



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE IMBIBICIÓN EN CELDAS
HELE-SHAW CON FLUJO TRANSVERSAL A LA ENTRADA**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

F I S I C O

P R E S E N T A :

VICTOR MATIAS PEREZ



**DIRECTOR DE TESIS:
DR. ROSALIO FERNANDO RODRÍGUEZ ZEPEDA**

2004



**FACULTAD DE CIENCIAS
SECCION ESCOLAR**



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.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA



LIBERTAD NACIONAL
 AVANZA II
 MEXICO

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 imbibición en celdas Hele-Shaw con flujo transversal
 a la entrada"

realizado por Víctor Matías Pérez

con número de cuenta 09415259-9 , quien cubrió los créditos de la carrera de: Física

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director de Tesis
 Propietario

Dr. Rosalio Fernando Rodríguez Zepeda

Propietario

Dra. Catalina Elizabeth Stern Forgach

Propietario

Dr. Marco Antonio Ramírez Garnica

Suplente

Dr. José Alvaro Chávez Carvayar

Suplente

Dr. Gerardo Ruíz Chavarría

Consejo Departamental de

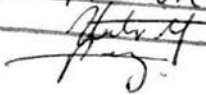
M. en C. Alicia Zarzosa Pérez
 Coordinadora de Licenciatura



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

NOMBRE: Víctor Matías Pérez

FECHA: 20. septiembre. 2004

FIRMA: 

CON TODO MI AMOR Y CARIÑO:

A MI PADRE ALFONSO MATÍAS GARCÍA

A MI MADRE LEONILA PÉREZ GONZÁLEZ

A MI HERMANO MIGUEL ÁNGEL MATÍAS PÉREZ

**A LA MEMORIA DE UN AMIGO DR. JOSÉ AGUSTÍN HAYASHI
MARTÍNEZ**

**A NICTÉ ANDREA GUTIÉRREZ PUENTE
PORQUE CON ELLA HE APRENDIDO LO QUE SIGNIFICA
DAR ES DAR**

DESEO AGRADECER:

- **A DR. JOSÉ AGUSTÍN HAYASHI MARTINEZ (Q.E.D.), LA PACIENCIA Y DEDICACIÓN QUE BRINDÓ EN LA DIRECCIÓN DE ESTE TRABAJO**
- **A CARLOS ÁLVAREZ, ROBERTO LÓPEZ Y RAÚL LUVIANO, POR EL GRATO AMBIENTE DE TRABAJO Y COOPERACIÓN QUE ME BRINDARON**
- **A LOS DOCTORES MARCO RAMÍREZ, ROSALIO RODRÍGUEZ, CATALINA STERN, JOSÉ CHÁVEZ Y GERARDO RUÍZ, POR SUS ATINADAS OBSERVACIONES Y APOYO PARA LA CONCLUSIÓN DE ESTA TESIS**
- **AL INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO (PROYECTO D.00084, PROGRAMA DE YNF), POR EL APOYO ECONÓMICO BRINDADO PARA LA REALIZACIÓN DE ESTA TESIS**
- **AL LABORATORIO DE TERMODINÁMICA, UAM-I, POR LAS INSTALACIONES PRESTADAS PARA LA REALIZACIÓN DE ESTE TRABAJO.**

“... ¿cuál es la mayor *gratificación* que puede darnos algo en la vida? ¿Cuál es la recompensa más alta que podemos obtener de un esfuerzo, una caricia, una palabra, una música, un conocimiento, una máquina, o de montañas de dinero, del prestigio, de la gloria, del poder, del amor, de la ética o de lo que se te ocurra? Te advierto que la respuesta es tan sencilla que corre el riesgo de decepcionarte: *lo máximo que podemos obtener sea de lo que sea es alegría*. Todo cuanto lleva a la alegría tiene justificación y todo lo que nos aleja sin remedio de la alegría es un camino equivocado. ¿Qué es la alegría? Un “sí” espontáneo a la vida que nos brota de dentro, a veces cuando menos lo esperamos. Un “sí” a lo que somos, o mejor, a lo que *sentimos* ser. Quien tiene alegría a recibido el premio máximo y no echa de menos nada...”

Fernando Savater

Contenido

Lista de Figuras y Tablas.....	iii
Introducción.....	1
Capítulo 1. Fenómenos superficiales y capilares.....	3
1.1 Tensión interfacial y mojabilidad.....	3
1.2 Capilaridad.....	5
1.3 Imbibición espontánea.....	8
1.4 Antecedentes.....	9
1.4.1 Estudios sobre imbibición en muestras de roca porosa.....	9
1.4.2 Estudios sobre imbibición en celdas Hele-Shaw.....	11
1.5 Perspectivas de la imbibición espontánea en celdas Hele-Shaw con flujo transversal a la entrada.....	15
Capítulo 2. Modelo experimental.....	17
2.1 Descripción de las celdas Hele-Shaw.....	17
2.2 Limpieza de vidrios.....	18
2.2.1 Procedimiento de limpieza para la primera y cuarta ronda.....	19
2.2.2 Procedimiento de limpieza para la segunda y tercera ronda.....	20
2.3 Construcción de las celdas Hele-Shaw con flujo transversal en la entrada.....	20
2.4 Propiedades de los fluidos utilizados.....	22
2.5 Baño térmico.....	22
2.6 Mecanismos para la alimentación continua de agua y recolección de aceite.....	23
2.7 Seguimiento del experimento.....	23
2.7.1 Iluminación.....	24
2.7.2 Filmación.....	24
2.8 Experimento.....	24
2.8.1 Preparativos.....	25
2.8.2 Desarrollo del experimento.....	25
Capítulo 3. Resultados y Discusión.....	39
3.1 Estructuras de las fases.....	40
3.2 Análisis sobre la repetibilidad de las estructuras en los experimentos.....	40
3.3 Análisis de la dinámica interfacial.....	45
3.3.1 Comportamiento de la interface agua-aceite y de la tasa de expulsión	

de aceite.....	45
3.3.2 Comportamiento del cociente (Área ocupada por aceite/Longitud interface agua-aceite).....	54
3.4 Análisis del desplazamiento de las fases.....	59
3.5 Análisis de la velocidad de desplazamiento.....	63
3.6 Comparación entre los ritmos de desplazamiento de procesos de imbibición espontánea y procesos con flujo a la entrada	68
Conclusiones.....	70
Apéndice Prueba Kolmogorov-Smirnov.....	72
Bibliografía.....	73

Lista de figuras

Capítulo 1

Figura 1.1 Representación esquemática de las fuerzas que actúan para tres fases inmiscibles en el punto de contacto

Figura 1.2 a) Superficie no mojable por el líquido; b) Superficie mojable

Figura 1.3 Equilibrio de fuerzas en una interfase de dos fluidos no miscibles

Figura 1.4 Función de Leverett para distintas arenas

Figura 1.5 Efecto de gotas de lluvia. Fenómeno que muestra la diferencia entre ángulo dinámico y estático.

Figura 1.6 Ángulo de contacto para una misma superficie cuando: a) se desplaza hacia arriba el líquido y b) se desplaza hacia abajo el líquido

Figura 1.7 Modelo de recuperación

Figura 1.8 Avance del agua en una celda saturada con aceite

Capítulo 2

Figura 2.1 Celdas Hele-Shaw

Figura 2.2 Componentes adicionales a la celda Hele-Shaw

Figura 2.3 Componentes del baño térmico, cámara e iluminación

Capítulo 3

Figura 3.1a Área y longitud interfacial de la región continua, Exp. 1A

Figura 3.1b Área y longitud interfacial de la región continua, Exp. 1B

Figura 3.1c Área y longitud interfacial de la región continua, Exp. 1C

Figura 3.1d Área y longitud interfacial de la región continua, Exp. 1D

Figura 3.2a Área y longitud interfacial de la región continua, Exp. 2A

Figura 3.2b Área y longitud interfacial de la región continua, Exp. 2B

Figura 3.2c Área y longitud interfacial de la región continua, Exp. 2C

Figura 3.2d Área y longitud interfacial de la región continua, Exp. 2D

Figura 3.3a Área y longitud interfacial de la región continua, Exp. 3A

Figura 3.3b Área y longitud interfacial de la región continua, Exp. 3B

Figura 3.3c Área y longitud interfacial de la región continua, Exp. 3C

Figura 3.3d Área y longitud interfacial de la región continua, Exp. 3D

Figura 3.4 Longitud interfacial característica L_{12} , experimentos con flujos de 0.3 ml/min

Figura 3.5 Longitud interfacial característica L_{12} , experimentos con flujos de 0.6 ml/min

Figura 3.6 Longitud interfacial característica L_{12} , experimentos con flujos de 1.0 ml/min

Figura 3.7 Estandarización de las curvas de la figura 3.4, flujo de 0.3 ml/min

Figura 3.8 Estandarización de las curvas de la figura 3.5, flujo de 0.6 ml/min

Figura 3.9 Estandarización de las curvas de la figura 3.6, flujo de 1.0 ml/min

Figura 3.10 Estandarización de las curvas, flujos de 0.3 ml/min, 0.6 ml/min y 1.0 ml/min

Figura 3.11 Comportamiento del área ocupada por el aceite al interior de la celda, flujo de 0.3 ml/min

Figura 3.12 Comportamiento del área ocupada por el aceite al interior de la celda, flujo de 0.6 ml/min

Figura 3.13 Comportamiento del área ocupada por el aceite al interior de la celda, flujo

de 1.0 ml/min

- Figura 3.14 Comportamiento del área para las celdas con limpieza de tipo ácido
- Figura 3.15 Comportamiento del área para las celdas con limpieza de tipo básico
- Figura 3.16 Comportamiento del área para las celdas con limpieza de tipo básico
- Figura 3.17 Comportamiento del área para las celdas con limpieza de tipo ácido
- Figura 3.18 Velocidades de desplazamiento, Exp. 1A, Limpieza ácida
- Figura 3.19 Velocidades de desplazamiento, Exp. 2A, Limpieza ácida
- Figura 3.20 Velocidades de desplazamiento, Exp. 3A, Limpieza ácida
- Figura 3.21 Velocidades de desplazamiento, Exp. 1B, Limpieza básica
- Figura 3.22 Velocidades de desplazamiento, Exp. 2B, Limpieza básica
- Figura 3.23 Velocidades de desplazamiento, Exp. 3B, Limpieza básica
- Figura 3.24 Velocidades de desplazamiento, Exp. 1C, Limpieza básica
- Figura 3.25 Velocidades de desplazamiento, Exp. 2C, Limpieza básica
- Figura 3.26 Velocidades de desplazamiento, Exp. 3C, Limpieza básica
- Figura 3.27 Velocidades de desplazamiento, Exp. 1D, Limpieza ácida
- Figura 3.28 Velocidades de desplazamiento, Exp. 2D, Limpieza ácida
- Figura 3.29 Velocidades de desplazamiento, Exp. 3D, Limpieza ácida
- Figura 3.30 Comparación en los ritmos de desplazamiento para imbibición espontánea e imbibición con flujo transversal a la entrada

Lista de tablas

Capítulo 2

- Tabla 2.1 Procedimiento de limpieza en 1ª y 4ª ronda
- Tabla 2.2 Procedimiento de limpieza en 2ª y 4ª ronda
- Tabla 2.3 Dimensiones de cada una de las celdas
- Tabla 2.4 Rondas y tipo de Limpieza

Capítulo 3

- Tabla 3.1 No. de imágenes analizadas por experimento
- Tabla 3.2 Porcentaje de aceite atrapado, número de islas dejadas y duración total del experimento
- Tabla 3.3 Porcentaje de aceite atrapado, número de islas dejadas y duración total del experimento
- Tabla 3.4 Porcentaje de aceite atrapado, número de islas dejadas y duración total del experimento
- Tabla 3.5 Media y varianza de las curvas de las figuras 3.4 a 3.6

Introducción

Cuando un medio capilar o un cuerpo poroso se pone en contacto con un fluido que es capaz de mojarlo se puede observar que el fluido penetra de manera espontánea dentro de él, desplazando el aire que tiene atrapado al interior. Al proceso en el cual un fluido desplaza a otro valiéndose únicamente de las fuerzas capilares dentro de un medio poroso o capilar se le conoce como imbibición. Este fenómeno se puede observar en muchos procesos naturales y fisiológicos y es importante porque tiene numerosas aplicaciones tecnológicas.

La imbibición es de particular interés en la industria petrolera porque es un fenómeno que juega un papel importante en la recuperación secundaria de hidrocarburos en yacimientos naturalmente fracturados. Especialmente aquellos en que la imbibición se da entre agua y aceite y en los que las rocas que forman el yacimiento son preferentemente mojables por agua. Por recuperación secundaria se entiende aquella en la que a un yacimiento se le inyecta agua para una mayor obtención del hidrocarburo.

A grandes rasgos un yacimiento fracturado está estructurado de tal manera que tiene bloques de roca a los cuales se les llama matriz (en donde usualmente se almacena la mayor cantidad de hidrocarburos) y fracturas que le rodean. Las fracturas tienen como característica ser buenas conductoras de flujo y muy poca capacidad de almacenamiento, mientras que la matriz tiene gran capacidad de almacenamiento y muy baja conductividad de fluidos. Cuando la matriz entra en contacto con agua comienza a suscitarse el fenómeno de imbibición, esto es, el aceite comienza a ser desplazado por el agua del interior de la roca debido a las fuerzas capilares y se conduce por las fracturas recuperando así una mayor cantidad del hidrocarburo.

Debido a su importancia son bastantes los trabajos experimentales y teóricos que se han elaborado para explicar y predecir la imbibición entre agua y aceite en un medio poroso real, sin embargo, debido a su complejidad quizá se deba partir de un estudio sencillo para poder comprender las leyes que la gobiernan. La dinámica de la imbibición ha sido descrita principalmente en modelos que toman en cuenta las fuerzas capilares, gravitacionales y viscosas. Muchos de estos modelos se plantean para medios que se consideran unidimensionales, como por ejemplo tubos capilares con geometrías específicas o bien con estrangulaciones e incluso con bifurcaciones. Otros modelos se plantean en medios que se consideran bidimensionales, como las celdas Hele-Shaw y algunos más se plantean para medios considerados como tridimensionales, como los empacamientos de esferas. En cada uno de estos modelos se ha buscado determinar características propias del proceso de imbibición independientemente del modelo que se escoja y de ahí la necesidad de plantear nuevos modelos y formas de análisis para describirlos y que permitan interpolar los resultados para la caracterización de un yacimiento fracturado real. Es por ello que en este trabajo experimental se ha retomado un modelo capilar bidimensional como la celda Hele-Shaw para describir la dinámica del proceso de imbibición cuando los fluidos son aceite y agua y cuando se presenta flujo de agua a la entrada de la celda.

La razón por la que se ha tomado este modelo es que, aunque no se trata de una muestra porosa real, es más sencillo visualizar el proceso de desplazamiento y a partir de estas observaciones se puede inferir la manera en que afectan los diferentes gastos que se presentan a la entrada de la celda. Además, se pueden controlar otras variables también importantes, como el espacio capilar (separación de la celda), la temperatura, preparación (limpieza) de superficies, etc., y su efecto en el proceso de imbibición.

Como se ha mencionado con anterioridad, este trabajo se ha planteado para estudiar experimentalmente el efecto que tiene la presencia de diferentes flujos a la entrada de la celda y también el efecto de la preparación (o limpieza) de las superficies en el desarrollo del proceso de imbibición. Por ello, se han planteado los siguientes objetivos generales:

- a) Determinar una metodología diseñada para reproducir los experimentos
- b) Determinar la influencia del flujo de agua en la dinámica del proceso de imbibición cuando éste se presenta de manera transversal a la entrada de la celda.
- c) Determinar la influencia de diferentes tipos de preparación (limpieza) de las superficies y su efecto en el proceso de imbibición.

Finalmente, cabe mencionar que este trabajo está estructurado en 3 capítulos. El primer capítulo consta de los conceptos fundamentales para comprender esta tesis, además de una revisión de los trabajos que para el autor son los más sobresalientes. El segundo capítulo da una explicación detallada del procedimiento que se siguió para la realización de los experimentos y de las características del material utilizado así como de los dispositivos empleados. El tercer capítulo corresponde a los resultados y su discusión y por último las conclusiones.

Capítulo 1

1. Fenómenos superficiales y capilares

Cuando se ponen en contacto dos fases inmiscibles, como el agua y aceite, en la interfase se presenta una discontinuidad en la presión ya que la interacción que tienen las moléculas al interior de los medios es distinta de las que se encuentran en la interface. Por supuesto, también puede existir discontinuidad en otras propiedades como la densidad, un gradiente de temperatura, etc. En particular nos interesa la diferencia de presiones porque provoca un desequilibrio de fuerzas cuya resultante puede estar orientada hacia cualquiera de los medios. Si estos dos medios son susceptibles de modificación en su forma y se colocan dentro de un tercero que no lo es, la diferencia de presiones se manifiesta deformando la interface.

Un medio que está en contacto con otro tiene energía por unidad de superficie ya que para poder separar ambos medios se requiere realizar trabajo. Así, todos los medios inmiscibles al estar en contacto con otro tienen energía libre que se manifiesta como tensión interfacial. Cuando un líquido tiene interacción con su vapor entonces de lo que se está hablando es de tensión superficial.

La imbibición es un fenómeno fuertemente vinculado con la diferencia de presiones entre medios inmiscibles, es una manifestación de capilaridad en el que están en contacto tres fases inmiscibles con dos de ellas capaces de modificar la interfase que las separa. En esta tesis se presentará la evolución temporal de la imbibición entre agua y aceite, siendo el vidrio la fase que les contiene por lo que será necesario abordar en detalle algunos de los conceptos fundamentales para familiarizar al lector con éstos; además, se proporcionará un bosquejo de los trabajos que, según la apreciación de quien esto escribe, proporcionan las bases en las que se asienta gran parte de esta tesis. Los conceptos que se presentarán son tensión interfacial, mojabilidad, ángulo de contacto, y por supuesto presión capilar y su relación directa con la imbibición.

1.1 Tensión interfacial y mojabilidad

Si un líquido está en contacto con otra sustancia (gas o sólido) existe entre ellos una energía interfacial libre. Esto quiere decir que se tiene que realizar trabajo para poder separarlos. Ya que una superficie con energía interfacial libre se contrae si tiene la posibilidad de hacerlo entonces se dice que la energía libre se manifiesta como tensión interfacial. Comúnmente se suele tratar indistintamente el concepto de tensión interfacial y de tensión superficial; sin embargo, la tensión superficial es aquella en la que está involucrada la energía interfacial entre el líquido y su vapor, mientras que la tensión interfacial involucra cualesquiera dos líquidos inmiscibles. La tensión interfacial se suele denotar con la letra griega γ y los subíndices s, l y g indicarían de qué fases estamos hablando, esto es, sólido, líquido y gas, respectivamente. Por ejemplo, si la interacción es líquido-gas la tensión interfacial se denotaría por γ_{lg} , mientras que la tensión superficial de un líquido simplemente se denotaría por γ_l .

El trabajo que se requiere para separar un área unitaria de dos medios está relacionado

con las tensiones superficiales e interfaciales por una ecuación establecida por Dupré²:

$$W_y = \gamma_i + \gamma_j - \gamma_{ij} \quad \text{con } i, j = s, l, g \text{ excepto } i = j = s \quad (1.1)$$

Si se supone ahora que dos fluidos no miscibles están en contacto y éstos a su vez lo están con un sólido entonces las tensiones superficiales se pueden calcular con (1.1). Supongamos un caso sencillo, digamos agua y aire. Ver figura 1.1.

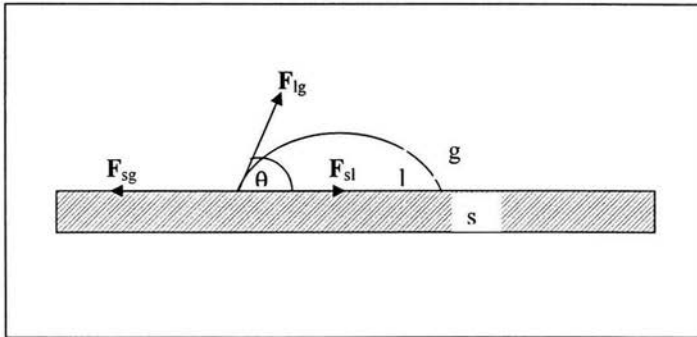


Figura 1.1 Representación esquemática de las fuerzas que actúan para tres fases inmiscibles en el punto de contacto

Debido a la condición de equilibrio entre fuerzas se forma un ángulo entre la interface del líquido y el aire. A este ángulo se le denomina “ángulo de contacto” y se denota por θ . Nótese que es el ángulo que forma la tangente a la superficie del líquido con la superficie del sólido, en el punto de contacto entre ambos medios. Por convención θ ($0 \leq \theta \leq \pi$) se mide a partir del medio de mayor densidad.

De la condición de equilibrio se tiene que

$$F_{sg} = F_{lg} \cos \theta + F_{sl} \quad , \quad (1.2)$$

por tanto

$$\cos \theta = \frac{F_{sg} - F_{sl}}{F_{lg}} = \frac{\gamma_{sg} - \gamma_{sl}}{\gamma_{lg}} \quad , \quad (1.3)$$

que es la ecuación de Young².

Esta última ecuación muestra que el equilibrio no es posible si $\gamma_{sg} - \gamma_{sl}$ es mayor que γ_{lg} . Además, si $\gamma_{sg} > \gamma_{sl}$ θ es un ángulo agudo en cuyo caso se dice que el agua “moja” al sólido porque tiene mayor preferencia por cubrirlo.

Existen casos en los que θ es un ángulo obtuso ($\gamma_{sg} < \gamma_{sl}$), en cuyo caso se dice que el sólido no es mojable por el líquido.

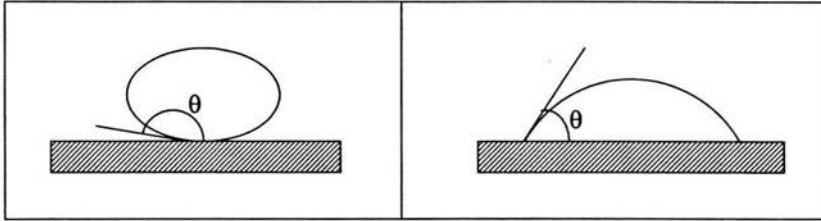


Figura 1.2 a) Superficie no mojable por el líquido; b) Superficie mojable

Tenemos así que el concepto de mojabilidad no es más que la manifestación que lleva a la reducción en la energía total del sistema. Una fase determinada cubre el sólido en presencia de la otra porque la energía interfacial de ésta última excede a la energía interfacial entre el sólido y la fase que llamamos “mojante” y el ángulo de contacto θ sería un buen parámetro para indicar esta afinidad para cubrir el sólido.

En términos de la ingeniería petrolera se dice que una roca es “preferentemente” mojable por agua si la roca tiene mayor afinidad a ser cubierta por el agua que por el aceite y es “preferentemente” mojable por aceite si la roca tiene mayor afinidad a ser cubierta por aceite que por agua.

1.2 Capilaridad

La diferencia de mojabilidades de varios fluidos para con un sólido es lo que da origen a los fenómenos capilares. De hecho, la imbibición espontánea es una manifestación de capilaridad.

Cuando dos fluidos inmiscibles están en contacto existe una discontinuidad en la presión de los fluidos, la cual depende de la curvatura de la superficie 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 debida a Laplace²,

$$p_c = p_1 - p_2 = \gamma_{12} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right), \quad (1.4)$$

donde R_1 y R_2 son los radios de curvatura y γ_{12} es la tensión interfacial entre el fluido 1 y el fluido 2. Esta ecuación se obtiene de considerar en equilibrio las fuerzas que actúan sobre un elemento de área en un punto de la interfase. Ver figura 1.3.

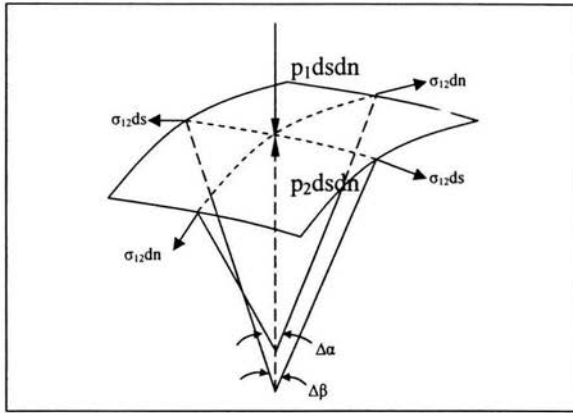


Figura 1.3 Equilibrio de fuerzas en una interfase de dos fluidos no miscibles

En medios porosos la presión capilar, sin embargo, se suele dar en función de la saturación que la fase mojanante tiene en el medio capilar. En medios porosos es más complicado asignar radios de curvatura dadas las irregularidades del medio capilar. Así que para poder hablar de presión capilar se tiene que hablar de un promedio en donde varios parámetros están involucrados: tensión interfacial, radio promedio del poro, el grado de saturación de la fase mojanante (S_m).

Dada la dificultad para poder describir analíticamente el medio poroso real se ha optado por el trabajo en laboratorio de donde se han obtenido expresiones empíricas y semiempíricas con resultados razonables. Leverett (Leverett, 1941) sugirió un enfoque semiempírico (utilizando análisis dimensional), donde mostraba que la función

$$J = J(S_m) = \left(\frac{p_c}{\gamma} \right) \sqrt{\frac{k}{\phi}}, \quad (1.5)$$

llamada la función J de Leverett y que se reduce a una curva que tiene la misma forma (ver figura 1.4) cuando se dibuja para varias arenas no consolidadas. En la ecuación precedente k es la permeabilidad del medio, ϕ es la porosidad del medio y el factor k/ϕ puede interpretarse como el diámetro medio del poro. Otros autores sugieren la expresión

$$J(S_m) = \left(\frac{p_c}{\gamma \cos \theta} \right) \sqrt{\frac{k}{\phi}}, \quad (1.6)$$

que considera al ángulo de contacto.

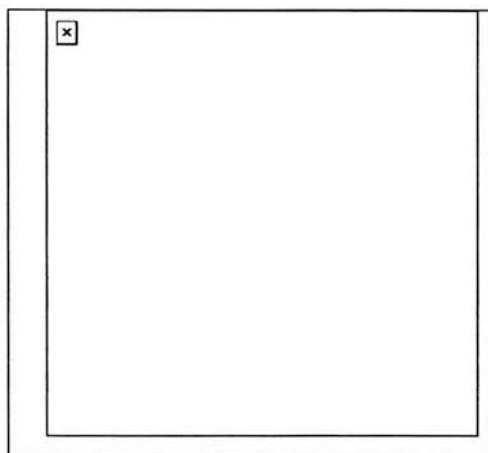


Figura 1.4 Función de Leverett para distintas arenas

Es importante mencionar también que la presión capilar está sujeta a histéresis debido a que el ángulo de contacto es función de la dirección de desplazamiento; θ puede asumir distintos valores al avanzar o retroceder sobre la superficie. La figura 1.5 muestra el fenómeno de histéresis para una interfase aire-agua. Este efecto recibe el nombre de efecto de gotas de lluvia.

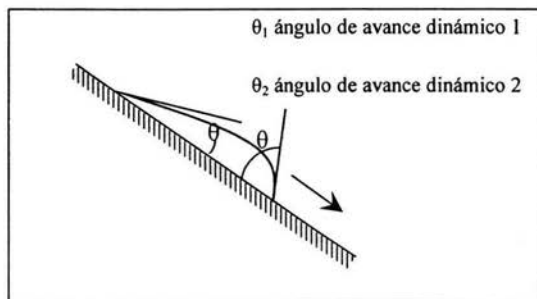


Figura 1.5 Efecto de gotas de lluvia. Fenómeno que muestra la diferencia entre ángulo dinámico y estático.

La figura 1.6 muestra la diferencia en el ángulo de contacto en una interface entre fluidos mojante y no mojante y lo que puede suceder cuando se desplaza la interface. Esta propiedad del ángulo de contacto es la razón de la diferencia entre las curvas de presión capilar $p_c = p_c(S_m)$ obtenidas a partir de experimentos estáticos y las obtenidas bajo condiciones dinámicas. Otro mecanismo que ocasiona histéresis es la geometría de los espacios que presentan muchos estrangulamientos, denominado efecto tintero.

Debido al fenómeno de histéresis, la relación entre la función J y S_m no es única y no es posible determinar p_c a través de conocer S_m , y viceversa, sin conocer la historia de cómo fue

mojada o secada la muestra en el pasado.

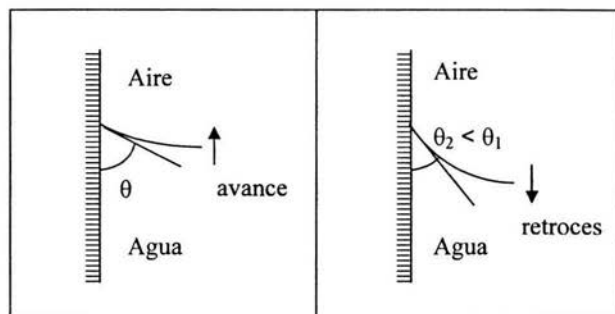


Figura 1.6 Ángulo de contacto para una misma superficie cuando: a) se desplaza hacia arriba el líquido y b) se desplaza hacia abajo el líquido

1.3 Imbibición espontánea

La imbibición espontánea se define como el proceso de desplazamiento inmiscible de un fluido por otro, el cual se lleva a cabo de manera natural en medios de dimensiones capilares o en medios porosos y en ausencia de fuerzas externas que produzcan un cambio de presión.

Aquí es donde juega un papel muy importante el concepto de mojabilidad ya que es precisamente el fluido que tiene mayor preferencia a cubrir el sólido el que desplaza sin necesidad de introducir una fuerza exterior.

En particular interesa la imbibición que se da entre agua y aceite dentro de un medio capilar como lo es una muestra de roca de yacimiento. Cuando una roca tiene preferencia a ser mojada por agua y se encuentra completamente saturada de aceite al ser sumergida en el de su preferencia comienza a haber un desplazamiento espontáneo de aceite por agua. El agua comienza a ocupar los espacios capilares dentro de la roca mientras el aceite gradualmente sale expulsado debido únicamente a la diferencia en la mojabilidad.

Dentro de la física de yacimientos éste fenómeno es muy importante porque un yacimiento está compuesto de bloques de roca matriz y fracturas que le rodean. Las fracturas tienen como característica ser buenas conductoras de flujo mientras que la matriz tiene gran capacidad de almacenamiento de hidrocarburo pero muy poca conductividad. Algunas veces estos bloques de roca se ven alcanzados naturalmente por acuíferos en cuyo caso el aceite es expulsado de la roca matriz debido a imbibición. También suele inyectarse agua ex profeso 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, bidimensionales como las celdas Hele-Shaw, o tridimensionales como el empacamiento de esferas, etc. en donde se puede encontrar algo más que lo meramente descriptivo. A continuación se darán algunos de los trabajos más relevantes en cuanto a procesos capilares se refiere, tomaremos de partida un orden cronológico para mostrar la forma en que ha ido evolucionado el estudio de estos

procesos y las dificultades que subsecuentemente se han encontrado.

1.4 Antecedentes

En esta sección se han seleccionado los artículos más representativos que se relacionan con los procesos de imbibición, considerando, por una parte los estudios realizados en muestras de roca porosa y por otra, se presentan los estudios relacionados con los procesos de imbibición en celdas Hele-Shaw. Se toma de partida el orden cronológico para mostrar cómo ha evolucionado este tipo de investigación.

1.4.1 Estudios sobre imbibición en muestras de roca porosa

Se han realizado muchos experimentos en medios capilares y en muestras de roca con el propósito de recabar información útil para la predicción de los fenómenos a los que da lugar la imbibición. Sin embargo muy pocos dan un seguimiento cabal a medios porosos como rocas y sólo recientemente se han utilizado técnicas más sofisticadas en las que se ha podido visualizar el desplazamiento del aceite por el agua en muestras reales. Bastantes experimentos se han realizado también en medios unidimensionales como son los tubos capilares y aunque el tema se podría dar por visto parece que todavía quedan aún muchas interrogantes. Los experimentos que aquí se describen se llevan a cabo en medios bidimensionales muy sencillos que si bien no son precisamente medios porosos reales podrían dar algunas ideas de las leyes que gobiernan a los medios capilares durante la imbibición. A continuación se comentarán algunos trabajos que para este autor han sido importantes en el seguimiento de los fenómenos capilares y en medios porosos dejando para una sección posterior los experimentos que se han realizado hasta la fecha en medios capilares bidimensionales, más concretamente, en celdas Hele-Shaw.

En 1958 Aronofsky, Massé y Natanson propusieron un modelo semiempírico que describe la tasa de expulsión en una corrida de imbibición entre agua y aceite en muestras de roca porosa. El modelo toma como condiciones las siguientes: 1) la recuperación de aceite, r , se comporta como una ecuación monótona continua del tiempo y converge a un límite finito y 2) ninguna de las propiedades que determinan el ritmo de convergencia cambian demasiado como para afectar el ritmo o el límite. La ecuación propuesta en el modelo es la siguiente:

$$r = \frac{V_o(t)}{V_i(t)} = R(1 - e^{-\lambda t}), \quad (1.7)$$

donde $V_o(t)$ es el volumen de aceite producido al tiempo t , $V_i(t)$ es el volumen total de aceite por recuperar, R es el porcentaje total de aceite que se recupera cuando t es muy grande, λ es un parámetro de ajuste y t es el tiempo. La forma de la función se muestra en la figura 1.7.

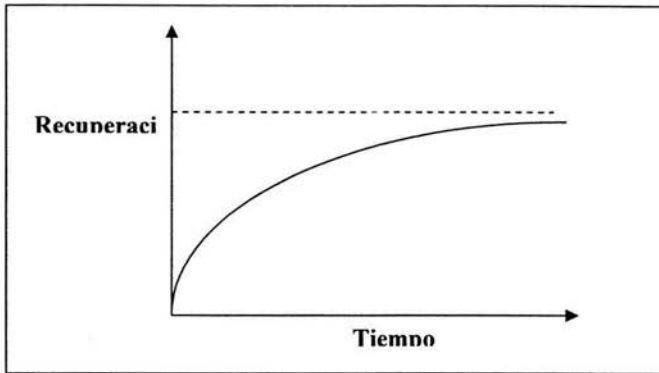


Figura 1.7 Modelo de recuperación

De igual manera en 1958, Bobek, Mattax y Denekas en un estudio realizado en seis diferentes tipos de rocas encontraron que la mojabilidad es esencial para entender el proceso de desplazamiento y su posible repetición. Mostraron, bajo condiciones de laboratorio, que la mojabilidad depende de la composición del aceite y también del tipo de roca y que depende fuertemente de la presencia de contaminantes en los fluidos utilizados e inclusive a una sobre exposición a oxígeno.

En 1962, Mattax y Kyte estudiaron la imbibición en una muestra de roca y propusieron leyes de escalamiento entre las muestras de laboratorio y los bloques de un yacimiento, para explicar la recuperación del hidrocarburo. Los experimentos se realizaron en muestras de roca con una geometría cilíndrica, en donde la superficie expuesta al agua variaba, esto es: a) de una cara plana, donde se exponía sólo una de las caras planas al agua; b) de dos caras planas, donde se tomaban dos muestras de forma cilíndrica recubiertas por material plástico excepto en las caras consideradas como planas y se colocaban una frente a otra y entre ellas se dejaba una distancia conocida con la que simulaba una fractura y c) de toda la superficie, donde la superficie expuesta al agua era total. También introdujeron el concepto de “ritmo crítico” en relación con el avance del agua en roca matriz y el avance en las fracturas. Por ritmo crítico se entiende a aquel en el que el avance del agua en las fracturas y en la matriz es igual. Encontraron que cuando el avance del agua es igual o menor que el del ritmo crítico, la recuperación en la matriz no depende del ritmo y a valores mayores que el crítico la recuperación es menor.

En 1979, Kazemi y Merrill realizaron un estudio teórico y experimental donde se toma en cuenta el volumen de aceite recuperado como función del volumen de agua inyectada. En el experimento toman en cuenta una muestra de roca de forma cilíndrica a la que hacen un corte longitudinal, de manera que éste simularía una fractura. Las caras opuestas se dejaron libres mientras el resto se sellaba con epóxi y así podían inyectar el agua por uno de los extremos. Los experimentos se llevaron a cabo de manera tal que la fractura quedaba orientada horizontalmente. En este trabajo destaca el hecho de que el simulador numérico es bidimensional y con éste logran un ajuste razonable a los datos experimentales. Muestran también que a velocidades bajas existe un proceso de desplazamiento que predomina en matriz, mientras que para velocidades altas aparece primero la fase agua a la salida de la

muestra de roca que se considera fracturada, por lo que el proceso de imbibición se hace más lento en la matriz.

En 1993, Babadagli y Ershaghi proponen un modelo teórico para describir un sistema poroso con interacción de agua y aceite tomando en cuenta las características de la matriz y las fracturas. Este modelo tiene la ventaja de que se puede predecir al sistema dual agua-aceite como uno único reduciendo así el número de variables y de cálculos. Mostraron que el proceso de imbibición es función del ritmo con el que se inyecta el flujo por las fracturas, de la mojabilidad en la matriz y de su permeabilidad. Destacaron el hecho de que el ritmo de inyección es de preponderancia en la comprensión de la interacción fractura-matriz donde concluyen que ritmos altos provocan un incremento del flujo en las fracturas pero reducen la imbibición al interior de la matriz.

1.4.2 Estudios sobre imbibición en celdas Hele-Shaw

a) Desplazamientos Forzados

De los trabajos que más han influido en la investigación en celdas Hele-Shaw destaca el de Saffman y Taylor, 1958. En este trabajo hacen un estudio teórico y experimental en donde afirman que el movimiento en una celda Hele-Shaw de caras planas es matemáticamente análoga a uno donde el medio poroso se considere bidimensional. Saffman y Taylor construyeron una celda de dimensiones $91 \times 2.54 \times 0.08$ cm que llenaron inicialmente con aceite. Posteriormente aplicaron a presión agua que entró al interior de la celda en forma de un dedo teniendo un frente de avance con una curvatura muy clara y que va dejando en los extremos dos largas columnas de aceite (ver figura 1.8).

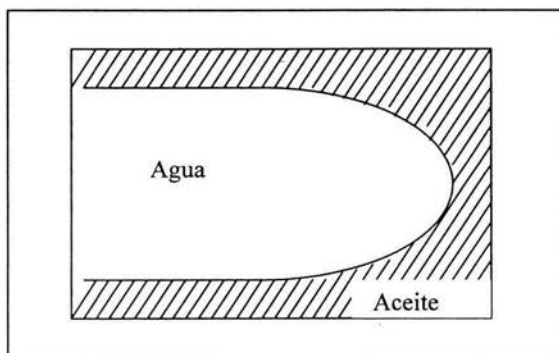


Figura 1.8 Avance del agua en una celda saturada con aceite

Para describir la forma del dedo entrante proponen componentes de velocidad u y v que dependen de la posición siendo u paralela al desplazamiento del frente y v perpendicular a él. Estas velocidades las relacionan a una función potencial ϕ y a una función de corriente ψ por las ecuaciones

$$u = \frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad , \quad v = \frac{\partial \varphi}{\partial y} = -\frac{\partial \psi}{\partial x} . \quad (1.8)$$

Posteriormente expanden la variable compleja $z = x + iy$ como una serie de funciones exponenciales del potencial complejo $\omega = \varphi + i\psi$, de donde obtienen una ecuación paramétrica del menisco y que es de la forma

$$\exp\left[\frac{\pi x}{2(1-\lambda)}\right] \cos\left(\frac{\pi y}{2\lambda}\right) = 1 \quad , \quad (1.9)$$

donde λ está definida como (amplitud del dedo/amplitud de la celda). Saffman y Taylor muestran que ésta expresión está de acuerdo con el experimento siempre y cuando el ritmo de inyección del agua sea alto porque para ritmos lentos la teoría muestra discrepancias importantes en la forma del frente de avance. Esta diferencia la atribuyen a la tensión interfacial (que por cierto no consideran en su análisis) de donde deducen que λ bien podría depender del número capilar, es decir, del cociente $\mu U/\gamma$, donde μ es la viscosidad de corte, γ es la tensión interfacial y U es la velocidad del frente y donde también podría existir una dependencia de la temperatura.

En 1959, Chuoke, Meurs y Poel presentaron un trabajo teórico-experimental en el que se estudia la inestabilidad en el desplazamiento inmisible de dos líquidos en una celda Hele-Shaw construida de vidrio de caras lisas y en empacamientos de esferas y una inclinación de 45° , por lo que consideran efectos gravitacionales. Es importante destacar que en este trabajo dan especial relevancia al lavado de las superficies de la celda donde para tener reproducibilidad en los experimentos, éstas son saturadas primero por el aceite durante un largo período y después es inyectada una solución de agua-glicerina. Observaron también que la formación y desarrollo de dedos es menor o mayor dependiendo del ritmo de inyección; en general, a mayor ritmo es mayor el número de dedos que se forman en el frente de avance. Sin embargo, existe una discrepancia cuando los ritmos de inyección son muy bajos porque la amplitud de los dedos es menor al esperado. Algo que es notorio es el hecho de que trabajan también con un empacamiento de esferas, un modelo evidentemente tridimensional que ajusta bastante bien con lo observado en las celdas Hele-Shaw, modelos que se consideran bidimensionales.

Más recientemente, en 1980, Pitts propone un tratamiento diferente al problema de Saffman y Taylor para ritmos de inyección lentos donde parte de una relación semi-empírica, $R \sin\theta = \text{cte}$. (donde R es el radio de curvatura a un punto en el frente de avance del dedo y θ define la dirección de este radio respecto a una línea paralela al desplazamiento) para llegar a la ecuación paramétrica

$$\exp\left[\frac{\pi x}{2\lambda}\right] \cos\left(\frac{\pi y}{2\lambda}\right) = 1 \quad , \quad (1.10)$$

donde λ está dada en los mismos términos en que lo hicieran Saffman y Taylor. Destaca el hecho de que en el análisis se toma en cuenta la tensión interfacial entre las fases y que el análisis teórico concuerda bastante bien con el experimento. Sin embargo, la ecuación $R \sin \theta = \text{cte}$ no está del todo justificada.

En 1984, Park y Homsy proponen una alternativa a la teoría desarrollada por Saffman y Taylor. En esta se desarrolla un método de expansión en el que los parámetros de relevancia son el número capilar y el cociente entre la longitud transversal y la longitudinal en la interface, además de que suponen que las paredes de la celda Hele-Shaw son completamente mojables por el fluido desplazado. Encuentran que la diferencia de presión (presión capilar) en la interface es

$$\Delta P = \gamma \left(\frac{1}{b} + \frac{\pi}{4} \frac{1}{R} \right), \tag{1.11}$$

donde b es la separación entre las celdas, R es el radio de curvatura y γ es la tensión interfacial. Se hace hincapié en que esta relación se mantiene cuando las variaciones laterales son pequeñas.

De nuevo en 1984, Park y Homsy presentan un estudio experimental en celdas Hele-Shaw de caras planas que pone a prueba la teoría desarrollada por ellos. Los experimentos se llevan a cabo entre un fluido de alta viscosidad (aceite) desplazando a uno menos viscoso (aire) y muestran que la teoría se adecua bastante bien a los resultados experimentales. Es importante mencionar que encuentran problemas en la frontera de las celdas, donde están unidas, debido a que el aceite se desplaza más rápidamente en esta zona por lo que la interface se deforma considerablemente hacia los extremos.

En 1985, Park y Homsy llevan a cabo otro estudio experimental con un tratamiento diferente porque relacionan el número capilar con variaciones (inestabilidades) en el frente de avance de los fluidos, es decir, con la formación de dedos. Saffman y Taylor obtuvieron una familia de soluciones analíticas cuando se desarrollaba un solo dedo (figura 1.7). Sin embargo, no reportan inestabilidades en la interface aún cuando trabajan con números capilares relativamente grandes.

Tomando como referencia a Maclean y Saffman y la condición de tensión superficial desarrollada (ecuación 1.11) con anterioridad se llega a una nueva definición de número capilar, esto es,

$$Ca' = \left(\frac{U\mu}{\sigma} \right) \left(\frac{a}{b} \right)^2, \tag{1.12}$$

donde $2a$ sería la amplitud de la celda, U la velocidad del dedo, μ la viscosidad del fluido desplazado, b la separación de la celda y σ la tensión interfacial.

Utilizando una mezcla de agua-glicerina como fluido desplazado y aire como fluido desplazante muestran inestabilidades en el frente que aparecen periódicamente y con formas bien determinadas, de manera que cuanto más grande es el número capilar (definido como en

la ecuación 1.12) mayor y más complicado es el patrón en las formas que se desarrollan en el frente de avance.

b) Desplazamientos espontáneos

En 1995, Hayashi y Soria llevan a cabo un estudio experimental en celdas Hele-Shaw de superficies irregulares y en el que los fluidos utilizados son agua y aceite, con el agua como fluido desplazante. El proceso de imbibición se lleva a cabo horizontalmente por lo que no toman en cuenta efectos gravitacionales. En este trabajo se estudian las diferencias en los procesos de imbibición espontánea cuando estos son a cocorriente y a contracorriente. En el primero, se dejan dos extremos de las celdas libres por lo que existe una entrada y una salida y en el segundo se sellan 3 de los extremos de la celda de manera que el aceite es expulsado por el mismo lado en que entra el agua. Este estudio muestra diferencias significativas en las tasas de expulsión de aceite, siendo más rápido en el proceso a cocorriente que en el de contracorriente. También muestran que en ambos procesos existen diferentes etapas de desarrollo, en la recuperación de aceite con el tiempo, a los que ajustan líneas rectas para estudiar su comportamiento.

Más recientemente, en 2001, Hayashi y Soria realizan un estudio experimental en celdas de caras planas donde varían la separación y el método de administración de agua es original al no permitir sobrepresión a la entrada. Inicialmente preparan las superficies para estandarizar su mojabilidad con un método de limpieza exhaustivo en el que utilizan detergentes y ácidos. Posteriormente las celdas son introducidas a un baño térmico de aire en el que la celda se coloca horizontalmente y se satura con aceite soltrol 170 para después llevar a cabo el proceso de imbibición espontánea colocando agua a la entrada. El proceso de imbibición se siguió en todo momento con la ayuda de una cámara de video que se colocaba por encima del baño, de manera tal que se podía seguir con detenimiento cualquier cambio en el desplazamiento de los fluidos. Al tratarse de celdas planas optaron por estudiar el desplazamiento de fluidos de manera bidimensional, de manera que dieron importancia a cantidades físicas tales como área del aceite desplazado y longitud interfacial.

Las separaciones con que trabajan en las celdas son 0.005 cm 0.015 cm y 0.075 cm. Al respecto encuentran que la relación (área de aceite)/(longitud interfacial) como función del logaritmo del tiempo se comporta como una función acumulativa de una variable continua y bajo este nuevo criterio la pendiente de las curvas donde la separación es pequeña es más pronunciada que para las de separaciones más grandes.

Otro aspecto importante es que en todos los casos el proceso de imbibición muestra etapas de desarrollo. Las velocidades desarrolladas por las fases hacia la mitad del experimento son considerablemente más grandes que al principio o al final y este desarrollo en la velocidad está caracterizado por una mayor formación de dedos.

Finalmente, es de los pocos trabajos que buscan repetibilidad en los experimentos al estandarizar la mojabilidad en las superficies con un método de limpieza bien establecido, logrando resultados satisfactorios.

1.5 Perspectivas de la imbibición en celdas Hele-Shaw con flujo transversal a la entrada

La imbibición espontánea es el proceso de desplazamiento inmiscible de un fluido por otro en medios capilares o porosos y en ausencia de fuerzas externas que produzcan un cambio de presión. De acuerdo a esta definición resulta muy importante la ausencia de fuerzas externas que puedan tener un efecto en el desarrollo de los experimentos. La mayoría de los trabajos que se han realizado hasta la fecha en celdas Hele-Shaw, consideran desplazamiento de fases de manera forzada y a partir de este análisis se trata de encontrar patrones que caractericen a los procesos de imbibición.

Por lo que respecta a este trabajo, el estudio experimental que se propone es novedoso porque busca determinar patrones en la tasa de desplazamiento, en la longitud de la interface, en la velocidad de desplazamiento, etc., que caractericen el comportamiento de los procesos de imbibición entre agua y aceite cuando se presenta flujo de agua a la entrada de una celda Hele-Shaw. En la actualidad, ningún trabajo se ha hecho con flujos que se presenten de manera transversal a la entrada de una celda y en donde los gastos de agua se consideren bajos, buscando precisamente la no sobrepresión y por tanto el desplazamiento forzado de las fases. Sin embargo, cabe señalar que algunos de los estudios realizados con anterioridad también han motivado en el diseño de los experimentos que se presentan en esta tesis. De acuerdo a Babadagli y Ershaghi, 1993 existe una relación entre el flujo que se da en la fracturas y la matriz de un yacimiento naturalmente fracturado, de tal manera que a mayor flujo de agua en las fracturas más lento se hace el proceso de imbibición al interior de la matriz. Aunque una celda no se puede considerar como matriz, es de suponer que algunas de las características que se presentan en el estudio numérico de Babadagli y Ershaghi también se presenten en modelos capilares como las celdas Hele-Shaw. Por lo que se espera que el ritmo de inyección de agua afecte el proceso de imbibición al interior de la celda de una manera similar, esto es, que a mayores ritmos en el flujo a la entrada de la celda menor sea el ritmo de desplazamiento al interior. También resulta de importancia el estudio realizado por Hayashi, 2001, en donde los procesos se consideran no forzados y en los que se muestra desarrollo de etapas en las velocidades de desplazamiento de las fases, así como la caracterización de la relación (área de aceite/longitud interfacial). Al respecto, se debe señalar que este trabajo es en parte continuación al realizado por Hayashi, 2001, por lo que gran parte de la metodología utilizada en la realización de los experimentos y su respectivo análisis es muy similar al de ese trabajo. Por tanto, se tienen diversas expectativas en los experimentos que aquí se proponen, expectativas que no tendrían razón de ser si no se consideran algunas hipótesis. A continuación se plantean las hipótesis a los que se tratará de dar validez.

HIPÓTESIS

- El gasto de agua que se presenta transversal a la entrada de la celda afecta el proceso de imbibición al interior de la celda de manera tal que a mayores flujos menor es el ritmo de desplazamiento de aceite por agua.
- La relación (área de aceite/longitud interfacial) es un parámetro importante en la comprensión de las fuerzas capilares y depende única y exclusivamente del espacio capilar de la celda, esto es, de la separación de la celda.
- La velocidad de desplazamiento de las fases presenta diferentes etapas de

- desarrollo y éstas pueden o no depender del flujo.
- La preparación (limpieza) de las superficies de la celda es determinante para que un experimento se considere reproducible.

El último punto es importante porque en el estudio de los procesos capilares se ha buscado una reproducibilidad de los experimentos sin obtener resultados satisfactorios. En este trabajo se ha desarrollado una metodología en cuanto a la preparación de las superficies y si diversas limpiezas afectan el proceso de imbibición, por lo que se espera cierta reproducibilidad y características propias de cada tipo de limpieza.

Capítulo 2

2. Modelo experimental

En un medio poroso real es muy complicado poder seguir con detenimiento el avance del fluido que desplaza durante la imbibición. Las celdas Hele-Shaw son modelos bidimensionales sencillos que permiten la visualización de la imbibición en todo momento y así se puede obtener información de la dinámica en la celda. En este trabajo se dará atención a la forma en que se preparan las superficies de la celda (limpieza), a la tasa en la expulsión del aceite y a la cantidad de aceite atrapado al final del experimento, así como a cantidades que tienen que ver con la dinámica de los fluidos, es decir, longitud interfacial y área ocupada por estos y su relación con el medio capilar y el proceso de imbibición. El experimento es similar al seguido por Hayashi y Soria (2001) con la variante de que se presenta flujo a la entrada de la celda y con una limpieza de vidrios ligeramente distinta.

2.1 Descripción de las celdas Hele-Shaw

Típicamente, las celdas Hele-Shaw se construyen con placas de un material transparente colocadas en paralelo y separadas por una distancia muy pequeña por donde los fluidos circulan. Las celdas que se utilizaron son placas de vidrio con caras planas con un espesor de 0.9 cm y con dimensiones aproximadas de 20 × 20 cm. Se requirió de 3 celdas en total por lo que se utilizaron 3 vidrios de 20 × 20 cm y 2 vidrios de 30 × 70 cm para optimizar el material con el que se contaba. Todas las piezas se extrajeron de la misma hoja de vidrio para evitar diferencias significativas en las propiedades de su superficie y que, debido a ello, hubiera cambios en la mojabilidad. La separación entre las placas que formaban la celda era de 0.015 cm. Sobre cada una de las placas de 30 × 70 cm se colocaron dos celdas con una entrada y una salida cada una.

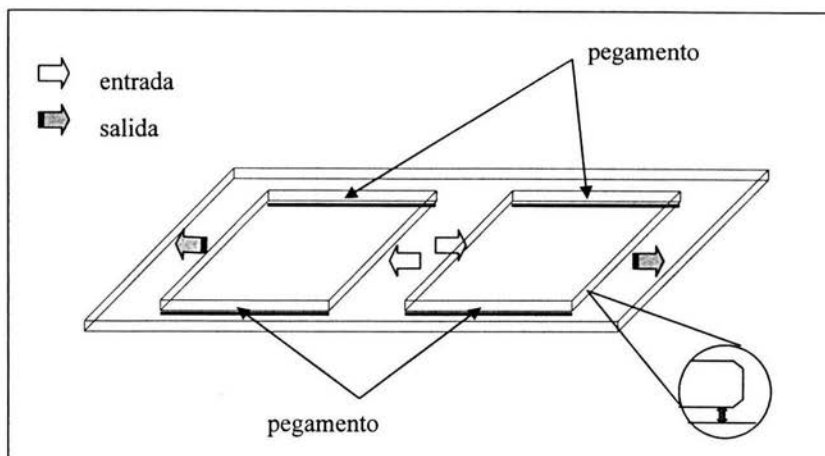


Figura 2.1 Celdas Hele-Shaw

2.2 Limpieza de vidrios

La limpieza de los vidrios es importante porque permite controlar las propiedades químicas de la superficie de las celdas. Al someterlos a una limpieza exhaustiva no solamente se buscaba eliminar impurezas de la superficie sino también restaurar la mojabilidad para cada una de las celdas.

Al parecer, la limpieza juega un papel importante en el desarrollo del proceso de imbibición (Bobek, Mattax y Denekas, 1958; Chuoke, Meurs y Poel, 1959; Hayashi y Soria, 2001); por ello, se han variado los procedimientos de limpieza en distintas rondas experimentales con la finalidad de controlar cambios significativos en la mojabilidad de las superficies de las celdas y su posible repercusión en la forma en que se desplazan los fluidos. Este control en la preparación de las superficies se lleva a cabo mediante la limpieza rigurosa, durante un tiempo determinado, con diferentes sustancias (sustancias que se encuentran en extremos opuestos de pH, es decir, sustancias ácidas y sustancias de tipo alcalino o básico). En este sentido sería importante determinar con precisión la ingerencia del pH de las superficies en el proceso de imbibición como tema de una investigación posterior, en donde se pretende utilizar la microscopía por fuerza atómica para caracterizarlo. Aquí solamente se estudiará la existencia de cambios en el proceso de imbibición con la limpieza y en qué sentido se presentan estos cambios.

En la realización de los experimentos se hicieron cuatro rondas de limpieza: en la primera ronda, las superficies se lavan principalmente con ácidos; en las rondas dos y tres las superficies se preparan con ácidos pero también con detergente alcalino; finalmente, la superficies de las celdas se lavan de nuevo con ácidos tal cual se hizo en la primera ronda. A continuación se da una descripción de las sustancias utilizadas para cada una de las rondas de limpieza.

2.2.1 Procedimiento de limpieza para la primera y cuarta ronda

Inicialmente se colocan los vidrios en un baño de thinner por 48 horas para eliminar los restos de aceite y el pegamento epóxico (cuando ya han sido utilizados), posteriormente se introducen en un baño de Extran MA 01 Alcalino (Merk) reducido al 20% con agua destilada a temperatura ambiente por 12 horas. Se enjuagan e introducen en mezcla crómica durante 12 horas, a una concentración de 100 mililitros de agua y 900 mililitros de ácido sulfúrico por cada 100 gramos de dicromato de potasio. Se enjuagan e introducen en ácido clorhídrico rebajado al 50 % con agua durante 12 horas. Pasado este tiempo de nuevo se enjuagan y se sumergen en agua destilada por 12 horas. Por último, se enjuagan con agua desionizada y se secan con nitrógeno gas. Todos los enjuagues se llevan a cabo con agua destilada. En la tabla 2.1 se muestran las etapas de limpieza:

Sustancia	Tiempo	Observaciones
Thinner	48 hrs.	Se sumergen en un baño a temperatura ambiente
Extran diluido: 20% Extran + 80% agua destilada	12 hrs.	Se sumergen en un baño con una temperatura inicial de 60° C y dejando enfriar a temperatura ambiente.
Agua destilada	15 minutos	Se sumergen a temperatura ambiente
Mezcla crómica: 100 ml H ₂ O + 900 ml H ₂ SO ₄ + 100 gr. K ₂ Cr ₂ O ₇	12 hrs	Se sumergen a temperatura ambiente
Agua destilada	15 minutos	Se sumergen a temperatura ambiente
Ácido clorhídrico: 50% H ₂ O + 50% HCl	12 hrs.	Se sumergen a temperatura ambiente
Agua destilada	15 minutos	Se sumergen a temperatura ambiente
Agua destilada	12 hrs.	Se sumergen a temperatura ambiente
Agua desionizada	15 minutos	Se sumergen a temperatura ambiente
N ₂ gaseoso	15 minutos	Se secan a temperatura ambiente

Tabla 2.1 Procedimiento de limpieza en 1ª y 4ª ronda

2.2.2 Procedimiento de limpieza para la segunda y tercera ronda

Esta limpieza es igual a la anterior hasta la inmersión en el ácido clorhídrico y de aquí en adelante radica la diferencia. Una vez que se ha cumplido el lapso del ácido clorhídrico los vidrios se sumergen de nuevo en Extran MA 01 Alcalino (Merk) a 60 °C inicialmente y dejando enfriar a temperatura ambiente por 12 horas. Se enjuagan y se sumergen otra vez en agua destilada por 12 horas. Se hace un último enjuague con agua desionizada y se secan con nitrógeno gas. Igualmente, todos los enjuagues se llevan a cabo con agua destilada. En la tabla 2.2 se muestran las etapas para este tipo de limpieza:

Sustancia	Tiempo	Observaciones
Thinner	48 hrs.	Se sumergen en un baño a temperatura ambiente
Extran diluido: 20% Extran + 80% agua destilada	12 hrs.	Se sumergen a temperatura ambiente
Agua destilada	15 minutos	Se sumergen a temperatura ambiente
Mezcla crómica: 100 ml H ₂ O + 900 ml H ₂ SO ₄ + 100 gr. K ₂ Cr ₂ O ₇	12 hrs	Se sumergen a temperatura ambiente
Agua destilada	15 minutos	Se sumergen a temperatura ambiente
Ácido clorhídrico: 50% H ₂ O + 50% HCl	12 hrs.	Se sumergen a temperatura ambiente
Agua destilada	15 minutos	Se sumergen a temperatura ambiente
Extran diluido: 20% Extran + 80% agua destilada	12 hrs.	Se sumergen en un baño con una temperatura inicial de 60° C y dejando enfriar a temperatura ambiente.
Agua destilada	15 minutos	Se sumergen a temperatura ambiente
Agua destilada	12 hrs.	Se sumergen a temperatura ambiente
Agua desionizada	15 minutos	Se sumergen a temperatura ambiente
N ₂ gaseoso	15 minutos	Se secan a temperatura ambiente

Tabla 2.2 Procedimiento de limpieza en 2ª y 4ª ronda

A lo largo de este trabajo se hablará de los procedimientos de limpieza por el número de ronda o bien por la sección en la que se describen o bien por las sustancias que predominan, es decir, se hablará en algunos casos de limpieza de “tipo ácido” para referirnos a la limpieza descrita en la sección 2.2.1 o de “tipo básico” para referirnos a la limpieza descrita en la sección 2.2.2.

2.3 Construcción de las celdas Hele-Shaw con flujo transversal en la entrada

Se mencionó que con el propósito de optimizar el material con el que se contaba se construyeron dos celdas de 20 × 20 cm en cada vidrio de 30 × 70 cm, siendo el vidrio grande el inferior. Como lo que nos interesa son las celdas por separado de ahora en adelante se hablará de ellas individualmente. Las medidas de cada celda las determina el vidrio superior y se presentan en la tabla 2.3.

Celda	1	2	3
Largo (cm)	20.5	20.1	19.8
Ancho (cm)	20.6	20.6	19.8

Tabla 2.3 Dimensiones de cada una de las celdas

La separación entre vidrios se logró colocando hilos de nylon a lo largo de los extremos de la celda y posteriormente fijando con pegamento epóxico. La separación fue la misma en

todos los experimentos y corresponde a 0.0150 ± 0.0013 cm. En la salida de cada celda se colocaron barras de plástico con la finalidad de recolectar el aceite expulsado durante el proceso de la imbibición. En la entrada se colocó una calzada hecha con barras también de plástico por la que se canalizaría el flujo de agua.

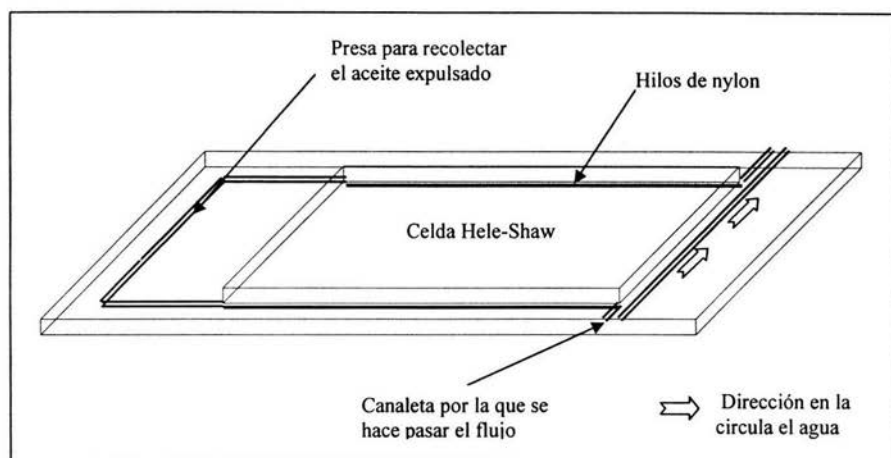


Figura 2.2 Componentes adicionales a la celda Hele-Shaw

Las superficies de cada una de las celdas pueden tener sinuosidades que podrían afectar el proceso de imbibición por lo que era importante preservar las características del espacio capilar y que estas sinuosidades, de existir, fueran iguales en cada una de las rondas de experimentos. Es por esto que se colocaron marcas sobre el vidrio inferior que coincidieran con los vértices del vidrio superior, de esta manera al armar y desarmar cada una de las celdas se aseguraba la repetibilidad en las sinuosidades del espacio capilar. Además, se realizaron pruebas ópticas, esto es, pruebas de *interferencia* óptica con un interferómetro de Fizeau (que típicamente se utiliza para estudiar la curvatura de lentes y espejos) para determinar los tipos de sinuosidades que tenían las superficies internas de la celda. Los patrones de interferencia proporcionan información en la superposición de las irregularidades de las superficies internas, mostrando franjas a manera de curvas de nivel que muestran las variaciones en las superficies de los vidrios. Al realizar las pruebas de interferencia se observó, al menos cualitativamente, gran similitud en los patrones de interferencia, cada vez que se armaba la celda, por lo que el espacio capilar se mantenía sin variaciones importantes y que pudieran afectar el proceso de imbibición.

2.4 Propiedades de los fluidos utilizados

Para estudiar el desplazamiento espontáneo de aceite por agua, se utilizó agua destilada como fluido desplazante y Soltrol 170 de Phillips Petroleum como fluido desplazado. Debido a que la interface Soltrol-Agua es difícil de distinguir a simple vista, se utilizó un colorante soluble en aceite (Oil Red O BDA de Merk) para resaltar la diferencia entre las fases, en una concentración de 0.2 gr. por cada litro, el cual fue filtrado con una membrana Micropore de 0.22 μm de tamaño de malla. Las propiedades de los fluidos relacionadas con su movimiento a través de la celda, como son densidad, viscosidad y tensión interfacial se midieron a la temperatura en que se realizaron los experimentos (25° C). La viscosidad de los fluidos se midió en un viscosímetro Fann, modelo 35-A, para el agua resultó ser $\mu_w=1.00\pm 0.005$ cp y para el Soltrol coloreado $\mu_o=3.80\pm 0.005$ cp. También se midió la tensión interfacial entre el agua destilada y el Soltrol coloreado, utilizando un tensiómetro marca Kruss, modelo K10, el resultado fue $\sigma =25.85\pm 0.005$ dinas/cm. La densidad se obtuvo de resultados de trabajos anteriores y donde se tiene que $\rho_w=1.0002\pm 0.00005$ grs/cm³ para el agua y $\rho_o=0.7735\pm 0.00005$ grs/cm³ para el Soltrol coloreado.

2.5 Baño térmico

El baño térmico de aire se diseñó para mantener la temperatura controlada durante la realización de los experimentos. El baño consiste en un recipiente en forma de paralelepípedo rectangular fabricado con vidrio plano de 0.6 cm de espesor y con dimensiones de 100×50×50 cm³.

La temperatura se controlaba utilizando un termoswitch de mercurio que enciende o apaga dos focos de 100 watts que actúan como calefactores. Además, se utilizaron dos ventiladores para homogeneizar la temperatura dentro del baño y la temperatura del laboratorio se mantenía controlada en 18 °C.

Por otra parte, la temperatura del baño se mantenía a 25.0 ± 0.5 °C y se monitoreaba constantemente con dos sensores Pycolog Technology. La figura 2.3 muestra un diagrama del baño térmico y los accesorios utilizados.

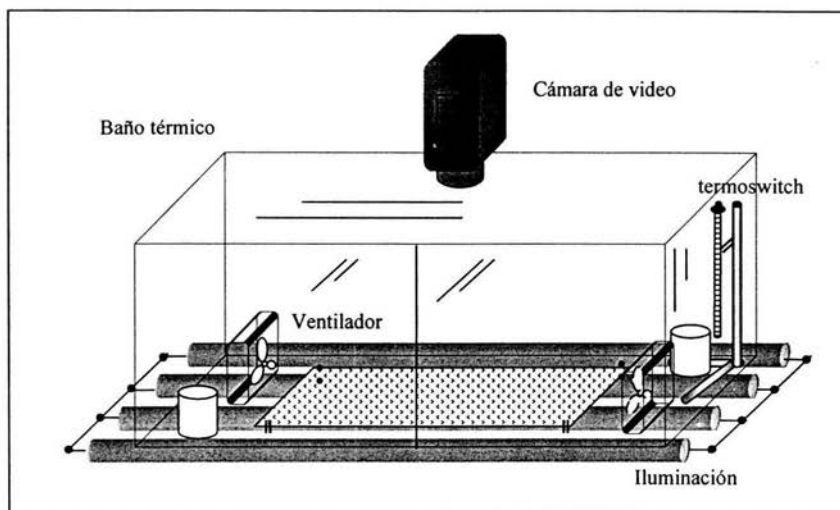


Figura 2.3 Componentes del baño térmico, cámara e iluminación

2.6 Mecanismos para la alimentación continua de agua y recolección de aceite

Una parte importante en el diseño de las celdas con flujo transversal en la frontera fue la manera de administrar el agua. Para ello se hizo una canaleta con barras de plástico a la entrada de la celda. El borde del vidrio superior de la celda forma, junto con una barra de plástico colocada en paralelo a 3 mm de la entrada, un canal por el que se conducía un flujo de agua controlado con bombas de inyección.

En el experimento se implementaron 3 flujos diferentes: 0.3, 0.6 y 1.0 mililitro por minuto. Para guiar el flujo y no cambiar las propiedades en la mojabilidad se colocaron las barras de plástico con pegamento epóxico. También a la salida de la celda se pegaron con epóxico algunas barras a manera de presa que contuviera el aceite que salía expulsado durante el proceso. La figura 2.2 muestra la estructura del canal y la presa de recolección de aceite.

2.7 Seguimiento del experimento

Dada la naturaleza del experimento es de gran importancia la visualización en todo momento de la manera en que se desarrolla la imbibición. Dos aspectos aquí son de relevancia: la filmación e iluminación de las celdas.

2.7.1 Iluminación

La iluminación debía ser lo más homogénea posible ya que en la toma de imágenes la luz se supone con igual intensidad en toda la celda. Para hacer posible esto fue necesario colocar lámparas fluorescentes por debajo y por fuera del baño térmico. La figura 2.3 muestra esquemáticamente cómo se colocaron. Entre la parte inferior del baño y las lámparas existía una distancia de 10 cm aproximadamente. Las lámparas aunque radian relativamente poca energía tenían la capacidad de incrementar la temperatura del baño por lo que fue necesario enfriarlas con aire suministrado por un enfriador portátil. Así el control de temperatura quedaba a cargo únicamente de los focos de 100 watts al interior del baño. También en el interior del baño, entre la celda y su base, se colocó una pantalla de papel albanene que fungía como dispersora de luz y con ello se logró la iluminación uniforme en toda la celda.

2.7.2 Filmación

El experimento se filmó en dos etapas. Durante los primeros 90 minutos los cambios en el proceso de imbibición con flujo a la frontera son muy rápidos por lo que requerían de una filmación continua, ésta es una primera etapa. Transcurrido este tiempo se tomaban imágenes durante 2 segundos y se desactivaba la filmación por 50 segundos para no perder el seguimiento del proceso y observar hasta el final el reacomodo de las fases, ésta constituye nuestra segunda etapa. Después de la primera etapa el proceso de imbibición se hace más lento por lo que fue suficiente filmar sólo dos segundos cada 50 segundos. Con este criterio de filmación se pretendió cubrir con mayor detalle las etapas iniciales del experimento y después, sin tanto detalle, el desarrollo posterior del experimento.

La videocámara que se utilizó fue Panasonic M9000 de formato VHS super, la cual fue colocada verticalmente por encima de la celda y fuera del baño térmico de manera fija y permanente durante todo el experimento.

2.8 Experimento

Se han planteado una serie de objetivos a estudiar en esta investigación y estos son:

1. Determinar patrones de tipo morfológico en el proceso de imbibición cuando se presentan diferentes gastos de agua a la entrada de la celda.
2. Determinar la existencia de diferentes patrones en el ritmo de desplazamiento de las fases y su relación con los diferentes flujos a la entrada de la celda.
3. Estudiar efectos que la dinámica de la interface agua-aceite tiene en la tasa de expulsión del aceite y su posible vínculo al flujo a la entrada.

Cabe mencionar también que los experimentos se llevaron a cabo en un lapso de 4 meses con procedimientos de limpieza distintos. Con las tres celdas se realizaron un total de 12 experimentos de los cuales 6 corresponden a la limpieza descrita en la sección 2.2.1 y 6 con la limpieza descrita en la sección 2.2.2. Cada una de las celdas tuvo asignado un mismo tipo de flujo a lo largo de las diferentes rondas de limpieza, de tal manera que para cada celda no se cambió más que el tipo de limpieza. Posteriormente se sometieron a un análisis en el que se

discute la influencia del flujo volumétrico en el proceso de imbibición y la repercusión que tiene la limpieza en la mojabilidad de las superficies.

Celda	Flujo (ml/min)	1ª ronda A	2ª ronda B	3ª ronda C	4ª ronda D
1	0.3	Limpieza de tipo ácido	Limpieza de tipo básico	Limpieza de tipo básico	Limpieza de tipo ácido
2	0.6				
3	1.0				

Tabla 2.4 Rondas y tipo de limpieza

A cada una de las rondas de limpieza se le ha etiquetado con una leyenda que describe características cualitativas de la limpieza que se manifiestan en los resultados. Por el momento estas etiquetas ayudarán para identificar cada uno de los experimentos. Así, se hablará del experimento 2A o el 3D donde el número indica la celda de la que se trata y A o D serían las letras que indican la ronda de limpieza. Nótese que como para cada celda se aplicó el mismo flujo por lo que 2A, 2B, 2C y 2D indican que se trata de la misma celda con el mismo flujo, es decir 0.6 ml/min, pero con diferente tipo de limpieza.

2.8.1 Preparativos

Para poder comparar los resultados obtenidos se estandarizaron varios aspectos que pueden influir en el desarrollo del experimento:

- La canaleta por donde se hacía fluir el agua siempre se mantuvo con un ancho de 3 mm.
- Las barras de plástico empleadas en la construcción de la canaleta siempre fueron las mismas para cada celda.
- La concentración de colorante en la fase aceite siempre fue la misma.
- El procedimiento para saturar la celda siempre fue el mismo. El aceite se introdujo por la salida con la ayuda de una pipeta de teflón.
- Se niveló la celda al interior del baño para evitar la influencia de efectos gravitacionales.
- Los experimentos se llevaron a cabo a una temperatura de $25.0^\circ \pm 1.0^\circ \text{C}$.

2.8.2 Desarrollo del experimento

El experimento se inicia una vez que se alcanza la temperatura deseada ($25.0^\circ \pm 1.0^\circ \text{C}$). El proceso de imbibición empieza a partir de que el agua entra en la celda. Puesto que se debe establecer un flujo a lo largo de toda la entrada existe un tiempo para el cual esta condición se cumple. Este tiempo es relativamente corto si se compara con el tiempo total de duración del experimento y oscila entre los 6 y 9 segundos.

En cuanto la imbibición se establece el aceite comienza a ser expulsado al exterior de la celda y se recolecta con las presas construidas ex profeso. Una secuencia de desplazamiento de cada experimento se muestra en las figuras 2.4 a 2.15.



1 minuto



3 minutos



5 minutos



10 minutos



20 minutos



35 minutos



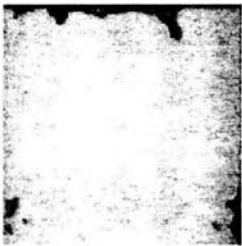
55 minutos



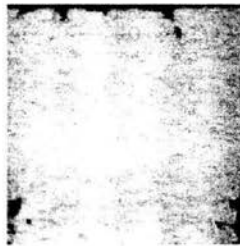
65 minutos



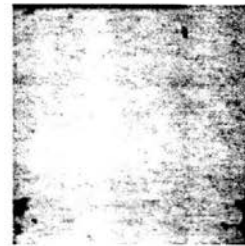
75 minutos



80 minutos



85 minutos



95 minutos

Figura 2.4 Secuencia de avance en el experimento 1A, flujo de 0.3 ml/min, limpieza ácida

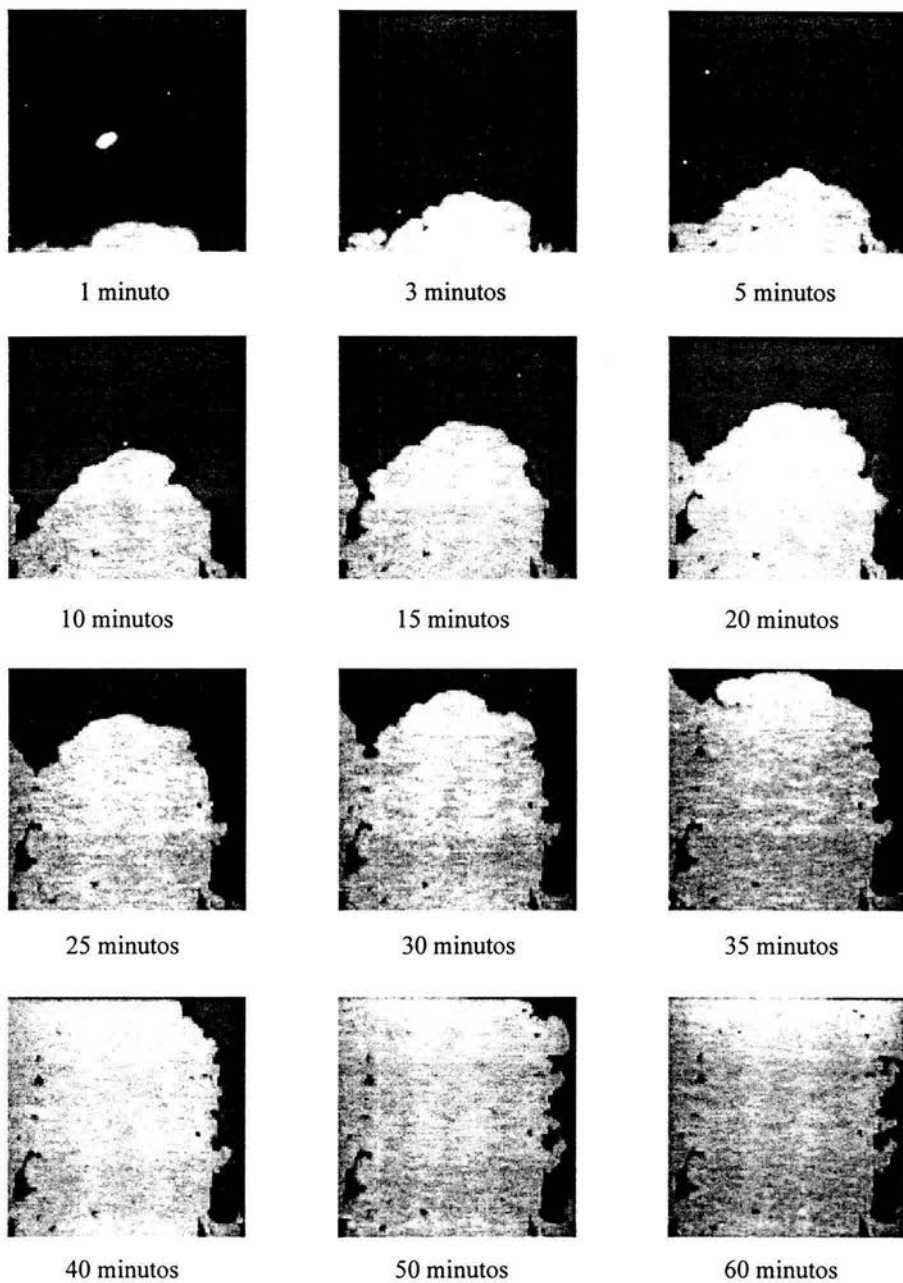


Figura 2.5 Secuencia de avance en el experimento 1B,
flujo de 0.3 ml/min, limpieza básica

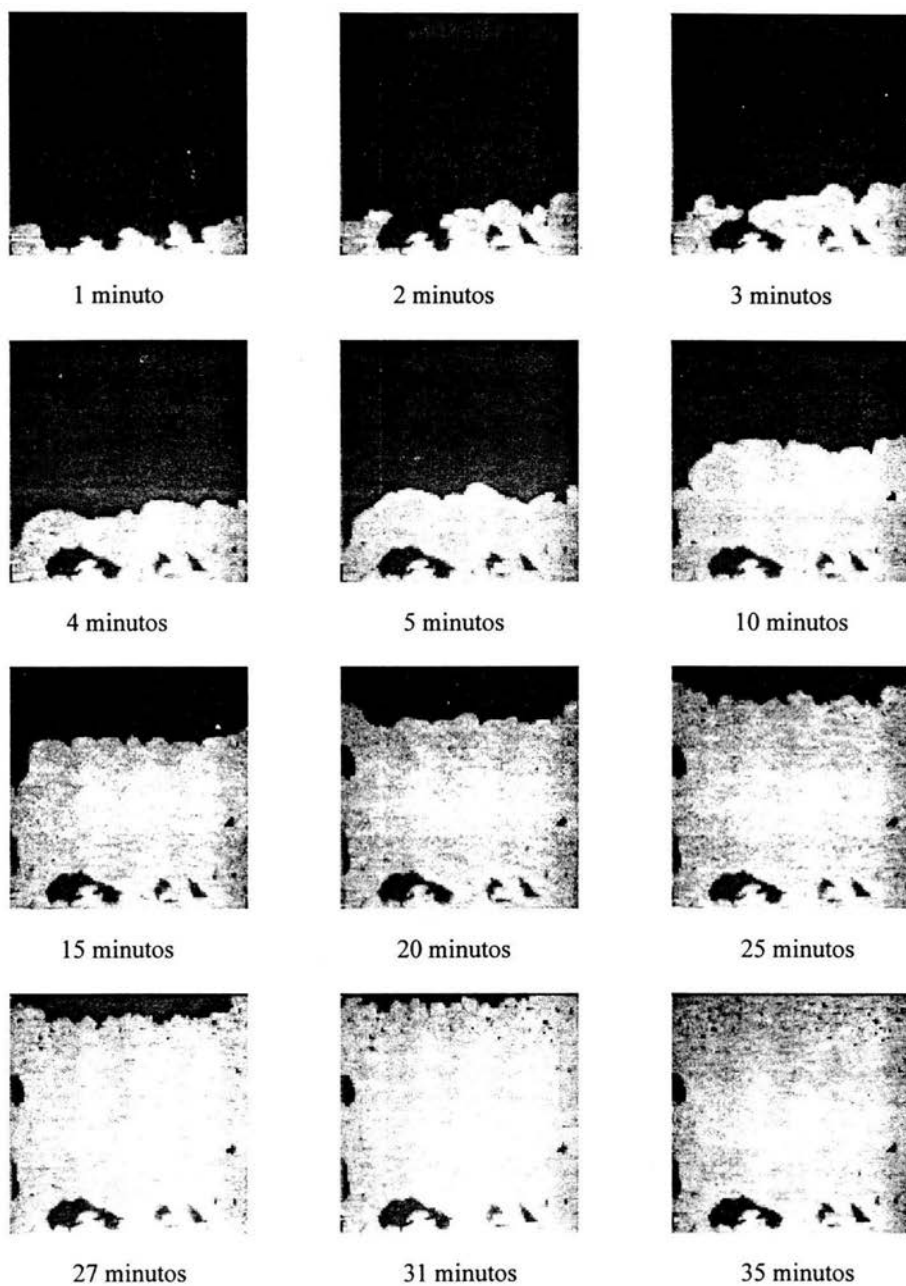


Figura 2.6 Secuencia del avance del experimento 1C,
flujo de 0.3 ml/min, limpieza básica

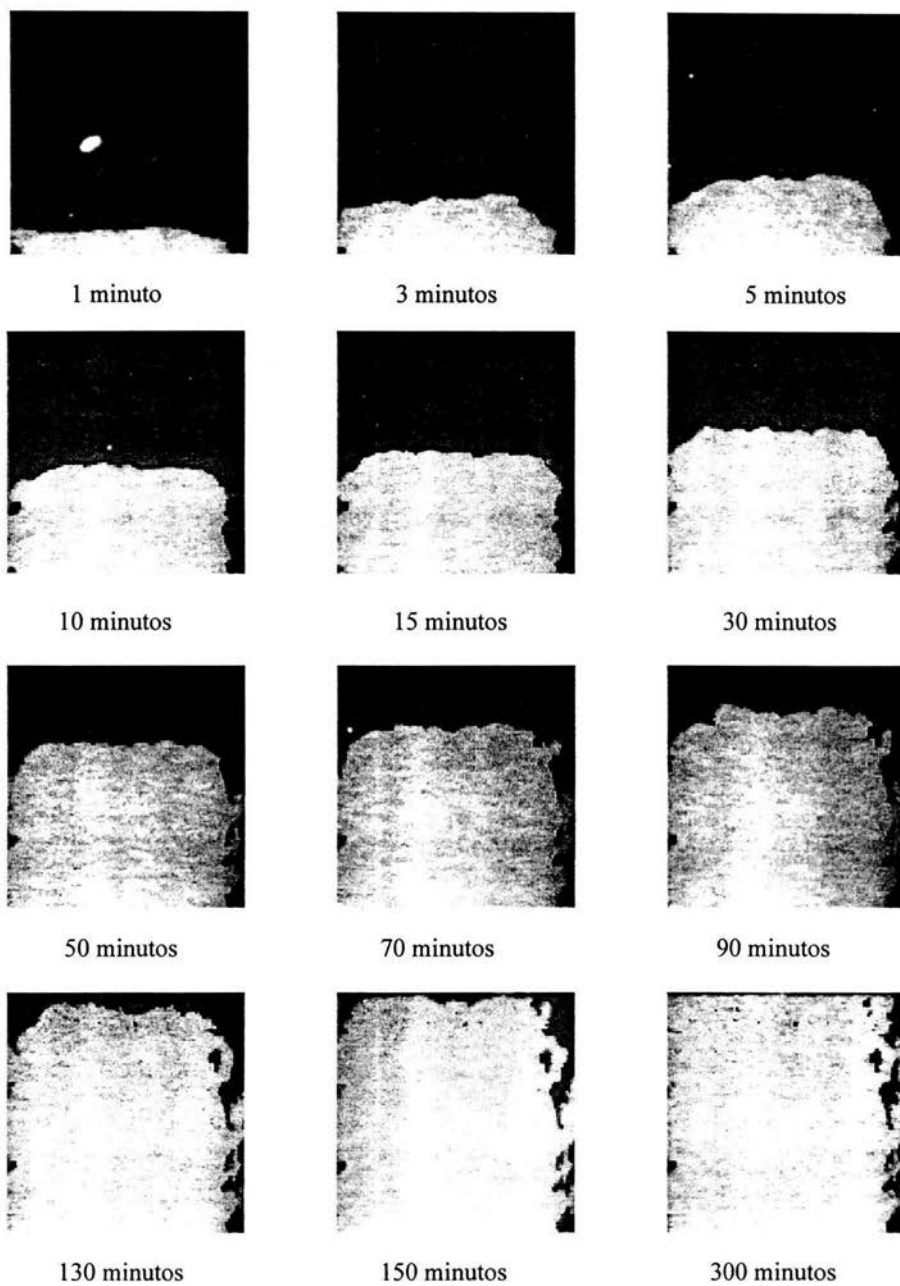


Figura 2.7 Secuencia de avance del experimento 1D,
flujo de 0.3 ml/min, limpieza ácida

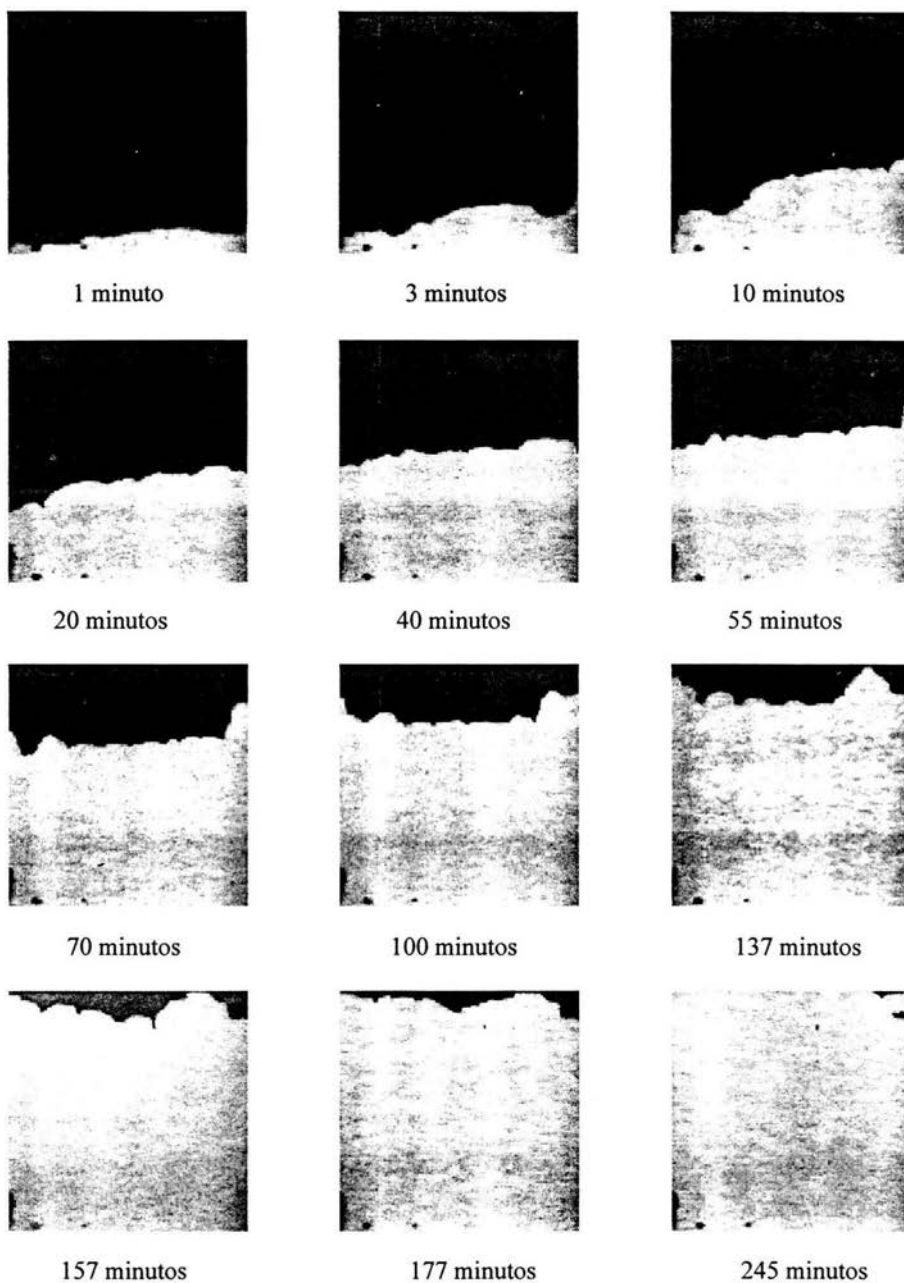


Figura 2.8 Secuencia del avance del experimento 2A,
flujo de 0.6 ml/min, limpieza ácida

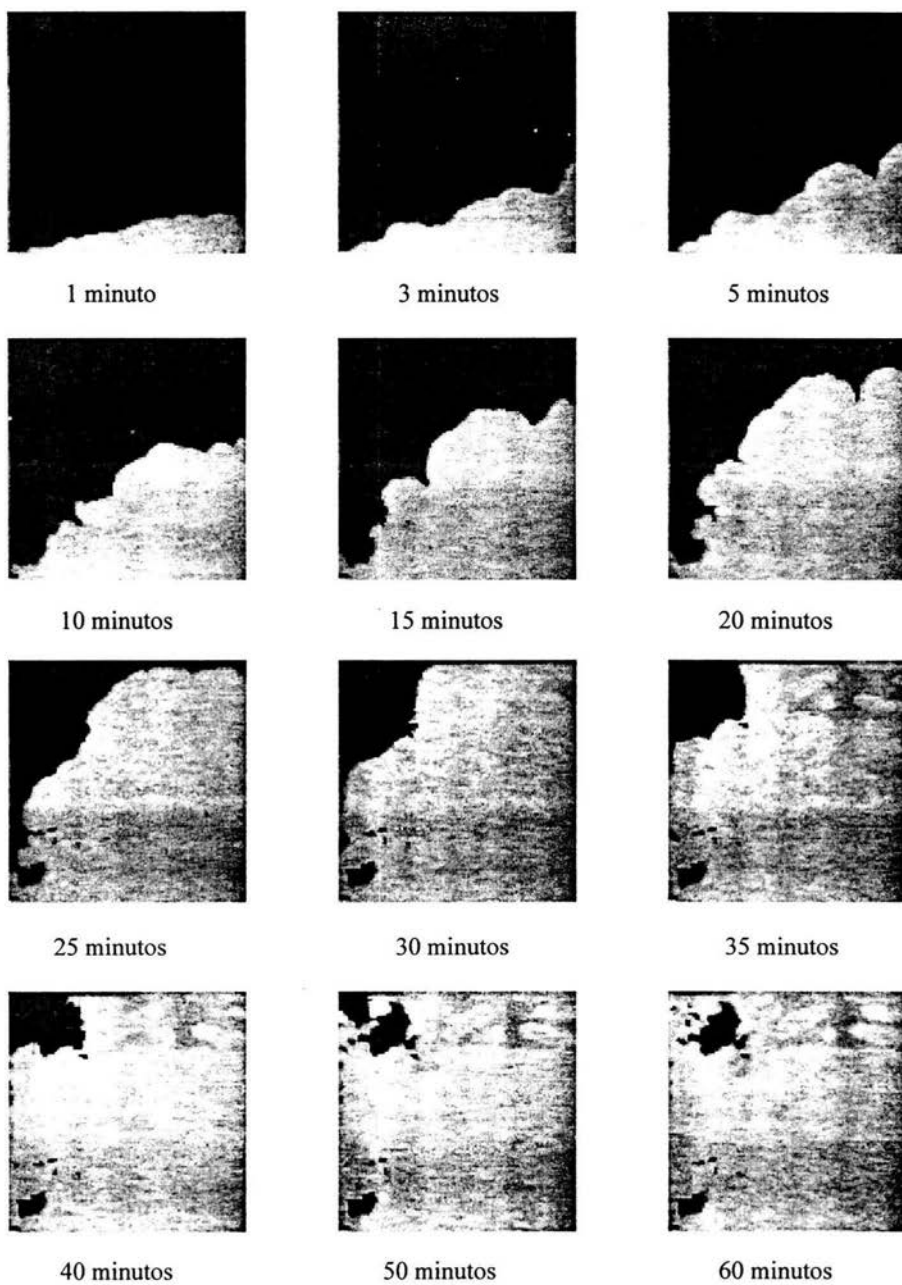


Figura 2.9 Secuencia de avance del experimento 2B,
flujo de 0.6 ml/min, limpieza básica

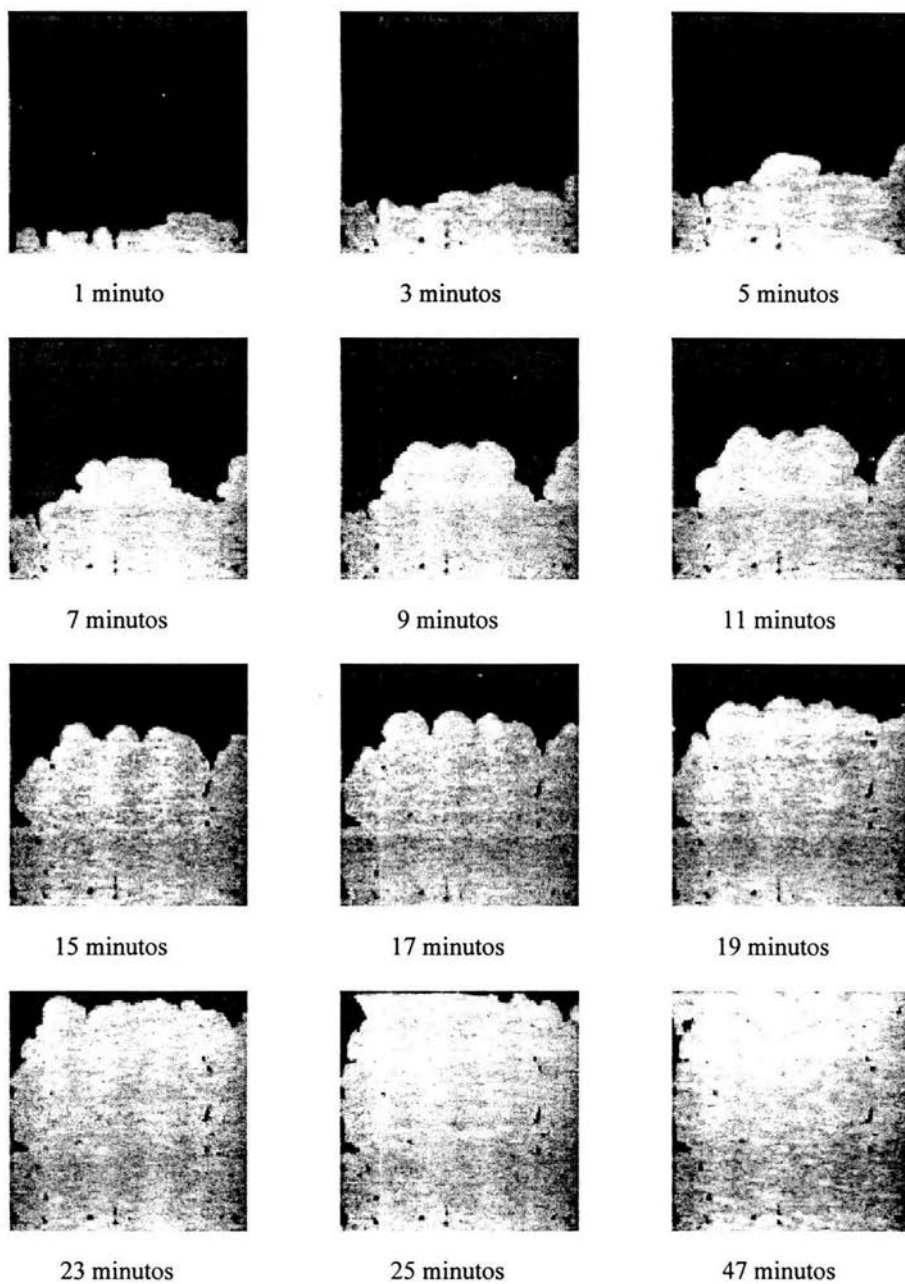


Figura 2.10 Secuencia de avance del experimento 2C,
flujo de 0.6 ml/min, limpieza básica



1 minuto



3 minutos



5 minutos



10 minutos



20 minutos



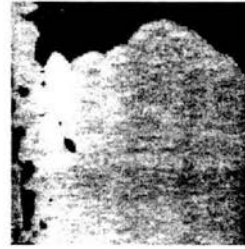
30 minutos



40 minutos



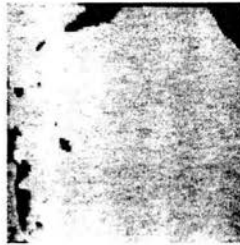
60 minutos



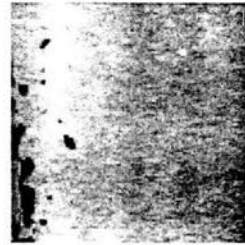
70 minutos



80 minutos



90 minutos



110 minutos

Figura 2.11 Secuencia de avance del experimento 2D,
flujo de 0.6 ml/min, limpieza ácida

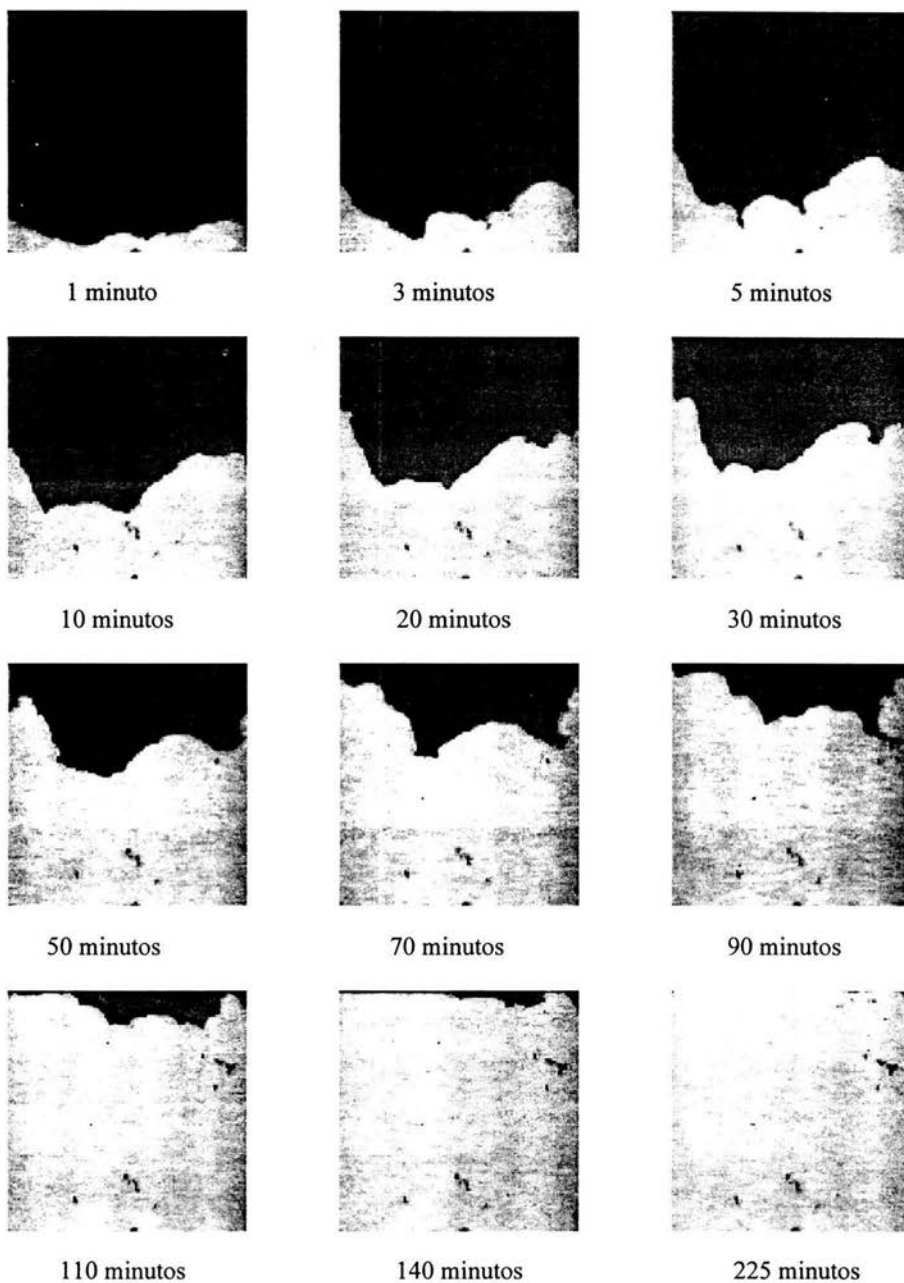


Figura 2.12 Secuencia de avance del experimento 3A,
flujo de 1.0 ml/min, limpieza ácida

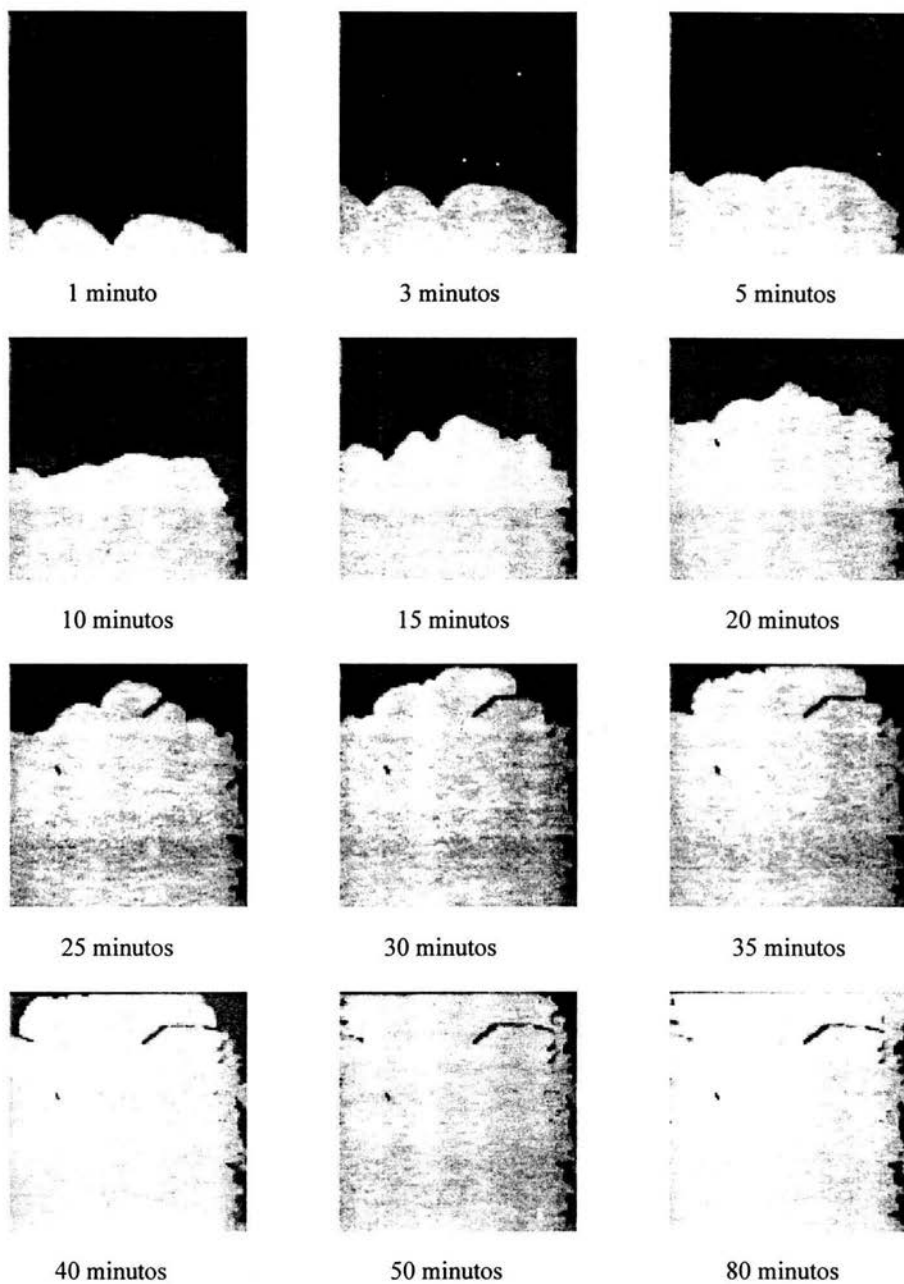


Figura 2.13 Secuencia de avance del experimento 3B,
flujo de 1.0 ml/min, limpieza básica

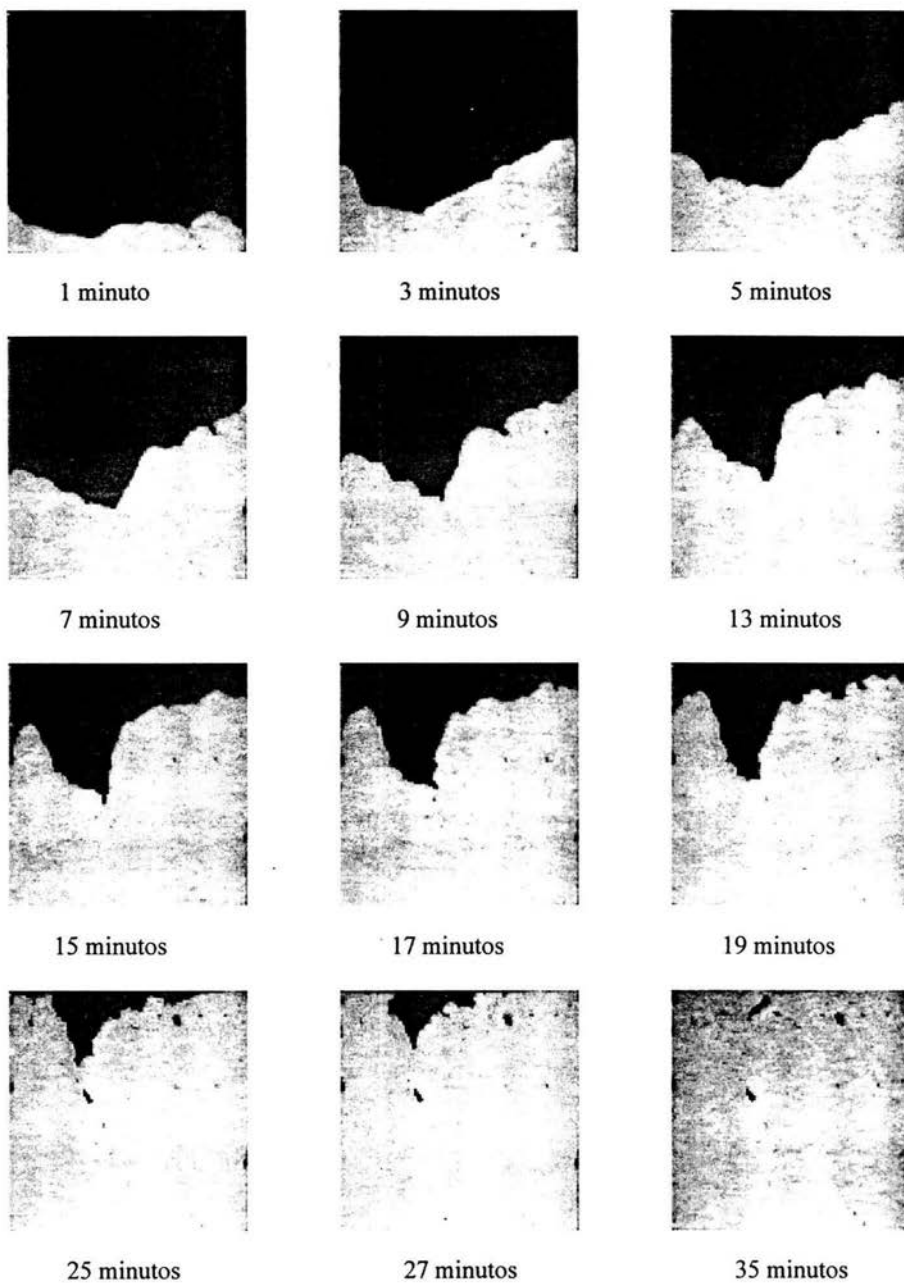


Figura 2.14 Secuencia de avance del experimento 3C,
flujo de 1.0 ml/min, limpieza básica



1 minuto



2 minutos



3 minutos



5 minutos



9 minutos



15 minutos



20 minutos



25 minutos



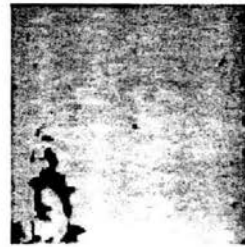
30 minutos



35 minutos



40 minutos



50 minutos

Figura 2.15 Secuencia de avance del experimento 3D,
flujo de 1.0 ml/min, limpieza ácida

Capítulo 3

3. Resultados y discusión

Para fines prácticos, de ahora en adelante se entenderá como fase agua al agua tridestilada empleada en los experimentos y como fase aceite al Soltrol 170 coloreado.

Un experimento se da por iniciado cuando el agua entra en contacto con el aceite. Esto sucede una vez que el flujo de agua ha cubierto la entrada de la celda. Puesto que el agua se está inyectando transversalmente existe un pequeño retardo temporal para establecer el flujo a lo largo de toda la entrada. Sin embargo, cabe mencionar que el tiempo de retardo fue muy pequeño (6-9 segundos) comparado con el tiempo total de duración del experimento.

En el proceso de imbibición, el agua desplaza al aceite no siempre de manera uniforme, debido a la competencia entre las fuerzas capilares y las viscosas, por lo que a su paso puede ir dejando residuos o fragmentos de aceite a los que se les denomina islas. Se tiene así un frente de agua-aceite que se desplaza y modifica con el tiempo e islas de aceite que se van dejando y que pueden o no cambiar de forma o incluso de lugar con el tiempo.

Puesto que estamos considerando a la celda Hele-Shaw como un modelo bidimensional se tomó especial interés a dos cantidades en el análisis de resultados, el área y al perímetro. El área es importante porque proporciona información de la dinámica del transporte de masa al interior de la celda y la evaluación de la cantidad de aceite residual, mientras que el perímetro es de relevancia porque de él se obtiene la longitud de la interfase agua-aceite, parámetro importante en el comportamiento de las fuerzas capilares.

En este capítulo se presentan los resultados que se han obtenido a partir de imágenes capturadas del video de cada uno de los experimentos. Estas imágenes se capturaron de acuerdo a avances significativos en el frente de desplazamiento o a la formación de islas. En cada una de estas imágenes se midió área y perímetro de las distintas islas que el frente iba dejando y del frente mismo. Nótese que como la entrada de la celda está siempre saturada de agua y la salida con aceite, excepto cuando el frente ha alcanzado y saturado la salida, se considera que la fase aceite es susceptible de ser expulsada mientras parte del aceite dentro de la celda tenga comunicación con el aceite fuera de la celda. De igual manera una isla se considera como tal cuando el frente ha cortado toda comunicación con ella.

Se consideraron un total de 12 experimentos, de los cuales se obtuvieron un total de 224 imágenes de 640×480 píxeles cada una. Estas imágenes se calibraron de acuerdo a las dimensiones de cada una de las celdas para su posterior análisis. La tabla 3.1 muestra el número de imágenes analizadas por experimento.

Experimento	Número de imágenes	Experimento	Número de imágenes	Experimento	Número de imágenes
1A	17	2A	19	3A	24
1B	18	2B	18	3B	18
1C	15	2C	19	3C	19
1D	20	2D	21	3D	16

Tabla 3.1 Número de imágenes analizadas por experimento

3.1 Estructuras de las fases

Tomando como referencia las estructuras propuestas por Hayashi y Soria, 2001 en el desarrollo del avance de las fases se han identificado las siguientes:

- a) Región Continua. Está formada por la fase aceite que tiene continuidad hasta la salida de la celda. La región continua se considera siempre susceptible de ser desplazada al exterior de la celda siempre y cuando no pierda comunicación con la salida.
- b) Región Insular. Está formada por los fragmentos que la región continua va dejando al desplazarse hacia la salida. Esta región no tiene comunicación con el aceite que está a la salida de la celda.

Existe la posibilidad de que la región insular modifique su posición dentro de la celda o su área o su perímetro con el tiempo (Hayashi y Soria, 2001). En este caso, la región insular fue estática en todos los experimentos, es decir, una vez formados los fragmentos o islas, estos no cambiaron ni de posición, ni tampoco en el área o perímetro. De ahí que cuando se hable de región insular se debe entender como la región que conforman fragmentos de aceite que no cambian de posición, área y perímetro con el tiempo.

3.2 Análisis sobre la repetibilidad de las estructuras en los experimentos

Para que un experimento y su repetición se puedan comparar se debe tener cuidado en que las condiciones bajo las cuales se lleva a cabo el experimento sean las mismas. Es por ello que se controlaron aspectos como la limpieza de los vidrios que formaban la celda, la temperatura a la cual se llevaban a cabo los experimentos, etc. Por ejemplo, la limpieza de vidrios resulta ser de gran relevancia debido a que con ésta se busca restaurar la mojabilidad de las superficies. Además, la temperatura parece tener un impacto directo en la tensión interfacial (efecto Marangoni).

En medios capilares o porosos se suele tratar el problema de repetir las condiciones de mojabilidad. Algunos trabajos han demostrado que en condiciones controladas (Hayashi, 2001) se pueden tener patrones de formación de islas similares en desplazamiento a cocorriente de imbibición espontánea y que incluso los ritmos de desplazamiento son repetibles. De acuerdo a estas observaciones se puede hacer un análisis en la región insular

y su forma dentro de la celda y también un análisis a la dinámica de las fases y de su interfase cuidando los factores que afectan la repetición en este tipo de experimentos:

- a) Es necesario que la celda se arme en una sola posición, cuidando que el espacio capilar sea el mismo.
- b) La limpieza es importante y se debe realizar de igual forma para cada celda. En este caso se tienen dos tipos de limpieza, limpieza de tipo ácido y de tipo básico.
- c) Cada vez que se realiza un experimento los fluidos desplazante (agua) y desplazado (aceite), deben de ser los mismos, de ahí que también se debe cuidar la concentración de colorante en el aceite.
- d) En el experimento la temperatura se mantiene dentro de un rango, ésta es de 25 ± 1 °C.
- e) La saturación con aceite del espacio capilar de la celda se debe realizar por el mismo lugar, es decir, introduciendo el aceite por la salida.
- f) La manera en que se establece el flujo de agua fue siempre igual, por eso el tiempo en que se satura completamente la entrada de la celda es también similar en todos los experimentos (6-9 segundos).

En el inciso b se hizo hincapié en los tipos de limpieza, porque juegan un papel importantísimo en la formación de estructuras, como digitaciones o islas, durante el proceso de desplazamiento de aceite por agua, así como también en el desarrollo dinámico del proceso de imbibición. En este sentido, se debe notar que los experimentos B's y C's pertenecen a un tipo de limpieza, esto es, la limpieza en la que se ha agregado un componente alcalino (extran) como parte de la estandarización de las superficies y que las rondas de los experimentos se hicieron de manera continua; mientras que los experimentos A's y D's pertenecen a otro tipo de limpieza en donde se ha dejado como componentes principales de la preparación de las superficies a sustancias ácidas.

A continuación se hará un análisis general de las estructuras que se forman en el desarrollo de los experimentos. En este análisis se dará especial atención a la formación de islas de aceite, al porcentaje de aceite dejado al final del experimento y a las similitudes que se observan entre los experimentos. Por lo tanto, se hablará de un análisis de tipo *morfológico* cuando se estén analizando formación de digitaciones, formación de islas y de la posición en los que se desarrollan dentro de la celda y su repetición en experimentos con condiciones iguales. Cuando se mencione análisis de tipo *dinámico* se referirá a cómo se desarrolla la longitud interfacial, el ritmo de desplazamiento y la velocidad del desplazamiento con respecto al tiempo, pero este tipo de análisis se hará más detalladamente en secciones posteriores (secciones 3.3, 3.4 y 3.5).

Se debe mencionar también que cuando se habla de repetibilidad de tipo morfológica no significa que las fases den lugar a patrones con estructuras idénticas en los experimentos con flujos y limpiezas equivalentes, esto es, que la formación de islas y digitaciones sea idéntica. En este caso se considera un concepto un poco más relajado de repetibilidad, el cual se basa en considerar que las fases presentan patrones con estructuras parecidas, ya sea porque aparecen islas en las mismas zonas o porque la forma del frente es similar.

i) Análisis para los experimentos con flujo de 0.3 ml/min

Desde el punto de vista morfológico se tienen las siguientes similitudes:

1. Los experimentos 1B y 1D, cuya evolución se muestra en las figuras 2.5 y 2.7, respectivamente, tienen formación de islas medianas a lo largo de todo el costado derecho de la celda, además de que el número de islas es parecido: 25 para el primero y 32 para el segundo. También el experimento 1A (figura 2.4) presenta formación de una isla mediana en el costado derecho.
2. En los experimentos 1B y 1C, cuya evolución se muestra en las figuras 2.5 y 2.6, respectivamente, existe formación de una gran cantidad de islas pequeñas en la misma zona de la celda, esto es, hacia el final de la celda.

El experimento 1D (figura 2.7) reúne algunas de las características dejadas por los antecesores en cuanto a formación de islas, porque presenta islas de tamaño mediano al costado derecho (como en 1B, figura 2.5) pero también una gran cantidad de islas pequeñas hacia el final de la celda (como en 1C, figura 2.6). En general no se aprecia una similitud entre 1A y su repetición 1D, y esto quizá se deba a que no fue una repetición de experimentos sucesiva; mientras que en 1B y su repetición 1C existe bastante similitud.

Otro aspecto a destacar es que se nota que la limpieza influye en la formación de islas, esto es, se forman una mayor cantidad de islas medianas cuando la superficie se encuentra medianamente ácida (experimento 1D, figura 2.7) o medianamente básica (experimento 1B, figura 2.5) mientras que deja una gran cantidad de islas pequeñas cuando la superficie es muy básica (experimento 1C, figura 2.6).

Por otra parte, el porcentaje de aceite dejado al final del experimento es muy parecido para 1C y 1D siendo de 5.30 % y 5.50 % respectivamente, mientras que para 1A fue de 1.87 % y en 1B de 8.85 %.

A continuación se muestra una tabla que contiene la información general de los experimentos llevados a cabo con un flujo de agua a la entrada de 0.3 ml/min.

Experimentos con flujo transversal a la entrada de 0.3 ml/min		1A	1B	1C	1D
% de aceite dejado al final del experimento		1.87	8.85	5.30	5.50
Número de islas dejadas	Pequeñas (0.1 - 1.0 cm ²)	7	22	58	26
	Medianas (1.0 - 10.0 cm ²)	1	2	4	6
	Grandes (10.0 cm ² en adelante)	0	1	1	0
Duración total del experimento (minutos)		95.1	70.15	35.1	300.1

Tabla 3.2 Porcentaje de aceite atrapado, número de islas dejadas y duración total del experimento

ii) Análisis para los experimentos con flujo de 0.6 ml/min

Desde el punto de vista morfológico se tienen las siguientes similitudes:

1. Los experimentos 2B, 2C y 2D, cuya evolución se muestra en las figuras 2.9, 2.10 y 2.11, respectivamente, tienen formación de islas medianas a lo largo del costado izquierdo.
2. El número de islas dejadas por los experimentos 2B (figura 2.9) y 2D (figura 2.11) es de nuevo similar: 16 para el primero y 20 para el segundo.

A diferencia de la celda con flujo de 0.3 ml/min, el parecido en la formación de islas de aceite es menor en todos los experimentos llevados a cabo con 0.6 ml/min, sólo se puede decir que la preferencia a dejar islas se da por el costado izquierdo de la celda. Es muy probable que la velocidad en la que se proporciona el flujo afecte en la formación de islas.

El porcentaje de aceite dejado por 2C y 2D es de nuevo similar, esto es, 2.18 % y 2.85 % respectivamente, mientras que para 1A es de 0.58 % y en 1B es de 4.28 %.

A continuación se muestra una tabla que contiene la información general de los experimentos llevados a cabo con un flujo de agua a la entrada de 0.6 ml/min.

Experimentos con flujo transversal a la entrada de 0.6 ml/min		2A	2B	2C	2D
% de aceite dejado al final del experimento		0.58	4.28	2.17	2.86
Número de islas dejadas	Pequeñas (0.1 - 1.0 cm ²)	6	14	35	19
	Medianas (1.0 - 10.0 cm ²)	0	1	2	1
	Grandes (10.0 cm ² en adelante)	0	1	0	0
Duración total del experimento (minutos)		245.1	60.15	47.1	110.15

Tabla 3.3 Porcentaje de aceite atrapado, número de islas dejadas y duración total del experimento

iii) Análisis general para los experimentos con flujo de 1.0 ml/min

Desde el punto de vista morfológico se tienen las siguientes similitudes:

1. El avance de la interfase agua-aceite es consistente para los experimentos 3C y 3D en cuanto a la forma triangular que la fase aceite forma a lo largo de todo el experimento.
2. El número de islas dejadas por los experimentos 3B y 3D es similar, con un total de 16 para el primero y 18 para el segundo.

En general este tipo de experimentos no presentó características similares en cuanto a la zona en que dejaron islas. La formación de islas no parece tener predilección por alguna zona de la celda y esto se puede deber a que el flujo era más alto que en los experimentos anteriores.

En esta ocasión el porcentaje de aceite dejado por las celdas con limpieza de tipo muy básico (experimento 3C) y ácido medio (experimento 3D) no tienen parecido entre ellas debido a la formación de una isla grande al inicio del experimento 3D (figura 2.15). Los porcentajes de aceite dejado al interior de la celda para 3A, 3B, 3C y 3D son 0.72 %, 3.77 %, 1.44 % y 5.24 % respectivamente.

A continuación se muestra una tabla que encierra la información general de los experimentos llevados a cabo con un flujo de agua a la entrada de 1.0 ml/min.

Experimentos con flujo transversal a la entrada de 1.0 ml/min		3A	3B	3C	3D
% de aceite dejado al final del experimento		0.72	3.77	1.44	5.24
Número de islas dejadas	Pequeñas (0.1 - 1.0 cm ²)	26	13	26	14
	Medianas (1.0 - 10.0 cm ²)	0	4	1	2
	Grandes (10.0 cm ² en adelante)	0	0	0	1
Duración total del experimento (minutos)		215.1	75.1	35.1	50.1

Tabla 3.4 Porcentaje de aceite atrapado, número de islas dejadas y duración total del experimento

iv) Características generales en los experimentos

Existen algunas características comunes que se observan en los experimentos y que tienen que ver con el tipo de limpieza y con el flujo que se presenta a la entrada de la celda. Como se ha mencionado con anterioridad existen bastantes similitudes entre el número de islas dejadas entre los experimentos con rondas de limpieza correspondientes a los marcados con una B y una D para un mismo tipo de flujo, esta similitud se extiende también para los diferentes flujos, esto es, en los experimentos 1B, 2B y 3B el número de islas es parecido, 25, 16 y 17 respectivamente, mientras que en los experimentos 1D, 2D y 3D el número de islas es de 32, 20 y 17 respectivamente. Nótese que el número de islas dejadas es ligeramente mayor para el flujo más bajo, esto es, el flujo de 0.3 ml/min.

Por otra parte, los experimentos correspondientes a la tercera ronda de limpieza se caracterizan por ser los que mayor número de islas de aceite dejan, siendo de 63 para 1C, 37 para 2C y 27 para 3C. Donde se nota de nuevo una predilección a dejar un mayor número de islas mientras más bajo es el flujo de agua.

Finalmente, los experimentos con una limpieza de tipo ácida (experimentos catalogados con una letra A) presentan una cantidad de islas mucho menor cuando el flujo

es de 0.3 ml/min y 0.6 ml/min en comparación con los demás experimentos, siendo de 8 para el primero y 6 para el segundo. Sin embargo, esta cantidad se dispara cuando el flujo es más alto, porque el número de islas se eleva hasta 26 para el flujo de 1 ml/min.

En general, se puede decir que existe una predilección a dejar una menor cantidad de islas mientras el flujo se incrementa, y es muy probable que se deba a una sobrepresión provocada por el flujo. Nótese también de las tablas 3.2, 3.3 y 3.4 que a medida que se incrementa el flujo es menor el porcentaje de aceite dejado al interior de la celda.

3.3 Análisis de la dinámica interfacial

En esta sección se analizará el comportamiento de la interface agua-aceite en relación con la tasa de expulsión del aceite, así como la longitud que se obtiene de dividir el área ocupada por el aceite entre la longitud interfacial agua-aceite, para cada uno de los flujos que se presentan a la entrada de las celdas.

3.3.1 Comportamiento de la interface agua-aceite y de la tasa de expulsión de aceite

Conforme el agua penetra al interior de la celda comienza a desplazar aceite dando lugar a las estructuras que se han descrito con anterioridad, esto es, región continua y región insular. La región continua es de particular importancia puesto que la interface agua-aceite determina la formación de islas y en general todo el proceso capilar. Si existe formación de islas la interface se deforma para dar lugar a éstas. Estos cambios en la longitud de la interface con el tiempo no se presentan de forma aleatoria, en general se observa que la longitud de la interface crece con el tiempo y que un crecimiento se debe a formación de islas medianas o grandes.

En las figuras 3.1 y 3.3 se presentan las gráficas del área de la región continua y la longitud de la interface agua-aceite como función del tiempo para cada uno de los experimentos. Generalmente, los picos que presentan estas gráficas son producto del desprendimiento de islas de tamaño considerable, que al separarse de la región continua, ocasionan la disminución de la longitud de la interface agua-aceite. Es importante mencionar que este incremento en la longitud interface agua-aceite, es decir, la formación de islas, tiene características que aparentemente dependen del flujo que se presenta a la entrada de la celda. Por otra parte, no se observa en estas gráficas que el área invadida por agua tenga alguna relación directa con la dinámica de la interface; sin embargo, se grafica su comportamiento para tenerlo como referencia.

A continuación se darán algunas de estas características por el tipo de flujo que se presenta a la entrada y más adelante algunas de las características generales.

Experimentos con flujo de 0.3 ml/min

Para el flujo de 0.3 ml/min, los experimentos 1A (figura 3.1a) y 1C (figura 3.1c) tienen un incremento grande de la longitud interfacial en los primeros 10 minutos que da lugar a islas de tamaño mediano y después decae a un valor más pequeño en los siguientes minutos. Después de los 10 minutos, se observa en el experimento 1C que la longitud de la

interface oscila en forma de picos alrededor de los 30 cm, producto de la formación de islas pequeñas, esto no sucede para 1A donde la longitud de la interface se mantiene en un valor constante entre los 25 y 30 cm y en el que casi se mantiene sin cambio hasta el término del experimento.

Por otra parte, la longitud interfacial en los experimentos 1B y 1D crece y decrece continuamente. Estos cambios están asociados a formaciones de islas de tamaño pequeño, mediano y grande como puede apreciarse visualmente en las figuras 2.5 y 2.7.

Experimentos con flujo de 0.6 ml/min

Los experimentos 2A (figura 3.2a) y 2C (figura 3.2c) tienen características similares en el desarrollo de la longitud interfacial ya que al principio del experimento crece hasta un valor de aproximadamente 25 y 40 cm, respectivamente, y después decae para de nuevo crecer y mantenerse entre los 25 y 30 cm como en 2A u oscilar entre los 30 y 40 cm como en 2C. El experimento 2A es interesante porque a pesar de que tiene formación de islas, éstas no son lo suficientemente grandes para que se noten en forma de picos y sin embargo la longitud interfacial oscila en forma sinusoidal con amplitud similar para después dar fin al experimento. El experimento 2C no presenta propiamente una oscilación sinusoidal, pero muestra zonas de picos que concuerdan con ser de amplitud similar y que se asemejarían a las formas presentadas en 2A. Por supuesto, los picos corresponden a formación de islas.

Por otra parte, en los experimentos 2B y 2D (figuras 3.2b y 3.2d, respectivamente) tienen también bastante similitud, en ambos experimentos se nota un incremento continuo de la longitud interfacial con picos muy pequeños que corresponden a formación de islas pequeñas. Después decae abruptamente para dar lugar a islas de tamaño mediano hacia el final del experimento.

Experimentos con flujo de 1.0 ml/min

Los experimentos 3A y 3C (figuras 3.3a y 3.3c, respectivamente) tienen un incremento continuo de la longitud interfacial hasta el final del experimento y finalmente decae para dar fin al experimento. Resalta en las figuras 3.3a y 3.3c el hecho de que existe un pico de tamaño mediano dentro de los primeros 10 minutos en ambos experimentos que es producto de la formación de islas de tamaño mediano.

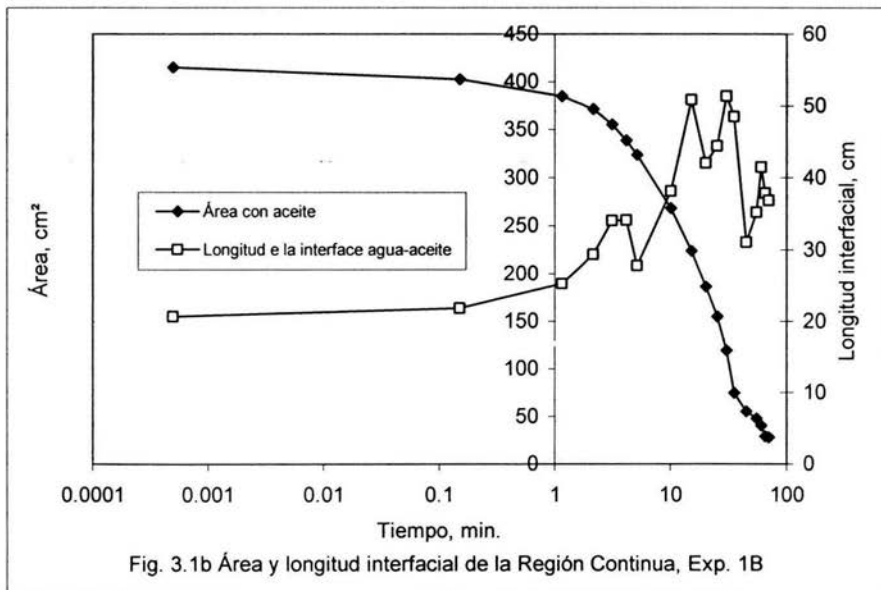
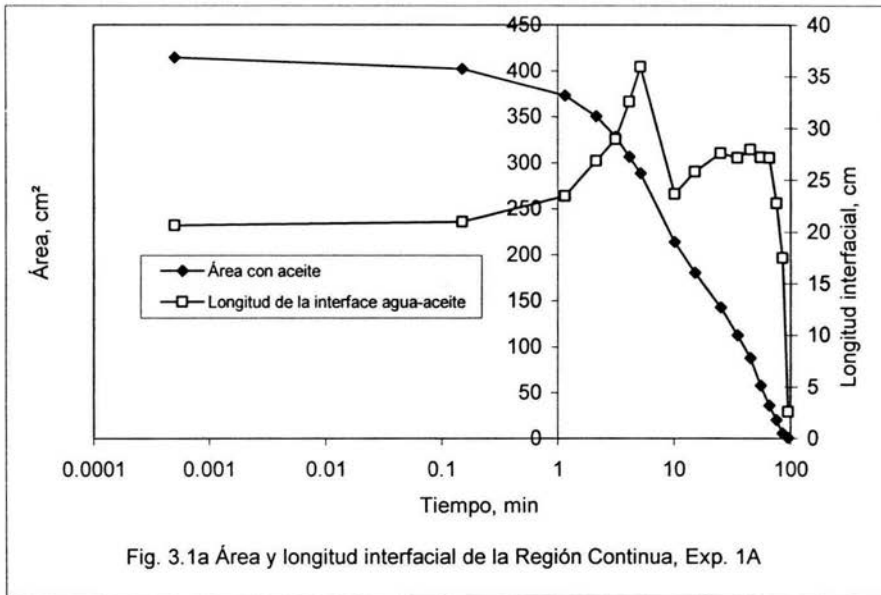
Por otra parte, en los experimentos 3B y 3D (figuras 3.3b y 3.3d) existen diversas formaciones de islas que dan lugar a incrementos grandes en la longitud de la interface, pero en general no presentan gran similitud.

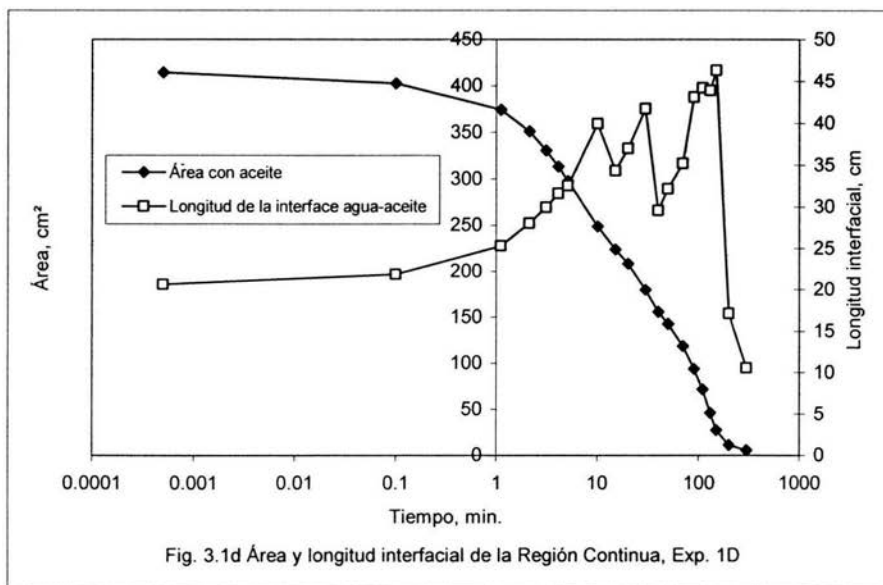
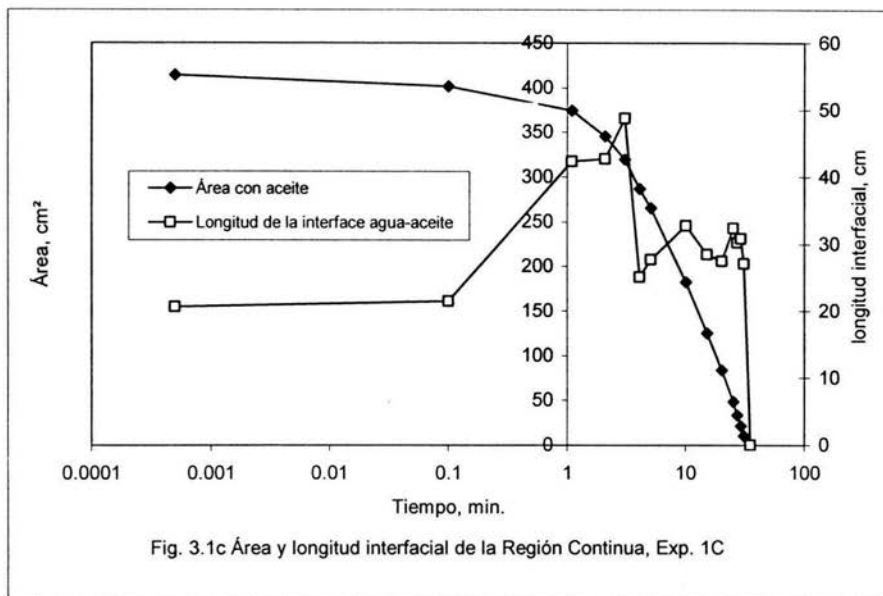
Formación de la longitud de la interface agua-aceite y su relación con el flujo y la limpieza

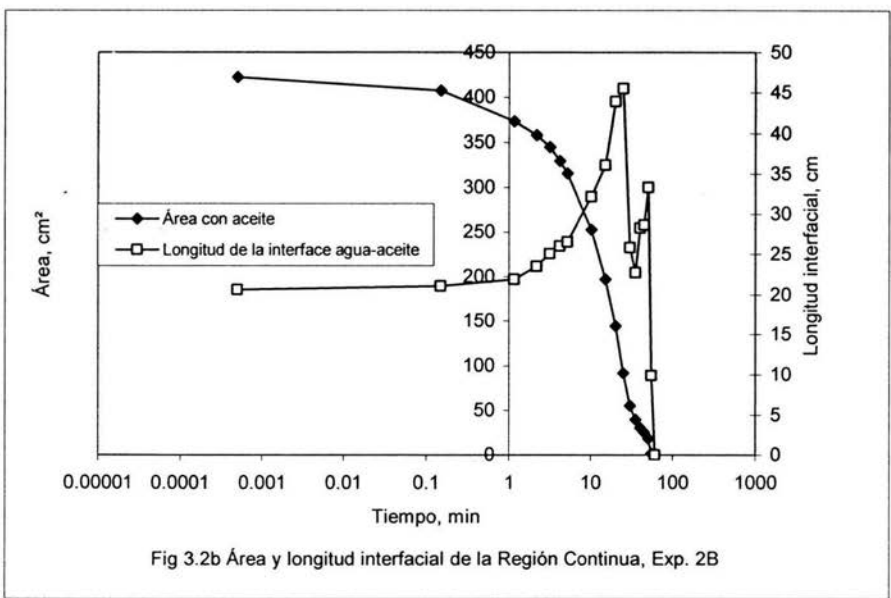
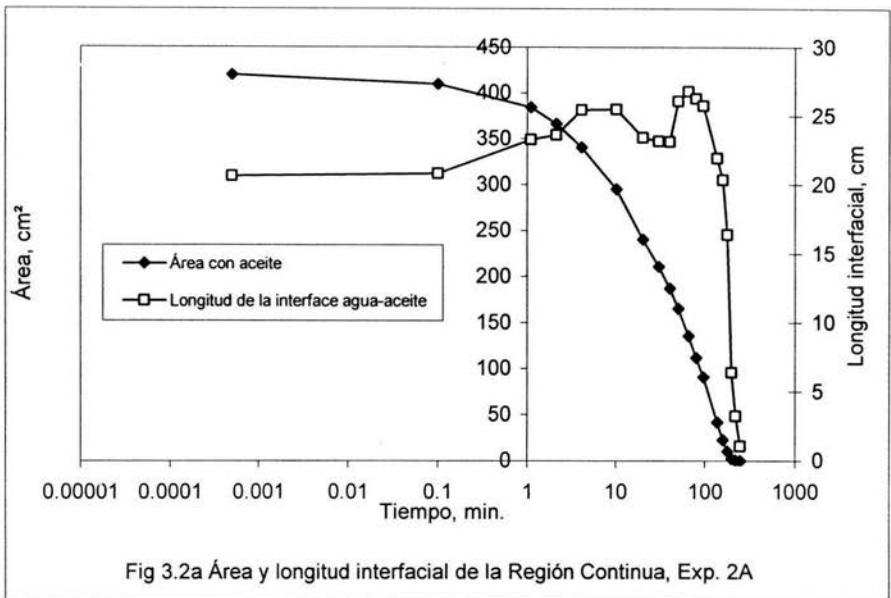
De acuerdo a las figuras 3.1a, 3.1c, 3.2a, 3.2c, 3.3a y 3.3c, los experimentos que han pasado por un proceso de estandarización de superficies (tomando como criterio una limpieza de tipo muy ácido como en el caso de los experimentos catalogados con una A o repetición del mismo tipo de limpieza como en el caso de los experimentos catalogados con una C) presentan características similares para un mismo tipo de flujo en el desarrollo de la longitud interfacial aunque la limpieza es diferente. Bajo este criterio, se puede decir lo siguiente:

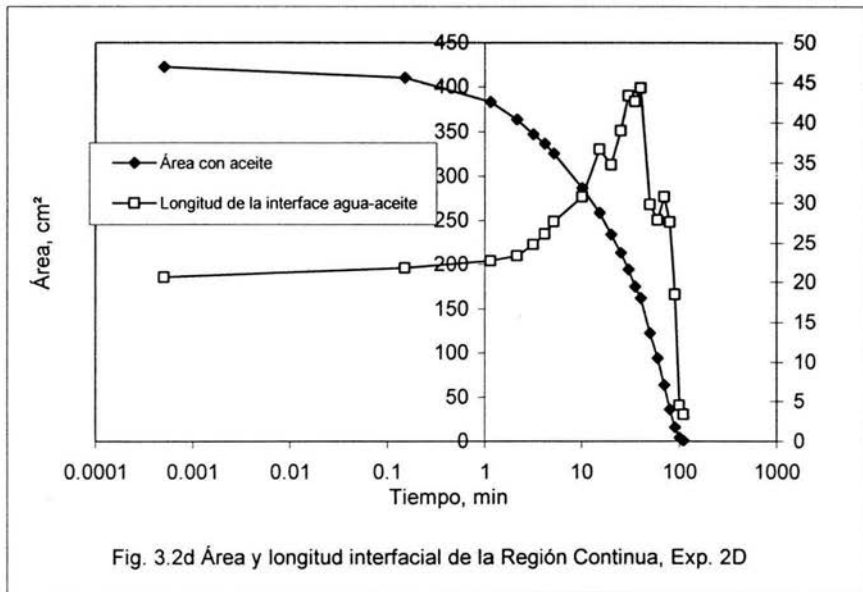
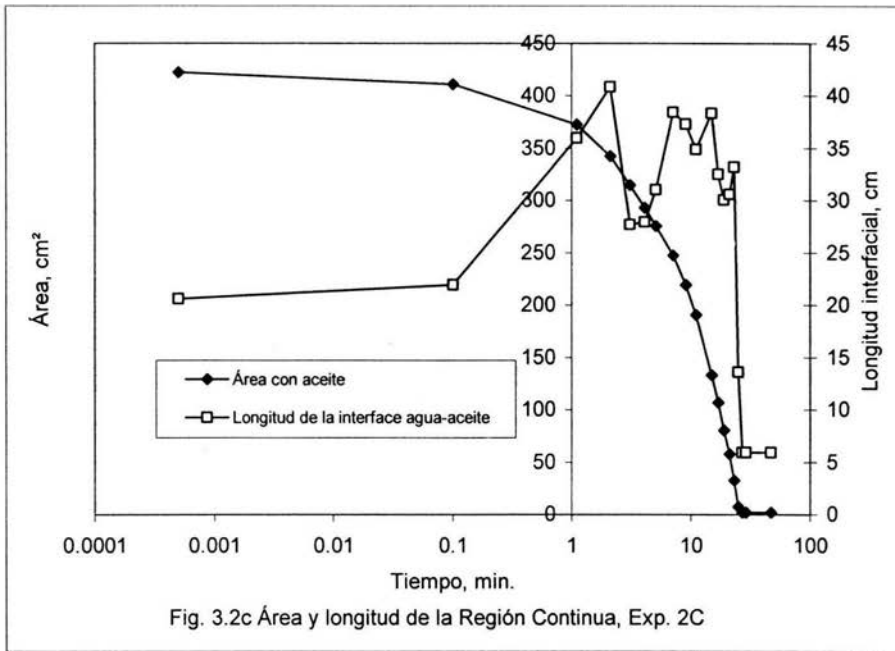
- Los experimentos con flujo de 0.3 ml/min alcanzan un máximo de desarrollo en la longitud interfacial al inicio del proceso de imbibición y es muy probable la formación de islas medianas o grandes en este periodo.
- Los experimentos con flujo de 0.6 ml/min tienen dos etapas de formación de longitud interfacial. Estas etapas se dan al inicio del experimento y de la mitad del proceso de imbibición en adelante y pueden formar islas (como en la figura 3.2b) o no formarlas (como en la figura 3.2a).
- Los experimentos con flujo de 1.0 ml/min tienen un incremento continuo en el desarrollo de la longitud de la interface con un incremento significativo al inicio del experimento.

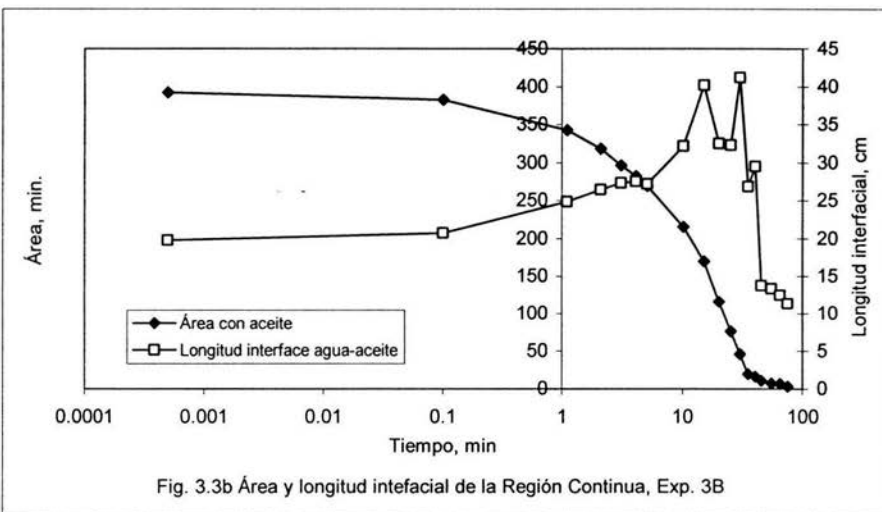
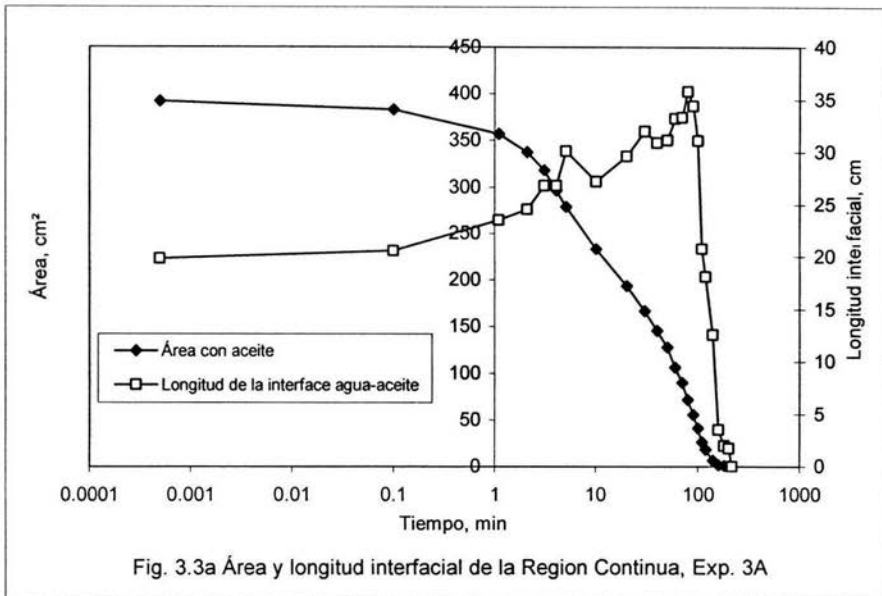
En general, los experimentos 1A, 1C, 2A, 2C, 3A y 3C (figuras 3.1a, 3.1c, 3.2a, 3.2c, 3.3a y 3.3c, respectivamente) presentan formación de islas medianas o grandes dentro de los primeros 10 minutos de desarrollo del proceso de imbibición. A diferencia de los experimentos descritos con anterioridad, los experimentos 1B, 1D, 2B, 2D, 3B y 3D (figuras 3.1b, 3.1d, 3.2b, 3.2d, 3.3b y 3.3d, respectivamente) no muestran un comportamiento análogo, caracterizándose por la formación de islas de diversos tamaños durante todo el proceso de imbibición.

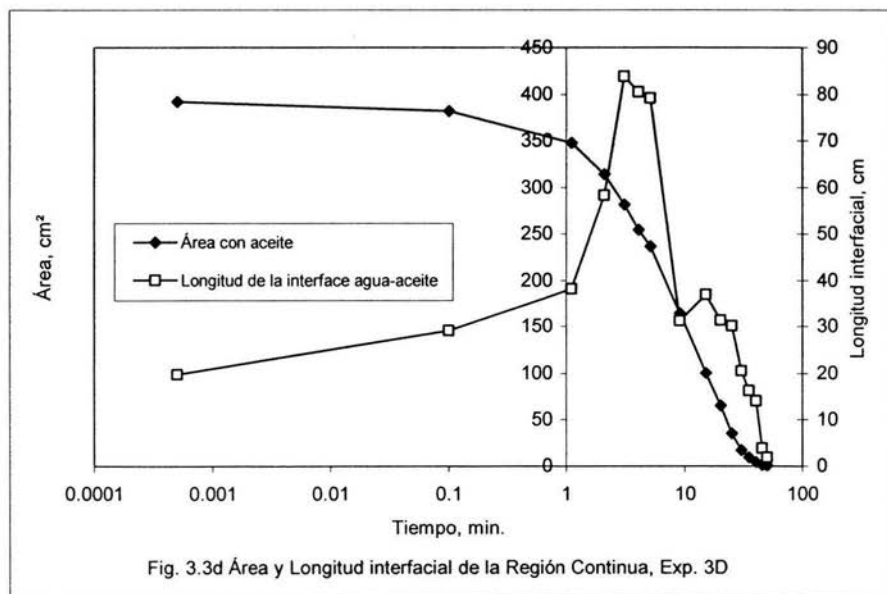
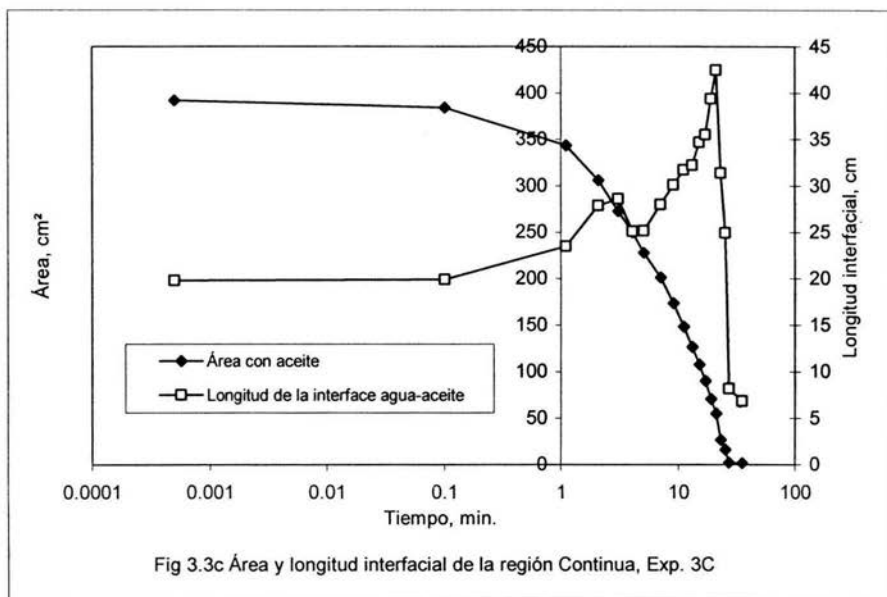












3.3.2 Comportamiento del cociente (Área ocupada por aceite/Longitud interface agua-aceite)

De acuerdo con Hayashi, 2001 existe un patrón característico para una separación dada en la celda Hele-Shaw. Este patrón involucra el área que ocupa el aceite y la longitud de la interface agua-aceite por lo que se define una longitud interfacial característica como

$$L_{12} = \frac{A_i}{L_i} \quad (3.1)$$

donde A_i es el área total ocupada por el aceite al tiempo t_i y L_i es la longitud total de la interface agua-aceite (donde incluso se incluye la región insular) al tiempo t_i .

Tomando como referencia a Hayashi y Soria, 2001 se ha hecho un seguimiento similar para cada uno de las celdas con los diferentes flujos. A continuación se presentan los resultados para las celdas con igual flujo a la entrada tomando en cuenta esta nueva variable L_{12} como función de $\log t$. Los resultados se presentan de acuerdo a cada uno de los flujos.

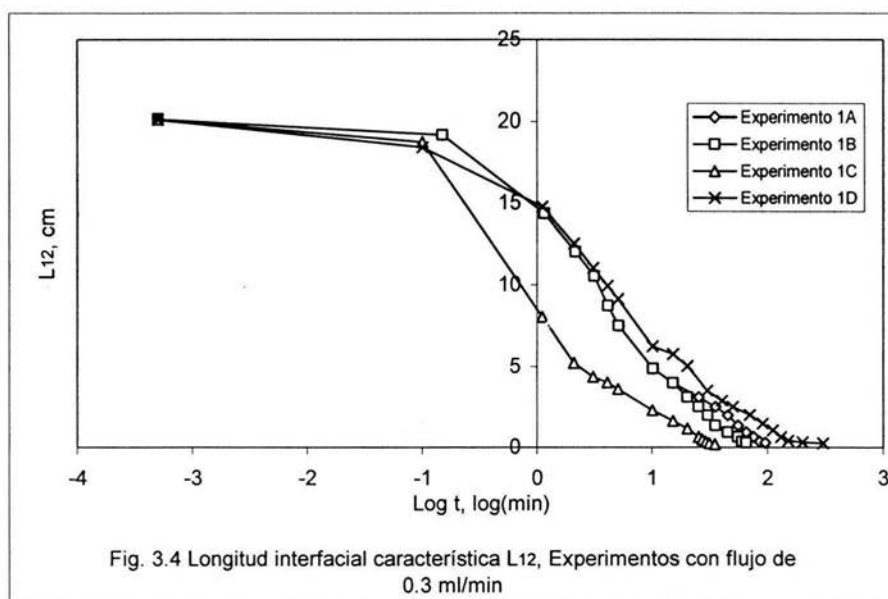
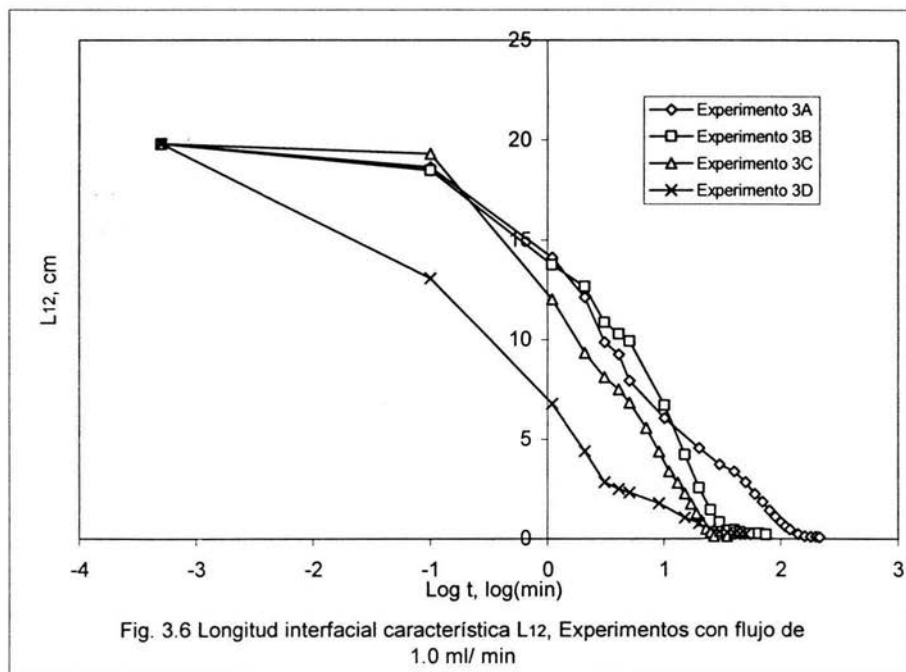
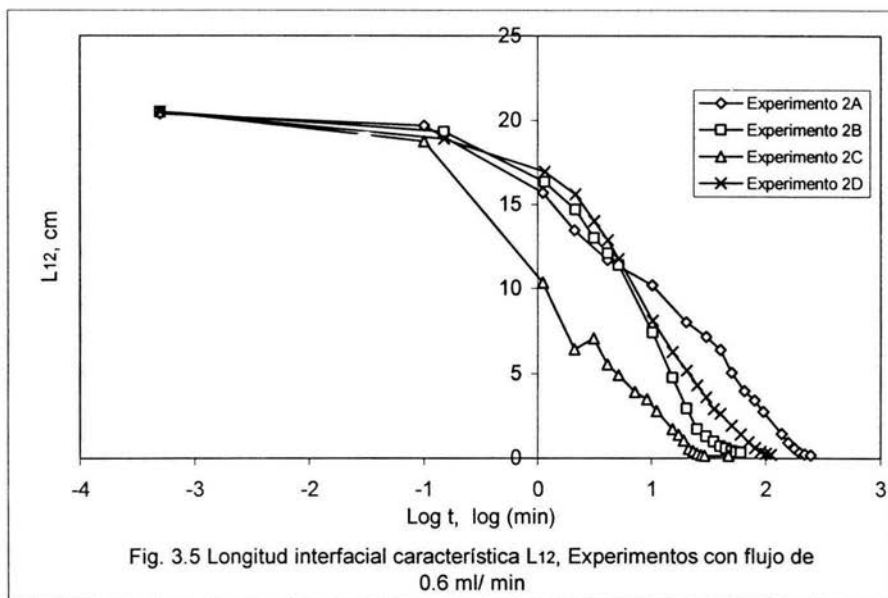


Fig. 3.4 Longitud interfacial característica L_{12} , Experimentos con flujo de 0.3 ml/min



En general, las figuras 3.4 a 3.6 muestran un comportamiento similar en donde aparentemente los gastos de agua a la entrada no influyen en la longitud característica. Hayashi, 2001 desarrolla una metodología para estandarizar estas curvas y compararlas entre sí mediante una función acumulativa de una variable continua (integrada por la derecha). De acuerdo a esta metodología es posible hacer un cambio de variable ($z = (x-\mu)/\sigma$), donde $x = \log t$ y los parámetros a determinar serían la media μ y la varianza σ . La media μ se calcula utilizando la mejor aproximación lineal en los puntos centrales de cada una de las curvas y la varianza σ se calcula proyectando puntos extremos de la curva (donde la concavidad cambia notoriamente) sobre el eje de las x ($\log t$). Una vez que se obtiene μ y σ se sustituyen en la ecuación teórica

$$F(t) = 1 - \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (3.2)$$

para evaluar si están de acuerdo con los resultados experimentales. Confirmados los valores de μ y σ se procede a estandarizar todas las curvas de las figuras 3.4 a 3.6 y compararlas bajo esta nueva forma con la función acumulativa. Los valores de μ y σ se muestran en la siguiente tabla para los experimentos con un mismo flujo.

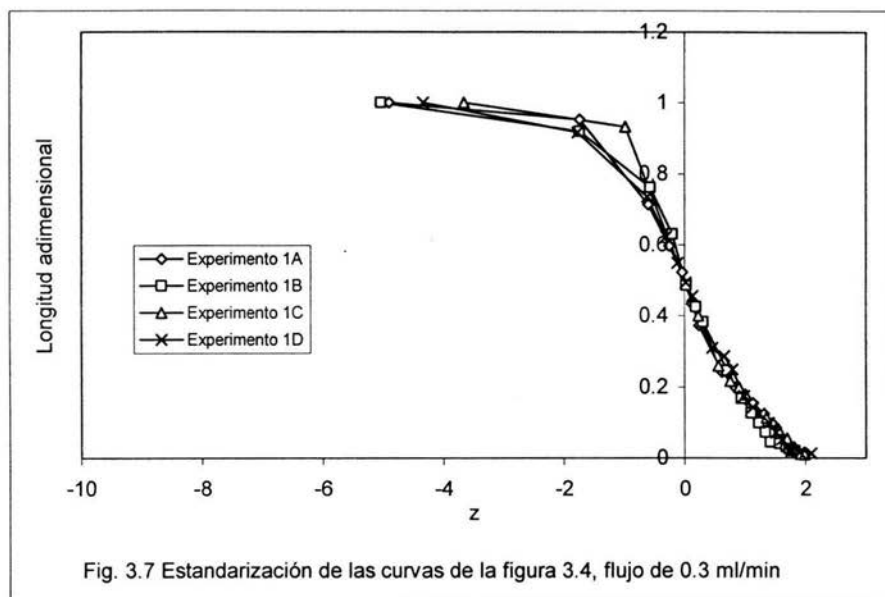
Flujo	Experimento	μ	σ
0.3 ml/min	1A	0.53	0.78
	1B	0.48	0.75
	1C	0.15	0.86
	1D	0.60	0.90
0.6 ml/min	2A	1.0	0.90
	2B	0.80	0.60
	2C	0.05	0.90
	2D	0.83	0.72
1.0 ml/min	3A	0.53	0.9
	3B	0.71	0.65
	3C	0.26	0.75
	3D	0.47	1.15

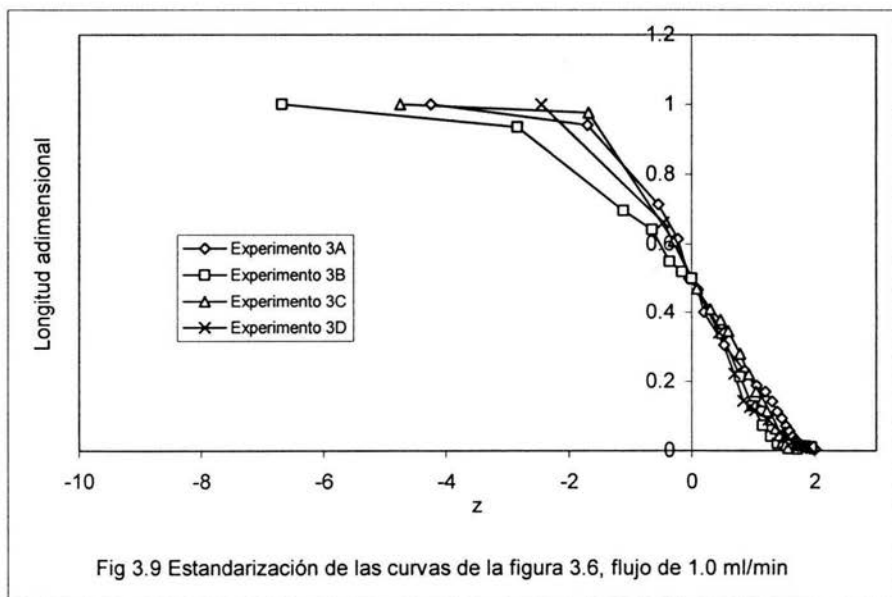
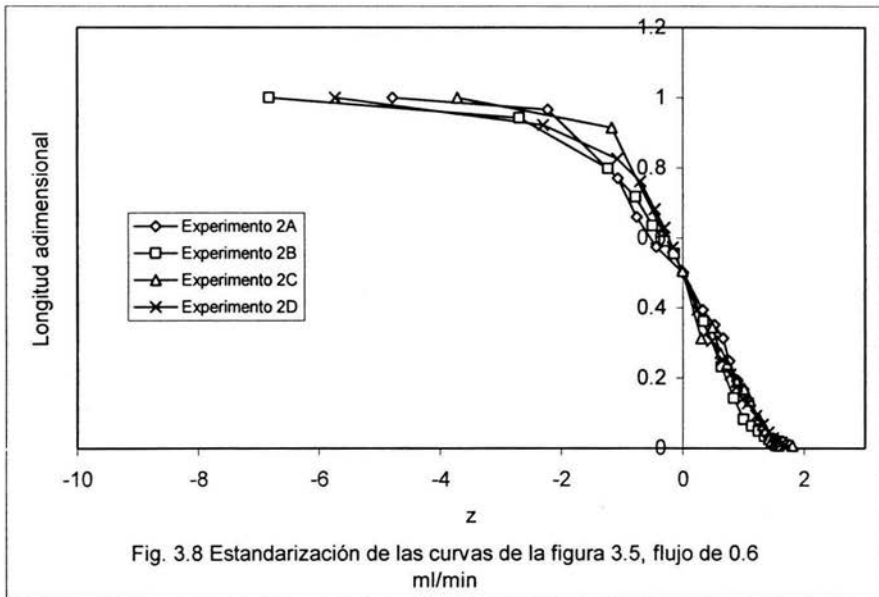
Tabla 3.5 Media y varianza de las curvas de las figuras 3.4 a 3.6

Para verificar la hipótesis de que las curvas de las figuras 3.4 a 3.6 siguen un comportamiento que se semeja a la de la función acumulativa de una función de densidad normal se utilizó la prueba de Kolmogorov- Smirnov para una sola muestra. La prueba arroja un resultado positivo tomando en cuenta que sólo falla para tres casos de los doce que aquí se consideran, es decir, la hipótesis de que las curvas experimentales son semejantes a una normal acumulativa es cierta, para varios niveles de confianza (0.1, 0.05 y 0.01) en pruebas de

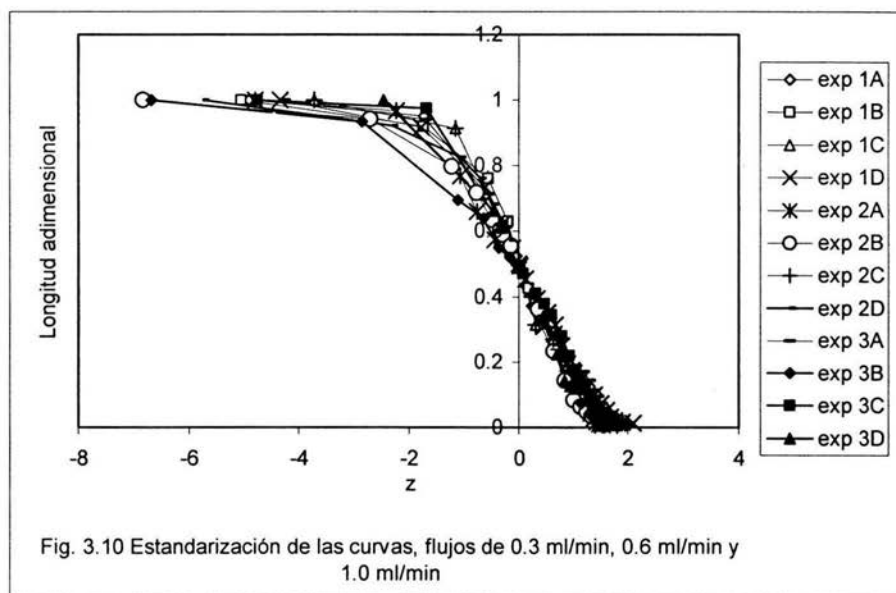
dos extremos. Los resultados de la prueba de Kolmogorov- Smirnov se muestran en el apéndice.

Las curvas que se obtienen bajo esta nueva forma de estandarizar se muestran en las figuras 3.7 a 3.9.





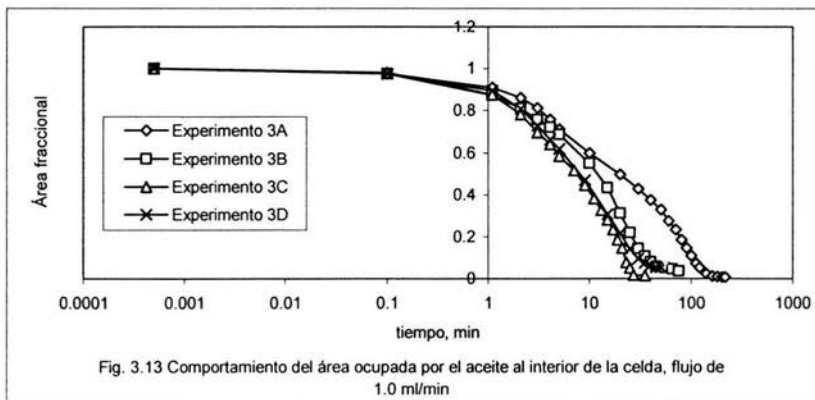
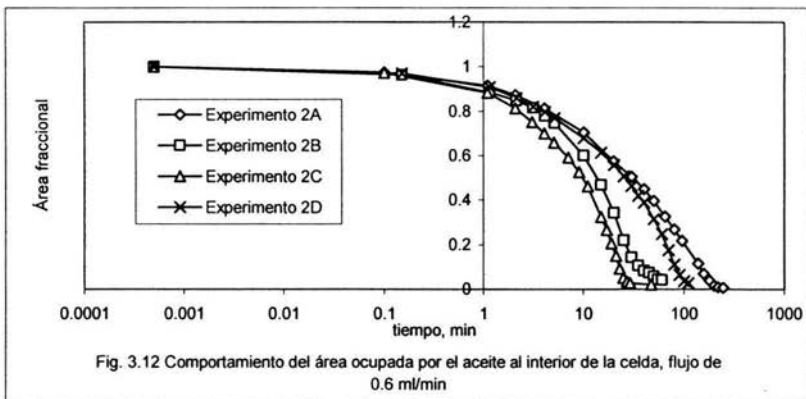
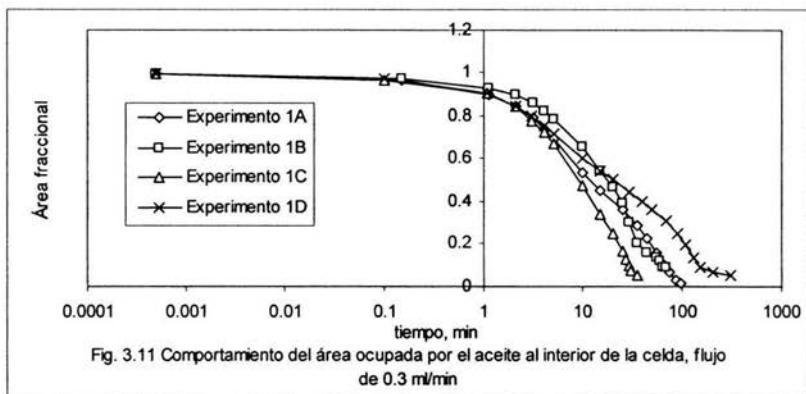
Con este procedimiento de estandarización no se nota un cambio significativo en la forma de las curvas, tal y como sucede en los experimentos realizados por Hayashi, 2001. Por lo que es muy probable que la relación (área del aceite/longitud interface agua-aceite) no dependa del flujo que se presenta a la entrada sino que depende únicamente de la separación de la celda. Estos experimentos se hicieron con una separación en la celda de 0.015 cm. Lo reportado por Hayashi, 2001 concuerda con lo aquí encontrado para 0.015 cm, por lo que no depende del flujo sino de la separación, la curva presenta una pendiente de decrecimiento mayor para las separaciones pequeñas y es menor conforme aumenta. Nótese en la figura 3.10 como todas las curvas tienen un comportamiento muy similar aun cuando los flujos son diferentes.



3.4 Análisis del desplazamiento de las fases

En esta sección se analizará el ritmo de expulsión de aceite en relación al flujo que se presenta a la entrada y también se discutirá la importancia que tiene para el desplazamiento de las fases el tipo de preparación (limpieza) llevado a cabo en las superficies de las celdas.

Aunque en una sección anterior se ha tomado en cuenta el desplazamiento del área de la región continua no se ha tomado como referencia el área total, es decir, el de la región continua más el de la insular en relación con el flujo. En las figuras 3.11 a 3.13 se muestra este comportamiento, donde el área se toma como fracción para que se puedan comparar todas las curvas bajo la misma escala. Similarmente, en las figuras 3.14 a 3.17 se muestra el comportamiento del área total respecto al tipo de limpieza.



Tomando como referencia a las figuras 3.11 a 3.13 se pueden hacer las siguientes observaciones:

- En cada tipo de flujo, el experimento que tiene un ritmo de desplazamiento más rápido se da cuando se han preparado las superficies de la celda con una limpieza de tipo básico, es decir, los experimentos que se han catalogado con la letra C (tercera ronda de limpieza).
- Los experimentos que tienen un ritmo de desplazamiento más lento para los flujos de 0.6 ml/min y 1.0 ml/min son aquellos que portan una letra A, que corresponde a una limpieza de tipo ácida (primera ronda de limpieza). En el caso de los experimentos con flujo de 0.3 ml/min el que más lento se desarrolla es el experimento 1D (cuarta ronda de limpieza) y corresponde de nuevo a una preparación de las superficies de tipo ácida.
- En las figuras del 3.11 a 3.13 se observa el deslizamiento de la curva del experimento D en relación con el flujo, siendo más lento cuando el flujo es de 0.3 ml/min (experimento 1D) y mucho más rápido cuando el flujo es de 1.0 ml/min, de hecho, el desplazamiento es tan rápido como el del experimento 3C.

De acuerdo a estas observaciones, la preparación de las superficies de la celda tiene un papel determinante en el desarrollo del proceso de imbibición. A medida que se estandariza la superficie con un tipo de limpieza, el parecido en los desplazamientos y los tiempos en que se realiza se hace más evidente. Es por ello que se ha comparado el ritmo de desplazamiento respecto al tipo de limpieza realizado. A continuación se presentan las figuras (figuras del 3.14 a 3.17) que muestran las curvas correspondientes a los experimentos donde la limpieza es del mismo tipo y el flujo es diferente. El orden de las figuras está de acuerdo con el orden en que se hizo cada una de las limpiezas.

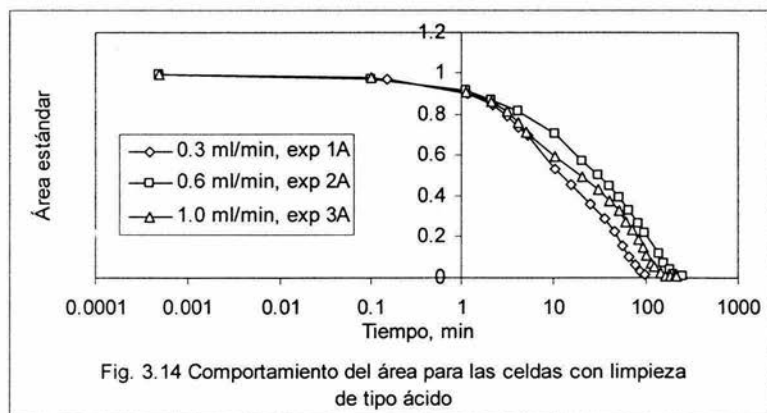
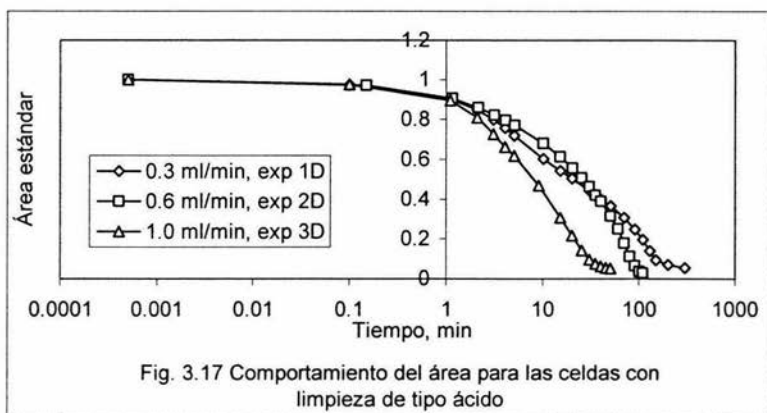
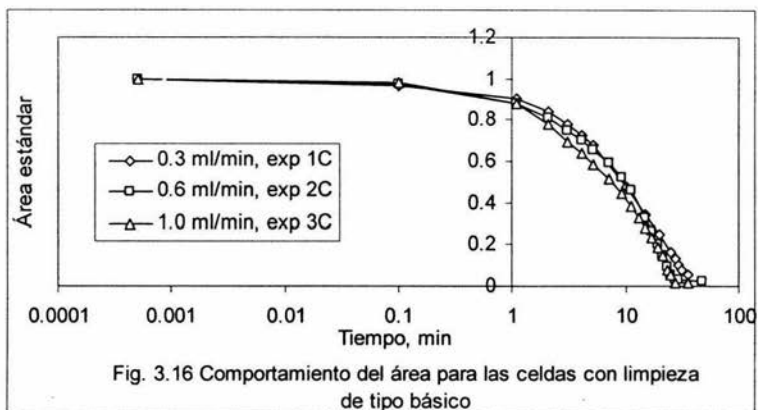
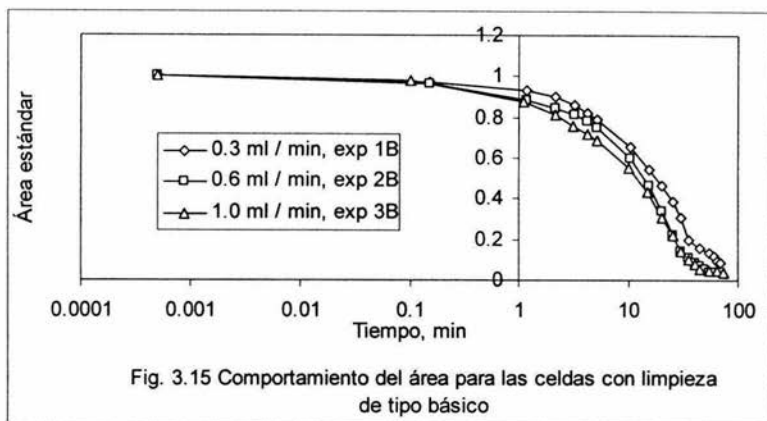


Fig. 3.14 Comportamiento del área para las celdas con limpieza de tipo ácido



De las figuras 3.14 a 3.17 se observa que el comportamiento en el desplazamiento de aceite se hace más repetible conforme se estandariza la superficie en el proceso de limpieza y en el que aparentemente no jugaría un papel muy importante el flujo a la entrada. En la figura 3.14 se puede observar una diferencia mayor entre las curvas que en la figura 3.15 y es aún mayor que para las curvas de la figura 3.16, de hecho para esta ronda de limpieza podemos decir que el comportamiento para 0.3 ml/min, 0.6 ml/min y 1.0 ml/min es casi idéntico. Nótese que en la última figura (3.17) las curvas tienen comportamientos disímiles, al respecto se puede decir que pasar de un proceso de limpieza a otro de manera brusca provoca cambios en la mojabilidad de las superficies que puede afectar en la repetibilidad del experimento.

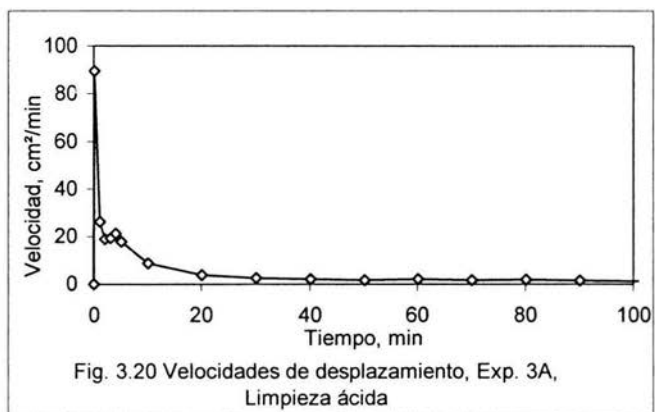
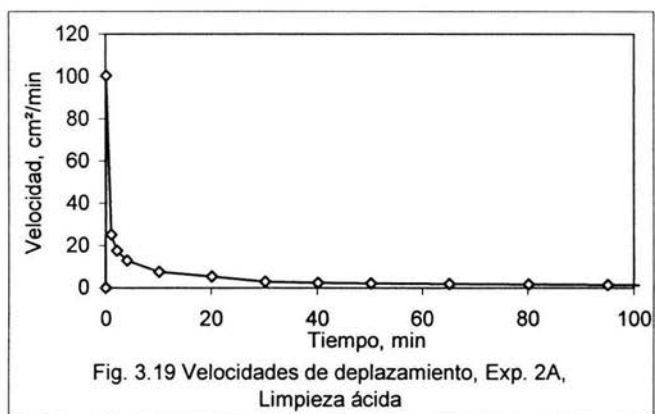
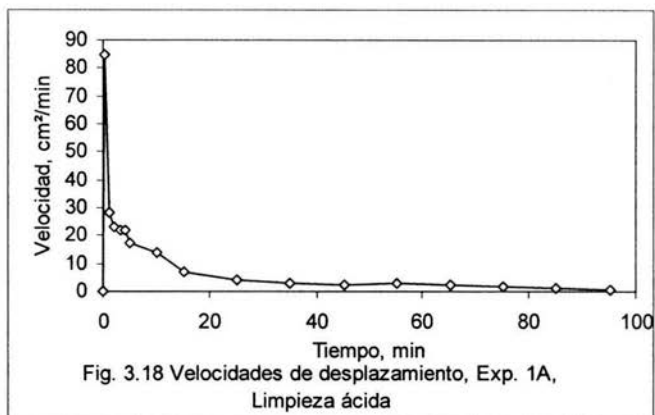
3.5 Análisis de la velocidad de desplazamiento

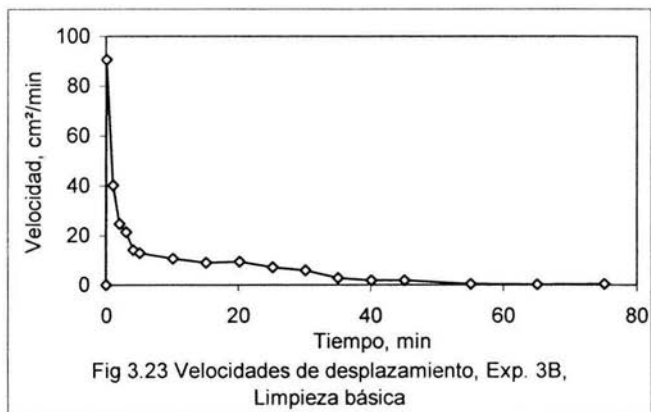
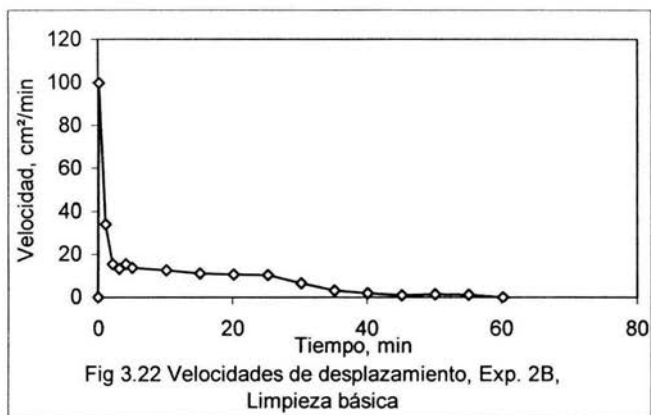
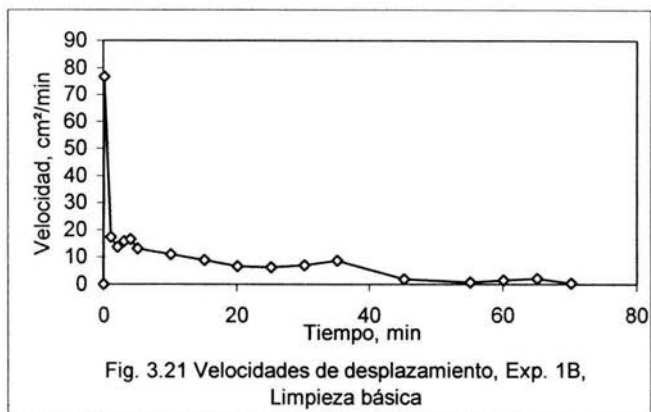
Al existir diferencias en el ritmo de desplazamiento con el tipo de limpieza se ha tomado en cuenta el análisis en la velocidad que desarrolla cada uno de los experimentos y su posible relación con el tipo de flujo y la limpieza. Para cuantificar la velocidad se consideran las mediciones del área de aceite desplazado entre cada dos instantes de tiempo, es decir,

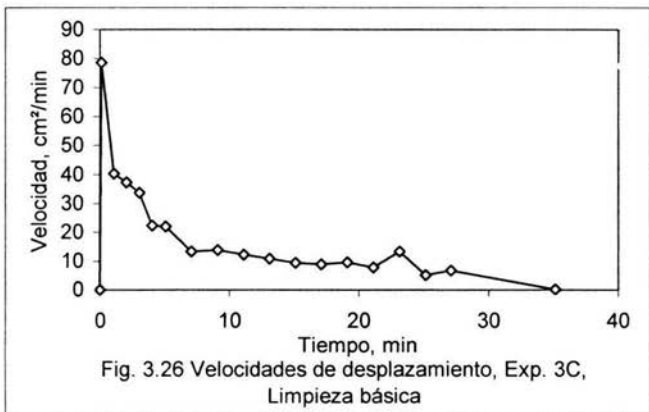
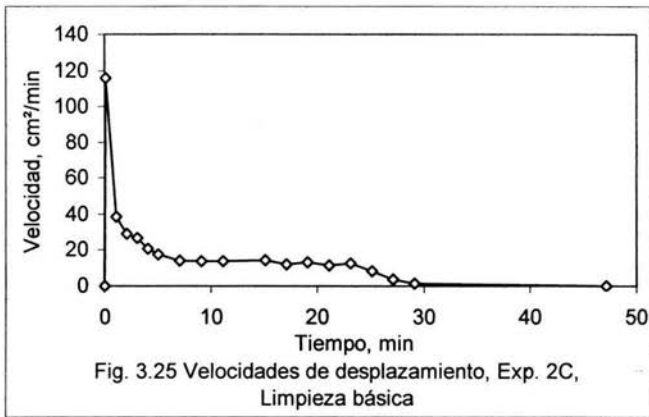
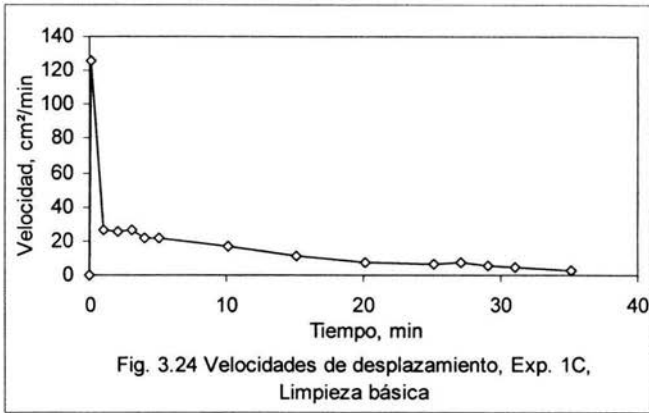
$$V_i = \frac{A_i - A_{i+1}}{t_{i+1} - t_i} \quad (3.3)$$

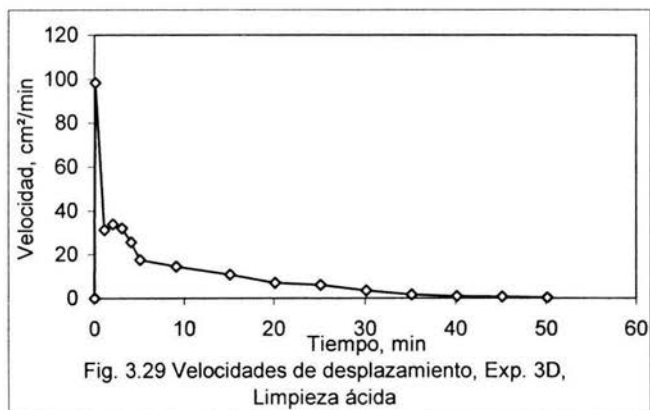
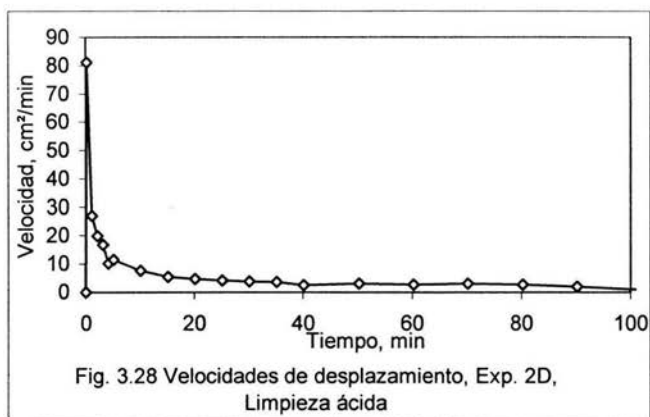
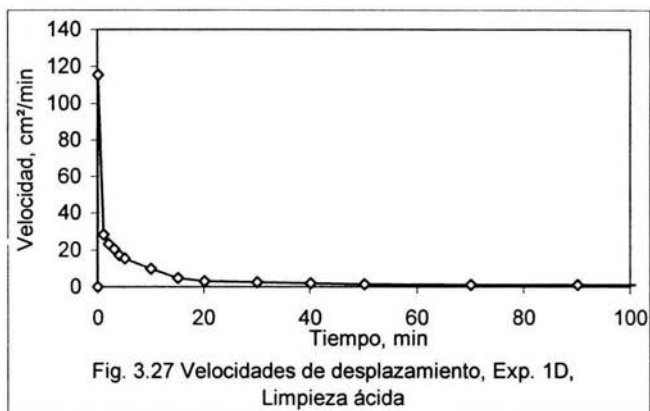
donde V_i es la velocidad del intervalo i y A_i es el área total ocupada por el aceite al tiempo t_i .

Utilizando las velocidades calculadas con la ecuación 3.3 se obtienen las figuras 3.18 a 3.29. El orden de las figuras corresponde con la ronda de limpieza.









A partir de la inspección visual se han identificado etapas de desarrollo en la velocidad para los experimentos identificados con B's y C's, esto es, aquellos que se prepararon con limpieza de tipo básica y que se muestran en las figuras 3.21 a 3.26. La etapa inicial consta de un primer incremento en la velocidad para después decaer. En la segunda etapa la velocidad se mantiene por un periodo de tiempo. Finalmente, en la tercera etapa, la velocidad vuelve a decaer para dar término al proceso de desplazamiento. La formación de etapas es más notorio en los experimentos 2B, 3B y 2C (figuras 3.22, 3.23 y 3.25, respectivamente).

El desarrollo de etapas en la velocidad ya había sido descrito por Hayashi, 2001 para procesos de imbibición espontánea en este tipo de celdas y con una preparación de las superficies análoga a la aquí presentada como de tipo básico. La diferencia principal radica en que los procesos con imbibición espontánea alcanzaban un máximo en la velocidad hacia la mitad del proceso de desplazamiento, el cual estaba relacionado con un desarrollo explosivo en formación de digitaciones. En este trabajo, la velocidad no alcanza un máximo y la formación de digitaciones no es muy grande por lo que es muy probable que el flujo que se establece a la entrada de la celda influya a manera de una ligera sobrepresión, suficiente para incrementar la velocidad de desplazamiento al inicio de cada uno de los experimentos.

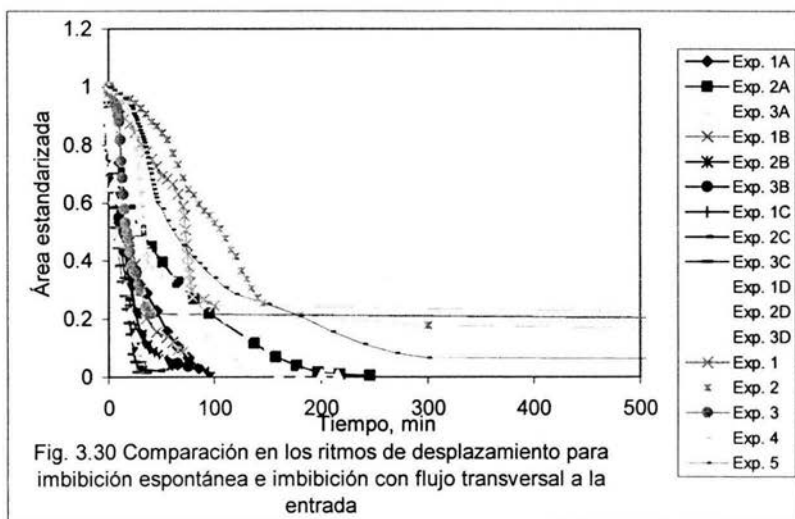
Por otra parte, a diferencia de lo que se observa en los experimentos con una limpieza de tipo básica, los experimentos identificados con las letras A's y D's y que se prepararon con una limpieza de tipo ácida (figuras 3.18 a 3.20 y 3.27 a 3.29), no muestran en general un desarrollo de etapas porque la velocidad es monótona decreciente. En el mejor de los casos existen pequeños incrementos de velocidad al inicio del experimento como en el experimento 1A, 3A y 3D (figura 3.18, 3.20 y 3.29, respectivamente) que pudieran ser indicadores de inicios en el desarrollo de etapas pero éstas desaparecen poco tiempo después.

De ahí que las superficies preparadas con un componente alcalino permiten un desarrollo de etapas que se caracteriza porque la velocidad se mantiene hacia la mitad del proceso de desplazamiento mientras que las superficies preparadas con componentes más bien ácidos presentan un comportamiento en donde a la velocidad decae continuamente con el tiempo.

3.6 Comparación entre los ritmos de desplazamiento de procesos de imbibición espontánea y procesos con flujo a la entrada

De acuerdo a Babadagli y Ershaghi, 1993, el ritmo de desplazamiento en el proceso de imbibición se vería afectado por flujo de agua en las fracturas de la matriz, de tal forma que a medida que aumenta el flujo se predice un retraso en el proceso de imbibición. Ya que las celdas Hele-Shaw son modelos capilares sencillos que intentan simular el comportamiento de la interacción entre la matriz y las fracturas era de esperar que también se viera retrasado el proceso de imbibición conforme aumenta el flujo. Sin embargo, se ha observado que el flujo afecta al proceso de imbibición de manera que el ritmo de desplazamiento es más rápido conforme aumenta el flujo, contrario a lo que se esperaba originalmente.

Por otra parte, también se ha comparado la diferencia en el ritmo de desplazamiento entre los procesos que se han llevado a cabo de manera espontánea (Hayashi, 2001) y en los que se ha aplicado flujo transversal a la entrada. Los experimentos se muestran en la figura 3.30.



Las curvas de desplazamiento correspondientes a imbibición espontánea y que tienen las etiquetas de Exp.1, Exp. 2, Exp.3, Exp.4 y Exp. 5 muestran, en general, desplazamientos con ritmos más lentos que los realizados con flujo a la entrada de la celda, además de que la recuperación de aceite es menor. Se observa también que existe una diferencia importante en el inicio del experimento ya que para los experimentos con flujo de agua se observa una caída en forma exponencial con el tiempo, mientras que es mucho más lenta en los de imbibición espontánea, dando lugar a una curva en forma de S invertida. Es posible de que al inicio del experimento tiene una influencia importante el flujo a la entrada, provocando una ligera sobrepresión suficiente para contribuir en el desplazamiento del aceite en un corto tiempo. Sin embargo, también es importante señalar que se observa en las etapas intermedias gran parecido en el desplazamiento y que incluso uno de los experimentos (experimento 3, figura 3.30) de imbibición espontánea es muy similar a los realizados en este trabajo.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

Conclusiones

Este trabajo es en parte continuación del realizado por Hayashi, 2001 y pretende aportar nuevas expectativas en el desarrollo experimental de los procesos de imbibición. Muchos trabajos en el campo hasta ahora se han centrado en las características de la interface de los fluidos a considerar cuando el proceso se lleva a cabo de manera forzada y muy pocos han estudiado los procesos capilares cuando existen gradientes de presión bajos o en los que se puede incluso considerarse nulo un gradiente de presión. Aunque hace falta precisar todavía algunos aspectos en el procedimiento experimental se ha llegado a diferentes conclusiones que consideramos de relevancia. A continuación citamos algunos de los aspectos que sobresalen en este trabajo.

1. Dinámica interfacial

- 1.1 En general, se observa que la longitud de la interface agua-aceite en el proceso de imbibición depende de la limpieza con que se han preparado las superficies y del tipo de flujo que se presenta a la entrada de la celda, mostrando un incremento grande en la longitud interfacial en el inicio del experimento con flujo de 0.3 ml/min, formación de zonas con igual incremento para los experimentos con flujo de 0.6 ml/min y crecimiento continuo de longitud interfacial para los de 1.0 ml/min.
- 1.2 A partir del análisis en la longitud característica ($\text{Área total ocupada por el aceite} / (\text{longitud total interface agua-aceite})$) se puede decir que los diferentes gastos (0.3 ml/min, 0.6 ml/min y 1.0 ml/min) que se presentan a la entrada de la celda y los diferentes tipos de limpieza no influyen en la manera en que se desarrolla, por lo que es una característica completamente capilar y que tiene que ver con la separación de las celdas.
- 1.3 El desarrollo de la longitud característica tiene un comportamiento similar a una función acumulativa de una variable continua que tiene una densidad de probabilidad normal o gaussiana.

2. Dinámica en el desplazamiento de las fases

- 2.1 El ritmo de expulsión de aceite depende fuertemente del procedimiento de limpieza con que fueron preparadas cada una de las celdas. A medida que se estandariza la superficie con un determinado procedimiento de limpieza más se parecen los ritmos desarrollados y en donde aparentemente no influye el flujo transversal que se presenta a la entrada de la celda.

2.2 El desarrollo de etapas en la velocidad con que se desplazan las fases depende también del procedimiento con que se han preparado las superficies. Cuando la limpieza ha sido de tipo básico se generan tres etapas que se pueden describir de la siguiente manera:

Etapa inicial. Incremento en la velocidad con un posterior decaimiento durante un periodo corto de tiempo.

Etapa intermedia. La velocidad se mantiene con pequeños cambios durante un periodo grande de tiempo.

Etapa final. La velocidad decae para dar término al proceso de desplazamiento.

Apéndice

La prueba de Kolmogorov-Smirnov (Castillo y Ojeda, 1994) requiere que se calculen las diferencias entre la ecuación acumulativa normal y los valores experimentales observados para un valor de X_i dado, es decir, $|F(X_j)-S(X_i)|$ donde F es la función teórica y S la experimental u observada. Sin embargo, también se requiere que esta diferencia sea evaluada entre el valor de la función en un punto X_i y su valor experimental en el punto inmediato anterior X_{i-1} , es decir, $|F(X_j)-S(X_{i-1})|$. Los niveles de confianza utilizados fueron de $\alpha = 0.1$, 0.05 y 0.01 en pruebas de dos extremos. En la tabla A se presentan los valores máximos de estas diferencias, los cuales se tienen que contrastar con los valores críticos para aceptar o rechazar la hipótesis de normalidad a un nivel de confianza dado. En la misma tabla se muestra el valor de alfa para el cual la hipótesis es rechazada.

Las hipótesis propuestas son:

La nula: $H_0: F(X) = N(\mu, \sigma)$ contra La alternativa: $H_a: F(X) \neq N(\mu, \sigma)$

Experimento	Max $\{ F(X_j)-S(X_i) , F(X_j)-S(X_{i-1}) \}$	Nivel de confianza, α			Resultado
		0.1	0.05	0.01	
1A	0.226, n = 17	0.286	0.318	0.381	NSR
1B	0.206, n = 18	0.279	0.309	0.371	NSR
1C	0.521, n = 15	0.304	0.338	0.404	SR, toda α
1D	0.185, n = 20	0.265	0.294	0.352	NSR
2A	0.130, n = 19	0.271	0.301	0.361	NSR
2B	0.192, n = 18	0.279	0.309	0.371	NSR
2C	0.411, n = 19	0.271	0.301	0.361	SR, toda α
2D	0.168, n = 21	0.259	0.287	0.344	NSR
3A	0.235, n = 24	0.242	0.269	0.323	NSR
3B	0.189, n = 18	0.279	0.309	0.371	NSR
3C	0.360, n = 19	0.271	0.301	0.361	SR, $\alpha = 0.05$
3D	0.334, n = 16	0.295	0.327	0.392	SR, $\alpha = 0.05$

NSR = No se rechaza, SR = Se rechaza

Como se observa en la tabla A, existen 2 casos (experimento 3C y 3D) de un total de doce en la que se rechaza parcialmente la hipótesis de normalidad y 2 que se rechazan para cualquier nivel de confianza (experimentos 1C y 2C), los 8 casos restantes tienen un nivel de confianza que permite considerar la viabilidad de la hipótesis de normalidad para la variable (Área total de aceite/Longitud total de la interface agua-aceite).

Bibliografía

1. Aronofsky, J.S., Massé, L. y Natanson, S.G., "A Model for the Mechanism of Oil Recovery from the Porous Matrix Due to Water Invasion in Fractured Reservoirs", *Petroleum Transactions AIME*, T.P. 4703, 213, 1958, 17-19.
2. Adanson, A.W., "Physical Chemistry of Surfaces", John Wiley & Sons, U.S.A. (1976)
3. Babadagli, T. y Ershaghi, I., "Improved Modeling of Oil/Water Flow in Naturally Fractured Reservoirs Using Effective Fracture Relative Permeabilities", *Soc. of Petroleum Eng.*, 1993, 463-476.
4. Bobek, J.E., Mattax, C.C. y Denekas, M.O., "Reservoir Rock Wettability-Its Significance and Evaluation, *Petroleum Transactions AIME*, T.P. 8021, 213, 1958, 155-160.
5. Chuoke, R.L., van Meurs, P. y van der Poel, "The Instability of show, Immiscible, Viscous Liquid-Liquid Displacements in Permeable Media", *Petroleum Transactions AIME*, T.P. 8073, 216, 1959, 188-194.
6. Hayashi Martínez, J.A., "La Imbibición como un Proceso de Desplazamiento de Fluidos en Medios Porosos", Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias, UNAM, junio de 1991.
7. Hayashi, J.A. y Soria, A., "Estudio Experimental del Flujo a Cocorriente y a Contracorriente en Procesos de Imbibición Espontánea, utilizando celdas porosas Bidimensionales", *Avances en Ingeniería Química*, 5(3), 1995, 272-276.
8. Hayashi Martínez, J.A., "
9. Hayashi, J.A. y Soria, A., "Spontaneous Imbibition Processes in Hele-Shaw Cells", *AIChE Journal*, 47(7), 2001, 1513-1523.
10. Kazemi, H. y Merrill, L.S., "Numerical Simulation of Water Imbibition in Fractured Cores", *Soc. Petroleum Eng. J.*, junio (1979), 175-182.
11. Leverett, M.C., "Capillary Behavior in Porous Solids", *Petroleum Transactions AIME*, T.P. 1223, 142, 1941, 152-169.
12. Mattax, C.C. y KYTE, J.R., "Imbibition Oil Recovery from Fractured, Water Drive Reservoir", *Soc. Petroleum Eng. J.*, junio (1962), 177-184.
13. Park, C.W. y Homsy, G.M., "Two-Phase Displacement in Hele Shaw Cells: Experiments on Viscously Driven Instabilities", *J. Fluid Mechanics*, 141, 1984, 257-287.
14. Park, C.W., Gorell, S. y Homsy, G.M., "Two-Phase Displacement in Hele Shaw Cells: Theory", *J. Fluid Mechanics*, 139, 1984, 291-308.
15. Park, C.W. y Homsy, G.M., "The Instability of Long Fingers in Hele-Shaw Flows", *Phys. Fluids*, 28(6), junio (1985), 1583-1585.
16. Pitts E., "Penetration of Fluid into a Hele Shaw cell: The Saffman-Taylor Experiment", *J. Fluid Mechanics*, 97, 1980, 53-64.
17. Saffman, P.G. y Taylor, G., "The Penetration of a Fluid into a Porous Medium or Hele Shaw Cell Containing a more Viscous Liquid", *Proc. Royal Society A*, 245(3), 1958, 312-329.