



UNIVERSIDAD AUTONOMA METROPOLITANA-IZTAPALAPA

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA  
UNIDAD IZTAPALAPA**

**DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA**

**DEPARTAMENTO DE IPH**

**“PROCESOS DE IMBIBICIÓN ESPONTÁNEA  
EN CELDAS HELE-SHAW”**

**TESIS QUE PRESENTA EL ALUMNO:  
M. EN C. JOSÉ AGUSTÍN HAYASHI MARTÍNEZ**

**MATRÍCULA: 92352191**

**PARA LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE:  
DOCTOR EN CIENCIAS**

**ASESOR:  
DR. ALBERTO SORIA LÓPEZ**

**JULIO DEL 2001**

Dedico esta tesis:

Con todo mi amor a mi esposa y amiga de toda la vida, Conchita, y a mi adorada hija Mariana.

A mi querida madre Luz, que tengo la dicha de contar con su presencia.

A mis queridas hermanas Lucha y Tere.

Con el afecto de siempre a mi tío Manuel.

A la memoria de mi querido padre Takasuke Hayashi y de todos los familiares y amigos que se ausentaron de la vida, dejando un recuerdo muy grato en mi.

Agradecimientos:

Muy especialmente:

A las instituciones:

- A) Al IMP por brindarme la oportunidad de crecer profesionalmente, otorgándome la beca para estudiar el doctorado y apoyar el proyecto de investigación doctoral a través de los proyectos FIES 95-92-I y 97-07-I.
- B) A la UAMI por albergarme en su Planta Piloto I, en su Laboratorio de Termodinámica de CBI, en su Biblioteca y Hemeroteca, y en sus hermosas instalaciones abiertas al tiempo.
- C) A la empresa Negromex por apoyarme en los inicios de la investigación doctoral, a través de la beca del Convenio Negromex-UAM. Asimismo, por el boleto de avión a Canadá que me brindó para presentar los resultados preliminares de esta investigación.

A las personas:

- D) Dr. Eduardo Carrillo Hoyo, por iniciar la avalancha que con esta tesis concluye y con la esperanza de un nuevo inicio.
- E) Dr. Francisco Guzmán López-Figueroa, por su inapreciable colaboración y apoyo al desarrollo de este trabajo, sus incontables comentarios, opiniones y sugerencias, no solo han enriquecido este trabajo, sino también mi formación profesional.
- F) Dra. Gretchen Lapidus Levine, por su contribución al artículo titulado: "Spontaneous Imbibition Processes in Hele-Shaw Cells", sus comentarios y sugerencias contribuyeron sustancialmente a mejorar la propuesta inicial.
- G) Dr. Alberto Soria López, por su constancia y dedicación a la dirección de esta tesis, por tolerar mi carácter y mi obstinación.
- H) A Elizabeth Salinas y Rosalío Rodríguez por su interés y respeto a mi trabajo, el cual hizo posible una estupenda colaboración que enriqueció mi formación profesional.
- I) A Gilberto Espinoza Paredes, por todos los momentos de apoyo solidario al desarrollo de mi tesis y su amistad incondicional.
- J) Dr. Alexander S. Balankin, por los comentarios y sugerencias que ayudaron a mejorar sustancialmente esta tesis.
- K) Dr. Rodolfo Camacho Velázquez, por su confianza, dedicación y comentarios que ayudaron a mejorar la versión final de esta tesis.
- L) Dr. Eduardo Ramos Mora, por su activa participación en la revisión, discusión y análisis de esta tesis.
- M) Dr. Jesús Alberto Ochoa Tapia, por sus valiosos comentarios, sugerencias y preguntas que contribuyeron a dar una mejor presentación a los resultados de esta tesis.

N) Dra. Alma América Porres Luna por el apoyo y la confianza que me ha brindado.

Muy cordialmente:

- A) A los Dres. Fernando del Río Haza y Andrés Estrada Alexanders, por compartir a lo largo de cuatro años el increíble espacio de trabajo que representa el Laboratorio de Termodinámica de CBI de la UAMI.
- B) Al Dr. Tomás Viveros García, la M. En C. Ma. Iseo González Christen y el Lic. José Atenco, por todo el apoyo brindado para presentar mi examen de grado.
- C) A los compañeros, Eloy, Orlando, Rodolfo, Benjamín, Edgar, Raúl, Javier, Daimler, Ileana Benítez y Enrique Díaz, por el ambiente de grata convivencia que dan al laboratorio de Termodinámica de CBI de la UAMI.
- D) A la Dra. Dolores Ayala y a los Laboratoristas Alberto Sarmiento e Hipólito, por prestarme las computadoras Mac con las que inicié la captura de las imágenes que procesé y analicé para realizar este trabajo.
- E) A Mario Vásquez, Fabián López y Liliana Astudillo, por su tolerancia y solidaridad en el tiempo que el proyecto D.00084 me ha brindado para finalizar esta tesis.
- F) A los compañeros que administran los proyectos FIES, Lic. Margarita Serrano, Fis. Bernardo Silva, Lic. Alvaro Hernández y Lic. Armando Landa, porque siempre estuvieron dispuestos apoyar y resolver los problemas que la administración de los Proyectos FIES conlleva.
- G) A los compañeros de becas, Tony, Gerardo de Alba Mora, Felipe de Jesús López, Luis Javier Villegas y José Lorenzo Flores, por su noble disposición a ayudar y por todas las molestias que mis trámites requirieron.
- H) Al Ing. Santiago Rivas por su enorme calidad humana que he tenido la oportunidad de ser beneficiario de ella.
- I) A los Lic. Leonor Zamora y Arnaldo Arellanos por su apoyo en el manejo del SAP y su disposición a ayudarme en la administración del Proyecto FIES 97-07-I.
- J) Al Dr. Rufino Díaz Uribe por su apoyo, confianza y amistad, que se refrendaron en las facilidades que me brindó al utilizar el interferómetro Fizeau, del laboratorio de Óptica del Centro de Instrumentos de la UNAM.
- O) A todos los trabajadores de Almacén y Compras de la UAMI, especialmente al a Lic. Martha Aguilar, al Ing. Manuel Cajigas y al Sr. Alejandro Jiménez.
- K) A la asistente administrativa Srita. Guadalupe Arenas, cuya eficiencia en los trámites de viáticos, compras, etc. ayudaron a que los proyectos FIES cumplieran su objetivo.
- L) A las secretarias y asistentes del departamento de IPH, Lourdes, Sandra y Martha

*Para que pueda ser he de ser otro,  
salir de mi, buscarme entre los otros,  
los otros que no son, si yo no existo,  
los otros que me dan plena existencia*

*Octavio Paz*

## Resumen

Este es un trabajo experimental sobre procesos de imbibición espontánea en celdas Hele-Shaw. Estos procesos consisten en el desplazamiento espontáneo de dos fases inmiscibles en un medio capilar o poroso y en ausencia de fuerzas externas.

En la introducción se ubica a este trabajo en el campo de aplicación que le corresponde, que es el estudio de la transferencia de masa y momento entre la matriz y la fractura en yacimientos naturalmente fracturados (YNF). En ingeniería petrolera las funciones de transferencia de masa matriz-fractura son muy útiles en la simulación numérica de YNF porque contribuyen a una mejor descripción de los procesos de desplazamiento de fluidos en la recuperación secundaria de hidrocarburos.

En el capítulo 1 se ha realizado una investigación bibliográfica extensa y selectiva, en donde se presentan los principales resultados de las investigaciones que desde principios del siglo XX influyeron en el desarrollo de la investigación sobre imbibición espontánea. La mayoría de los trabajos aquí presentados son de naturaleza experimental porque es el interés de esta tesis. Sin embargo, también se han incluido trabajos que desarrollan métodos numéricos o teoría para comparar sus resultados experimentales.

En el capítulo 2 se hace una exposición de los motivos por los cuales fue necesario diseñar y aplicar un método experimental específico. Asimismo, se describe con detalle cada uno de los aspectos que fue necesario cubrir para realizar experimentos confiables. También se presenta, a través de imágenes, una muestra de la secuencia fotográfica de cada uno de los experimentos.

En el capítulo 3 se presenta el análisis de los resultados experimentales. Para realizar este análisis se requirió de mucho trabajo previo que consistió en seleccionar, capturar y procesar manualmente 600 imágenes. Los principales resultados se agrupan en 6 categorías, en las cuales el parámetro a variar fue la separación entre los vidrios que forman la celda (0.005 cm, 0.015 cm y 0.075 cm). La primera categoría se refiere a la clasificación de las diferentes formas y estructuras que tienen lugar en el desplazamiento espontáneo a cocorriente de aceite por agua en celdas Hele-Shaw. La segunda se refiere al estudio de reproducibilidad entre un experimento y su repetición, desde el punto de vista de la dinámica del desplazamiento de las fases y de la formación y evolución de estructuras que el movimiento de los fluidos genera. La tercera relaciona la dinámica del desplazamiento espontáneo, con el comportamiento de la interface agua-aceite. La cuarta define el concepto de

velocidad de desplazamiento para identificar dos o tres etapas en el desplazamiento espontáneo de los fluidos. La quinta analiza el comportamiento de variables adimensionales de la velocidad, la longitud y el tiempo, para caracterizar el comportamiento del desplazamiento espontáneo. Finalmente, la sexta categoría, utiliza el concepto de número capilar para caracterizar el comportamiento de las dos o tres etapas de desplazamiento que tiene lugar en el desplazamiento espontáneo.

Las conclusiones resumen y destacan los resultados experimentales y la metodología experimental desarrollada.

El apéndice 1 describe los resultados obtenidos al tratar de relacionar las irregularidades de las superficies internas de los vidrios con el desplazamiento de los fluidos. El apéndice 2 describe a detalle el estudio comparativo entre cada experimento y su repetición, para analizar la repetibilidad dinámica y conformacional de los experimentos. Finalmente, el apéndice 3 concentra el análisis detallado de la identificación de dos o tres etapas en el desplazamiento espontáneo de los fluidos en las celdas Hele-Shaw.

# Índice

Lista de figuras	ii
Lista de tablas	vii
Nomenclatura	ix
Introducción	1
Antecedentes	3
Objetivos	4
1. Capítulo 1. Imbibición espontánea. Estado actual del conocimiento	6
1.1 Estudios sobre imbibición espontánea en tubos capilares	7
1.2 Estudios sobre imbibición espontánea en medios porosos naturales	14
1.2.1 Generalidades	14
1.2.2 Estudios realizados	14
1.2.3 Comportamiento de yacimientos naturalmente fracturados	29
1.2.4 Perspectivas	30
1.3 Estudios sobre imbibición espontánea en celdas Hele-Shaw	31
1.3.1 Generalidades	31
1.3.2 Estudios realizados	33
2. Capítulo 2. Modelos físicos de celdas Hele-Shaw para el estudio de la imbibición espontánea	36
2.1 Antecedentes	36
2.2 Metodología experimental	38
2.2.1 Control del origen de los vidrios y su manufactura	38
2.2.2 Limpieza y restauración de la mojabilidad de las superficies de los vidrios	39
2.2.3 Descripción de las celdas Hele-Shaw a cocorriente	40
2.2.4 Propiedades de los fluidos utilizados	43
2.2.5 Control de la temperatura	43
2.2.6 Mecanismo para la alimentación continua de agua	45
2.2.7 Visualización del experimento	46
2.3 Experimentos	47
2.3.1 Preparativos	48
2.3.2 Desarrollo de los experimentos	49
3. Capítulo 3. Resultados y análisis	73
3.1 Análisis del movimiento de los fluidos y definición de sus estructuras	74
3.2 Análisis de repetibilidad	76
3.2.1 Repetibilidad conformacional y dinámica	79
3.3 Análisis de la dinámica interfacial	85
3.4 Análisis del desplazamiento de los fluidos	99
3.5 Estudio comparativo entre etapas de desplazamiento, tiempos y velocidades	108
3.6 Comportamiento del número capilar ( $Ca$ ) y de la densidad de potencia interfacial ( $DPI$ ) con la separación	110
Conclusiones	113
Perspectivas	119
Apéndice 1 Análisis de la influencia de la microestructura de las superficies de los vidrios (waviness) en el comportamiento del desplazamiento espontáneo	120
Apéndice 2 Repetibilidad conformacional y dinámica	126
Apéndice 3 Prueba Kolmogorov-Smirnov para probar el comportamiento normal de la longitud adimensional de $L_{21}$ , longitud interfacial característica	145
Apéndice 4 Análisis del desplazamiento de los fluidos	147
Bibliografía	154

## Lista de figuras

Figura 1.1. Recuperación de aceite por imbibición espontánea

Figura 2.1. Esquema de la celda Hele-Shaw

Figura 2.2. Vista azimutal de la celda Hele-Shaw

Figura 2.2. Vista lateral del baño isotérmico de aire

Figura 2.4. Dispositivo para alimentación continua de agua a la entrada de la celda Hele-Shaw

Figura 2.5a. Secuencia del desplazamiento en la celda 1A

Figura 2.5b. Secuencia del desplazamiento en la celda 1B

Figura 2.5c. Secuencia del desplazamiento en la celda 1C

Figura 2.5d. Secuencia del desplazamiento en la celda 1D

Figura 2.5e. Secuencia del desplazamiento en la celda 1E

Figura 2.5f. Secuencia del desplazamiento en la celda 1F

Figura 2.5g. Secuencia del desplazamiento en la celda 1G

Figura 2.6a. Secuencia del desplazamiento en la celda 2A

Figura 2.6b. Secuencia del desplazamiento en la celda 2B

Figura 2.6c. Secuencia del desplazamiento en la celda 2C

Figura 2.6d. Secuencia del desplazamiento en la celda 2D

Figura 2.6e. Secuencia del desplazamiento en la celda 2E

Figura 2.6f. Secuencia del desplazamiento en la celda 2F

Figura 2.6g. Secuencia del desplazamiento en la celda 2G

Figura 2.7a. Secuencia del desplazamiento en la celda 3A

Figura 2.7b. Secuencia del desplazamiento en la celda 3B

Figura 2.7c. Secuencia del desplazamiento en la celda 3C

Figura 2.7d. Secuencia del desplazamiento en la celda 3D

Figura 2.7e. Secuencia del desplazamiento en la celda 3E

Figura 2.7f. Secuencia del desplazamiento en la celda 3F

Figura 2.7g. Secuencia del desplazamiento en la celda 3G

Fig. 3.1a. Área y longitud interfacial de la Región Continua, Exp. 1A

Fig. 3.1b. Área y longitud interfacial de la Región Continua, Exp. 1B

Fig. 3.1c. Área y longitud interfacial de la Región Continua, Exp. 1C

Fig. 3.1d. Área y longitud interfacial de la Región Continua, Exp. 1D

Fig. 3.1e. Área y longitud interfacial de la Región Continua, Exp. 1E

Fig. 3.1f. Área y longitud interfacial de la Región Continua, Exp. 1F

Fig. 3.1g. Área y longitud interfacial de la Región Continua, Exp. 1G

Fig. 3.2a. Área y longitud interfacial de la región Continua, Exp. 2A

Fig. 3.2b. Área y longitud interfacial de Región Continua, Exp. 2C

Fig. 3.2c. Área y longitud interfacial de la Región Continua, Exp. 2D

Fig. 3.2d. Área y Longitud Interfacial de la Región Continua, Exp. 2E

Fig. 3.2e. Área y longitud interfacial de la Región Continua, Exp. 2G

Fig. 3.3a. Área y Longitud Interfacial de la Región Continua, Exp. 3A

Fig. 3.3b. Área y Longitud Interfacial de la Región Continua, Exp. 3B

Fig. 3.3c. Área y Longitud Interfacial de la Región Contínua, Exp. 3C

Fig. 3.3d. Área y Longitud Interfacial de la Región Continua, Exp. 3D

Fig. 3.3e. Área y Longitud Interfacial de la Región Continua, Exp. 3E

Fig. 3.3f. Área y longitud interfacial de la Región Continua, Exp. 3F

Fig. 3.3g. Área y longitud interfacial de la Región Continua, Exp. 3G

- Fig. 3.4a. Longitud interfacial característica  $L_{2l}$ , Exp. 1F y 1G
- Fig. 3.4b. Longitud interfacial característica  $L_{2l}$ , Exp. 1A, 1B y 1C
- Fig. 3.4c. Longitud interfacial característica  $L_{2l}$ , Exp. 1D y 1E
- Fig. 3.5a. Longitud interfacial característica  $L_{2l}$ , Exp. 2G
- Fig. 3.5b. Longitud interfacial característica  $L_{2l}$ , Exp. 2A y 2C
- Fig. 3.5c. Longitud interfacial característica  $L_{2l}$ , Exp. 2D y 2E
- Fig. 3.6a. Longitud interfacial característica  $L_{2l}$ , Exp. 3F y 3G
- Fig. 3.6b. Longitud interfacial característica  $L_{2l}$ , Exp. 3A, 3B y 3C
- Fig. 3.6c. Longitud interfacial característica  $L_{2l}$ , Exp. 3D y 3E
- Fig. 3.7a. Estandarización de las curvas de la figura 3.4a, 3.5a y 3.6a
- Fig. 3.7a. Estandarización de las curvas de la figura 3.4a, 3.5a y 3.6a
- Figura 3.7c. Estandarización de las curvas de las figura 3.4c, 3.5c y 3.6c
- Fig. 3.8a. Velocidades de desplazamiento, Exp. 1B
- Fig. 3.8b. Velocidades de desplazamiento, Exp. 1C
- Fig. 3.8c. Velocidades de desplazamiento, Exp. 1D
- Fig. 3.8d. Velocidades de desplazamiento, Exp. 1E
- Fig. 3.8f. Velocidades de desplazamiento, Exp. 1F
- Fig. 8g. Velocidades de desplazamiento, Exp. 1G
- Fig. 3.9a. Velocidades de desplazamiento, Exp. 2C
- Fig. 3.9b. Velocidades de desplazamiento, Exp. 2D
- Fig. 3.8c. Velocidades de desplazamiento. Exp. 2E
- Fig. 3.10d. Velocidades de desplazamiento, Exp. 2G
- Fig. 3.10a. Velocidades de desplazamiento, Exp. 3B

Fig. 3.10b. Velocidades de desplazamiento, Exp. 3C

Fig. 3.10c. Velocidades de desplazamiento, Exp. 3D

Fig. 3.10d. Velocidades de desplazamiento, Exp. 3E

Fig. 3.10e. Velocidades de desplazamiento, Exp. 3F

Fig. 3.10f. Velocidades de desplazamiento, Exp. 3G

Fig. 3.11. Número capilar,  $Ca$ , para las etapas de Inicio y Desarrollo ( $d=0.005$  y  $0.015$  cm) y etapa Final ( $d=0.075$  cm)

Fig. 3.12. Densidad de potencia interfacial,  $DPI$  para las etapas de Inicio y Desarrollo ( $d=0.005$  y  $0.015$  cm) y etapa Final ( $d=0.075$  cm)

Fig. 1A.1. Patrones de interferencia de las celdas 1

Fig. 1A.2. Patrones de interferencia de las celdas 2

Fig. 1A.3. Patrones de interferencia de las celdas 3.

Fig. 2A.1a. Área de la Región Continua, Exp. 1A, 1B y 1C

Fig. 2A.1b. Área de la Región Insular, Exp. 1A, 1B y 1C

Fig. 2A.1c. Área del Total (Continua e Insular), Exp. 1A, 1B y 1C

Fig. 2A.2a. Área de la Región Continua, Exp. 2A y 2C

Fig. 2A.2b. Área de la Región Insular, Exp. 2A y 2B

Fig. 2A.2c. Área del Total (Continua e Insular), Exp. 2A y 2C

Fig. 2A.3a. Área de la Región Continua, Exp. 3A, 3B y 3C

Fig. 2A.3b. Área de la Región Insular, Exp. 3A, 3B y 3C

Fig. 2A.3c. Área del Total (Continua e Insular), Exp. 3A, 3B y 3C

Fig. 2B.1. Área del Total (Continua e Insular), Exp. 1D y 1E

Fig. 2B.2. Áreas del Total (Continua e Insular), Exp. 2D y 2E

Fig. 2B.3. Áreas del Total (Continua e Insular), Exp. 3D y 3E

Fig. 2B.1. Similaridades en forma y posición entre las islas formadas en los

experimentos 1F y 1G en la configuración final

Fig. 2C.2a. Área de la Región Continua, Exp. 1F y 1G

Fig. 2C.2b. Área de la Región Insular, Exp. 1F y 1G

Fig. 2C.2c. Área del Total (Continua e Insular), Exp. 1F y 1G

Fig. 2C.3. Áreas de las Regiones Continua, Insular y Total, Exp. 2G

Fig. 2C.4a. Áreas de Región Continua, Exp. 3F y 3G

Fig. 2C.4b. Área de Región Insular, Exp. 3F y 3G

Fig. 2C.4c. Área del Total (Continua e Insular), Exp. 3F y 3G

## Lista de tablas

Tabla 2.1. Procedimiento de limpieza de los vidrios de la celda Hele-Shaw

Tabla 2.2. Dimensiones del vidrio superior de las celdas Hele-Shaw

Tabla 2.3. Duración de los experimentos realizados, en minutos

Tabla 3.1. Características distintivas de los experimentos de acuerdo a su separación y etapa de desplazamiento

Tabla 3.2. Volúmenes, porcentajes de recuperación y duración total de los experimentos con separación de 0.015 cm

Tabla 3.3. Volúmenes, porcentajes de recuperación y duración total de los experimentos con separación de 0.075 cm

Tabla 3.4. Volúmenes, porcentajes de recuperación y duración total de los experimentos con separación de 0.005 cm

Tabla 3.5. Volumen total de aceite expulsado y porcentaje de recuperación, para la duración total de cada experimento en las tres celdas

Tabla 3.6. Comportamiento de la longitud interfacial característica  $L_{21}$  en la región de decaimiento lineal

Tabla 3.7. Media y varianza de las curvas de las figuras 3.4 a 3.6

Tabla 3.8. Velocidad, alcance y duración de las etapas Inicial, de Desarrollo y Final, para diferentes separaciones en la celda 1

Tabla 3.9. Velocidad, alcance y duración de las etapas Inicial, de Desarrollo y Final, para diferentes separaciones en la celda 2

Tabla 3.8. Velocidad, alcance y duración de las etapas Inicial, de Desarrollo y Final, para diferentes separaciones en la celda 3

Tabla 3.11. Cocientes de la velocidad, el alcance y la duración entre las etapas de Inicio y Desarrollo e Inicio y Final con respecto a la separación

Tabla 3.12. Número capilar de las etapas de Inicio y de Desarrollo, para separaciones de 0.005 y 0.015 cm, y de las etapas de Inicio y Final para separaciones de 0.075 cm

Tabla 1A.1. Evaluación de la magnitud máxima de las irregularidades de las superficies de los vidrios a través de su patrón de interferencia, comparación de ésta respecto a la separación impuesta ( $d$ ) y comparación de las variaciones de la presión capilar debido a las irregularidades con respecto a la presión capilar para la separación impuesta ( $d$ )

Tabla 3A.1. Tabla de valores críticos para  $\alpha = 0.1, 0.5$  y  $0.01$ , y valores observados para la prueba Kolmogorov-Smirnov

## Glosario

Términos utilizados en este trabajo, excepto el capítulo 1

$d$	Separación entre los vidrios de la celda
$A_i$	Área de la celda ocupada por aceite
$L$	Ancho de la celda
$V_i$	Velocidad promedio del desplazamiento de los fluidos en el intervalo $i$ de tiempo
$L_e$	Desplazamiento longitudinal de los fluidos en la etapa, $e$ =Inicio, Desarrollo o Final
$V_e$	Velocidad de desplazamiento promedio en la etapa, $e$ =Inicio, Desarrollo o Final
$t_e$	Duración del desplazamiento de los fluidos en la etapa, $e$ =Inicio, Desarrollo o Final
$Ca$	Número capilar, adimensional
$DPI$	Densidad de potencia interfacial, dina/seg $\text{cm}^2$
$z$	Variable estándar
$\alpha$	Nivel de significación
$\mu$	Viscosidad cinemática, cp
$\mu$	Media
$\rho$	Densidad, $\text{gr}/\text{cm}^3$
$\sigma$	Tensión interfacial y/o superficial, dina/cm
$\sigma$	Desviación típica

## Introducción

El concepto de imbibición se refiere al proceso de desplazamiento de un fluido por otro en un medio capilar o poroso, en donde el fluido de mayor preferencia a mojar el sólido desplaza al de menor preferencia. Hay procesos de imbibición en los cuales esta preferencia es muy notable y no es necesario ejercer ninguna fuerza externa para realizar dicho desplazamiento, en este caso el proceso recibe el nombre de imbibición espontánea porque el fluido desplazante penetra de manera espontánea en el medio capilar o poroso. La absorción de agua en una servilleta, es un ejemplo sencillo de un proceso de imbibición espontánea en el cual el agua desplaza al aire dentro del espacio poroso formado por la servilleta.

En esta tesis se estudian de manera particular los procesos de imbibición espontánea en un medio capilar formado en una celda Hele-Shaw (1898). Estas celdas consisten en dos placas planas de material transparente colocadas paralelamente entre sí y separadas por una distancia muy pequeña, a través de la cual circulan los fluidos. En este trabajo las placas son dos vidrios planos colocados uno sobre el otro y separados entre sí por una distancia menor a 1 mm.

En general, la imbibición espontánea tiene lugar en una gran variedad de aplicaciones industriales, tales como:

- Procesos de absorción de líquidos, tales como la pigmentación de telas y papel.
- Protección de madera con aceites, como la absorción de keroseno en durmientes para vías de ferrocarril y postes telefónicos.
- La impermeabilización de telas, como la aplicación de sustancias a telas.
- Los procesos de lubricación por capilaridad, como es la aplicación de lubricantes en metales que presentan oxidación.
- Las técnicas de recuperación secundaria de hidrocarburos, que consisten en la inyección de agua en yacimientos con roca preferentemente mojable por agua.

Aunque el estudio que se realiza en esta tesis tiene por objeto investigar los mecanismos de desplazamiento espontáneo en procesos de recuperación secundaria, los resultados pueden ser útiles para comprender el comportamiento de cualquiera de los procesos citados con anterioridad.

En la industria petrolera la imbibición espontánea juega un papel muy importante, particularmente en los yacimientos naturalmente fracturados (YNF) y en roca preferentemente mojable por agua. En este caso, el yacimiento está

formado por una red de fracturas que separan a grandes bloques de roca matriz. Si el agua, proveniente de un acuífero o de un proceso externo de inyección de agua, llega a invadir las fracturas, entonces ésta espontáneamente penetra en la roca matriz, expulsando al aceite hacia las fracturas. Por esta razón, la imbibición espontánea es un proceso natural de desplazamiento que se aprovecha en la recuperación secundaria de hidrocarburos. Este intercambio de agua y aceite desde y hacia las fracturas, respectivamente, se denomina interacción matriz-fractura.

En la ingeniería petrolera la mayoría de las investigaciones relacionadas con la imbibición espontánea se han enfocado a estudiar el proceso en muestras de roca de yacimiento, tratando a la roca como una "caja negra" de donde se extrae información relacionada con la velocidad de desplazamiento y la eficiencia de barrido (Brownscombe, 1952, Aronofsky, 1958, Bobek et al., 1958, Mattax y Kyte, 1962, Kleppe y Morse, 1974, Jacquin y Legait, 1984, Cuiec et al., 1990, Zhang et al., 1996). Recientemente se han utilizado técnicas de tomografía y escaneo para estudiar el comportamiento de las fases y su distribución al interior del medio poroso (Lefebvre du Prey, 1978, Bourbiaux y Kalaydjian, 1990, Ramírez, 1998 y Akin et al., 2000). Sin embargo, todavía hay varios aspectos que es indispensable investigar acerca de este fenómeno, que representa la competencia natural de las fuerzas que obran sobre un fluido para desplazarlo o atraparlo dentro de un medio poroso o capilar.

La visualización del proceso de desplazamiento de dos fluidos inmiscibles es un factor fundamental para el estudio de los fenómenos capilares, como lo demuestran la enorme variedad de modelos experimentales utilizados con este fin: tubos capilares (Templeton, 1954 y 1956, Szekely et al., 1971, Good, 1973, Jacquin y Legait, 1984, Slatery, 1985, Zeybeck, 1990), micromodelos de vidrio (Mattax y Kyte, 1961, McKellar y Wardlaw, 1982, Mahers et al., 1981, Peden y Husain, 1985a y b, Chatzis et al., 1983, Campbell, 1983), micromodelos de pasta epóxica (Lenormand y Zarcone 1984, 1985, Celdas Hele-Shaw (Park y Homsy, 1985, Saffman y Taylor, 1958, Perkins y Johnston, 1969, Claridge, 1972, Fanchi, 1989, Paterson, 1981 y 1985, Chuoke, 1959), empacamientos de vidrio triturado (Van Meurs, 1957), cadenas de cavidades capilares de vidrio (Chatzis y Dullien, 1983), etc. Sin embargo, la mayoría de estos modelos no han sido utilizados en el estudio de los procesos de imbibición espontánea, excepto en el caso de los tubos capilares (Washburn, 1921, Joos, 1983 y Mumley, 1984) o cavidades capilares (Chatzis y Dullien, 1983), tal vez porque se piensa que se obtendría poca información adicional a la obtenida en procesos de desplazamiento forzado, o porque en el proceso espontáneo no se tiene control sobre el desplazamiento, y por lo tanto sobre su repetibilidad. No obstante, en este trabajo se intenta demostrar que un procedimiento experimental escrupuloso y

riguroso puede aportar resultados confiables y novedosos para estudiar el comportamiento de las fases en el interior del medio capilar. Aunque el medio poroso real es el medio ideal para realizar estudios que tienen por objetivo conocer más acerca de los mecanismos de desplazamiento en un yacimiento petrolero, ofrece muchas dificultades para apreciar el movimiento *in situ* de los fluidos y puede ser un punto de partida inapropiado para un estudio básico de las fuerzas que gobiernan estos procesos. Es posible que modelos sencillos de medios capilares proporcionen información básica importante que contribuya a la correcta interpretación de estos procesos en medios porosos reales (Kalaydjian y Legait, 1988 y Kalaydjian 1990). Además, es indispensable cubrir el vacío de información que existe en torno a la imbibición espontánea en medios capilares de dos dimensiones (Hayashi y Pérez-Rosales, 1992 y Hayashi y Soria, 1995). Tal vez el camino sea diseñar modelos experimentales *ad hoc* para el estudio del desplazamiento espontáneo. Por esta razón, en este trabajo se construyó un modelo experimental de dos dimensiones que permite visualizar y cuantificar el desplazamiento espontáneo de aceite por agua.

## **Antecedentes**

Los primeros experimentos de imbibición espontánea realizados por el autor de este trabajo, se realizaron en celdas Hele-Shaw rugosas (Hayashi, 1991 y Hayashi y Pérez-Rosales, 1992), en ellos se observaron varios aspectos delicados que requerían ser atendidos para comprender mejor el proceso en cuestión. Estos aspectos dependían de la simplificación del modelo experimental y del establecimiento de un procedimiento experimental más riguroso. Por ejemplo, entre varias de las peculiaridades detectadas, algunas de las más importantes son: a) que el tamaño de las digitaciones era del orden de los modelos utilizados (10 X 10 cm), b) que los efectos a la entrada y salida de la celda afectan el ritmo de desplazamiento de los fluidos (Hayashi y Soria, 1995), c) que era imposible reproducir el comportamiento del desplazamiento y en particular la velocidad de expulsión de aceite, d) era necesario modificar el patrón de la rugosidad para construir una nueva celda, y por lo tanto los experimentos no eran comparables porque la celda era distinta. Por estas razones, entre otras, fue necesario construir un modelo experimental más grande y sencillo, así como desarrollar una metodología más rigurosa, que permitiera realizar los experimentos bajo las mismas condiciones, con el propósito de determinar hasta donde es posible reproducir un desplazamiento espontáneo. Para ello se tuvo especial cuidado en los aspectos que pueden influir fuertemente en el desarrollo de este tipo de experimentos, como son: a) Mantener la temperatura en un valor constante mientras transcurre el experimento, b) Utilizar el mismo juego de vidrios en cada experimento y su réplica, c) Utilizar el mismo procedimiento de limpieza cada vez que se reutilizan los vidrios para construir una celda para un nuevo experimento, d)

Colocar los vidrios en la misma posición cada vez que se construye una celda, e) Utilizar las técnicas de interferometría para evaluar las irregularidades de la superficie de los vidrios (waviness) cada vez que se reconstruye una celda, f) Repetir bajo las mismas condiciones cada uno de los experimentos.

En el primer capítulo de esta tesis se presenta una revisión bibliográfica en donde se exponen los resultados de las investigaciones más importantes en torno al estudio de la imbibición espontánea. En esta revisión se incluyen modelos en tubos capilares, en muestras de roca y en celdas Hele-Shaw. En el capítulo 2 se describe el método experimental utilizado para desarrollar la investigación de esta tesis, se describe la celda Hele-Shaw y la forma en que se evalúa la distribución de la sinuosidades de la superficie de los vidrios (waviness), así como la metodología para restaurar la mojabilidad de los vidrios. También se describe el desarrollo de los experimentos, las propiedades de los fluidos utilizados y el baño isotérmico de aire que se diseñó y construyó para mantener a temperatura constante el experimento. Asimismo, se exponen las técnicas utilizadas para iluminar y videografiar los experimentos. En el capítulo 3 se desarrolla el análisis de los resultados experimentales, en ella se estudia el movimiento de las fases y se definen las estructuras que se generan durante el proceso de desplazamiento; se analiza la repetibilidad de los experimentos mediante una inspección cualitativa y cuantitativa de los resultados; se analiza la dinámica de la interface y su relación con el ritmo de expulsión de aceite y con la evolución de la relación (área con aceite)/(longitud interfacial); se analiza el desplazamiento de los fluidos a través de la velocidad del flujo y sus características; finalmente se analiza la velocidad del flujo para establecer la relación entre fuerzas viscosas y capilares. En las conclusiones de esta tesis se resumen los resultados del análisis del capítulo 3 y se resaltan las aportaciones de esta investigación. Finalmente, en el apéndice A se incluye un análisis sobre la influencia de las sinuosidades naturales de la superficie de los vidrios en el desplazamiento de los fluidos.

## **Objetivo**

Estudiar el comportamiento del desplazamiento espontáneo de aceite por agua en un modelo capilar bidimensional, como es la celda Hele-Shaw, en donde es posible visualizar y evaluar cuantitativamente este proceso, para lograr este objetivo se han considerado los siguientes aspectos:

- a) Probar una metodología diseñada para reproducir los experimentos.
- b) Determinar la influencia que tienen las irregularidades de los vidrios en el comportamiento del desplazamiento espontáneo.
- c) Determinar la influencia que tienen la entrada y la salida de la celda, y la separación entre los vidrios, en los ritmos de expulsión de aceite.

- d) Determinar la relación entre el comportamiento de la interface agua-aceite y el ritmo de expulsión de aceite.
- e) Determinar si la separación entre los vidrios (efectos capilares) tiene algún efecto en el cociente (área ocupada por aceite)/(longitud de la interface agua-aceite), como función del tiempo.

## Capítulo 1

### Imbibición espontánea. Estado actual del conocimiento

La investigación bibliográfica que se presenta en este capítulo no pretende ser exhaustiva, solo se intenta situar a este trabajo en la posición que le corresponde dentro de la enorme cantidad de estudios que se han publicado en relación con la imbibición espontánea. Por esta razón, se escogieron aquellos artículos que han aportado ideas sustancialmente novedosas o ingeniosas y que son comúnmente citados cuando se habla de este tema. Se han ordenado cronológicamente para tener una idea del desarrollo que ha tenido el estudio de la imbibición espontánea y se han escogido los sistemas capilares más sencillos para dar inicio a esta revisión. Aunque las celdas Hele-Shaw son sistemas más sencillos que el medio poroso real, se ha decidido colocar este tema hasta el final, con el propósito de vincularlo directamente al desarrollo de esta investigación.

La imbibición espontánea se define como el proceso de desplazamiento inmisible de un fluido por otro, el cual se puede llevar a cabo de manera natural en medios capilares o porosos y en ausencia de cambios de presión inducidos por agentes externos. Las fuerzas que actúan en estos procesos son la capilar, la viscosa y la gravitacional.

En particular, en esta tesis se discutirá y analizará el proceso de imbibición espontánea en relación con su importancia en la recuperación secundaria de hidrocarburos. En este sentido, la imbibición espontánea es un proceso que solamente puede tener lugar en yacimientos naturalmente fracturados (YNF) y en roca que es preferentemente mojable por agua.

La imbibición espontánea está íntimamente ligada a la propiedad fisico-química denominada mojabilidad. Tradicionalmente esta propiedad ha sido evaluada en relación con el ángulo de contacto entre dos fases inmiscibles (Laplace, 1870, Young-Dupré, 1890) y una superficie sólida, pero esta información no es suficiente cuando se trata de medir el ángulo de contacto entre dos fases inmiscibles y un medio capilar heterogéneo, como sucede en un medio poroso. En este caso, la mojabilidad se determina a través de la capacidad del medio poroso para absorber espontáneamente el fluido mojante y expulsar simultáneamente al no mojante (Bobek, 1958; Cuiec, 1990; Anderson, 1980).

Para los procesos de desplazamiento inmisible, en la actualidad se ha ampliado el concepto de ángulo de contacto, como una propiedad dinámica (Ramé y Garoff, 1996) que cambia continuamente conforme la interface formada por dos fluidos se desplaza sobre un sólido. Sin embargo, este

concepto resulta aún más complicado al aplicarlo en un proceso de desplazamiento inmiscible dentro de un medio poroso.

### 1.1 Estudios sobre imbibición espontánea en tubos capilares

Washburn (1921) desarrolló la ecuación que describe el desplazamiento de dos fluidos inmiscibles dentro de un tubo capilar y extendió este concepto a medios porosos. También realizó algunos experimentos para validar sus ecuaciones.

Las ecuaciones que dedujo Washburn resultan del equilibrio de fuerzas que actúan sobre el flujo de dos fluidos inmiscibles e incompresibles. Consideró que los fluidos siguen la ecuación de Poiseuille, e incluyó el efecto del arrastre, que se expresa como la fuerza que se opone en mayor o menor grado al avance del menisco en la pared (dependiendo del valor que se le asigne al coeficiente de arrastre  $\varepsilon$ ). Esta fuerza típicamente se impone como condición en la pared del tubo, al considerar que la velocidad es cero, cuando se deduce la ecuación de Poiseuille para flujo monofásico. Además, el gradiente de presión incluye las posibles fuentes que pueden dar origen a éste, como son: la presión atmosférica no balanceada ( $P_A$ ), la capilar ( $P_c=2\sigma\cos\theta/r$ ) y la hidrostática ( $P_h=hg\rho-l_s g\rho\sin\psi$ ). Bajo estas consideraciones, la ecuación de Poiseuille se escribe como

$$\frac{dl}{dt} = \frac{\left[ P_A + g \cdot \rho(h - l_s \sin \psi) + \frac{2\sigma}{r} \cos \theta \right] (r^2 + 4\varepsilon r)}{8\mu l} \quad (1.1)$$

donde  $r$  es el radio interno del capilar,  $\psi$  es el ángulo de inclinación del capilar,  $\varepsilon$  el coeficiente de arrastre,  $\rho$  es la densidad del fluido mojante y  $\mu$  su viscosidad.

Para expresar el avance del menisco como función del tiempo, integró esta ecuación y obtuvo una expresión para capilares verticales y otra para horizontales. Para verificar la validez de las ecuaciones realizó dos tipos de experimentos, en el caso vertical utilizó agua destilada como fase mojante y aire como fase no mojante, midió la elevación capilar y a partir de la ecuación para el caso vertical determinó el valor de la tensión superficial ( $\sigma=70.2$  dinas/cm), el cual difiere muy poco respecto a la medición directa 71.03 dinas/cm. Para el caso horizontal, realizó experimentos de desplazamiento espontáneo utilizando mercurio, reportó los valores experimentales del desplazamiento como función del tiempo y también los valores teóricos obtenidos a partir de su ecuación, en este último caso consideró conocidos los valores de  $\sigma$  (440 dinas/cm),  $\mu$  (0.0152 micropoises) y  $\rho$  (valores obtenidos en

la literatura), mientras que, el valor de  $\theta$  fue el parámetro de ajuste entre los valores teóricos y los experimentales, así el valor de  $\theta$  fue de  $112^\circ$ .

Washburn también aplicó su ecuación al caso de imbibición espontánea de líquidos en un medio poroso. Para este caso consideró que el medio poroso está formado por una serie de tubos capilares de diferente diámetro. La ecuación resultante de esta hipótesis la aplicó para predecir el comportamiento de la penetración del agua en muestras de carbón, de acuerdo con los resultados reportados por Cude y Hulett (1920). La aproximación de la ecuación con los experimentos reprodujo aceptablemente el comportamiento lineal de la raíz de  $t$  vs el volumen, al inicio, pero el comportamiento no lineal que se da al final, no lo reproduce. Washburn justificó esta divergencia argumentando la existencia de microporos que no son llenados con agua.

También propuso la medición de la tensión superficial utilizando su ecuación, tanto para capilares verticales como para horizontales.

Chatzis y Dullien (1982) estudiaron los mecanismos que gobiernan el desplazamiento inmiscible en modelos capilares de doble o triple porosidad, también denominados dobletes o tripletes de poro. Los dobletes fueron originalmente sugeridos por Moore y Slobod (1956) y consisten en la unión en paralelo de dos (o tres) cavidades capilares (poros) de diferente diámetro, formando una "Y" (o "Ψ") en cada extremo. Cuando una interface de dos fluidos inmiscibles llega a una de las bifurcaciones tiene la misma posibilidad de moverse a través de cualquiera de las dos cavidades. Sin embargo, la preferencia a transitar por una u otra cavidad depende del tipo de desplazamiento que se lleve a cabo y de las condiciones a la frontera e iniciales.

En una serie de experimentos de drene e imbibición, donde utilizaron modelos experimentales formados por cadenas de dobletes y tripletes de diferente diámetro y conectados en serie, resaltan los resultados que obtuvieron en experimentos de imbibición espontánea en sistemas decano-aire y agua-decano.

En el experimento con decano-aire, observaron que los cambios en el diámetro del poro entre un doblete y otro, contribuyen al entrampamiento de la fase no mojante en las cavidades, particularmente cuando el tamaño entre las cavidades de los dobletes y el capilar que las une es cuatro veces mayor, o más. La principal razón del entrampamiento es la coalescencia de una delgada película de decano que avanza reptando por las paredes de la cavidad y que se une al resto de la fase al salir de la cavidad, en los capilares que unen los dobletes, de manera análoga a lo que sucede en la condensación capilar. Otra razón es la ocurrencia del fenómeno conocido como snap-off (paso de un

fluido a través de una constricción, en presencia de una delgada película de fase mojante que cubre las paredes de la constricción), debido a la existencia de inestabilidades capilares (Roof, 1970; Mohanty et al., 1979, 1980 y Arriola et al., 1983). Para entender mejor el problema del atrapamiento realizaron un experimento de imbibición forzada, utilizando el mismo modelo experimental y aplicando una presión de 25 cm de decano entre la fase mojante y la no mojante. Observaron que el atrapamiento se reduce considerablemente, debido a que el ritmo de imbibición aumenta sustancialmente. La explicación que dan a este hecho es que el tiempo en que la interface viaja de un nodo (uniones entre dobletes) a otro disminuye, reduciendo la formación de la película reptante y evitando la ocurrencia del snap-off, porque la coalescencia de la película de líquido depende del tiempo: es necesario que la película haya alcanzado un espesor crítico, en el nodo, antes de que la inestabilidad se desarrolle. Por ello los cambios en el atrapamiento por snap-off (o choke-off) decrecen si se incrementa el ritmo de desplazamiento.

En el experimento con salmuera-decano, utilizaron salmuera de NaCl al 2% y el mismo micromodelo de cadena de dobletes, el cual primero saturaron con salmuera y después la desplazaron inyectando decano hasta dejar una saturación irreductible de salmuera. En estas condiciones iniciaron el proceso de desplazamiento espontáneo, en donde observaron que el aceite queda atrapado en poros relativamente grandes. Esto se debe principalmente a la movilidad de la salmuera irreductible que se desplaza en forma de película, desarrollando nuevas interfaces fluido-fluido en nodos que la interface precursora ya rebasó. Al comparar con el desplazamiento decano-aire, señalan que en los dobletes donde no existe una tercera cavidad (tripletes) en medio, el desplazamiento es completo. En estos experimentos observan el estrangulamiento (choke-off) de la fase aceite por delante de la interface (agua-aceite) principal, así como el desplazamiento tipo snap-off en las cavidades intermedias de los tripletes.

Jacquin y Legait (1984) realizaron un estudio teórico-experimental de imbibición espontánea en dobletes de tubo capilar, para confirmar la dependencia de la razón de las viscosidades de los fluidos ( $\mu_o/\mu_w$ ) sobre la recuperación final de fluido no mojante. El modelo experimental consiste de dobletes capilares, contruidos con dos tubos capilares de diferente diámetro y colocados paralelamente. El fluido desplazante fue agua destilada y el desplazado octano u otro aceite parafínico pesado (albef). El modelo se colocó horizontalmente para evitar los efectos gravitacionales. Los dobletes fueron perfectamente mojables por agua ( $\cos\theta=1$ ) dentro de un error experimental del 3%. Los experimentos se realizaron en dos tipos de doblete y para dos razones de viscosidad (0.54 y 130).

Teóricamente consideraron flujo de Poiseuille en tubos capilares, tomaron en cuenta las fuerzas inerciales y que la fuerza impulsora del desplazamiento es únicamente la capilar. La solución a estas ecuaciones reproduce aceptablemente los resultados experimentales para las geometrías y las viscosidades antes descritas. Sin embargo, teóricamente resuelven las ecuaciones para una cadena de dobletes conectados en serie.

Experimentalmente observaron el fenómeno de snap-off, lo que ocasiona el entrampamiento de fase no mojante en uno de los capilares. Sin embargo, no se menciona como se representa este fenómeno en la solución de sus ecuaciones.

Mumley et al. (1986) presentaron un trabajo teórico y experimental en dos artículos consecutivos, en el primero se presentan los resultados experimentales y en el segundo los teóricos. En estos trabajos estudiaron el comportamiento del ascenso capilar de interfaces líquido-líquido en tubos capilares.

En los experimentos el fluido desplazante son soluciones agua-glicerina y el desplazado son tres tipos de hidrocarburos (Hexadecano, Heptano, Decano) y tres de tipos de aceites de silicón. Con estos fluidos abarcaron un amplio rango de razón entre viscosidades, que va desde 0.417 hasta  $2.7 \times 10^4$ , para este último utilizaron el sistema silicón-aire. Los tubos capilares eran de vidrio con radios de 0.10 y 0.05 cm, los cuales fueron previamente tratados para obtener tres tipos de superficies: a) secas, b) previamente mojadas y c) previamente mojadas y luego secadas. La posición del menisco,  $h$ , se siguió con ayuda de un catetómetro y de una cámara de filmación, desde que el tubo entraba hasta que el menisco se detenía en  $h_{\infty}$ . Los resultados los presentaron en gráficas de  $h$  vs  $t$ , las cuales son aproximadamente independientes de la viscosidad del fluido no mojante pero muy sensibles a la viscosidad del fluido mojante. Los resultados muestran que el ascenso es muchos más rápido para los tubos previamente mojados que para los tubos secos y para los que fueron previamente mojados y luego secados. Fotografías del menisco muestran un movimiento asimétrico de ascenso en muchos casos, aún en los casos de mejor comportamiento, como sucede en los tubos previamente mojados. También analizaron los resultados utilizando los conceptos de ángulo de contacto dinámico y fuerza de exceso.

Teóricamente analizaron la hidrodinámica del ascenso capilar para el caso de los tubos previamente mojados, en donde una película de fluido desplazante cubre las paredes del capilar. Este análisis se centra en la región cercana a la pared del tubo, donde el menisco interacciona con una película estacionaria que cubre la pared. Utilizaron la teoría de lubricación para predecir el campo de velocidades para el flujo ascendente que converge en la película, para el cual la

forma del menisco cerca de la pared y la fuerza viscosa de arrastre pueden ser calculados. También compararon los resultados teóricos con los obtenidos para el caso del ángulo de contacto dinámico y la fuerza de exceso del artículo experimental. Aunque cualitativamente la teoría concuerda con los experimentos en muchos de los aspectos importantes, también se encontraron algunas discrepancias cuantitativas. Tal vez la razón más importante de esta discrepancia radica en la naturaleza del flujo intermitente (pseudo deslizamiento y frenado) que se observa en la película. Un cálculo aproximado de la disipación de energía en flujo intermitente les proporcionó una mejor concordancia entre los datos y la predicción de la fuerza de arrastre en la película. Concluyeron que la hidrodinámica de este fenómeno en capilares previamente mojados, debe considerar la comprensión del deslizamiento de la línea de contacto formada por tres fases, antes de avanzar sustancialmente en otros aspectos del ascenso capilar.

Joos et al. (1990) estudiaron el comportamiento del ascenso capilar de interfaces aire-líquido en tubos, tanto experimental como teóricamente. Desde el punto de vista teórico utilizaron una expresión empírica propuesta por ellos (1989) para el ángulo de contacto dinámico ( $\theta_d$ ), la cual depende explícitamente del ángulo de contacto estático, la tensión superficial, la viscosidad del líquido y la velocidad del menisco. Esta ecuación difiere de la propuesta por Newman (1968), porque no depende de parámetros ajustables. Esencialmente la ecuación diferencial que describe el ascenso capilar es similar a la obtenida por Washburn, porque se considera flujo tipo Poiseuille y que las fuerzas que actúan son la capilar y la gravitacional, excepto que en este caso se considera un ángulo de contacto dinámico y no un ángulo de contacto fijo, de mojado completo ( $\cos\theta_d = 1$ ).

En los experimentos utilizaron tubos capilares de diferente diámetro, 0.05, 0.1 y 0.2 cm, para capilares de alta precisión y de 0.072 y 0.148 cm para capilares comunes. Los líquidos utilizados fueron aceites de silicón de alta viscosidad que en estado de equilibrio mojan completamente al tubo y cuya tensión superficial es baja (aproximadamente 20 dinas/cm para todos los fluidos). El ascenso fue medido con ayuda de un catetómetro.

Con los resultados experimentales justificaron la validez de su expresión empírica del ángulo de contacto dinámico, obtenida con anterioridad (1989). Para comparar los resultados teóricos con los experimentales, resolvieron la ecuación de Washburn (que desprecia los efectos disipativos en el menisco) y la compararon con su ecuación completa (que considera los efectos disipativos del líquido y del menisco) e incompleta (que no considera los efectos disipativos del líquido). En todos los casos, la ecuación completa es la que mejor se aproxima a los datos experimentales. Observaron que para capilares delgados ( $r = 0.025$  cm) la ecuación de Washburn es la que mejor se aproxima

a su ecuación completa. Mientras que, para capilares gruesos ( $r=0.1$  cm) la ecuación incompleta es la que mejor se aproxima a la ecuación completa. Para capilares intermedios ( $r=0.05$  cm) tanto la ecuación de Washburn como la incompleta se alejan de la ecuación completa, esto puede ser indicativo de que la disipación en el menisco y en el líquido son importantes. Este análisis muestra la transición entre un régimen, en que la disipación del líquido es importante, a otro, en el que la disipación en el menisco es la dominante. Concluyeron que la ecuación de Washburn tiene un comportamiento más aproximado a lo observado en capilares delgados. Mientras que, la ecuación incompleta se aproxima mejor a lo observado cuando se aplica a capilares gruesos (considerando el menisco semiesférico). Finalmente señalaron que las curvas teóricas de la ecuación completa tienen la tendencia a ir por debajo de los datos experimentales a tiempos grandes, lo cual indica que su ecuación es tan solo una aproximación. Aunque no realizaron experimentos, presentan las ecuaciones que pueden ser utilizadas en el desplazamiento capilar en tubos horizontales.

Kalaydjian y Legait (1987a, 1987b, 1988) y Kalaydjian (1990) presentaron desarrollos teóricos y experimentales sobre el proceso de imbibición espontánea en tubos capilares cuadrados. El propósito de su trabajo fue cuantificar el término de acoplamiento viscoso de la ecuación de Darcy para flujo de dos fases\*.

Los experimentos consistieron en acoplar un tubo capilar de sección transversal cuadrada a uno de sección transversal redonda. Inicialmente el sistema se encontraba totalmente saturado con la fase mojante (agua), después introdujeron un glóbulo de fase no mojante (aceite). La diferencia del radio capilar entre un tubo y otro ( $R_{cir} < R_{cuad}$ ) ejerce una fuerza capilar mayor

---

\*Tradicionalmente, la descripción del flujo de dos fases en un medio poroso se ha hecho a través de la ecuación de Darcy, suponiendo que cada fluido se mueve de manera independiente. Las relaciones que ligan a las fases son las permeabilidades relativas y la presión capilar, porque ambas dependen de la saturación de las fases. Las ecuaciones que describen el flujo de fluidos en medios porosos, típicamente surgen de sustituir la ecuación de Darcy en la ecuación de continuidad para cada una de las fases, cuyas variables (presión y saturación de cada fase) están sujetas a cumplir dos condiciones: a) Que la diferencia de presión entre cada par de fases sea igual a la presión capilar entre las fases, es decir,  $P_w - P_{nw} = P_c$  (ecuación (1.10a)) y b) Que a un tiempo dado, la suma de las saturaciones de cada fase sea 1, esto es,  $S_w + S_{nw} = 1$  (ecuación (1.10b)). De esta manera se obtiene un sistema de ecuaciones similares a las ecuaciones (1.9) que se presentan más adelante.

Desde principios de los años 50 un gran número de investigadores (Yuster, 1953, Rusell y Charles, 1959, Rose, 1953, 1960, 1972, 1988 y 2000, Auriault y Sánchez-Palencia, 1986, Whitaker, 1986 y 1994, Kalaydjian, 1987, 1990, Liang y Lohrenz, 1993, Bentsen 1993, 1994, Zarcone y Lenormand, 1994) han profundizado en el problema de la interacción de las fases al fluir dentro de un medio poroso, sobre todo a la luz de fuertes contradicciones que el enfoque tradicional ha mostrado (Bear, 1977). Sin embargo, la medición del acoplamiento y su interpretación teórica no han alcanzado un nivel de desarrollo que permita incorporar esta información en la teoría tradicional. Además, este es un tema de suma complejidad que aún se encuentra en desarrollo.

desde el tubo circular, que ocasiona el desplazamiento del glóbulo hacia el interior del tubo capilar cuadrado. Este desplazamiento termina cuando todo el glóbulo ha ingresado al capilar cuadrado, es decir, cuando las dos curvaturas son iguales, como el sistema es cerrado el flujo neto es nulo. Sin embargo, la fase mojante queda atrapada en las esquinas del capilar cuadrado, lo cual permite medir la magnitud de la fuerza de arrastre entre las dos fases. La fase mojante fue agua destilada y la fase no mojante fueron cuatro tipos de fluidos: Octano-Albelf, Marcol 52, Dodecano-Vaselina y Vaselina, cuyas viscosidades oscilan entre 1 y 100 cp, y sus tensiones interfaciales son aproximadamente de 40 dinas/cm en todos los casos. Los experimentos se realizaron horizontalmente para evitar los efectos gravitacionales y a condiciones ambiente de presión y temperatura (30° C).

Desde el punto de vista teórico utilizaron la ecuación de Stokes para describir el flujo de cada fase y consideraron que el flujo es tipo Poiseuille. Además, partieron de las siguientes hipótesis: a) el capilar es lo suficientemente delgado como para considerar que las componentes de la velocidad ortogonales a la dirección longitudinal son despreciables; b) el flujo es muy lento y es posible despreciar los términos inerciales y los dependientes del tiempo; c) La curvatura de la interface fluido-fluido solo depende de la dirección longitudinal y se describe a través del ángulo de contacto, mediante la ecuación de Mayer (Mayer y Stowe, 1965; Lenormand, 1981; Legait, 1983a,b).

En sus resultados muestran el comportamiento del desplazamiento del glóbulo como función del tiempo, a través del ajuste teórico determinaron la influencia que tiene el ángulo de contacto y su valor para los fluidos que utilizaron, los cuales fueron elegidos adecuadamente para cotejar los resultados con los reportados por Ngan y Dussan (1982). Con las ecuaciones de flujo determinaron las permeabilidades que surgen del arrastre entre las fases, y considerando que el proceso de desplazamiento es igual en ambas direcciones, calcularon las permeabilidades tradicionales y las de arrastre para dos casos: a) cuando la relación de viscosidades es 1 y b) cuando la relación de viscosidades es 10, en ambos casos el ángulo de contacto fue cero.

Ramírez (1998) llevó a cabo experimentos de desplazamiento espontáneo líquido-líquido en tubos capilares circulares. Comparó sus resultados experimentales con las ecuaciones de Washburn. Realizó sus experimentos en tubos capilares de 1 mm de diámetro y de tres longitudes distintas 20, 50 y 78 cm, utilizó agua bidestilada como fase mojante y Soltrol 177 coloreado como fase no mojante. Observó el comportamiento del desplazamiento como función del tiempo. Ajustó la ecuación de Washburn a los datos experimentales, utilizando el ángulo de contacto como parámetro de ajuste. Encontró que el desplazamiento es uniformemente acelerado al inicio y después mantiene una velocidad uniforme. La primera etapa la asocia a la

interacción que tiene la entrada del capilar con las fuerzas viscosa y capilar, en donde la segunda domina sobre la primera, pero después ambas fuerzas se compensan hasta alcanzar una velocidad uniforme (terminal), este fenómeno es más notorio en capilares largos (78 cm).

## 1.2 Imbibición espontánea en medios porosos naturales

### 1.2.1 Generalidades

Como se podrá apreciar a lo largo de esta sección, gran parte de los esfuerzos por comprender los procesos de imbibición espontánea en medios porosos naturales se han enfocado a su utilización en el estudio del comportamiento de los YNF. Esto ocurre así por que a nivel mundial existe un gran número de yacimientos que caen en esta categoría, y México no es la excepción. Sin embargo, una buena parte de la investigación de los últimos 20 años se ha orientado a la simulación numérica de este tipo de yacimientos y muy poca a la investigación básica, tanto teórica como experimental, sobre los procesos de imbibición espontánea.

Existe común acuerdo en describir a un YNF como un sistema formado por fracturas que rodean a los bloques de roca matriz, en donde las fracturas tienen una muy baja capacidad de almacenamiento (volumen muy pequeño) y una alta conductividad al flujo de fluidos. Mientras que, la roca matriz por el contrario, posee una gran capacidad de almacenamiento, pero una muy pequeña conductividad al flujo de fluidos.

### 1.2.2 Estudios realizados

Los primeros experimentos que tratan con los procesos de imbibición espontánea en medios porosos naturales son los realizados por King (1897-1898), Haynes y Keen (1931), Smith (1932 y 1933a,b) y Leverett (1941 y 1942), para determinar la relación entre la curvatura del menisco, formado por las fases mojante y no mojante y un sólido (arena), y el grado de saturación en un empacamiento de arena. En el caso particular de Leverett esta investigación lo conduce a establecer de manera semi-empírica la relación entre presión capilar y saturación, esta expresión es

$$J(S_w) = (p_c / \sigma \cos \theta) \sqrt{\frac{k}{\phi}} \quad (1.2)$$

Donde  $S_w$  es la saturación de la fase mojante,  $p_c$  es la presión capilar,  $\sigma$  es la tensión superficial,  $\theta$  es el ángulo de contacto,  $k$  la permeabilidad absoluta y  $\phi$  la porosidad.

Calhoun (1949) consideró a la imbibición espontánea como un proceso de desplazamiento natural que es gobernado esencialmente por la fuerza capilar y que juega un papel fundamental como mecanismo de recuperación de hidrocarburos en sistemas agua-aceite.

Brownscombe y Dyes (1952) llevaron a cabo los primeros experimentos reportados en la literatura sobre procesos de imbibición natural o espontánea en sistemas líquido-líquido (agua-aceite), utilizando muestras de roca del yacimiento Spraberry. Sus resultados experimentales muestran que la penetración secuencial de agua es una curva cuyo crecimiento tiende a declinar conforme pasa el tiempo, Figura 1.1. Basándose en consideraciones teóricas, que suponen que la saturación de agua permanece constante en la zona invadida, propusieron que el tiempo que requiere la invasión de agua puede ser proporcional al cuadrado de la distancia invadida. Propusieron una prueba piloto basada en los resultados obtenidos en laboratorio.

Recuperación de aceite,  $r$

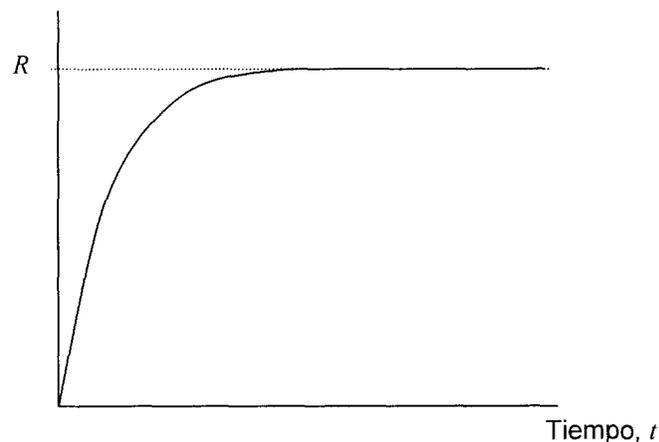


Figura 1.1. Recuperación de aceite por imbibición espontánea

Aronofsky y Natanson (1958) propusieron un modelo empírico basado en suposiciones intuitivas y en resultados experimentales de desplazamiento forzado e imbibición espontánea. Este modelo consiste de una ecuación uniparamétrica que considera el ritmo de expulsión de aceite como función del tiempo, esta ecuación es

$$r = \frac{V_o(t)}{V_i(t)} = R(1 - e^{-\lambda t}) \quad (1.3)$$

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 límite hacia el cual la recuperación tiende a converger,  $t$  es el tiempo transcurrido en el proceso de imbibición y  $\lambda$  es un parámetro que proporciona el ritmo de convergencia. Aronofsky y Natanson también generalizaron la ecuación (1.3) para el caso de un conjunto de  $n$  bloques de roca matriz independientes colocados verticalmente, la cual se ajustó aceptablemente a una serie de observaciones de campo.

Bobek et al. (1958) reportaron que la medición del ritmo de desplazamiento y del volumen de la fase mojante en procesos de imbibición espontánea en muestras de roca, es una prueba confiable y reproducible para la determinación semi-cuantitativa de la mojabilidad preferencial. Pruebas de laboratorio indicaron que la mojabilidad de una muestra de roca de yacimiento puede depender tanto de la composición del aceite crudo como del tipo de roca. Asimismo, pruebas de laboratorio y de campo, indicaron que las técnicas para la extracción de muestras de roca de yacimiento, así como su manipulación, pueden ocasionar cambios significativos en la mojabilidad de la superficie de la roca.

Graham y Richardson (1959) desarrollaron una ecuación para describir el comportamiento del volumen acumulado de aceite que es expulsado por imbibición. Este desarrollo supone que el flujo de ambas fases inmiscibles (mojante y no mojante) es independiente y sigue la ley de Darcy. Sin embargo, no realizan la integración de la ecuación diferencial resultante, se limitan a inspeccionar cualitativamente el comportamiento de esta ecuación, resaltando las siguientes observaciones:

El ritmo de producción de aceite (gasto) es

- Proporcional a la raíz cuadrada de la permeabilidad absoluta  $k$ .
- Proporcional a la tensión interfacial  $\sigma$ .
- Dependiente de una función del ángulo de contacto  $\{f(\theta)\}$ .
- Dependiente de la viscosidad de ambos fluidos.

- Dependiente de una función muy complicada de las permeabilidades relativas y presión capilar características del sistema poroso.

Experimentalmente, desarrollaron dos modelos: a) El primero fue construido utilizando trozos de cuarzo sinterizado formando una placa de forma triangular de 1.5 pulgadas de espesor, con fracturas en dos de los lados. En este caso el principal objetivo fue determinar el efecto que tiene el ritmo de inyección de agua, a través de las fracturas, en la recuperación de aceite. Los experimentos se realizaron para tres diferentes gastos de agua (1.15, 3.60 y 6.31 cc/seg) y dos anchos de fractura. b) El segundo modelo fue construido para escalar los experimentos realizados en el primero, para ello utilizaron un bloque cuadrado de arenisca de 5 pies de lado y 7.5 pulgadas de ancho. Las fracturas en este caso rodean al cuadrado y tienen 33 veces la permeabilidad de la matriz. Encontraron que la presencia de gas reduce el ritmo de imbibición por agua. Estos experimentos no son propiamente de imbibición espontánea, porque a través de las fracturas se inyectó el fluido mojante (agua), ejerciendo una sobrepresión a la entrada de los modelos.

Handy (1960) comparó dos ecuaciones para calcular los gastos por imbibición espontánea de agua en medios porosos, una es la ecuación de difusión y otra es la del desplazamiento tipo pistón. Al graficar ésta última se encuentra que el comportamiento del cuadrado del volumen de agua embebido como función del tiempo, es lineal. Basándose en las ecuaciones que en Hidrología se habían desarrollado para describir el movimiento del agua en subsuelo seco, Handy comparó los resultados obtenidos por ellos con la ecuación de difusión y los que él obtuvo utilizando la ecuación de desplazamiento tipo pistón. La ecuación de difusión la obtuvo partiendo de la ecuación de flujo de fluidos en medios porosos, que resulta de sustituir la ecuación de Darcy en la de continuidad, considerando la presión capilar, esto es

$$\phi \frac{\partial S_w}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \frac{k_w}{\mu_w} \frac{\partial P_c}{\partial S_w} \right) \frac{\partial S_w}{\partial x} \right] \quad (1.4)$$

donde  $\phi$  es la porosidad,  $S_w$  la saturación de agua en el espacio poroso,  $k_w$  es la permeabilidad efectiva del agua,  $\mu_w$  la viscosidad del agua,  $P_c$  la presión capilar,  $t$  el tiempo y  $x$  la distancia. Handy propuso que si el término

$$D = \frac{k_w}{\mu_w} \frac{\partial P_c}{\partial S_w} \quad (1.5)$$

es considerado como coeficiente de difusión, entonces la ecuación para el flujo de fluidos se puede expresar como una ecuación de difusión, esto es

$$\phi \frac{\partial S_w}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial S_w}{\partial x} \right) \quad (1.6)$$

De acuerdo con Handy, hidrólogos como Kirkham y Feng (1949) compararon datos experimentales con soluciones obtenidas suponiendo que  $D$  es independiente de la saturación de agua ( $S_w$ ). Estas soluciones predicen que el volumen de agua embebida vs. la raíz cuadrada del tiempo es lineal. Si bien los resultados experimentales confirmaron esta predicción, la forma del frente de desplazamiento fue muy diferente al que se esperaba obtener por difusión. Klute (1952) obtuvo soluciones numéricas de la ecuación de difusión, considerando a  $D$  como una función de la saturación y utilizando datos experimentales para establecer esta dependencia. Estas soluciones mostraron el desarrollo de un frente muy aproximado con lo observado. Gardner y Mayhugh (1958) encontraron que una  $D$  que depende exponencialmente de la saturación puede describir los datos experimentales muy satisfactoriamente.

La ecuación de desplazamiento tipo pistón fue obtenida de una manera muy similar a la utilizada por Washburn (1921) para describir el desplazamiento espontáneo entre dos fases inmiscibles en un tubo capilar. Por esta razón el resultado que obtiene Handy (1960) es muy similar al obtenido por Washburn.

Handy (1960) estableció dos diferencias importantes al comparar los resultados obtenidos por Kirkham y Feng (1949) con la ecuación de difusión y las obtenidas por él con la ecuación del desplazamiento tipo pistón. La primera es que la ecuación de difusión (considerando que se conocen al menos las permeabilidades en régimen estacionario y la relación presión capilar-saturación) predice que los capilares más delgados son los que se ocupan con agua primero y los más gruesos después. Mientras que, en el modelo tipo pistón, todos los capilares se llenan simultáneamente, dejando atrapado el aire. La segunda diferencia consiste en que la ecuación de difusión considera que para un incremento de longitud en la dirección del flujo, el potencial generado por las fuerzas capilares es disipado por el flujo viscoso.

Con la ecuación de desplazamiento tipo pistón Handy (1960) obtuvo una expresión para obtener curvas de presión capilar en procesos de imbibición espontánea. Utilizando esta expresión y los datos experimentales del desplazamiento espontáneo de aire por agua en muestras de areniscas, logró obtener una familia de curvas de presión capilar como función de la saturación. Esta ingeniosa manipulación tanto teórica como experimental le permitió estimar el comportamiento de la presión capilar como función de la saturación de agua en procesos de imbibición espontánea, partiendo del modelo propuesto por Washburn (1921). Hasta hoy en día no se ha determinado

experimentalmente el comportamiento de la presión capilar como función de la saturación para procesos de imbibición espontánea. La ecuación de Washburn para tubos capilares y la extensión hecha por Handy para medios porosos reales, representan una manera indirecta de determinar la presión capilar como función de la saturación de la fase mojante sin medirlas directamente, sino a través de la información relacionada con el gasto.

Blair (1960) utilizó las ecuaciones que describen el flujo de dos fases en medios porosos, pero particularmente en la forma en que Douglas et al. (1959) las expresaron. Resolvió numéricamente estas ecuaciones para el caso de imbibición por agua y flujo de aceite a contracorriente en medios porosos. Consideró dos casos, el lineal y el radial, en el primero la imbibición tuvo lugar por una de las caras de un medio cilíndrico, mientras que, en el caso radial la imbibición tuvo lugar alrededor de la frontera circular, en ambos casos el aceite salió a contracorriente.

Blair estudió los efectos en los ritmos de imbibición al variar las curvas de presión capilar y de permeabilidad relativa, la viscosidad del aceite y la saturación inicial de agua en el medio poroso. En cada uno de estos casos se obtuvo el ritmo de imbibición de agua, la saturación y la presión de las fases como función del tiempo. Los resultados indican que el tiempo que se requiere para embeber un volumen fijo de agua es proporcional a la raíz cuadrada de la viscosidad del aceite, siempre y cuando la viscosidad del aceite sea menor a la del agua.

Mattax y Kyte (1962) se plantearon establecer una relación explícita entre el comportamiento de la recuperación de aceite por imbibición espontánea y el tamaño del bloque de roca matriz. Teóricamente propusieron una regla de escalamiento para predecir el comportamiento de la recuperación de aceite mediante pruebas de laboratorio. Esta regla supone la correspondencia entre las condiciones a nivel laboratorio y a nivel yacimiento, a un mismo tiempo. El escalamiento se traduce en un cambio de variable adimensional que les permite estandarizar los resultados de un mismo tipo de experimento realizado con muestras de diferente longitud y permeabilidad. Los experimentos se realizaron en muestras de geometría cilíndrica, en donde la superficie expuesta al agua variaba: a) una sola cara plana, b) las dos caras planas y, c) toda la superficie. La variable adimensional es:

$$t \sqrt{\frac{k}{\phi} \frac{\sigma}{\mu_w L^2}} \quad (1.7)$$

generalizando este resultado a la predicción de la recuperación en un yacimiento, establecieron que los tiempos de cada caso son equivalentes utilizando parámetros equivalentes, esto es:

$$t_{\text{modelo}} \left( \frac{k}{\phi} \frac{\sigma}{\mu_w L^2} \right)_{\text{modelo}} = t_{\text{bloque}} \left( \frac{k}{\phi} \frac{\sigma}{\mu_w L^2} \right)_{\text{bloque}} \quad (1.8)$$

Para ilustrar el escalamiento de la recuperación de aceite para un solo bloque de yacimiento, a partir de experimentos de laboratorio, realizaron experimentos de imbibición en un bloque de 9 pies cúbicos y en uno de 3 pulgadas cúbicas y escalaron los resultados utilizando la expresión anterior.

También introdujeron el concepto de "ritmo crítico" para definir el avance vertical comparativo del agua en fracturas y en roca matriz. Para estudiar el comportamiento de este ritmo realizaron una serie de experimentos, de donde concluyeron tres posibles casos: 1) El ritmo crítico es aquel en el que el agua avanza por igual en las fracturas que en la roca matriz; 2) Cuando el ritmo es menor que el valor crítico, el avance del agua en las fracturas es más lento que en la roca matriz, en este caso la recuperación de aceite de la roca matriz no depende del tiempo; 3) Cuando el ritmo es mayor que el valor crítico, el avance del agua en las fracturas es más rápido que en la roca matriz, en este caso la recuperación de aceite de la matriz es menor. Las muestras de roca que utilizaron para estos experimentos fueron las mismas que las utilizadas para los experimentos de escalamiento adimensional.

Para estudiar la influencia del tamaño de la fractura en el proceso de recuperación de aceite por imbibición espontánea, realizaron experimentos utilizando 2 muestras cilíndricas recubiertas por material plástico, excepto por una de sus caras planas. Las caras libres fueron colocadas una frente a otra y separadas por una distancia de 0.005, 0.0025 y 0.001 cm, la cual representa una fractura. Encontraron que para separaciones de 0.0025 y 0.005 cm, el ritmo de recuperación de aceite es casi idéntico. Mientras que, para la separación de 0.001 cm el ritmo de recuperación es más lento, pero finalmente, en todos los casos se alcanzó la misma recuperación total.

Basándose en las pruebas de imbibición realizadas en laboratorio propusieron una metodología para predecir el comportamiento de la recuperación de aceite para sistemas matriz-fractura en yacimientos con invasión por agua. Las suposiciones que hicieron para validar este método son:

- a) El volumen de aceite contenido en las fracturas es despreciable en comparación con el almacenado en la roca matriz.

- b) La resistencia de los fluidos a transitar por las fracturas, es despreciable comparada con la que existe en la roca matriz.
- c) La gravedad no tiene efecto en el flujo de fluidos dentro de la roca matriz.
- d) El agua en las fracturas avanza uniformemente en planos horizontales dentro del yacimiento.

Kleppe y Morse (1974) realizaron un estudio numérico y experimental de la imbibición espontánea. Para el primero utilizaron las ecuaciones del flujo de fluidos en medios porosos (ecuación (1.4)) para cada una de las dos fases consideradas, agua y aceite, estas son:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( ck \frac{k_{ro}}{B_o \mu_o} \frac{\partial P_o}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( ck \frac{k_{ro}}{B_o \mu_o} \left( \frac{\partial P_o}{\partial y} - \rho_o g \right) \right) + q_o = \phi \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{S_o}{B_o} \right) \quad (1.9a)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( ck \frac{k_{rw}}{B_w \mu_w} \frac{\partial P_w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( ck \frac{k_{rw}}{B_w \mu_w} \left( \frac{\partial P_w}{\partial y} - \rho_w g \right) \right) + q_w = \phi \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{S_w}{B_w} \right) \quad (1.9b)$$

sujetas a las siguientes condiciones:

$$P_w = P_o - P_c \quad (1.10a)$$

$$S_o + S_w = 1 \quad (1.10b)$$

donde,  $k_{rw}$  y  $k_{ro}$  son las permeabilidades relativas del agua y del aceite, respectivamente,  $B_w$  y  $B_o$  son los factores de volumen del agua y del aceite, respectivamente,  $\mu_w$  y  $\mu_o$  son las viscosidades del agua y del aceite, respectivamente,  $q_w$  y  $q_o$  son los gastos de agua y aceite, respectivamente,  $\rho_w$  y  $\rho_o$  son las densidades del agua y del aceite, respectivamente, y  $g$  es la aceleración de la gravedad.

Resolvieron numéricamente el sistema de ecuaciones (1.9) (dos dimensiones) en dos formas: Una, mediante la solución secuencial para las presiones y las saturaciones, y la otra, mediante la solución simultánea para las presiones y las saturaciones. Las dos formas de solución fueron utilizadas en varios sistemas con diferente grado de complejidad. El método secuencial es muy rápido y requiere menos área para almacenamiento de información, pero presenta problemas de convergencia cuando los gradientes de presión son muy pequeños.

Para validar los resultados numéricos también desarrollaron trabajo experimental. Utilizaron una muestra cilíndrica de arenisca Berea de 4 pulgadas de diámetro y 4 pies de largo, la cual fue colocada dentro de un tubo de Plexiglass, dejando un espacio anular de 2.5 cm entre el tubo y el núcleo. Este espacio anular representa una fractura que rodea la muestra cilíndrica. Inicialmente el núcleo fue saturado con salmuera, después la salmuera fue expulsada mediante un desplazamiento con keroseno, hasta que se alcanzó una relación agua-aceite superior a 100. Determinaron la saturación mediante la medición de la resistividad, utilizando 7 electrodos colocados regularmente a lo largo del núcleo. Durante el experimento la salmuera fue inyectada desde la base del cilindro de Plexiglass, a gasto constante, los fluidos expulsados se recogieron en la cara superior del cilindro, la cual se encontraba a presión atmosférica. En cada corrida se midió el nivel de la interface agua-aceite en el espacio anular y la producción acumulada de agua y aceite, como función del tiempo. Cada corrida finalizó al alcanzar una relación agua-aceite de 30. Después, el núcleo fue sometido a un nuevo desplazamiento con keroseno hasta alcanzar una relación agua-aceite superior a 100.

De los resultados numéricos y experimentales concluyeron que:

- Es preferible utilizar el modelo numérico que calcula simultáneamente las saturaciones y las presiones para describir los resultados experimentales. Con ambos modelos es posible calcular el flujo de agua y aceite tanto en la fractura como en la matriz. Los resultados numéricos muestran valores estables de saturación y presión en toda una corrida.
- La recuperación final en un yacimiento naturalmente fracturado puede ser afectada notablemente por el ritmo de producción cuando el cociente de conductividades (matriz-fractura) es mayor que 1, a mayores cocientes la recuperación es menor.
- Para fracturas que poseen una décima parte de la capacidad de flujo de la matriz, el efecto sobre el ritmo de producción de aceite es despreciable.
- A ritmos de producción del orden de 0.05 veces el ritmo gravitacional de referencia  $(kA(\rho_o - \rho_w)/\mu_o B_o)$ , los sistemas fracturados se comportan esencialmente como sistemas homogéneos (sin fracturas).
- El aceite no se pierde a causa de los grandes ritmos de producción, pero se puede recuperar una mayor cantidad de aceite si se reduce el gasto.

Lefebvre du Prey (1978) realizó una serie de experimentos con el propósito de estimar el escalamiento de las fuerzas capilar y gravitacional en los bloques de roca matriz de yacimientos naturalmente fracturados. Los experimentos

muestran gran discrepancia entre las curvas de recuperación obtenidas por escalamiento para diferentes tamaños de bloque. Las razones que propuso para explicar esta discrepancia son: 1) las condiciones de flujo en la frontera, 2) las heterogeneidades locales, y 3) las inestabilidades en el barrido del agua.

Para estudiar el comportamiento de la recuperación de aceite por imbibición, consideró un bloque cilíndrico que está saturado de aceite y de agua intersticial y que es sumergido en agua. Analizando la estructura de las ecuaciones del flujo de fluidos en medios porosos (ecuaciones (1.9)) en coordenadas cilíndricas, así como sus condiciones iniciales y a la frontera, consiguió reducir el número de parámetros involucrados a un pequeño grupo de parámetros adimensionales, estos son

- Grupo de tres dimensiones:

Factor de forma:

$$\pi_1 = \frac{H}{L} \sqrt{\frac{k_x}{k_z}} \quad (1.11)$$

Relación de movilidades:

$$\pi_2 = \frac{k_{wmax}}{\mu_w} / \frac{k_{omax}}{\mu_o} \quad (1.12)$$

Relación capilaridad/gravedad:

$$\pi_3 = \frac{P_{ct}}{\Delta\rho \cdot g \cdot H} \quad (1.13)$$

- Saturación inicial de agua.
- Curvas de permeabilidad relativa y de presión capilar reducida.

Donde  $H$  es la altura de la muestra,  $L$  su longitud,  $k_x$  y  $k_z$  son las permeabilidades absolutas en la dirección  $X$  y  $Z$ , respectivamente,  $k_{wmax}$  y  $k_{omax}$  son los valores máximos de permeabilidad efectiva para el agua y el aceite, respectivamente,  $P_{ct}$  la presión capilar de desplazamiento,  $\Delta\rho$  la diferencia en densidad entre el agua y el aceite,  $\mu_w$  y  $\mu_o$  las viscosidades del agua y del aceite, respectivamente y  $g$  la gravedad.

Una vez que se fijan estos parámetros, las funciones de recuperación correspondientes serán las mismas que las que se hubieran obtenido en forma reducida al relacionar las cantidades de aceite recuperado como fracción de la recuperación final, así como de relacionar los tiempos de recuperación con un tiempo deducido de las ecuaciones del problema. Así por ejemplo, al escalar el tiempo en relación con la capilaridad, el tiempo de referencia es:

$$t_c = \frac{H^2 \cdot \phi \cdot \Delta S \cdot \mu_o}{P_{cl} \cdot k_{omax}} \quad (1.14)$$

donde  $\phi$  es la porosidad,  $\Delta S$  el cambio en saturación de alguna de las fases, y los demás parámetros tienen el mismo significado que en las ecuaciones (1.9) y (1.10). Si todos los demás parámetros permanecen constantes, a valores grandes de  $\pi_3$ , cuando predomina la capilaridad, las curvas pueden ser superpuestas. Si el tiempo es escalado en relación con la gravedad, el tiempo de referencia será:

$$t_g = \frac{H \cdot \phi \cdot \Delta S \cdot \mu_o}{\Delta \rho \cdot g \cdot k_{omax}} \quad (1.15)$$

en donde las curvas de recuperación reducida se pueden superponer, si  $\pi_3$  es mínima, lo cual corresponde a un preponderancia de las fuerzas gravitacionales.

Con base en el análisis teórico, Lefebre du Prey (1978) interpretó los resultados experimentales de imbibición en muestras pequeñas, para predecir el comportamiento de los grandes bloques de roca matriz, de donde concluyó que:

- Para bloques pequeños, la capilaridad es el efecto preponderante y el tiempo de recuperación es proporcional al tamaño del bloque.
- Para bloques grandes, la gravedad es el efecto preponderante y el tiempo de recuperación es proporcional al tamaño del bloque.
- Para un yacimiento real, las áreas de influencia de estos efectos pueden ser definidas.

Por otra parte, el estudio destinado a verificar las predicciones de la teoría le permitió concluir que:

- Para muestras pequeñas de igual tamaño que se sometieron a pruebas de variación de la gravedad (en máquina centrífuga), el comportamiento está de acuerdo con la teoría.

- A velocidades grandes de centrifugado, existen diferencias entre la teoría y el experimento. Al parecer, por encima de cierto nivel de gravedad, las propiedades del flujo de dos fases cambia.
- Las pruebas en muestras de diferente tamaño mostraron que las reglas de escalamiento no son confiables al reproducir el comportamiento de la recuperación de un bloque, a partir de pruebas de centrifugado en muestras pequeñas.
- El cambio de la saturación de agua dentro de un bloque sujeto a imbibición y la observación directa de la zona matriz-fractura muestran la existencia de mecanismos muy complejos.
- Aunque la aplicación de la formulación matemática convencional no fue exitosa, algunas causas de esta falta de validez pueden ser: 1) la formulación del problema de imbibición, utilizando ecuaciones macroscópicas generalmente aceptadas para describir problemas de desplazamiento, no es la adecuada, por ejemplo, las relaciones de permeabilidad relativa son válidas cuando ambos fluidos se mueven en la misma dirección, pero no pueden ser utilizadas para describir la imbibición cuando se observa flujo a contracorriente; 2) las condiciones a la frontera para una muestra de laboratorio difieren de las que existen en un yacimiento; 3) las heterogeneidades locales no son escaladas cuando el tamaño de bloque varía.
- Es necesario un estudio detallado de los complejos mecanismos que gobiernan los procesos de imbibición, para desarrollar un método realista de escalamiento que permita obtener las curvas de recuperación de los grandes bloques de yacimientos fracturados.

Kazemi y Merrill (1979) realizaron un estudio numérico y experimental similar al de Kleppe y Morse, en donde ajustaron las curvas de volumen de aceite recuperado y de relación agua-aceite como función del volumen de agua inyectada, a los datos experimentales. En sus experimentos utilizaron muestras de roca Berea de forma cilíndrica de 1 pulgada de diámetro y tres de longitud, y paralelepípedos de 2 pulgadas de ancho, 4 de alto y 4 de largo, y de 2 pulgadas de ancho, 2 de alto y 4 de longitud. Las muestras fueron cortadas longitudinalmente, para simular una fractura entre ellas, y se volvieron a unir sin utilizar ningún separador. Se sellaron totalmente con material epóxico, dejando una entrada y una salida en los extremos longitudinalmente opuestos, al nivel de la fractura. Los experimentos se realizaron orientando la fractura horizontalmente, por la entrada se inyectó agua a diferentes gastos y por la salida se recuperó agua y aceite. Los cortes se hicieron con las muestras previamente encapsuladas en epóxi y saturadas de aceite, en todos los casos las muestras estuvieron inicialmente saturadas con aceite, excepto en un caso (2X2X4 pulgadas), en donde se dejó una saturación residual de agua. Realizaron un total de 8 experimentos, 5 en las muestras cilíndricas (uno de los cuales no se fracturó la muestra), 2 en las muestras de 2X4X4 pulgadas y 1

en la de 2X2X4 pulgadas. Los aceites utilizados fueron Diesel y Decano y la fase mojante fue salmuera de NaCl a 2000 ppm.

El simulador numérico utilizado fue de dos dimensiones y para dos fases, que utiliza un método semi-implícito de diferencias finitas para resolver las ecuaciones. El medio fracturado se simuló considerando dos capas de roca matriz separadas por una delgada capa con alta permeabilidad, alta capacidad de flujo y presión capilar nula, que representaba a la fractura. Las ecuaciones son similares a la (1.9) y (1.10), considerando que los fluidos son incompresibles, lo cual hace que los factores de volumen ( $B_w$  y  $B_o$ ) sean constantes.

Los ajustes que obtuvieron a partir de la simulación numérica se ajustaron razonablemente a las observaciones experimentales, de aquí concluyeron lo siguiente:

- Los ajustes logrados con el simulador mostraron que a velocidades bajas (velocidades intersticiales de 1 pie por día), la imbibición ocasiona que el agua avance más rápidamente a través de la matriz que de la fractura.
- A velocidades intersticiales altas (5 pies por día) o presiones capilares bajas, la aparición de agua a la salida es más rápida en un medio fracturado que en uno sin fracturar.
- Para la muestra de roca no fracturada, la imbibición espontánea mostró una recuperación de aceite equivalente a la obtenida inyectando de manera forzada al agua.
- Las presiones capilares, medidas experimentalmente en las muestras de roca, fueron muy cercanas a las utilizadas en el simulador para obtener los ajustes.
- Algunos experimentos mostraron que cuando el agua entra a la fractura hay un considerable retraso antes de que la imbibición actúe de manera efectiva en el 100% del aceite acumulado en la roca matriz. Sin embargo, esto no se observó en el experimento donde la roca matriz contenía una saturación residual de agua.

Bourbiaux y Kalaydjian (1990) realizaron experimentos de imbibición espontánea a cocorriente, a contracorriente y total en muestras de arenisca en forma de paralelepípedo de sección transversal rectangular. Los experimentos se llevaron a cabo colocando la muestra verticalmente, con sus caras laterales selladas y dejando libres las caras superior e inferior. En los experimentos a cocorriente (2), la cara inferior se puso en contacto con el agua y la superior

con aceite, colocaron un bypass entre ambas caras con el propósito de evitar gradientes de presión. En el experimento a contracorriente, la cara superior se puso en contacto con agua y la inferior con aceite, en este caso no fue necesario colocar un bypass. En el experimento de imbibición total ambas caras, la superior y la inferior se pusieron en contacto con agua y se colocó un bypass entre ambas.

En todos los experimentos midieron la presión y la saturación de las fases como función del tiempo. La distribución de la saturación de las fases a lo largo de la muestra se registró mediante un escaner de absorción de rayos X, que cuenta el número de partículas que emite el aceite dopado. La presión se midió localmente con transductores de presión, a los cuales se les colocaron membranas hidrofílicas e hidrofóbicas. De esta manera pudieron medir la presión del agua y la presión diferencial del agua y el aceite a un mismo nivel de la muestra. Como la presión capilar depende de la saturación, las mediciones de la presión de las fases les permitieron construir una curva de presión capilar para todos los experimentos.

Realizaron una prueba de reproducibilidad del experimento a cocorriente, para checar un ligero decaimiento de la permeabilidad absoluta a la salmuera, que se observó entre el primer experimento a cocorriente y el de imbibición total. Sin embargo, observaron una reproducibilidad satisfactoria que los llevó a obtener una diferencia en la recuperación final del 3%.

De los resultados experimentales concluyeron que:

- El ritmo de producción de aceite en los experimentos a contracorriente es el más bajo de los tres (cocorriente, contracorriente y total).
- En los experimentos a contracorriente se presenta el frente agua-aceite más uniforme y la recuperación final de aceite es la más baja de los tres casos estudiados. Sin embargo, este último punto queda a discusión, porque el origen de esta diferencia puede deberse a heterogeneidades locales.

Desde el punto de vista numérico Bourbiaux y Kalaydjian (1990) utilizaron un modelo en diferencias finitas unidimensional. Las curvas de permeabilidad relativa con las que alimentaron el simulador fueron calibradas para reproducir los valores inicial y final de saturación irreductible de agua y la residual de aceite. Consideraron que un experimento es simulado correctamente cuando el modelo es capaz de reproducir: a) el umbral de producción de aceite en ambas caras de la muestra, b) el ritmo de recuperación de aceite y la evolución local de la saturación como función del tiempo.

De los resultados numéricos concluyeron que:

- La evolución local de las saturaciones y la producción de aceite a través de cada una de las caras de la muestra se reproducen adecuadamente.
- Las permeabilidades relativas a cocorriente no permiten obtener una predicción exacta de los ritmos de recuperación por los flujos a contracorriente.
- La primera mitad del tiempo de recuperación a contracorriente es subestimada en aproximadamente 25%, si se incluyen las permeabilidades relativas a cocorriente en el modelo.
- Las permeabilidades relativas al agua y al aceite a cocorriente deben reducirse en un 30% para obtener un ritmo de recuperación que esté de acuerdo con los resultados experimentales.

Desde el punto de vista teórico, Bourbiaux y Kalaydjian (1990) tomaron en cuenta el acoplamiento viscoso entre los fluidos, generalizando la ecuación de Darcy para hacer predicciones de los flujos a cocorriente y a contracorriente. Esto implica que las movilidades deben ser expresadas como un tensor y por tanto la ecuación de Darcy se debe expresar como:

$$\begin{bmatrix} \bar{u}_1 \\ \bar{u}_2 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \nabla p_1 - \rho_1 \bar{g} \\ \nabla p_2 - \rho_2 \bar{g} \end{bmatrix} \quad (1.16)$$

También consideran que el acoplamiento viscoso tiene efectos opuestos en el flujo a cocorriente y a contracorriente, por esta razón las permeabilidades relativas son menores en el flujo a contracorriente. Asumen como verdadera la relación de reciprocidad de Onsager, es decir,  $\lambda_{12} = \lambda_{21}$ .

Finalmente concluyen que el escalamiento de las pruebas de imbibición espontánea de laboratorio da como resultado un cambio dramático en el papel que juegan los flujos a cocorriente y a contracorriente. Esto probablemente justifica la generalización de la ecuación de Darcy, para predecir los ritmos de recuperación de aceite en procesos de invasión por agua en yacimientos fracturados. Sin embargo, el acoplamiento viscoso tiene que ser cuantificado a partir de experimentos con flujo puramente a contracorriente y flujo a cocorriente no capilar. Estos experimentos se deben realizar con fluidos de igual densidad, para eliminar las fuerzas gravitacionales y asegurar la estabilidad del frente de desplazamiento. Los efectos de las heterogeneidades de dos y tres dimensiones del medio poroso sobre la distribución espacial de fluidos deben ser tomados en cuenta en el modelamiento, para separar los efectos del acoplamiento viscoso de las heterogeneidades macroscópicas.

Ramírez (1998) presentó resultados teóricos y experimentales sobre imbibición espontánea de aceite en muestras de roca Berea. Utilizó una muestra de roca Berea de 3.81 cm de diámetro y 5 cm de longitud, de forma cilíndrica que es

recubierta longitudinalmente con resina epóxica. El desplazamiento a cocorriente de aire por aceite Yododecano se registró mediante un scanner de rayos X. Obtuvo la gráfica del porcentaje del aceite embebido como función del tiempo, a la cual intenta ajustar las ecuaciones de Aronofsky y de Difusión.

En los primeros minutos del experimento observó un ritmo de desplazamiento muy rápido y prácticamente lineal que disminuye drásticamente y se mantiene en un valor aproximadamente constante a lo largo del experimento. Ninguna de las ecuaciones que utilizó se aproximó a los datos experimentales, excepto en la tendencia monótona creciente. Solamente la ecuación de Aronofsky se aproximó a los datos de la etapa inicial, pero la de difusión unidimensional no se aproximó en ningún momento. No obstante, observó un cambio notable en el comportamiento del ritmo de imbibición, a medida que el aceite se desplazaba hacia el interior de la muestra, supone que esto implica un cambio en la relación entre fuerzas viscosas y capilares.

### **1.2.3 Comportamiento de yacimientos naturalmente fracturados**

En el lenguaje de la Ingeniería Petrolera se ha denominado “interacción matriz fractura” a las funciones, algoritmos o artificios que representan la transferencia simultánea y recíproca de agua desde las fracturas hacia la matriz y de aceite desde la matriz hacia las fracturas. Tal vez las únicas expresiones explícitas que se han propuesto son la ecuación de Aronofsky (1958) y la de Kazemi et al. (1976), así como la ampliación del concepto de Aronofsky realizada por de Swaan (1976), Rodríguez (1988) y Kazemi y Gilman (1989). En este sentido, prácticamente todos los simuladores numéricos comerciales han adoptado de manera natural la expresión propuesta por Kazemi en 1976, solo en casos de literatura se ha utilizado la ecuación propuesta por Aronofsky (de Swaan, 1982, Kazemi y Gilman, 1989, Gupta y Civan 1994, Reis y Cil, 1999 y Reis y Haq, 1999). Esto tal vez sucede porque el parámetro  $\sigma$  de Kazemi (factor de forma) solo depende de las dimensiones del bloque de roca matriz, lo que permite una fácil manipulación de este parámetro.

Aún cuando la imbibición es el motor del desplazamiento de fluidos en los procesos de recuperación secundaria, parece razonable suponer que las condiciones bajo las que ocurre este desplazamiento, son las que definen el tipo de proceso de imbibición predominante. Así por ejemplo, en las cercanías de un pozo inyector de agua, el proceso dominante es el de imbibición forzada. Sin embargo, en lugares alejados de algún pozo, la imbibición espontánea puede ser el proceso dominante.

Hay varios escenarios en los que la transferencia de masa matriz-fractura puede llevarse a cabo. Aunque se han propuesto modelos de laboratorio (Mattax y KYTE, 1970) o modelos teóricos de sistemas fracturados (de Swaan, 1976 y Rodríguez, 1988) para describir el comportamiento de los YNF, puede ser que muchos de ellos solo describan una situación muy particular que no siempre puede estar ocurriendo. Por ejemplo, una condición que es indispensable considerar para que tenga lugar la transferencia de aceite desde la matriz hacia la fractura, es que ésta debe estar permanentemente saturada con agua y que el agua debe estar fluyendo constantemente a través de la fractura. Si bien esto puede ser cierto en las cercanías de un pozo inyector, puede ser que en lugares alejados no suceda esta situación.

Por otra parte, las experiencias de campo y de laboratorio han mostrado que las técnicas de recuperación secundaria son más eficientes cuando se permite que los procesos de imbibición espontánea se lleven a cabo libremente, lo cual puede implicar periodos de tiempo muy largos.

Casi todos los trabajos sobre imbibición espontánea en medios porosos se han enfocado a establecer reglas de escalamiento que permitan predecir el comportamiento de un yacimiento con base en los resultados experimentales obtenidos. Sin embargo, en muy pocos casos se ha logrado establecer una relación satisfactoriamente validada por pruebas de campo. Tal vez en todos los casos se adolece de la adecuada representatividad del escalamiento, porque se desconocen los mecanismos que gobiernan el desplazamiento espontáneo de los fluidos. Es un hecho irrefutable que la mayoría de los trabajos realizados consideran al medio poroso como una caja negra y que las reglas de escalamiento se establecen de manera empírica al extrapolar los resultados de laboratorio con lo que se espera debe suceder en el yacimiento. Aunque este es un procedimiento que ha proporcionado cierta utilidad práctica, es muy posible que requiera de aportaciones significativas orientadas a estudiar más cuidadosamente los mecanismos básicos que dan lugar a los procesos de desplazamiento espontáneo.

#### **1.2.4 Perspectivas**

Las investigaciones sobre los procesos de imbibición espontánea en donde se ha considerado al medio poroso como una caja negra, aparentemente han alcanzado un límite en el cual ya muy poco se puede agregar al respecto. Parece ineludible la necesidad de extender las investigaciones a otro ámbito, en donde es imprescindible estudiar a fondo los mecanismos que internamente gobiernan el desplazamiento espontáneo. Los estudios sobre la mojabilidad del medio poroso constituyen una parte importante de este esfuerzo. Sin embargo, no es suficiente si se desconoce la dinámica de los fluidos al desplazarse al

interior del medio poroso. Las nuevas técnicas de tomografía computarizada pueden ayudar notablemente a descubrir y entender estos mecanismos.

Por otra parte, los avances en el estudio de los YNF han sido preferencialmente orientados a la optimización y mejoramiento de la simulación numérica, en donde destacan los algoritmos y el software utilizados para visualizar los resultados numéricos. Desgraciadamente las opciones para representar la interacción matriz-fractura se reducen a la utilización del factor de forma  $\sigma$ , propuesto inicialmente por Warren y Root (1963) y extendido a flujo bifásico agua-aceite por Kazemi et al. (1976). Ante este panorama, surge de manera natural el preguntarse, si el grado de sofisticación y precisión numéricas es compatible con el grado de comprensión y descripción de la interacción matriz-fractura.

Muchos de los conceptos que se estudiaron y definieron hasta los años 50 han venido sufriendo cambios en su manera de entenderse o interpretarse, como ha sucedido con el concepto de permeabilidad relativa, por esta razón es plausible que el estudio de la imbibición espontánea no sea una excepción. Asimismo, existe una tendencia natural a reinterpretar muchos de los conceptos estudiados con anterioridad para dar un sentido unificador a los estudios sobre mojabilidad, presión capilar, ángulo de contacto y permeabilidad, entre otros, que representan y describen el comportamiento del desplazamiento multifásico en medios porosos.

El estudio propuesto en esta tesis está orientado a comprender el comportamiento del desplazamiento espontáneo de aceite por agua en un sistema capilar muy sencillo, que puede aportar información básica y novedosa sobre conceptos conocidos pero poco estudiados.

A lo largo de esta investigación se ha observado que el estudio del desplazamiento espontáneo en sistemas capilares sencillos, puede contribuir a una mejor comprensión del fenómeno capilar, antes de abordar el problema más complejo que representa un medio capilar real. Además puede ser un punto de partida más realista o complementario, para establecer reglas de escalamiento que se aproximen más a la realidad, a través de funciones de interacción matriz-fractura apropiadas.

### **1.3 Estudios sobre imbibición espontánea en celdas Hele-Shaw**

#### **1.3.1 Generalidades**

El principal obstáculo para el estudio de los medios porosos naturales, es la imposibilidad de observar de manera directa el desplazamiento de los fluidos en

su interior. Por esta razón, muchas investigaciones se han orientado a diseñar y construir modelos de laboratorio que tienen por objetivo visualizar el movimiento de los fluidos, tal vez el caso más antiguo sea el de Hele-Shaw (1898). Sin embargo, a partir de los años 50 han florecido una enorme diversidad de modelos para visualizar la dinámica de los fluidos, algunos de los más conocidos son:

- Empacamientos de esferas de vidrio entre dos placas transparentes (Van Meurs, 1957; Perkins y Johnston, 1969; Brock y Orr, 1991).
- Micromodelos de material epóxico (Lenormand y Zarcone, 1985).
- Micromodelos de vidrio (Mattax y Kyte, 1961; Peden y Husain, 1985; Chatzis, 1983, Chatzis et al., 1983; Mahers y Dawe, 1985).
- Dobletes de cavidades capilares (Chatzis y Dullien, 1983).
- Tubos capilares de diferente geometría: Dobletes (Jaquin y Legait, 1984) y tubos cuadrados (Kalaydjian y Legait, 1987a, 1987b y 1988; Kalaydjian, 1990; Kalaydjian, Bourbiaux y Guerillot).
- Celdas Hele-Shaw (Safmann y Taylor, 1958; Bear, Jacobs y Braester, 19xx; Park y Homsy, 1985; Daccord, Nitmann y Stanley, 1986; Claridge, 1972; Perkins y Johnston, 1969).
- Técnicas de rayos X y gamma (Slobod y Claude, 1952; Bourbiaux y Kalaydjian, 1990; Lefevre du Prey, 1978).

Esto refleja la gran importancia que tiene la visualización para el estudio del comportamiento del desplazamiento de fluidos en medios capilares.

Por otra parte, a partir de los avances tecnológicos en torno a la tomografía por resonancia magnética nuclear (RMN), se ha logrado superar de manera definitiva el obstáculo de visualizar el movimiento de los fluidos al interior de un medio poroso natural.

Un gran porcentaje de las investigaciones relacionadas con la visualización del desplazamiento de los fluidos se ha orientado al estudio del desplazamiento forzado, dando muy poca importancia a la imbibición espontánea. Aunque resulta sorprendente esta situación, pocos investigadores han reconocido la importancia de esta carencia (Mumley, 1985). Tal vez esto sucede así porque se piensa que el desplazamiento espontáneo puede ser un caso particular del forzado. Sin embargo, se ha observado que importantes aspectos del desplazamiento espontáneo pueden estar encubiertos en los estudios del forzado, como sucede con el efecto terminal en la medición de las permeabilidades relativas (Osoba et al., 1952 y Richardson et al., 1951).

El estudio de la imbibición espontánea en celdas Hele-Shaw, que en este trabajo se propone, se ha desarrollado pensando que hay muy poca información al respecto y que por lo mismo, es indispensable estudiar este

proceso cuidadosamente. Si bien esta investigación abarca un sistema capilar muy particular, representa tan solo uno de los muchos sistemas capilares que es posible estudiar siguiendo las técnicas propuestas en este trabajo. El propósito a largo plazo, es caracterizar el comportamiento de los procesos de imbibición espontánea en varios sistemas capilares, para inferir las características de una función de transferencia de masa y de momento entre el medio capilar y el exterior.

Con base en los avances recientes en la investigación de la dinámica de interfaces líquido-líquido, la línea de contacto (formada por tres fases líquido-líquido-sólido) es la responsable del desplazamiento de las fases, porque en ella convergen todos los esfuerzos mecánicos producidos por las fuerzas moleculares que actúan entre el sólido y las fases. La dinámica de la línea de contacto es la responsable de la propiedad macroscópica denominada mojabilidad y de que el ángulo de contacto se modifique en el desplazamiento de la interface líquido-líquido, dando lugar al concepto de ángulo de contacto dinámico. Ante esta situación, es imprescindible que los estudios de imbibición espontánea incorporen la dinámica interfacial para entender y cuantificar la magnitud de las fuerzas que dan lugar al desplazamiento espontáneo.

### **1.3.2 Estudios realizados**

Hayashi (1991) y Hayashi y Pérez-Rosales (1992) presentan los resultados teóricos y experimentales del desplazamiento espontáneo de aceite por agua en celdas rugosas Hele-Shaw. En los experimentos utilizaron celdas Hele-Shaw cuadradas, construidas con dos vidrios planos previamente esmerilados por una de sus caras, que al ponerlas en contacto forman un medio poroso irregular. Las celdas tienen una dimensión de 10 cm por lado y el vidrio tiene un espesor de 0.9 mm. La rugosidad de las superficies produce un contraste drástico en el índice de refracción del agua, por lo cual el contraste entre ambas fases es notorio, es decir, no se requiere colorear ninguna de las fases para mejorarlo. En estos experimentos se utilizó agua destilada como fase mojante y gasolina diesel como fase no mojante. Los experimentos se realizaron a contracorriente, pues una vez que la celda fue saturada con aceite, el agua penetró por los cuatro lados de la celda. Aún cuando se hicieron varios experimentos, la mayoría presentó flujo a cocrriente porque la mojabilidad a la entrada de la celda no fue uniforme, por eso solo presentaron los resultados de un solo experimento. El desplazamiento paulatino del agua se registró mediante una cámara fotográfica, y el área invadida con agua se midió aproximadamente utilizando una malla milimétrica. En estos trabajos se presentaron los resultados del porcentaje del aceite recuperado (como fracción del área invadida con agua) como función del tiempo.

Desde el punto de vista teórico, Hayashi (1991) y Hayashi y Pérez-Rosales (1992) consideran que el proceso de desplazamiento es equivalente a un proceso de difusión, en donde la saturación de agua juega el papel de la concentración. Particularmente, para el caso de imbibición a contracorriente, los resultados experimentales ajustan muy satisfactoriamente con los teóricos, donde el parámetro de ajuste es el coeficiente de difusión.

Hayashi y Soria (1995) presentan los resultados experimentales obtenidos en celdas Hele-Shaw a cocrriente y a contracorriente. La técnica para construir las celdas es similar al utilizado en trabajos previos (Hayashi, 1991 y Hayashi y Pérez-Rosales, 1992) pero se construyen modelos separados para estudiar el flujo a cocrriente y a contracorriente. Las celdas son vidrios rectangulares de 17X4 cm y de 0.6 mm de espesor, en el caso a cocrriente se sellan con pegamento epóxico las caras menores del rectángulo y en el caso a contracorriente se sellan tres lados. De esta manera, en el primer caso el agua entra por uno de los lados libres y el aceite sale por el lado libre opuesto. Mientras que, en el segundo caso el aceite se ve obligado a salir por el mismo lado por donde ingresa el agua. El desplazamiento del aceite por el agua se registra fotográficamente y la cuantificación del área invadida con agua se realiza con una malla milimétrica. Los resultados se presentan en gráficas de fracción de aceite recuperado como función del tiempo. Del análisis de las gráficas y de la secuencia fotográfica concluyen que el proceso de desplazamiento espontáneo presenta tres etapas consecutivas con diferente ritmo de desplazamiento. En el caso a cocrriente, la primera etapa está fuertemente influenciada por la entrada de la celda, la segunda no manifiesta influencia alguna, y la tercera muestra la influencia de la salida de la celda. En el caso de la celda a contracorriente, también se observan estas tres etapas, pero la influencia que se observa en la tercera etapa corresponde a la del lado que se encuentra sellado. También concluyen que los mecanismos de desplazamiento son diferentes en cada caso, en el flujo a cocrriente el desplazamiento es frontal y en el caso a contracorriente sugieren que el aceite reptará en forma de película o formando canales por encima del agua y a contraflujo. Por último, observan que la entrada o salida tienen un efecto retardador en el desplazamiento en dos casos: a) mientras el frente no se haya desprendido completamente de la entrada, y b) cuando una parte del frente alcanza la salida y tiene que esperar a que el resto se incorpore, incluso en el caso a contracorriente, porque el lado sellado actúa como una restricción al flujo.

Ramírez (1998) presenta los resultados experimentales y teóricos del desplazamiento espontáneo de aceite por agua en celdas Hele-Shaw lisas. Utiliza celdas cuadradas construidas con vidrio plano de 20X20 cm y 0.9 cm de espesor. Para estudiar el flujo a cocrriente sella con pegamento epóxico dos lados paralelos de la celda. Los fluidos utilizados son agua bidestilada y

aceite Soltrol 170 de Phillips, el cual es coloreado con un pigmento soluble en aceite para contrastar las fases. La separación entre los vidrios se hace colocando cuerda para raquetas de 0.75 mm de espesor en los lados que se sellan. El desplazamiento de los fluidos se registra a través de una videocámara y el área invadida por agua se estima utilizando una malla milimétrica. Los datos se representan en gráficas de la fracción de aceite recuperado como función del tiempo. En el aspecto teórico utiliza tres ecuaciones para comparar los resultados teóricos con los experimentales: a) La ecuación de Washburn modificada para el caso de celdas Hele-Shaw, b) La ecuación de Aronofsky (ecuación (1.3)), y c) La ecuación de Difusión, considerando constante el coeficiente de difusión (ecuación (1.6)).

De las tres ecuaciones obtiene un mejor ajuste utilizando la de Aronofsky, después la de Difusión para un coeficiente de  $0.017 \text{ cm}^2/\text{seg}$ , y finalmente la que más difiere es la ecuación de Washburn. Del análisis del desplazamiento observa que desde el inicio la expulsión de aceite se realiza a contracorriente, a través de las cuerdas colocadas lateralmente (porque las cuerdas son mojables por aceite). Cuando el agua ha ocupado poco más de la mitad de la celda la expulsión se realiza a cocrriente. Los efectos de la entrada y la salida de la celda se observan en el cambio que sufre la curva de recuperación, al inicio el ritmo de expulsión es constante, casi lineal, después se va reduciendo paulatinamente, posiblemente por la competencia con la fuerza viscosa, y finalmente llega a una etapa de agotamiento, que coincide con el arribo del frente de desplazamiento en algún punto a la salida de la celda. Por esta razón, asocia la primera etapa al inicio del proceso en donde la fuerza capilar domina sobre la viscosa. Mientras que, en la segunda etapa del desplazamiento se modifica la relación entre las fuerzas viscosa y capilar. Finalmente, en la tercera etapa el desplazamiento se frena cuando algún punto del frente de desplazamiento arriba a la salida.

## Capítulo 2

### Modelos físicos de celdas Hele-Shaw para el estudio de la imbibición espontánea.

#### 2.1 Antecedentes

En este trabajo de investigación se hizo un análisis cuidadoso de los resultados experimentales obtenidos con anterioridad por Hayashi (1991), por Hayashi y Pérez-Rosales (1992) y por Hayashi y Soria (1995). Se concluyó que era indispensable diseñar un procedimiento experimental riguroso que proporcionara resultados experimentales confiables. Por esta razón, la primera tarea fue detectar las causas que pudieran originar la falta de confiabilidad, para posteriormente diseñar y proponer una metodología que controlara las variables que influyen de manera decisiva en los resultados experimentales, las que se pueden agrupar en tres aspectos:

- a) Simplificación del modelo experimental.
- b) Limpieza y reutilización de las celdas Hele-Shaw.
- c) Estandarización del procedimiento experimental.

**a) Simplificación del modelo experimental.** Fue necesario re-estructurar este punto porque en las celdas rugosas no es posible visualizar en detalle el movimiento de los fluidos y porque los procesos de desplazamiento son más complicados (Hayashi y Soria, 1995), es decir, la rugosidad por sí sola es un factor que debe ser estudiado cuidadosamente. Por esta razón, se optó por construir celdas de vidrio con superficie lisa, esto es, sin esmerilar sus superficies.

Las primeras investigaciones se realizaron intentando obtener flujo a contracorriente, esto es, que el aceite fuera expulsado a contraflujo del ingreso de agua (Hayashi, 1991, Hayashi y Pérez-Rosales, 1992). Sin embargo, resultados posteriores (Hayashi y Soria, 1995) mostraron la importancia de separar ambos flujos para estudiar cuidadosamente los mecanismos que dan lugar a cada uno. Por esta causa los experimentos se realizaron construyendo dos tipos de celda, a cocrriente y a contracorriente.

También se observó que en el desplazamiento espontáneo el tamaño de las digitaciones más grandes (longitudinalmente  $\sim 7$  cm) era del orden de los modelos utilizados por Hayashi, 1991 y Hayashi y Pérez-Rosales, 1992 (10 X 10 cm), y que los efectos a la entrada y salida de la celda afectan el ritmo de desplazamiento de los fluidos (Hayashi y Soria, 1995). Por ello se consideró

que el tamaño mínimo que debía tener una celda debería ser al menos del doble de los considerados inicialmente, es decir, de 20X20 cm y que uno de los objetivos de esta investigación debería ser el estudio del comportamiento del desplazamiento en las cercanías de la entrada y la salida de la celda.

**b) Limpieza y reutilización de las celdas Hele-Shaw.** Los experimentos reportados con anterioridad (Hayashi, 1991, Pérez-Rosales, 1992 y Hayashi y Soria, 1995) permitieron suponer que los procesos de imbibición espontánea en celdas Hele-Shaw podrían aportar información fundamental sobre los mecanismos de desplazamiento natural. Sin embargo, cada experimento era único, porque la celda nunca era reutilizada. Esto se debía, fundamentalmente, a que la mojabilidad de los vidrios se alteraba durante el experimento. De manera que para poder utilizarlos en una segunda ocasión, era necesario volverlos a esmerilar. Esto, desde un punto de vista riguroso, implicaba que en cada ocasión se tenía una celda con una nueva estructura rugosa, es decir, una celda nueva. Por esta razón, se consideraron tres aspectos básicos para la construcción de las celdas lisas Hele-Shaw: i) Todas las piezas de vidrio de las celdas deberían ser cortadas de la misma hoja (Hayashi, 1992b) para evitar, en lo posible, cambios en la mojabilidad ocasionados por variaciones en la composición de la materia prima con que se fabrican; ii) Aplicar un método de limpieza que garantice la reutilización de la celda en un nuevo experimento (Hayashi, 1992b), esto es, restaurar, en lo posible, las propiedades de mojabilidad que tenían las superficies de los vidrios antes del experimento. Este aspecto constituyó uno de los retos más difíciles de superar, porque se probaron varias técnicas que incluían diferentes tipos de solventes, sin obtener resultados favorables. Por esta razón, se decidió utilizar detergente y dos tipos de ácidos, con lo cual se logró restaurar la mojabilidad original de los vidrios. Esta técnica se detalla en la sección de metodología experimental; iii) Como el procedimiento de limpieza requiere que los vidrios sean separados, para realizar un nuevo experimento fue necesario armar la celda nuevamente (Hayashi, 1994, informe FIES). Esto implica que los vidrios deben ser colocados en la misma posición, para ello se hicieron marcas en el vidrio inferior que permitieran ubicar la posición de los vértices del vidrio superior. Además, el material utilizado para obtener una separación constante fue colocado aproximadamente en la misma posición. Aún cuando se siguió cuidadosamente este procedimiento, también se utilizó una técnica óptica (interferometría) que permitiera evaluar los cambios producidos al re-ensamblar los vidrios de la celda.

**c) Estandarización del procedimiento experimental.** En los experimentos previos (Hayashi, 1991, Pérez-Rosales, 1992 y Hayashi y Soria, 1995) no era posible comparar los resultados entre experimentos porque estrictamente cada uno se realizaba en condiciones distintas, esto es, no existía un procedimiento estándar para desarrollar el experimento. El primer aspecto que se consideró

fue que los experimentos deberían realizarse a la misma temperatura y presión, para ello se construyó un baño térmico de aire, cuyas características se detallan en la sección de metodología experimental. El segundo aspecto fue la alimentación continua de fase mojante (agua), para lo cual se diseñó un mecanismo sencillo y eficiente que desde la entrada proporciona agua a la celda, sin generar sobrepresión, este prototipo también se explica detalladamente en la sección de metodología experimental. El tercer aspecto corresponde a la evaporación de las fases mojante y no mojante (aceite), para ello se colocó una campana de vidrio que cubre a la celda y que disminuye considerablemente el problema de la evaporación de las fases y evita la interacción con las corrientes de aire del baño. Finalmente, el cuarto y último aspecto de este tema es la iluminación de la celda, la cual se realiza a través de la celda, esto es, por transmisión y no por reflexión como se hacía con anterioridad, este punto también se explica detalladamente en la sección de metodología experimental.

## **2.2 Metodología experimental**

En esta sección se describen todos los aspectos experimentales que se consideraron para realizar los experimentos de imbibición espontánea a cocorriente en celdas Hele-Shaw lisas.

### **2.2.1 Control del origen de los vidrios y su manufactura**

Las celdas Hele-Shaw fueron construidas utilizando vidrio plano de 0.9 cm de espesor aproximadamente. Las seis piezas, tres de 20X20 cm y tres de 30X40 cm aproximadamente, fueron extraídas de la misma hoja de vidrio (2.40X3.00 mts). La razón de que las piezas provengan de la misma hoja es asegurar que la mojabilidad promedio de las superficies sea aproximadamente la misma. Aunque hay poca evidencia (Hayashi, primer informe anual del doctorado, 1993) para suponer que la composición química de piezas de vidrio de diferente origen puede ocasionar cambios notables en la mojabilidad, existen otras razones para estandarizar las piezas de vidrio, como pueden ser: a) la técnica de fabricación (vidrio flotado), b) el almacenamiento, manejo y transporte (humedad y exposición a la intemperie), c) las sustancias y equipos utilizados en corte y esmerilado de las piezas. El sentido de esta preocupación es que las piezas de vidrio tengan el mismo historial, procurando con ello utilizar piezas que no tengan propiedades químicas y físicas muy diferentes.

Una celda Hele-Shaw está constituida por dos placas planas transparentes (vidrio, lucita, etc.) colocadas paralelamente y separadas entre sí por una distancia muy pequeña por la cual circulan los fluidos. Para asegurar que el

inicio del experimento sea uniforme, el vidrio superior fue trabajado para dejar todos sus cantos pulidos, Figura 2.1.

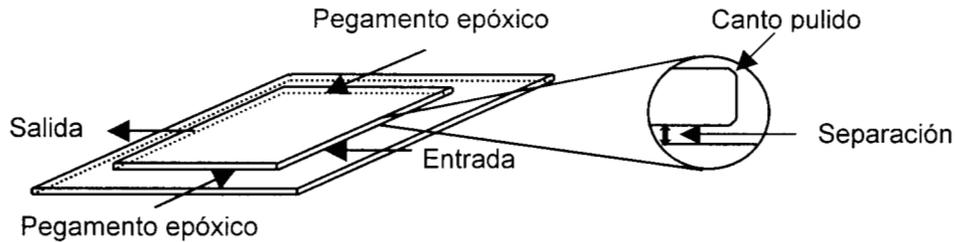


Figura 2.1. Esquema de la celda Hele-Shaw

### 2.2.2 Limpieza y restauración de la mojabilidad de las superficies de los vidrios.

La limpieza de los vidrios es el aspecto más delicado de este trabajo porque está directamente relacionado con la mojabilidad de las superficies internas de la celda. Típicamente se ha definido a la mojabilidad a través del ángulo de contacto que forman tres fases inmiscibles en coexistencia. Sin embargo, éste es un concepto estático que en el caso de interfaces en movimiento puede diferir notablemente (Dussan et al., 1991). Los desplazamientos espontáneos que se reportan en este trabajo generan interfaces muy complicadas, que es posible que no sean reproducidas idénticamente, pero cuya reproducción depende indudablemente de que el espacio capilar y la mojabilidad puedan ser restaurados, para repetir un experimento en las mismas condiciones. Por ello, se intentó restituir las características geométricas y químicas de las superficies, reconstruyendo el espacio capilar bidimensional, colocando los vidrios en la misma posición, en cada ocasión que se reconstruía la celda y desarrollando un riguroso procedimiento de limpieza para recuperar las características químicas de las superficies de los vidrios. Este procedimiento está parcialmente basado en las experiencias reportadas por Dussan et al (1991) para la limpieza de tubos de vidrio Pyrex. Inicialmente los vidrios son sumergidos en un baño de Tinner por doce horas, para eliminar la grasa o los restos de aceite y el pegamento epóxico (cuando ya han sido utilizados), después se introducen en un baño de Extran MA 01 Alcalino (Merck) reducido al 20% con agua bidestilada y a 60° C durante doce horas. Posteriormente, se enjuagan con agua bidestilada y se tallan con ayuda de una esponja, luego se sumergen en mezcla crómica durante doce horas, a una concentración de 100

mililitros de agua y 900 mililitros de ácido sulfúrico por cada 100 gramos de dicromato de potasio. Después, se enjuagan con agua bidestilada y se introducen en ácido clorhídrico rebajado al 50% con agua, durante doce horas, para restaurar el pH de la superficie de los vidrios y se vuelven a sumergir en un baño de Extran al 20% a temperatura ambiente, durante doce horas. Finalmente, los vidrios son enjuagados y sumergidos en agua bidestilada por doce horas, después de lo cual se vuelven a enjuagar tallándolos con una esponja mojada y por último se secan con nitrógeno gas. Este procedimiento permitió estandarizar las propiedades químicas de los vidrios. En la Tabla 2.1 se resumen secuencialmente las etapas de limpieza:

Substancia	Tiempo	Observaciones
Thinner	1 día	Se sumergen en un baño a temperatura ambiente.
Separación manual de los vidrios de la celda		
Extran diluido: 20% Extran + 80% agua bidestilada	½ día	Se sumergen en un baño a 60° C.
Agua bidestilada	10 min.	Se enjuagan sumergiéndolos en agua y tallando suavemente con una esponja.
Mezcla crómica: 100 ml H <sub>2</sub> O + 900 ml H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + 100 gr. K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	½ día	Se sumergen a temperatura ambiente.
Agua bidestilada	10 min.	Se enjuagan sumergiéndolos en agua y tallando suavemente con una esponja.
Acido hidrociorhidrico: 50% H <sub>2</sub> O + 50% HCl	½ día	Se sumergen a temperatura ambiente.
Agua bidestilada	10 min.	Se enjuagan sumergiéndolos en agua y tallando suavemente con una esponja.
Extran diluido: 20% Extran + 80% agua bidestilada	½ día	Se sumergen en un baño a temperatura ambiente.
Agua bidestilada	½ día	Se sumergen a temperatura ambiente.
Agua bidestilada	10 min.	Se enjuagan sumergiéndolos en agua y tallando suavemente con una esponja.
N <sub>2</sub> gaseoso	10 min.	Se secan a temperatura ambiente

Tabla 2.1. Procedimiento de limpieza de los vidrios de la celda Hele-Shaw

### 2.2.3 Descripción de las celdas Hele-Shaw a cocorriente

Una vez que los vidrios han sido lavados, la siguiente etapa es la construcción de la celda Hele-Shaw y posteriormente, la determinación de la magnitud y distribución de las irregularidades de la superficie, que en inglés se denomina "waviness". Esto último permite observar los cambios que sufre la distribución de irregularidades superficiales al re-ensamblar los vidrios de una celda. Así, aunque no sea posible reconstruir una celda exactamente idéntica, al menos se

conocen los cambios que sufre la distribución de las irregularidades de las superficies internas de los vidrios. Por esta razón, se utilizaron técnicas de interferometría para determinar la magnitud de estas irregularidades y evaluar posteriormente el estudio de su influencia en el desplazamiento espontáneo.

### ***Construcción de celdas a cocroriente***

Las celdas Hele-Shaw utilizadas para desarrollar la investigación de esta tesis se construyeron con tres pares de vidrios de aproximadamente 0.9 cm de espesor. Las dimensiones del vidrio inferior son de 30X40 cm y las del superior se presentan en la Tabla 2.2.

<b>Celda</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Largo, cm</b>	19.2	19.9	20.0
<b>Ancho, cm</b>	20.3	20.1	20.0

Tabla 2.2. Dimensiones del vidrio superior de las celdas Hele-Shaw

Las dimensiones del vidrio superior son las que definen las dimensiones del medio capilar al interior de una celda Hele-Shaw. El vidrio inferior fue de mayor tamaño porque a la entrada de la celda se coloca el mecanismo que suministra de manera continua la fase mojante (agua) y a la salida se coloca una presa que colecta la fase no mojante (aceite), Figura 2.2.

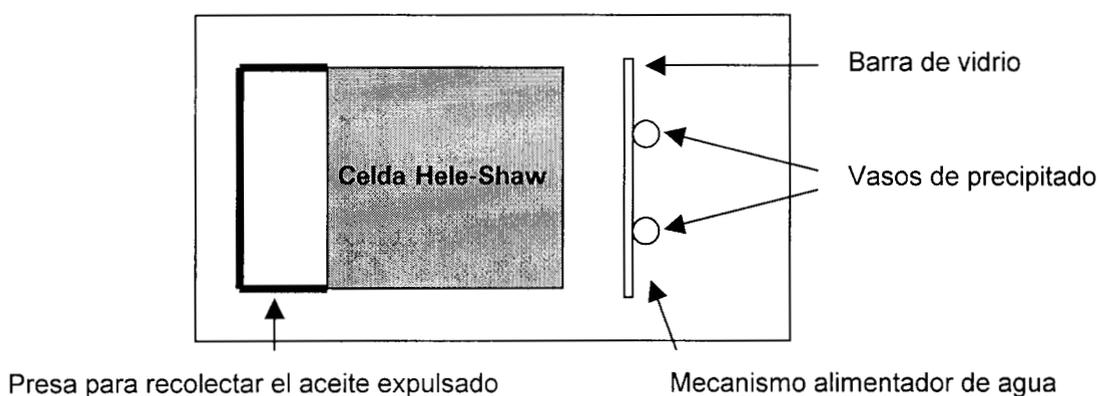


Figura 2.2. Vista azimutal de la celda Hele-Shaw

La separación entre los vidrios se impone utilizando hilo de nylon de tres calibres diferentes, 0.0050, 0.0150 y 0.0750 cm ( $\pm 0.0013$  cm). El vidrio superior se fijó al inferior con pegamento epóxico transparente en dos de las orillas paralelas del vidrio superior y colocando éste en la misma posición cada vez que se reconstruía la celda. Las celdas Hele-Shaw construidas de esta manera tienen una entrada y una salida, que son los lados opuestos de un cuadrado como se puede apreciar en la Figura 2.1.

Cada celda fue desarmada y vuelta a armar hasta seis veces consecutivas utilizando las mismas piezas de vidrio, porque se realizaron siete experimentos, tres utilizando una separación de 0.015 cm, dos utilizando una separación de 0.075 cm y dos utilizando una separación de 0.005 cm. Los experimentos se identificaron con las letras A, B, C, D, E, F y G, respectivamente.

En cada ocasión que la celda se volvía a ensamblar se intentó, en la medida de lo posible, preservar las características del medio capilar. Por esta razón, para colocar el vidrio superior en la misma posición, cada vez que se armaba la celda, se hicieron marcas en el vidrio inferior para identificar la posición de los vértices del vidrio superior. Sin embargo, la posición de los separadores (trozos de hilo nylon) también puede modificar ligeramente la posición vertical entre los vidrios. Este aspecto se cuidó procurando colocar los separadores aproximadamente en la misma posición, pero al parecer no se tuvo demasiado éxito por los resultados que arrojaron los patrones de interferencia, como se analizará en el capítulo 3.

### ***Patrón de interferencia***

Los vidrios de las celdas se utilizaron sin alterar las ondulaciones originales de su superficie, tal y como fueron recibidos de fábrica. El único tratamiento al que fueron sometidos fue el de limpieza, que ya fue descrito. Sin embargo, se recurrió a un método óptico para obtener información acerca de la magnitud y distribución de las irregularidades de las superficies internas de las celdas. Para ello se utilizó un interferómetro de Fizeau, que típicamente se usa para verificar la curvatura de lentes y espejos. Al colocar un vidrio encima de otro, como ocurre en una celda Hele-Shaw, es posible observar el patrón de interferencia que forman las superficies internas de la celda. Este patrón representa la superposición de las irregularidades del vidrio inferior tomando como referencia las irregularidades del vidrio superior, lo que da como resultado un mapa de las diferencias entre ambas superficies. Las franjas del patrón de interferencia son zonas que tienen la misma separación.

El patrón de interferencia proporciona las variaciones en la superficie de los vidrios debidas a la deformación de la superficie, las cuales están superpuestas a la separación base que se impone con el hilo nylon. En general, los patrones obtenidos proporcionaron información sobre la separación de las superficies, excepto para las celdas con mayor separación (0.075 cm), en donde no se observó el patrón.

El conocer aproximadamente la magnitud de las irregularidades de la superficie de los vidrios, tuvo dos propósitos. El primero para verificar si el patrón de interferencia se reproduce entre una celda y otra, como medio para asegurar que las celdas son idénticas. El segundo, para investigar si la magnitud de las irregularidades tiene algún efecto en el comportamiento del desplazamiento espontáneo. Ambos aspectos serán tratados con detenimiento en el apéndice 1.

#### 2.2.4 Propiedades de los fluidos utilizados

Para estudiar el desplazamiento espontáneo de aceite por agua, se utilizó agua bidestilada 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  $\mu\text{m}$  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 bidestilada 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 midió de manera indirecta a través de la medición de la masa y el volumen, los resultados fueron  $\rho_w = 1.0002 \pm 0.00005$  grs/cm<sup>3</sup> para el agua y  $\rho_o = 0.7735 \pm 0.00005$  grs/cm<sup>3</sup> para el Soltrol coloreado.

#### 2.2.5 Control de la temperatura

Para realizar los experimentos a temperatura controlada, se diseñó y construyó un baño térmico de aire, dentro del cual se colocó la celda Hele-Shaw. El baño consiste en un recipiente en forma de paralelepípedo rectangular fabricado con vidrio plano de 0.6 mm de espesor, y con dimensiones de 100X50X50 cm. El

control de la temperatura se realizó utilizando un termómetro 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. Durante la realización de cada experimento la celda fue cubierta con una campana de vidrio, para evitar que las corrientes de aire producidas por los ventiladores alteraran el desarrollo del mismo, así como para minimizar la evaporación de los líquidos. Con el uso de esta campana, se procuró realizar los experimentos bajo condiciones de presión de vapor saturado a temperatura de  $25.0^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ), la Figura 2.3 muestra un diagrama del baño térmico y de los accesorios utilizados. Independientemente del termómetro que controla la temperatura del baño, se colocaron tres termopares para monitorear la temperatura de la celda y los fluidos, uno se colocó en el mecanismo alimentador de agua, haciendo contacto con ella, otro dentro de la campana, registrando la temperatura del aire, y el tercero junto al termómetro que controla la temperatura del baño. Sin embargo, la única temperatura que se registró de manera continua fue la que medía el primero. Los termopares se calibraron utilizando el método del punto triple, la resolución del medidor de temperatura marca Bailey Instruments es de décimas de grado.

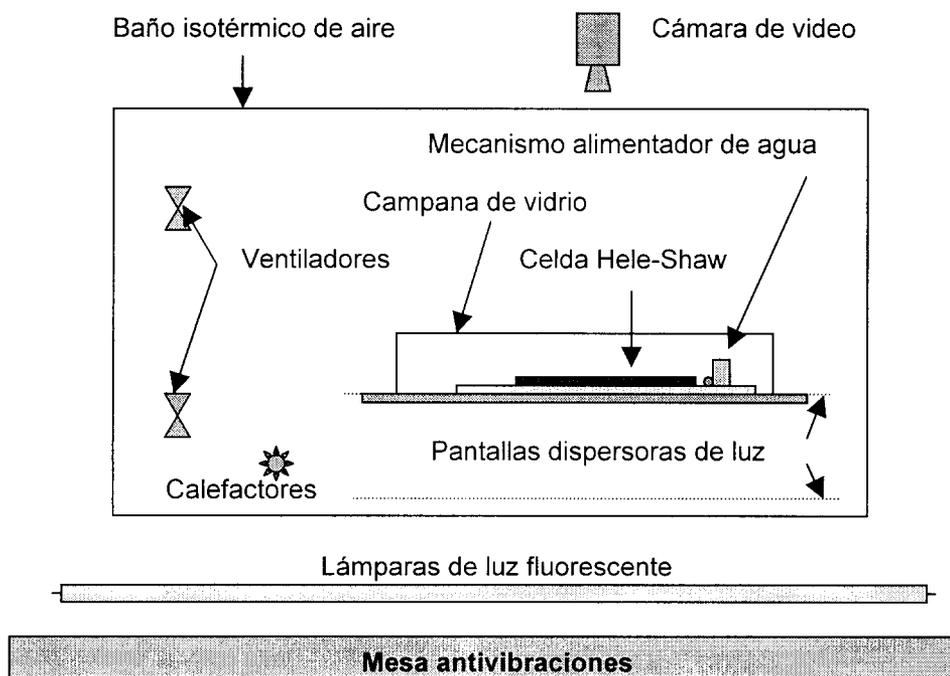


Figura 2.2. Vista lateral del baño térmico de aire

## 2.2.6 Mecanismos para alimentación continua de agua y para recolección de aceite

Una parte muy importante en el diseño de los experimentos consistió en idear la forma en que el agua debería ser suministrada a la celda, sin generar una sobrepresión a la entrada al inicio y durante el experimento. Esto se logró utilizando un diseño que funciona de manera independiente y que no requiere de atención alguna o mantenimiento por parte del investigador en el curso del experimento. Este mecanismo aprovecha las propiedades de capilaridad en los vértices del vidrio y su principio de funcionamiento es el mismo que el que se utiliza en los surtidores de agua que tiene el garrafón invertido. Consiste de una barra delgada de vidrio (de tamaño ligeramente mayor a la longitud de la entrada de la celda) pegada a dos vasos de precipitado colocados de cabeza, los cuales almacenan el agua que se requiere durante el experimento, Figura 2.4. Antes de que el experimento comience, los vasos se llenan con agua y se cubren con un trozo de película plástica, como la utilizada para cubrir los alimentos, con ello se pretende que al invertir los vasos el agua no se derrame. Después, los vasos invertidos se colocan sobre el vidrio inferior de la celda, del lado que corresponde a la entrada, posteriormente, se retiran los trozos de película plástica deslizándolos suavemente entre el vidrio inferior de la celda y la boca invertida del vaso. Es posible que al principio se derrame un poco de agua pero, casi de manera inmediata, la presión atmosférica y la presión al interior del vaso se equilibrarán. En estas condiciones, el agua derramada rodea la barra de vidrio y las bocas invertidas de los vasos. Para dar inicio al experimento, se aproxima cuidadosamente la barra a la entrada de la celda y de manera natural el agua moja al vidrio superior, obligando al aceite que se encuentra en la entrada a flotar sobre el agua. De esta manera, la entrada queda permanentemente cubierta por una ligera capa de agua que se cuelga mojando el vidrio superior y la barra de vidrio. Este mecanismo es autocontrolado porque, a medida que el agua penetra en la celda, se reduce la cantidad que rodea el lado opuesto de la barra y las bocas de los vasos. Esta reducción requiere un flujo que compense la falta de agua, pero tal flujo desde el vaso sólo es posible cuando se genera una burbuja de aire que ingresa por el labio del vaso y que obliga a desdalojar un volumen equivalente de agua, el cual mantiene inundada la entrada de la celda de manera permanente y además restituye el equilibrio de la presión.

En el proceso de desplazamiento a cocorriente el aceite es expulsado hacia la salida de la celda, y es necesario recolectarlo de alguna manera para evitar derrames de aceite sobre el papel albanene. Para ello se construye una pequeña presa alrededor de la salida, colocando pequeñas barras de plástico que se fijan al vidrio inferior y se unen entre sí con pegamento epóxico. Si el

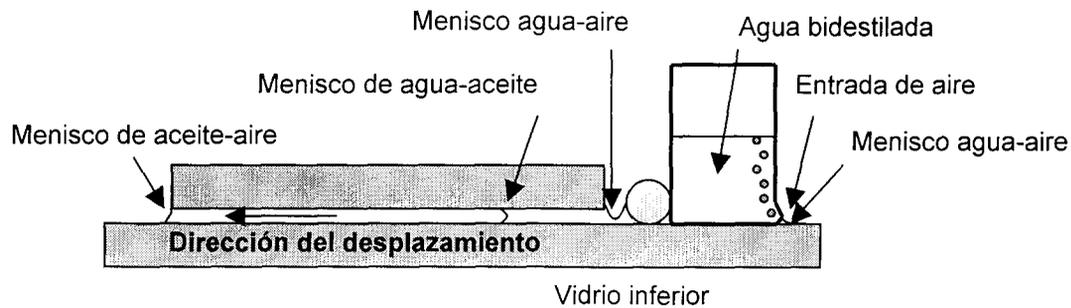


Figura 2.4. Dispositivo para alimentación continua de agua a la entrada de la celda Hele-Shaw

volumen de aceite expulsado llegara a cubrir la salida de la celda, sería necesario extraer parte de este aceite para evitar una sobrepresión ejercida por nivel hidrostático del aceite a la salida. Sin embargo, esto nunca fue necesario hacerlo, porque en ningún caso el aceite expulsado rebasó la capacidad de la presa, Figura 2.2.

### 2.2.7 Visualización del experimento

Para visualizar los experimentos de imbibición espontánea se diseñaron y construyeron los dispositivos necesarios para dar seguimiento al desplazamiento de los fluidos dentro de la celda, para ello fue necesario considerar dos aspectos básicos, iluminación y filmación.

#### *Iluminación*

La iluminación de la celda debe ser muy homogénea para asegurar que la distribución de luz sea uniforme en toda la celda, esto es, que cada sitio reciba luz con la misma intensidad. La iluminación se hizo de manera tal que la luz atravesara la celda, iluminando por debajo de ella con lámparas fluorescentes de 1.15 mts de longitud. Las lámparas se colocaron exteriormente al baño para evitar el calentamiento originado por ellas. Sin embargo, esto no fue suficiente, fue necesario utilizar el aire acondicionado del laboratorio para fabricar un túnel de aire que enfriara los focos. Para asegurar que la luz llegara de manera uniforme y difusa, la celda se colocó encima de una placa de vidrio de 0.9 mm de espesor y separada del piso del baño por una distancia de 10 cm aproximadamente, y se colocaron dos pantallas de papel albanene entre la celda y las lámparas, una se insertó entre la celda y la placa de vidrio y otra en

el piso del baño, en la Figura 2.3 se muestra el arreglo utilizado para iluminar la celda.

### ***Filmación***

El proceso de desplazamiento espontáneo se registró mediante una videocámara Panasonic M9000 de formato VHS super, la cual fue colocada verticalmente por encima de la celda y fuera del baño térmico, la Figura 2.3 muestra la posición de la videocámara.

La videocámara tiene dos modos de filmación, uno continuo y otro por intervalos, este último filma 1 segundo y se desactiva cada 50 segundos. El uso de uno u otro modo dependió del tipo de experimento, para los de mayor separación (0.075 cm), que son los que tardan más, se filmaba de forma continua durante los primeros 15 minutos y después por intervalos; para los experimentos con separación intermedia (0.015 cm) se filmó de manera continua durante los primeros 30 minutos y después se utilizó el modo de intervalos; y para los experimentos con separación más pequeña (0.005 cm), que son los de menor duración, se filmó de manera continua durante una hora y después por intervalos. 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. Sin embargo, este procedimiento no garantizó que en algunos casos los desplazamientos más rápidos pudieran ocurrir durante la filmación por intervalos.

## **2.3 Experimentos**

El objetivo de esta investigación se centra en estudiar varios aspectos básicos de los procesos de imbibición espontánea en celdas Hele-Shaw lisas a cocorriente, estos son:

1. Definir si el proceso de imbibición espontánea es reproducible y en que sentido lo es.
2. Detectar la existencia de diferentes patrones de desplazamiento y su relación con la entrada y salida de la celda.
3. Estudiar los efectos que la dinámica de la interface agua-aceite tiene en el ritmo de expulsión de aceite.
4. Investigar si la magnitud de las pequeñas irregularidades (waviness) de la superficie de los vidrios tiene algún efecto en el desplazamiento de los fluidos.

Con base en los objetivos antes señalados se estructuró un plan experimental, esto es, se definieron las características de los experimentos que debían realizarse para cubrir las expectativas de esta investigación.

- El objetivo relacionado con la reproducibilidad del proceso de imbibición se cubre realizando al menos dos experimentos en iguales circunstancias. Por esta razón, se repitió cada uno de los experimentos.
- Para estudiar la dinámica del desplazamiento espontáneo, se consideró indispensable modificar la separación entre los vidrios para así establecer distintas relaciones entre la fuerza capilar y la viscosa. Para ello se consideraron tres separaciones: 0.005, 0.015 y 0.075 cm.
- Para estudiar si la microestructura (waviness) de las superficies tiene algún efecto en el comportamiento del desplazamiento espontáneo, se obtuvieron los patrones de interferencia para cada una de las celdas construidas, excepto para las de separación más grande (0.075 cm), en donde no fue posible obtener el patrón correspondiente.

Estas tres características se pudieron conjuntar realizando siete experimentos en cada celda, bajo las siguientes características: Para estandarizar la mojabilidad de cada celda primero se hizo un experimento utilizando una separación de 0.015 cm, después se realizaron otros dos experimentos consecutivos y similares. Posteriormente, se realizaron dos experimentos consecutivos utilizando una separación de 0.075 cm y, finalmente se realizaron dos experimentos consecutivos con una separación de 0.005 cm.

Se utilizaron tres celdas y se realizaron siete experimentos en cada una de ellas, esto es, se realizaron un total de 21 experimentos. El objetivo de repetir los mismos experimentos tres veces se justifica por la posibilidad de que una de las celdas se fracturara o rompiera en el proceso de separación de los vidrios. Aunque esto no sucedió, ocurrieron otros imprevistos: a) En un experimento (2B) fue imposible detectar desplazamiento alguno, b) En dos experimentos de celdas distintas (2G y 2F), hubo problemas de contraste entre las fases, lo cual empobreció notablemente la calidad de las imágenes y por consiguiente la identificación y medición de las fases.

En realidad todos los experimentos dieron información valiosa, ninguno de ellos se descartó para el análisis. Sin embargo, en los experimentos con un contraste pobre, resultó más difícil rescatar información cuantitativa útil.

### 2.3.1 Preparativos

Para poder comparar los resultados obtenidos en los diferentes experimentos se estandarizaron varios aspectos que pueden influir en el desarrollo de cada experimento:

- La concentración de colorante en la fase aceite siempre fue la misma.
- Siempre se utilizó el mismo procedimiento para saturar la celda con la fase aceite. En cada caso el aceite se introdujo desde la entrada con ayuda de una jeringa y un filtro Micropore con malla de  $0.22\ \mu\text{m}$ .
- Se niveló la celda para evitar efectos gravitacionales.
- Se colocó la campana de vidrio, para evitar las corrientes de aire producidas por los ventiladores del baño térmico y para disminuir la evaporación de los líquidos.
- Fue necesario un tiempo de espera para que la celda y los fluidos alcanzaran la temperatura de experimentación, esto implica que se colocó el mecanismo que suministra el agua, que se niveló la celda y se cubrió con la campana de vidrio. En estas condiciones fue necesario esperar aproximadamente tres horas para que la celda alcanzara la temperatura del baño térmico ( $25^\circ\text{C}$ ).
- Una vez que la celda se equilibró térmicamente con el baño de aire, fue posible iniciar el experimento, lo cual se hizo aproximando cuidadosamente la barra de vidrio del mecanismo alimentador de agua a la entrada de la celda, esto permitió suministrar bajo las mismas condiciones el agua, sin generar gradientes de presión.

### 2.3.2 Desarrollo de los experimentos

Un experimento puede dar inicio hasta que la celda alcance la temperatura deseada. El comienzo del desplazamiento tiene lugar cuando el agua del mecanismo alimentador ha mojado en algún lugar la entrada de la celda, a través de la barra de vidrio. Para evitar un brusco desplazamiento del aceite a la entrada, es necesario que el mecanismo alimentador se aproxime cuidadosamente. Una vez que la entrada es mojada por el agua, se inicia el proceso de desplazamiento espontáneo del aceite que está al interior de la celda. En algunos casos la entrada no es mojada simultáneamente en toda su extensión, a pesar de que la barra de vidrio ha sido aproximada uniformemente, esto origina un pequeño retraso en la uniformidad de la condición a la frontera. Sin embargo, se ha observado que este lapso es muy pequeño en comparación con la duración total del proceso. En el peor de los casos se ha observado un retraso de 1 minuto. Como es prácticamente imposible que la entrada sea mojada en toda su extensión instantáneamente, se ha observado que en los puntos donde el agua moja primero empuja al aceite lateralmente haciendo que el mojado se vaya desplazando en ambas direcciones, hasta que toda la entrada es mojada por el agua.

Una vez que el agua satura completamente la entrada de la celda, el desplazamiento a cocorriente tiene lugar, esto es, el agua penetra por la

entrada y el aceite es obligado a salir por el extremo opuesto de la celda. Generalmente el desplazamiento espontáneo no es predecible, porque la competencia entre las fuerzas capilar y viscosa depende de muchos factores locales que generan cambios iniciales importantes. Por ejemplo, es común observar que el movimiento local de la interface agua-aceite puede inducir el desplazamiento de la interface en una región alejada. Sin embargo, también se observa lo contrario, que mientras la interface tiene movimientos muy fuertes en una región (digitaciones), muy cerca de ella la interface permanece inmóvil (al menos a simple vista). Este comportamiento invita a proponer que la mojabilidad es una propiedad local y que su presencia define el comportamiento del desplazamiento espontáneo.

A pesar de que los experimentos fueron diseñados para que el aceite saliera por uno de los extremos de la celda, en las celdas con separaciones de 0.005 y 0.015 cm se observaron varios casos en donde el aceite salió a contracorriente hacia la entrada de la celda. Esto ocurrió cuando el agua se canalizó a través de digitaciones, llegando muy anticipadamente a la salida y eventualmente invadiéndola, ocasionando que gran cantidad de aceite quedara atrapado. Sin embargo, en un re-acomodo de las fases, debido a la distribución de la mojabilidad en la celda, el aceite fue empujado y obligado a salir por la entrada, hasta alcanzar un equilibrio entre las fuerzas que movilizan a los fluidos.

En los tres primeros experimentos que se realizaron se utilizó una separación de 0.015 cm, y se identificaron con las letras A, B y C, respectivamente. Después se realizaron dos experimentos utilizando una separación de 0.075 cm, y se identificaron con las letras D y E, respectivamente. Finalmente, se realizaron otros dos experimentos utilizando una separación de 0.005 cm, y se identificaron con las letras F y G, respectivamente. El orden que se siguió para identificarlos fue acorde con el de su realización.

La duración de cada experimento dependió fundamentalmente de la separación entre los vidrios, los más largos y con desplazamientos más lentos fueron los de 0.075 cm, que llegaron a durar hasta una semana, después fueron los de 0.015 cm de separación, que duraron aproximadamente dos días, finalmente fueron los de 0.005 cm que duraron en promedio medio día. El criterio utilizado para determinar el final de un experimento consistió en observar que la distribución de los fluidos dentro de la celda no sufría cambios en un intervalo de tiempo relativamente grande (uno o dos días). Sin embargo, en algunos casos el experimento se declaraba terminado cuando ya no había aceite por desplazar. En las celdas con mayor separación (0.075 cm), el 66% de los experimentos finalizaron aun cuando había todavía mucho aceite por desplazar, en estos casos el final consistió en observar que la expulsión de aceite iba disminuyendo hasta llegar a un punto en que la interface agua-aceite

permanecía inmóvil por varias horas (un día). Sin embargo, también se observó que un incremento de un grado centígrado en la temperatura podía ser suficiente para desactivar el equilibrio de la interface y provocar el inicio de una nueva etapa de desplazamiento, por ello se cuidó que la temperatura del baño no rebasara cambios de  $\pm 0.5^\circ \text{C}$ .

En todos los experimentos se filmó una última toma de la celda antes de dar por terminado el experimento. Esta toma es la que se considera como el punto final del proceso de desplazamiento, aunque en muchos casos el experimento prácticamente ya ha terminado con mucha anterioridad. Sin embargo, aún se llega a observar el re-acomodo de las islas de aceite que quedaron atrapadas en la celda.

En la Tabla 2.3 se muestran los experimentos realizados y los tiempos en que se consideró finalizado el desplazamiento.

Separación, cm	0.015			0.075		0.005	
Celda	Experimento						
	A	B	C	D	E	F	G
1	3,718	550	1,200	768	8,640	7,061	7,020
2	4,025	1,240	1,005	3,093	5,400	1,804	1,200
3	941	1,351	1,173	10,080	11,205	7,261	8,524

Tabla 2.3. Duración de los experimentos realizados, en minutos

En las Figuras 2.5, 2.6 y 2.7 se presenta una muestra del avance secuencial del agua, en todos los casos la última imagen de la secuencia corresponde a la última toma realizada.

La característica que diferencia a las celdas 1, 2 y 3, es que cada una fue construida con un par de vidrios diferente, lo cual generó una distribución de irregularidades (waviness), en las superficies internas de los vidrios, diferente. Esto se puede apreciar en el patrón de interferencia de cada una de las celdas, Apéndice 1.

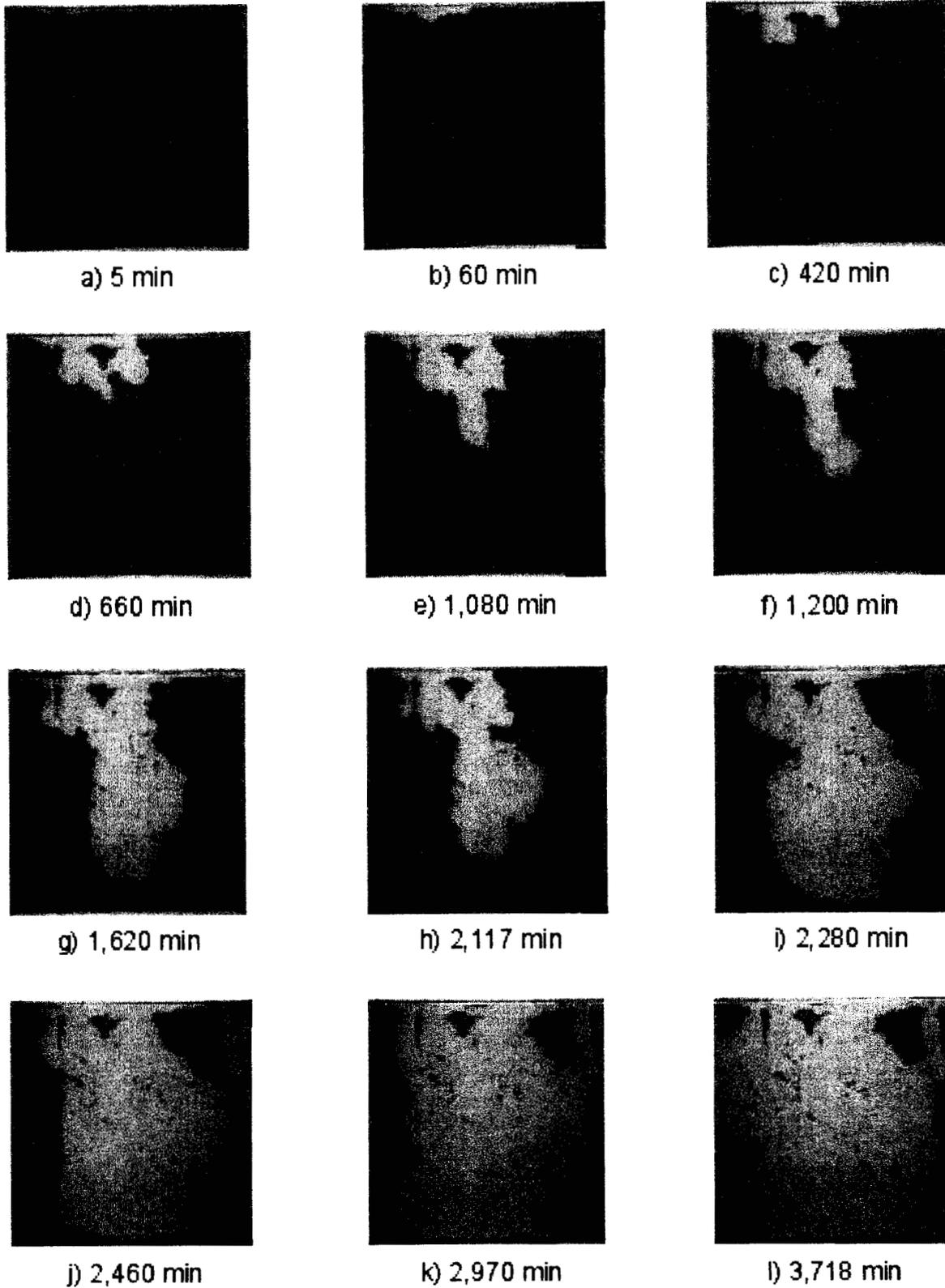


Figura 2.5a. Secuencia del desplazamiento en la celda 1A

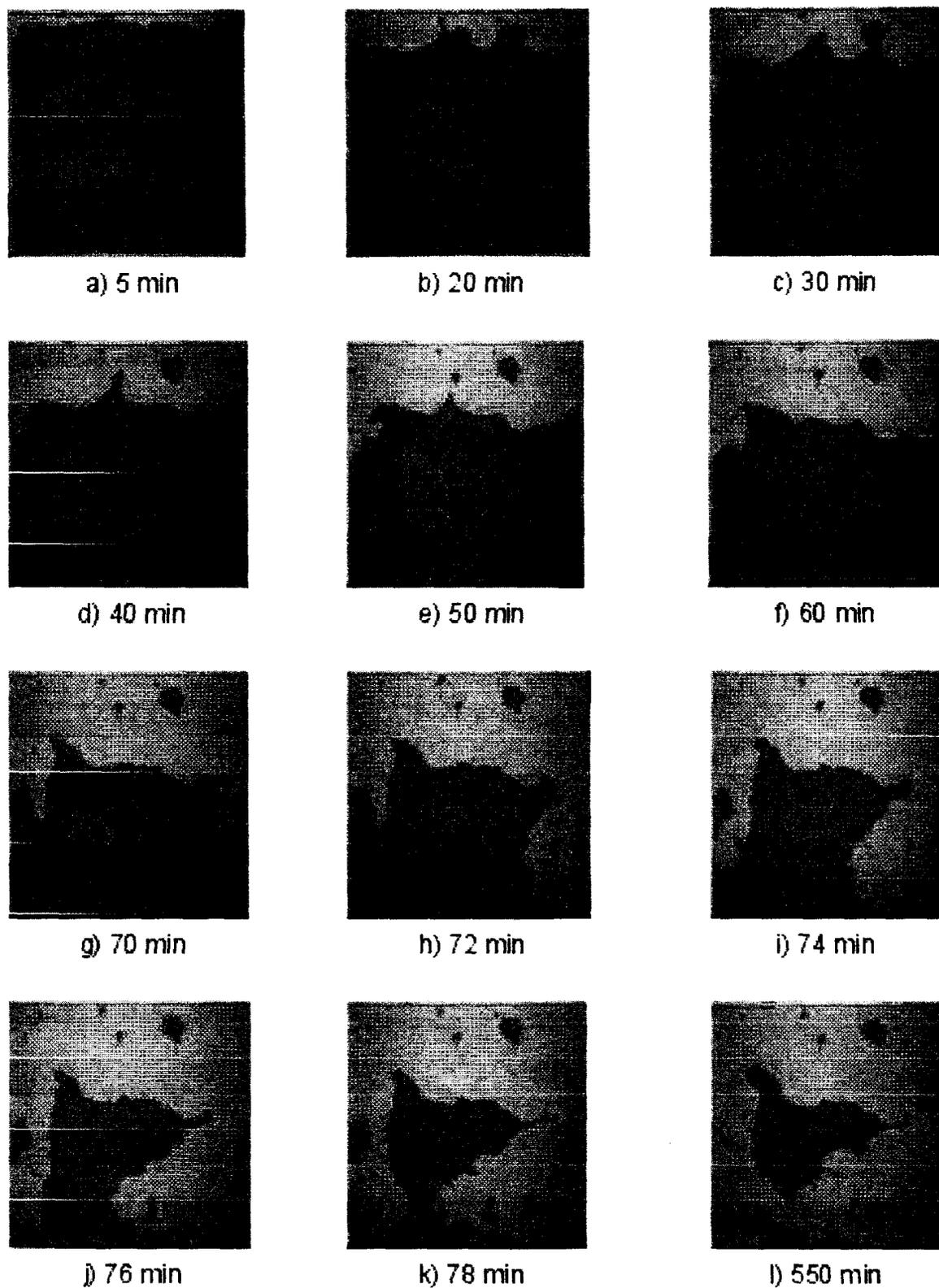


Figura 2.5b. Secuencia del desplazamiento en la celda 1B

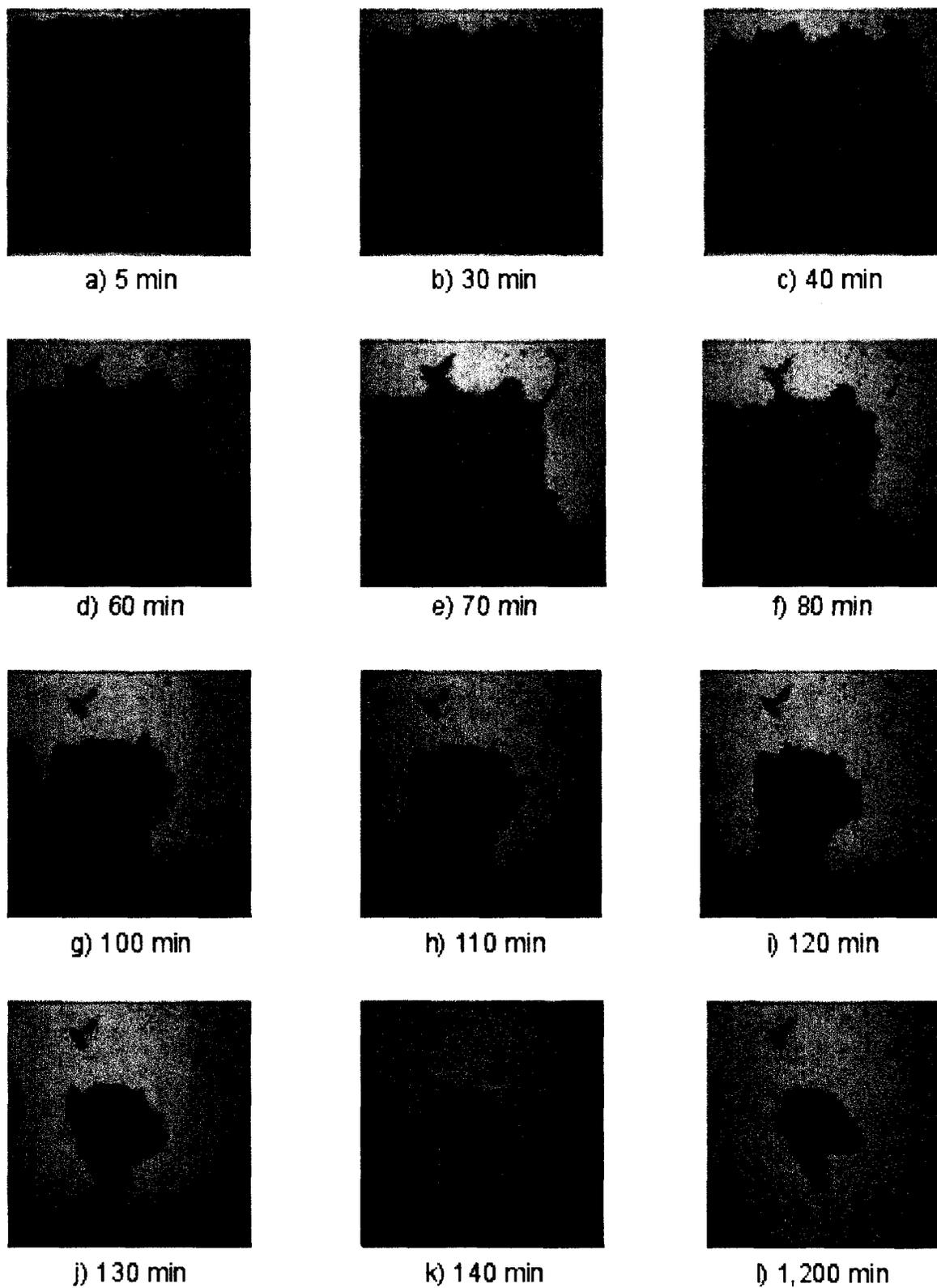


Figura 2.5c. Secuencia del desplazamiento en la celda 1C

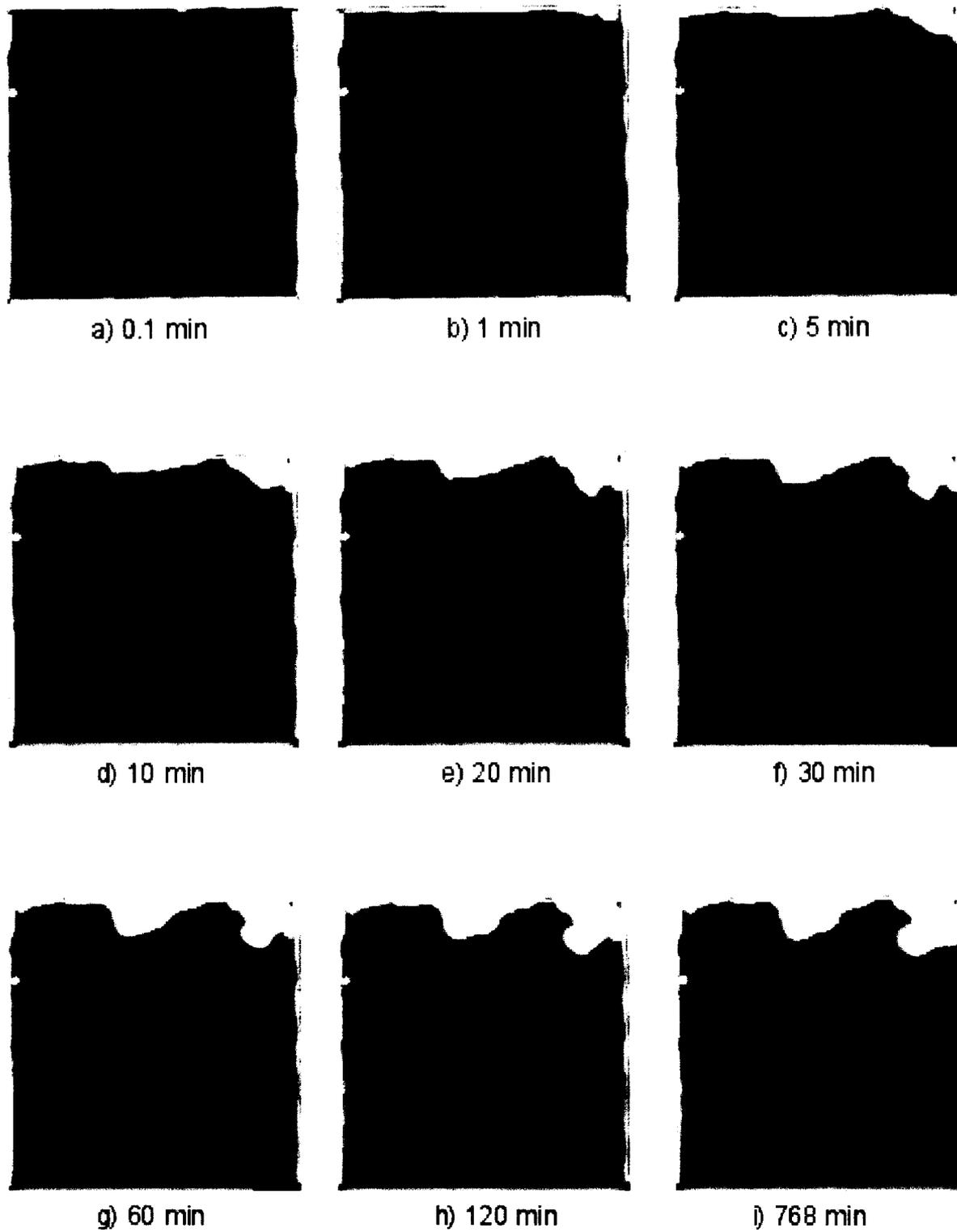


Figura 2.5d. Secuencia del desplazamiento en la celda 1D

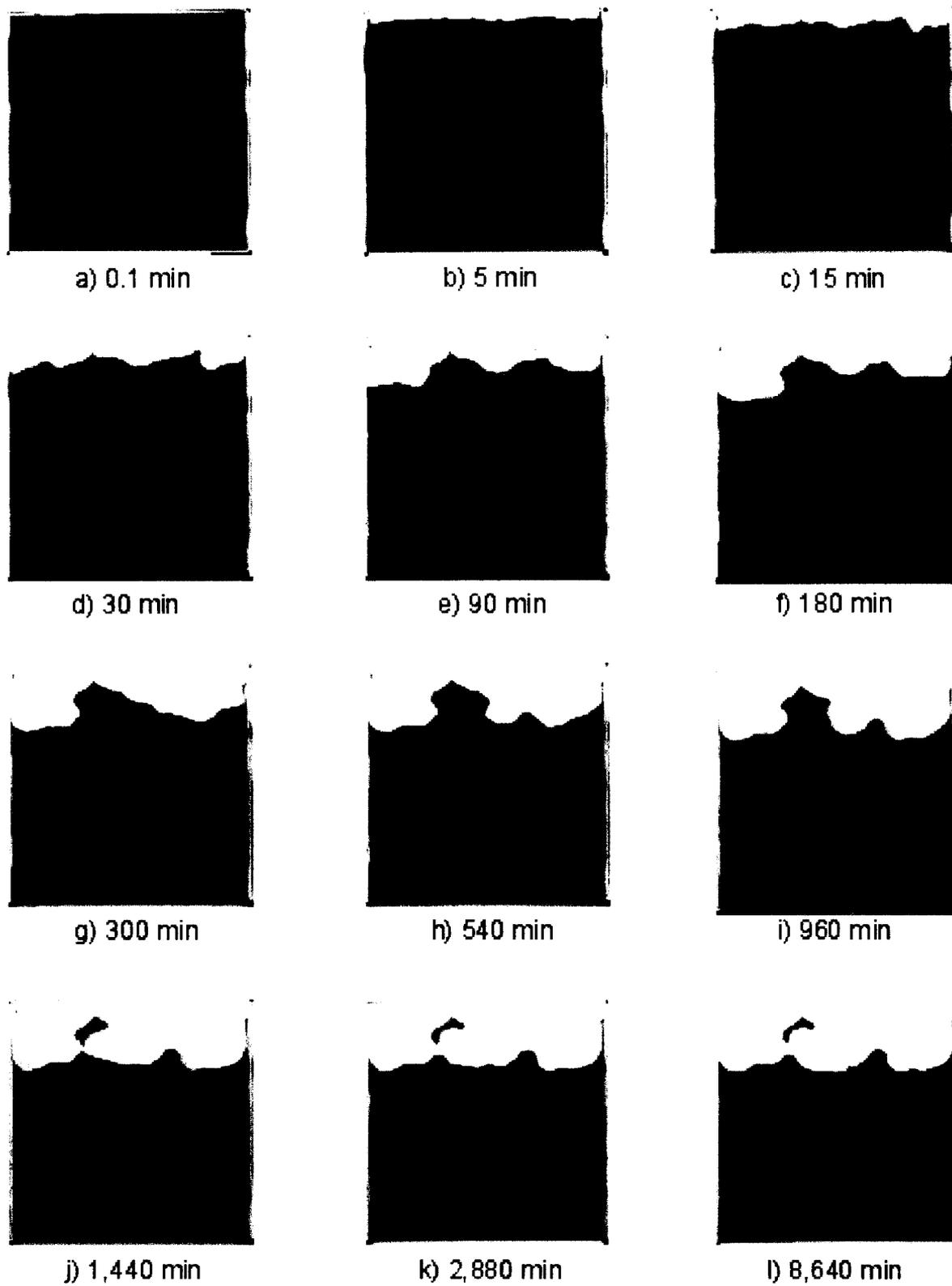


Figura 2.5e. Secuencia del desplazamiento en la celda 1E

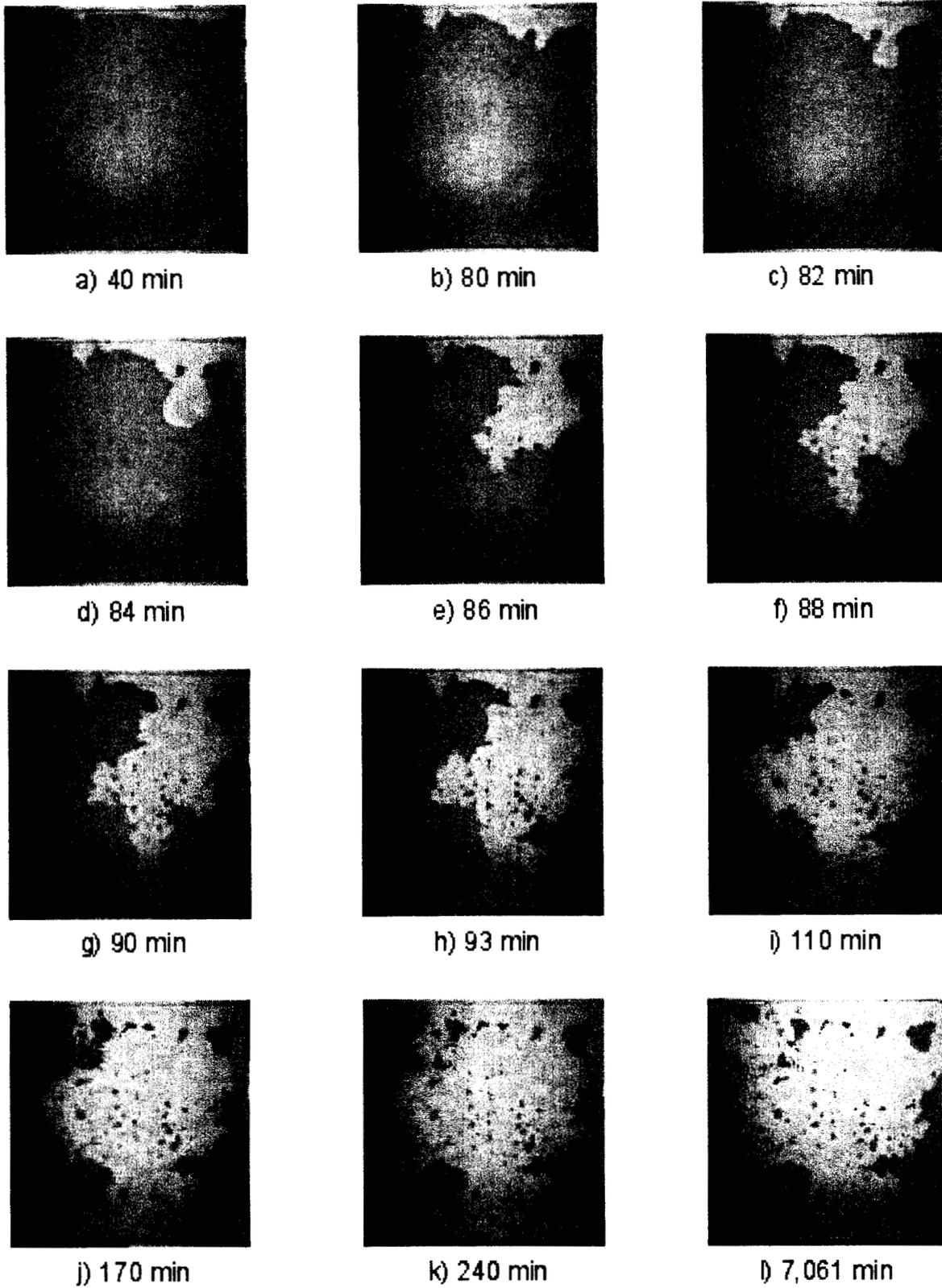


Figura 2.5f. Secuencia del desplazamiento en la celda 1F

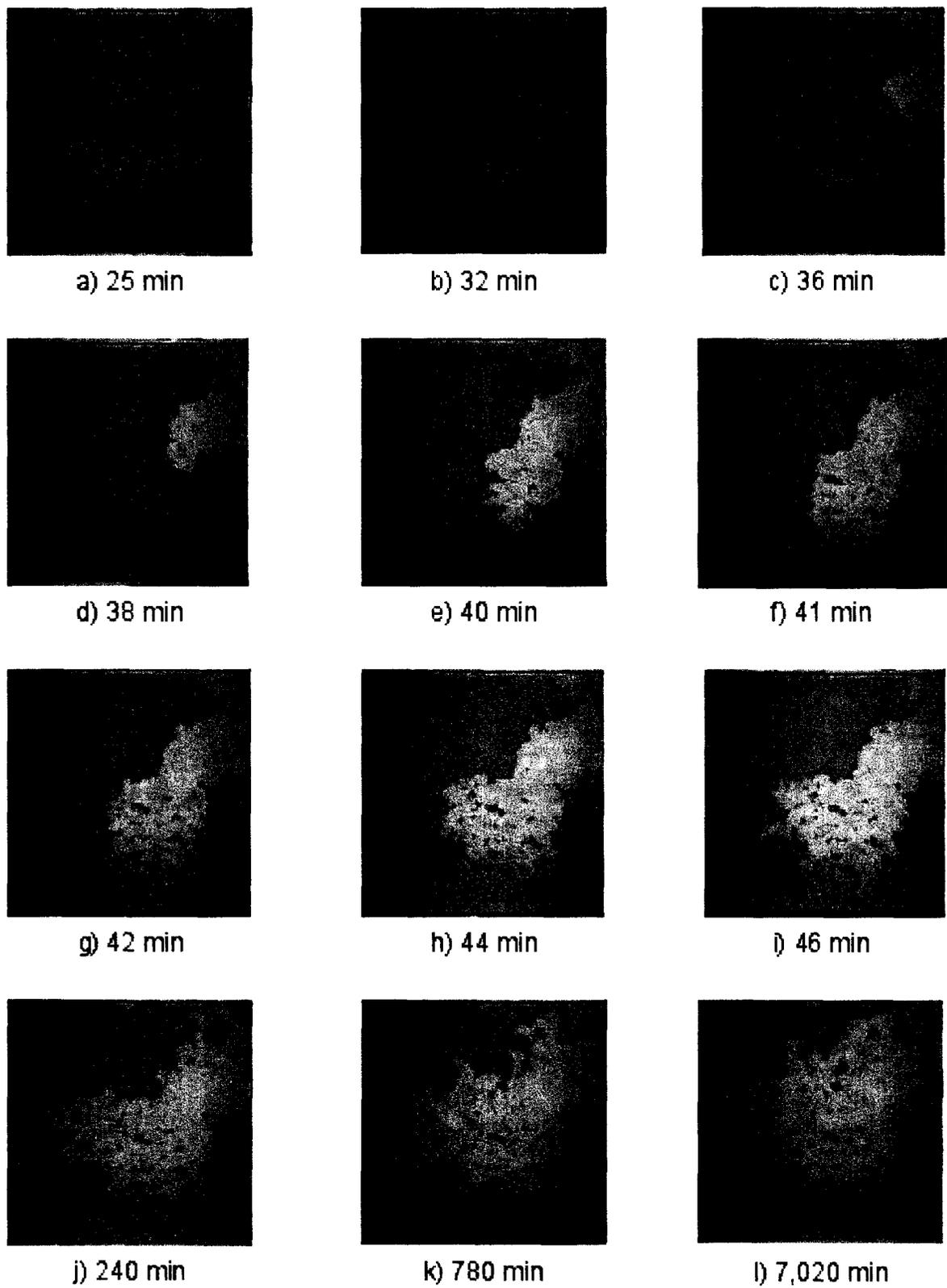


Figura 2.5g. Secuencia del desplazamiento en la celda 1G

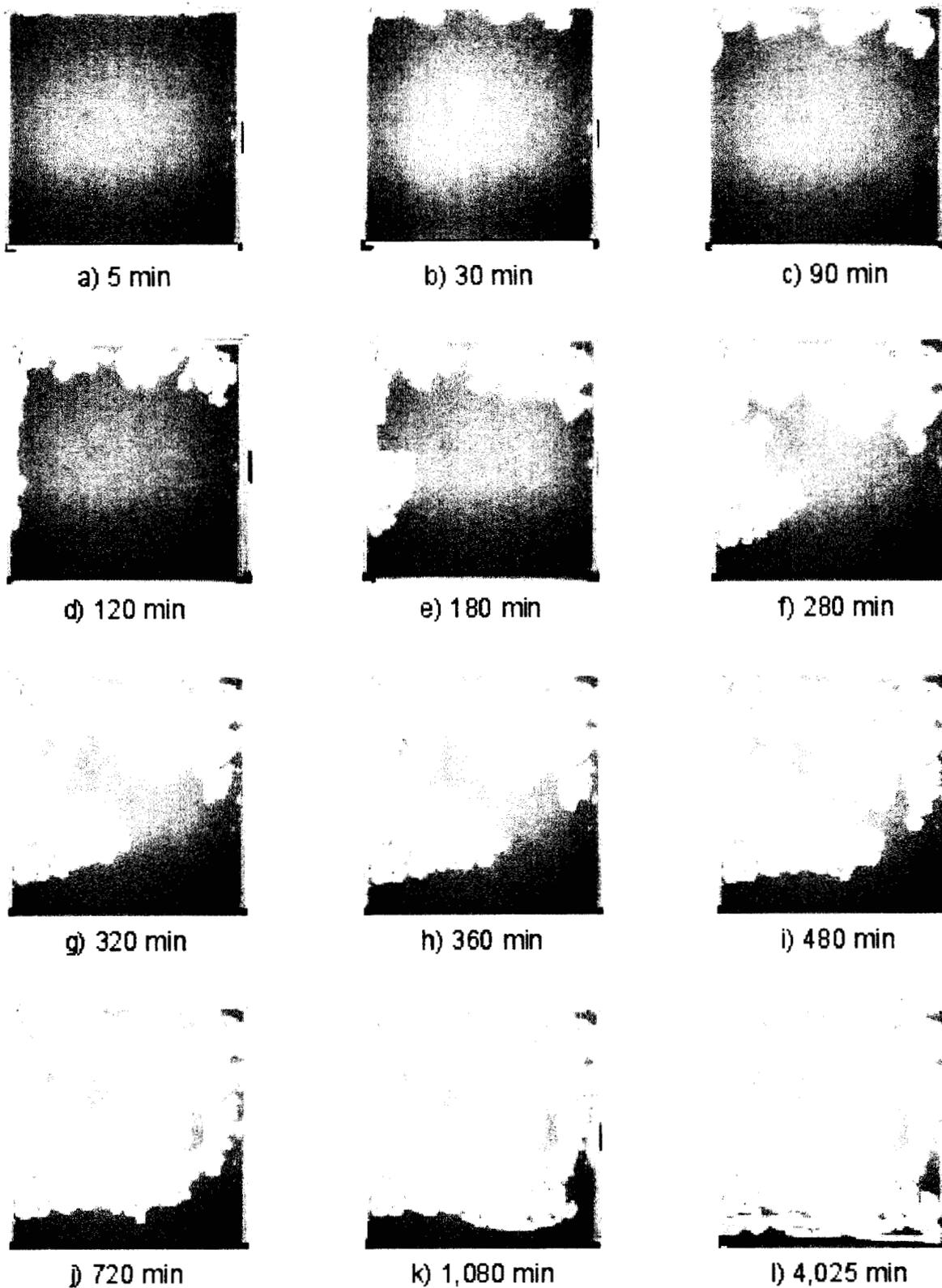
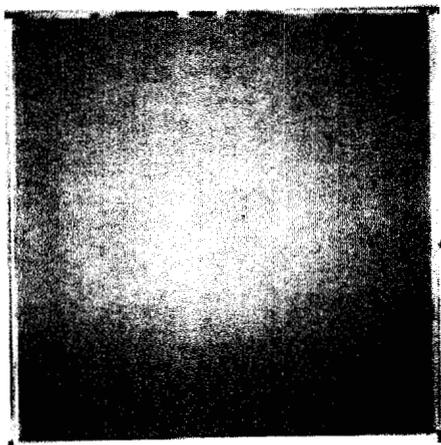
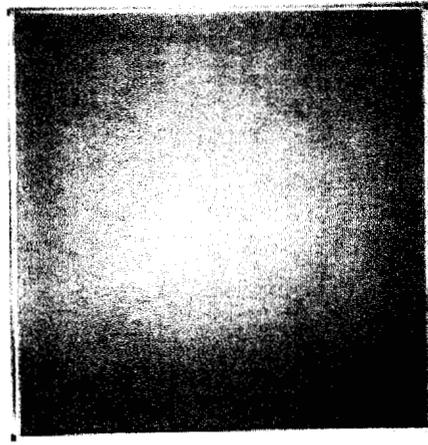


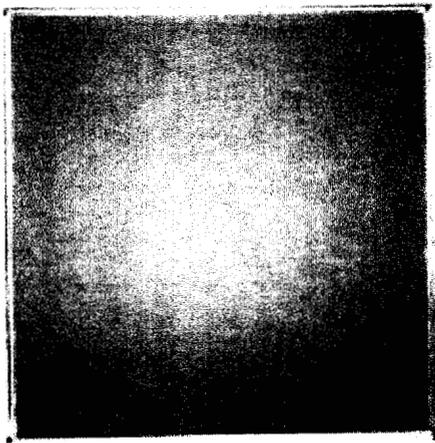
Figura 2.6a. Secuencia del desplazamiento en la celda 2A



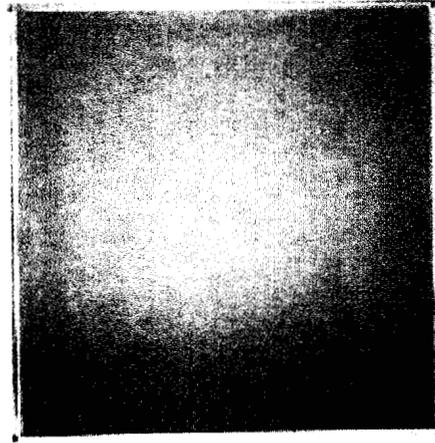
a) 0.1 min



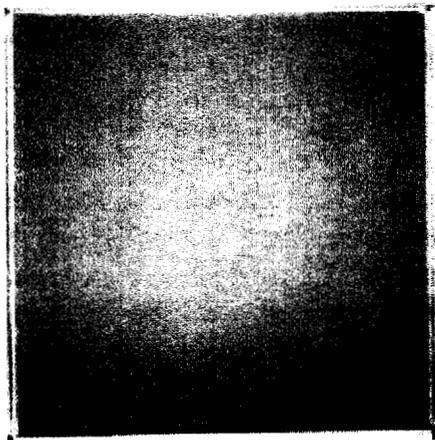
b) 1 min



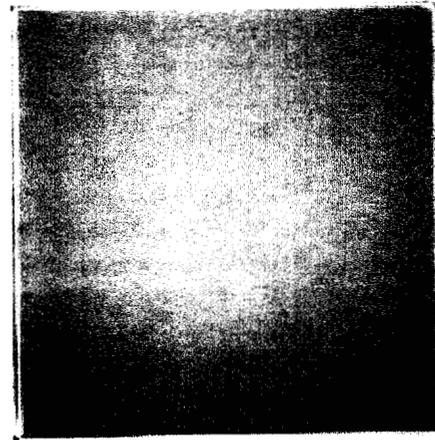
c) 5 min



d) 720 min



e) 1,200 min



f) 1,240 min

Figura 2.6b. Secuencia del desplazamiento en la celda 2B

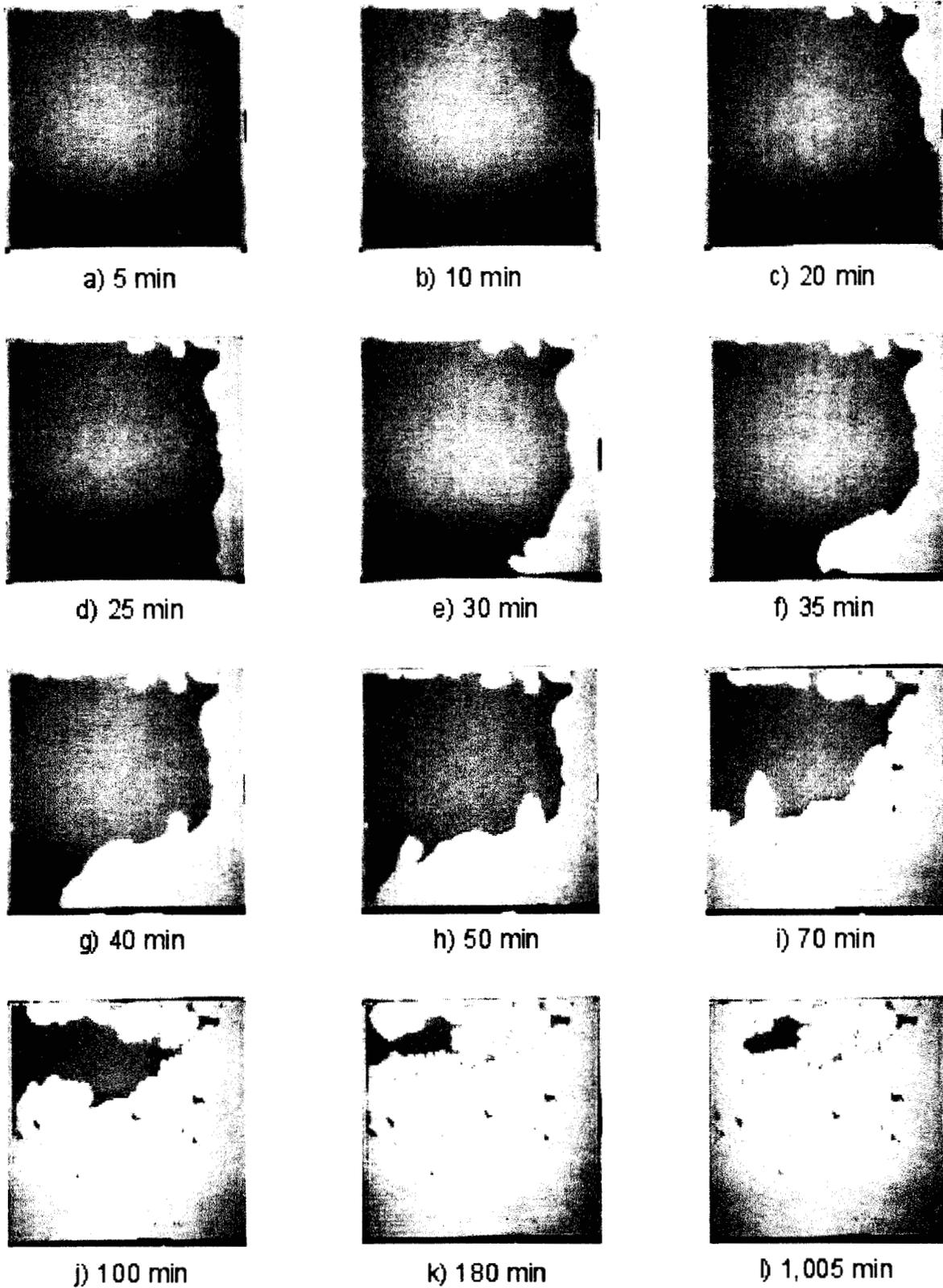


Figura 2.6c. Secuencia del desplazamiento en la celda 2C

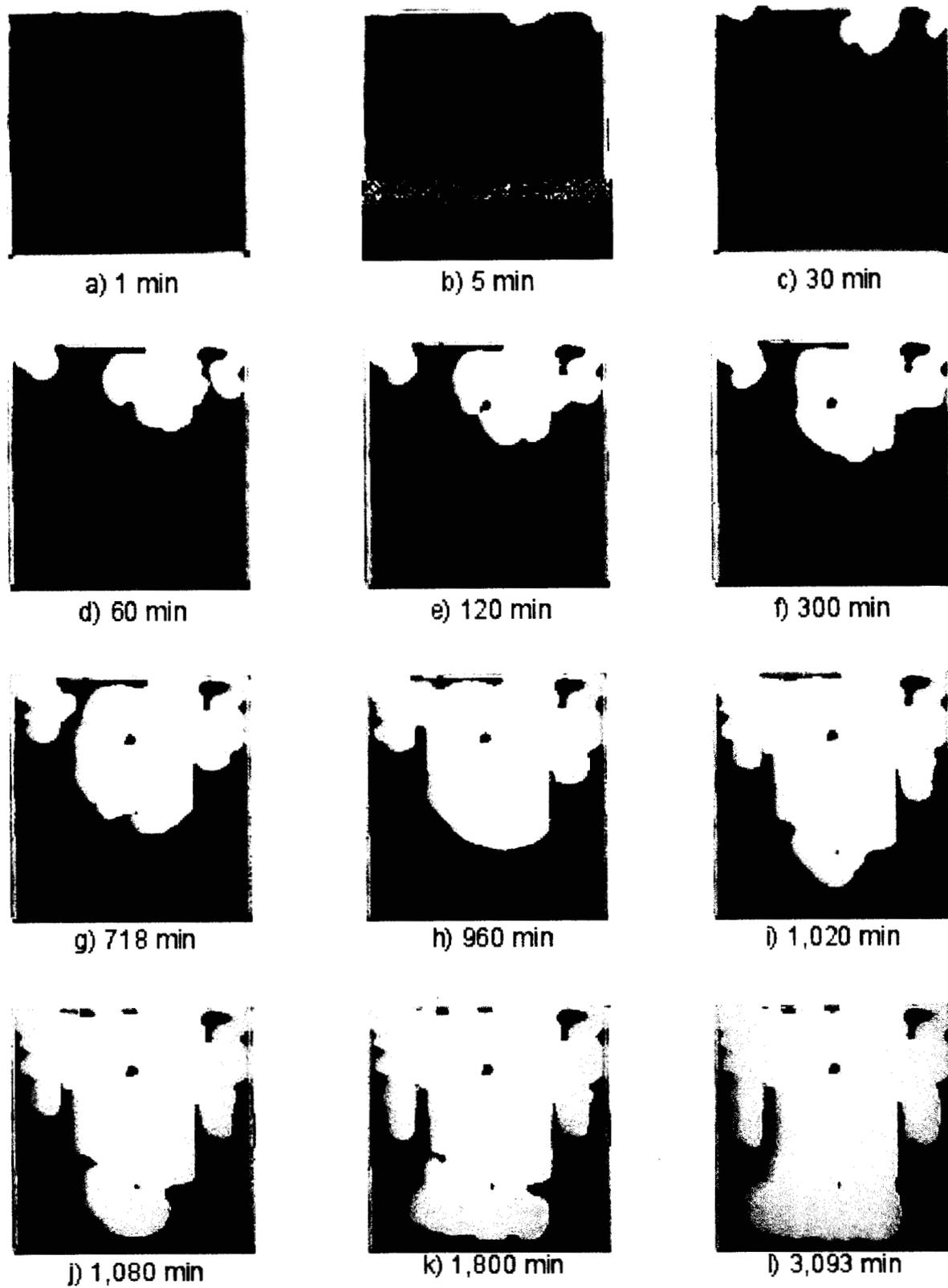


Figura 2.6d. Secuencia del desplazamiento en la celda 2D

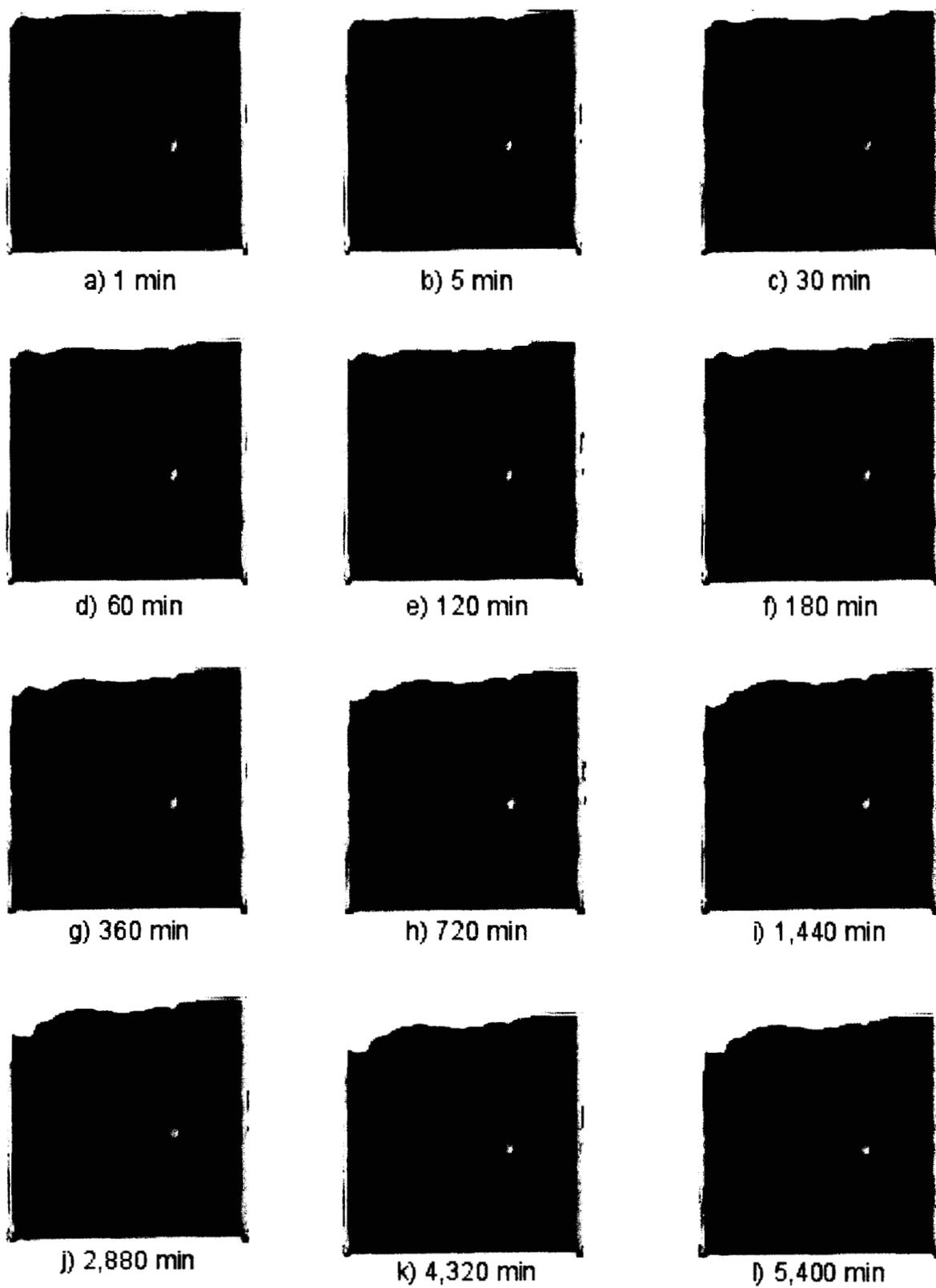


Figura 2.6e. Secuencia del desplazamiento en la celda 2E

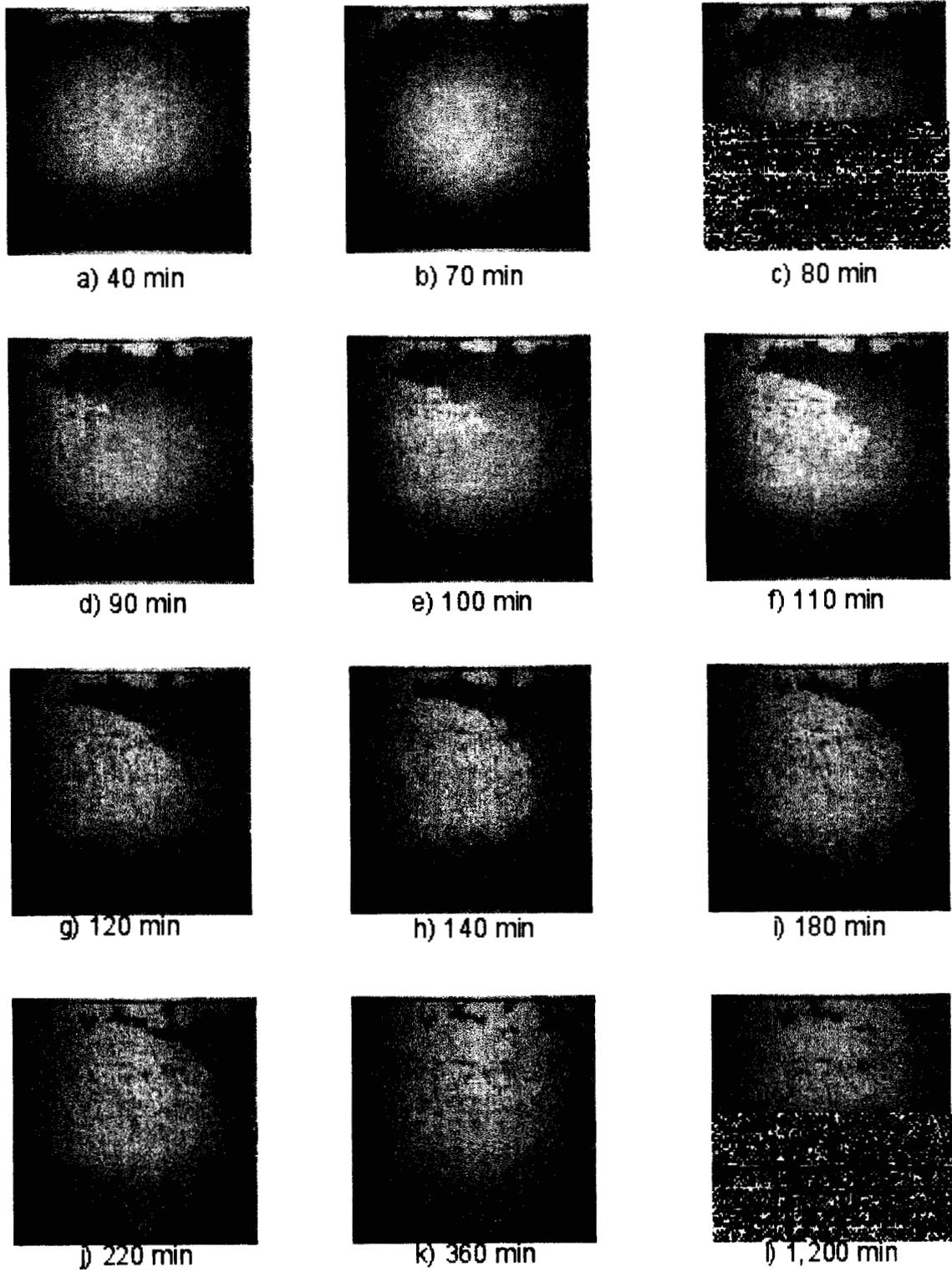


Figura 2.6f. Secuencia del desplazamiento en la celda 2F

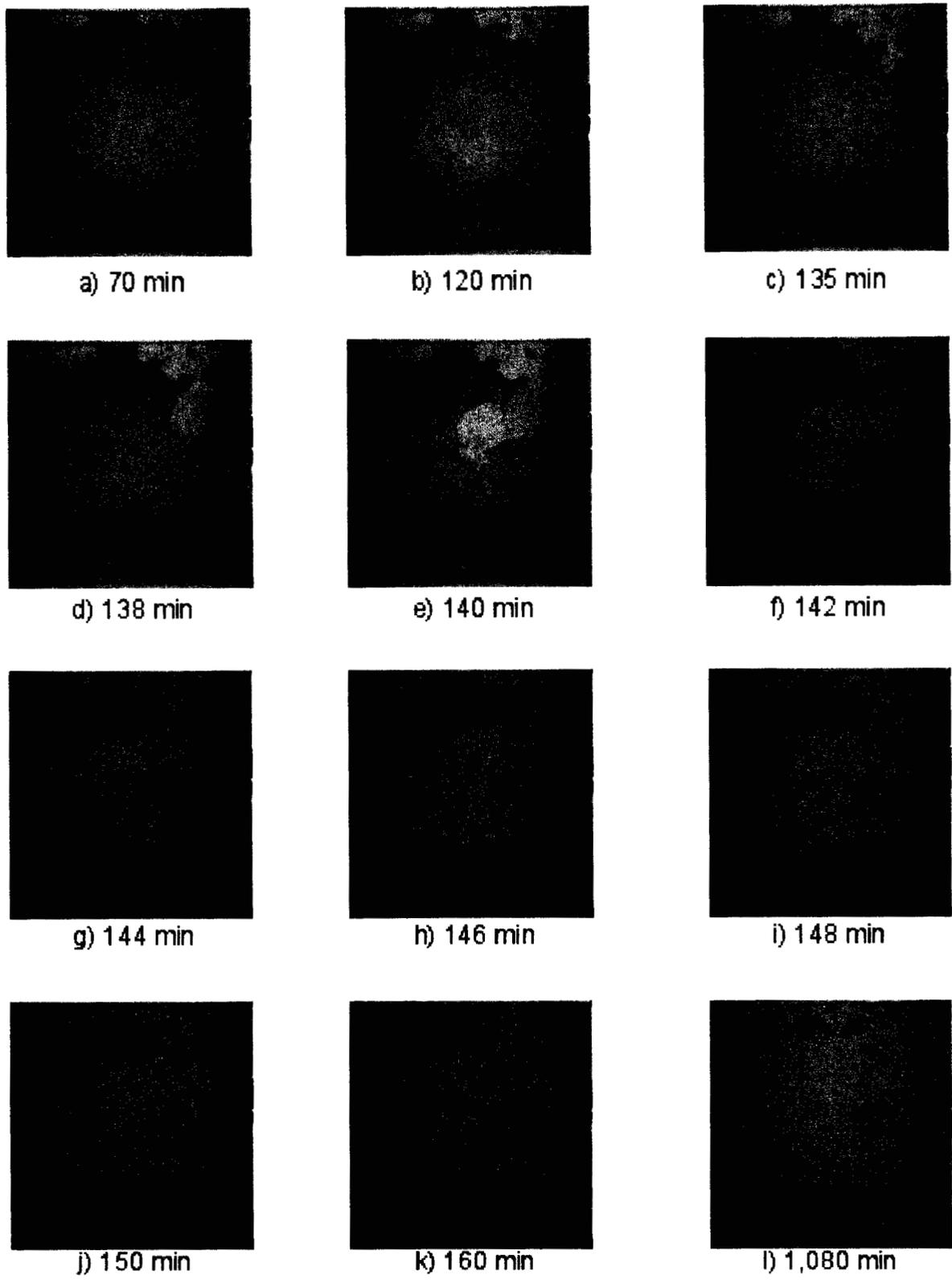


Figura 2.6g. Secuencia del desplazamiento en la celda 2G

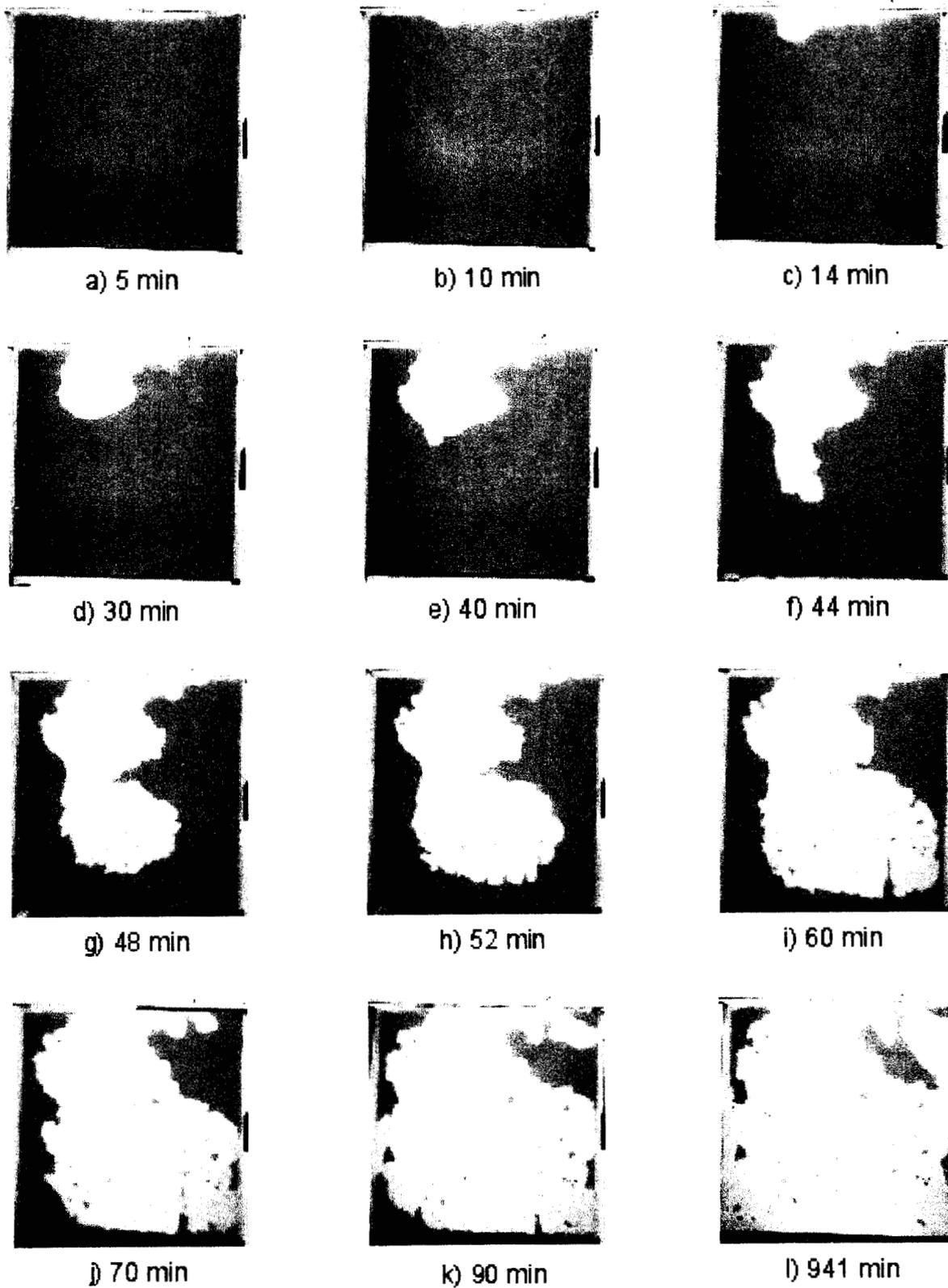


Figura 2.7a. Secuencia del desplazamiento en la celda 3A

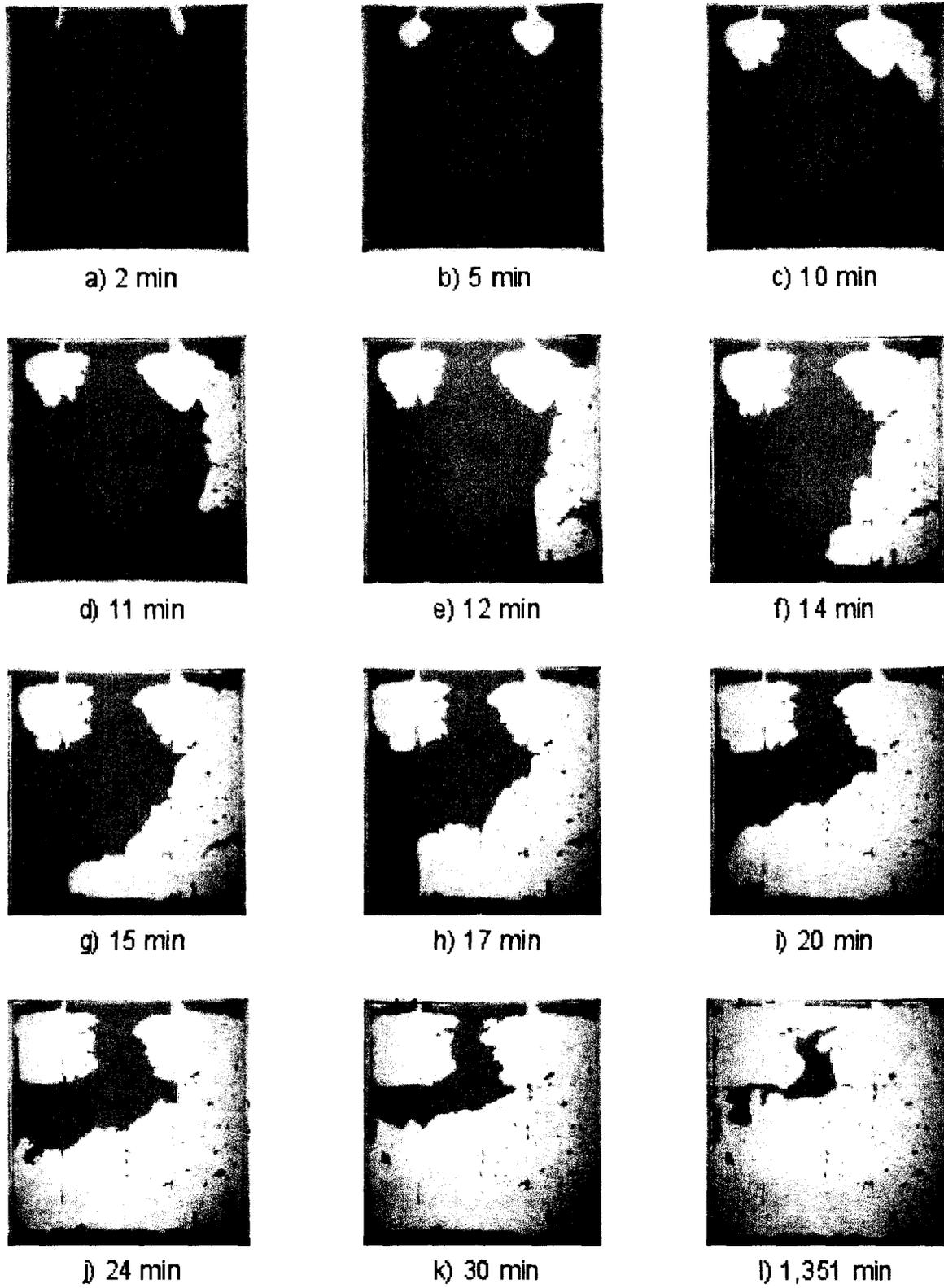


Figura 2.7b. Secuencia del desplazamiento en la celda 3B

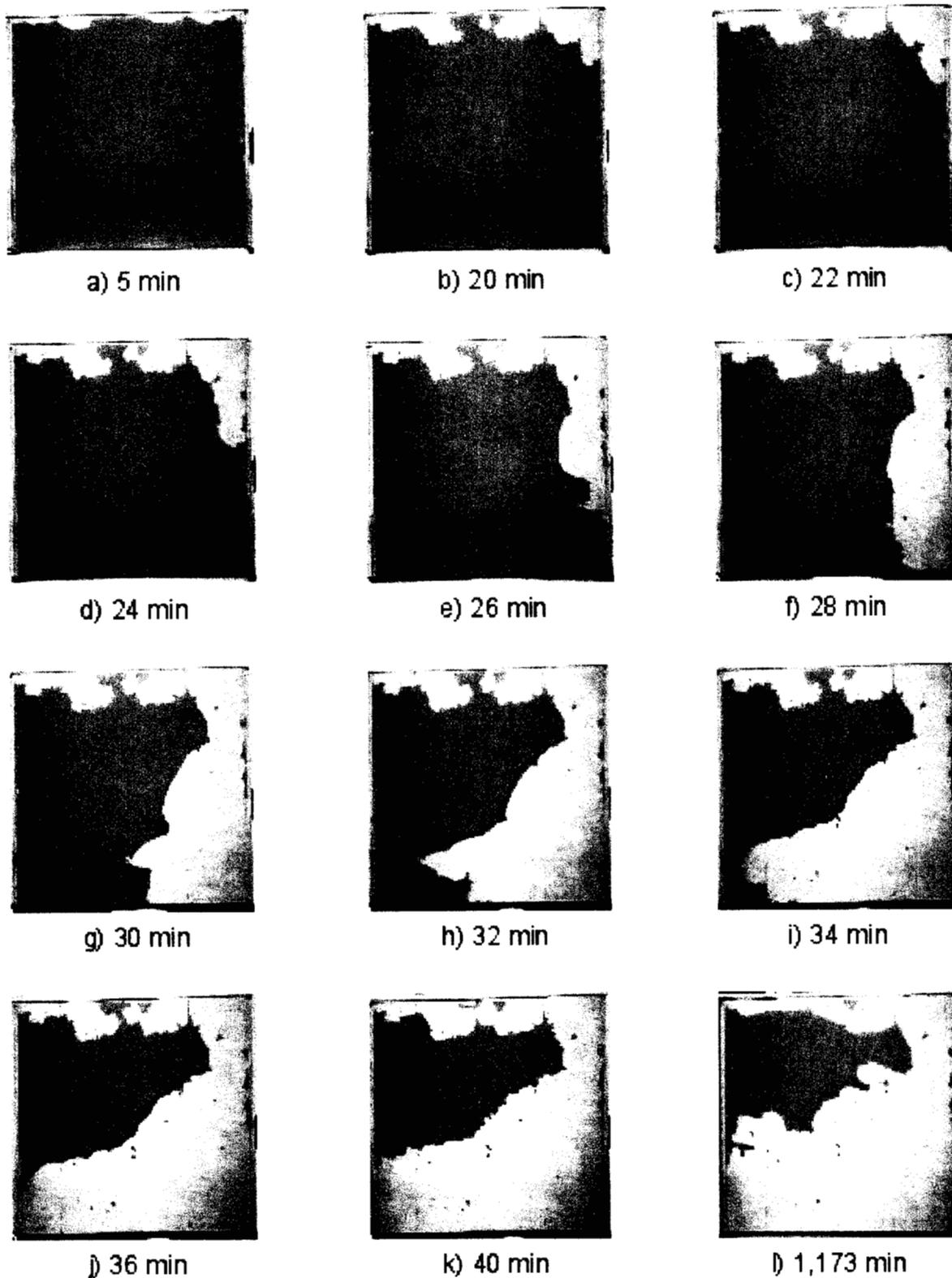


Figura 2.7c. Secuencia del desplazamiento en la celda 3C

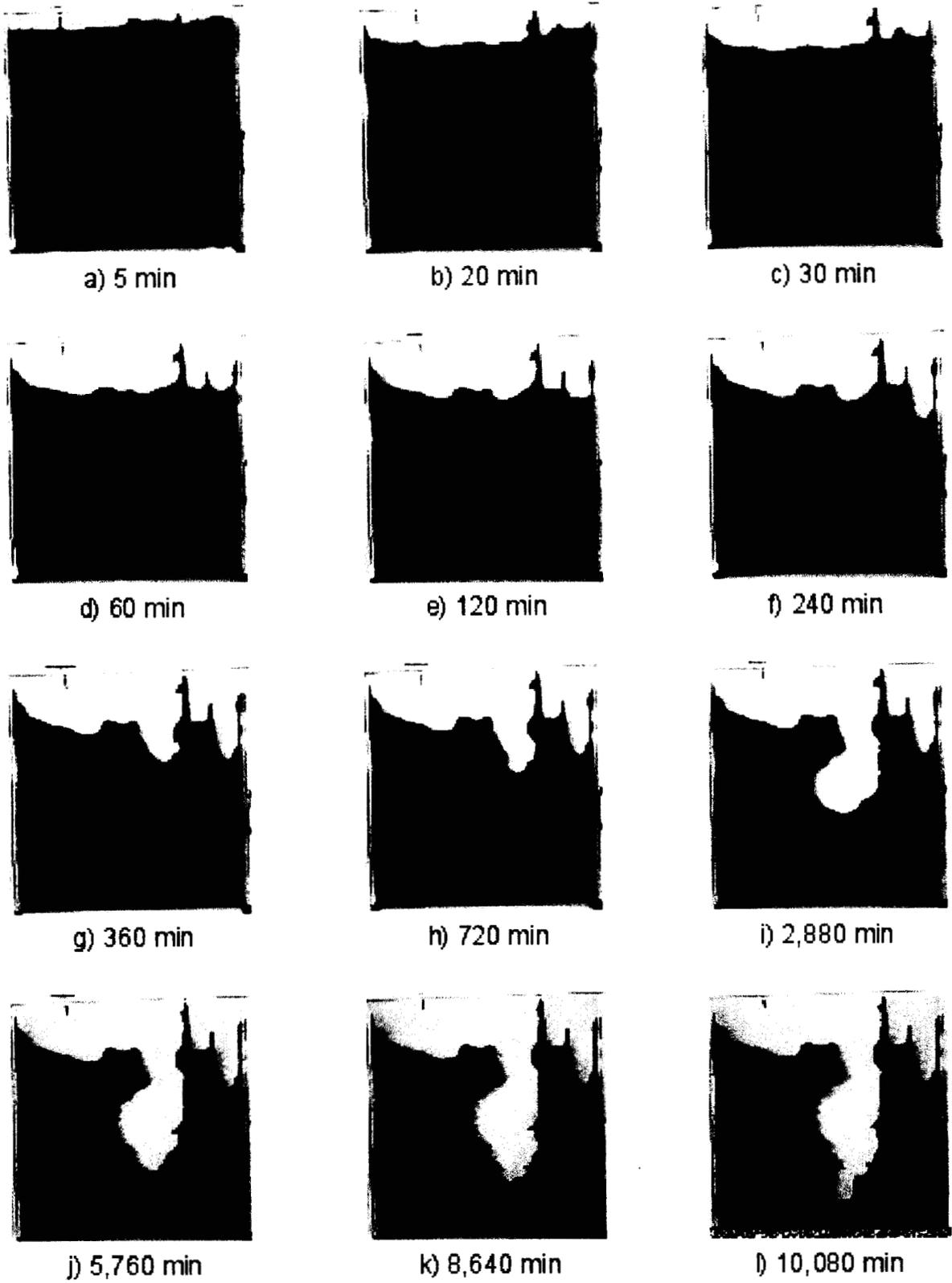


Figura 2.7d. Secuencia del desplazamiento en la celda 3D

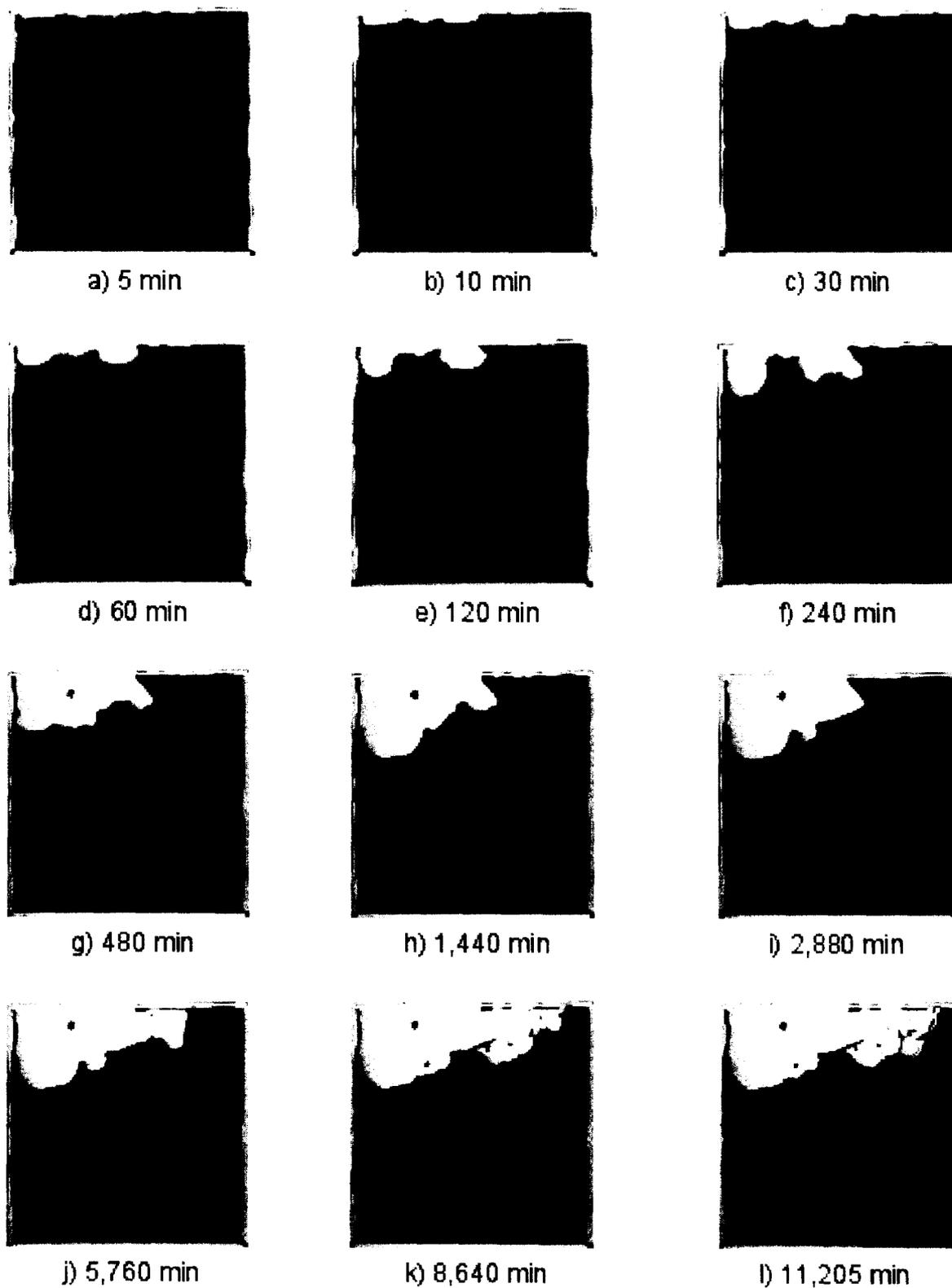
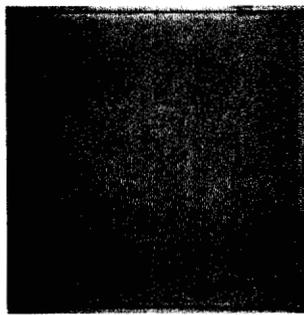


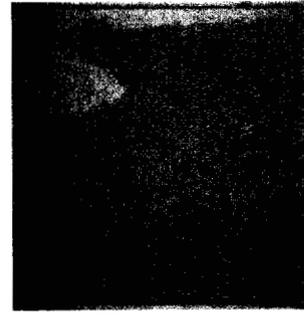
Figura 2.7e. Secuencia del desplazamiento en la celda 3E



a) 5 min



b) 10 min



c) 20 min



d) 30 min



e) 40 min



f) 44 min



g) 48 min



h) 52 min



i) 56 min



j) 60 min

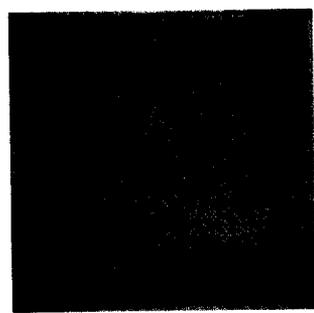


k) 120 min

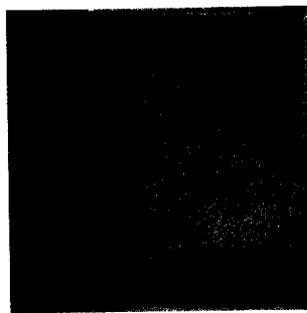


l) 7261 min

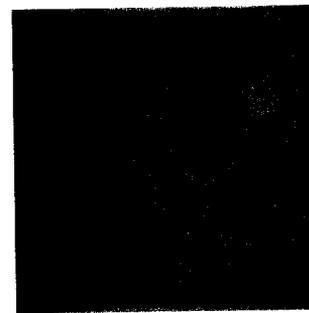
Figura 2.7f. Secuencia del desplazamiento en la celda 3F



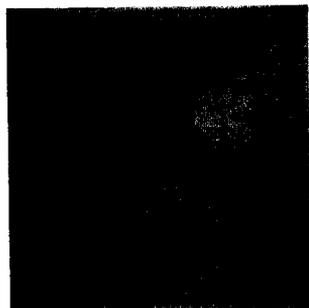
a) 5 min



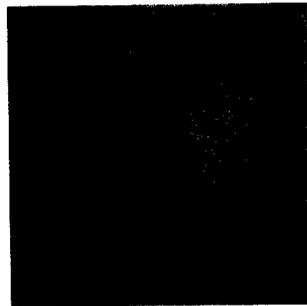
b) 10 min



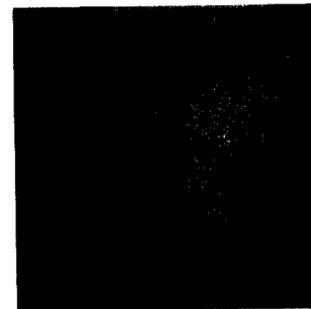
c) 12 min



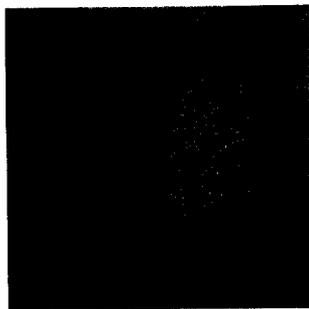
d) 13 min



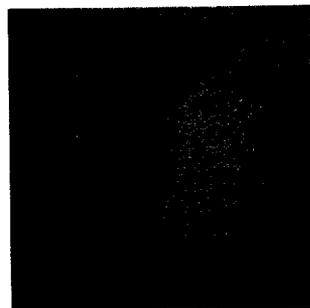
e) 16 min



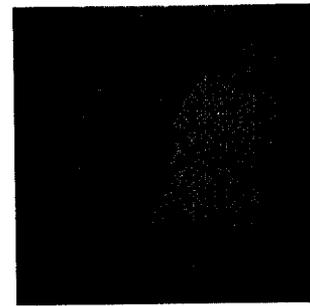
f) 18 min



g) 20 min



h) 22 min



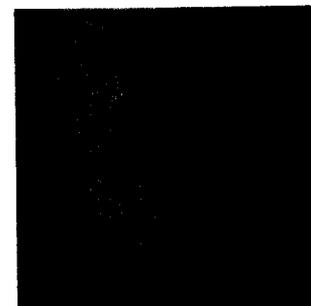
i) 24 min



j) 30 min



k) 360 min



l) 8,524 min

Figura 2.7g. Secuencia del desplazamiento en la celda 3G

## Capítulo 3

### Resultados y análisis

En lo que resta de esta tesis, se entenderá como fase agua al agua bidestilada utilizada en los experimentos, y fase aceite al Soltrol 170.

La interface agua-aceite se forma cuando el agua moja uniformemente la entrada de la celda, al inicio del experimento. Después su avance genera un frente que se deforma con el tiempo, dejando a su paso fragmentos de aceite atrapado en forma de islas, las cuales pueden quedar estáticas, deformarse, crecer, emigrar, o incluso desaparecer (por expulsión), dependiendo de las condiciones de mojabilidad local y de su posición dentro de la celda.

Aunque el proceso de desplazamiento de los fluidos en una celda Hele-Shaw es tridimensional, la información que se obtiene de las imágenes de video es bidimensional. En este sentido, el frente de avance agua-aceite y las islas, son objetos o estructuras planas a las cuales se les puede determinar perímetro y área, entre otros parámetros. El perímetro es un parámetro de importancia porque está ligado a la longitud de la interface agua-aceite, tanto en el frente como en las islas, y puede dar información acerca de la magnitud y evolución de las fuerzas capilares. Mientras que, el área es imprescindible para cuantificar la dinámica del transporte de masa en la celda, como son los ritmos de expulsión de aceite (o ingreso de agua) en la celda y la evaluación del aceite residual.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos al procesar un conjunto de imágenes representativas de veinte de los veintiún experimentos realizados. En cada una de las imágenes capturadas, 600 de 640X480 pixeles, se cuantificó área y perímetro de las islas que va dejando el frente de avance. Se considera que se ha formado una isla de aceite cuando el agua fragmenta a la fase aceite dejándola aislada del resto de la fase, la cual sigue avanzando para ser expulsada por la salida de la celda. Como la entrada de la celda está permanentemente saturada con agua y la salida con aceite, excepto cuando el agua 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.

### 3.1 Análisis del movimiento de los fluidos y definición de sus estructuras

En esta sección se describen y definen las formas y movimientos que se desarrollan en el desplazamiento espontáneo de aceite por agua en las celdas Hele-Shaw.

En una celda saturada con aceite el desplazamiento con agua comienza a la entrada, la cual se encuentra en contacto con el agua durante todo el experimento. El agua paulatinamente ingresa por la entrada de la celda y va expulsando un volumen igual de aceite por la salida. El frente de desplazamiento está formado por la interface agua-aceite cuya forma y evolución depende de la relación entre las fuerzas capilares y las viscosas. Así, al inicio de todos los experimentos puede observarse que la interface agua-aceite es uniforme y el avance es lento. Sin embargo, una vez que se ha superado esta etapa, la velocidad del desplazamiento es mayor que la de inicio y el avance del frente se realiza por medio de digitaciones, como sucede en los experimentos con separación de 0.015 y 0.005 cm. Si la digitación avanza muy rápidamente puede incluso ocasionar que la fase aceite quede fragmentada en un gran número de islas, como sucede en los experimentos con separación de 0.005 cm. Existe también una condición intermedia en donde el desplazamiento de los fluidos puede anularse, como es el caso de los experimentos con separación de 0.075 cm. Estas observaciones generales se han concentrado en la Tabla 3.1.

Separación cm	Etapa	Formación de islas	Rapidez del desplazamiento	Forma dominante del frente
0.005	Inicial	Pocas ( ~ 1 )	Muy lenta	Digitación pobre
	Intermedia	Muchas ( ~ 150 )	Muy rápida	Digitación muy pronunciada
	Final	Pocas ( ~ 10 )	Muy lenta con flujo a contracorriente	Digitación pobre
0.015	Inicial	Pocas ( ~ 5 )	Lenta	Digitación moderada
	Intermedia	Pocas ( ~ 10 )	Rápida	Digitación pronunciada
	Final	Pocas ( ~ 10 )	Muy lenta con flujo a contracorriente	Digitación pobre
0.075	Inicial	Nula	Lenta	Digitación pobre
	Final	Pocas ( ~ 1-10 )	Muy lenta	Digitación moderada

Tabla 3.1. Características distintivas de los experimentos de acuerdo a su separación y etapa de desplazamiento

A partir de la observación del desplazamiento de los fluidos se apreció la formación de estructuras tanto del aceite fragmentado como del aceite en el frente de desplazamiento. Con base en estas observaciones se definieron las siguientes estructuras:

- a) **Región Continua.** Está formada por la fase aceite que tiene continuidad hasta la salida de la celda. Cuando la salida se ha saturado totalmente con agua, se considera que esta región ha desaparecido, aún cuando queden islas de gran tamaño. Sin embargo, en muchos experimentos se ha observado que la región Continua permanece en contacto con el borde de la salida mucho tiempo después de haber concluido el desplazamiento. Esta región se puede fragmentar, pero cada uno de sus fragmentos debe tener continuidad hasta la salida de la celda, en caso contrario los fragmentos forman parte de la región Insular.
- b) **Región Insular.** Esta 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. En algunos casos los fragmentos cercanos a la entrada, a la salida o a una pared epóxica pueden deformarse y adherirse a estos sitios como consecuencia del empuje que ejercen las fuerzas capilares que actúan al interior de la celda, obligando al fragmento a re-acomodarse o incluso a drenar aceite hacia el exterior.

La evolución de la región Insular presenta dos categorías distintas: dinámica y estática.

- **La región Insular Dinámica** se refiere a que un fragmento de la fase aceite puede modificar en el tiempo su área y su perímetro. Este cambio puede ser importante porque un fragmento, que en un instante se considera aislado, puede eventualmente sufrir cambios en su contenido de aceite. Esta situación particular puede presentarse cuando el agua ejerce presión sobre los fragmentos cercanos a la entrada, a la salida o a las paredes epóxicas de la celda, ayudando a que el aceite de este fragmento pueda desplazarse hacia el exterior.
- **La región Insular Estática** es la opuesta a la dinámica, en este caso los fragmentos de la fase aceite no pueden modificar su contenido de aceite porque se encuentran alejados de la entrada o la salida, o porque la pared epóxica no puede ser el medio para que expulsen aceite. Para estos fragmentos, es posible que se modifique su perímetro, pero no su área, porque solo se produce un re-acomodo de los fragmentos de aceite. En esta región se pueden distinguir tres posibilidades:
  - **Inmóvil.** Hay situaciones en que las fuerzas capilares son de tal magnitud que impiden que los fragmentos cambien su forma, en este caso no hay cambios ni de perímetro, ni de área.

- **Migratoria.** Los fragmentos tienden a moverse de un sitio a otro dentro de la celda o a deformarse, sin llegar a expulsar aceite, en este caso se modifica el perímetro pero no el área del fragmento.
- **Fragmentaria.** Los fragmentos de aceite se vuelven a fragmentar dentro de la celda, ocasionando el re-acomodo de la fase aceite, en este caso también cambia el perímetro pero el área es la misma.

### 3.2 Análisis de repetibilidad

En esta sección se analizan un experimento y su repetición con el propósito de identificar las similitudes y diferencias que existen entre ambos, para delimitar la repetibilidad tanto desde el punto de vista cuantitativo como del cualitativo.

Para que un resultado o medición experimental pueda repetirse es necesario que las condiciones bajo las cuales se realizó un experimento no cambien. En tales circunstancias se entiende que una medición es repetible cuando su valor cae dentro de un intervalo de valores que se ha considerado como la incertidumbre de la medición. Típicamente, cuando una observación no es repetible, la discrepancia se asocia a errores cometidos por el experimentador, o a variables ocultas que no han sido detectadas con anterioridad, y que por lo mismo no se ha ejercido ningún control sobre ellas, alterando el desarrollo del experimento. Un error común que comete el experimentador es la falta de calibración de un instrumento de medición. Sin embargo, en los procesos de desplazamiento espontáneo de aceite por agua es necesario precisar qué variable o parámetro se intenta reproducir y bajo qué condiciones.

En medios capilares o porosos, los procesos de desplazamiento de dos fluidos inmiscibles pueden ser repetibles, en tanto los fluidos no interaccionen químicamente con la superficie sólida (Saffman y Taylor, 1958; Chouke, 1962 y Homsy y Park, 1984). Sin embargo, esto no es válido en el desplazamiento espontáneo, en donde el motor del desplazamiento es precisamente la interacción físico-química entre los fluidos y las paredes del medio poroso o capilar. Por esta razón, la repetibilidad de los procesos de desplazamiento por imbibición espontánea es muy difícil de obtener, ya que es necesario restituir las propiedades químicas de las superficies sólidas del medio poroso o capilar, una vez que los fluidos han interaccionado con ellas durante el proceso de desplazamiento. En medios porosos la repetibilidad consiste en restituir la mojabilidad de la roca, que se cuantifica mediante experimentos de imbibición espontánea, en donde se evalúa la repetibilidad de la rapidez del desplazamiento espontáneo y el volumen del aceite residual atrapado (Mattax y Bobek, 1958, Cuiec, 1980), después de que el medio poroso ha sido sometido a un procedimiento de limpieza (químico o de altas temperaturas).

Sin embargo, en medios capilares no existen trabajos de desplazamiento espontáneo que estudien particularmente el problema de la repetibilidad.

En esta sección se definen las condiciones bajo las cuales se puede considerar que un desplazamiento espontáneo puede ser repetible, así como el significado de dicha repetibilidad.

Como en las celdas Hele-Shaw es posible observar el movimiento de los fluidos dentro del medio capilar, esta característica permite analizar la repetibilidad visualizando los aspectos reproducibles del proceso de desplazamiento. Desde el punto de vista de la morfología de las interfaces agua-aceite, es posible identificar los rasgos de repetibilidad en el proceso de desplazamiento. Además, para reforzar este análisis morfológico se ha cuantificado la evolución temporal de las regiones continua e insular, definidas con anterioridad, así como de la de su total, que resulta de la suma de ambas. Por esta razón, el análisis de repetibilidad contempla el aspecto configuracional o morfológico y el dinámico, este último se refiere al comportamiento temporal del cambio volumétrico que sufre el aceite durante el proceso de desplazamiento espontáneo.

La repetibilidad al nivel morfológico no significa que los fluidos se desplacen de manera idéntica en dos experimentos equivalentes, esto es, que la formación de islas y digitaciones sea idéntica. En este caso se considera un concepto más relajado de repetibilidad, el cual se basa en suponer que los fluidos utilizan patrones de desplazamiento similares pero no idénticos, es decir, el agua desplaza al aceite formando patrones de digitación parecidos, que avanzan por las mismas regiones de la celda.

La repetibilidad al nivel dinámico consiste en comparar el comportamiento de la rapidez de desplazamiento del aceite entre dos experimentos similares, esto implica que es posible establecer comparaciones temporales del comportamiento de la región Continua, de la insular y de la suma de ambas, es decir, de su total.

Con base en las apreciaciones anteriores, es importante establecer los factores que afectan la repetibilidad de un experimento, que son:

- a) Cada vez que termina un experimento la celda es desarmada, lavada y vuelta a armar. En este caso, se debe procurar que la celda sea rearmada colocando los vidrios en la misma posición, para asegurar que el medio capilar reconstruido sea "prácticamente" el mismo.
- b) Cada vez que se realiza un experimento los fluidos desplazante (agua) y desplazado (aceite), deben ser los mismos, esto implica que la concentración de colorante en el aceite debe ser la misma.

- c) Durante el experimento es importante procurar que la temperatura de la celda se mantenga constante y que la presión a la entrada y a la salida de la celda sean las mismas (presión atmosférica), para evitar que un gradiente tanto de temperatura como de presión generen desplazamiento forzado o inducido, porque propiedades como la viscosidad, la densidad y la tensión interfacial dependen tanto de la temperatura como de la presión.
- d) La saturación con aceite del espacio capilar de la celda se debe realizar por el mismo lugar, es decir, introduciendo el aceite por la entrada, o por la salida en ambos experimentos. Asimismo, la alimentación de agua, debe realizarse siguiendo el mismo procedimiento, para asegurar que se genere una sobrepresión a la entrada de la celda.

Estos factores han sido considerados en el desarrollo de los experimentos y fundamentan la metodología experimental utilizada, la cual ha sido descrita en la sección 2.2.

En esta sección se presentan y analizan los resultados experimentales que permiten apreciar que el proceso de imbibición espontánea es reproducible en dos niveles, el morfológico y el dinámico, de acuerdo a los términos y las condiciones antes descritos.

Aunque cada juego de vidrios fue armado siete veces para rearmar la celda, se considera que el primer experimento realizado no puede ser comparado con los dos subsiguientes, porque forma parte del procedimiento de estandarización de la metodología utilizada, que consiste en establecer el mismo procedimiento en cada experimento. Para recuperar las condiciones originales de mojabilidad de los vidrios, es necesario que ya hayan sido utilizados en algún experimento de imbibición espontánea, esto es, la presencia inicial de agua y aceite en un desplazamiento espontáneo puede modificar la mojabilidad de los vidrios vírgenes, cambiando las condiciones químicas de su superficie. Esta hipótesis fue corroborada al observar que los resultados del primer experimento son sustancialmente diferentes a los de los dos subsiguientes. Además, los primeros experimentos de cada celda mostraron un comportamiento muy parecido entre ellos.

En el primer experimento de cada celda se observó un desplazamiento más lento que en los dos subsiguientes, a pesar de que los tres son de la misma separación. También se observa una mayor fragmentación de la fase aceite durante el desplazamiento, la cual se realiza "como si" las superficies contuvieran algo de detergente (Extran). Durante la fragmentación las islas se alargan más en la dirección del desplazamiento, en comparación con los dos experimentos subsecuentes. De las tres celdas utilizadas, la 3 mostró menor fragmentación durante el primer experimento, pero en las tres se observó que

el patrón de desplazamiento del primer experimento difiere del patrón de los dos subsiguientes.

### **3.2.1 Repetibilidad conformacional y dinámica**

Como se ha indicado, este análisis abarca dos aspectos el conformacional o morfológico y el dinámico. En el primero se establecen las similitudes que guarda la sucesión de configuraciones del aceite en dos experimentos del mismo tipo (misma separación y misma celda), comparando la conformación de las estructuras generadas en el proceso de desplazamiento espontáneo. En el aspecto dinámico se compara la evolución en el tiempo del comportamiento de las regiones continua, insular y su total. En este análisis se revisa el comportamiento de todos los experimentos con la misma separación, para cada una de las tres celdas. En el apéndice 2A se presenta un análisis detallado para cada uno de los experimentos con separación de 0.015 cm, en el apéndice 2B el análisis de los experimentos con separación de 0.075 cm, y finalmente, en el apéndice 2C el análisis de los experimentos con separación de 0.005 cm. Sin embargo, a manera de resumen, en esta sección se sintetizan las similitudes observadas en todos los experimentos con la misma separación. Cabe aclarar que en algunos experimentos no fue posible cuantificar la información por causas diversas: a) El experimento B de la celda 2 no presentó desplazamiento alguno, b) El experimento F de la celda 2 presentó problemas de contraste entre la fase aceite y la fase agua, lo que se tradujo en problemas de visualización de la interface agua-aceite, por la misma razón, en el experimento G de la celda 3, solo fue posible cuantificar el comportamiento de los primeros 15 minutos.

Aunque el primer experimento de cada celda no es representativo para este análisis, se consideró conveniente incluirlo para mostrar que su comportamiento difiere de los dos experimentos subsiguientes. Además, de que representa el punto de partida de la serie de experimentos realizados en cada celda, y su inclusión es importante para el análisis de la sección 3.3.

#### **Análisis global de los experimentos con separación de 0.015 cm.**

Desde el punto de vista conformacional se pueden destacar las siguientes similitudes:

1. En los experimentos de estandarización de las celdas 1 y 3 se observa una gran similitud en el comportamiento del desplazamiento. Sin embargo, en la celda 2 el agua penetra preferentemente por el lado izquierdo de la celda. Estos tres experimentos presentan mayor fragmentación que los

subsecuentes, porque el número de islas (~100) que se forman durante el proceso de desplazamiento de los primeros experimentos (1A, 2A y 3A), es mayor que las que se forman en los dos experimentos subsiguientes (~20). En este sentido, la celda 3 presentó, desde el primer experimento, una menor fragmentación de la fase aceite, esto es, una menor formación de islas. El hecho de que los primeros experimentos presenten mayor fragmentación puede deberse a que la mojabilidad de las superficies tiende a estandarizarse después de realizar el primer experimento. Sin embargo, esto no se observó en la celda 2 (experimento 2B), lo cual puede ser un indicativo de que la estandarización no en todos los casos se logra después del primer experimento.

2. Los experimentos 1B y 3B pudieron compararse con su repetición, los experimentos 1C y 3C, respectivamente. Sin embargo, el experimento 2B no pudo compararse con su repetición, el experimento 2C. Esto no es imputable al método de limpieza porque las celdas 1B, 2B y 3B se lavaron y armaron simultáneamente, siguiendo el mismo procedimiento. Por esta razón, el experimento 2B fue anulado.
3. La invasión temprana y total de la salida de la celda con agua obliga al aceite a salir a contracorriente por la entrada (experimentos 2C, 3B y 3C), a través de sitios en los que el aceite puede tener fácil contacto con la salida. Cuando esto no sucede, difícilmente el aceite sale a contracorriente (experimentos 1B y 1C).

En el aspecto dinámico se pueden anotar las siguientes observaciones generales:

1. Se observa que la aparición de digitaciones pronunciadas está relacionada con la rapidez de desplazamiento, y su aparición acelera el movimiento de las fases.
2. La rapidez de desplazamiento tiene un comportamiento muy similar entre los experimentos B y C, y difiere poco (celda 3) o mucho (celdas 1 y 2) respecto a los experimentos A.

La Tabla 3.2 muestra la información general obtenida de la configuración del experimento en el último tiempo de observación. Se puede apreciar que la recuperación de aceite es consistentemente alta, en promedio es de 82.72%. Esto quiere decir que la separación de 0.015 cm permite una recuperación de aceite de 82.72%. La duración de un experimento indica el lapso de tiempo comprendido entre el instante en que el agua tiene contacto con la entrada de la celda y el instante en el que los cambios en la expulsión de aceite en la celda son prácticamente imperceptibles para el observador. Aunque el inicio de un experimento queda bien determinado, el final real es muy difícil de definir porque el área ocupada por el aceite tiende asintóticamente con el tiempo, al valor del área que ocupa el aceite residual que queda atrapado en la celda. En

este trabajo, el tiempo en que finaliza la expulsión de aceite generalmente está sobreestimado, porque el experimento continuó a pesar de que la expulsión de aceite era imperceptible. Sin embargo, para realizar este análisis no ha sido necesario definir de manera inequívoca el momento en que finaliza un experimento. Considerando como final el tiempo en que se suspendió cada experimento, el tiempo promedio de duración fue de 1,753 minutos.

Experimentos con separación de 0.015 cm.	1A	1B	1C	2A	2C	3A	3B	3C
Volumen inicial de aceite, cm <sup>3</sup>	5.41	5.38	5.38	5.94	5.87	5.75	5.82	5.84
% de aceite recuperado	87.62	77.73	86.71	80.82	94.42	86.13	82.06	66.29
Volumen de aceite recuperado, cm <sup>3</sup>	4.74	4.18	4.67	4.8	5.54	4.95	4.77	3.87
Duración del experimento, min.	3,718	550	1,200	4,085	1,005	941	1,351	1,173

Tabla 3.2. Volúmenes, porcentajes de recuperación y duración total de los experimentos con separación de 0.015 cm

### Análisis global de los experimentos con separación de 0.075 cm.

Desde el punto de vista conformacional se pueden destacar los siguientes aspectos:

1. Todos los experimentos con esta separación presentaron desplazamiento de aceite, aunque en algunos casos el volumen desplazado fue mínimo (1D y 2E). Esta observación indica que para esta separación la presión capilar todavía tiene efectos sobre el desplazamiento
2. Ningún experimento y su repetición mostraron semejanza en su comportamiento conformacional o morfológico. Esto hace suponer que para esta separación, las fuerzas capilares son muy débiles y que otras fuerzas comienzan a participar de manera importante, como es el caso de la fuerza gravitacional y de la resistencia viscosa, ocasionando que la repetibilidad sea muy difícil de lograr.
3. Como esta separación es de magnitud considerable, puede suponerse que los efectos gravitacionales pueden comenzar a influir en el desplazamiento de los fluidos.

Desde un punto de vista dinámico se pueden mencionar los siguientes aspectos:

1. La rapidez del desplazamiento entre un experimento y su repetición muestran un comportamiento muy distinto, como se puede observar de las gráficas de la región Continua. En todos los casos, al inicio (primeros 10 o

20 minutos) la rapidez es muy parecida, pero conforme evoluciona el experimento las curvas tienden a diferir.

2. La recuperación de aceite no fue consistentemente menor en los experimentos iniciales (1D, 2D y 3D), esto es, el comportamiento no repetitivo de los experimentos con esta separación no es atribuible a la falta restauración de la mojabilidad de las superficies..
3. En general se observaron digitaciones muy anchas y de longitud corta, excepto en los experimentos 2D y 3D, en donde se observaron digitaciones de consideración. Sin embargo, en estos casos la rapidez del desplazamiento no aumentó a causa de las digitaciones.

La Tabla 3.3 muestra la información general obtenida de la configuración final de cada experimento. La recuperación de aceite es muy variable. En unos experimentos es muy baja (1D y 2E), y en otros es muy alta (2D), en este caso un valor promedio sería poco significativo. Esto quiere decir que para una separación de 0.075 cm no es posible predecir la recuperación de aceite. También se puede concluir que la duración de los experimentos en general es muy grande, en promedio 6,531 minutos. Aunque, como en el caso de los experimentos con separación de 0.015 cm, su duración no es muy representativa, es muy notorio que estos experimentos tienen duraciones mucho mayores a los de separaciones de 0.015 cm.

Experimentos con separación de 0.075 cm.	1D	1E	2D	2E	3D	3E
Volumen inicial de aceite, cm <sup>3</sup>	26.99	26.89	29.71	29.37	29.09	28.55
% de aceite recuperado	7.80	27.22	73.17	5.30	31.56	20.71
Volumen de aceite recuperado, cm <sup>3</sup>	2.10	7.32	21.74	1.56	9.19	5.91
Duración del experimento, min.	768	8,640	3,093	5,400	10,080	11,205

Tabla 3.3. Volúmenes, porcentajes de recuperación y duración total de los experimentos con separación de 0.075 cm

### Análisis global de los experimentos con separación de 0.005 cm.

En el aspecto conformacional se pueden señalar las siguientes similitudes:

1. Los experimentos de la celda 1 presentan mayor repetitividad que los de las otras dos celdas, incluso la forma y posición de algunas islas coincide.
2. En todas las celdas el experimento y su repetición mostraron características que los identifica:
  - a) En la celda 1, la formación de digitaciones y el proceso de fragmentación de la fase aceite coinciden, así como la aparición de flujo de aceite a contracorriente y la ubicación de ciertas islas.

- b) En la celda 2, la abundante fragmentación de la fase aceite, el hecho de que las digitaciones avancen rápidamente pero sin alcanzar la salida de la celda, evitando la aparición de flujo de aceite a contracorriente.
  - c) En la celda 3, la escasa formación de islas y el entrapamiento de una isla muy grande hacia el final de ambos experimentos.
3. Los experimentos muestran flujo de aceite a contracorriente, especialmente cuando la salida de la celda es totalmente invadida con agua, pero también cuando alguna isla puede eventualmente tener contacto con la entrada, como en el experimento 3G, en donde la enorme isla es deformada y obligada a expulsar aceite por la entrada.

Desde un punto de vista dinámico se puede mencionar lo siguiente:

1. Solo en la celda 1 se pudo cuantificar la rapidez del desplazamiento entre un experimento y su repetición. En las otras dos celdas no fue posible hacerlo porque alguno de los experimentos tuvo problemas de contraste entre el agua y el aceite (experimentos 2F y 2G). Sin embargo, el comportamiento inicial de estos experimentos, el cual sí pudo ser cuantificado, muestra que la velocidad del desplazamiento es similar entre ambos.
2. Los experimentos de las celdas 2 y 3 no presentaron una invasión prematura de agua en la salida de la celda, por lo cual no se presentó flujo a contracorriente.

La Tabla 3.4 muestra la información general obtenida de la última configuración de cada experimento, se puede apreciar que la recuperación promedio de aceite es de 70.44%, descartando los experimentos 2F y 3G. Esto quiere decir que la separación de 0.005 cm permite una recuperación aceptable de aceite, pero inferior que para separaciones de 0.015 cm. (82.72%). El tiempo promedio de duración de los experimentos fue de 5,368 minutos. Aunque esta información está sobrestimada, es importante notar que los experimentos de la celda 2 fueron en general más rápidos que los de las celdas 1 y 3, en una relación de 1 a 7, aproximadamente.

Experimentos con separación de 0.005 cm.	1F	1G	2F	2G	3F	3G
Volumen inicial de aceite, cm <sup>3</sup>	1.82	1.80	2.00	1.99	1.92	1.96
% de aceite recuperado	70.40	80.86	–	86.16	65.82	–
Volumen de aceite recuperado, cm <sup>3</sup>	1.28	1.48	–	1.71	1.26	–
Duración del experimento, min.	7,061	7,020	1,260	1,080	7,261	8,524

Tabla 3.4. Volúmenes, porcentajes de recuperación y duración total de los experimentos con separación de 0.005 cm

## Análisis Global

La Tabla 3.5 muestra la información general obtenida de las Tablas 3.2, 3.3 y 3.4, de ella se puede apreciar que los porcentajes más altos en la recuperación se obtuvieron en los experimentos con separación de 0.015 cm. (A, B y C). Esto también se traduce en un mayor volumen de aceite expulsado, porque las celdas con esta separación contienen un mayor volumen de aceite que las de 0.005 cm. Aunque el desplazamiento en la separación de 0.005 cm es más rápido, esto ocasiona que se deje más aceite esparcido en forma de islas y que el barrido sea menos homogéneo. La separación de 0.075 genera un barrido muy uniforme pero su eficiencia es muy baja, esto es, el área invadida por agua al final de los experimentos es mucho menor que en los casos de las otras separaciones.

CELDA 1	Experimento						
	A	B	C	D	E	F	G
Volumen inicial de aceite, cm <sup>3</sup>	5.41	5.38	5.38	26.99	26.89	1.9	1.9
% de aceite recuperado	87.62	77.73	86.71	7.80	27.22	77.0	68.5
Volumen de aceite recuperado, cm <sup>3</sup>	4.74	4.18	4.67	2.10	7.32	1.46	1.30
Duración del experimento, min.	3,718	550	1,200	768	8,640	7061	7020
CELDA 2	Experimento						
	A	C	D	E	F	G	
Volumen inicial de aceite, cm <sup>3</sup>	5.94	5.87	29.71	29.37	2.00	1.99	
% de aceite recuperado	80.82	94.42	73.17	5.30	-	86.16	
Volumen de aceite recuperado, cm <sup>3</sup>	4.8	5.54	21.74	1.56	-	1.71	
Duración del experimento, min.	4,085	1,005	3,093	5,400	1,260	1,080	
CELDA 3	Experimento						
	A	B	C	D	E	F	G
Volumen inicial de aceite, cm <sup>3</sup>	5.75	5.82	5.84	29.09	28.55	1.92	1.96
% de aceite recuperado	86.13	82.06	66.29	31.56	20.71	65.82	-
Volumen de aceite recuperado, cm <sup>3</sup>	4.95	4.77	3.87	9.19	5.91	1.26	-
Duración del experimento, min.	941	1,351	1,173	10,080	11,205	7,261	8,524

Tabla 3.5. Volumen total de aceite expulsado y porcentaje de recuperación, para la duración total de cada experimento en las tres celdas

### 3.3 Análisis de la dinámica interfacial

En esta sección se analiza el comportamiento de la interface agua-aceite en relación con el ritmo de expulsión de aceite de la celda. Uno de los análisis compara la generación de interface agua-aceite con la cantidad de aceite expulsado, y el otro compara, entre experimentos con igual separación, el comportamiento temporal de la longitud que se obtiene al dividir el área ocupada por aceite entre la longitud interfacial agua-aceite (móvil e inmóvil).

De acuerdo con las definiciones de región Continua e Insular expuestas con anterioridad, solo la región Insular puede tener perímetro, a la región Continua se le mide la longitud de la interface agua-aceite, que es la responsable del desplazamiento espontáneo a través de la línea de contacto agua-aceite-vidrio. Sin embargo, el perímetro de la región Insular no está ligado a la dinámica de los fluidos, excepto en los casos en que se encuentra en etapa Migratoria o Fragmentaria. Durante el proceso de desplazamiento espontáneo de los fluidos se observa que la longitud de la interface agua-aceite crece con el tiempo, excepto cuando se observa la fragmentación de la región Continua debido a la formación de islas, lo cual es posible identificar mediante los picos que presenta esta curva. La longitud inicial de la interface agua-aceite es aproximadamente del tamaño de la entrada de la celda (~19 cm).

En las Figuras 3.1 a 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 realizados en cada celda, respectivamente. En cada una de ellas se observa que un crecimiento de la longitud de la interface va acompañado de un decremento en el área de la región Continua. Al inicio, cuando la interface se ha deformado muy poco, el área de la región Continua casi no disminuye, pero cuando la longitud de la interface crece de manera notoria, se observa una evidente disminución del área de la región Continua. Esto indica que el ritmo de expulsión de aceite (o ritmo con que disminuye la región Continua) es función del ritmo de crecimiento o decrecimiento de la longitud de la interface agua-aceite. 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.

Durante el proceso de desplazamiento espontáneo de los fluidos siempre se genera más interface agua-aceite, aunque la región Insular no contribuya con el movimiento de las fases, si aporta perímetro interfacial que se acumula en el tiempo. En ocasiones, la longitud de la interface disminuye aún cuando se ha acumulado región Insular, esto sucede porque esta región modifica su perímetro por migración, re-acomodo o expulsión de aceite hacia la salida o entrada de la celda.

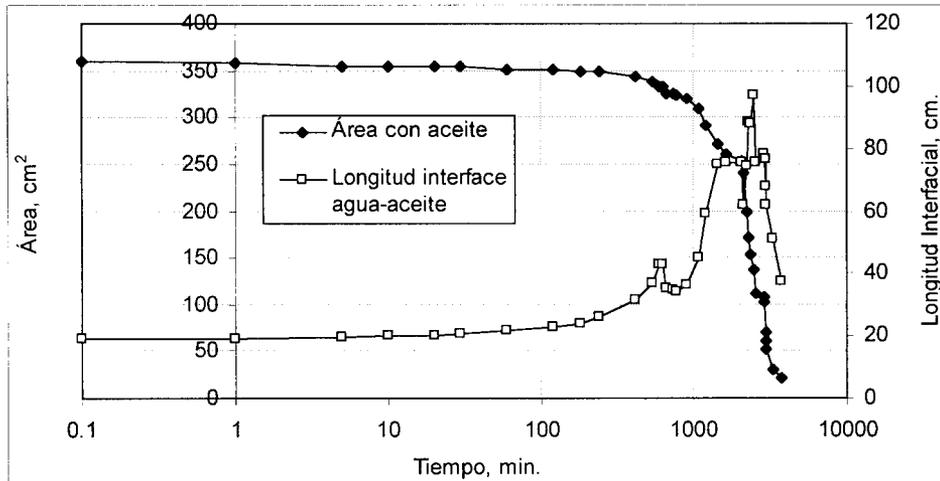


Fig. 3.1a. Área y longitud interfacial de la Región Continua, Exp. 1A

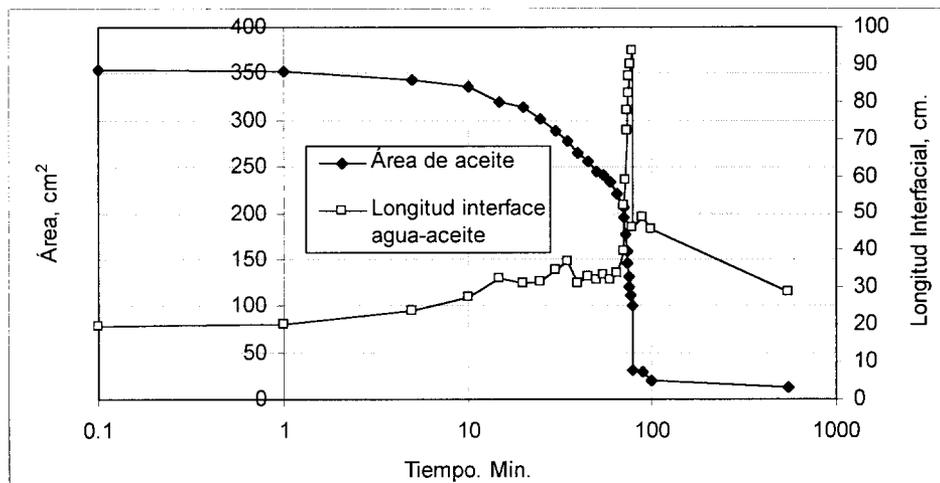


Fig. 3.1b. Área y longitud interfacial de la Región Continua, Exp. 1B

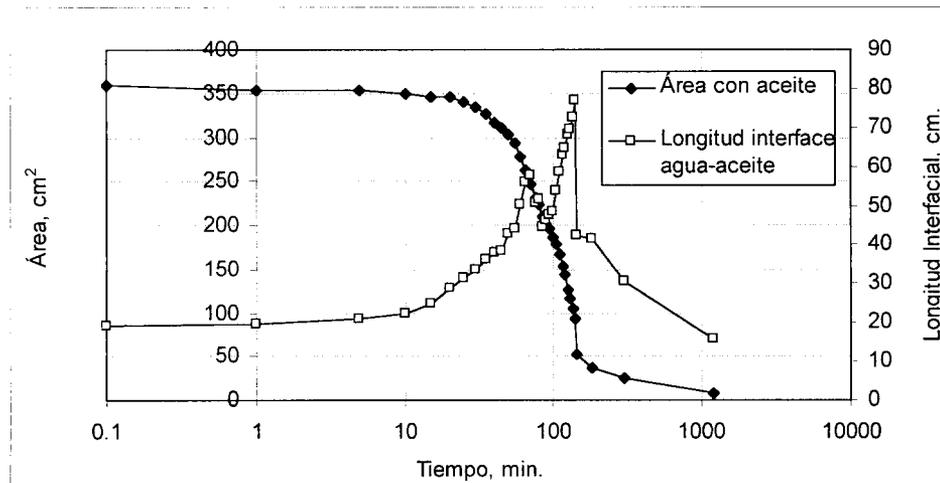


Fig. 3.1c. Área y longitud interfacial de la Región Continua, Exp. 1C

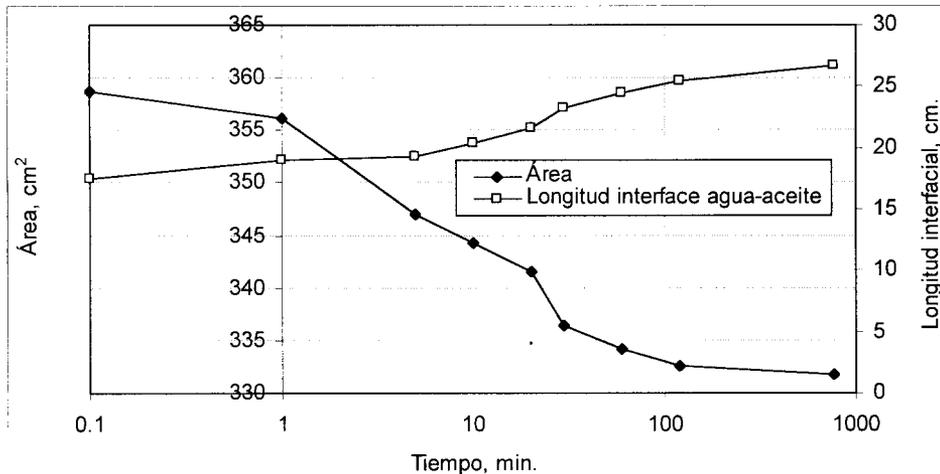


Fig. 3.1d. Área y longitud interfacial de la Región Continua, Exp. 1D

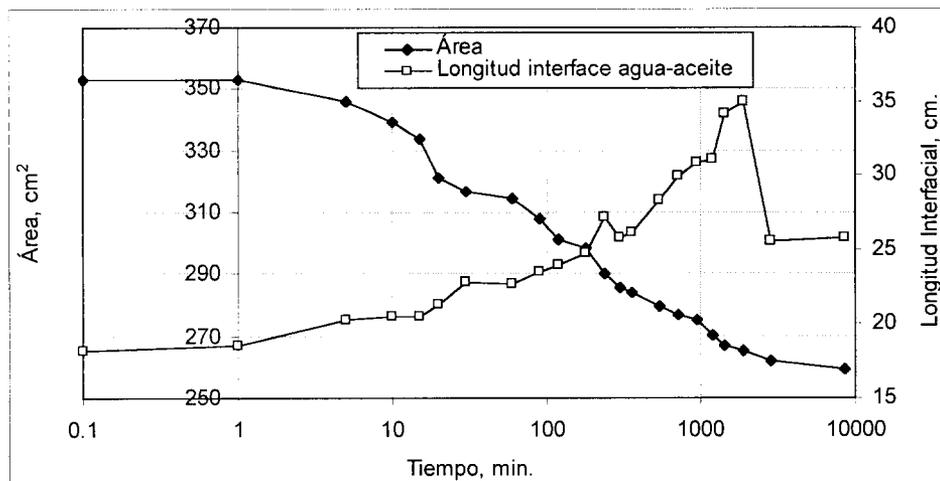


Fig. 3.1e. Área y longitud interfacial de la Región Continua, Exp. 1E

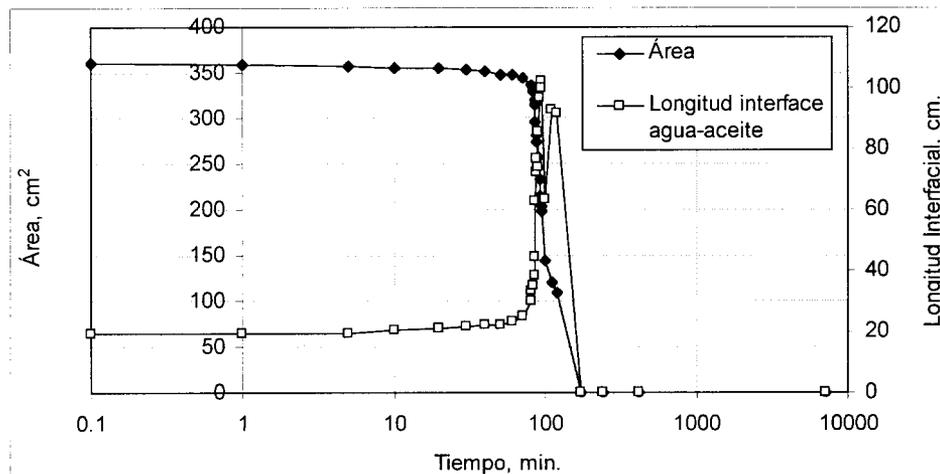


Fig. 3.1f. Área y longitud interfacial de la Región Continua, Exp. 1F

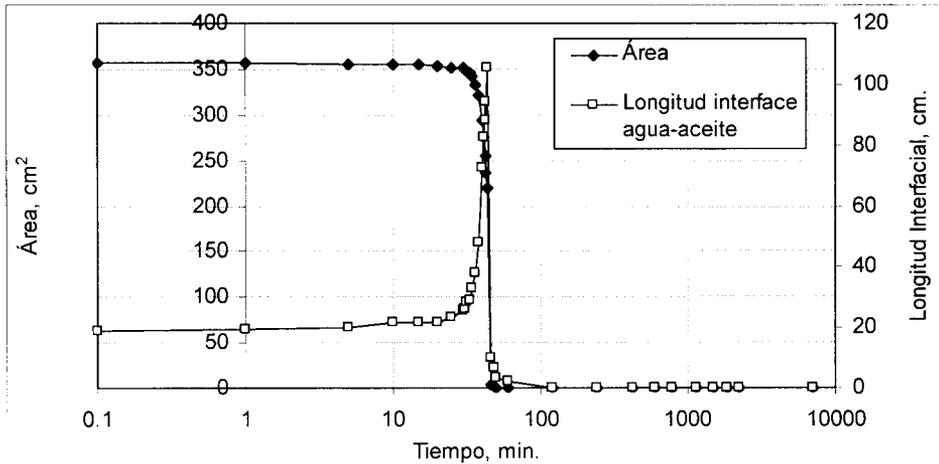


Fig. 3.1g. Área y longitud interfacial de la Región Continua, Exp. 1G

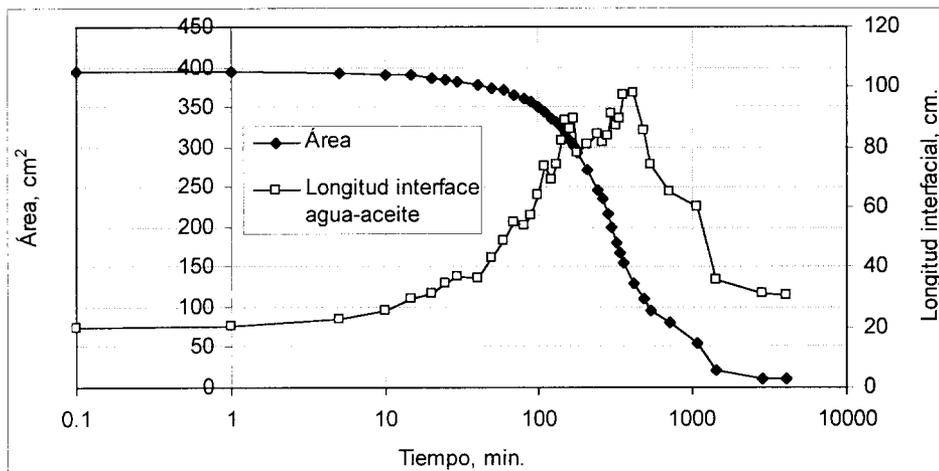


Fig. 3.2a. Área y longitud interfacial de la Región Continua, Exp. 2A

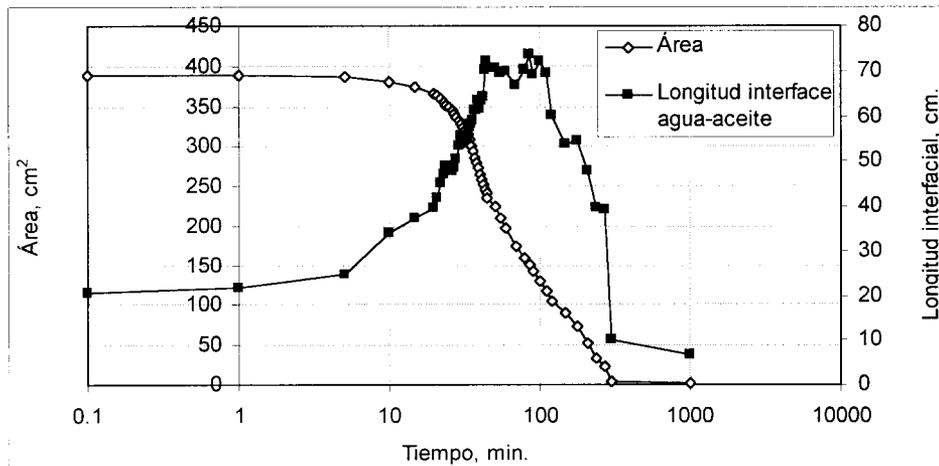
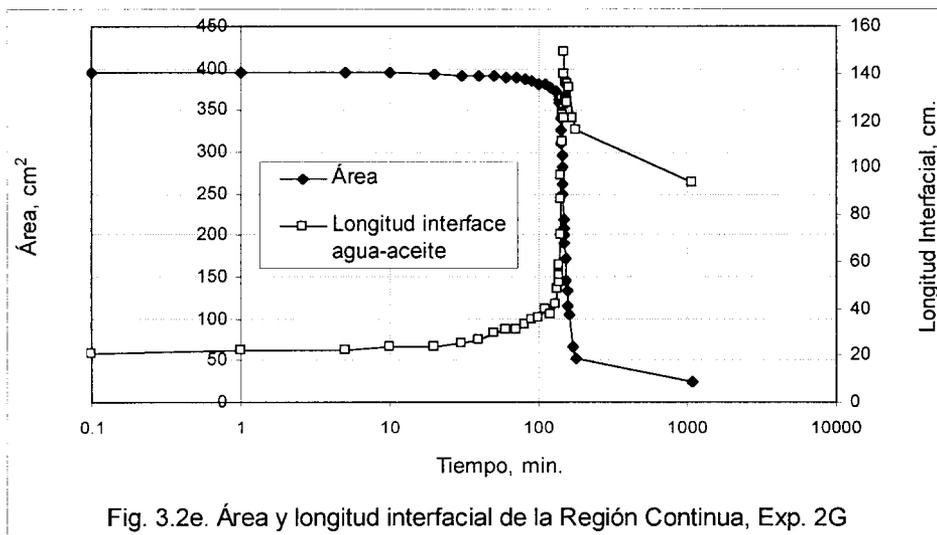
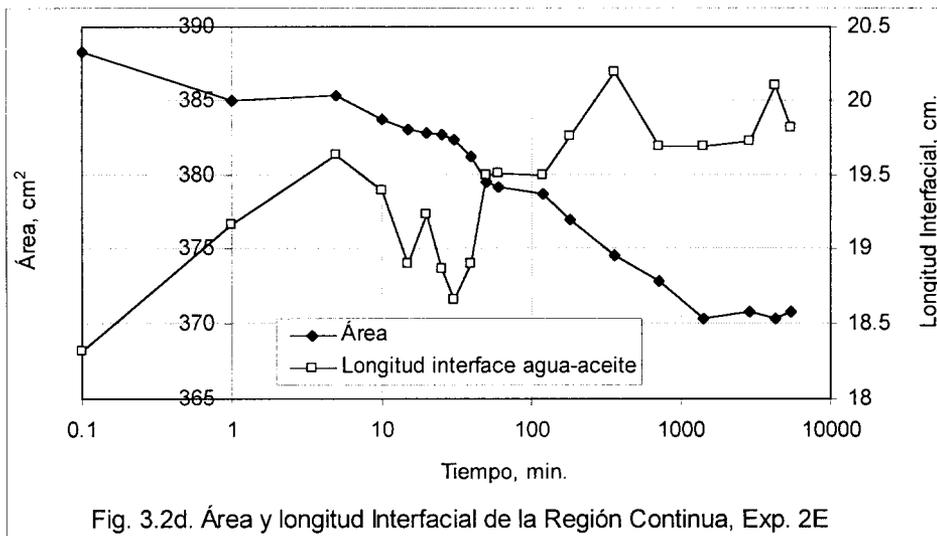
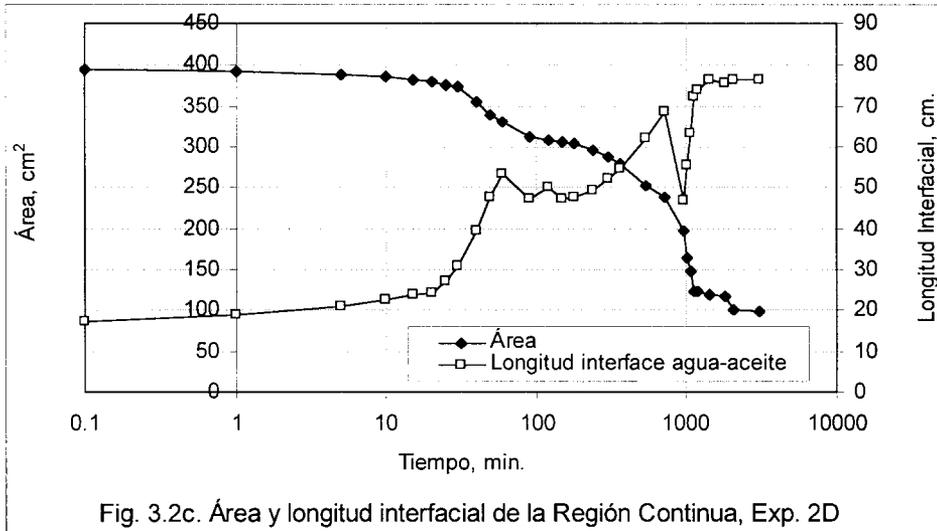
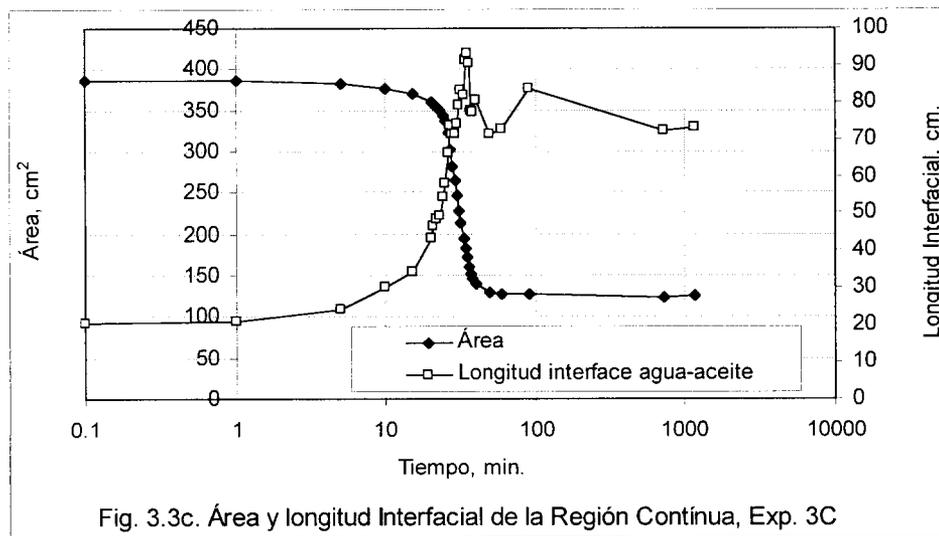
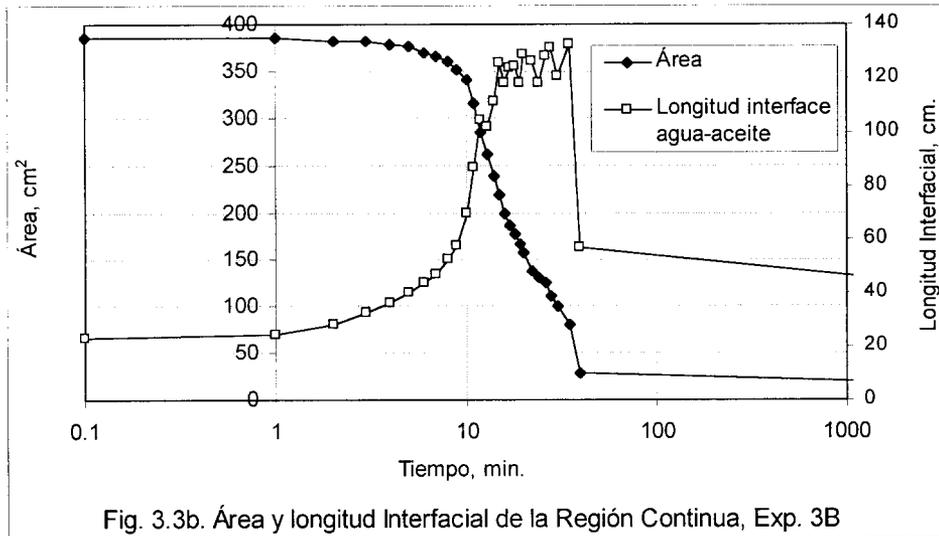
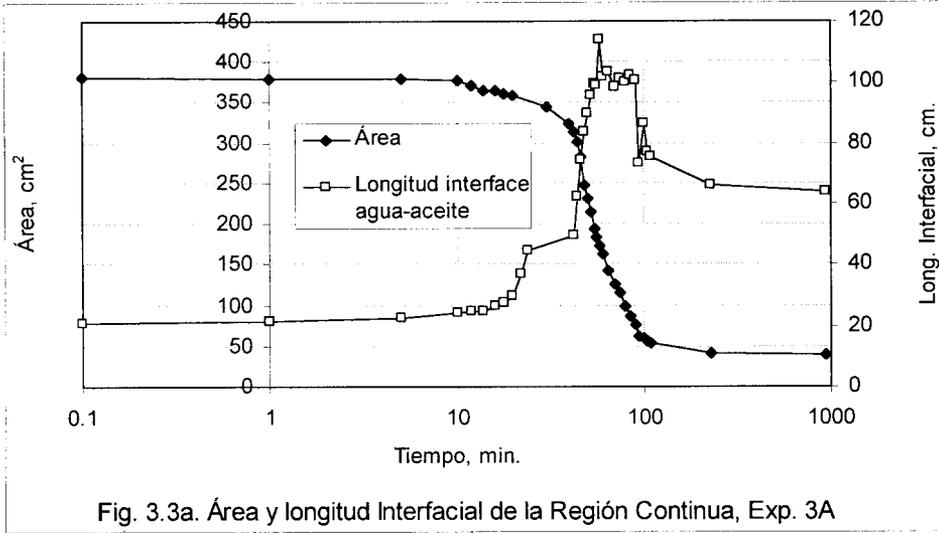


Fig. 3.2b. Área y longitud interfacial de Región Continua, Exp. 2C





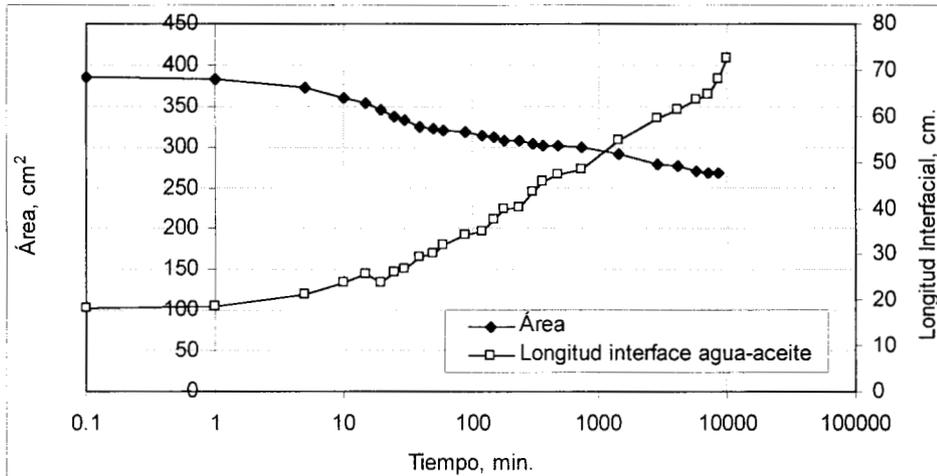


Fig. 3.3d. Área y longitud Interfacial de la Región Continua, Exp. 3D

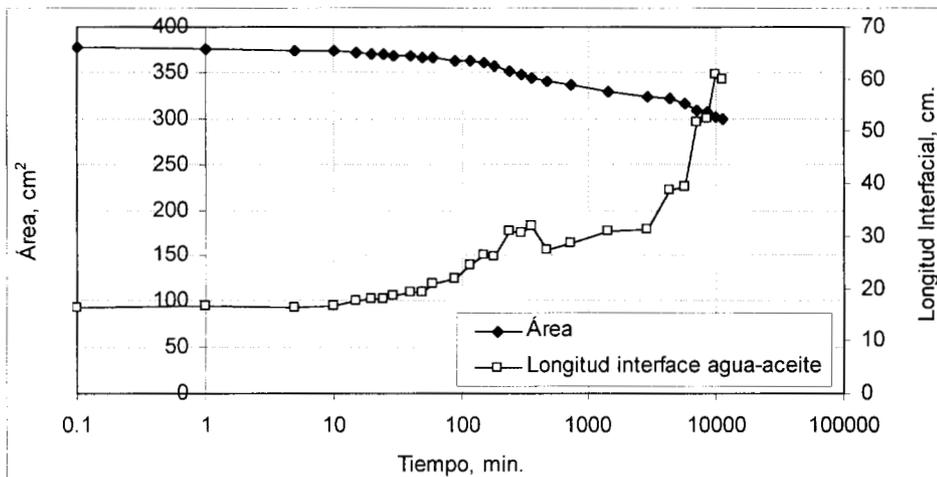


Fig. 3.3e. Área y longitud Interfacial de la Región Continua, Exp. 3E

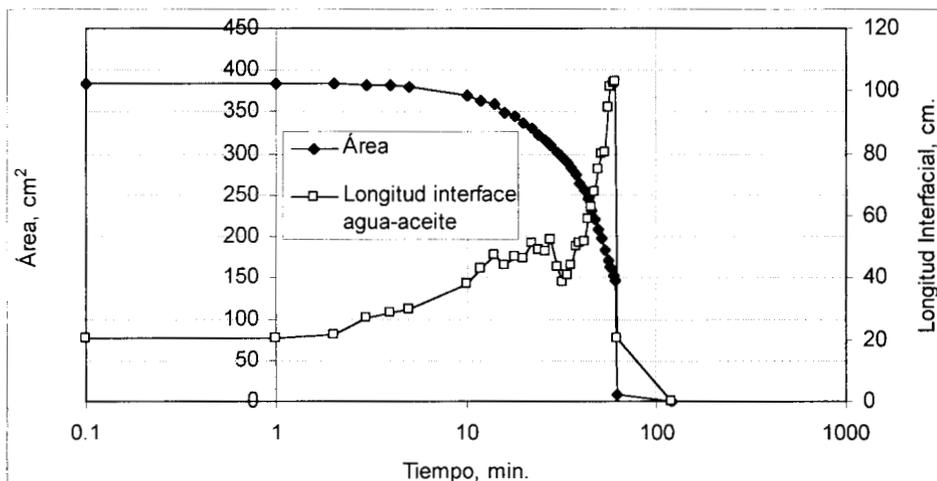
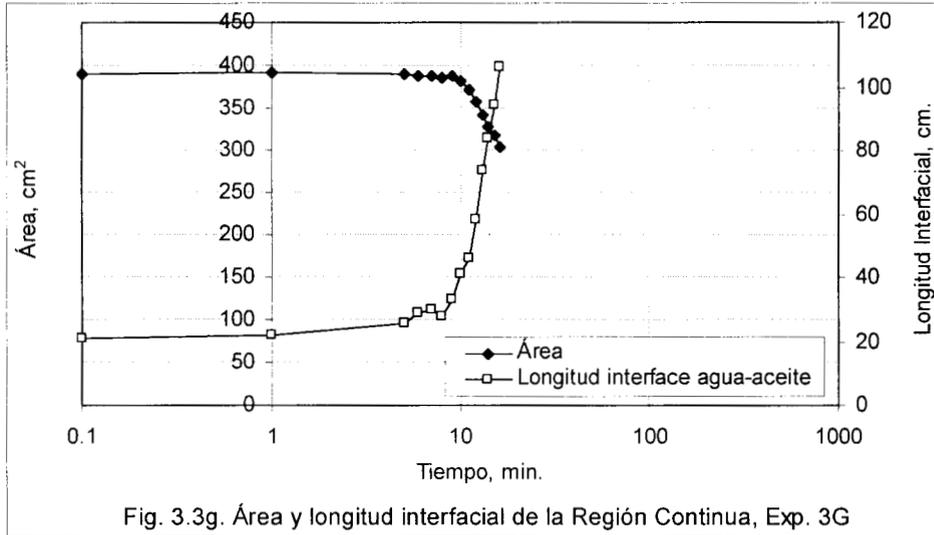


Fig. 3.3f. Área y longitud Interfacial de la Región Continua, Exp. 3F



Una inspección de las secuencias de las Figuras 2.5 a 2.7 muestra diferencias notorias entre experimentos con diferente separación. A partir de estas observaciones, resumidas en la Tabla 3.1, se intuye que el comportamiento del desplazamiento del aceite por el agua debe tener un patrón de comportamiento distinto para cada separación. Una de las características importantes es la generación de islas, lo cual genera a su vez una cantidad notable de perímetro interfacial estático; otra, es la generación de longitud interfacial en forma de dedos. Esto implica que si se relaciona el comportamiento del área con el de la longitud interfacial es posible obtener un patrón de comportamiento característico de cada separación. Por esta razón se definió una longitud interfacial característica expresada como

$$L_{2l} = \frac{A_i}{L_i} \quad (3.1)$$

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 (incluyendo la región Insular) al tiempo  $t_i$ . Si se observa el comportamiento de esta variable como función del logaritmo del tiempo, para cada separación, se obtienen las Figuras 3.4 a 3.6. En ellas se puede apreciar que el comportamiento de los experimentos es muy similar en su tendencia, dependiendo de la separación. Para cuantificar el grado de similitud se midió la pendiente de la sección lineal más extensa de cada curva, los resultados se muestran en la Tabla 3.6.

<i>d</i> cm	Celda 1	Pendiente cm/log(min)	Pendiente Promedio	Celda 2	Pendiente cm/log(min)	Pendiente Promedio	Celda 3	Pendiente cm/log(min)	Pendiente Promedio
0.005	1F	-157.26	-121.14	2F	—	-82.57	3F	-15.98	-27.68
	1G	-85.01		2G	-82.57		3G	-39.37	
0.015	1A	-11.01	-11.26	2A	-10.26	-12.24	3A	-16.32	-18.73
	1B	-9.41		2B	—		3B	-13.29	
	1C	-13.37		2C	-14.21		3C	-26.57	
0.075	1D	-3.01	-3.29	2D	-0.69	-1.78	3D	-7.25	-8.20
	1E	-3.57		2E	-2.80		3E	-9.14	

Tabla 3.6. Comportamiento de la longitud interfacial característica  $L_{2l}$  en la región de decaimiento lineal

De la Tabla 3.6 se puede apreciar que las pendientes muy pronunciadas están asociadas a separaciones pequeñas, mientras que las pendientes poco pronunciadas se asocian a separaciones grandes y las pendientes intermedias son características de las separaciones intermedias. Analizando esta información se puede asumir que si se desprecian los efectos iniciales y finales de las Figuras 3.4 a 3.6, es posible identificar un patrón de comportamiento particular de cada separación, en el cual el ritmo de desplazamiento del agua es acompañado por una generación de longitud interfacial en una proporción muy distinta para cada separación.

Las curvas de las Figuras 3.4 a 3.6 tienen un comportamiento similar al de una función acumulativa de una variable continua (integrada por la derecha). Si la función de densidad correspondiente fuera una función normal, sería posible hacer un cambio de variable ( $z=(x-\mu)/\sigma$ ), donde  $x=\log t$ , para llevar a cada curva a una escala de representación común o estándar, en donde todas se pueden comparar entre sí. Para estandarizar estas curvas es necesario determinar su media ( $\mu$ ) y su desviación estándar ( $\sigma$ ) a través de su función acumulativa. Esto se hizo utilizando la mejor aproximación lineal en los puntos centrales de las curvas, cuyas pendientes se mostraron en la Tabla 3.6, una vez trazada la mejor recta, se toman los puntos extremos de ella en donde la tendencia lineal los puntos comienza a alejarse de la curva (polígono que une los puntos experimentales). Tomando la proyección de estos puntos extremos sobre el eje de las X ( $\log t$ ), se obtiene el segmento de variación ( $\mu-\sigma, \mu+\sigma$ ), y de aquí se obtiene el valor de  $\mu$  y  $\sigma$ , los cuales se sustituyen éstas en la ecuación (3.2) (función acumulativa normal) para evaluar si los parámetros medidos proporcionan el mejor ajuste. En algunos casos hubo pequeñas variaciones, de una o dos décimas, que permitieron por ensayo y error obtener un mejor ajuste.

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

Una vez que se han confirmado los valores de  $\mu$  y  $\sigma$  que permiten un mejor ajuste (Tabla 3.7), con ellos se realiza la estandarización de la variable  $x$  ( $\log t$ ). Esto permite mostrar el comportamiento de cada curva bajo la misma escala, como se puede apreciar en la Figura 3.7.

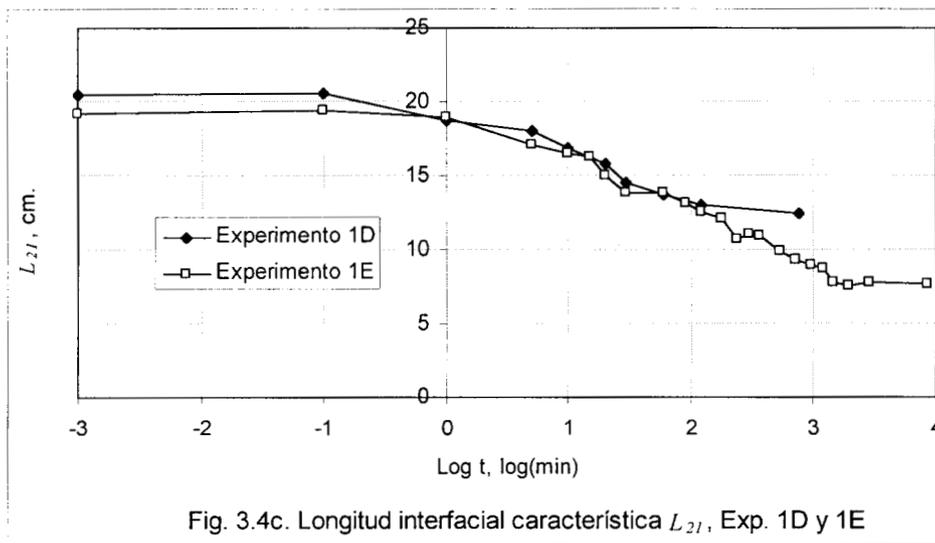
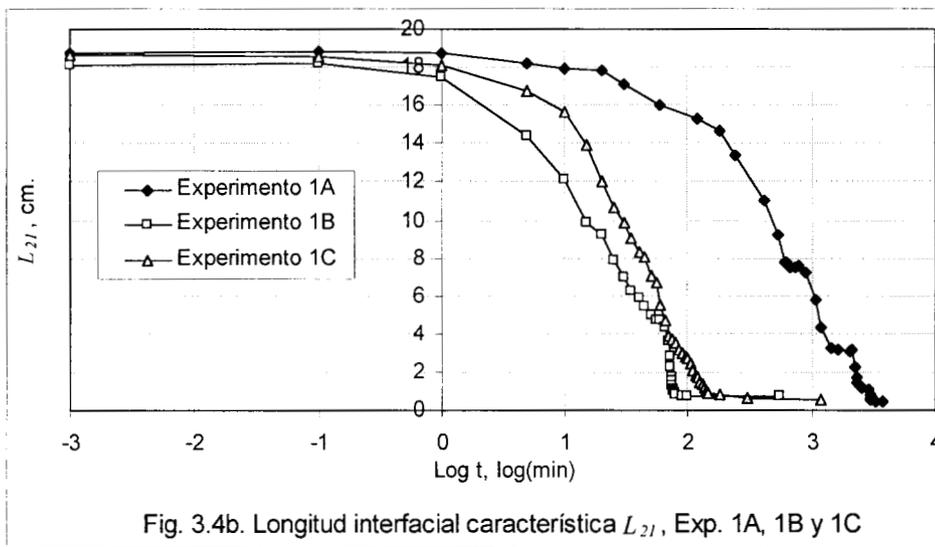
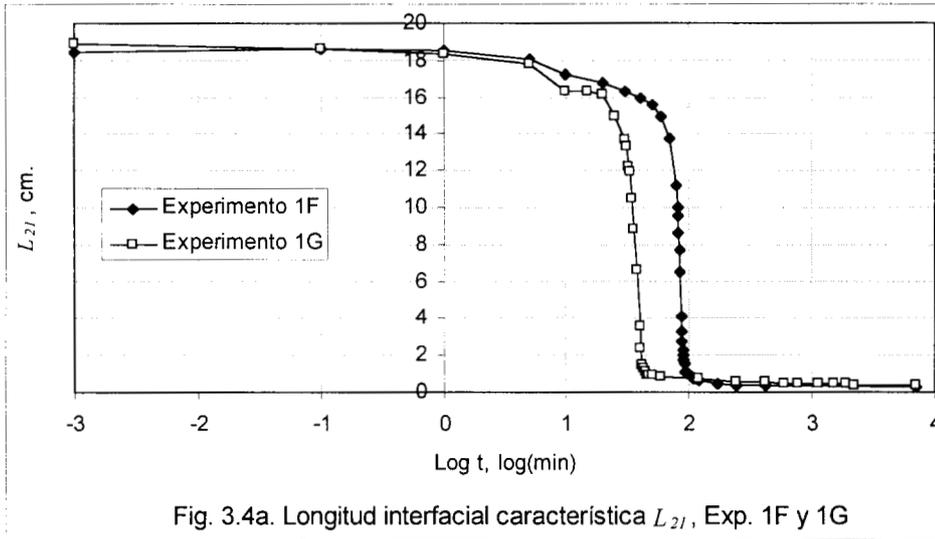
Para verificar la hipótesis de que las curvas de las Figuras 3.4 a 3.6 siguen un comportamiento que se semeja a la función acumulativa de una función de densidad normal se utilizó la prueba Kolmogorov-Smirnov para una sola muestra. En la mayoría de los casos esta prueba arroja un resultado positivo, 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 se muestran en el apéndice 3.

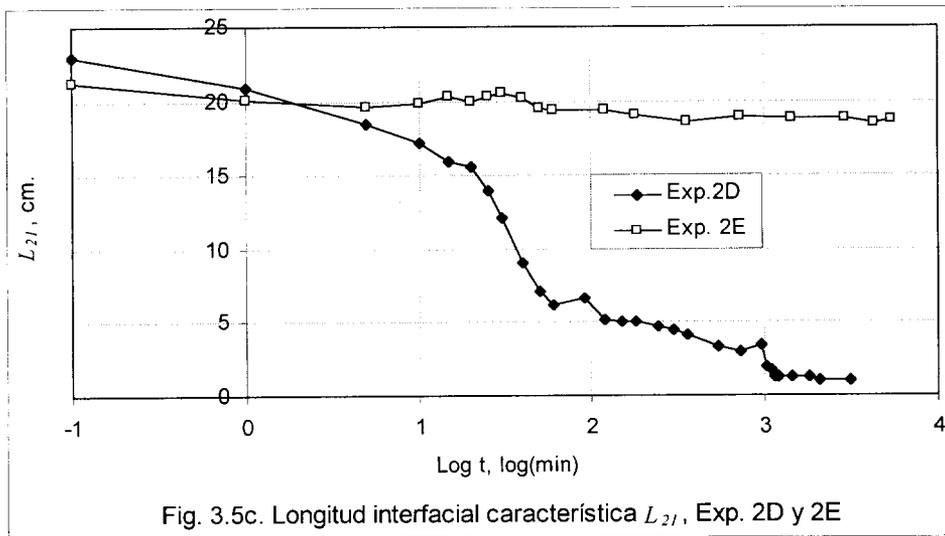
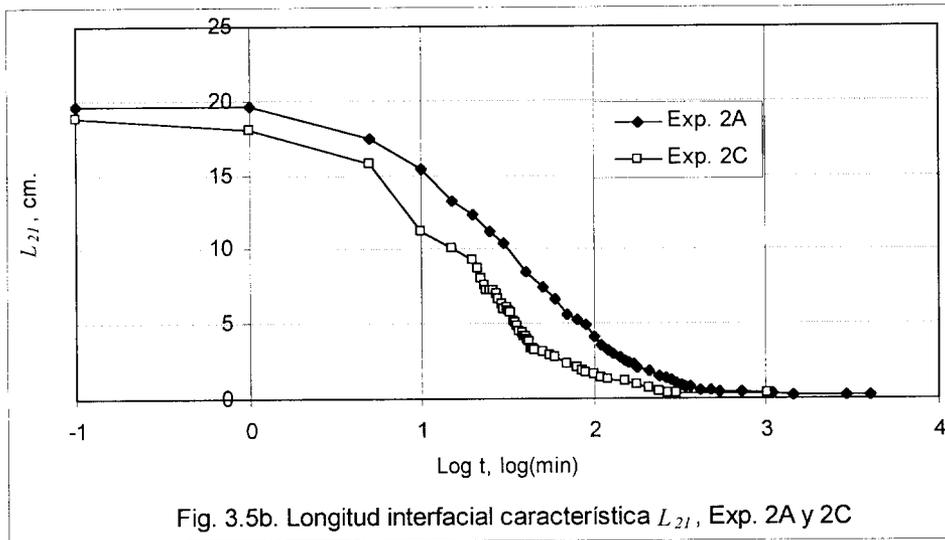
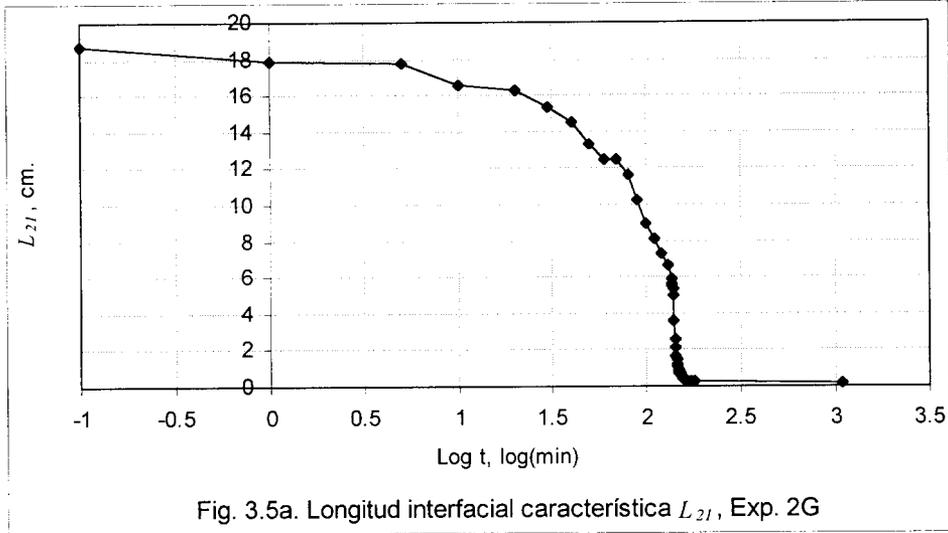
Este procedimiento de estandarización muestra que los resultados del cociente área/longitud interfacial de experimentos distintos se pueden comparar bajo una misma escala. Esto implica que dos experimentos con la misma separación pueden desarrollarse de manera distinta, sin embargo, su cociente área/longitud tiene un comportamiento equivalente bajo la curva normal estandarizada. Esta observación es muy importante porque significa que el desplazamiento espontáneo a diferentes separaciones tiene un invariante ante el tiempo que es el cociente área/longitud interfacial.

Separación <i>d</i> , cm	Celda	$\mu$	$\sigma$	Separación <i>d</i> , cm	Celda	$\mu$	$\sigma$	Separación <i>d</i> , cm	Celda	$\mu$	$\sigma$
0.005	1F	1.9	0.08	0.015	1A	2.6	0.7	0.075	1D	2.8	2
	1G	1.5	0.1		1B	1.27	0.7		1E	2.8	0.9
	—	—	—		1C	1.5	0.5		—	—	—
	2G	2.0	0.6		2A	1.5	0.6		2D	1.5	0.9
	—	—	—		2C	1.2	0.51		2E	6	2.6
	3F	1.0	0.5		3A	1.4	0.35		—	—	—
3G	1.0	0.2	3B	0.8	0.3	3D	2	1.3			
				3C	1.15	0.3	3E	2.8	1.3		

Tabla 3.7. Media y varianza de las curvas de las Figuras 3.4 a 3.6.

De la Figura 3.7 se observa que la variable estandarizada muestra un comportamiento que depende de la separación, esto es, a menor separación, la pendiente de decrecimiento es mayor. Este análisis es un refinamiento de lo reportado en la Tabla 3.6, en donde solamente se consideró el comportamiento de la tendencia de decaimiento lineal. Sin embargo, este tratamiento sirvió para encontrar los mejores valores para  $\mu$  y  $\sigma$ .





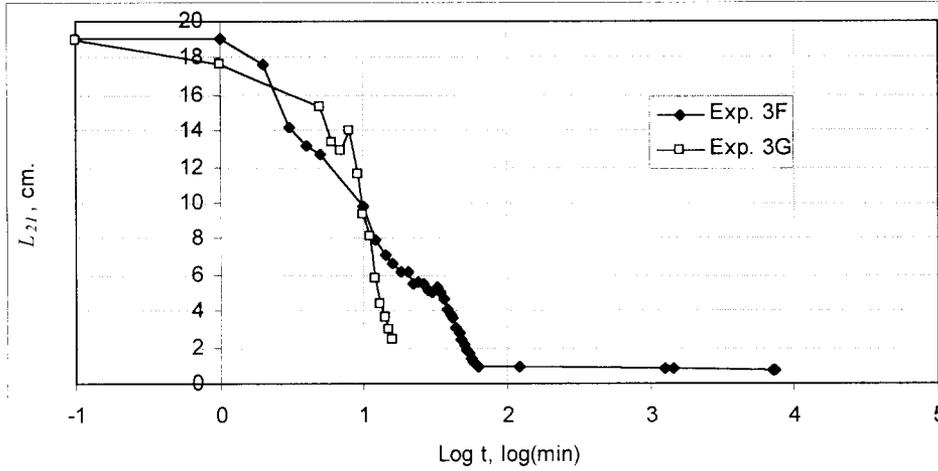


Fig. 3.6a. Longitud interfacial característica  $L_{21}$ , Exp. 3F y 3G

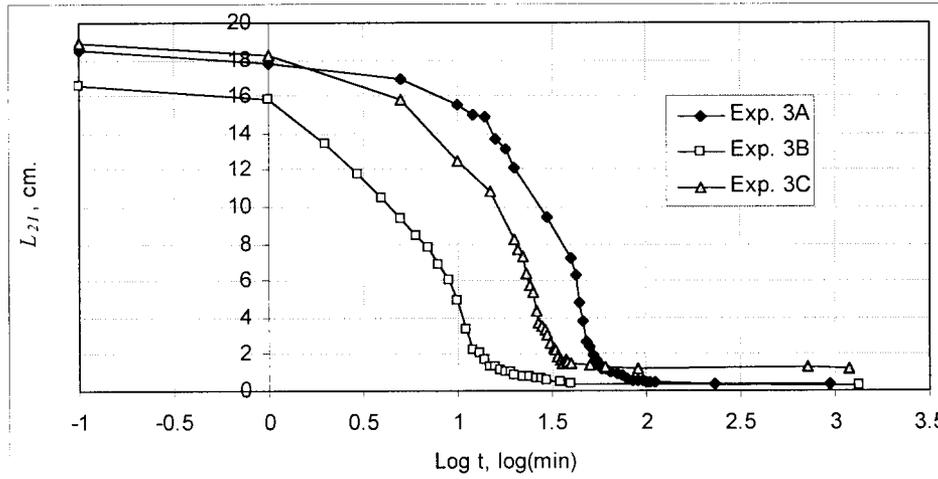


Fig. 3.6b. Longitud interfacial característica  $L_{21}$ , Exp. 3A, 3B y 3C

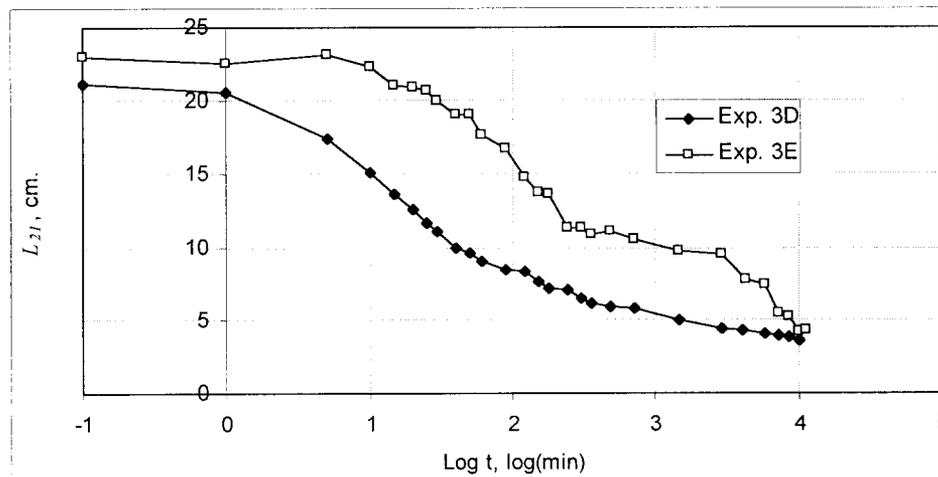
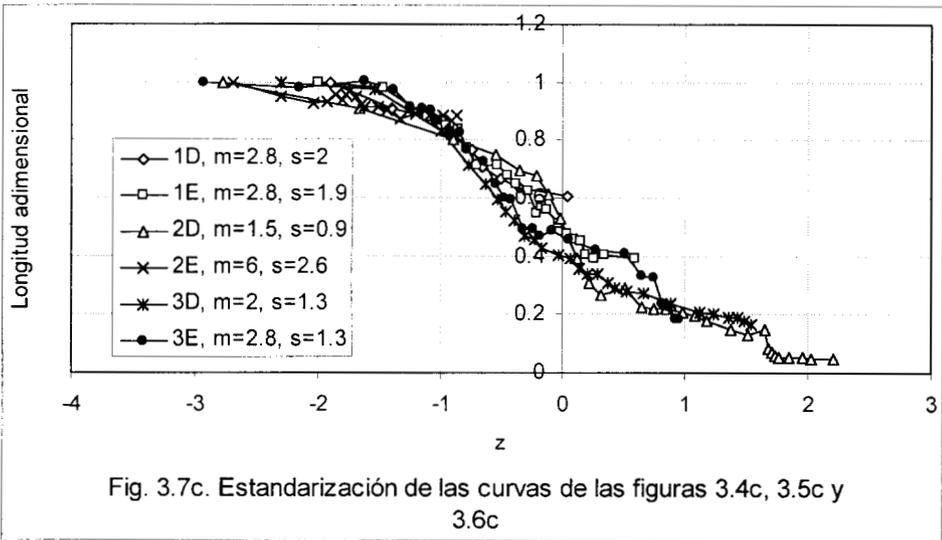
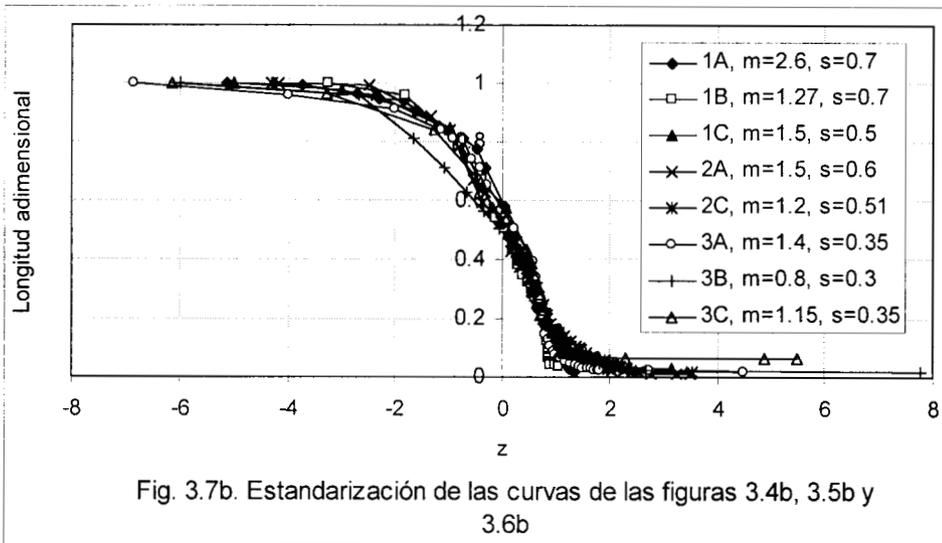
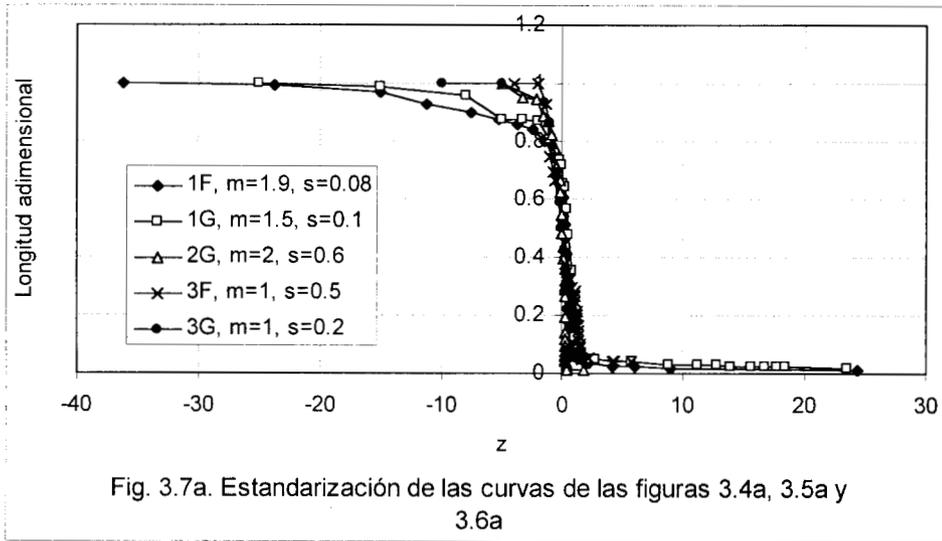


Fig. 3.6c. Longitud interfacial característica  $L_{21}$ , Exp. 3D y 3E



### 3.4 Análisis del desplazamiento de los fluidos

En esta sección se analiza si existe una relación entre las características del desplazamiento y la separación entre los vidrios de la celda. Aunque las gráficas de las secciones precedentes dan evidencia sobre los cambios que sufre el desplazamiento de los fluidos, es necesario visualizar éstos de una manera más práctica. Por esta razón, se ha considerado necesario cuantificar la velocidad promedio del desplazamiento frontal de los fluidos, utilizando la información de la evolución temporal del desplazamiento del aceite. Para evaluar esta variable se utilizaron las observaciones del área de aceite desplazado entre cada dos instantes de tiempo, es decir

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

Donde  $V_i$  es la velocidad del intervalo  $i$ ,  $A_i$  es el área ocupada por aceite al tiempo  $t_i$ ,  $A_{i+1}$  el área ocupada con aceite al tiempo  $t_{i+1}$  y  $L$  el ancho de la celda. También es posible evaluar la magnitud del desplazamiento promedio en la dirección longitudinal, para cada intervalo de tiempo, utilizando el área total ocupada por aceite al tiempo  $t_i$ , eso es

$$L_i = (A_i - A_{i+1}) / L \quad 3.4$$

Utilizando las velocidades calculadas con la ecuación (3.3), se obtuvieron las Figuras 3.8 a 3.10, que son las gráficas de las  $V_i$  como función del tiempo para los experimentos realizados en las tres celdas, respectivamente. Para los propósitos de este análisis no se consideran los experimentos 1A, 2A y 3A porque son experimentos utilizados para estandarizar la mojabilidad de los vidrios. Por ello solo se consideraron parejas de experimentos 1B y 1C, 2C, 3B y 3C, 1D y 1E, 2D y 2E, 3D y 3E, 1F y 1G, 2G, 3F y 3G.

A partir de la inspección visual del proceso de desplazamiento (Figuras 2.5 a 2.7) y del comportamiento de las velocidades de desplazamiento (Figuras 3.8 a 3.10), se identificaron dos o tres etapas distintas, dependiendo de la separación entre los vidrios. Para las separaciones de 0.005 y 0.015 cm se distinguen tres etapas. Una primer etapa, denominada Inicial, se presenta al inicio del experimento, en donde el frente de desplazamiento presenta digitaciones pequeñas. Esta etapa es seguida por una segunda, denominada de Desarrollo, que se caracteriza por un continuo y rápido incremento de la velocidad, ocasionado por la formación de grandes digitaciones que tienen su origen en el inesperado crecimiento de algunas de las pequeñas digitaciones

formadas en la etapa anterior (Inicio). Después de esta segunda etapa, se distingue una tercera, denominada Final, en donde la salida de la celda juega un papel importante en la desaceleración del desplazamiento y en la generación de flujo a contracorriente, cuando toda la salida es prematuramente invadida por agua. Para los experimentos con separación de 0.075 cm se distinguieron dos etapas, una Inicial, que se caracteriza por un desplazamiento lento pero constante, y otra Final. En donde se observa un continuo decaimiento de la velocidad hasta llegar al reposo. Estas dos etapas muestran un comportamiento "asintótico" de la velocidad, en cuya intersección se define el fin de una etapa, la Inicial, y el principio de otra, la Final.

A continuación se presenta el análisis del comportamiento de la velocidad de desplazamiento promedio, el cual es apoyado visualmente a través de las secuencias fotográficas de las Figuras 2.5 a 2.7. Este análisis se lleva a cabo por cada celda y en pares de experimentos similares. Para identificar el inicio y el final de cada etapa se utilizaron las gráficas de la velocidad de desplazamiento promedio (Figuras 3.8 a 3.10), y se contrastaron con la secuencia fotográfica de cada experimento. Siguiendo este procedimiento se observó que la formación de las grandes digitaciones tiene su origen en la formación lenta y prematura de pequeñas digitaciones en la etapa de Inicio. También se observó que en la etapa de Desarrollo las digitaciones de gran tamaño tienden a crecer transversalmente cuando ya no pueden hacerlo longitudinalmente. Asimismo, se observó que en experimentos con separaciones de 0.005 y 0.015 cm la rápida canalización del agua, a través de grandes digitaciones que alcanzan prematuramente la salida, ocasionan que la salida de la celda se sature con agua y que gran cantidad de aceite quede atrapado y sea obligado a salir a contracorriente.

Una vez que se la identificado el inicio y el final de cada etapa, se obtiene la velocidad de desplazamiento promedio, el desplazamiento longitudinal medio de la interface agua-aceite y la duración de cada etapa. Las expresiones para obtener estos valores promedio son las siguientes

$$V_e = \frac{L_e}{t_e} \quad (3.5)$$

$$L_e = \sum_{i=1}^n (A_i - A_{i+1})L \quad (3.6)$$

$$t_e = \sum_{i=1}^n t_i \quad (3.7)$$

Donde  $V_e$ , es la velocidad de cada etapa, es decir,  $e=I$ , para la etapa de Inicio,  $e=D$ , para la etapa de Desarrollo y  $e=F$ , para la etapa Final.  $L_e$  es el desplazamiento longitudinal de la etapa y  $t_e$  su duración. Las  $A_i$ , las  $t_i$ , y la  $L$  tienen el mismo significado que en la ecuación (3.3).

El análisis por celda describe cualitativamente el desplazamiento observado en cada experimento, en relación con el comportamiento de la velocidad de desplazamiento. Los detalles se pueden consultar en el anexo 3A para la celda 1, en el anexo 3B para la celda 2, y en el anexo 3C para la celda 3. Sin embargo, los resultados cuantitativos por celda se resumen en las Tablas 3.8, 3.9 y 3.10, respectivamente.

$d$ cm	Exp.	Velocidad Promedio de la etapa, cm/min			Desplazamiento Promedio de la etapa, cm			Duración de la etapa, min		
		Inicio ( $V_I$ )	Desarrollo ( $V_D$ )	Final ( $V_F$ )	Inicio ( $L_I$ )	Desarrollo ( $L_D$ )	Final ( $L_F$ )	Inicio ( $t_I$ )	Des. ( $t_D$ )	Fin. ( $t_F$ )
0.005	1F	0.016	0.158	0.001	1.29	6.35	5.61	80	15	6,966
	1G	0.011	0.453	0.001	0.34	7.24	4.33	30	16	6,974
0.015	1B	0.105	0.482	0.002	6.84	6.75	1.01	65	14	471
	1C	0.045	0.111	0.002	1.35	12.80	2.31	30	115	1,055
0.075	1D	0.046	—	0.0007	0.90	—	0.52	20	—	748
	1E	0.023	—	0.00002	2.74	—	2.14	120	—	8,520

Tabla 3.8. Velocidad, alcance y duración de las etapas Inicial, de Desarrollo y Final, para diferentes separaciones en la celda 1

$d$ cm	Exp.	Velocidad Promedio de la etapa, cm/min			Desplazamiento Promedio de la etapa, cm			Duración de la etapa, min		
		Inicio ( $V_I$ )	Desarrollo ( $V_D$ )	Final ( $V_F$ )	Inicio ( $L_I$ )	Desarrollo ( $L_D$ )	Final ( $L_F$ )	Inicio ( $t_I$ )	Des. ( $t_D$ )	Final ( $t_F$ )
0.005	2G	0.007	0.29	0.004	0.87	11.57	3.73	120	40	920
0.015	2C	0.037	0.193	0.042	0.018	7.71	10.68	5	40	255
0.075	2D	0.0437	—	0.0035	3.93	—	10.62	90	—	3,003
	2E	0.0097	—	0.0001	0.48	—	0.53	50	—	5,380

Tabla 3.9. Velocidad, alcance y duración de las etapas Inicial, de Desarrollo y Final, para diferentes separaciones en la celda 2

<i>d</i> cm	Exp.	Velocidad Promedio de la etapa, cm/min			Desplazamiento Promedio de la etapa, cm			Duración de la etapa, min		
		Inicio ( $V_I$ )	Desarrollo ( $V_D$ )	Final ( $V_F$ )	Inicio ( $L_I$ )	Desarrollo ( $L_D$ )	Final ( $L_F$ )	Inicio ( $t_I$ )	Des. ( $t_D$ )	Final ( $t_F$ )
0.005	3F	0.045	0.203	0.0061	0.13	11.57	1.43	3	57	7,201
	3G	0.021	Np	Np	0.19	Np	Np	9	Np	Np
0.015	3B	0.037	0.581	0.003	0.03	12.20	4.05	1	21	1,329
	3C	0.071	0.664	0.001	1.41	10.14	1.61	20	16	1,137
0.075	3D	0.057	—	0.0003	3.39	—	2.80	60	—	10,020
	3E	0.006	—	0.0003	0.83	—	3.16	120	—	11,085

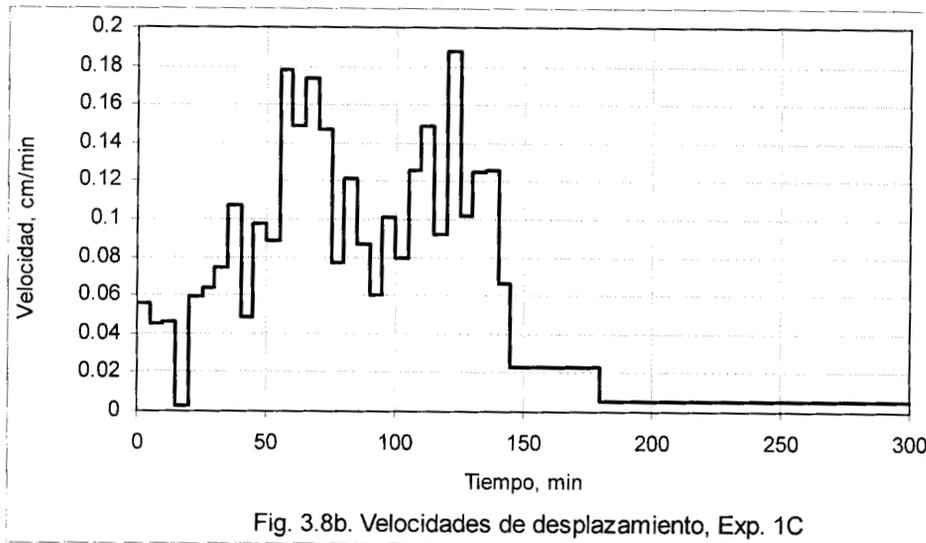
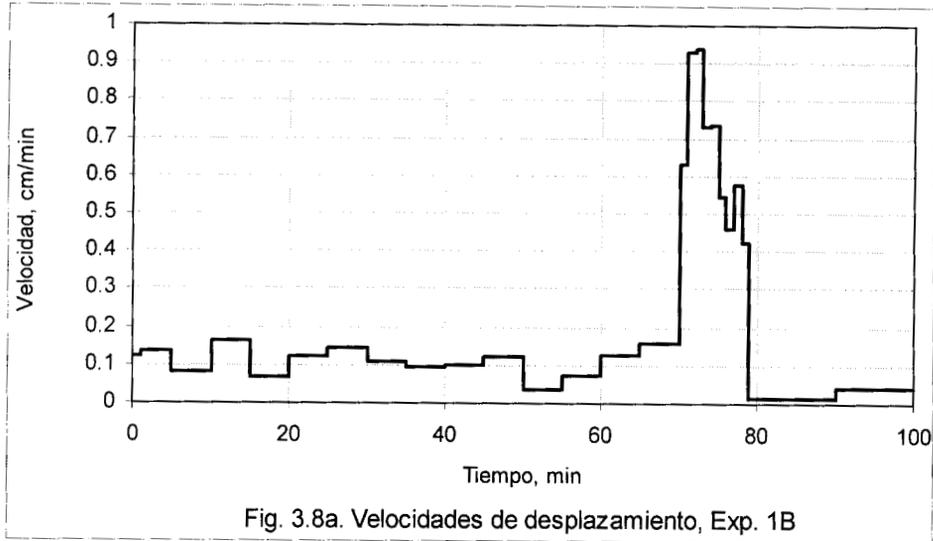
Np = no procesado

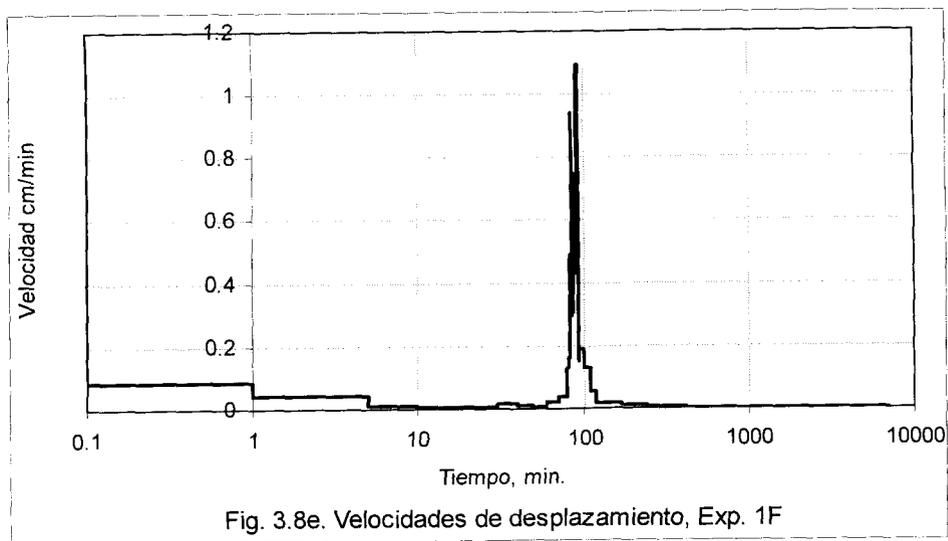
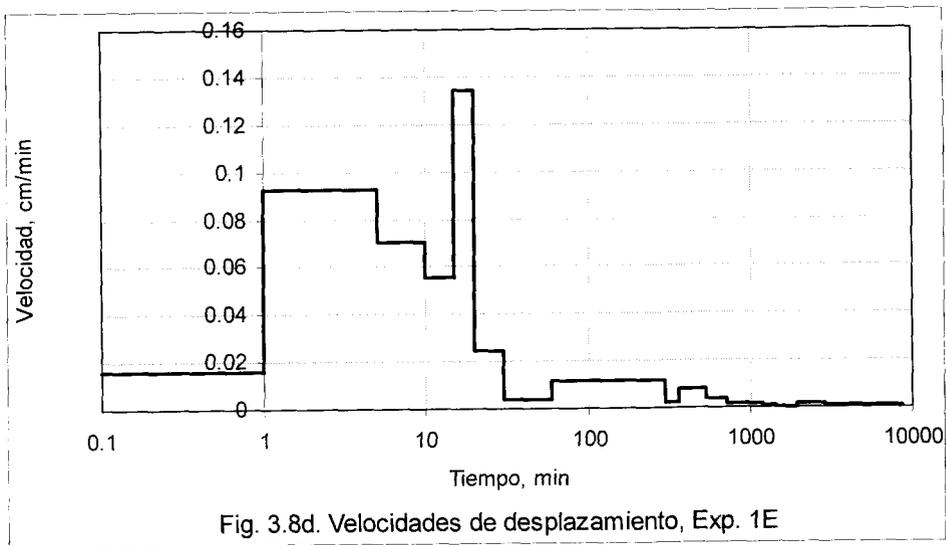
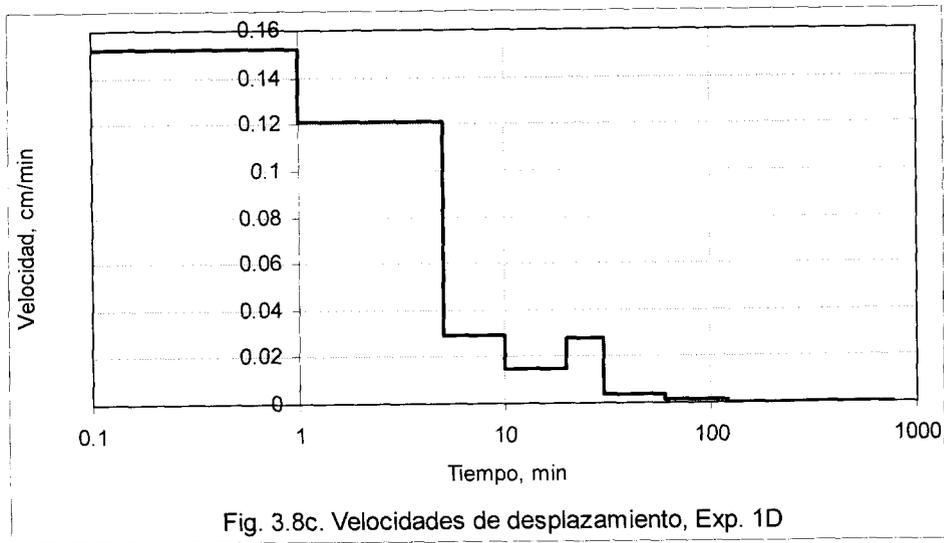
Tabla 3.10. Velocidad, alcance y duración de las etapas Inicial, de Desarrollo y Final, para diferentes separaciones en la celda 3

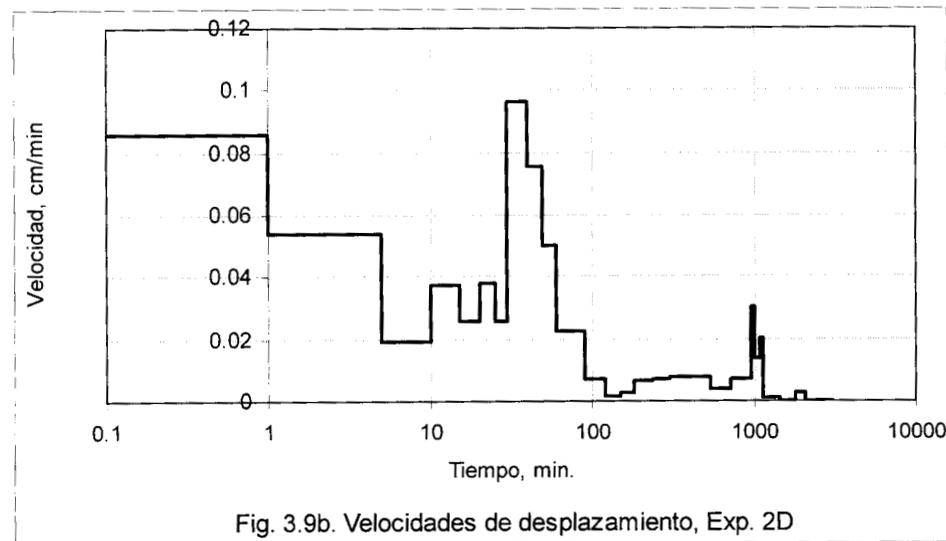
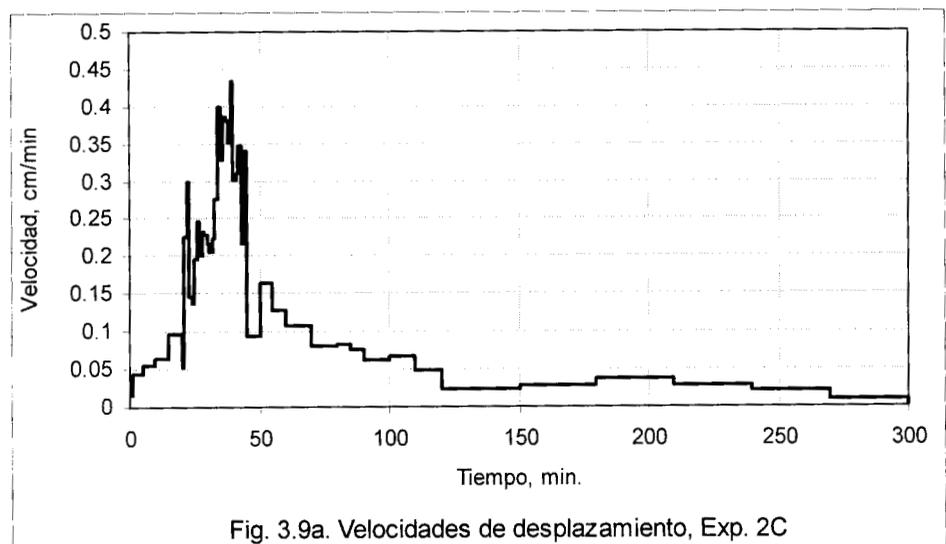
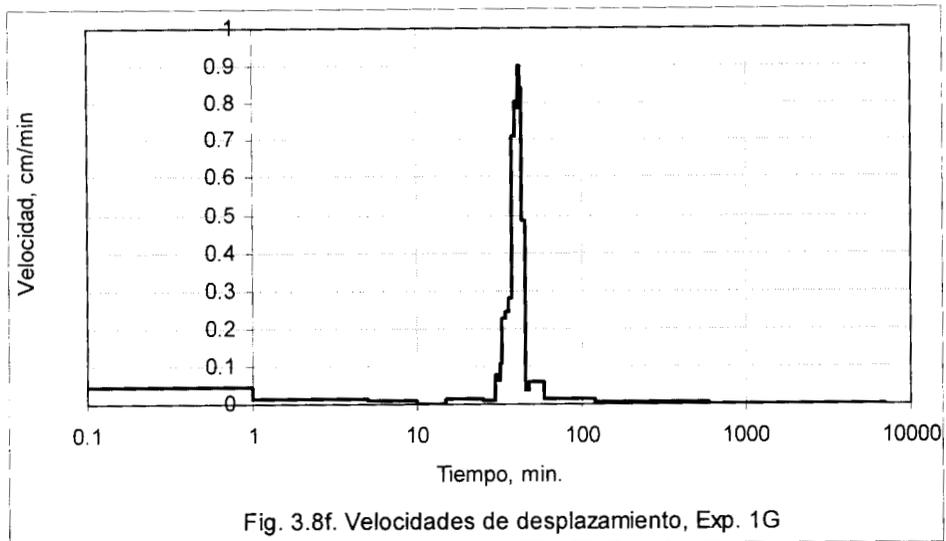
De acuerdo con los resultados del análisis precedente se pueden resaltar las siguientes observaciones:

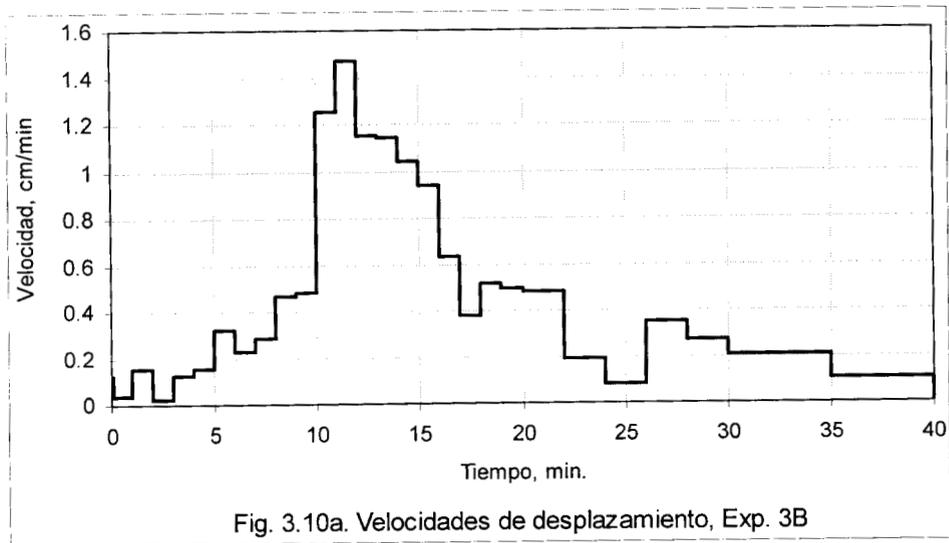
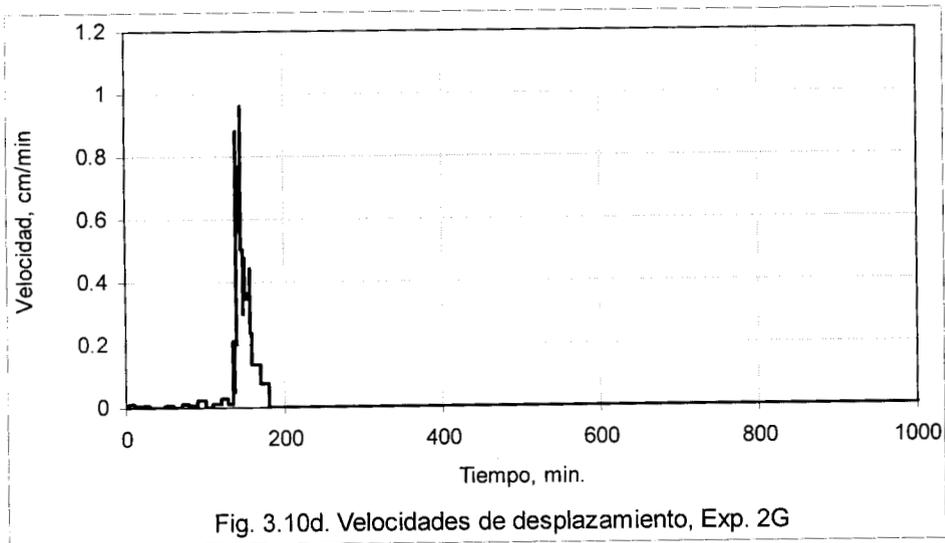
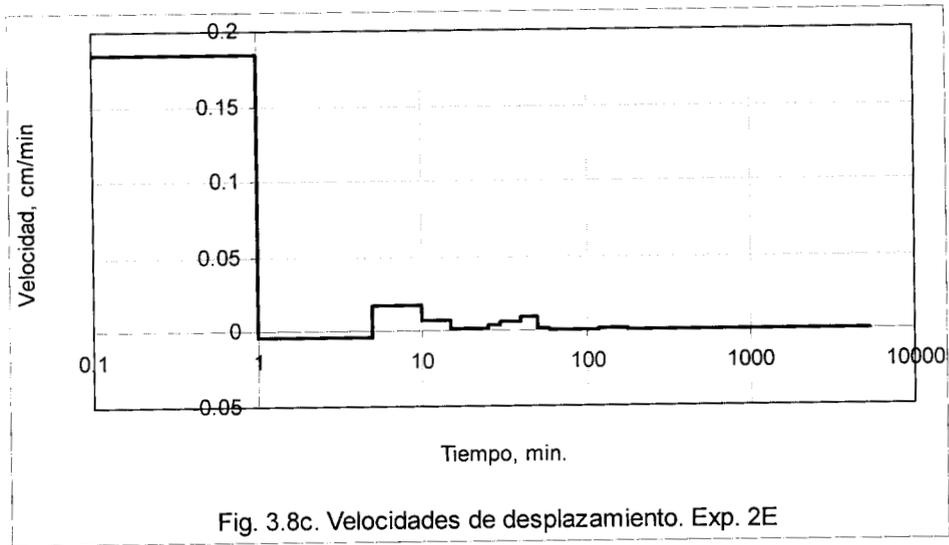
- Cada etapa presenta una velocidad característica. Para los experimentos con separaciones de 0.005 y 0.015 centímetros la velocidad de las etapas Inicial y Final (avance con digitaciones moderadas) tienen valores menores que los de la etapa de Desarrollo (digitaciones pronunciadas), de acuerdo con las Tablas 3.8, 3.9 y 3.10. Mientras que, en los experimentos con separación de 0.075 centímetros, la etapa de Inicio siempre presenta valores mayores que los de la etapa Final.
- En casi todos los experimentos de 0.005 y 0.015 cm el avance de la interface agua-aceite durante la etapa de Desarrollo es mayor que en las etapas Inicial y Final, excepto en el experimento 2C, en donde la longitud de avance de la etapa Final es mayor que la de Desarrollo. Para los experimentos con separación de 0.075 cm por lo general la etapa de Inicio presentó menor desplazamiento que la final, excepto en los experimentos 1D y 3D.
- La duración de la etapa Final siempre fue mayor que la duración de las otras dos etapas, para separaciones de 0.005 y 0.015 cm, porque hacia el final de los experimentos la expulsión de aceite es más lenta. Cabe señalar que esta observación es válida a pesar de que la duración de la etapa Final está sobrestimada, porque la última configuración del experimento se ha capturado cuando ya ha transcurrido bastante tiempo sin cambiar. En los experimentos con separaciones de 0.075 cm, la duración de la etapa Inicial siempre fue mucho menor que la de la etapa Final, porque en estos casos el movimiento de los fluidos siempre fue muy lento.

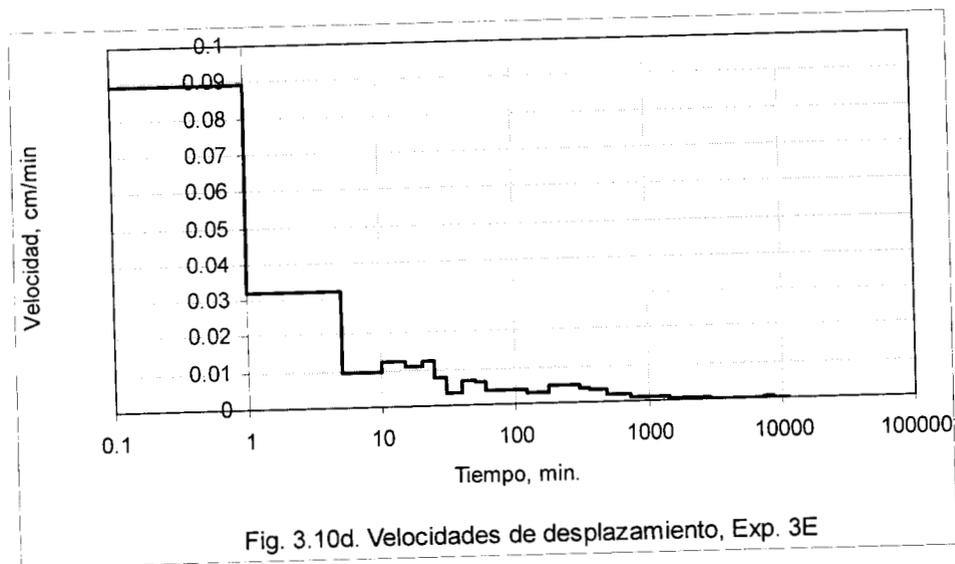
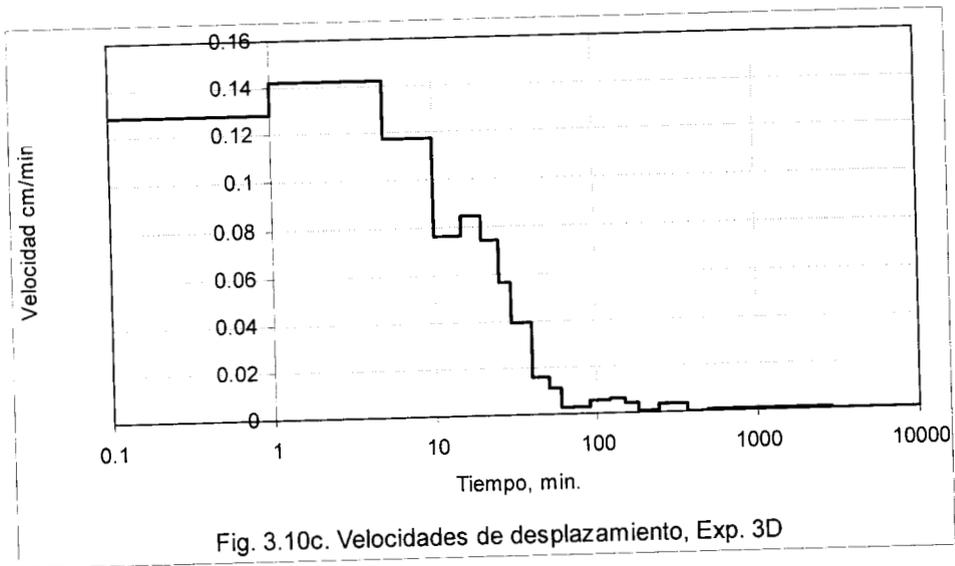
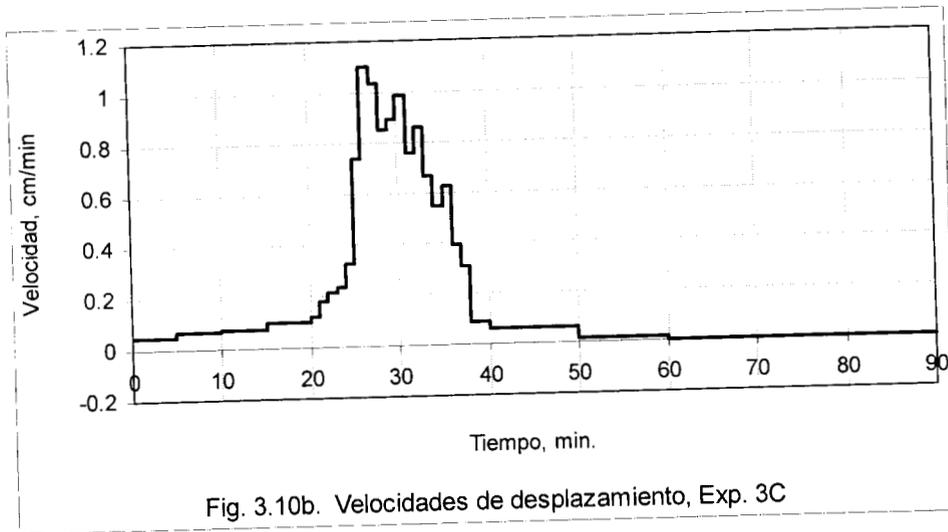
- Aunque se presentan los resultados para la etapa Final, no se consideran para este análisis porque en esta etapa hay variaciones en el comportamiento del desplazamiento que alteran el comportamiento natural del flujo a cocorriente, ocasionando que las comparaciones puedan ser sesgadas. El caso más común fue la aparición de flujo a contracorriente en varios experimentos.

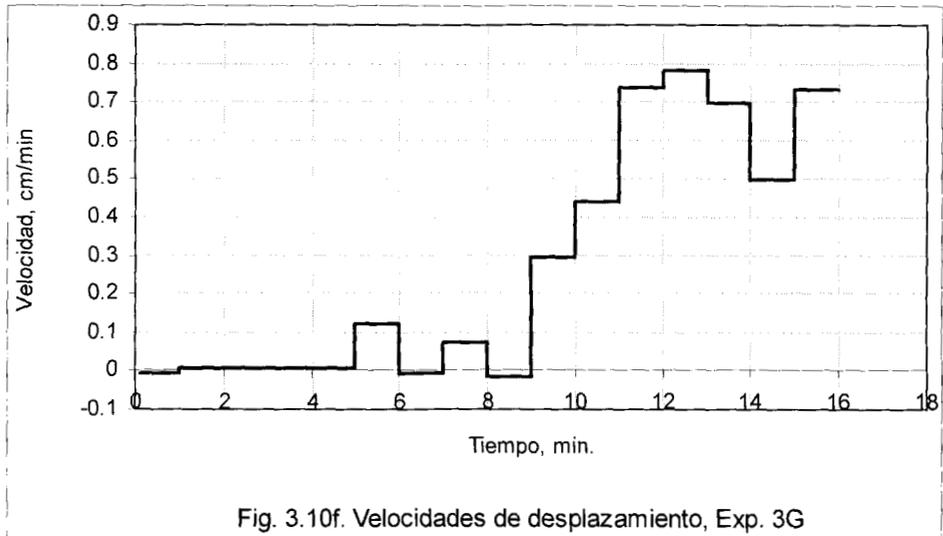
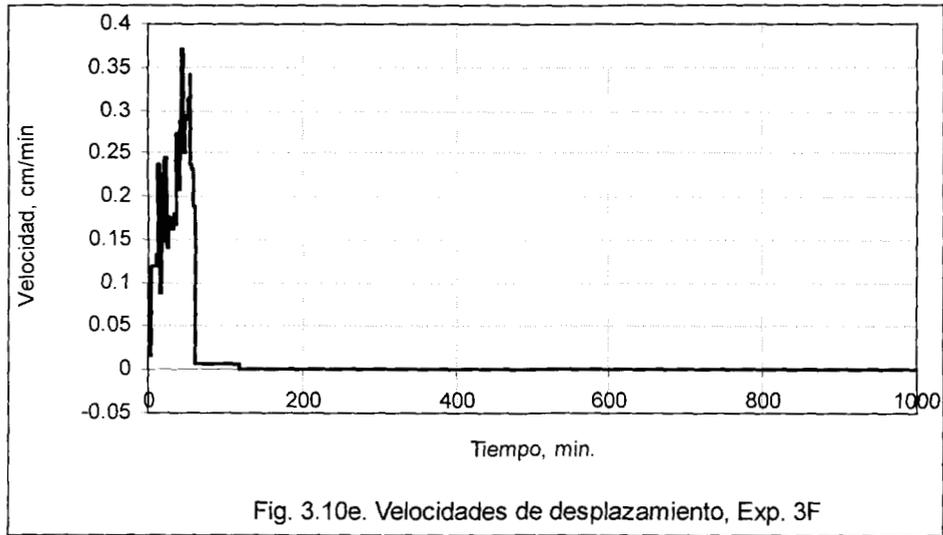












### 3.5 Estudio comparativo entre etapas de desplazamiento, tiempos y velocidades.

En esta sección se presenta un estudio comparativo entre la etapa Inicial y la de Desarrollo, para los experimentos con  $d= 0.005$  y  $0.015$  cm, la etapa Final no fue considerada porque en algunos experimentos presenta flujo a contracorriente. Mientras que, para los experimentos con  $d= 0.075$  cm se consideraron las etapas Inicial y Final. Con este propósito se obtuvieron cuatro cocientes relacionados con la velocidad, el tiempo y el desplazamiento,  $V_I/V_D$  ( $V_I/V_F$ ),  $L_I/d$ .  $L_D/d$  ( $L_F/d$ ) y  $t_I/t_D$  ( $t_I/t_F$ ) donde  $V_I$ ,  $V_D$  y  $V_F$  son las velocidades de la etapa Inicial, de Desarrollo (para  $d=0.005$  y  $0.015$  cm) y Final (para  $d=0.075$  cm), respectivamente;  $L_I$ ,  $L_D$  y  $L_F$  son las magnitudes del desplazamiento medio

de las etapas Inicial, de Desarrollo (para  $d=0.005$  y  $0.015$  cm) y Final (para  $d=0.075$  cm), respectivamente;  $d$  es la separación entre los vidrios y, finalmente  $t_I$ ,  $t_D$  y  $t_F$  son la duración de la etapa de Inicio, de Desarrollo (para  $d=0.005$  y  $0.015$  cm) y Final (para  $d=0.075$  cm), respectivamente, los resultados se muestran en la Tabla 3.11.

$d$ , cm	Exp.	1F	1G	2F	2G	3F	3G	Prom.
0.005	$V_I/V_D$	0.101	0.024	—	0.024	0.222	—	0.093
	$L_I/d$	258	68	—	174	26	58	113
	$L_D/d$	1,270	1,448	—	2,314	2,314	—	1,837
	$t_I/t_D$	5.33	1.88	—	3	0.05	—	2.57
	Exp.	1B	1C	2B	2C	3B	3C	Prom.
0.015	$V_I/V_D$	0.218	0.405	—	0.192	0.064	0.107	0.986
	$L_I/d$	456	90	—	12	2	94	131
	$L_D/d$	450	853	—	514	813	676	661
	$t_I/t_D$	4.64	0.26	—	0.13	0.05	1.25	1.27
	Exp.	1D	1E	2D	2E	3D	3E	Prom.
0.075	$V_I/V_F$	65.71	115	12.49	97	190	20	83.37
	$L_I/d$	12	36.5	52.4	6.4	45.2	11.1	27.27
	$L_F/d$	6.9	28.5	141.6	7.1	37.3	42.1	43.9
	$t_I/t_F$	0.027	0.014	0.03	0.009	0.006	0.011	0.016

Tabla 3.11. Comparación de la velocidad y el tiempo entre las etapas de Inicio y Desarrollo (o Final) y del desplazamiento con respecto al espesor para las mismas etapas.

Se puede observar que el cociente de las velocidades  $V_I/V_D$  y  $V_I/V_F$ , para las celdas 1 y 2, depende de la magnitud de la separación, esto es, crece con la separación. Sin embargo, para la celda 3 esta regla no se cumple para las separaciones de 0.005 y 0.015 cm, porque las velocidades de la etapa de Desarrollo, para  $d=0.015$  cm, casi duplicaron los valores observados en las celdas 1 y 2. Mientras que, para la separación de 0.005 cm las velocidades en las etapas Inicial y de Desarrollo tuvieron valores muy aproximados en las tres celdas, ver Tablas 3.8, 3.9 y 3.10.

Al analizar el comportamiento del cociente de la longitud de desplazamiento y la separación para las diferentes etapas,  $L_I/d$ ,  $L_D/d$  y  $L_F/d$ , se observa en las tres celdas que para separaciones de 0.005 y 0.015 cm el cociente para la etapa de Desarrollo es siempre mayor que para la etapa de Inicio, excepto en la celda 1B, en donde son casi iguales. Mientras que, para la separación de 0.075 cm, no se observa un comportamiento bien definido entre el cociente para la etapa de Inicio y el de la etapa Final, porque en algunos casos el primero es mayor que el segundo (celdas 1D, 1E y 3D) y en otros el segundo es mayor que el primero (celdas 2D, 2E y 3E). También se puede observar que el cociente de la

etapa de Desarrollo ( $d=0.005$  y  $0.015$  cm) o Final ( $d=0.075$  cm) decrece con la separación, pero el cociente para la etapa Inicial no muestra un patrón de comportamiento bien definido. Esto último puede indicar que la etapa de Inicio es típicamente impredecible, porque refleja la interacción con la entrada de la celda, pero la etapa de Desarrollo, para  $d=0.005$  y  $0.015$  cm, y la etapa Final, para  $d=0.075$  cm, no están influenciadas por la entrada.

El cociente de la duración de las etapas muestra que los valores más bajos corresponden a la separación mayor. El comportamiento de este cociente no muestra un patrón de comportamiento, excepto para el caso de la observación previa. Esta circunstancia refuerza el hecho de que el comportamiento del tiempo puede ser estandarizado, como se hizo al final de la sección 3.3, en donde se aplicó una técnica estadística para superponer el comportamiento de todos los experimentos con la misma separación.

### 3.6 Comportamiento del número capilar ( $Ca$ ) y de la densidad de potencia interfacial ( $DPI$ ) con la separación

En esta sección se estudia el comportamiento del número capilar ( $Ca = \langle V \rangle \mu / \sigma$ ) como función de la separación y de las etapas. En principio, el concepto de número capilar es aplicable a experimentos en los cuales la velocidad de desplazamiento es constante (Saffman y Taylor, 1958, Park y Homsy, 1985). En este sentido, la velocidad de cada etapa (Tablas 3.8, 3.9 y 3.10) representa la velocidad promedio de desplazamiento en ese intervalo de tiempo. En la Tabla 3.12 se presentan los números capilares de todas las etapas y todos los experimentos en que fue posible determinar el valor promedio de la velocidad.

$d$ , cm	Exp.	$Ca (10^{-7})$			Exp	$Ca (10^{-7})$			Exp	$Ca (10^{-7})$		
		Inicio	Des	Fin		Inicio	Des	Fin		Inicio	Des	Fin
0.005	1F	3.92	38.71	0.24	2F	Np	Np	Np	3F	11.02	49.74	1.49
	1G	2.69	110.99	0.24	2G	1.72	71.05	0.98	3G	5.14	Np	Np
0.015	1B	25.72	118.09	0.49	2B	—	—	—	3B	9.06	142.35	0.74
	1C	11.02	27.20	0.49	2C	9.06	47.28	10.29	3C	17.40	162.68	0.24
0.075	1D	11.27	—	0.17 2	2D	10.71	—	0.86	3D	13.96	—	0.074
	1E	5.64	—	0.04 9	2E	2.38	—	0.024	3E	1.47	—	0.074

Tabla 3.12. Número capilar de las etapas de Inicio y de Desarrollo, para separaciones de 0.005 y 0.015 cm, y etapas de Inicio y Final para separaciones de 0.075 cm.

En la Figura 3.10 se muestra el comportamiento del número capilar como función de la separación, para las etapas de Inicio y Desarrollo en separaciones de  $d=0.005$  y  $0.015$  cm, y de Inicio y Final para separaciones de  $d=0.075$  cm. Para obtener un solo punto representativo de la etapa y de la celda, se ha promediado el número capilar de dos experimentos con igual separación y misma etapa. Por ejemplo, el número capilar promedio para la etapa de Inicio de los experimentos 1B y 1C es el promedio de los valores  $3.92 \times 10^{-7}$  y  $2.69 \times 10^{-7}$ . Esto es completamente válido, pues se trata del experimento y su repetición. Hay algunos casos en que no hay posibilidad de promediar, como sucede en los experimentos 2F y 3G. Es importante observar que el  $Ca$  en la etapa Inicial casi no depende de la separación. Mientras que, en la etapa de Desarrollo (para  $d=0.005$  y  $0.15$  cm) y Final (para  $d=0.075$  cm), disminuye conforme la separación aumenta, esto ocasiona un cruzamiento en el comportamiento del número capilar de las tres etapas, si se considera a la etapa Final como el equivalente de la etapa de Desarrollo, para experimentos con  $d=0.075$  cm. Este comportamiento es de esperar, porque a menor separación las fuerzas capilares son mayores, generando velocidades mayores y por tanto número capilares mayores, considerando que el cociente  $\mu/\sigma$  permanece constante. Esta situación conduce a suponer que la etapa de Inicio puede estar influenciada por la entrada de la celda, provocando que el desplazamiento no refleje los cambios que se esperan.

Puesto que en experimentos con separaciones menores a  $0.015$  cm se ha observado la aparición de digitaciones pronunciadas en la etapa de Desarrollo, y en separaciones mayores ( $d=0.075$  cm) este tipo de desplazamiento no se observa. Puede suponerse que la región de cruzamiento entre las curvas de la etapa Inicial y las curvas de las etapas de Desarrollo (para  $d=0.005$  y  $0.15$  cm) y Final (para  $d=0.075$  cm), esto es, la región comprendida entre  $d=0.06$  y  $d=0.07$  cm puede representar una separación "umbral", por arriba de la cual se puede esperar la generación de digitaciones pronunciadas, como mecanismo de desplazamiento en la etapa de Desarrollo, tienda a desaparecer. Esto puede suceder porque la fuerza capilar tiende a disminuir con la separación y la gravitacional comienza a jugar una papel adverso para el desplazamiento espontáneo de los fluidos.

La fuerza capilar es el motor que genera el desplazamiento espontáneo, por esta razón, la densidad de potencia interfacial ( $DPI$ ) es una propiedad relevante en este proceso y puede definirse como  $\langle V \rangle \sigma / d$ , que representa la potencia por unidad de área que la interface agua-aceite genera durante el desplazamiento en una etapa. En la Figura 3.11 se muestra el comportamiento de la  $DPI$  como función de la separación ( $d$ ), en este caso se observa que en la etapa Inicial la  $DPI$  casi no depende de la separación. Sin embargo, en la etapa de Desarrollo (o Final para  $d=0.075$  cm) se observa una dependencia decreciente. Este comportamiento esta de acuerdo con lo señalado en la

sección 3.3, en donde se hace notar que la etapa en donde se generan las digitaciones pronunciadas es la que posee mayor longitud interfacial agua-aceite y que más desplazamiento de aceite logra. Sin embargo, la  $DPI$  en la etapa de Inicio casi no depende de la separación porque la longitud interfacial agua-aceite no tiene cambios fuertes y por tanto, la expulsión de aceite no sufre un cambio significativo. En este caso, el entrecruzamiento de las curvas de la etapa de Inicio con las de la etapa de Desarrollo (para  $d=0.005$  y  $0.15$  cm) y Final (para  $d=0.075$  cm), en la región comprendida entre  $d=0.03$  y  $d=0.05$  cm, tiene un sentido diferente al del  $Ca$ . En este caso la potencia, que se define como el producto de la fuerza por la velocidad, tiende a disminuir con la separación, esto quiere decir que la velocidad de desplazamiento en la etapa de Desarrollo tiende a disminuir hasta hacer desaparecer esta etapa, como ocurre en los experimentos con  $d=0.075$  cm. Esto puede significar que existe una región en  $d$ , en la cual la etapa de Desarrollo desaparece para dar lugar a la etapa Final. Por esta razón, en experimentos con  $d=0.005$  y  $0.015$  cm se observan tres etapas, y para  $d=0.075$  cm se observan solo dos.

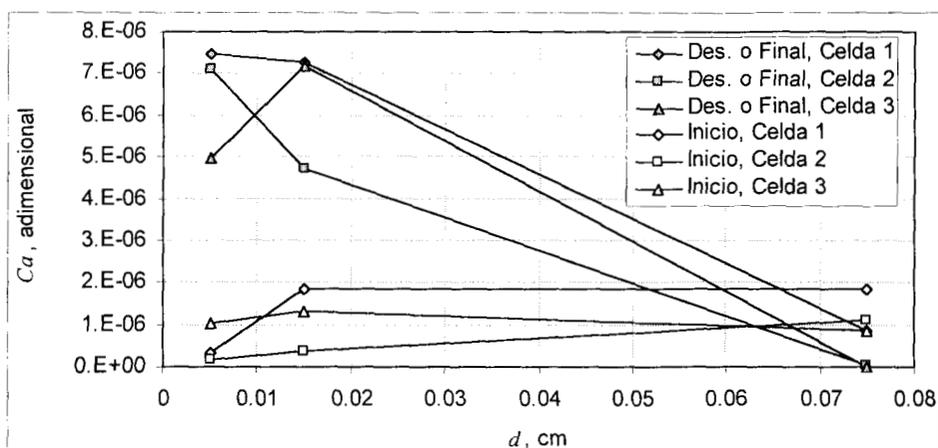


Fig. 3.11. Número capilar,  $Ca$ , para las etapas de Inicio y Desarrollo ( $d=0.005$  y  $0.015$  cm) y etapa Final ( $d=0.075$  cm)

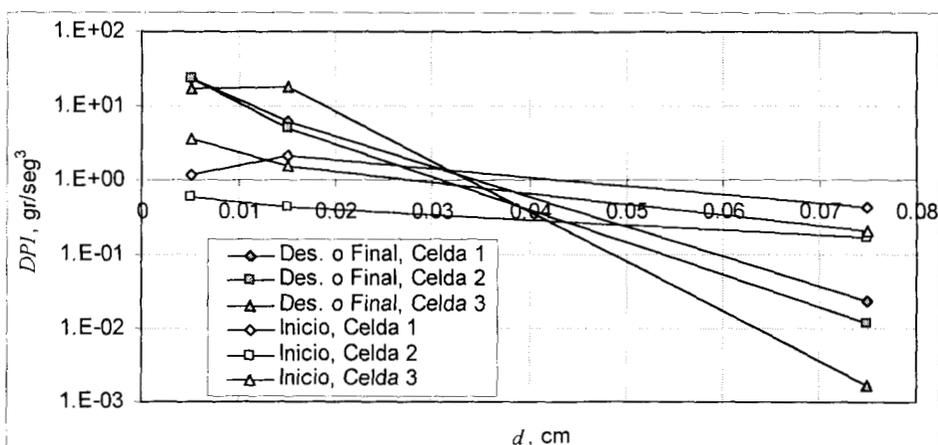


Fig. 3.12. Densidad de potencia interfacial,  $DPI$ , para las etapas de Inicio y Desarrollo ( $d=0.005$  y  $0.015$  cm) y etapa Final ( $d=0.075$  cm)

## Conclusiones

En este trabajo de carácter experimental se pueden resaltar dos resultados originales e importantes. El primero de ellos se refiere al diseño y uso de una metodología experimental cuidadosa y confiable. El segundo tiene que ver con el análisis de los resultados experimentales, los cuales es difícil de comparar con otros trabajos de su especie, porque no hay hasta el momento desarrollos equivalentes. La fortaleza de este trabajo experimental radica en su originalidad y en las bases que ha creado para el desarrollo de nuevas investigaciones en relación con la imbibición espontánea en medios capilares. Todas las conclusiones son resultado de un trabajo original que aspira a contribuir a la comprensión de los fenómenos capilares aquí descritos.

### 1. Movimiento de los fluidos y generación de estructuras

1.1 El desplazamiento espontáneo a cocorriente presenta un comportamiento distinto, dependiendo de la separación entre los vidrios. En los experimentos con separaciones de 0.005 y 0.015 cm se observó que el desplazamiento se inicia con un frente con digitaciones moderadas ( $\sim 0-5$  cm), que repentinamente se acelera generando digitaciones pronunciadas ( $\sim 7-13$  cm) y que disminuyen su velocidad nuevamente, al aproximarse a la salida. En este proceso de desplazamiento de los fluidos, la fragmentación de la fase aceite es notable ( $\sim 100-150$  islas), en los experimentos con menor separación,  $d=0.005$  cm. Mientras que, en los experimentos con separación intermedia,  $d=0.015$  cm, la fragmentación es menor ( $\sim 10-20$  islas). Para los experimentos con separación de  $d=0.075$  cm, el desplazamiento inicial se realiza mediante digitaciones muy anchas ( $\sim 5$  cm) y poco largas ( $\sim 0-5$  cm), que conforme avanza el experimento tienden al reposo. En este caso la fragmentación de la fase aceite es mínima ( $\sim 1-5$  islas), porque el desplazamiento es tan lento que puede durar hasta una semana antes de detenerse de manera definitiva.

### 2. Reproducibilidad

2.1 Uno de los objetivos de esta tesis es estudiar la repetibilidad de los experimentos de imbibición espontánea. Por esta razón, fue necesario diseñar una escrupulosa metodología experimental para la limpieza y reensamblado de los vidrios para cada una de las tres celdas, con el propósito de restituir las propiedades de mojabilidad de los vidrios.

2.2 Se encontró que los procesos de desplazamiento espontáneo de Soltrol 170 por agua bidestilada pueden ser repetibles. Definiéndose la repetibilidad como la capacidad de reproducir los ritmos de desplazamiento de aceite, desde un punto de vista dinámico, y como la

capacidad de reproducir el patrón de desplazamiento y fragmentación de la fase aceite, desde un punto de vista conformacional.

### 3. Eficiencia de barrido

3.1 Al finalizar el desplazamiento espontáneo de aceite por agua en un experimento, queda una cantidad de aceite residual. Con base en el área ocupada por el aceite residual, se observó que la separación de 0.015 cm presenta un desplazamiento más eficaz que las otras dos separaciones. Aún cuando es de esperar que la separación más pequeña sea la más eficaz, porque las fuerzas capilares son mayores, esta circunstancia es contraproducente, porque en este caso el avance por digitaciones que crecen explosivamente ( $\sim 0.3$  cm/min), hace que el agua se canalice rápidamente hacia la salida de la celda y la inunde prematuramente con agua, impidiendo la expulsión a contracorriente de aceite. Esta situación obliga al aceite a salir a contracorriente, pero con una menor efectividad en el desplazamiento.

### 4. Microestructura

4.1 Uno de los objetivos de este trabajo fue probar si las irregularidades naturales de las superficies de los vidrios (waviness) tienen alguna influencia en el comportamiento del desplazamiento espontáneo de los fluidos. En este trabajo se encontró que las sinuosidades de ambos vidrios son pequeñas, comparadas con la separación entre los vidrios ( $\sim 0.8-4.2\%$ , de la separación entre los vidrios,  $d$ ). Asimismo, se encontró que éstas irregularidades no parecen influir en la dinámica de los fluidos, durante el proceso de desplazamiento espontáneo. Los cambios que pueden esperarse en la fuerza capilar debido a las irregularidades de los vidrios, son inferiores al 3.4%.

### 5. Dinámica interfacial

5.1 Uno de los objetivos de este trabajo propone estudiar si existe alguna relación entre la generación de interface agua-aceite y la rapidez con que el aceite es desplazado. En este caso se encontró que el crecimiento de la interface agua-aceite, a través de digitaciones de distintos tamaños, está relacionada con el crecimiento de la expulsión de aceite, es decir, la interface agua-aceite nunca avanza sin deformarse. La única forma de que la interface avance es que tienda a deformarse, es decir, aumentando su longitud.

5.2 Se definió el concepto de longitud interfacial característica  $L_{2l} = (\text{área total ocupada por el aceite}) / (\text{longitud total de la interface agua-aceite})$ , y se analizó su comportamiento como función del tiempo en una escala semilogarítmica. Esta variable tiene un comportamiento bien definido

que depende de la separación entre los vidrios, y que en todos los casos muestra una sección lineal. Para separaciones de 0.005 cm la pendiente del decaimiento lineal en una escala semilogarítmica puede variar entre 160 y 16 cm/min, aproximadamente. Mientras que, para separaciones de 0.015 cm la pendiente de decaimiento lineal puede variar entre 10 y 25 cm/min, aproximadamente. Finalmente, para separaciones de 0.075 cm la pendiente de decaimiento lineal puede oscilar entre 0.7 y 9 cm/min, aproximadamente. Este comportamiento establece rangos característicos para la pendiente, de acuerdo con la separación entre los vidrios.

**5.3** La longitud  $L_{2l}$  vs el tiempo, en una escala semilogarítmica, se parece a una curva normal acumulativa. Aprovechando esta similitud, se estimó la media y desviación estándar para cada experimento, y se procedió a estandarizar la variable temporal para representar todos los experimentos de una misma separación en una escala estándar única. La suposición de que los datos experimentales se comportan como una curva normal acumulativa fue comprobada utilizando la prueba Kolmogorov-Smirnov para una muestra. Los resultados de esta prueba de hipótesis bilateral indican que 12 de los experimentos se comportan como una normal, a un nivel de confianza del 1%. Mientras que, para otros tres experimentos el nivel de confianza debe ser aumentado a 5% para que aprueben la prueba bilateral, y para otros tres experimentos el nivel de confianza debe llegar hasta un 10% para ser aceptada la hipótesis de normalidad. Solamente para un caso, experimento 2G, ningún nivel de confianza es suficiente para aceptar la hipótesis de normalidad.

## **6. Tipos de Flujo**

**6.1** El análisis del comportamiento de la velocidad de desplazamiento del aceite por el agua muestra la existencia de tres etapas en celdas con separaciones de 0.005 y 0.015 cm. La primera etapa denominada Inicial, presenta un desplazamiento con digitaciones poco pronunciadas (~0-5 cm) y velocidad moderada (~0.01-0.1 cm/min). La segunda etapa denominada de Desarrollo, presenta desplazamiento con digitaciones muy pronunciadas (~7-13 cm) y velocidades altas (~0.1-0.7 cm/min). La tercera etapa denominada Final se caracteriza por un desplazamiento muy lento (~0.04-0.001 cm/min) y con digitación moderada (~0-5 cm). En celdas con separación de 0.075 cm se observan dos etapas. La primera se denomina Inicial y se distingue por que su desplazamiento es muy lento (0.01-0.08 cm/min) y con digitaciones muy suaves (~0-4 cm). La segunda etapa se denomina Final y se lleva a cabo con desplazamientos extremadamente lentos (~0.0001-0.005 cm/min) y digitaciones que van de moderadas a grandes (~1-10 cm).

**6.2** Para cada etapa se determinó: a) la velocidad promedio de desplazamiento, b) la longitud promedio de desplazamiento y c) la duración promedio. Estos valores sirvieron para estimar tres tipos de cocientes:

- a) El cociente de las velocidades promedio de desplazamiento entre la etapa Inicial y la de Desarrollo (para  $d=0.005$  y  $0.015$  cm), o la Final (para  $d=0.075$  cm), el cual muestra un comportamiento creciente con la separación. Sin embargo esto no es concluyente porque una de las 3 celdas no siguió este comportamiento.
- b) Los cocientes de la longitud promedio de desplazamiento y la separación de los vidrios, para cada una de las etapas. Este cociente no tiene un comportamiento consistente en la etapa Inicial, pero sí en la etapa de Desarrollo (para  $d=0.005$  y  $0.015$  cm) y en la etapa Final (para  $d=0.075$  cm). Este comportamiento errático del cociente en la etapa de Inicio puede ser producido por los efectos que la entrada de la celda ejerce sobre el flujo espontáneo.
- c) El cociente de la duración promedio entre las etapas de Inicio y de Desarrollo (para  $d=0.005$  y  $0.015$  cm), o la Final (para  $d=0.075$  cm). este cociente muestra que los valores más bajos se obtienen para las celdas con mayor separación. Sin embargo, en general no se observa un comportamiento consistente.

## **7. Número Capilar y densidad de potencia interfacial**

**7.1** El número capilar ( $\langle V \rangle \mu / \sigma$ ) como función de la separación entre los vidrios, es una función independiente de la separación durante la etapa de Inicio. Sin embargo, en las etapas de Desarrollo y Final, es una función decreciente de la separación. Este comportamiento es el que se espera, porque el número capilar es proporcional a la velocidad, y las fuerzas capilares son mayores para separaciones menores, por lo tanto es lógico suponer que mayores velocidades se generen a menores separaciones. La cuestión de ¿por qué ocurre esto durante la etapa de Desarrollo y no en la de Inicio?, es un punto aún por investigar, pero puede especularse que la etapa de Inicio puede estar fuertemente influenciada por los efectos de entrada en la celda. Las curvas de la etapa de Inicio se cruzan con las curvas de las etapas de Desarrollo ( $d=0.005$  y  $0.015$  cm) y Final ( $d=0.075$  cm) en un intervalo que varía entre  $0.06$  y  $0.07$  cm. Este cruzamiento puede ser un indicio de que las digitaciones prominentes ( $\sim 10$  cm) que aparecen en la etapa de Desarrollo tienden a desaparecer como mecanismo de desplazamiento porque a separaciones mayores de  $0.06$  ó  $0.07$  cm, los efectos

capilares tienden a disminuir y los gravitacionales comienzan a ejercer un papel adverso al desplazamiento espontáneo de los fluidos.

**7.2** Se define el concepto de densidad de potencia interfacial ( $DPI$ ),  $\langle V \rangle \sigma/d$ , que es la capacidad de la interface para desplazar al aceite. Este parámetro como función de la separación de los vidrios, se mantiene aproximadamente constante para la etapa de Inicio, pero decrece para las etapas de Desarrollo ( $d=0.005$  y  $0.015$  cm) y Final ( $d=0.075$  cm). Esto ocasiona que las curvas de la etapa de Inicio se crucen con las curvas de las etapas de Desarrollo y Final. Este cruzamiento puede oscilar entre  $0.03$  y  $0.05$  cm de separación entre los vidrios, y tiene un significado distinto al observado en el  $Ca$ . Se puede decir que para este intervalo de valores de  $d$  la  $DPI$  tiende a disminuir, ocasionando que la velocidad de desplazamiento en la etapa de Desarrollo tienda a disminuir hasta hacer desaparecer esta etapa, como ocurre en los experimentos con separaciones de  $0.075$  cm. Esto significa que existe un umbral a partir del cual la etapa de Desarrollo desaparece, dando lugar a la etapa Final.

## **8. Relación de los resultados obtenidos con el medio poroso real**

**8.1** Es importante señalar que los resultados aquí descritos no pueden ser directamente aplicables al comportamiento de la imbibición espontánea en Yacimientos Naturalmente Fracturados (YNF). Sin embargo, estos resultados han permitido descubrir parte de la dinámica que gobierna a los mecanismos de desplazamiento espontáneo de dos fluidos inmiscibles en un medio capilar de dos dimensiones. Estos mecanismos pueden tener equivalentes en sistemas porosos tridimensionales, que deben ser identificados y considerados en los modelos de interacción matriz-fractura, a fin de obtener un mejor modelamiento y predicción para optimizar los procesos de recuperación secundaria.

**8.2** El cociente área/longitud interfacial tiene un comportamiento que se semeja a una curva normal acumulativa. Esta hipótesis es probada utilizando la prueba Kolmogorov-Smirnov para una muestra. A un nivel de confianza del 5% y aún del 1%, casi todas las curvas, excepto una, son aceptadas. Esto significa que la hipótesis de normalidad es aceptable y permite estandarizar todas las curvas, llevándolas a una normal acumulativa de media cero y desviación estándar la unidad. Los resultados de la estandarización se agrupan en tres categorías que dependen de la separación entre los vidrios de la celda.

Aunque este resultado puede ser diferente en un medio poroso real, es posible especular la existencia de una regla equivalente para el cociente

volumen/área de la interface para medios capilares en tres dimensiones,  
cuyo comportamiento depende del tamaño de poro.

## Perspectivas de este trabajo

El desarrollo de esta tesis abre una amplia gama de posibilidades. A corto plazo (seis meses) se tiene los siguientes planes:

1. Se encuentran en primer plano el desarrollo de experimentos de imbibición espontánea a cocorriente en tubos capilares redondos, los cuales fueron desarrollados de manera preliminar en la tesis de maestría del M. en C. Marco A. Ramírez Garnica, ESIQIE, IPN, diciembre de 1998. En una segunda etapa, estos experimentos serán desarrollados como parte de la tesis de maestría del Ing. Javier Hernández Aguilar, utilizando una metodología experimental más sofisticada, que permitirá estudiar la repetibilidad de los experimentos.
2. Se planea el desarrollo de los experimentos de esta tesis en celda Hele-Shaw más largas (40 cm), con el propósito de estudiar el comportamiento del desplazamiento espontáneo como función de la longitud del modelo experimental.
3. Se han adquirido sensores de presión para medir la presión de las fases durante el proceso de desplazamiento espontáneo en celdas Hele-Shaw lisas.
4. En colaboración con el CIE-UNAM se planea medir el campo de velocidades y los cambios longitudinales en la curvatura de la interface agua-aceite. Asimismo, se estudia la posibilidad de generar un algoritmo que permita visualizar los cambios en la morfología de la interface agua-aceite.
5. Finalmente, también se planea el estudio del comportamiento del desplazamiento espontáneo cuando hay un flujo estacionario de agua a lo largo de la entrada de la celda.

A mediano plazo (dos años):

1. El estudio de imbibición espontánea en celdas Hele-Shaw circulares y la medición de la presión capilar.
2. El estudio de imbibición espontánea en celdas Hele-Shaw rugosas, variando la separación de los vidrios, la longitud de los modelos experimentales y el flujo transversal a la entrada de la celda.

# APÉNDICES

## APÉNDICE 1

### **Análisis de la influencia de la microestructura de las superficies de los vidrios (waviness) en el comportamiento del desplazamiento espontáneo**

Como se mencionó en la sección 2.2 (Patrón de interferencia), los vidrios de las celdas Hele-Shaw no tienen un espesor uniforme, porque se utilizaron tal y como se recibieron de fábrica. En esta sección se analizará si estas irregularidades (sinuosidades o waviness) tienen alguna influencia en el comportamiento del desplazamiento de los fluidos. Particularmente, las irregularidades que interesa conocer son las de las superficies internas de la celda. Aunque se probaron dos técnicas, una mecánica (palpador) y otra óptica (interferómetro), se prefirió la segunda porque se puede determinar la magnitud de las irregularidades in situ, esto es, una vez que la celda ha sido armada.

Se observó que la técnica utilizada para armar las celdas, no siempre reproduce de manera idéntica el espacio capilar formado entre los vidrios. Esto ocurre así porque los vidrios no se colocan exactamente en la misma posición, lo cual puede deberse a dos causas excluyentes: 1) Aunque se hicieron marcas sobre el vidrio inferior para situar aproximadamente en la misma posición al vidrio superior, sería necesario utilizar un método más preciso para realizar esta labor, 2) Aún cuando los separadores (trozos de hilo de nylon) se colocaron aproximadamente en la misma posición, es necesario que su tamaño y posición sea exactamente la misma. Sin embargo, independientemente de que las técnicas de armado puedan ser mejoradas, el objetivo de este análisis no se ve afectado, porque el patrón de interferencia proporciona un registro de la distribución de las irregularidades, el cual puede ser comparado con el patrón de desplazamiento para realizar el análisis que en esta sección se propone. A final de cuentas, con la técnica aquí utilizada puede haber pequeñas variaciones en la posición de las irregularidades (menores a una micra) pero la magnitud de ellas no cambia tan drásticamente como para que el medio capilar sea totalmente distinto. Además, en este análisis también se cuantifica la magnitud de las irregularidades respecto a la separación impuesta a los vidrios mediante hilo nylon.

#### **Descripción e interpretación de los patrones de interferencia**

Después de que una celda era armada, se utilizaba un interferómetro de Fizeau para obtener el patrón de interferencia de las superficies internas de la celda, el cual se fotografiaba y videograba. Cada patrón se obtuvo a condiciones de temperatura ambiente y presión atmosférica, y sin saturar el espacio capilar con algún líquido. Entre menor es la distancia que separa a los vidrios, mejor

es el contraste que se obtiene en el patrón. Por esta razón, para las celdas con separación de 0.075 cm no fue posible obtener su patrón de interferencia. En la Figura 1A.1 se presentan los patrones de interferencia de la celda 1, en la Figura 1A.2 los de la celda 2 y en la Figura 1A.3 los de la celda 3.

El patrón de interferencia puede ser interpretado como un mapa de líneas que describen los sitios que tienen la misma separación entre los vidrios, a semejanza de las líneas de nivel que se utilizan en Topografía. Como se mencionó en la sección 2.2, las líneas miden las irregularidades del vidrio inferior tomando como referencia las irregularidades del superior. Sin embargo, hay superpuesta una distancia constante,  $d$ , entre ellas, que se supondrá es muy aproximada a la separación impuesta mediante hilo nylon.

A partir del patrón de interferencia, Figuras 1A.1, 1A.2 y 1A.3, se contabilizó número de líneas para estimar la magnitud máxima de las irregularidades. En la Tabla 1A.1 se presenta el número de líneas observadas en los patrones de interferencia de la celda 1, que fue la que presentó mayor irregularidad en las superficies de sus vidrios.

Celda 1	Experimento						
	A	B	C	D	E	F	G
Separación entre vidrios, $\mu\text{m}$	150	150	150	750	750	50	50
No. de líneas en la celda	48	66	72	--	--	72	34
Diferencia entre líneas extremas, $\mu\text{m}$	1.2	1.7	1.8	--	--	2.1	0.9
Diferencia entre líneas con respecto a la separación de los vidrios, %*	0.8	1.1	1.2	-	-	4.2	1.8

\*Estimación de los cambios en presión capilar ocasionados por las irregularidades, respecto a la presión capilar para la separación impuesta, %.

Tabla 1A.1. Evaluación de la magnitud máxima de las irregularidades de las superficies de los vidrios a través de su patrón de interferencia, comparación de ésta respecto a la separación impuesta ( $d$ ) y comparación de las variaciones de la presión capilar debido a las irregularidades con respecto a la presión capilar para la separación impuesta ( $d$ ).

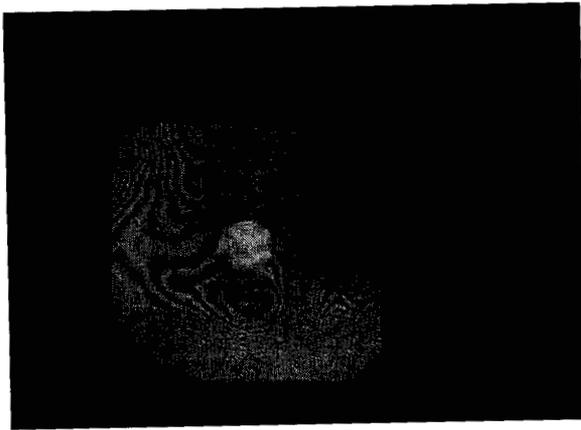
También se filmó el patrón de interferencia para lograr una adecuada interpretación, porque el corrimiento de las líneas, al presionar los vidrios, proporciona información acerca de la orientación de la separación y la identificación de máximos, mínimos o puntos silla. La magnitud máxima de las irregularidades se estimó contando el número de líneas de diferente nivel e identificando la presencia de singularidades (máximos, mínimos y puntos silla) en el patrón. Entre cada dos líneas hay una distancia  $\lambda/2$ , donde  $\lambda$  es la longitud de onda de la fuente luminosa ( $\lambda \approx 0.5 \mu\text{m}$ ). De aquí se calculó la magnitud de la máxima variación de las irregularidades entre los dos vidrios, la cual se muestra en la Tabla 1A.1. Si se estima el porcentaje que representa

esta magnitud respecto a la separación de los vidrios, se llega a los resultados del renglón 4. Esto quiere decir que en el peor de los casos las irregularidades llegaron a ser el 4.2% de la separación (0.005 cm), mientras que, en el mejor de los casos fue de 1.1% (0.015 cm), sin considerar los valores para la separación más grande, 0.075 mm. Estos porcentajes son los mismos que se obtienen al estimar los cambios que puede sufrir la presión capilar debido a las irregularidades de los vidrios, tomando como referencia la presión capilar para la separación impuesta ( $d$ ) y considerando que la presión capilar es proporcional a  $\sigma/d$ . De esta manera, los cambios en presión capilar se pueden estimar como

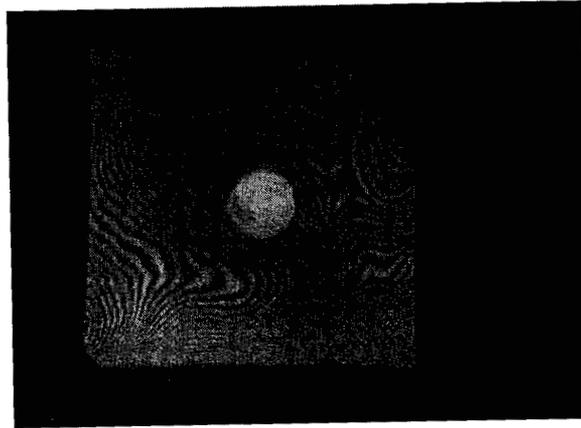
$$\frac{\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2}}{\frac{1}{d}} \quad 1A.1$$

Donde  $d_1$  y  $d_2$  son los valores extremos de las irregularidades y  $d$  la magnitud de la separación impuesta con hilo nylon. Esta aproximación indica que las variaciones en la fuerza capilar, debido a las irregularidades son pequeñas y casi imperceptibles conforme la separación entre los vidrios aumenta. Aunque los patrones de interferencia de las celdas con mayor separación no se obtuvieron, es de esperar que la influencia de las irregularidades sea aún menor que en el caso de la separación intermedia.

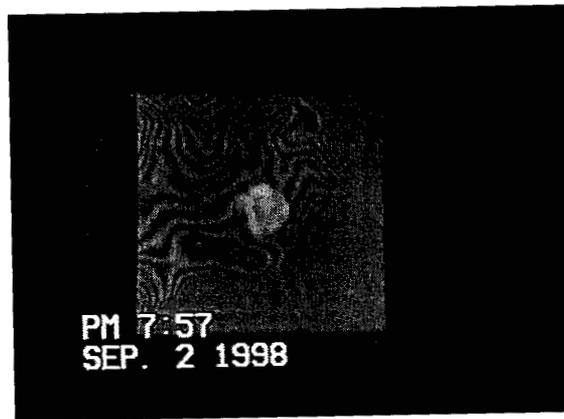
Para analizar si las irregularidades juegan un papel importante en el desplazamiento de los fluidos, se observó cuidadosamente el comportamiento de cada experimento y se comparó directamente con el patrón de interferencia de la celda correspondiente. Sin embargo, no se encontró ninguna relación entre la posición de las líneas y la evolución de la interfaz agua-aceite. En ocasiones la interfaz avanza perpendicularmente a las líneas, y en otras paralelamente a ellas. Además, la formación de islas o digitaciones no está relacionada con la presencia de irregularidades tales como valles, cimas o puntos silla. Por esta razón, se puede concluir que las irregularidades de los vidrios tienen una influencia imperceptible, a un nivel macroscópico, en los procesos de imbibición espontánea estudiados en este trabajo. Sin embargo, es muy posible que para separaciones del orden de las irregularidades si se pueda observar esta influencia. Solo un cambio significativo en la separación entre los vidrios puede generar un cambio notable en el patrón de desplazamiento.



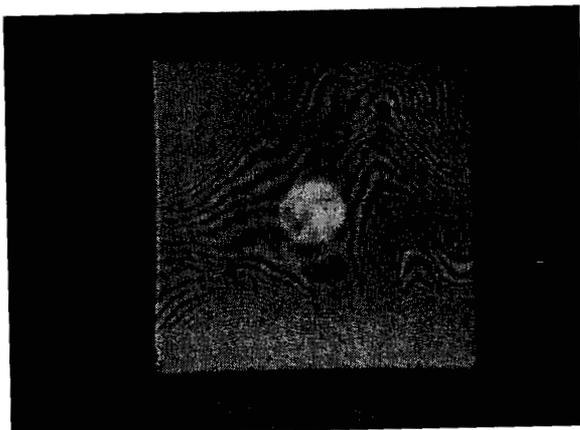
a) Experimento 1A



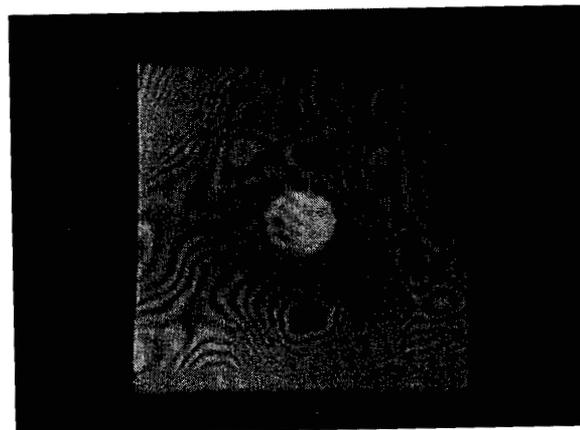
b) Experimento 1B



c) Experimento 1C

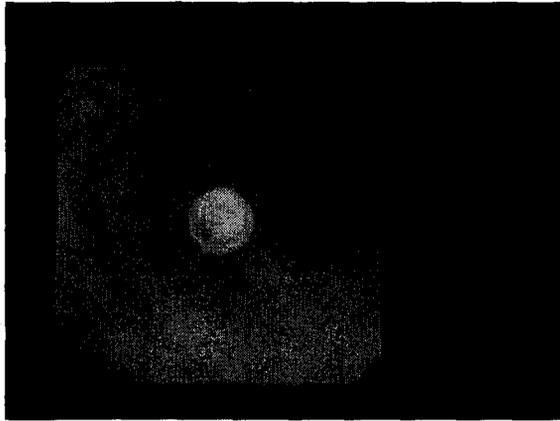


e) Experimento 1F

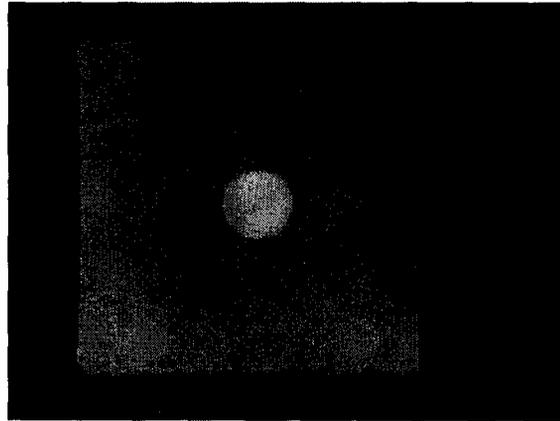


f) Experimento 1G

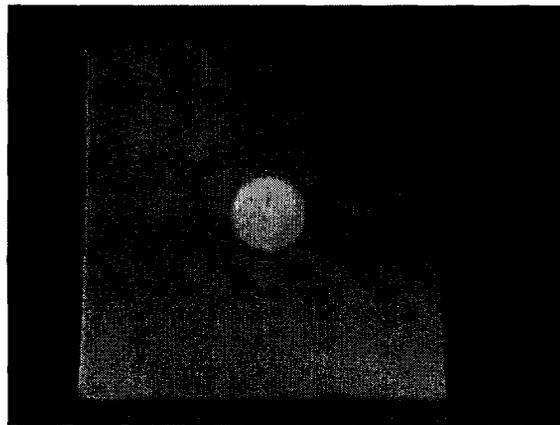
Fig. 1A.1. Patrones de interferencia de las celdas 1



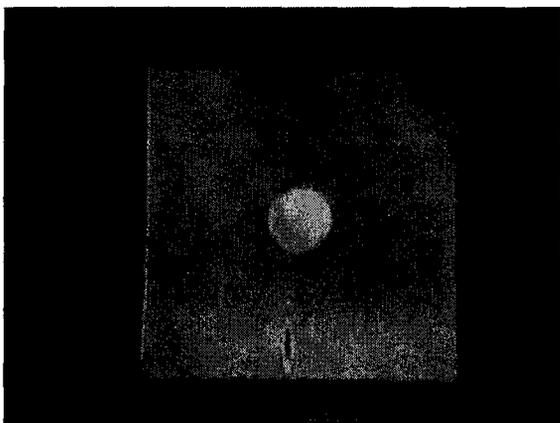
a) Experimento 2A



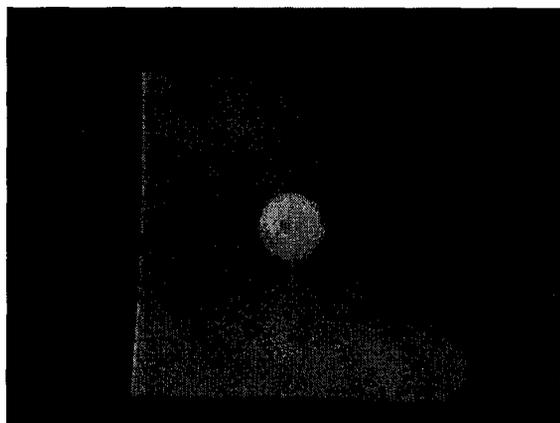
b) Experimento 2B



c) Experimento 2C

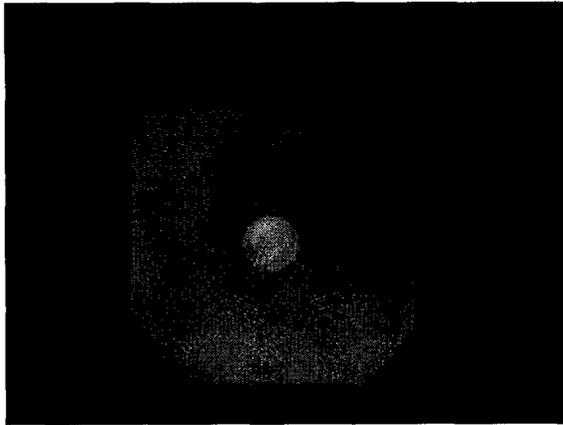


e) Experimento 2F

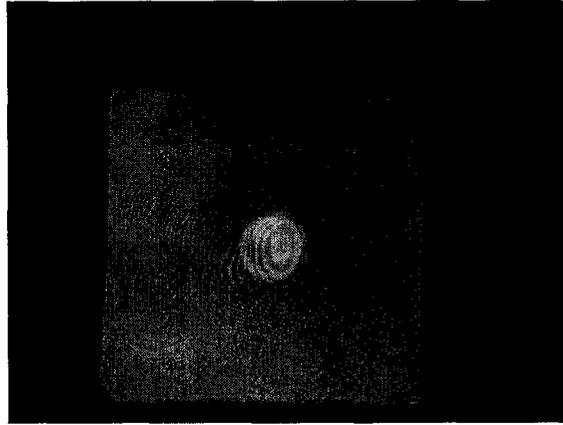


f) Experimento 2G

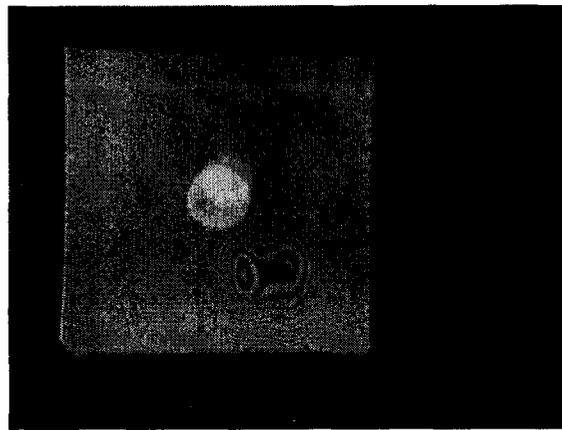
Fig. 1 A.2. Patrones de interferencia de las celdas 2



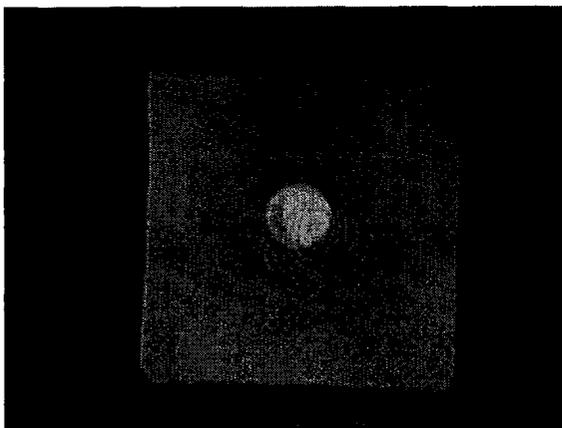
a) Experimento 3A



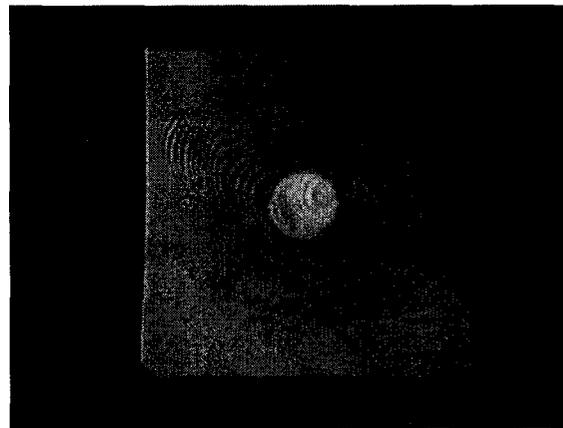
b) Experimento 3B



c) Experimento 3C



e) Experimento 3F



f) Experimento 3G

Fig. 1A.3. Patrones de interferencia de las celdas 3

## APÉNDICES 2

### Repetibilidad conformacional y dinámica

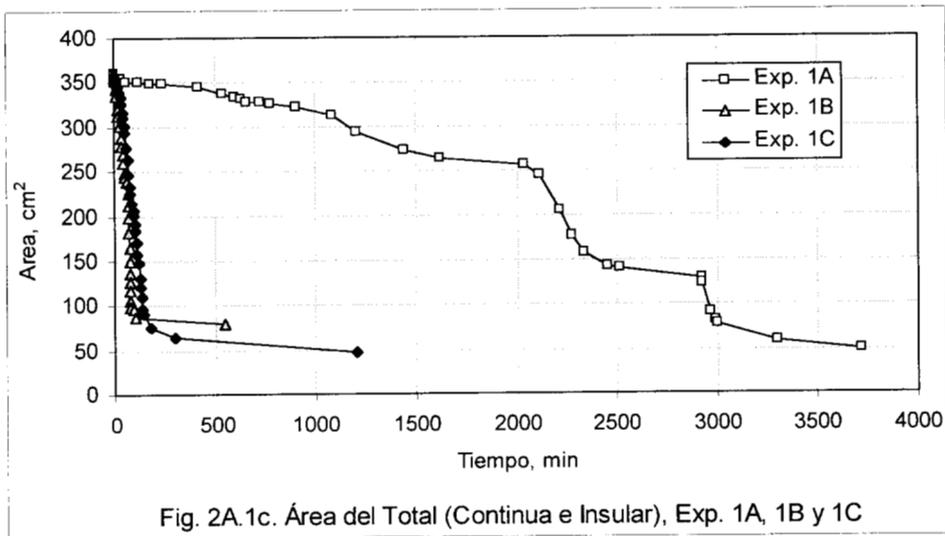
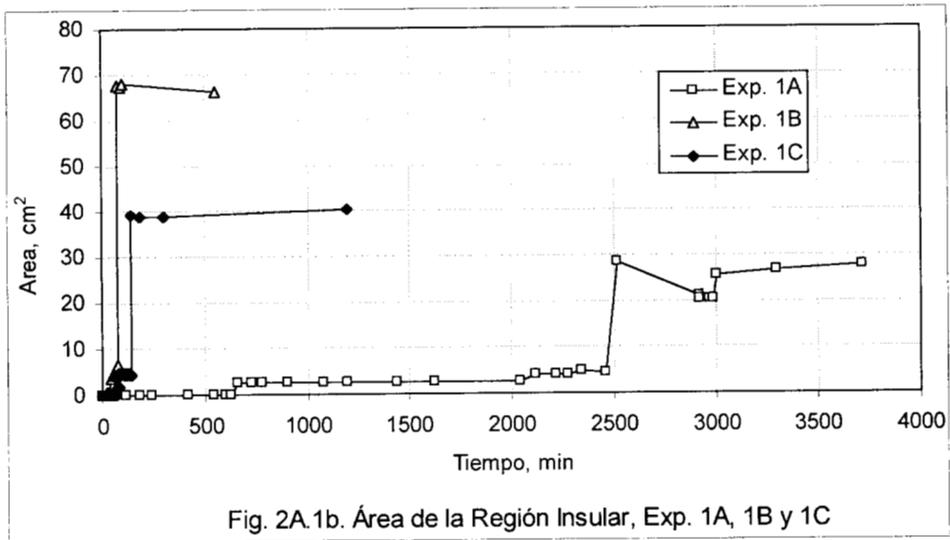
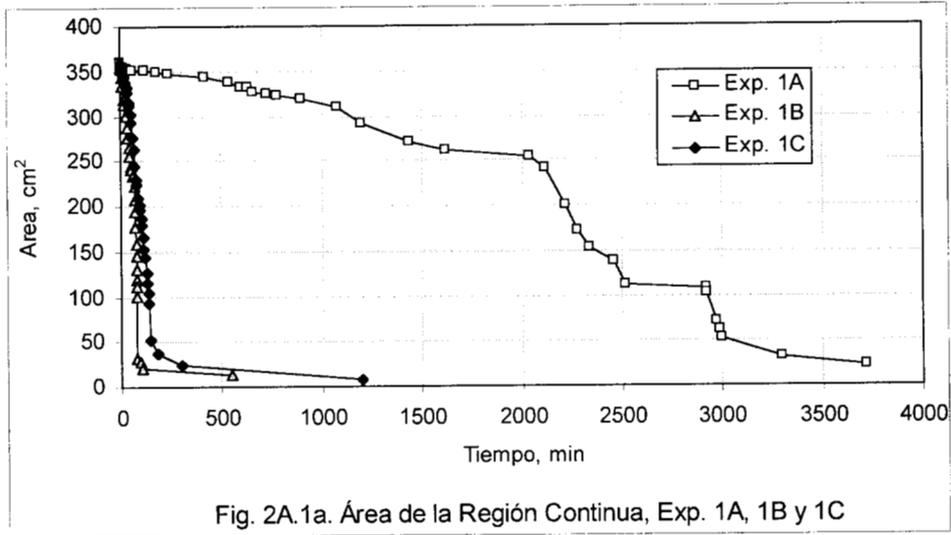
#### Apéndice 2A. Experimentos en celdas con separación de 0.015 cm.

##### Celda 1

Análisis conformacional, experimentos 1A, 1B y 1C. Se observó que la hipótesis de que el primer experimento sirve para estandarizar las propiedades químicas de las superficies de los vidrios es cierta, porque el desplazamiento en el segundo experimento fue muy similar al del tercer experimento, es decir, el de su repetición. Esto se aprecia al comparar el comportamiento del desplazamiento en los experimentos 1A, 1B y 1C, Figuras 2.5a, b y c, en donde destaca el parecido del desplazamiento de los experimentos 1B y 1C, porque ambos dejan una enorme isla al centro de la celda, lo cual no sucede con el experimento 1A, en donde no hay el menor rastro de esta isla. Otra diferencia entre el desplazamiento del experimento 1A y el de los experimentos 1B y 1C es que en estos últimos la formación de digitaciones es muy similar, es decir, en ambos experimentos se observa por el lado derecho de la celda la formación de una gran digitación, que después avanza hacia la izquierda para unirse a otra que se ha formado por el lado izquierdo. En comparación con el experimento 1A, en este se observa la formación de una gran digitación al centro, que crece y se ensancha cuando ha llegado al centro de la celda. Como las celdas se armaron colocando los vidrios en la misma posición, es poco probable que estas diferencias provengan del procedimiento de armado, más bien cabe suponer que el procedimiento de limpieza es el responsable. Sin embargo, la única diferencia que existe entre los experimentos 1A, 1B y 1C es que el primer experimento de desplazamiento espontáneo (1A) haya modificado los sitios de mojabilidad de las superficies, los cuales se preservaron o estandarizaron en los experimentos subsecuentes. Esta observación coincide con el hecho de que la fragmentación de la fase aceite disminuye notablemente a partir del segundo experimento (1B).

Análisis dinámico, experimentos 1A, 1B y 1C. Las Figuras 2A.1a, 2A.1b y 2A.1c muestran el comportamiento del área de las regiones continua e insular, así como el de su total, respectivamente. De acuerdo con las definiciones de las regiones de la sección precedente, el área de la región Continua debe ser una función monótona decreciente del tiempo, porque el aceite expulsado de la celda nunca vuelve a ingresar a ella, mientras el espacio capilar permanezca ocupado por el agua. En la Figura 2A.1a se puede apreciar que el comportamiento de la región Continua del experimento 1A difiere del observado en los experimentos 1B y 1C, porque la velocidad de

desplazamiento de la fase aceite, que viene dada por la pendiente de las curvas, es muy similar entre los experimentos 1B y 1C. Contrariamente al comportamiento de la región Continua, el área de la región Insular es una función creciente del tiempo, excepto cuando se observa la existencia de región Insular dinámica (islas que eventualmente tienen contacto con la entrada o la salida de la celda). La Figura 2A.1b muestra el comportamiento de la región Insular, que también es muy parecido entre el experimento 1B y el 1C, y difiere del observado en el experimento 1A. El descenso observado entre los 2500 y 3000 minutos del experimento 1A, corresponde a la expulsión de aceite a contracorriente a través de una isla que tiene contacto con la entrada de la celda. Mientras que, el descenso en la curva de la celda 1B hacia el final del experimento, es ocasionado por la expulsión de aceite a cocorriente a través de una isla que expulsa aceite a través de la pared epóxica de la celda. Aunque hay un retraso en el experimento 1C respecto del 1B (Figuras 2A.1a y 2A.1b), su comportamiento es muy parecido porque al final de ambos experimentos se observa la formación de una isla muy grande, cuya posición es aproximadamente la misma, pero sus áreas difieren en casi el doble, en 1B es de  $59.16 \text{ cm}^2$ , y en 1C es de  $33.89 \text{ cm}^2$ , que corresponde a la diferencia que se observa entre los puntos finales de los experimentos 1B y 1C en la Figura 2A.1b. Finalmente, en la Figura 2A.1c se observa que al sumar el área de las regiones continua e insular se modifica la terminación de las curvas de los experimentos 1B y 1C, es decir, la diferencia de tamaño en las islas mencionadas con anterioridad, invierte el comportamiento terminal de estos dos experimentos. Sin embargo, desde el punto de vista dinámico, esto es, en el comportamiento de las pendientes de las curvas, no se observan cambios ocasionados por la formación de las islas grandes. Al final de cada experimento el porcentaje de aceite que forma la región Insular, esto es, de aceite atrapado en forma de islas, fue de 12.38% para el experimento 1A, de 22.27% para el 1B y de 13.29% para el 1C, como se muestra en la Tabla 3.2. Sin embargo, el aceite residual del experimento 1A es más fragmentado que el de los experimentos 1B y 1C, como se puede apreciar al comparar las Figuras 2.5aI, 2.5bI y 2.5cI. El experimento 1A tardó aproximadamente  $2\frac{1}{2}$  días en concluirse, y el 1B y el 1C tardaron poco menos de un día. En particular, el experimento 1A duró más porque en dos ocasiones la entrada de la celda fue invadida con aceite proveniente de un flujo a contracorriente, que ocasionó retraso en el proceso de imbibición, lo cual puede apreciarse en los descensos que aparecen después de los 2000 minutos en las Figuras 2A.1a y 2A.1c.

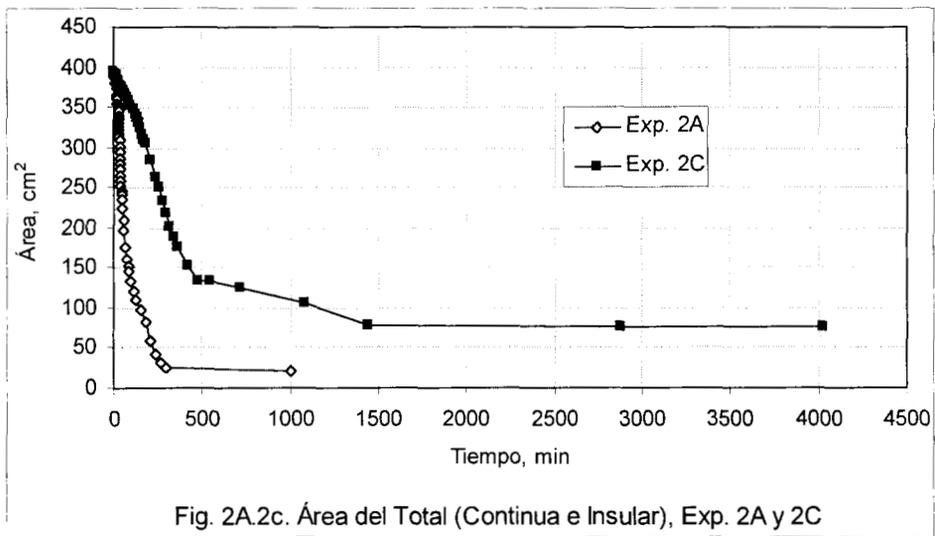
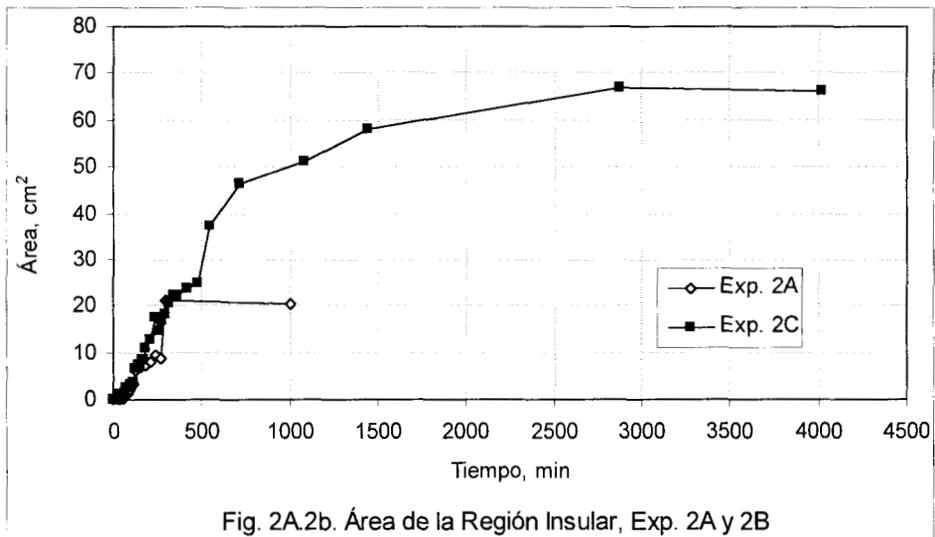
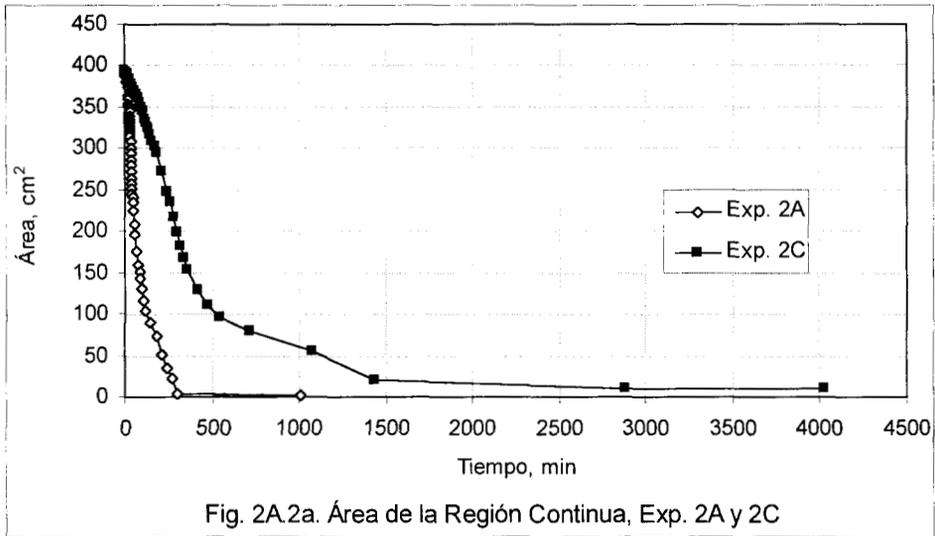


## Celda 2

Análisis conformacional, experimentos 2A, 2B y 2C. Es importante recordar que en las tres celdas se utilizó el mismo procedimiento de limpieza y de estandarización de la mojabilidad de las superficies de los vidrios, que es el propósito de los experimentos 1A, 2A y 3A. Sin embargo, solamente en uno de tres casos (experimento 2B) se observó un comportamiento diferente, porque el agua no desplazó al aceite, Figura 2.6b. No obstante, para el tercer experimento (2C) el agua volvió a desplazar al aceite de manera espontánea. Este comportamiento que sale de lo usual y que no es causado por el procedimiento de limpieza, conduce a suponer la existencia de una variable "oculta", de la cual se desconoce su origen y que en los hechos anuló la posibilidad de recabar la información proveniente de este experimento. Por esta razón, el experimento 2B fue anulado como fuente de información. Así, su influencia se reduce a considerar un número menor de experimentos, es decir un número menor de grados de libertad, lo cual amplía el intervalo de confianza para un nivel de confianza fijo, por ejemplo, del 95%. Este comportamiento sugiere que las propiedades químicas de las superficies no siempre logran estandarizarse durante el primer experimento, como es el caso de esta celda. En estas condiciones, no fue posible hacer una comparación del comportamiento de los experimentos 2B y 2C, pero considerando que el experimento 2C es representativo de la repetición, también se observa que la fragmentación del aceite en el primer experimento (2A) es mayor que en el último (2C), como se señaló en los experimentos de la celda 1. En este último se observa (Figura 2.6a) la formación de una digitación pronunciada en el extremo izquierdo de la celda, la cual avanza longitudinalmente y después lateralmente hacia el lado derecho de la celda. Simultáneamente se observa un avance longitudinal lento y con digitaciones menos pronunciadas, en la mitad derecha de la celda. Por otro lado, en el experimento 2C, se observa desde el principio la formación de un dedo que se desplaza por el lado derecho de la celda hasta llegar a la salida de ésta. Después avanza hacia la izquierda recorriendo la salida e invadiéndola completamente con agua, obligando con esto a que el aceite residual salga a contracorriente por la entrada, Figura 2.6c.

Análisis dinámico, experimentos 2A, 2B y 2C. Las Figuras 2A.2a, 2A.2b y 2A.2c muestran el comportamiento del área de las regiones continua e insular, así como el de su total, respectivamente, de los experimentos 2A y 2C. De la Figura 2A.2a se observa que el proceso de desplazamiento del experimento 2A es mas lento que el del 2C, lo cual se aprecia en las tendencias de las pendientes de ambas curvas. En la Figura 2A.2b se aprecia que el experimento 2A deja una considerable cantidad de aceite atrapado en forma de islas, en contraposición con el experimento 2C, lo cual fue señalado en el análisis conformacional. La Figura 2A.2c muestra que la suma de las regiones no

modifica sustancialmente el comportamiento de la región Continua. Al final, el aceite residual atrapado en forma de islas fue de 19.18% para el experimento 2A y de 5.58% para el experimento 2C. La duración del experimento 2A (4025 min) fue casi cuatro veces mayor que la del 2C (1005 min). Aún cuando no es posible comparar los resultados del experimento 2B con los del 2C, para fines de un análisis de repetibilidad, el experimento 2C es representativo de la separación de 0.015 cm para la celda 2, y sus resultados son útiles para hacer estudios comparativos con experimentos equivalentes de otras celdas (1B, 1C, 3B y 3C), como se verá en las secciones 3.3 y 3.4.

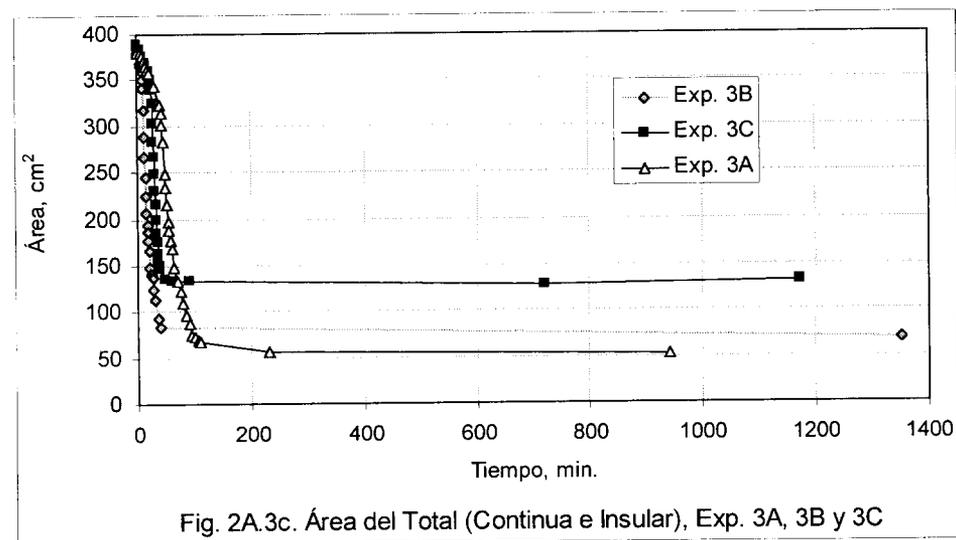
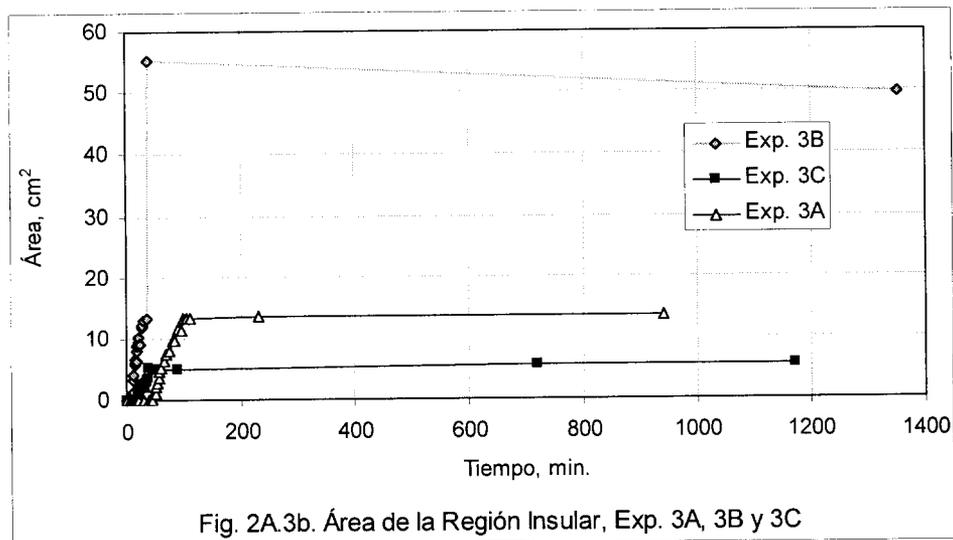
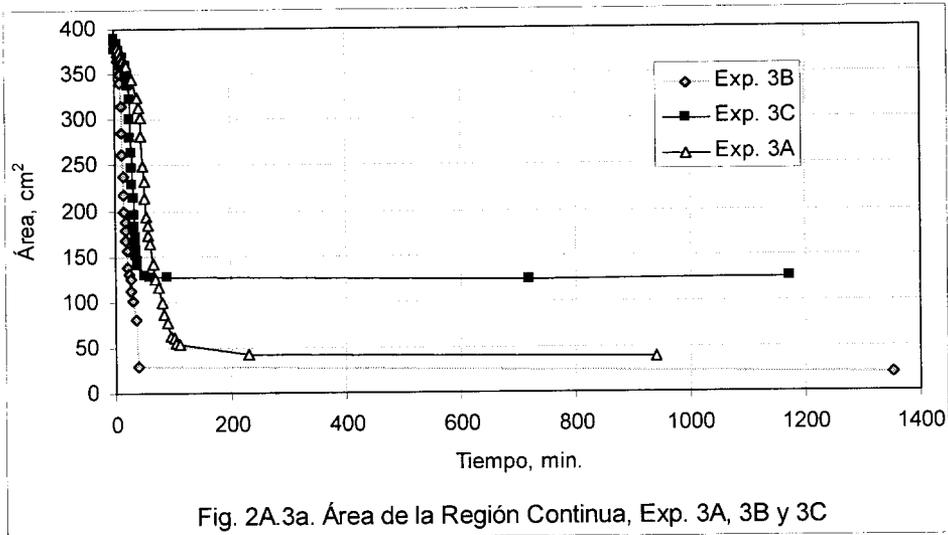


### Celda 3

Análisis conformacional, experimentos 3A, 3B y 3C. En este caso se repitió la experiencia de la celda 1, esto es, se observó que el método utilizado para limpiar los vidrios funcionó adecuadamente a partir del segundo experimento, porque devolvió a la superficie sus propiedades anteriores de mojabilidad. Un análisis cualitativo muestra que el desplazamiento en el primer experimento es distinto al de los dos subsiguientes, lo cual se puede apreciar de las Figuras 2.7a, b y c. Al igual que en el experimento 1A, el frente de desplazamiento del experimento 3A avanza por el centro de la celda y se ensancha una vez que ha llegado al centro. El comportamiento de los experimentos 3B y 3C es muy similar, excepto al inicio en donde hay diferencias notables, porque en el 3B el desplazamiento se realiza mediante la formación de dos glóbulos que crecen ingresando agua desde dos puntos específicos en la entrada. Mientras que, en el experimento 3C, al inicio el desplazamiento presenta digitaciones pequeñas. Después, los dos experimentos se desarrollan de manera muy similar, esto es, en ambos casos es evidente la formación de una gran digitación desde el lado derecho de la celda, la cual avanza hasta aproximarse a la salida (experimento 3B), o que incluso llega a la salida (experimento 3C). Posteriormente, en ambos experimentos, la digitación continúa avanzando a la izquierda hasta que el agua invade completamente el área cercana a la salida (experimento 3B), o incluso toda la salida (experimento 3C), en ese momento el aceite es obligado a salir a contracorriente por la entrada. Otra similitud que es importante resaltar es que ambos experimentos tuvieron aproximadamente la misma duración, esto es, hora y media. También, cabe destacar que hay una disminución paulatina de la fragmentación del aceite después del primer experimento, esto significa que la fragmentación del tercer experimento (3C) es la menor de las tres. Es importante notar que el comportamiento del desplazamiento y la fragmentación del aceite son muy similares entre los experimentos 2C y 3C.

Análisis dinámico, experimentos 3A, 3B y 3C. Las Figuras 2A.3a, 2A.3b y 2A.3c muestran el comportamiento del área de las regiones continua e insular, así como el de su total (suma de ambas), respectivamente. De la Figura 2A.3a se observa que el comportamiento del desplazamiento de aceite es muy similar en los tres experimentos. Aunque es notorio un pequeño retardo en el desplazamiento del experimento 3A respecto al 3B y al 3C, la rapidez (pendiente) en los tres casos es muy similar. La Figura 2A.3b muestra la evolución de la fragmentación del aceite, aunque en todos los casos hay una formación creciente de islas, es más notable en el experimento 3C que en el 3A y el 3B, porque hacia el final de los experimentos queda más aceite residual en 3C. La Figura 2A.3c es el resultado de sumar el área de la región Continua con el de la región Insular. Aunque esta suma no produce un cambio

en el comportamiento dinámico, es decir, en las pendientes de las curvas, si se produce un aumento notable en el área total del experimento 3B, porque ahora la curva 3C desciende más que la 3B. Al final de cada experimento el porcentaje de aceite atrapado en las islas fue de 13.87% para en experimento 3A, de 17.94% para el 3B y de 33.71% para el 3C. Aunque el comportamiento conformacional del desplazamiento del experimento 3A es muy diferente al de los experimentos 3B y 3C, en este caso resultó cuantitativamente menos distinto que los observados en las celdas 1 y 2.



## Apéndice 2B. Experimentos en celdas con separación de 0.075 cm.

### Celda 1

Análisis conformacional, experimentos 1D y 1E. En estos experimentos el proceso de desplazamiento fue muy lento y con baja expulsión de aceite, impidiendo que la interface agua-aceite logra llegar al extremo opuesto de la celda, Figuras 2.5d y e. Aunque el experimento 1E presenta mayor expulsión, en ambos experimentos se observa que la formación de digitaciones es pobre. Asimismo, la formación de islas es prácticamente nula, solo en el experimento 1E se forma una isla.

Análisis dinámico, experimentos 1D y 1E. La Figura 2B.1 representa el comportamiento del total (regiones Continua e Insular), en este caso se ha prescindido de las gráficas independientes de las regiones continua e insular, porque en el experimento 1D no se generan islas y en 1E solamente una. Los experimentos tienen cierta similitud sólo al principio, durante los primeros 10 minutos, porque después el comportamiento de cada uno es distinto, en el experimento 1D el desplazamiento es más lento que en E, esto es, en el primer caso se requirió de 768 minutos para que el desplazamiento de las fases se anulara, y en el segundo caso se requirió de 8,640 min., Figura 2B.1. También se puede apreciar una diferencia notable en la cantidad de aceite recuperado al finalizar el desplazamiento, en el experimento 1D es tan solo de 7.80%, y en 1E es de 27.22%. En esta separación, la fuerza capilar es muchos más débil que en el caso anterior (0.015 cm), porque esta fuerza es proporcional a  $1/d$ , donde  $d$  es la separación entre los vidrios. Por esta razón, es muy probable que la fuerza capilar esté en desventaja respecto a la fuerza viscosa, para desplazar al aceite, ocasionando una menor repetibilidad en el comportamiento del desplazamiento, o incluso puede pensarse que las fuerzas gravitacionales pueden también contribuir.

### Celda 2

Análisis conformacional, experimentos 2D y 2E. Como en el caso de la celda 1, el proceso de desplazamiento fue muy lento en ambos experimentos. Sin embargo, en el experimento 2D si hubo una expulsión considerable de aceite. Mientras que, en el experimento 2E la cantidad de aceite expulsada fue mínima, Figuras 2.6d y e. Se puede observar que en el experimento 2D la interface prácticamente llega a la salida, el desplazamiento se realiza mediante un solo dedo cuya longitud y amplitud son aproximadamente iguales. Además, el proceso de desplazamiento deja varias islas (8) entre las que se distinguen las dos formadas alrededor de los trozos de hilo nylon utilizados para imponer

la separación entre los vidrios, Figura 2.6d. El experimento 2E se parece mucho al 1D porque el avance de la interface es muy pobre, a pesar del enorme tiempo invertido en el experimento y porque no se forman islas, Figura 2.6e.

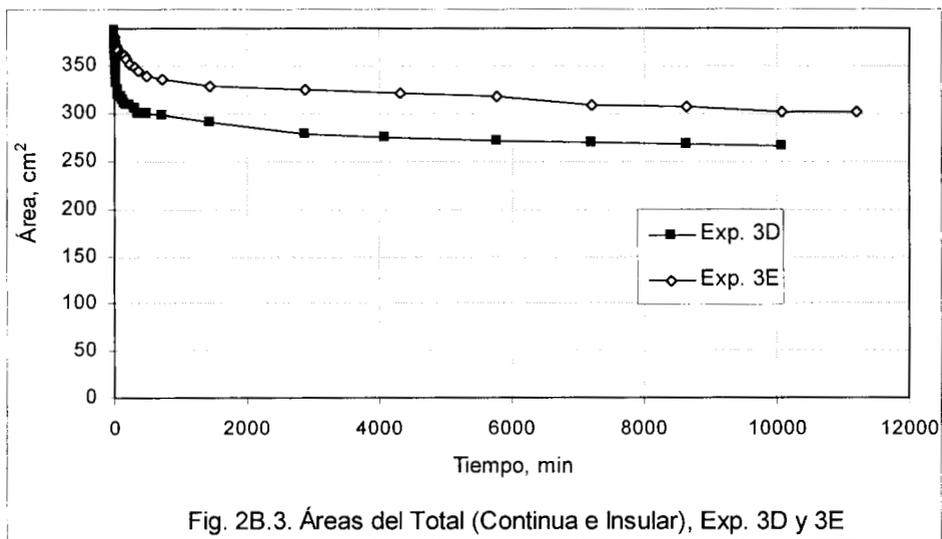
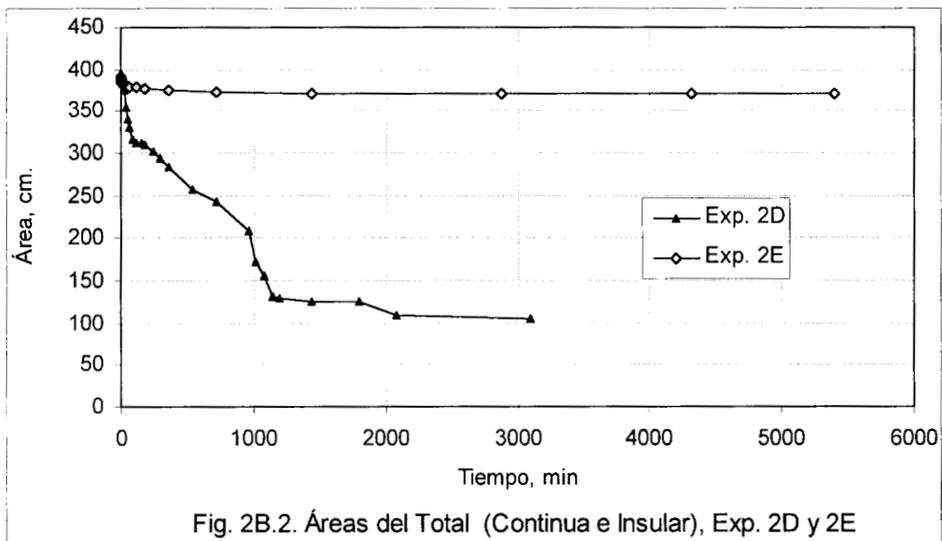
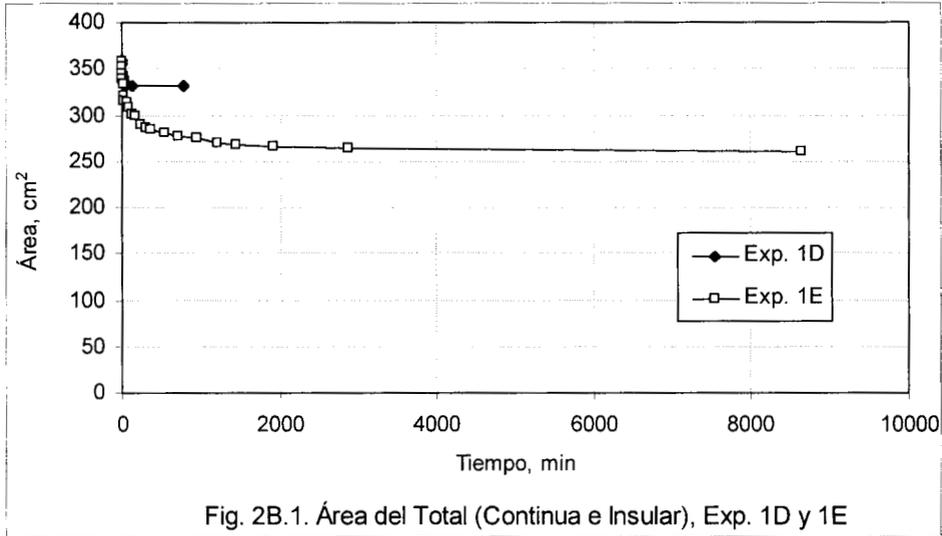
Análisis dinámico, experimentos 2D y 2E. La Figura 2B.2 muestra el comportamiento del total para los experimentos 2D y 2E, como en el caso de la celda 1, la formación de islas es muy escasa en el experimento 2D (7 islas) y en el 2E no hay formación de islas. En el experimento 2D se observó que el movimiento de la interfaz es muy sensible, esto es, cuando el desplazamiento ha alcanzado aparentemente un equilibrio estático, repentinamente la interfaz comienza nuevamente a avanzar. Esto se puede observar en el descenso que tienen las curvas Continua y total alrededor de los 2,000 minutos, Figura 2B.2. Como en el caso de la celda 1, el desplazamiento es muy lento porque la fuerza capilar es muy débil. Se puede especular pensando que el avance se detiene porque el ángulo de contacto no es el adecuado localmente, pero dado que la línea de contacto agua-aceite-vidrio recibe las tensiones de las superficies interfaciales agua-aceite, agua-vidrio y aceite-vidrio, el reordenamiento de estas tensiones a lo largo de las líneas de contacto superior e inferior puede dar origen a un eventual avance, aún después de que la interface parece no moverse. Esto puede ser más notorio en el caso de separaciones de esta magnitud, debido a que la fuerza capilar es más débil que en el caso de las otras separaciones y que es posible que la fuerza gravitacional comience a jugar un papel. Es por esta razón, que resulta muy difícil, sino imposible, repetir algunos rasgos generales del proceso de desplazamiento. Aún cuando el experimento 2D (3,093 min.) duró menos que el 2E (5400 min.), la recuperación de aceite fue de 73.17% en el primer caso, y de 5.30% en el segundo.

### **Celda 3**

Análisis conformacional, experimentos 3D y 3E. El proceso de desplazamiento en cada uno de estos experimentos fue distinto, en el 3D resalta la formación de una digitación que avanza longitudinalmente y cuya forma no es parecida a las obtenidas en los demás experimentos con la misma separación, esto es, su longitud es de más del doble que su amplitud. Esta digitación se parece a las obtenidas en los experimentos de estandarización (1A, 2A y 3A), excepto que en este caso la formación de islas es escasa, tan solo una. Sin embargo, el experimento 3E difiere totalmente porque el desplazamiento se realiza a lo ancho de la celda, y se forman cuatro islas, Figuras 2.7d y e.

Análisis dinámico, experimentos 3D y 3E. La Figura 2B.3 muestra el comportamiento del total para los experimentos 3D y 3E. Aunque el

comportamiento cualitativo de ambos experimentos es muy distinto, el porcentaje de aceite recuperado es muy similar, a diferencia de lo ocurrido en las celdas 1 y 2, Tabla 3.3. El experimento 3D duró 10,080 minutos y se recuperó el 31.56%, mientras que en el 3E duró 11,205 minutos y se recuperó el 20.71%, la duración de estos experimentos fue de las más largas.

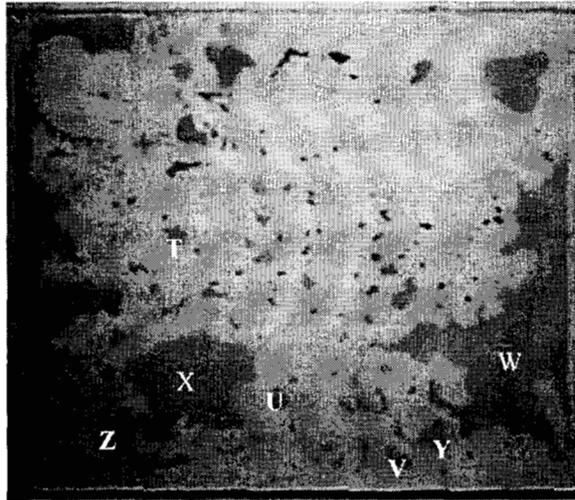


## Apéndice 2C. Experimentos con separación de 0.005 cm

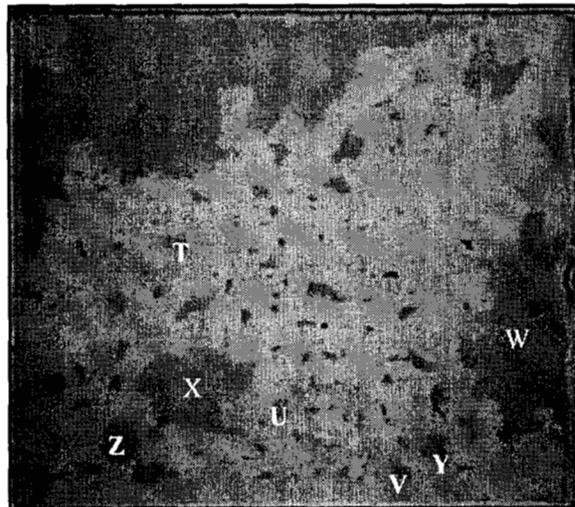
### Celda 1

Análisis conformacional, experimentos 1F y 1G. Estos experimentos fueron los últimos que se realizaron en la celda número 1, en ambos se observó un patrón de desplazamiento muy parecido. En el lado derecho de la celda se forma un dedo que crece muy rápidamente y avanza cruzando la celda en pocos minutos (10 minutos), dejando una gran cantidad de aceite esparcido en forma de pequeñas islas, Figuras 2.5f y g. También se observa que cuando la salida queda completamente saturada con agua, el aceite atrapado tiende a salir a contracorriente por la entrada, porque es empujando hasta hacer contacto con ella. En estos experimentos es notoria la similitud entre las islas formadas en ambos casos, en la Figura 2C.1 se muestra la imagen del estado de la celda al finalizar los experimentos 1F y 1G, respectivamente. Con letras se señalan las islas que guardan similitud en tamaño y posición.

Análisis dinámico, experimentos 1F y 1G. En las Figuras 2C.2a, 2C.2b y 2C.2c se presenta la gráfica del comportamiento del área de las regiones Continua, Insular y su total, respectivamente. En el caso de la Figura 2C.2a se aprecia que la región Continua decrece muy rápidamente y que el experimento 1F desplaza más aceite que el 1G, aunque el ritmo de expulsión de aceite es prácticamente el mismo porque la pendiente de ambas curvas es muy parecida. Después de este repentino y rápido avance del agua, se aprecia un cambio en la pendiente, que está relacionado con una disminución notable en el ritmo de expulsión de aceite, debido a que la salida es invadida con agua y el aceite es obligado a salir lentamente a contracorriente por la entrada. En la Figura 2C.2b se observa el crecimiento de la región Insular, que coincide con el súbito avance de la región Continua; la separación de ambas curvas está relacionada con el atrapamiento de aceite cuando la salida queda invadida con agua. Es importante hacer notar que aunque la mayor parte del aceite de la región Insular está contenido en las islas grandes, es el avance repentino el que genera un gran número de islas pequeñas que quedan atrapadas en el espacio capilar, esto es, se genera una gran cantidad de perímetro interfacial inmóvil, que será tema de análisis en la sección 3.3. En la Figura 2C.2c se puede observar que el comportamiento del total no es muy distinto al de la región Continua, porque no se acumula mucho aceite residual de la región Insular. Sin embargo, la saturación final de aceite difiere aproximadamente en un 10.5%. La duración de cada experimento también coincidió, ambos duraron un poco menos de 5 días.

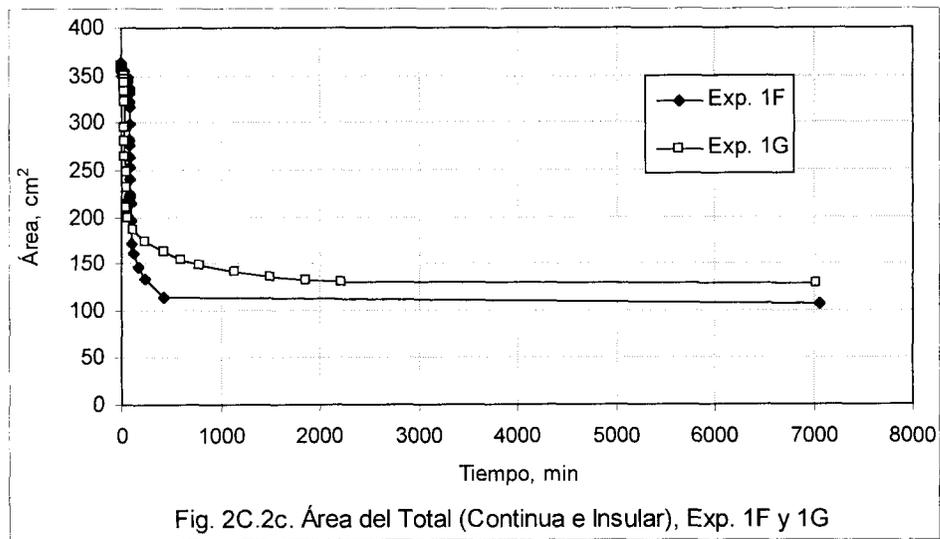
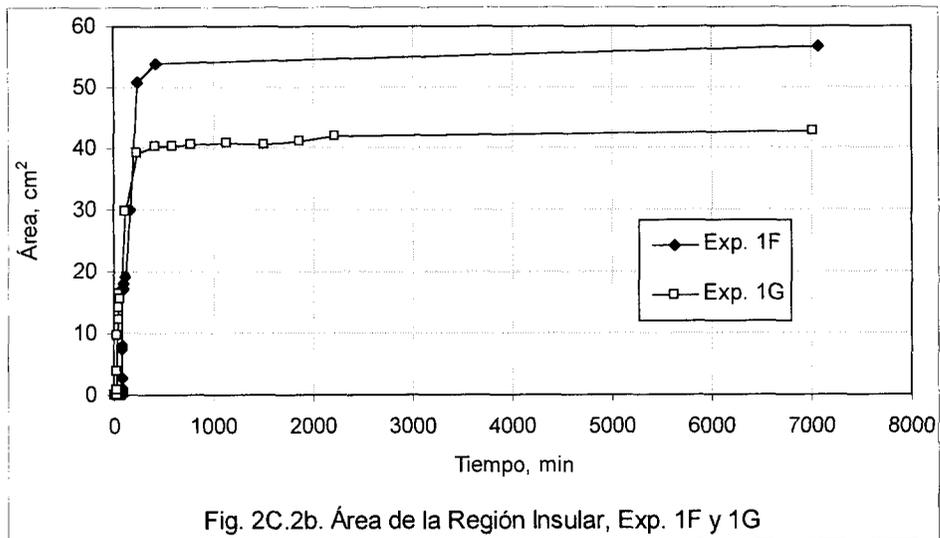
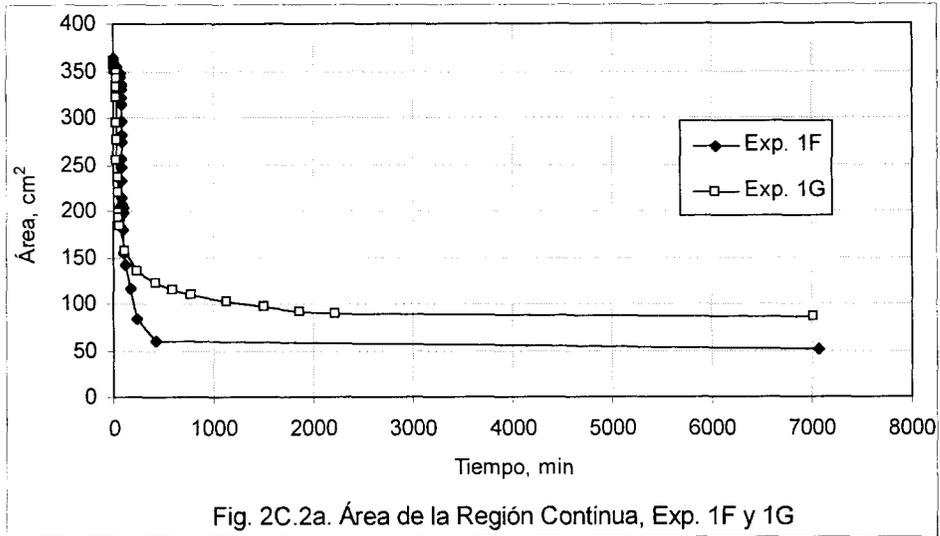


a) Experimento 1F



b) Experimento 1G

Fig. 2C.1. Similaridades en forma y posición entre las islas formadas en los experimentos 1F y 1G en la configuración final



## Celda 2

Análisis conformacional, experimentos 2F y 2G. Comparando estos experimentos el proceso de desplazamiento al inicio fue muy similar, pero después las digitaciones crecieron en sitios opuestos, esto es, en el experimento 2F las digitaciones avanzaron por el lado izquierdo de la celda y se ensancharon creciendo hacia la derecha. Mientras que, en la celda 2G fue al contrario, avanzaron por el lado derecho y se ensancharon creciendo hacia el lado izquierdo de la celda, Figuras 2.6f y g. Como en los experimentos de la celda 1, también se observa que el desplazamiento se realiza fragmentando a la fase aceite en un gran número de islas que van quedando atrás del frente. Estos experimentos fueron los últimos que se realizaron en la celda 2, desgraciadamente el proceso de saturación de la celda con aceite generó un gradiente de coloración a lo largo de ella, lo cual no fue un obstáculo para el experimento 2G, pero sí para el 2F, porque el repentino avance del agua alcanzó los lugares con poco colorante y por tanto de bajo contraste. Por esta razón, el experimento 2F no fue procesado.

Análisis dinámico, experimentos 2F y 2G. En las Figuras 2C.3a, 2C.3b y 2C.3c se muestra el comportamiento de las regiones Continua, Insular y su total, respectivamente. Solo se presentan los resultados del experimento 2G, por lo que no es posible establecer una comparación cuantitativa entre la dinámica de ambos experimentos.

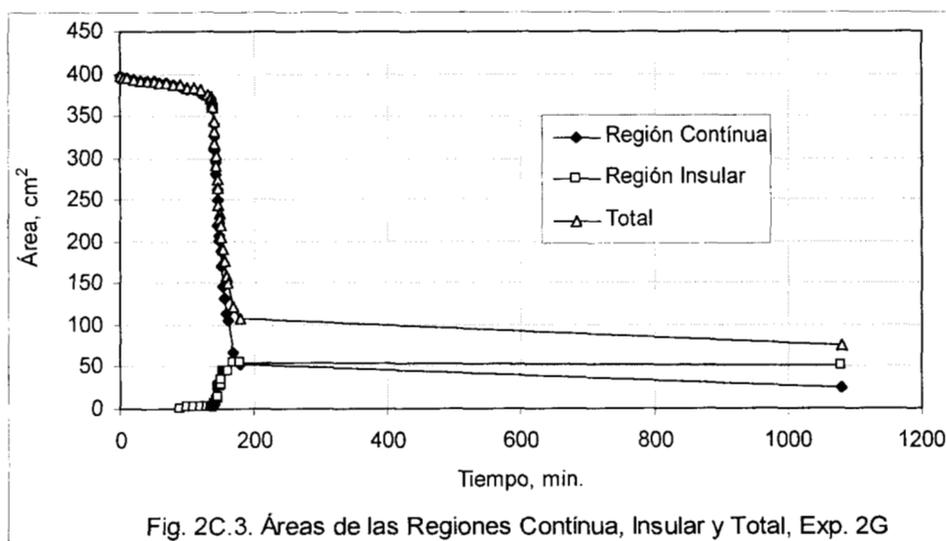
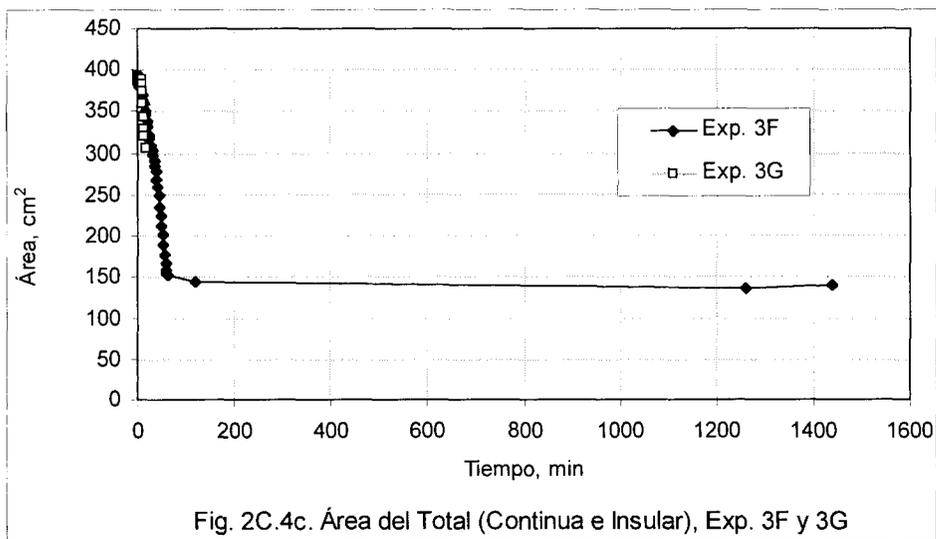
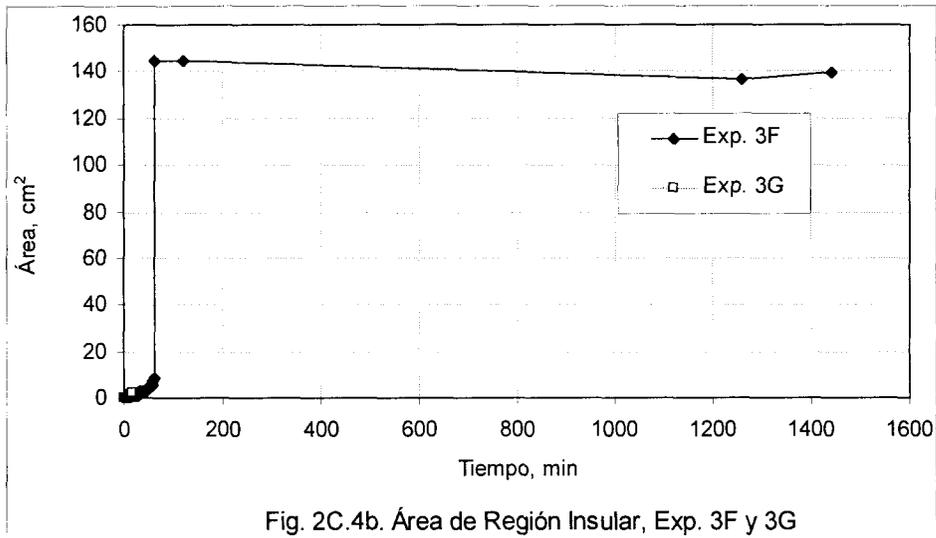
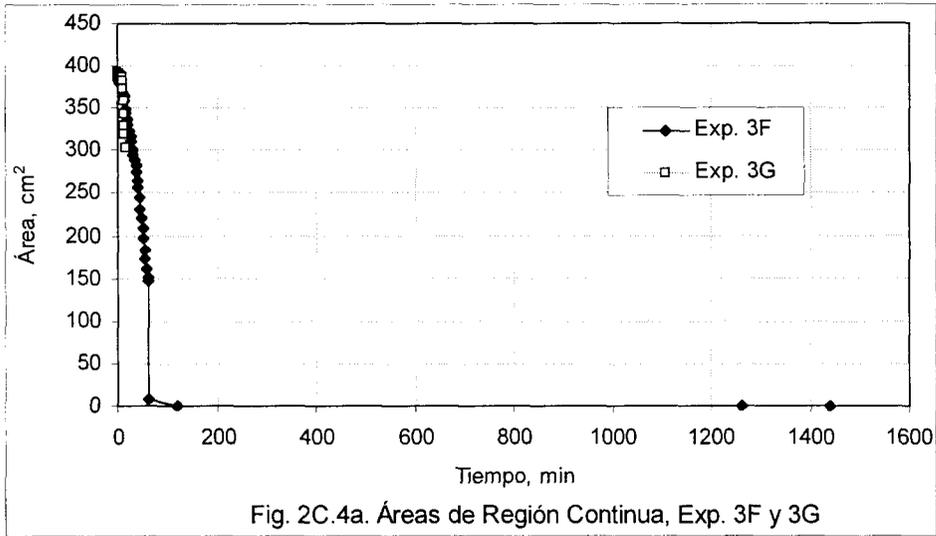


Fig. 2C.3. Áreas de las Regiones Continua, Insular y Total, Exp. 2G

### Celda 3

Análisis conformacional, experimentos 3F y 3G. Comparando estos experimentos el proceso de desplazamiento fue muy similar. En el experimento 3F el avance del agua se realiza formando tres digitaciones de gran tamaño, dos corren longitudinalmente a ambos lados de la celda, por las paredes laterales, y la tercera corre longitudinalmente sobre la mitad derecha de la celda, Figura 2.7f. En el experimento 3G se forman dos digitaciones que avanzan longitudinalmente a cada lado de la celda y que se unen cuando están muy próximas a la salida de la celda. Al final, los dos experimentos dejan una gran isla al centro de la celda, en un caso cerca de la salida (experimento 3F) y en el otro cerca de la entrada (experimento 3G), Figura 2.7g. En ambos experimentos se observa poca fragmentación del aceite lo cual difiere con lo observado en las celdas 1 y 2, pero es consistente con la baja fragmentación observada en el primer experimento (3A), Figura 2.7a.

Análisis dinámico, experimentos 3F y 3G. Las Figuras 2C.4a, 2C.4b y 2C.4c presentan las gráficas de las regiones Continua, Insular y su total, respectivamente. En el experimento 3G se observó una banda de baja coloración, que fue producida al utilizar una técnica inapropiada para saturar la celda con aceite. Esta franja se distingue perfectamente en las tres primeras imágenes de la Figura 2.7g. En este experimento la digitación izquierda avanzó muy rápidamente y alcanzó la zona de baja coloración, lo cual tuvo como consecuencia que este experimento no pudiera ser evaluado en su totalidad, esto es, solo se pudieron procesar las imágenes de los primeros 15 minutos. Por esta razón, la comparación entre los dos experimentos sólo se pudo hacer al inicio, en donde se observa que la velocidad del desplazamiento es repetible, porque la pendiente de ambas curvas es muy similar, Figura 2C.4a. El comportamiento entre la región Continua y del total es muy parecido porque la formación de región Insular es prácticamente nulo, excepto al final, donde se forma una gran isla en ambos experimentos, lo cual se observa en el abrupto crecimiento de la región Insular, Figura 2C.4b.



## APÉNDICE 3

### Prueba Kolmogorov-Smirnov para probar el comportamiento normal de la longitud adimensional de $L_{21}$ , longitud interfacial característica

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,  $|F(X_i)-S(X_i)|$ , 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,  $|F(X_i)-S(X_{i-1})|$ . Los niveles de significancia utilizados fueron de:  $\alpha=0.1$ , 0.05 y 0.01 en pruebas de dos extremos. En la Tabla 3A.1 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 significancia dado. En la misma tabla se consigna en gris el valor de alfa para el cual la hipótesis es rechazada.

Las hipótesis planteadas son:

La nula  $H_0: F(X)=N(\mu, \sigma)$  vs La alternativa  $H_\alpha: F(X)\neq N(\mu, \sigma)$

Como se puede observar en la Tabla 3A.1, solo en seis casos de diecinueve se rechaza parcialmente la hipótesis de normalidad. Esto es, en tres casos se rechaza a un nivel de 10%, pero se aceptan a un nivel de 5% y 1%. En otros tres casos la hipótesis nula se acepta a un nivel de 1%. Solo en un caso (experimento 2G) se rechaza para cualquier nivel.

En términos generales esto significa que la hipótesis de normalidad es plausible para la longitud adimensional de  $L_{21}$ .

Exp.	Max{ $ F(X_i)-S(X_i) ,  F(X_i)-S(X_{i-1}) $ }	Nivel de significancia, $\alpha$			Resultado para H <sub>0</sub>
		0.1	0.05	0.01	
1A	0.224, n=36	0.199	0.221	0.265	SA, $\alpha=0.01$
1B	0.169, n=28	0.225	0.250	0.3	SA, $3\alpha's$
1C	0.104, n=34	0.205	0.227	0.273	SA, $3\alpha's$
1D	0.152, n=9	0.387	0.430	0.513	SA, $3\alpha's$
1E	0.127, n=22	0.253	0.281	0.337	SA, $3\alpha's$
1F	0.254, n=33	0.208	0.231	0.277	SA, $\alpha=0.01$
1G	0.277, n=33	0.208	0.231	0.277	SA, $\alpha=0.01$
2A	0.096, n=39	0.191	0.213	0.255	SA, $3\alpha's$
2C	0.186, n=48	0.176	0.196	0.235	SR, $\alpha=0.1$
2D	0.109, n=29	0.221	0.246	0.295	SA, $3\alpha's$
2E	0.074, n=19	0.271	0.301	0.361	SA, $3\alpha's$
2G	0.316, n=40	0.189	0.210	0.252	SR, $\forall \alpha$
3A	0.243, n=29	0.221	0.246	0.295	SR, $\alpha=0.1$
3B	0.148, n=29	0.221	0.246	0.295	SA, $3\alpha$
3C	0.242, n=30	0.218	0.242	0.290	SR, $\alpha=0.1$
3D	0.150, n=27	0.229	0.254	0.305	SA, $3\alpha's$
3E	0.150, n=28	0.225	0.250	0.300	SA, $3\alpha's$
3F	0.167, n=39	0.191	0.213	0.255	SA, $3\alpha's$
3G	0.145, n=14	0.275	0.349	0.418	SA, $3\alpha's$

SA = Se acepta, SR = Se rechaza

Tabla 3A.1. Tabla de valores críticos para  $\alpha = 0.1, 0.5$  y  $0.01$ , y valores observados para la prueba Kolmogorov-Smirnov

## APÉNDICES 4

### Análisis del desplazamiento de los fluidos

#### Apéndice 4A. Celda 1

**Experimentos 1B y 1C (0.015 cm).** La Figura 3.8a es la gráfica de las velocidades de desplazamiento del experimento 1B y la Figura 2.5b, es su secuencia. Se puede observar claramente que la etapa de Inicio tiene lugar durante los primeros 70 minutos, en los cuales la velocidad de desplazamiento es lenta y aproximadamente constante, y el frente de avance presenta digitaciones pequeñas. Después, tiene inicio la etapa de Desarrollo, en donde se aprecia un incremento notable en la velocidad, que coincide con la formación simultánea de dos grandes digitaciones que evolucionan a ambos lados de la celda y que al final de esta etapa se unen cerca de la salida de la celda, hacia el minuto 79. A partir de aquí tiene lugar la etapa Final, en donde el ritmo de expulsión de aceite se reduce notablemente.

La Figura 3.8b muestra el comportamiento de las velocidades del experimento 1C y la Figura 2.5c muestra la secuencia del desplazamiento. La gráfica de las velocidades es muy irregular porque presenta cambios abruptos que impiden una identificación inmediata de cada etapa. Sin embargo, la secuencia fotográfica permite complementar la identificación, porque se observa que las grandes digitaciones que corren a ambos lados de la celda no se desarrollan de manera simultánea sino sucesivamente, esto es, primero la digitación derecha y luego la izquierda. Esto explica porque el cambio en las velocidades no se manifiesta de manera tajante. De esta manera, se puede considerar que la etapa de Inicio tiene lugar durante los primeros 40 minutos, porque la gran digitación del lado derecho apenas inicia su crecimiento. Después tiene lugar la etapa de Desarrollo, cuando la velocidad aumenta debido al crecimiento sucesivo de ambas digitaciones, las cuales se unen al final de esta etapa, es decir, cuando han transcurrido 145 minutos. La etapa Final corresponde al desalojo del aceite que queda a la salida de la celda, una vez que se han unido ambas digitaciones.

**Experimentos 1D y 1E (0.075 cm).** La Figura 3.8c presenta las velocidades del experimento 1D y la Figura 2.5d es la secuencia del desplazamiento. En este tipo de experimentos se observa que conforme transcurre el tiempo, el desplazamiento es cada vez más lento y al final casi imperceptible. Por esta razón, en estos casos se considera que existen dos etapas, aunque en realidad parece ser una sola que no alcanza a desarrollarse. Sin embargo, en este trabajo se ha supuesto la existencia de dos etapas una Inicial y otra Final. El rápido decaimiento del desplazamiento, en los primeros minutos del

experimento, es seguido por un lento desplazamiento que tiende a cero. Esta observación conduce a suponer que el primer comportamiento corresponde a la etapa Inicial y el segundo a la Final. Esta tendencia semeja a la rama positiva de una hipérbola, por lo que en una gráfica log-log se pueden observar dos tendencias bien definidas. Si se ajusta una recta a cada una de estas tendencias, se obtiene un punto de intersección de dichas rectas, el cual se ha tomado como referencia para identificar el fin de la etapa Inicial y el inicio de la Final. Con base en este método, la etapa Inicial tiene una duración de 10 minutos y la Final corresponde al resto del experimento. En este experimento también se puede suponer que el agua tardará un tiempo infinito en alcanzar la salida de la celda, porque el desplazamiento es cada vez más lento. Asimismo se observa que el avance es muy uniforme porque las digitaciones no alcanzan a desarrollarse.

La Figura 3.8d muestra las velocidades del experimento 1E y la Figura 2.5e la secuencia del proceso de desplazamiento. En este caso, como en el anterior, se observa que la velocidad disminuye conforme transcurre el tiempo. También en este caso se pueden reconocer dos etapas, una Inicial, en donde la velocidad de desplazamiento decae notablemente, y otra posterior o Final, en donde el desplazamiento tiende lentamente a cero. La etapa Inicial dura 15 minutos y la Final corresponde al resto del experimento. Tanto en el experimento 1D como en el 1E no hay efectos terminales de la celda, porque los fluidos no alcanzan la salida como resultado del desplazamiento. En ésta separación entre vidrios (0.075 cm) es notable el esfuerzo que hace la fuerza capilar para vencer la inercia de la fuerza viscosas.

**Experimentos 1F y 1G (0.005 cm).** La Figura 3.8e es la gráfica de las velocidades del experimento 1F y la Figura 2.5f es la secuencia fotográfica de dicho experimento. Como en el caso de los experimentos 1B y 1C, también se distinguen tres zonas bien definidas, una inicial de baja velocidad, una intermedia en donde aumenta la velocidad considerablemente y una al final en donde la velocidad de desplazamiento vuelve a disminuir. La etapa Inicial tiene una duración de 80 minutos. Mientras que, la etapa de Desarrollo se realiza en 40 minutos. En la etapa Final se observa que el agua ha invadido prematuramente la salida de la celda, dejando una gran cantidad de aceite entrampado. Sin embargo, el proceso de imbibición no se detiene, pues el aceite es obligado a salir a contracorriente por la entrada de la celda.

La Figura 3.8f muestra las velocidades del experimento 1G y la Figura 2.5g es la secuencia del desplazamiento. En este caso también se distinguen tres zonas de diferente velocidad y la etapa Final también muestra la presencia de efectos terminales y flujo a contracorriente. Se aprecia que la etapa Inicial tiene una duración de 30 minutos, porque después la velocidad aumenta notablemente, lo cual coincide con el avance apresurado de la digitación

formada al lado derecho de la celda. La etapa de Desarrollo tiene una duración de 16 minutos, termina cuando el agua ha invadido completamente la salida de la celda. En ese momento inicia la etapa Final, en donde el aceite entrampado es obligado a salir a contracorriente por la entrada de la celda.

## Apéndice 4B. Celda 2

**Experimento 2C (0.015 cm).** La Figura 3.9a es la gráfica de las velocidades de desplazamiento del experimento 2C y la Figura 2.6c es la secuencia. La etapa de inicio muestra el crecimiento de una digitación por el lado derecho de la celda, la cual crece lentamente durante los primeros 20 minutos. Posteriormente, el crecimiento abrupto de esta digitación da lugar a la etapa de Desarrollo, cuya velocidad muestra dos etapas, una en la cual la digitación alcanza la salida de la celda (entre los 20 y los 32 minutos), y otra en donde el desplazamiento es lateralmente a la izquierda, abarcando la salida de la celda (entre los 33 y los 45 minutos). La etapa Final se inicia cuando la salida está invadida por agua y el aceite es obligado a salir a contracorriente por la entrada, esto es, a partir de los 45 minutos.

**Experimentos 2D y 2E (0.075 cm).** La Figura 3.9b muestra las velocidades del experimento 2D y la Figura 2.7d la secuencia del desplazamiento del mismo experimento. En este caso el desplazamiento fue casi total y representa el único caso con separación de 0.075 cm, en el cual el agua prácticamente alcanza la salida de la celda. Las etapas inicial y final se identificaron mediante la técnica de asíntotas en una gráfica log-log. La etapa inicial tuvo una duración de 90 minutos y la final de 3003 minutos. Después de los primeros 90 minutos, se desarrolló una gran digitación al centro de la celda, que fue la que dominó el avance hasta el final del experimento, de hecho, este experimento mostró dos picos uno muy notable después de los primeros 30 minutos, y otro menor alrededor de los 1000 minutos. Ambos picos en la velocidad hacen pensar en la generación de etapas de desarrollo que no llegan a concretarse porque su avance es muy efímero, particularmente en la segunda, en donde la salida de la celda juega un papel importante para evitar su desarrollo. No obstante estas diferencias el experimento fue tratado como de dos etapas las cuales se determinaron por el método de las asíntotas como se mencionó con anterioridad.

La Figura 3.9c presenta las velocidades del experimento 2E y la Figura 2.6e es la secuencia del desplazamiento. La etapa Inicial y la de Desarrollo se identificaron a través de la intersección de las dos rectas ajustadas a una gráfica log-log, como se explicó en el caso de la celda 1 para este tipo de experimentos. En este caso el desplazamiento fue muy pobre y ninguna irregularidad en la interface llegó a generar digitaciones pronunciadas. La duración de la etapa Inicial fue de 10 minutos, y la de Desarrollo corresponde al resto del experimento.

**Experimentos 2F y 2G (0.005 cm).** El experimento 2F no fue procesado porque el contraste se empobrece notablemente durante el desplazamiento, Figura 2.6f.

La Figura 3.9d es la gráfica de las velocidades del experimento 2G y la Figura 2.6g es la secuencia del desplazamiento. Este experimento presenta una etapa Inicial muy larga, porque tiene una duración de 139 minutos. Después se inicia la etapa de Desarrollo, porque la velocidad aumenta notablemente y el desplazamiento de la digitación es muy rápido. La duración de esta etapa es de 31 minutos. Hacia el final de este experimento no hay invasión prematura de la salida con agua y el aceite es expulsado a cocorriente.

## Apéndice 4C. Celda 3

**Experimentos 3B y 3C (0.015 cm).** La Figura 3.10a es la gráfica de las velocidades del experimento 3B y la Figura 2.7b es la secuencia del desplazamiento. Del análisis de ambas Figuras se observa que la etapa de Inicio corresponde al desarrollo de dos pequeñas digitaciones que se forman desde el comienzo del experimento y que evolucionan lentamente formando dos glóbulos durante los primeros 10 minutos. Después, el glóbulo derecho se desarrolla rápidamente en dirección longitudinal y luego transversal, esto coincide con el abrupto aumento de la velocidad a partir de los 10 minutos, o sea el comienzo de la etapa de Desarrollo, la cual parece terminar cuando el glóbulo derecho arriba a la pared izquierda de la celda, es decir, cuando han transcurrido ya 22 minutos. En ese momento el aceite que ha quedado aislado de la salida de la celda es obligado a salir a contracorriente por la entrada de la celda. A partir de aquí tiene lugar la etapa Final.

La Figura 3.10b muestra el comportamiento de las velocidades del experimento 3C y la Figura 2.7c es la secuencia del desplazamiento. En este caso la etapa de Inicio se desarrolla durante los primeros 25 minutos del experimento. Su comportamiento es muy similar al observado en las celdas 1B, 1C y 2C, es decir, genera un frente con digitaciones pequeñas que evolucionan lentamente. Después, la etapa de Desarrollo se inicia con una rápida evolución de la digitación del lado derecho de la celda, la cual crece rápidamente en sentido longitudinal hasta alcanzar la salida de la celda, para luego avanzar transversalmente a la izquierda, abarcando incluso la salida. Este comportamiento corresponde al abrupto crecimiento de la velocidad y su subsecuente decaimiento, lo cual tiene lugar hasta los 38 minutos. A partir de aquí la etapa Final tiene lugar, con flujo a contracorriente que obliga a salir al aceite por la entrada de la celda.

**Experimentos 3D y 3E (0.075 cm).** La Figura 3.10c muestra el comportamiento de las velocidades del experimento 3D y la Figura 2.7d es la secuencia del desplazamiento. Aún cuando se observa la formación de una gran digitación, el avance paulatino tiende a disminuir conforme transcurre el tiempo. Siguiendo el procedimiento de la intersección de las rectas en una gráfica log-log, se observó que la etapa Inicial tuvo una duración de 20 minutos. Mientras que, la Final corresponde al resto del experimento. La peculiaridad de este experimento es la formación de una gran digitación que prácticamente atraviesa la celda, pero cuyo desplazamiento es sistemáticamente cada vez más lento, siguiendo el patrón de comportamiento de los demás de su tipo.

La Figura 3.10d presenta las velocidades del experimento 3E y la Figura 2.7e es la secuencia del desplazamiento. Siguiendo la metodología de las gráficas log-log, se observa que la duración de la etapa Inicial de este experimento es de 10 minutos, y la duración de la Final corresponde al resto del experimento. La peculiaridad de este experimento está en la formación de una gran muralla que se forma en toda la mitad derecha de la entrada. Este patrón se sigue observando hacia el final del experimento, cuando se forman varias penínsulas delgadas de aceite. Sin embargo, esto no altera el comportamiento decreciente de la velocidad, que se observa en casi todos los experimentos de esta separación.

**Experimentos 3F y 3G (0.005 cm).** La Figura 3.10e es la gráfica de las velocidades del experimento 3F y la Figura 2.7f es la secuencia del desplazamiento. En este caso no se aprecia claramente la separación entre la etapa Inicial y la de Desarrollo, pero sí la Final, que comienza cuando la velocidad cae abruptamente después de haber transcurrido 62 minutos. Para identificar perfectamente el inicio y fin de cada etapa es necesario analizar la secuencia del desplazamiento. La etapa Inicial se realiza durante los primeros 18 minutos, porque posteriormente se forman grandes digitaciones que aumentan la velocidad del desplazamiento. La etapa de Desarrollo parece realizarse en dos pasos sucesivos, el primero tiene lugar entre los 18 y 38 minutos y el segundo, entre los 38 y los 62 minutos. En este último las velocidades presentan sus valores más altos, que son menores a 0.4 cm/min. En todos los demás experimentos de este tipo (1F, 1G, 2G y 3G), las velocidades de esta etapa fueron mayores a 0.8 cm/min, es decir, fueron de más del doble. Sin embargo, tal vez por la misma razón, el proceso de desplazamiento fragmenta muy poco a la fase aceite, dejando pocas islas. El final de la etapa de desarrollo se alcanza cuando una gran isla se fragmenta de la región continua, que coincide con la abrupta disminución de la velocidad.

La Figura 3.10f muestra las velocidades del experimento 3G, la gráfica se muestra incompleta porque a partir del minuto 16 la digitación del lado izquierdo de la celda llega a una zona en donde el aceite está poco coloreado y, consecuentemente el contraste entre el agua y el aceite es muy pobre, como se puede apreciar en la secuencia de la Figura 2.7g. Por esta razón, solamente se cuantificaron los primeros 16 minutos del experimento. No obstante, es posible identificar la etapa Inicial y el comienzo de la etapa de Desarrollo. La secuencia del desplazamiento permite corroborar el inicio de las digitaciones de gran magnitud, que son características de la etapa de Desarrollo, que comienzan cuando han transcurrido los primeros diez minutos del experimento. Desgraciadamente las velocidades de las etapas de desarrollo y final no son cuantificables por las razones antes expuestas.

## Bibliografía

1. Akin, S., Schembre, J.M., Bhat, S.K. y Kavscek, A.R., "Spontaneous Imbibition Characteristics of Diatomite", *J. Petroleum Sci. and Tech.*, **25**, 2000, 149-165.
2. Anderson, W.G., "Wettability Literature Survey Part 2: Wettability Measurement", *J. Petroleum Tech.*, November 1986, 1246-1262.
3. 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,.
4. Arriola, A., Willhite, G.P. y Green, D.W., "Trapping of Oil Drops in a Noncircular Pore Throat and Mobilization upon Contact with a Surfactant", *Soc. Petroleum Eng. J.*, febrero 1983, 99-114.
5. Auriault, J.L. y Sanchez-Palencia, E, "Remarques sur la loi de Darcy pour les écoulements biphasiques en milieu poreux", *J. Theoretical and Applied Mechanics*, Número especial, 1986, 141-156.
6. Bear, J., "*Dynamics of Fluids in Porous Media*", American Elsevier Pub. Co., 1972.
7. Bear, J, Jacobs, M. y Braester, C., The use of models and analoges in reservoir engineering, Hydraulic Lab. Technion , Haifa, Israel, Proyecto número 609, 1966.
8. Bentsen, R.G. y Manai, A.A., "On the Use of Conventional Cocurrent and Countercurrent Effective Permeabilities to Estimate the Four Permeability Coefficients which arise in Coupled", Two-Phase Flow, *Transport in Porous Media*, **11**, 1993, 243-262.
9. Bentsen, R.G., "An Investigation into whether the Nondiagonal Mobility Coefficients which arise in Coupled, Two Phase Flow are Equal", *Transport in Porous Media*, **14**, 1994, 23-32.
10. Blair, P.M., "Calculation of Oil Displacement by Countercurrent Water Imbibition, *Soc. of Petroleum Eng. J.*, septiembre 1960, 195-202.
11. 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.
12. Bourbiaux, B.J. y Kalaydjian, F.J., Experimental Study of Cocurrent and Countercurrent Flows in Natural Porous Media", *Soc. of Petroleum Eng. Reservoir Engineering*, Agosto 1990, 361-368.
13. Brock, D.C. y Orr, F.M., "Flow Visualization of Viscous Fingering in Heterogeneous Porous Media", *Proc. 66<sup>th</sup> Annual Technical Conference and Exhibition*, SPE No. 22614, Dallas, TX, 6-9 octubre, 1991, 211-222.
14. Brownscombe, E.R. y Dyes, A.B., "Water-Imbibition Displacement...Can it Release Reluctant Spraberry Oil", *The Oil and Gas J.*, Noviembre 17, 264-265 y 377-378, 1952.

15. Calhoun, J.C., "Rate of Capillary Displacement", *The Oil and Gas J.*, 48, julio 7 1949, 93.
16. Campbell, B.T. y Orr, F.M., "Flow Visualization for CO<sub>2</sub>/Crude Oil Displacements", *Proc. 58<sup>th</sup> Annual Technical Conference and Exhibition*, SPE No. 11958, San Francisco, CA, 5-8 octubre, 1983, 1-16.
17. Castillo M., A. y Ojeda R., M.M., "*Principios de estadística no paramétrica*", Ed. Universidad Veracruzana, 1994.
18. Chatzis, I., "Visualization of Oil Displacement Mechanisms and Enhanced Oil Recovery", *Proc. 22<sup>nd</sup> Annual Ontario Petroleum Institute Inc. Conference*, London, Ontario, Canada, 16-18 octubre 1983, 1-20.
19. Chatzis, I. y Dullien, F.A.L., "Dynamic Immiscible Displacement Mechanism in Pore Doublets: Theory versus Experiment", *J. Colloid Interface Sci.*, **91**(1), 1983 199-222.
20. Chatzis, I., Morrow, N.R. y Lim H.T., "Magnitude and Detailed Structure of Residual Oil Saturation", *Soc. Petroleum Eng. J.*, abril 1983, 311-326.
21. Chuoke, R.L., van Meurs, P., y van der Poel, "The Instability of Slow, Immiscible, Viscous Liquid-Liquid Displacements in Permeable Media", *Petroleum Transactions AIME*, T.P. 8073, **216**, 1959, 188-194.
22. Claridge, E.L., "A Trapping Hele-Shaw Model for Miscible-Immiscible Flooding Studies", SPE No. 4105, *Proc. 47<sup>th</sup> Annual Fall Meeting SPE-AIME*, San Antonio, TX, 8-11 octubre 1972.
23. Cude y Hulett, *J. American Chemical Society*, **42**, 1920, 391. Cita extraída del artículo de Washburn.
24. Cuiec, L.E., Bourbiaux, B. y Kalaydjian, F., "Imbibition in Low-Permeability Porous Media: Understanding and Improvement of Oil Recovery", *Proc. 7<sup>th</sup> Symposium on EOR*, SPE/DOE No. 20259, 1990, 833-846.
25. da Costa e Silva, A., "Analysis of Viscous Fingering Reproducibility in Consolidated Natural Porous Media", *Proc. International Symposium of the Society of Core Analysts*, Artículo número 9504, 1995.
26. Dacord, G., Nittmann, J. y Stanley, H.E., "Radial Viscous Fingers and Diffusion-Limited Aggregation: Fractal Dimension and Growth Sites", *Phys. Rev. Lett.*, **56**(4), 1986, 336-339.
27. De Laplace P.S., "Mechanique Celeste", suplemento al libro 10, 1806. Cita extraída del libro de Arthur W. Adamson, "*Physical Chemistry of Surfaces*", 3<sup>a</sup> Ed. John Wiley & sons, 1976.
28. de Swaan, A., "Modelo Tri-fásico de Yacimientos Naturalmente Fracturados con Segregación de los Fluidos", *Rev. Instituto Mexicano del Petróleo*, **16**(2), abril 1984, 28-36.
29. de Swaan, A., "Theory of Waterflooding in Fractured Reservoirs", *Soc. Petroleum Eng. J.*, SPE No. 5892, **18**(2), abril 1978, 117-122.
30. Dussan, E.B., Ramé, E. y Garoff, S., "On Identifying the Appropriate Boundary Conditions at a Moving Contact Line: An Experimental Investigation", *J. Fluid Mechanics*, **230**, 1991, 97-116.

31. Fanchi, J.R. y Christiansen, R.L., "Applicability of Fractals to the Description of Viscous Fingering", *Proc. 64<sup>th</sup> Annual Technical Conference and Exhibition*, San Antonio, TX, 8-11 octubre 1989, 105-120.
32. Gardner, W.R. y Mayhugh, M.S., "Solutions and Test of the Diffusion Equation for the Movement of Water in Soil", *Proc. Soil Sci. Soc.*, **42**, 1958, 197-201.
33. Good, R.J., "The Rate of Penetration of a Fluid into a Porous Body Initially Devoid of Adsorbed Material (1,2)", *J. Colloid Interface Sci.*, **42**(3), marzo 1973, 473-477.
34. Graham, J.W. y Richardson, J.G., "Theory and Application of Imbibition Phenomena in Recovery of Oil", *Petroleum Transactions AIME*, T.N. 2029, **216**, 1959, 377-381.
35. Gupta, A. y Civan, F., "An Improved Model for Laboratory Measurement of Matrix to Fracture Transfer Function Parameters in Immiscible Displacement", SPE 28929, *Proc. 69<sup>th</sup> Annual Technical Conference and Exhibition*, New Orleans, LA, 25-28 septiembre, 1994, 383-396.
36. Handy, L.L., "Determination of Effective Capillary Pressures for Porous Media from Imbibition Data", *Petroleum Transactions AIME*, T.P. 8109, **219**, 1960, 75-80.
37. Hele-Shaw, H.S., "Experiments on the Nature of Surface Resistance in Pipes and on Ships", *Transactions Institute Naval Architects*, **39**, 1897, 145-156. Cita tomada del libro de Sir Horace Lamb, "*Hydrodynamics*", Ed. Cambridge University Press.
38. Hele-Shaw, H.S., "Experiments on the Nature of Surface Resistance of Water and Streamline Motion on the Certain Experimental Conditions", *Transactions Institute Naval Architects*, **40**, 1898, 21-46. Cita tomada del libro de Sir Horace Lamb, "*Hydrodynamics*", Ed. Cambridge University Press.
39. Hayashi Martínez, J.A., "*La Imbibición como un Proceso de Desplazamiento de Fluidos en Medios Porosos*", Tesis de maestría, Facultad de Ciencias, UNAM, junio 1991.
40. Hayashi, J.A. y Pérez-Rosales, C., "Visual Investigation of Imbibition Processes", *Proc. Second LAPEC*, SPE, SPE No. 23745, 353-355, 1992.
41. 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.
42. Haynes y Keen, B.A., "*Physical Properties of the Soil*", New York, 1931, Longmans Green.
43. Jacquin, Ch. y Legait, B., "Influence of Capillarity and Viscosity During Spontaneous Imbibition in Porous Media and in Capillaries", *PhysicoChemical Hydrodynamics*, **5**(3/4), 1984, 307-319.
44. Joos, P., Van Remoortere, P. y Bracke, M., "The Kinetics of Wetting in a Capillary", *J. Colloid Interface Sci.*, **136**(1), 1990, 189-197.

45. Kalaydjian, F. y Legait, B., "Effets de la Géométrie des Pores et de la Mouillabilité sur le Déplacement Diphasique à Contre-courant en Capillaire et en Milieu Poreux", *Revue Phys. Appl.*, **23**, 1988, 1071-1081.
46. Kalaydjian, F. y Legait, B., "Ecoulement lent a contre-courant en imbibition spontanée de deux fluides non miscibles dans un capillaire présentant un rétrécissement", *Compte Rendus Acad. Sc. Paris*, **304**, serie II, No. 15, 1987a, 869-872.
47. Kalaydjian, F. y Legait, B., "Permeabilites Relatives Couplees dans Ecoulements en Capillaire et en Milieu Poreux", *Compte Rendus Acad. Sc. Paris*, **304**, serie II, No. 17, 1987b, 1035-1038.
48. Kalaydjian, F., "Origin and Quantification of Coupling between Relative Permeabilities for Two-Phase Flows in Porous Media", *Transport in Porous Media*, **5**, 1990, 215-229.
49. Kalaydjian, F., Bourbiaux, B. y Guerillot, "Viscous Coupling between Fluid Phases for Two-Phase Flow in Porous Media: Theory versus Experiment", *Proc. 5<sup>th</sup> European Symposium on Improved Oil Recovery*, Budapest, Hungría, 25-27 abril, 1989.
50. Kazemi, H., Merrill, L.S., Porterfield, K.L. y Zeman, P.R., "Numerical Simulation of Water-Oil Flow in Naturally Fractured Reservoirs", *Soc. Petroleum Eng. J.*, SPE No. 5719, diciembre 1976, 317-326.
51. Kazemi, H. y Merrill, L.S., "Numerical Simulation of Water Imbibition in Fractured Cores", *Soc. Petroleum Eng. J.*, Junio (1979), 175-182.
52. Kazemi, H. y Gilman, J.R., "Analytical and Numerical Solution of Oil Recovery from Fractured Reservoirs using Empirical Transfer Functions", SPE 19849, *Proc. 64<sup>th</sup> Annual Technical Conference and Exhibition*, San Antonio, TX, USA, 8-11 octubre, 1989, 827-842.
53. King, F.H., *U. S. Geological Survey 19<sup>th</sup> Annual Report*, 1897-1898, pt. II, 59-294. Cita extraída del artículo de Leverett, 1941.
54. Kirkham, D. y Feng, C.L., Some test of the diffusion theory and laws of capillary flow in soils, *Soil Sci.*, **67**, 1949, 29-40. Cita extraída del artículo de Gardner y Mayhugh.
55. Kleppe, J. y Morse, R.A., "Oil Production from Fractured Reservoirs by Water Displacements", *Proc. 49<sup>th</sup> Annual Fall Meeting SPE-AIME*, SPE No. 5084, Houston, TX, USA, 6-9 octubre 1974, 1-20.
56. Klute, A., "Some Theoretical Aspects of the Flow of Water in Unsaturated Soils", *Proc. Soil Science Society*, **16**, 1952, 144-148.
57. Lefebvre du Prey, "Gravity and Capillary Effects on Imbibition Porous Media", *Soc. Petroleum Eng. J.*, SPE No. 6192, junio 1978, 195-206.
58. Legait, B., "*Interprétation de Certains Types D'écoulements Diphasiques en Milieu Poreux a Partir des Écoulements en Capillaires*", Tesis doctoral, Universidad de Bordeaux, 1983a.
59. Legait, B., "Laminar Flow of Two Phases through a capillary Tube with Variable Square Cross-Section", *J. Colloid Interface Sci.*, **96**, 1983b, 28-38.

60. Lenormand, R., "*Déplacements polyphasiques en milieu poreux sous l'influence des forces capillaires. Etude expérimentale et modélisation de type percolation*", Tesis doctoral, Universidad de Toulouse, 1981.
61. Lenormand, R. y Zarcone, C., "Role of Roughness and Edges during Imbibition in Square Capillaries", *Proc. 59<sup>th</sup> Annual Technical Conference and Exhibition*, SPE No. 13264, Houston, TX, USA, 16-19 septiembre 1984, 1-17
62. Lenormand, R. Y Zarcone, C., "Two-phase Flow Experiments in a Two-dimensional Permeable Medium", *PhysicoChemical Hydrodynamics*, **6**(5/6), 1985, 497-506.
63. Leverett, M.C., "Capillary Behavior in Porous Solids", *Petroleum Transactions AIME*, T.P. 1223, **142**, 1941, 152-169.
64. Leverett, M.C., Lewis, W.B. y True, M.E., "Dimensional-Model Studies of Oil-Field Behavior", *Petroleum Transactions AIME*, T.P. 1413, **146**, 1942, 175-193.
65. Liang, Q. y Lohrenz, J., "Dynamic Method of Measuring Coupling Coefficients of Transport Equations of Two-Phase Flow in Porous Media", *Transport in Porous Media*, **15**, 1994, 71-79.
66. McKellar, M. y Wardlaw, N.C., "A method of making two-dimensional glass micromodels of pore systems", *J. Can. Pet. Tech.*, julio-agosto 1982, 39-41.
67. Mahers, E.G., Wright, R.J. y Dawe, R.A., "Visualization of the behavior of EOR Reagents in Displacements in Porous Media", *European Symposium on Enhanced Oil Recovery*, Bournemouth, U.K., Elsevier, Ed. F.J. Fayers, 1981, 511-526.
68. Mahers, E.G. y Dawe, R.A., "Visualization of Microscopic Displacement Processes within Porous Media in EOR Capillary Pressure Effects", 49-58.
69. Mattax, C.C. y Kyte, J.R., "Ever see a water flood?", *Oil and Gas J.*, **59**, octubre 16, 1961, 115-128.
70. Mattax, C.C. y Kyte, J.R., "Imbibition Oil Recovery from Fractured, Water-Drive Reservoir", *Soc. Petroleum Eng. J.*, Junio 1962, 177-184.
71. Mayer, R.P. y Stowe, R.A., "Mercury Porosimetry-Breakthrough Pressure for Penetration between Packed Spheres", *J. Colloid Interface Sci.*, **20**, 1965, 893-911.
72. Mohanty, K.K., Davis, H.T. y Scriven, L.E., "Thin Fluid Films at Rest on Simply Shaped Solids", Paper No. 112<sup>a</sup>, *AIChE Annual Meeting*, San Francisco, Ca, USA, 25-29 noviembre, 1979.
73. Mohanty, K.K., Davis, H.T. y Scriven, L.E., "Thin-Films and Fluid Distributions in Porous Media", *Proc. 3<sup>rd</sup> International Conference on Surface and Colloid Science*, Stockholm, Suiza, 20-25 agosto, 1979.
74. Mohanty, K.K., Davis, H.T. y Scriven L.E., "Physics of Oil Entrapment in Water-Wet Rock", *Proc. 55<sup>th</sup> Annual Technical Conference and Exhibition*, SPE No. 9406, Dallas, TX, USA, 21-24 septiembre, 1980, 1-16.

75. Moore, T.F. y Slobod, R.L., "The Effect of Viscosity and Capillary on the Displacement of Oil by Water", *Producers Monthly*, Agosto, 1956, 20-30.
76. Mumley, T.E., Radke, C.J. y Williams, M.C., "Kinetics Liquid/Liquid Capillary Rise. I. Experimental Observations", *J. Colloid Interface Sci.*, **109**(2), 1986, 398-412.
77. Mumley, T.E., Radke, C.J. y Williams, M.C., "Kinetics Liquid/Liquid Capillary Rise. II. Development and Test of Theory", *J. Colloid Interface Sci.*, **109**(2), 1986, 413-425.
78. Newman, S., *J. Colloid Interface Sci.*, **26**, 1968, 209. Cita extraída del artículo de Joos et al.
79. Ngan, C.G. y Dusan, V., "On the Nature of the Dynamic Contact Angle: An Experimental Study", *J. Fluid Mechanics*, **118**, 1982, 27-40.
80. Osoba, J. S., Richardson, J. G., Kerver, J. K., Hafford, J. A. y Blair, P. M., "Laboratory Measurements of Relative Permeability", *Petroleum Transactions AIME*, **192**, 1951, 47-56.
81. Park, C.W. y Homsy, G.M., "The Instability of long Fingers in Hele-Shaw Flows", *Phys. Fluids*, **28**(6), Junio 1985, 1583-1585.
82. Park, C.W. y Homsy, G.M., "The Instability of Long Fingers in Hele-Shaw Flows", *Phys. Fluids*, **28** (6), Junio 1985, 1583-1585.
83. Peden, J.M. y Husain, M.I., "Visual Studies in Reservoir Engineering: The Development of a Novel Technique for the Preparation of Real Pore Space Structure Glass Micromodels and their Application in Displacement Experiments under Simulated Reservoir Conditions", *Proc. 3<sup>rd</sup> European Meeting on Improved Oil Recovery*, Roma, Italia, 16-18 abril, 1985, 37-48.
84. Peden, J.M. y Husain, M.I., "Visual Investigation of Multiphase Flow and Phase Interactions within Porous Media", *Proc. 60<sup>th</sup> Annual Technical Conference and Exhibition*, Las Vegas, NV, USA, 22-25 septiembre, 1985, 1-12.
85. Perkins, T.K. y Johnston, O.C., "A Study of Immiscible Fingering in Linear Models", *Soc. of Petroleum Eng. J.*, Marzo 1969, 39-46.
86. Paterson, L., Radial Fingering in a Hele-Shaw Cell, *J. Fluid Mechanics*, **113**, 1981, 513-529.
87. Paterson, L., "Fingering with Miscible Fluids in a Hele-Shaw Cell", *Phys. Fluids*, **28**(1), enero 1985, 26-30.
88. Ramé, E. y Garoff, S., "Microscopic and Macroscopic Dynamic Interface Shapes and the Interpretation of Dynamic Contact Angles", *J. Colloid Interface Sci.*, **177**, 1996, 234-244.
89. Ramírez Garnica, M.A., "*Estudio Experimental de la Imbibición Espontánea en Medios Capilares*", Tesis de maestría, ESIQIE, IPN, diciembre de 1998.
90. Reis, J.C. y Cil, S.A., "Analytical Models for Capillary Imbibition: One-Dimensional Matrix Blocks", *IN SITU*, **23**(3), 1999, 265-270.

91. Reis, J.C. y Haq, S.A., "Water Advance in a Single Fracture in the Presence of Capillary Imbibition into Adjacent Matrix Blocks", *IN SITU*, **23**(3), 1999, 271-293.
92. Richardson, J.G., Kerver, J.K., Hafford, J.A. y Osoba, J.S., 1952, "Laboratory Determination of Relative Permeability", *Petroleum Transactions AIME*, **195**, 1952, 187-196.
93. Rodríguez de la Garza, F., "Modelo Analítico del Desplazamiento Lineal de Aceite por Inyección de Agua en Yacimientos Fracturados", *Ingeniería Petrolera*, junio 1988, 20-27.
94. Roof, J.G., "Snap-off of Oil Droplets in Water-Wet Pores", *Soc. Petroleum Eng. J.*, marzo 1970, 85-90.
95. Rose, W. y Scott, P.H., "An Explanation of the Yuster Effect", *JPT*, 1953, 19-20.
96. Rose, W., "Fluid Flow in Petroleum Reservoirs. III. Effect of Fluid-Fluid Interfacial Boundary Condition", *Illinois State Geological Survey*, Circular 291, 1960, 1-18.
97. Rose, W., "Petroleum Reservoir Engineering at the Crossroads (Ways of thinking and doing)", *The Iranian Petroleum Institute*, Bulletin No. 46, 1972, 23-27.
98. Rose, W., "Measuring Transport Coefficients Necessary for the Description of Coupled Two-Phase Flow of Immiscible Fluids in Porous Media", *Transport in Porous Media*, **3**, 1988, 163-171.
99. Rose, W., "Data Interpretation Problems to be Expected in the Study of Coupled Fluid Flow in Porous Media", *Transport in Porous Media*, **4**, 1989, 185-198.
100. Rose, W., "Myths about Later-Day Extensions of Darcy's Law", *J. Petroleum Sci. and Eng.*, **26**, 2000, 187-198.
101. Russell, T.W.F. y Charles, M.E., "The Effect of the Less Viscous Liquid in the Laminar Flow of Two Immiscible Liquids", *The Canadian J. Chem. Eng.*, febrero 1959, 18-24.
102. 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.
103. Slobod, R.L. y Claude, B.H., "X-Ray Shadowgraph Studies of Areal Sweepout Efficiencies", *Petroleum Transaction AIME*, T.P. 3440, **195**, 1952, 265-270.
104. Szekely, J., Neumann, A.W. y Chuang, Y.K., "The Rate of Capillary Penetration and the Applicability of the Washburn Equation", *J. Colloid Interface Sci.*, **35**(2), febrero 1971, 273-278.
105. Smith, W.O., *Physics*, **3**, 1932, 139-146. Cita extraída del artículo de Leverett, 1941.
106. Smith, W.O., *Physics*, **4**, 1933a, 184-193. Cita extraída del artículo de Leverett, 1941.

107. Smith, W.O., *Physics*, **4**, 1933b, 425-438. Cita extraída del artículo de Leverett, 1941.
108. Templeton, C.C., A "Study of Displacements in Microscopic Capillaries", *Petroleum Transactions AIME*, T.P. 3804, **201**, 1954 162-168.
109. Templeton, C.C. y Rushing, S.S., "Oil-Water Displacements in Microscopic Capillaries", *Petroleum Transactions AIME*, T.P. 4340, **213**, 1956 211-214.
110. van Meurs, P., "The Use of Transparent Three-Dimensional Models for Studying the Mechanism of Flow Processes in Oil Reservoirs", *Petroleum Transactions AIME*, T.P. 4634, **210**, 1957, 295-301.
111. Washburn, E.W., "The Dynamics of Capillary Flow", *Physical Review*, **27**(3), 1921, 273-283.
112. Whitaker, S., "Flow in Porous Media II: The Governing Equations for Immiscible Two-Phase Flow", *Transport in Porous Media*, **1**, 1986, 105-125.
113. Whitaker, S., "The Closure Problem for Two-Phase Flow in Homogeneous Porous Media", *Chemical Engineering Sci.*, **49**(5), 1994, 765-780.
114. Young, T., "*Miscellaneous Works*", G. Peacock, ed. J. Murray, London, 1855, Vol. I, p. 418. Cita extraída del libro de Arthur W. Adamson, "*Physical Chemistry of Surfaces*", 3ª Ed. John Wiley & sons, 1976.
115. Yuster, S.T., "Theoretical Considerations of multiphase Flow in Idealized Capillary Systems", *Proc. Third World Petroleum Congress*, La Haya, v. II, 1951, 437-445.
116. Zeybeck, M, Gurakin, G., Donmez, A. y Onur, M., "Effects of Capillary Heterogeneities on Spontaneous Imbibition", SPE No. 30778, *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Dallas, TX, USA, 22-25 octubre 1995, 779-793. 1982.
117. Zarcone, C. y Lenormand, R., "Détermination Expérimentale du Couplage Visqueux dans les Écoulements Diphasiques en Milieu Poreux", *Compte Rendus Acad. Sci. Paris*, **318**, Série II, 1994, 1429-1435.
118. Zhang, X., Morrow, N.R. y Ma, S., "Experimental Verification of a Modified Scaling Group for Spontaneous Imbibition", *Soc. Petroleum Eng. Reservoir Engineering*, noviembre 1996, 280-285.