

NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE PETROLEO

EFECTO DE UN SURFACTANTE SOLUBLE EN ACEITE EN LA RECUPERACION
SECUNDARIA POR INYECCION DE AGUA

TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE
INGENIERO DE PETROLEO

POR

ALBERTO NORIEGA SALINAS

LIMA - PERU

1 9 6 3

A G R A D E C I M I E N T O

EL AUTOR DESEA EXPRESAR SU AGRADECIMIENTO A LOS SEÑORES PROFESORES DE LA ESCUELA DE PETROLEO DE LA UNIVERSIDAD DE OKLAHOMA POR SU AYUDA Y DIRECCION TECNICA.

A LOS SEÑORES CATEDRATICOS DE LA FACULTAD DE PETROLEO DE LA UNIVERSIDAD DE INGENIERIA POR LOS CONOCIMIENTOS ADQUIRIDOS DURANTE LOS CINCO AÑOS DE ESTUDIO.

A LAS SEÑORAS DEL "WOMEN AUXILIARY TO THE AIME" POR LA AYUDA ECONOMICA DURANTE LOS CUATRO ULTIMOS AÑOS DE ESTUDIO Y ESPECIALMENTE A MRS. MINA BURGESS POR LA OBTENCION DE DICHA BECA Y A SU EXTENSION A LOS EE.UU.

A LA INTERNACIONAL PETROLEUM CO. LIMA, PERU POR LA BECA DE POST GRUADO QUE HA SIDO DE GRAN AYUDA EN LA REALIZACION DE ESTE TRABAJO.

S U M A R I O

LISTA	TABLAS	V
LISTA DE ILUSTRACIONES Y GRAFICOS		
RESUMEN		VII
CAPITULO		
I	INTRODUCCION	1
II	OBJETO	3
III	FUNDAMENTO TEORICO	4
IV	EQUIPO EXPERIMENTAL	8
V	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	
VI	SUMARIO DE RESULTADOS	23
VII	DISCUSION DE RESULTADOS	
VIII	CONCLUSIONES	
APENDICE		
I	EJEMPLO DE LOS CALCULOS	68
II	GRAFICOS AUXILIARES	73
BIBLIOGRAFIA		76

LISTA DE TABLAS

TABLA		PAGINA
1.-	PROPIEDADES DE LA MUESTRA Y DE LOS FLUIDOS USADOS.	24
2.-	TENSIONES SUPERFICIALES E INTERFACIALES	25
3.-	PERMEABILIDAD DE LA MUESTRA	26
4.-	RESULTADOS DE LA PRUEBA No.1	27
5.-	RESULTADOS DE LA PRUEBA No.2	28
6.-	RESULTADOS DE LA PRUEBA No.3	29
7.-	RESULTADOS DE LA PRUEBA No.4	30
8.-	RESULTADOS DE LA PRUEBA No.5	31
9.-	RESULTADOS DE LA PRUEBA No.6	32
10.-	RESULTADOS DE LA PRUEBA No.7	33
11.-	RESULTADOS DE LA PRUEBA No.8	34
12.-	RESULTADOS DE LA PRUEBA No.9	35
13.-	RESULTADOS DE LA PRUEBA No.10	36
14.-	RESULTADOS DE LA PRUEBA No.11	37
15.-	RESULTADOS DE LA PRUEBA No.12	38

LISTA ILUSTRACIONES

FIGURA		PAGINA
1.-	DIAGRAMA DE FUERZAS INTERFACIALES EN EL CONTACTO AGUA-ACEITE-SOLIDO.	5
2.-	LIMPIEZA DE LA MUESTRA	13
3.-	SATURACION DE LA MUESTRA CON AGUA	15
4.-	SATURACION DE LA MUESTRA CON ACEITE	17
5.-	INVASION DE LA MUESTRA	19
6.-	PERMEABILIDAD RELATIVA AGUA-ACEITE EN CONDICIONES DE FLUJO UNIFORME.	41
7.-	CURVAS DE PRESION CAPILAR AGUA-AIRE Y ACEITE-AGUA	40
8.-	RECUPERACION DE ACEITE VS TIEMPO. CONCENTRACION DE SURFACTANTE 1%.	42
9.-	RECUPERACION DE ACEITE VS TIEMPO. CONCENTRACION DE SURFACTANTE 5%.	43
10.-	RECUPERACION DE ACEITE VS TIEMPO. CONCENTRACION DE SURFACTANTE 10%.	44
11.-	TENSION INTERFACIAL VS ACEITE PRODUCIDO ACUMULADO	45
12.-	TENSION INTERFACIAL VS ACEITE PRODUCIDO ACUMULADO	46
13.-	TENSION INTERFACIAL VS ACEITE PRODUCIDO ACUMULADO	47
14.-	TENSION INTERFACIAL VS ACEITE PRODUCIDO ACUMULADO	48
15.-	RECUPERACION DE ACEITE VS VOLUMEN DEL COJIN DE SURFACTANTE.	49
16.-	PRESION DE ENTRADA VS TIEMPO	50
17.-	SATURACION INICIAL VS SATURACION FINAL DE ACEITE	51
18A.-	MECANISMO PROPUESTO PARA LA INYECCION DE AGUA	52
18B.-	MECANISMO PROPUESTO PARA LA INYECCION DE AGUA CON COJIN DE SURFACTANTE.	53
19.-	GRAFICO DE CALIBRACION PARA LA BOMBA ZENITH USANDO UN REDUCTOR DE VELOCIDAD ZERO MAX.	72
20.-	TENSIONES SUPERFICIALES E INTERFACIALES (AGUA-ACEITE) VS. CONCENTRACIONES DE SURFACTANTE EN ACEITE.	74
21.-	75

R E S U M E N

AUNQUE SE HA HECHO GRAN CANTIDAD DE TRABAJOS ACERCA DE RECUPERACION SECUNDARIA POR INYECCION DE AGUA, USANDO AGENTES REDUCTORES DE LA TENSION INTERFACIAL NO HAY LITERATURA SOBRE INVESTIGACIONES HECHAS CON SURFACTANTES SOLUBLES EN ACEITE.

EN ESTA INVESTIGACION SE HA USADO UNA MUESTRA REDONDA DE ARENA CONSOLIDADA. EL AGUA USADA CONTENIA 25,000 PPM DE SAL Y EL ACEITE FUE UNA MEZCLA DE HIDROCARBUROS LLAMADA SOLTROL-C. EL SURFACTANTE SOLUBLE EN ACEITE USADO, ERA UNA MEZCLA DE AGENTES REDUCTORES DE TENSION SUPERFICIAL LLAMADA "CONTROL FLOW".

EL APARATO USADO PARA INVADIR LA MUESTRA SE COMPONIA DE DOS TANQUES DE LUCITA, TUBERIA DE COBRE Y VALVULAS. EL EQUIPO DE BOMBEO USADO CONSISTIA EN UNA BOMBA ZENITH DE ENGRANAJES.

LA MUESTRA FUE INICIALMENTE SATURADA AL 100% CON AGUA SALADA LA CUAL FUE MAS TARDE DESPLAZADA POR SOLTROL HASTA QUE SE OBTUVO LA SATURACION MINIMA DE AGUA. EL AGUA DE INYECCION FUE FORZADA DENTRO DE LA MUESTRA A REGIMEN CONSTANTE.

EL COJIN DE ACEITE CON EL SURFACTANTE DISUELTO SE INYECTO DELANTE DEL AGUA DESPLAZANTE. LAS PRESIONES Y EL TIEMPO SE REGISTRARON CADA 5 cc DE PRODUCCION TOTAL.

LA MUESTRA FUE LAVADA DESPUES DE CADA EXPERIMENTO USANDO PENTANO Y AIRE SECO. SE USARON DIFERENTES VOLUMES DE ACEITE CON DIFERENTES CONCENTRACIONES DE SURFACTANTE COMO COJINES DELANTE DEL AGUA PARA DETERMINAR SU EFECTO EN LA RECUPERACION DE ACEITE.

SE ENCONTRO QUE LA RECUPERACION DE ACEITE FUE INVERSAMENTE PROPORCIONAL AL VOLUMEN DEL COJIN Y A LA CONCENTRACION DE SURFACTANTE USADO. NO SE PRODUJO AGUA DE FORMACION DELANTE DEL COJIN Y SE OBSERVO QUE LA PRESION DE ENTRADA AUMENTABA DE ACUERDO AL AVANCE DEL FRENTE DE AGUA EN LA MUESTRA.

NO SE OBTUVO ACEITE ADICIONAL MEDIANTE EL USO DE UN SURFACTANTE SOLUBLE EN ACEITE EN ESTA MUESTRA PREVIAMENTE MOJADA. SE ASUME QUE EL COJIN HAYA SIDO PARCIAL O TOTALMENTE SOBREPASADO POR EL AGUA DE DESPLAZAMIENTO.

EFECTO DE UN SURFACTANTE SOLUBLE EN ACEITE EN LA RECUPERACION SECUNDARIA POR INYECCION DE AGUA

CAPITULO I

I N T R O D U C C I O N

El desplazamiento del aceite por inyección de agua es bastante incompleto, debido a las fuerzas naturales que actúan para retener el aceite en la roca reservorio. Posiblemente las fuerzas más importantes son las capilares, que pueden ser relativamente grandes comparadas a las generadas por el agua inyectada. Las fuerzas capilares expresan la acción molecular entre las tres fases: sólido, líquido y gas en un reservorio. Estas fuerzas están íntimamente relacionadas a la tensión superficial, tensión interfacial, mojabilidad y a la cantidad de área superficial involucrada.

Para reducir las fuerzas capilares y facilitar la liberación del aceite, algunos de los primeros investigadores usaron surfactantes como una primera solución al problema. Los surfactantes disminuyen la tensión interfacial entre el agua y el aceite. Para ser efectivo este surfactante debe ponerse en íntimo contacto con los fluidos del reservorio. En el pasado, el vehículo más comúnmente usado para transportar el agente fué el agua de inyección usada para las operaciones de recuperación secundaria.

No hay una opinión definida sobre el mecanismo de la liberación del aceite por surfactantes ni sobre la efectividad de los detergentes en la inyección de agua. Se ha probado experimentalmente que la mayoría de los surfactantes fueron fuertemente adsorbidos sobre la superficie de los sólidos en el reservorio. Por

consiguiente el aditivo se perdía después de haber cubierto solo una pequeña área de la formación que contenía el aceite adicional por recuperarse.

Los experimentos también indicaron que si se usaban pequeñas concentraciones de surfactantes, el régimen de avance del frente de detergente sería solamente una pequeña fracción del régimen de avance del frente de invasión. Algunos investigadores, Dunning⁶ y Ojeda¹², encontraron que si se usaban concentraciones mayores el régimen de avance del frente del aditivo, sería una fracción mayor del régimen de avance del frente de invasión. El costo del surfactante impide el uso de concentraciones excesivamente altas para inyección continua, porque excedería el valor del aceite adicional recuperado. Preston y Calhoun⁵ fueron los primeros en indicar que no es necesario tratar toda el agua para la inyección con el detergente, desde que los principios básicos de la cromatografía se podrían aplicar al sistema. Sugirieron que el detergente podría ser inyectado durante cierto tiempo y luego ser desplazado dentro de la formación mediante agua no tratada.

Johnson¹⁰ concluyó que un proceso cromatográfico debería ser económicamente posible si el límite superior para la concentración de surfactante se fija a 0.1%. Taber¹⁵ demostró que mayores concentraciones (hasta de 10%) podrían ser usadas más eficientemente.

Todos los hechos y anotaciones presentadas anteriormente se refieren a surfactantes solubles en agua. El propósito de esta investigación es presentar y discutir los resultados de una inyección de agua usando diferentes tamaños de "COJINES" de aceite con concentraciones variables de surfactantes solubles en aceite. Se trata también de evaluar su utilidad para aumentar la recuperación de aceite.

CAPITULO II

O B J E T O

El propósito de esta investigación consistía en descubrir si se podría aumentar la eficiencia de la recuperación de aceite en la inyección de agua, inyectando en el reservorio un cojin de aceite con alta concentración de surfactantes delante del frente de agua y tratar de explicar el mecanismo involucrado en el desplazamiento.

Se usaron cojines de aceite con varias concentraciones de surfactante, para tratar de determinar si existía alguna relación entre la cantidad de detergente usada, la eficiencia en la recuperación de aceite de adsorción del surfactante por la superficie de la arena. Se escogieron tres diferentes tamaños de cojines para observar su efecto en la recuperación.

Para impedir el hinchamiento de las gredas en la muestra (core), la fase acuosa fué agua salada. Para reducir el número de variables complicatorias, se procuro que la muestra estuviese en todo momento completamente saturada con líquido.

CAPITULO III

FUNDAMENTO TEORICO

Aunque se han hecho bastantes estudios sobre inyección de agua usando agentes reductores de tensión superficial no existe literatura informando sobre ninguna investigación hecha con un surfactante soluble en aceite.

El primer intento, anotado, de usar un detergente fué en 1927. Desde entonces solo se han hecho unas cuantas inyecciones de agua usando un surfactante disuelto en el agua en pequeñas concentraciones.

El movimiento y distribución de los fluidos en un medio poroso estan gobernados por tales factores como: tensiones superficiales e interfaciales, viscosidad del aceite, tamaño de los poros, configuración y propiedades mojantes del medio. El conocimiento del rol de cada uno de estos factores parece ser muy limitado.

De acuerdo a Kennedy y Guerrero⁸, en un sistema mojado por agua el aceite se supone que está distribuido en gotitas. Si se restringe su movimiento solamente a pasar por la abertura de los poros, y si se desprecian las fuerzas capilares y las fuerzas que resultan de la afinidad de la superficie de roca al aceite, así también como los efectos de la viscosidad se puede aplicar la siguiente ecuación:

$$\Delta P = 2\gamma \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (1)$$

En esta ecuación: ΔP es la caída de presión necesaria para forzar la gotita de aceite a travez de un orificio (poro) γ es la tensión interfacial aceite-agua. r_1 es el radio de curvatura en el lado mas

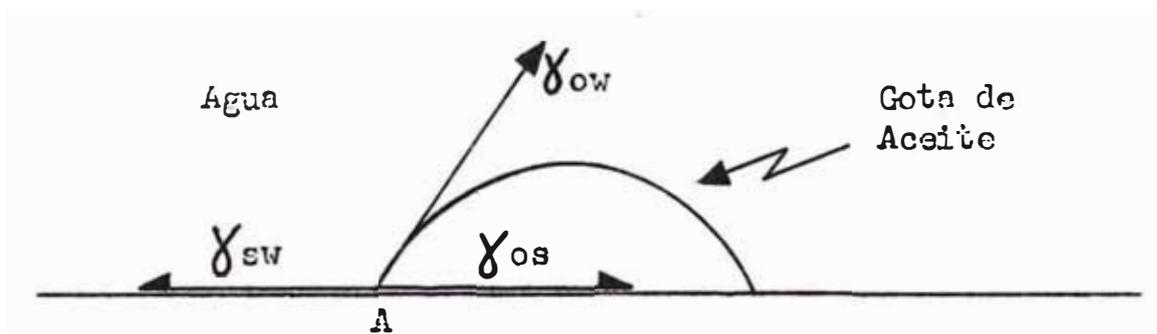


Diagrama de fuerza interfaciales en el contacto agua -
aceite-sólido según Kennedy y Guerrero⁸.

Figura 1

y hacia adelante de la gotita formada y V_2 es el radio mas grande. Esta ecuación muestra que si se reduce la tensión interfacial se necesitará una menor caída de presión para desplazar la gotita.

Ahora si se considera el desprendimiento del aceite de la superficie de la arena, asumiendo que la gotita de aceite es mas pequeña que la abertura del poro y tomando en cuenta la afinidad entre la arena y el aceite, se puede derivar una relación entre las fuerzas involucradas. Del diagrama de fuerzas mostrado en la figura 1, obtenemos:

$$\gamma_{ws} = \gamma_{os} + (\gamma_{ow}) \cos\theta \quad (2)$$

donde:

γ tensión interfacial

w	agua
s	sólido
o	aceite
θ	ángulo de contacto

Esta ecuación se puede aplicar desde que solamente estén presentes en la muestra tres fases: sólido, agua y aceite. Las interfases presentes serán: aceite-sólido, agua-sólido y agua-aceite. El contacto entre las tres fases es una línea y esta representado por el punto A en el diagrama.

La única tensión interfacial que se puede medir es aquella entre el agua y el aceite. Fero, el trabajo de adhesión entre aceite y sólido puede calcularse por medio de la ecuación de Dupre:

$$W_{os} = \gamma_{ow} + \gamma_{ws} - \gamma_{os} \quad (3)$$

donde:

W_{os} es el trabajo de adhesión entre la arena y el aceite. Esto se define como el trabajo necesario para separar por endicularmente, en contra de las fuerzas adhesivas entre ellos, el líquido

Combinando las ecuaciones (2) y (3), se puede desarrollar una expresión para el trabajo de adhesión en función de la tensión interfacial entre el aceite y el agua.

$$W_{os} = \gamma_{ow} (1 + \cos\theta) \quad (4)$$

Esta ecuación indica que si la tensión interfacial entre el agua y el aceite se reduce, el aceite será mas fácilmente despegado de la superficie de la arena. Se puede notar también que si se reduce el ángulo de contacto del aceite, el valor de $(1 + \cos\theta)$ será mayor y tiende a compensar la reducción en la tensión interfacial.

Si el ángulo aumenta porque el aceite se ha hecho no mojan- te o el agua se hizo mas mojante, el coseno del ángulo tenderá a cero. Una reducción en la tensión interfacial, causará una reduc- ción en el trabajo de adhesión del aceite al sólido.

Si el ángulo de contacto no se altera debido al efecto del surfactante, la reducción en la tensión interfacial aceite-agua reducirá el trabajo de adhesión.

CAPITULO IV

EQUIPO EXPERIMENTAL

La Muestra (Core)

En éste experimento se usó una muestra larga de arena consolidada fué tomada de un afloramiento de la arenisca "Torpedo" y cortada paralela al plano de estratificación. La muestra fué montada en lucita con pequeños espacios vacios a la entrada y salida para que sirvieran como cámaras de colección. En cada extremo de la muestra se colocó una válvula hoke de 1/8" para permitir la entrada y salida de los fluidos del medio poroso. La muestra fué donada a Bill R. Hise⁹ por el Pan American Petroleum Corporation Research Center en Tulsa, Oklahoma.

La muestra medía 35.8 cm. de largo y 18.5 cm. cuadrados de área de la sección transversal. Su permeabilidad al líquido era 490 MD. y su porosidad 26.9 por ciento. En la Tabla 1 se ha hecho un resumen de las propiedades físicas de la muestra. Las curvas de permeabilidad relativa y presión capilar para la arenisca torpedo, similar a la de la muestra usada en esta prueba se incluyen en las Figuras 6 y 7.

Los fluidos

Se usó agua salada (25,000 PPM) como fluido desplazante y como agua residual. Se preparó usando una solución saturada de sal de roca, agua destilada y formaldehido. La solución saturada se preparó añadiendo agua destilada a la sal de roca, agitando por una hora y dejándola sedimentar durante una semana. Se mezcló entonces, con agua destilada en proporción de 1: 3.25. Se añadió formaldehido a la mezcla para matar bacterias prevenir corrosión.

tó la mezcla obtenida y se dejó decantar por cuarentiocho horas, se filtró entonces usando un filtro de porcelana al vacío y se le embotelló para uso futuro.

La composición del agua * era 25,000 PPM de sal y 50 PPM de formaldehído. El contenido de sal fué medido por titración. La densidad del agua era 1.05 gms/cc. y su viscosidad fué 0.86 cp. ambas propiedades fueron medidas a 88°F.

El aceite usado en el experimento, como aceite de formación y como vehículo para el surfactante, fué una fracción destilada de hidrocarburos $C_{10} - C_{12}$ vendida por la Phillips Petroleum Company bajo el nombre de Soltrol-C. El aceite tenía una viscosidad de 1.19 cp. y una densidad de 0.75 GM/CC a 88°F ó 54.5°API a 60°F.

La relación de viscosidad aceite-agua era 1.38 a 88°F.

El fluido usado para desplazar el agua por medio de una bomba de engranajes fué un aceite de transmisión grado 90 SAE vendido por la Phillips Petroleum Company.

Los fluidos usados para lavar la muestra después de cada prueba fueron pentano normal o hexano normal y aire seco.

Se usó dióxido de carbono (CO_2) para saturar la muestra antes de saturarla con agua.

Surfactante

El detergente usado es un producto de Mud Control Laboratories Inc. es vendido bajo el nombre de Control-Flow. Como es un producto relativamente nuevo su composición no se conoce con exactitud y solo se sabe que es una complicada mezcla de surfactantes.

* se denominará agua en este trabajo de agua salada 25,000 PPM.

Control-Flow es un líquido marrón y espeso soluble en cualquier proporción en la mayoría de los hidrocarburos. Reduce la tensión interfacial agua-aceite a cero, cuando la concentración es mayor de 1% pero tiene muy pequeño efecto sobre la tensión superficial del aceite.

Equipo

El equipo experimental usado se muestra en las Figuras 2, 3, 4 y 5 como diagramas de flujo simplificados.

El equipo de bombeo estaba compuesta de una bomba de engranajes Zenith de tamaño 1/2 la cual estaba accionada por un motor General Electric de 1/4 HP. Se usó un reductor de velocidad Zero - Max, modelo 142 X, para reducir las 1725 RPM del motor a un valor ajustable, estaba conectado a la bomba por medio de un eje. Una curva de calibración para esta bomba se muestra en la Figura 19. Para impedir resbalamiento solamente aceite de transmisión grado 90 SAE fué empleado en la bomba. Un tanque de desplazamiento fué necesario para mover todos los fluidos dentro de la muestra. En éste tanque el aceite de transmisión, que se inyectaba por la parte superior, estaba en contacto con el agua. La salida para el agua estaba al fondo. El tanque era un tubo de lucita de 2" ID con bridas y válvulas en los extremos.

El tanque del aceite era también un tubo de lucita de 2" ID con bridas y válvulas en cada extremo. La capacidad de este reservorio era de 1,500 cc. La entrada del agua estaba en el fondo del tanque y la salida del aceite en el tope. El aceite era desplazado directamente dentro de la muestra.

El reservorio del aceite de transmisión era una botella de un galón y este líquido no recibió ningún tratamiento especial.

Tubos de cobre de 1/4" con uniones tipo "Flare" formaban las líneas para el sistema de entrada. Las conexiones de despla-

an hechas con tubos de polietileno de 1/4" también con nes tipo "Flare". El tamaño de todas las válvulas usadas fué 1/4". Solamente fué necesario un manómetro para medir la presión de entrada a la muestra y su rango fué 0 A 30 PSI. Fué calibrado antes de usarlo con el probador de peso muerto.

A la salida del tanque de agua se conectó un filtro de arena consolidada para extraer del agua cualquier sólido suspendido que pudiera taponear la muestra. Era un core pequeño montado en lucita y con conecciones de bronce en los extremos.

En el tope del tanque de aceite instaló un filtro hecho de lana de vidrio para extraer cualquier sólido suspendido en el aceite antes de ser inyectado en la muestra. Este filtro se cambiaba después de cada experimento. El filtro del agua se limpiaba después de cada prueba por reflujo de pentano y secándolo con aire seco.

El equipo para la limpieza de la muestra tenía un regulador de presión de aire y un deshidratador de cloruro de calcio. El pentano era introducido dentro de la muestra mediante presión de aire seco usando un tubo de cobre de 1/4".

Las conecciones de entrada tenían una línea conectada a una botella de CO₂. Todos los fluidos gases y líquidos se inyectaban dentro de la muestra usando el mismo sistema de tuberías de entrada.

La salida de la muestra estaba a la presión atmosférica y el efluente se recibía en buretas calibradas de 10 ml. para obtener volúmenes precisos.

El instrumento utilizado para medir el tiempo en cada prueba fué un cronómetro de gran precisión.

CAPITULO V

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se realizaron cuatro operaciones fundamentales para cada prueba a saber:

Limpieza

Saturación con agua

Saturación con aceite

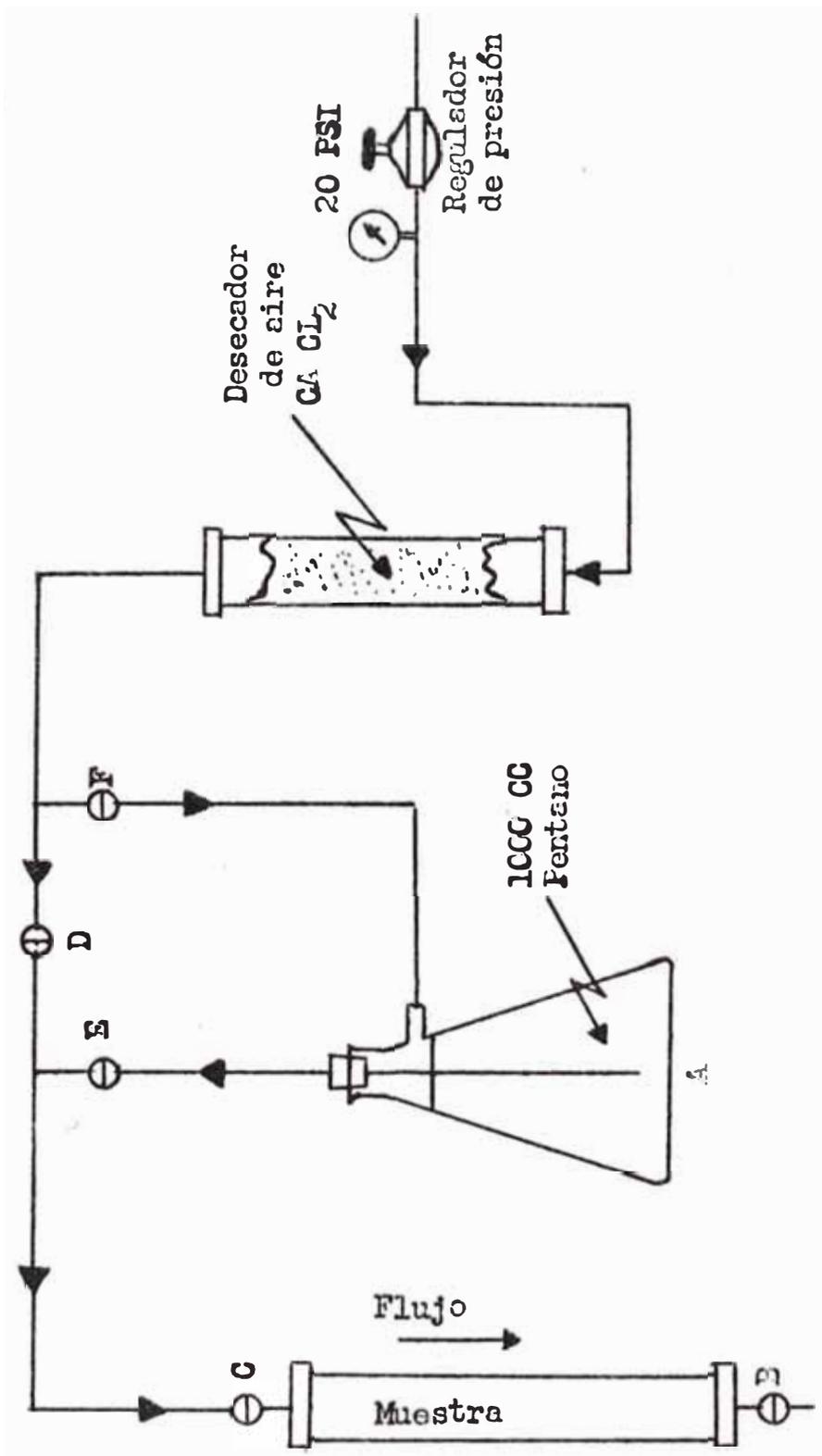
Operaciones de invasión

Algunas otras medidas especiales que se tomaron, serán también explicadas en las páginas siguientes:

La muestra requería un lavado después de cada prueba, desde que la misma muestra fué usada para todas las pruebas. El procedimiento de limpieza fué el siguiente (Ver figura 2).

El recipiente A se llenó con 1000 CC de pentano. El regulador de presión de aire se abrió hasta 20 PSI. Se permitió al aire fluir a través de la muestra durante tres horas para extraer los fluidos almacenados allí después de la prueba de invasión. La muestra se instaló en posición vertical y se inyectó el aire por el tope para asegurar una mayor eficiencia de desplazamiento.

Se abrieron las válvulas B, C y D, y se cerraron las válvulas E y F. Después de las tres horas, se cerró la válvula D, se abrieron las válvulas E y F y se permitió al pentano fluir a través de la muestra. Para extraer el pentano de la muestra se le inyectó aire seco durante veinticuatro horas. Para complementar la acción del aire, se conectó una bomba de vacío a la salida de la muestra durante dos horas. A continuación se tomó el peso de la muestra y se calculó la saturación residual de agua, que resultó ser 21%.



Limpieza de la Muestra

Figura 2

Esta fué considerada como la saturación irreductible de agua que debería alcanzarse al limpiar el core después de cada prueba.

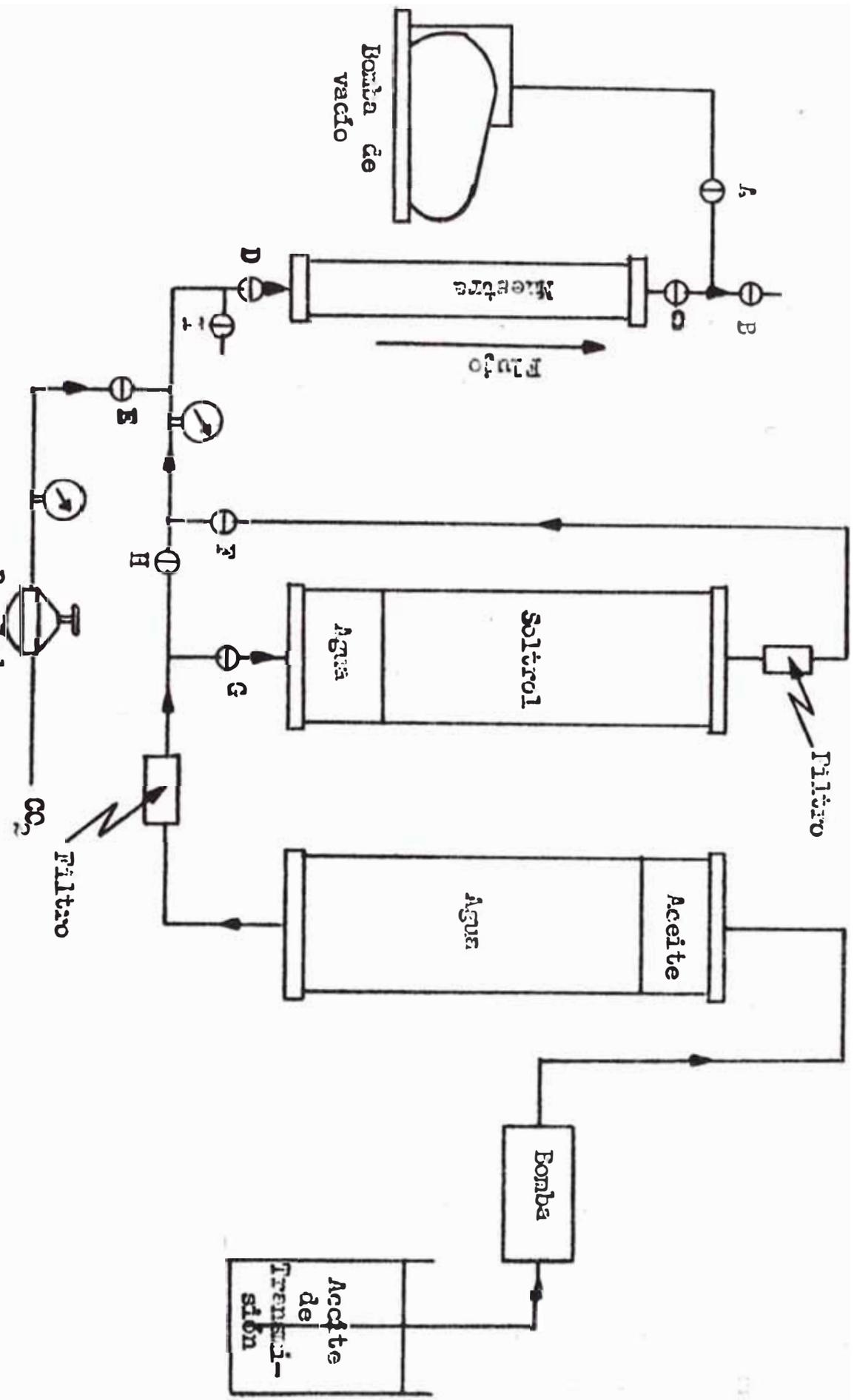
El peso seco de la muestra se encontró siguiendo el mismo procedimiento presentado anteriormente pero permitiendo al aire seco fluir constantemente a través de la muestra durante 14 días en vez de veinticuatro horas. Después de este tiempo el peso de la muestra permaneció constante e igual a 2104.8 GMS.

El peso del core correspondiente a la saturación irreductible de agua fué de 2143.6 GMS.

Saturación con Agua.-

Cuando se alcanzaba el peso irreductible de la muestra se invertía la posición de ésta como puede verse en la figura 3. Se conectaba otra vez la bomba de vacío a la salida de la muestra por una hora. Las válvulas F, H, E y B permanecían cerradas y las válvulas A, D y C, abiertas. Mientras tanto el regulador de presión del CO₂ se ajustaba a 20 P.S.I.G y se abría la válvula E. El flujo de CO₂ a través del core permitía durante cinco minutos, después de los cuales se cerraba la válvula E. La muestra se evacuaba por treinta minutos.

Nuevamente se inyectaba CO₂ y luego se evacuaba la muestra por una hora. En este momento se asumía que la muestra estaba saturada con CO₂. Se conectaba la bomba de engranajes permitiendo el flujo de agua por el sistema de entrada. Cuando todas las líneas estaban llenas de agua se cerraba la válvula I y se dejaba levantar algo de presión. Se abría la válvula D y con la bomba de vacío trabajando se permitía que el agua penetrara en la muestra del fondo hacia arriba. Cuando el agua llegaba a la cámara de salida de la muestra se cerraba la válvula A y nuevamente se levantaba algo de presión antes de abrir la válvula B. El objeto de este procedimiento era impedir la entrada de aire en la muestra.



Saturación de la muestra con agua

Figura 3

En esta posición se inyectaron 600 CC (cerca de 3 volúmenes porosos) de agua a la muestra y se consideró 100 por ciento saturada con agua. Se pesó la muestra siendo éste 2191.4 GMS.

La muestra se saturó con CO_2 antes de su saturación con agua para tenerla llena de un fluido fácilmente soluble en agua e impedir que el aire fuera atrapado en la muestra.

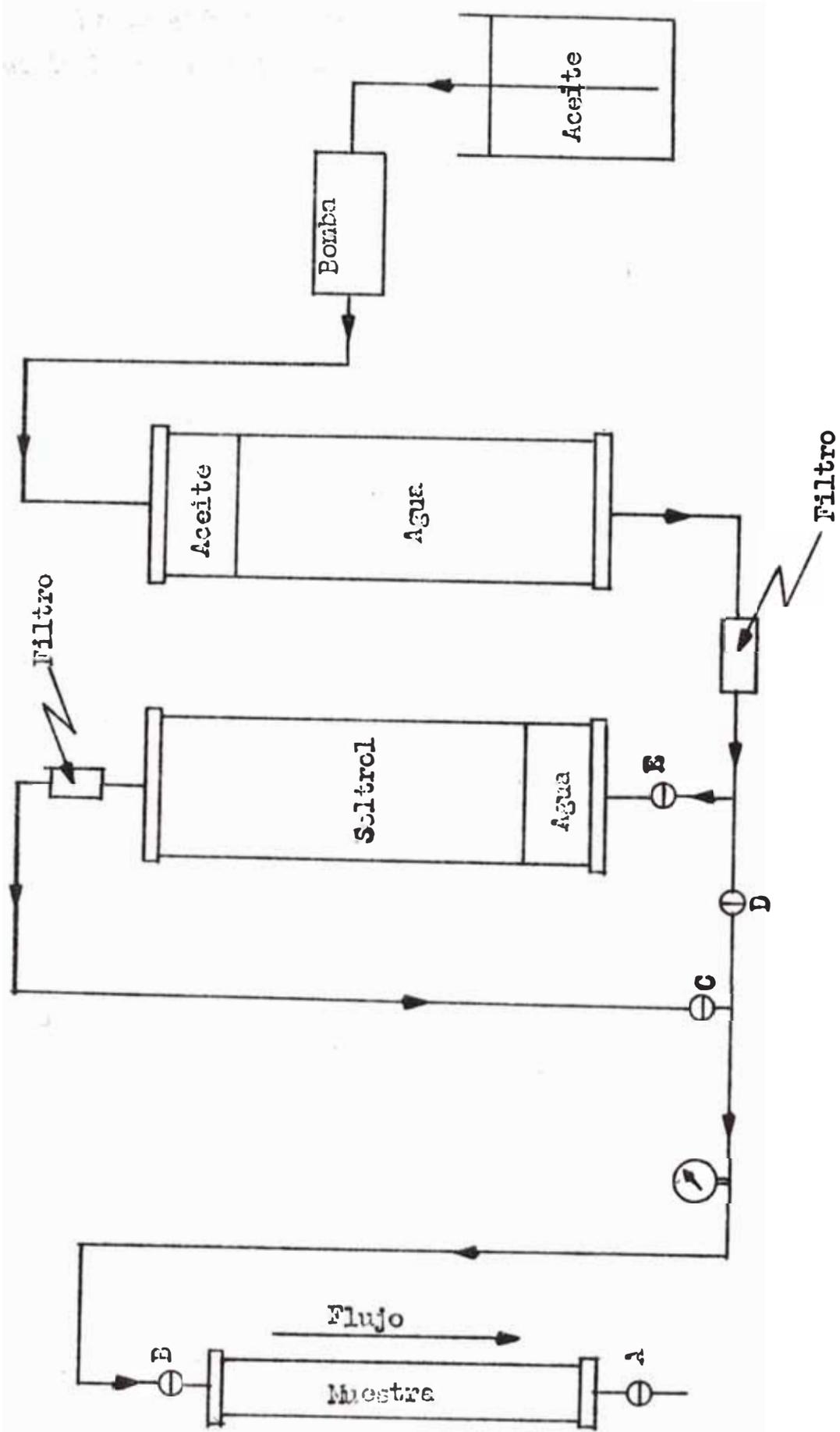
El agua con la cual se saturó el core fué empujada por el aceite de transmisión y la presión a la cual fluyó dentro de la muestra fué 10 PSI. Antes de cada prueba hizo el vacío al agua conectando una bomba de vacío al tope del reservorio. El propósito de esta evacuación fué sacar la mayor parte del aire en solución del agua.

Saturación con aceite

El instrumento usado para saturar la muestra con aceite está esquematizado en la figura 4. El aceite se inyectó por el tope de la muestra colocada verticalmente manteniendo cerrada la válvula D. El aceite fué empujado directamente dentro de la muestra mediante agua que entraba por el fondo del tanque de aceite. Fué necesario usar cerca de 500 CC. de aceite para obtener la saturación máxima de aceite dentro de la muestra. Se consideró haberla obtenido cuando no se produjo mas agua.

Para asegurarnos de la limpieza de la muestra se midió la tensión interfacial de ambos fluidos: el afluente y el efluente usando el tensiómetro Du-Nuoy y si ambas lecturas eran iguales se consideraba limpia la muestra, si eran diferentes la muestra se limpiaba otra vez usando el procedimiento descrito anteriormente.

Desde que ninguno de los fluidos usados para saturar la muestra estuvo en contacto con el aire y como todos los fluidos fueron evacuados antes de cada prueba para extraer el aire en solución, el peligro de tener aire atrapado en la muestra se redujo al mínimo.



Saturación de la muestra con aceite

Figura 4

La presión durante la saturación de aceite fué 10 PSIG medida en la línea de entrada.

Después de la saturación de aceite se pesó la muestra y se consideró lista para la inyección de agua.

Se midieron todos los fluidos que salieron de la muestra usando buretas calibradas de 10 ML. La saturación de aceite se calculó por dos métodos y el error obtenido fué \pm 1.8 por ciento. Estos dos métodos fueron:

- 1.- Usando el volumen de agua recuperado de la muestra después de la saturación de aceite.
- 2.- Usando el peso de la muestra después de la saturación de aceite.

El segundo método fué considerado ser el mas preciso.

Inyección de Agua

Después de completar la saturación de aceite, se colocó la muestra en posición horizontal y la línea de entrada se lavó y se llenó de agua. Se dejó levantar algo de presión en la línea antes de comenzar la inyección manteniendo cerradas las válvulas A y B y la válvula C abierta. Esto se muestra en la figura 5. Cuando el manómetro D indicaba una presión de 2 PSI se abrieron simultáneamente las válvulas A y B. Se comenzó a contar el tiempo desde el momento en que se produjo la primera gota de aceite.

Se anotaron el tiempo y la presión cada 5 CC. de producción total y después de la rotura * se registró también la producción de agua cada 5 CC.

Esta prueba de invasión de agua "Normal" se hizo como base

* se denominará rotura al momento en que la primera gota de agua sea producida.

de comparación para las pruebas con el "Cojin" de aceite con detergente. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4 y en las figuras 8, 9 y 10.

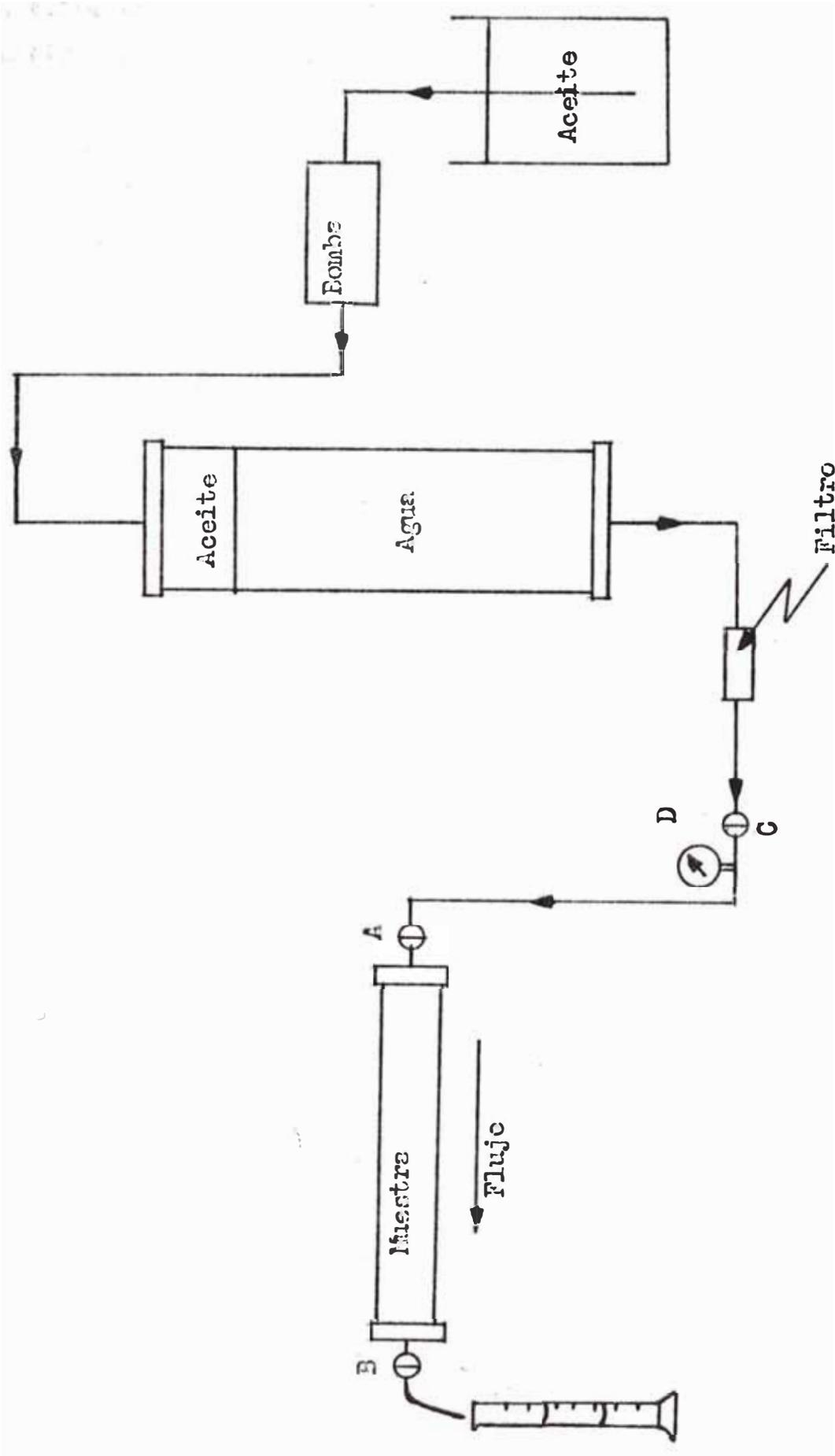
Se hizo una segunda prueba de inyección de agua "Normal" después de todas las otras pruebas, para comprobar si las propiedades físicas de la muestra no habían sido alteradas. Los resultados obtenidos fueron exactamente los mismos que los de la primera prueba, esto indica la reproductibilidad de los resultados. Los datos obtenidos en esta prueba se muestran en la tabla 15.

Todas las pruebas se hicieron a un régimen de inyección constante. La rotura del agua se midió cuando la primera gota de agua cayó en la bureta. La inyección continuo hasta que un volumen de agua igual a un volumen poroso de la muestra pasó a travez de ella pero no se obtuvo producción adicional de aceite después de la rotura.

Inyección de agua con cojin de surfactante

El término cojin de surfactante se usa para definir un volumen de aceite con surfactante que se inyecta dentro de la muestra para ser desplazado por el agua de inyección. Después de la saturación con aceite se colocó la muestra en posición horizontal, como se indica en la figura 5. Se cerró la válvula C y se purgo la línea entre las válvulas C y A secándola luego con aire seco a presión. El volumen de esta línea era 30 CC. El cojin de aceite con detergente se vacio dentro de esta línea y antes de hacer la conexión con la válvula A se sacó todo el aire. Se comenzó a bombear y se permitió subir la presión en la línea. Cuando el manómetro indicó 2 PSI. se abrieron las válvulas A y B simultaneamente.

Después de esta operación el procedimiento que se siguió fué el mismo que para una inyección de agua "Normal". La presión y el tiempo se registraron cada 5 CC de producción total hasta 40 CC



Invasión de la muestra

Figura 5

(2 CC antes de la rotura en la prueba 1). Después de los 40 CC de producción total las lecturas se hicieron cada 2 CC hasta la rotura. Esto se hizo para determinar si parte del agua intersticial era producida delante del cojin de surfactante.

La inyección continuo hasta que se produjo un volumen poroso de agua. No se recuperó aceite adicional después de la rotura. Las tablas 5 a 14 y en las figuras 8, 9 y 10 muestran las recuperaciones de aceite obtenidas con las diferentes concentraciones de detergente y los variados tamaños de "Cojines" usados.

Se hicieron mediciones de la tensión interfacial entre el aceite producido y el agua después de cada prueba. El tamaño de cada muestra fué de 5 CC y los resultados obtenidos se muestran en las figuras 11, 12, 13 y 14. Todas las mediciones de la tensión se hicieron con el tensiometro Du-Nuoy de lectura directa. El instrumento fué calibrado usando el método indicado por el fabricante.

Todos los recipientes usados para contener las muestras a ser probadas se lavaron con una solución concentrada de ácido sulfúrico saturada con dicromato de potasio y enjuagadas con agua destilada⁷. El anillo fué lavado en benceno y alcohol y quemado después de cada medida de la tensión interfacial.

Las muestras de aceite se vaciaron sobre agua nueva para realizar las mediciones. Desde que el surfactante no era soluble en el agua se consideró que no se incurriría en error alguno al usar agua nueva. Las muestras se dejaron en reposo por dos horas antes de hacer las mediciones. En cualquier caso, era imposible usar el agua producida antes de la rotura y después de ella no se produjo aceite.

Se hicieron tres grupos de pruebas usando diferentes concentraciones de surfactante en el cojin. Las concentraciones usadas fueron 1%, 5% y 10% en volumen.

Los volúmenes de los cojines seleccionados originalmente fueron 5% , 10% y 15% del volumen poroso de la muestra. Los tamaños verdaderos de los cojines se midieron asumiendo un desplazamiento uniforme dentro de la muestra. Se midió el aceite producido cuando se observó caer la primera gota de agua dentro de la cámara de entrada de la muestra. Se asumió que éste volumen era el tamaño del cojin. Se usó este método debido a las dificultades encontradas para tratar de sacar el aire de la línea de entrada sin sacar parte del "Cojin" contenido en ella.

Tensión superficial e interfacial

Se escogieron varias concentraciones de surfactante en el aceite. Los resultados de estas medidas se muestran en la tabla 2 una curva de la concentración del surfactante en el aceite, vs las tensiones superficial e interfacial del agua-aceite se presentan en la figura 20.

Estas curvas fueron usadas como base para encontrar la cantidad de detergente en el aceite producido y para determinar la adsorción del surfactante en la muestra.

Densidad

Era necesario conocer la densidad de todos los fluidos usados, para determinar su saturación en la muestra y el volumen poroso de este. Las medidas se hicieron usando un picnómetro de 10 CC y una balanza de precisión, la cual podía leer hasta 1/10,000 GM. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 1.

Viscosidad

Las viscosidades del agua destilada, soltrol, agua salada y las soluciones del surfactante en aceites se determinaron usando un viscosímetro Ostwald modificado (Cannon). La viscosidad del surfactante mismo era demasiado alta para este tipo de viscosímetro.

Todas las medidas se hicieron a 83°F y se muestran en la tabla 1.

Permeabilidad y porosidad

La porosidad se determinó por el método de diferencia de pesos, desde que no habian disponibles trozos pequeños de la muestra. El volumen total de cálculo de las dimensiones de la muestra.

Se midió la permeabilidad al aire y se extrapolo la permeabilidad teórica al líquido usando el método Klaukenberg. Esta extrapolación se muestra en la figura 21. Se midió la permeabilidad al agua y la diferencia encontrada fué 3.9%. Esta diferencia podría ser consecuencia de la hidratación de las gredas presentes en la muestra. Estos resultados se sumarizan en la tabla 3. Se midió la permeabilidad al agua al principio de cada prueba y los resultados obtenidos así como las diferencias encontradas se muestran también en la tabla 3.

Calibración de la muestra.

Para evitar los efectos del régimen de inyección en la recuperación escogió el coeficiente de calibración presentado por Rapacort⁹ como: $L U w V$, mucho mayor que el coeficiente crítico el cual se considera ser 3.5. Usando un coeficiente de calibración de 5 se fijó el régimen de inyección a 0.0132 CC/SEC para las operaciones de inyección. Cualquier régimen de inyección mayor que este valor debería dar la misma recuperación. Se ilustra en la figura 15 que un régimen de inyección mayor dió una mayor recuperación.

Se escogió el valor de 5 para coeficiente de calibración para tener una pérdida de presión por pie menor que el promedio de campo ± 10 PSI/FT. La máxima caída de presión obtenida usando el régimen escogido fué 8 PSI.

CAPITULO VI

SUMARIO DE RESULTADOS

TABLA 1

PROPIEDADES DE LA MUESTRA Y DE LOS FLUIDOS

Muestra

Característica	Arena Consolidada
Longitud	35.8 cm.
Area de la Sección Transversal	18.5 cms ²
Volumen Total	661.4 cc.
Porosidad	26.9%
Volumen Poroso	178.1 cc.
Permeabilidad	0.49 darcys
Peso seco	2104.8 grs.
Permeabilidad al aire	0.51 darcys

Fluidos

	Temp. 88°F Densidad gm/cc	Temp. 88°F. Viscosidad CP.
Agua (agua salada)	1.05	0.86
Aceite (Soltrol-C)	0.75	1.19
Surfactante (control-flow)	0.902	Alta

Soluciones

1.0% volumen control-flow	0.75	1.23
5.0% volumen control-flow	0.757	1.35
10.0% volumen control-flow	0.763	1.49

Composición del agua

Agua destilada	979,950 ppm.
Sal	25,000 ppm.
Formaldehido	50 ppm.

Relación de viscosidad aceite-agua

Concentración de surfactante	U _o /U _w
0% volumen	1.38
1% volumen	1.43
5% volumen	1.57
10% volumen	1.74

TABLA 2

TENSION SUPERFICIAL E INTERFACIAL

CONTROL - FLOW

Concentración % volumen	Temp. 88°F Tensión superficial Solución - aire	Tensión interfacial Solución - agua
0	28.0 dinas/cm.	22.7 dinas/cm.
0.1		10.3 dinas/cm.
0.5		3.9 dinas/cm.
1.0		0 dinas/cm.
2.0	27.6 dinas/cm.	
3.0		
4.0	27.3 dinas/cm.	
5.0		
6.0		
7.0		
8.0	27.1 dinas/cm.	
9.0		
10.0		
15.0	27.0 dinas/cm.	

TABLA 3

PERMEABILIDAD DE LA MUESTRA

Permeabilidad extra polada (Klinkenberg)	510 md.
Permeabilidad al agua	490 md.
Diferencia %	$\frac{510 - 490}{510} = 3.9\%$

Prueba No.	Permeabilidad absoluta al líquido	Diferencia por ciento
1	490 md.	0
2	475 md.	- 3.05
	487 md.	- 0.61
4	493 md.	+ 0.61
5	479 md.	2.25
6	490 md.	0
7	491 md.	0.2
8	486 md.	0.8
9	482 md.	1.64
10	481 md.	- 0.61
11	490 md.	0
12	493 md.	+ 0.61

TABLA 4
 INYECCION DE AGUA (PRUEBA 1)

Tiempo Sec.	Vol Total Producido cc.	Agua Producida cc.	Aceite Producido cc.	Recupera- ción de aceite %	Presión Diferen- cial psig
0	0		0	0	2.3
315	5		5	4.7	2.8
715	10		10	9.4	3.8
1095	15		15	14.0	4.6
1515	20		20	18.7	5.5
1920	25		25	23.5	6.5
2345	30		30	28.1	7.2
2705	35		35	32.9	7.8
3080	40	0	40	38.5	7.8
3490	45	3	42	38.5	7.8
3855	50	6.2	43.8	40.1	7.8
4555	60	15.9	44.1	40.5	7.8
6090	80	35.9	44.1	40.5	7.8

Régimen de flujo ▾ 0.0132 cc/sec.
 Tiempo de rotura ▾ 3225 sec.
 Peso inicial de la muestra ▾ 2259.8 gm.
 Peso final de la muestra ▾ 2273.0 gm.
 Saturación inicial de aceite ▾ 61.2%
 Saturación residual de aceite ▾ 36.4%
 Eficiencia de recuperación 40.5%
 de aceite.

Fluido desplazante Agua

TABLA 5
 INYECCION DE AGUA CON COJIN DE SURFACTANTE
 (Prueba 2)

Tiempo Sec.	Vol Total Producido cc.	Agua Producido cc.	Aceite Producido cc.	Recuperación de aceite %	Presión diferencial psig.
0	0		0	0	2.5
312	5		5	4.9	2.6
710	10		10	9.8	3.0
1089	15		15	14.7	3.5
1516	20		20	19.6	4.1
1925	25		25	24.5	4.8
2345	30		30	29.4	5.7
2703	35		35	34.3	6.6
3071	40		40	39.2	7.3
3198	42		42	41.2	7.6
3340	44		44	43.1	8.0
3491	46		46	45.0	8.2
3645	48		48	47.0	8.2
3810	50	0.5	49.5	48.5	8.2
4028	53	3.1	49.9	49.0	8.2
4100	54	4.1	49.9	49.0	8.2
4557	60	10.1	49.9	49.0	8.2
6089	80	30.1	49.9	49.0	8.2

Régimen de flujo > 0.0132 cc/sec.
 Tiempo de rotura > 3701 sec.
 Peso inicial de la muestra > 2262.0 gm.
 Peso final de la muestra > 2274.2 gm.
 Saturación inicial de aceite > 57.0%
 Saturación residual de aceite > 34.3%
 Eficiencia de recuperación
 de aceite. > 40.2%

Volumen del cojin (% volumen
 poroso). 5%
 Concentración de surfactante
 (% volumen) 1%

TABLA 6
 INYECCION DE AGUA CON COJIN DE SURFACTANTE
 (Prueba 3)

Tiempo Sec.	Vol Total Producido cc.	Agua Producido cc.	Aceite Producido cc.	Recuperación de aceite %	Presión diferencial psig.
0	0		0	0	2.9
315	5		5	4.55	2.9
717	10		10	9.10	3.0
1090	15		15	13.6	3.3
1514	20		20	18.2	4.0
1928	25		25	22.7	5.0
2343	30		30	27.3	5.3
2700	35		35	31.9	5.6
3080	40		40	36.5	5.9
3195	42		42	38.1	6.1
3343	44		44	40.0	6.5
3495	46		46	41.9	6.8
3651	48		48	43.6	7.1
3818	50		50	45.5	7.6
4036	52	0	52	47.3	7.8
4110	54	0.3	53.7	48.9	8.0
4353	56	1.0	55	50.0	8.0
4396	58	2.0	56	51.0	8.1
4551	60	3.2	56.8	51.5	8.2
5320	70	13.2	56.8	51.5	8.3
6042	80	23.2	56.8	51.5	8.3

Régimen de flujo - 0.0132 cc/sec.
 Tiempo de rotura - 4072 sec.
 Peso inicial de la muestra - 2259.6 gm.
 Peso final de la muestra - 2273.2 gm.
 Saturación inicial de aceite - 61.8%
 Saturación residual de aceite - 36.8%
 Eficiencia de recuperación de aceite - 40.5%

Volumen del cojin (% volumen poroso). 6.9%
 Concentración de surfactante (% volumen) 1%

TABLA 7
 INYECCION DE AGUA CON COJIN DE SURFACTANTE
 (Prueba 4)

Tiempo Sec.	Vol Total Producido cc.	Agua Producido cc.	Aceite Producido cc.	Recuperación de aceite %	Presión diferencial psig.
0	0		0	0	2.5
348	5		5	4.9	2.5
720	10		10	9.8	2.6
1141	15		15	14.7	2.6
1479	20		20	19.4	2.7
1780	25		25	24.2	3.5
2261	30		30	29.0	4.3
2650	35		35	34.0	5.0
3085	40		40	38.6	5.4
3203	42		42		5.6
3347	44		44		5.9
3492	46		46		6.0
3651	48		48		6.1
3763	50		50	49.0	6.2
3945	52		52		6.5
4090	54		54		6.8
4251	56		56	54.9	7.1
4398	58	0	58		7.2
4549	60	0	60	58.9	7.7
4701	62	1.2	60.8	59.5	8.0
4870	64	3.0	61.0	59.9	8.1
5001	66	3.8	61.2	60.0	8.1
5182	68	5.8	61.2	60.0	8.2
5303	70	7.8	61.2	60.0	8.2
6007	80	17.8	61.2	60.0	8.2
6828	90	27.8	61.2	60.0	8.2

Régimen de flujo - 0.0132 cc/sec.
 Tiempo de rotura - 4635 sec.
 Peso inicial de la muestra - 2269.0 gm.
 Peso final de la muestra - 2273.3 gm.
 Saturación inicial de aceite - 57.1%
 Saturación residual de aceite - 34.7%
 Eficiencia de recuperación de aceite - 39.2"

Volumen del cojin (% volumen poroso) - 11.6%
 Concentración de surfactante (% volumen) - 1%

TABLA 8
 INYECCION DE AGUA CON COJIN DE SURFACTANTE
 (Prueba 5)

Tiempo Sec.	Vol Total Producido cc.	Agua Producido cc.	Aceite Producido cc.	Recuperación de aceite %	Presión diferencial psig.
0	0		0	0	2.3
336	5		5	4.7	2.4
691	10		10	9.3	2.8
1075	15		15	14.1	3.3
1485	20		20	18.7	4.1
1872	25		25	23.4	4.6
2278	30		30	28.0	5.5
2661	35		35	32.7	6.4
3051	40		40	37.5	7.0
3181	42		42	39.2	7.3
3345	44		44	41.1	7.7
3493	46		46	43.0	7.9
3641	48		48	45.0	8.3
3799	50	0.4	49.6	46.4	8.3
3931	52	2.2	49.8	46.5	8.3
4151	55	4.4	50.6	47.4	8.3
4550	60	9.4	50.6	47.4	8.3
5311	70	19.4	50.6	47.4	8.3
6071	80	29.4	50.6	47.4	8.3

Régimen de flujo - 0.0132 cc/sec.
 Tiempo de rotura - 3727 sec.
 Peso inicial de la muestra - 2259.9 gm.
 Peso final de la muestra - 2273.8 gm.
 Saturación inicial de aceite - 60.0%
 Saturación residual de aceite - 35.5%
 Eficiencia de recuperación de aceite. - 39.9%

Volumen del cojin (% volumen poroso. 4.5%
 Concentración de surfactante (% volumen). 5%

TABLA 9
 INYECCION DE AGUA CON COJIN DE SURFACTANTE
 (Prueba 6)

Tiempo Sec.	Vol Total Producido cc.	Agua Producido cc.	Aceite Producido cc.	Recuperación de aceite %	Presión diferencial psig.
0	0		0	0	2.5
339	5		5	4.8	2.5
691	10		10	9.5	2.6
1061	15		15	14.3	2.7
1475	20		20	19.0	3.3
1852	25		25	23.8	4.0
2251	30		30	28.6	4.6
2671	35		35	33.4	5.2
3095	40		40	38.2	5.6
3210	42		42	40.0	6.1
3339	44		44	42.0	6.5
3495	46		46	43.9	6.8
3650	48		48	45.7	7.1
3781	50		50	47.5	7.4
3949	52	0	52	49.5	7.7
4101	54	0.3	53.7	51.2	8.0
4260	56	0.9	55.1	52.5	8.2
4401	58	1.8	56.2	53.5	8.3
4552	60	3.4	56.6	54.0	8.3
5291	70	13.4	56.6	54.0	8.3
6051	80	13.4	56.6	54.0	8.3

Régimen de flujo ▶ 0.0132 cc/sec.
 Tiempo de rotura ▶ 4085 sec.
 Peso inicial de la muestra ▶ 2260.6 gm.
 Peso final de la muestra ▶ 2273.4 gm.
 Saturación inicial de aceite ▶ 59.0%
 Saturación residual de aceite ▶ 35.7%
 Eficiencia de recuperación de
 aceite. ▶ 39.2%

Volumen del cojin (% volumen
 poroso. 8.7%
 Concentración de surfactante
 (% volumen). 5%

TABLA 10
 INYECCION DE AGUA CON COJIN DE SURFACTANTE
 (Prueba 7)

Tiempo Sec.	Vol Total Producido cc.	Agua Producido cc.	Aceite Producido cc.	Recuperación de aceite %	Presión diferencial psig.
0	0		0	0	1.9
330	5		5	4.6	1.9
732	10		10	9.2	1.9
1101	15		15	13.8	2.0
1502	20		20	18.4	2.1
1880	25		25	23.0	2.6
2280	30		30	27.5	3.3
2650	35		35	32.1	4.0
3045	40		40	36.6	4.8
3190	42		42		5.1
3337	44		44		5.3
3502	46		46	42.1	5.5
3649	48		48		5.8
3820	50		50	45.9	5.9
3920	52		52		6.1
4110	54		54		6.3
4260	56		56	51.4	6.8
4303	58		58		7.0
4550	60	0	60	55.0	7.5
4701	62	0.4	61.6	56.5	7.9
4850	64	1.8	62.2	57.0	8.1
4985	66	2.8	63.2	58.0	8.1
5180	68	3.9	64.1	58.9	8.1
5310	70	5.7	64.3	59.0	8.1
5700	75	10.7	64.3	59.0	8.1
6009	80	15.7	64.3	59.0	8.1
6803	90	25.7	64.3	59.0	8.1

Régimen de flujo	▾ 0.0132 cc/sec.
Tiempo de rotura	▾ 4645 sec.
Peso inicial de la muestra	▾ 2260.0 gm.
Peso final de la muestra	▾ 2272.4 gm.
Saturación inicial de aceite	▾ 61.0%
Saturación residual de aceite	▾ 37.6%
Eficiencia de recuperación de aceite	▾ 38.5%
Volumen del cojin (% volumen poroso)	12.5%
Concentración de surfactante (% volumen)	5 %

TABLA 13
 INYECCION DE AGUA CON COJIN DE SURFACTANTE
 (Prueba 10)

Tiempo Sec.	Vol Total Producido cc.	Agua Producido cc.	Aceite Producido cc.	Recuperación de aceite %	Presión diferencial psig.
0	0		0	0	1.9
335	5		5	4.6	2.0
732	10		10	9.3	2.1
1136	15		15	13.9	2.2
1473	20		20	18.5	2.4
1866	25		25	23.2	3.2
2255	30		30	27.8	4.0
2644	35		35	32.5	4.5
3079	40		40	37.0	5.0
3798	42		42		5.1
3341	44		44		5.3
3486	46		46	42.6	5.5
3645	48		48		5.8
3760	50		50	46.3	5.9
3939	52		52		6.1
4084	54		54		6.3
4043	56		56	51.9	6.8
4392	58		58		7.0
4543	60	0	60	55.5	7.5
4700	62	0.1	61.9	57.1	7.9
4874	64	1.9	62.1	57.5	8.1
4994	66	3.8	62.2	57.6	8.1
5176	68	5.8	62.2	57.6	8.1
5297	70	7.8	62.2	57.6	8.2
6001	80	17.8	62.2	57.6	8.3
6822	90	27.8	62.2	57.6	8.3

Régimen de flujo - 0.0132 cc/sec.
 Tiempo de rotura - 4690 sec.
 Peso inicial de la muestra - 2259.8 gm.
 Peso final de la muestra - 2271.2 gm.
 Saturación inicial de aceite - 60.3%
 Saturación residual de aceite - 39.2%
 Eficiencia de recuperación de aceite - 35.3%

Volumen del cojin (% volumen poroso) 13.5%
 Concentración de surfactante (% volumen) 10%

TABLA 15
 INYECCION DE AGUA (Prueba 12)

Tiempo Sec.	Vol Total Producido cc.	Agua Producido cc.	Aceite Producido cc.	Recuperación de aceite %	Presión diferencial psig.
0	0		0	0	2.5
327	5		5	4.9	2.8
742	10		10	9.2	3.7
1130	15		15	14.7	4.6
1575	20		20	19.6	5.5
2303	25		25	24.5	6.5
2402	30		30	29.4	7.2
2715	35		35	34.3	7.8
3089	40	0	40	39.2	7.9
3492	45	4.1	40.9	40.0	7.9
3850	50	9	41.0	40.2	7.9
4575	60	19	41.0	40.2	7.9
5310	70	29	41.0	40.2	7.9
6075	80	39	41.0	40.2	7.9

Régimen de flujo = 0.0132 cc/sec.
 Tiempo de rotura = 314.3 sec.
 Peso inicial de la muestra = 2262.0 gm.
 Peso final de la muestra = 2274.2 gm.
 Saturación inicial de aceite = 57.0%
 Saturación residual de aceite = 34.1%
 Eficiencia de recuperación de aceite = 40.2%

Fluido desplazante = Agua

CAPITULO VII
DISCUSION DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos de las doce pruebas se muestran en las curvas de recuperación de aceite vs tiempo, en las figuras 8, 9 y 10. La recuperación de aceite anotada en la tabulación se calculó usando la relación siguiente:

$$\% \text{ Recuperación de aceite} = \frac{\text{aceite producido}}{\text{aceite inicial}} \times 100 \quad (5)$$

Este valor coincide con el calculado usando el peso de la muestra después de la invasión para la prueba 4, inyección de agua "Normal".

En el caso de la inyección de agua con cojin de surfactante, se inyectó dentro de la muestra un volumen adicional de aceite con detergente, el cual reemplazó parte del aceite originalmente en ella. Por lo tanto la eficiencia de recuperación calculada usando la ecuación (5), fué mas alta que la calculada usando el peso de la muestra después de la invasión. La recuperación ploteada en las figuras 8, 9 y 10 es el valor calculado usando la ecuación (5). Después de cada curva, se ha ploteado el valor correspondiente al calculado usando el peso de la muestra como base de comparación. Esta es la verdadera eficiencia de recuperación considerada.

Se ha encontrado que las eficiencias de recuperación para la misma concentración de surfactante era inversamente proporcional al volumen del cojin. Si el volumen del cojin permanecía constante, la eficiencia en la recuperación de aceite era inversamente proporcional a la concentración del surfactante. Estos resultados se muestran en la figura 15. Este gráfico indica también que se hubieran obtenido la misma recuperación usando un cojin de 5% de volumen con 10% de concentración de surfactante, un cojin de 8.9% volumen

con 5% de concentración y un cojin de 11.6% volumen con 1% de concentración.

La eficiencia de recuperación mas alta fué 40.5% para la inyección de agua "Normal" y la menor 35.3% para el cojin con mayor volumen y mayor concentración de detergente. Este 5% de diferencia en recuperación se puede explicar considerando la relación de viscosidad aceite-agua. Si se usan mayores concentraciones de surfactante en el cojin de aceite, mayor cantidad de aceite será sobrepasada por el agua dentro de la muestra. Esto concuerda con el hecho de que solamente se produce una pequeña fracción de cojin cuando tiene su máximo volumen (cerca de 15% del volumen poroso).

La compañía productora del detergente asegura, que el uso de este surfactante pondrá al aceite en íntimo contacto con el sólido, desplazando el agua intersticial. Esto podría explicar la reducción en la eficiencia de recuperación, desde que parte del aceite se pierde en la arena como saturación irreductible, cuando se convierte en mojada por aceite ¹¹.

Parte del agua intersticial podría ser desplazada por el cojin de aceite y producida delante de el, desde que la tensión interfacial aceite-agua se redujo a cero. Una observación cuidadosa durante las pruebas, indicó que no se produjo agua delante del cojin de surfactante especialmente cuando se produjo parte del cojin.

Es también posible que el agua intersticial haya sido desplazada por el cojin pero no producida. Cuando el cojin fué sobrepasado por el agua e banco de agua intersticial formado delante de el se mezcló con el agua de inyección. Fué imposible distinguir el banco de agua intersticial del agua de inyección desde que ambas tenían la misma composición.

Si la muestra permaneció mojada por agua, se puede asumir que hubo muy pequeña absorción del detergente sobre la superficie de la arena desde que el surfactante no era soluble en agua. Sin embargo

algo de absorción ocurrirá en la interfase aceite-agua. No se hizo ningún intento analítico para evaluar la absorción del detergente en la muestra.

En todas las pruebas realizadas se observó que la presión de inyección crecía proporcionalmente al volumen de agua inyectado. Esto se muestra en las curvas de la figura 16. La presión se ha ploteado en contra del tiempo para las pruebas 1, 5, 6 y 7. La prueba 1 es una inyección de agua "Normal" y las pruebas 5, 6 y 7 son pruebas con 5% de concentración de surfactante en el cojin.

La curva de presión para la prueba normal comienza a 2.3 ps cuando el tiempo es cero. Aumenta con una pendiente casi constante hasta la máxima presión en el momento de la rotura. Después de esta, la presión permanece constante sin que la afecte el volumen de agua inyectada.

Este comportamiento se podría explicar usando la ley de Darcy para flujo lineal y la suposición siguiente. Desde que no se produce aceite adicional después de la rotura, la saturación de agua detrás del frente de invasión puede considerarse constante. Por lo tanto la permeabilidad efectiva al agua en dicha zona será también constante en todo momento. Esta saturación se puede calcular usando la siguiente relación:

$$K_w = \frac{(Q_w) (U_w) (L_w)}{(A) (\Delta P_w)} \quad (6)$$

Donde

- K_w - permeabilidad efectiva al agua, darcies
- Q_w - régimen de inyección de agua, cc/seg.
- U_w - viscosidad del agua cp.
- L_w - distancia de el punto de inyección a la posición del frente de agua en cualquier momento, cm.
- ΔP_w - caída de presión en la zona de agua, psi.

Después de la rotura (L_w) es igual a la longitud de la muestra y (ΔP_w) es la caída de presión total medida sobre la longitud de la muestra. En ese momento se puede calcular K_w porque (Q_w), (U_w) y (A) con constantes.

$$K_w = \frac{(0.0132) (0.86) (35.8)}{(18.5) \frac{(7.8)}{(14.7)}} \quad 0.0415 \text{ Darcies}$$

$$K_w = 41.5 \text{ md.}$$

El valor obtenido para la permeabilidad efectiva al agua, es dividida por la permeabilidad absoluta al líquido, para obtener el valor de la permeabilidad relativa. De la figura (6) se obtiene la saturación de agua correspondiente a esta permeabilidad relativa.

$$K_{rw} = \frac{0.0415}{0.490} = 0.085$$

$$S_w = 61.5\%$$

El valor calculado de la saturación de agua usando el peso de la muestra después de la prueba 1 es:

$$S_w = 1 - S_{or} = 1 - 0.364 = 63.6\%$$

se puede notar que ambos valores concuerdan dentro de un 3.5% de diferencia. Esta diferencia puede ser debida a imprecisiones en el trazado del gráfico, desde que solamente hay muy pocos puntos disponibles, o a diferencias en las propiedades de las arenas.

Por otro lado en la zona de aceite solamente están presentes aceite y agua intersticial. Se puede asumir que el agua intersticial no ha sido movida por el aceite desplazado desde que la muestra se consideró estar saturada con aceite cuando no se produjo más agua intersticial. Desde que la saturación de aceite es constante la permeabilidad efectiva al aceite es también constante en dicha zona y se puede calcular usando la misma relación usada para el agua:

$$K_o = \frac{(Q_o) (U_o) (L_o)}{(A) (\Delta P_o)} \quad (7)$$

(Q_o) , (U_o) y (A) son conocidos. (ΔP_o) se puede medir cuando se obtiene la primera gota de aceite al comienzo de la inyección de agua. En este instante (L_o) es la longitud total de la muestra y K_o es:

$$K_o = \frac{(0.0132) (1.19) (35.8)}{(18.5) \frac{(2.3)}{(14.7)}}$$

$$K_o = 179 \text{ md.}$$

La permeabilidad relativa al aceite es 0.365. La saturación de agua correspondiente de la curva de permeabilidad relativa es 41.0%. La saturación de agua intersticial calculada del peso de la muestra es 38.9%. La diferencia es 5%. Los valores calculados por este método son considerados más exactos que aquellos obtenidos de la curva.

La diferencia en permeabilidad efectiva al aceite y agua explicada el cambio en la presión de entrada en la inyección de agua desde que la caída de presión total es:

$$\Delta P_t = \Delta P_o + \Delta P_w \quad (8)$$

usando la ley de Darcy

$$\Delta P_t = \frac{(Q_o) (U_o) (L_o)}{(A) (K_o)} + \frac{(Q_w) (U_w) (L_w)}{(A) (K_w)} \quad (9)$$

pero

$$L_t = L_o + L_w$$

por lo tanto:

$$\Delta P_t = \frac{(Q_o) (U_o) (L_t - L_w)}{(A) (L_o)} + \frac{(Q_w) (U_w) (L_w)}{(A) (K_w)} \quad (11)$$

$$\Delta P_t = \frac{(Q_o) (U_o) (L_o)}{A (K_o)} + (L_w) \left(\frac{(Q_w) (U_w)}{(A) (K_w)} - \frac{(Q_o) (U_o)}{(A) (K_o)} \right) \quad (12)$$

desde que la única variable es L_w

$$\frac{(Q_w) (U_w)}{(A) (K_w)} > \frac{(Q_o) (U_o)}{(A) (K_o)} \quad (12A)$$

Cuando (L_w) aumenta, aumenta también (ΔP_t). La curva obtenida de la prueba con surfactantes es ligeramente diferente. Tiene cuatro zonas bien definidas.

La primera zona es aquella correspondiente a la menor pendiente al comienzo de la inyección. Esta pertenece al tiempo de inyección del cojin.

La siguiente ecuación puede usarse para esta zona:

$$\Delta P_t = \Delta P_s + \Delta P_o \quad (13)$$

Donde (ΔP_s) es la caída de presión en la zona del cojin. Se puede expresar también en términos de la ley de Darcy:

$$\Delta P_s = \frac{(Q_s) (U_s) (L_s)}{(A) (K_s)} \quad (14)$$

Donde (K_s) es la permeabilidad efectiva del cojin en la zona del cojin.

La caída de presión por unidad de longitud en la zona del cojin es mayor que la del aceite en la zona de aceite. Aunque el cojin está compuesto de aceite tiene viscosidad mas alta debido al surfactante en solución. La presión de entrada aumenta durante la inyección del cojin proporcionalmente a la longitud de este (L_s), hasta que la última gota de cojin ha sido inyectado dentro de la muestra.

Después del cojin comienza a entrar agua en la muestra. La caída de presión total aumentará y la pendiente marca la segunda zona de la curva. La caída total de presión para esta zona es:

$$\Delta P_t = \Delta P_w + \Delta P_s + \Delta P_o \quad (15)$$

como el aceite es producido, (ΔP_o) disminuye y como el cojin es sobrepasado por el agua, su longitud (L_s) cambia con respecto al tiempo. Por lo tanto, (ΔP_s) disminuye, mientras que ΔP_w aumenta proporcionalmente a la distancia desde el punto de inyección, a la posición del frente de agua (L_w). Después que el cojin es completamente sobrepasado $\Delta P_s = 0$ y la caída total de presión será:

$$\Delta P_t = \Delta P_w + \Delta P_o \quad (16)$$

La pendiente de esta tercera zona de la curva será todavía mayor que la pendiente de la curva cuando el cojin está fluyendo desde que solamente agua y aceite están fluyendo en la muestra. En esta zona la pendiente de la curva debería ser la misma que aquella de la curva de inyección de agua. Se puede ver que esto es casi completamente cierto en la figura 16. Las diferencias encontradas deben ser debidas a imprecisión de los instrumentos usados y a errores introducidos al leer las presiones.

Si se asume que la viscosidad del cojin es constante hasta que este es sobrepasado, se puede demostrar analíticamente, que la pendiente de la tercera zona debería ser mayor que la de la segunda zona si el cojin es sobrepasado por el agua.

Considerando dos pruebas:

- (1) Inyección de agua
- (2) Inyección de agua con cojin de detergente

ambas usando el mismo régimen de inyección. La caída total de presión en ambos casos después de comenzar la inyección de agua puede ser expresada como sigue:

$$\Delta P_{t1} = \Delta P_{o1} + \Delta P_{w1} \quad (17)$$

$$\Delta P_{t2} = \Delta P_{o2} + \Delta P_s + \Delta P_{w2} \quad (18)$$

después de un tiempo ΔT , desde que los regímenes de inyección son los mismos se puede asumir que: $L_{o1} = L_{o2}$

y por lo tanto

$$\Delta P_{o1} = \Delta P_{o2} \quad (18A)$$

Desde que $L_{t1} = L_{t2}$

se tiene que:

$$L_{o1} + L_{w1} = L_{o2} + L_{w2} + L_s \quad (19)$$

o que

$$L_{w1} = L_{w2} + L_s$$

$$L_{w1} - L_{w2} = L_s \quad (20)$$

La caída de presión para la distancia $L_{w1} - L_{w2}$ será.

$$\Delta P_{w1} - \Delta P_{w2} \quad (21)$$

en la zona de agua,

en la sección del cojin la caída de presión será: ΔP_s

sabemos que
$$\frac{\Delta P_o}{L_o} < \frac{\Delta P_w}{L_w} \quad (22)$$

$$\frac{Q_o U_o}{K_o A} < \frac{Q_w U_w}{K_w A} \quad (12A)$$

o también

$$\frac{U_o}{K_o} < \frac{U_w}{K} \quad (23)$$

desde que (Q) y (A) son constantes.

Como el cojin es también aceite podemos decir que $K_s \approx K_o$ y en la Tabla 1 vemos que $U_s > U_o$

por lo tanto

$$\frac{U_s}{K_s} > \frac{U_o}{K_o} \quad (24)$$

pero también sabemos que

$$U_s > U_w \quad (25)$$

y que

$$K_s \approx K_o >$$

$$K_s > K_w \quad (26)$$

Dividiendo la ecuación (25) por la (26) obtenemos

$$\frac{U_s}{K_s} > \frac{U_w}{K_w} \quad \frac{U_s}{K_s} < \frac{U_w}{K_w} \quad (27)$$

Conociendo sus valores reales,

también

$$\frac{\Delta P_s}{L_s} < \frac{\Delta P_w}{L_w}$$

desde que

$$\Delta P = \frac{Q}{A} \times K$$

Quando $L_s = L_w$

$$\Delta P_s < \Delta P$$

por lo tanto

$$\Delta P_{w1} - \Delta P_{w2} > \Delta P_s$$

desde que

$$L_{w1} - L_{w2} = L_s \tag{20}$$

sumando miembro a miembro con la ecuación (18A) obtenemos

$$\Delta P_{w1} - \Delta P_{w2} + \Delta P_{o1} > \Delta P_s + \Delta P_{o2}$$

o sea

$$\Delta P_{w1} + \Delta P_{o1} > \Delta P_{o2} + \Delta P_{w2} + \Delta P_s$$

reemplazando las ecuaciones 17 y 18 tenemos

$$\Delta P_{t1} > \Delta P_{t2}$$

si ambos lados de la ecuación se dividen por un mismo tiempo T se tiene

$$\frac{\Delta P_{t1}}{\Delta T} > \frac{\Delta P_{t2}}{\Delta T}$$

pero la pendiente de la curva ΔP vs. tiempo es:

$$\frac{\Delta P}{\Delta T} \quad s$$

entonces

$$s_1 > s_2$$

donde

s_1 = pendiente de la inyección de agua normal

S_2 = pendiente de la inyección de agua con surfactante (zona 2).

Esto quiere decir que: "La pendiente de la tercera zona, en la curva correspondiente a la inyección de agua con cojin de detergente, debería ser mayor que la curva de la zona 2, si solamente estuvieran fluyendo aceite y agua". Esto pasaría solamente si el cojin hubiera sido sobrepasado. Comparando las curvas en la figura 16 se puede ver que la pendiente de la tercera zona en las pruebas 5, 6 y 7 es casi paralela a la curva correspondiente a la prueba 1.

En todas las pruebas con surfactante hay una pequeña deflección en la curva entre las zonas dos y tres. Esto se ilustra muy bien en la curva de la prueba No.7 y no esta tan bien definida en las curvas de las pruebas 5 y 6 desde que los puntos fueron tomados muy separados, cada 5 cc. de producción total. Este, se cree, es el punto donde el agua ha sobrepasado el cojin. Esta deflección esta presente en todas las pruebas con surfactante pero su posición relativa en la curva cambia con el tamaño del cojin para la misma concentración de surfactante. Este cambio de posición se puede notar también en la figura 16. La concentración de surfactante no parece afectar la posición de la deflección.

El mecanismo involucrado en la reducción de la resistencia al flujo en esa zona, no se puede explicar con la información obtenida de estos experimentos.

La cuarta zona corresponde a la parte de la curva obtenida después de la rotura. La caída total de presión es igual a la caída de presión en la zona de agua. Esta permanece constante desde que no se ha producido aceite adicional y por lo tanto la permeabilidad relativa al agua permanece también constante.

Si se produjera aceite adicional después de la rotura, aumentaría la saturación de agua y por consiguiente la permeabilidad relativa al agua sería mayor. La caída de presión disminuiría en este caso.

En la figura 18B se ha intentado representar el mecanismo de la invasión cuando una fracción del cojin ha sido producida.

Desde que parte del cojin se produce, cuando la concentración es mayor del 5% y el volumen de la muestra es el máximo, se deberá buscar otra explicación para el cambio de pendiente en dichos casos.

Esto se puede explicar asumiendo que la viscosidad del cojin esta constantemente disminuyendo, en la interfase cojin-aceite, debido a que se mezcla con el aceite. Por lo tanto en dicha zona la viscosidad del cojin se aproxima mas y mas a la del aceite. Cuando ambas sean casi iguales la caída de presión por unidad de longitud en la zona del aceite será la misma que en la zona del cojin diluido. El agua sobrepasará en ese punto a la parte del cojin con alta viscosidad y no sobrepasa la zona de menor viscosidad tan completamente. Por lo tanto solo se produce una pequeña fracción del cojin delante del agua, con concentraciones menores del 1% en todos los casos.

Para determinar la relación entre la saturación inicial de aceite y la residual, se han ploteado en la figura 17. Los valores obtenidos en cada una de las pruebas.

Al observar dicha figura se puede notar que:

- La saturación final de aceite es una función de la saturación inicial y es independiente del método de desplazamiento.
- Para la misma saturación inicial la saturación residual aumenta cuando el volumen del cojin aumenta.

La saturación residual de aceite no muestra ninguna relación con la concentración de detergente en el cojin.

Errores Involucrados

La condición que podría causar errores en las medidas es la presencia de las pequeñas cámaras en los extremos de la muestra usada. Estos espacios vacíos causarían un error en la medida de las

saturaciones por el método de los pesos, pero como el volumen poroso fué calculado bajo las mismas condiciones, el error es probablemente despreciable.

La principal dificultad encontrada debida a dichas cámaras fué en la medida de los tiempos de rotura. Como se ha indicado anteriormente el tiempo de rotura fué medido cuando la primera gota de agua cayó en la bureta.

Se ha calculado una diferencia de lectura de 3.5% entre la aparición del agua en la cámara de la muestra y la primera gota en la bureta.

CAPITULO VIII

CONCLUSIONES

- 1.- No se obtuvo recuperación adicional de aceite usando un surfactante soluble en aceite en la inyección de agua, en muestras con agua intersticial mojando la arena.
- 2.- El agua intersticial no ha sido desplazada por el cojin de detergente ni producida delante de el.
- 3.- El cojin es sobrepasado total o parcialmente por el agua dependiendo de su tamaño y concentración.
- 4.- La caída de presión a lo largo de la muestra aumenta proporcionalmente al volumen de agua inyectada cuando se usa un régimen de inyección constante.
- 5.- La absorción presente es mínima cuando se usa un detergente soluble en aceite en una muestra de arena mojada con agua. Sin embargo no se ha tratado de determinar dicha absorción.
- 6.- El surfactante actúa fuertemente sobre la tensión interfacial aceite-agua y muy débilmente sobre la tensión superficial del aceite.

Se debe investigar mas sobre los surfactantes solubles en aceite para tratar de determinar su utilidad en un sistema mojado en aceite. Otra sería determinar la absorción en ambos sistemas de arena mojada por agua o por aceite. También determinar si el agua intersticial es desplazada por el cojin como, un banco y no producida o si no la desplaza.

B I B L I O G R A F I A

1. Adam, N.K., The Physics and Chemistry of Surfaces, Third Edition, London, Oxford University Press, 1941.
2. Bikerman, J.J., Surface Chemistry, New York, Academic Press Inc., 1948.
3. Buckley, S.E. and Leverett M.C. "Mechanism of Fluid Displacement in Sand," AIME Trans., 1942, pp. 142.
Calhoun, J.C. Fundamentals of Reservoir Engineering, Norman, Oklahoma, University of Oklahoma Press, 1953.
5. Calhoun, J.C., Jr. and Freston, F.W., "Application of Chromatography to Petroleum Production Research, " Producers Monthly, Vol. 16, No. 5, 1952, pp 22.
6. Dunning, H.N. and Hsiao, L., "Experiments with Detergents as Water Flooding Additives," Producers Monthly, 1954, 18, 24.
7. Harley, R.K., A Study of The Use of Surface Active Agents in Water Flooding, M.P.E. Thesis, University of Oklahoma, 1954.
8. Kennedy, Harvey T. and Guerrero, E.T., "The Effect of Surface and Interfacial Tensions on The Recovery of Oil by Water Flooding.
9. Hise, Bill R., A Study of The Effect of Gas Injection Prior to Water-Flooding Core Systems of Multiple Permeabilities, M.P. E. Thesis, University of Oklahoma, 1954.
10. Johnson, C.E. Jr., "Evaluation of Surfactants for Oil Field Flooding", Journal of American Oil Chem. Society, 1957,

Vol. 34, 209.

11. Muskat, M., The Flow of Homogeneous Fluids Through Porous Media,
New York, McGraw-Hill Book Co., 1946.
12. Ojeda, E., Preston, F.W. and Calhoun, J.C., Jr., "Correlation
of Oil Residual Following Surfactant Floods," Producers
Monthly, 1953, 18, 20.
13. Pirson, S.E., Elements of Oil Reservoir Engineering, New York,
McGraw Hill Book Company, 1950.
14. Rapaport, L.A. and Leas, W.J., "Properties of Linear Water
Floods," AIME Trans., 1953, pp. 139.
15. Taber, J.J., "The Injection of Detergent Slugs in Water Floods,"
AIME Tech. Paper 8025, 1958.