

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA DE PETROLEO**



**“Pruebas Especiales en Laboratorio
(Presión Capilar, Resistividad
y Permeabilidad Relativa)”**

Titulación por Exámen Profesional

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO DE PETROLEO

Rosa María Gusukuma Shiroma

EL PRESENTE TRABAJO LO DEDICO CON TODO CARIÑO
A MIS HIJOS CESAR Y FERNANDO.

MI AGRADECIMIENTO A MIS PROFESORES
POR SUS ENSEÑANZAS Y CONSEJOS.

PRUEBAS ESPECIALES EN LABORATORIO
(PRESION CAPILAR, RESISTIVIDAD Y PERMEABILIDAD RELATIVA)

SUMARIO

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1.- INTRODUCCION

1.1 Diagrama del Proceso de Pruebas Especiales

2.- Prueba de Presion Capilar

2.1 Conceptos Teóricos

2.2 Pruebas en Laboratorio (Método Aire-Agua)

2.2.1 Preparación de Agua Sintética

2.2.2 Preparación de Muestra

2.2.3 Preparación de Equipo

2.2.4 Procedimiento de la Prueba

3.- PRUEBAS DE RESISTIVIDAD

3.1 Conceptos Teóricos

3.1.1 Resistividad al agua

3.1.2 Resistividad a la Roca

3.1.3 Índice de Resistividad

3.1.4 Factor de Formación

3.2 Pruebas en Laboratorio en Agua de Formación y Roca Reservori

3.2.1 Preparación de Muestra

3.2.2 Procedimiento de la Prueba de Resistividad al Agua de Formación

3.2.3 Procedimiento de la Prueba de Resistividad a la Roca Reservorio

4.- PERMEABILIDAD

4.1 Conceptos Teóricos

4.1.1 Permeabilidad

4.1.2 Permeabilidad Absoluta

4.1.3 Permeabilidad Efectiva

4.1.4 Permeabilidad Relativa

5.- PRUEBA DE PERMEABILIDAD RELATIVA (AGUA-ACEITE)

5.1 Pruebas Preliminares a la Permeabilidad Relativa

5.1.1 Preparación de Muestra

5.1.2 Permeabilidad Absoluta

5.1.3 Permeabilidad Efectiva al Aceite a la Saturación Irreductible de agua

5.2 Procedimiento para Prueba de Permeabilidad Relativa Agua-Aceite

6.- PRUEBA DE PERMEABILIDAD RELATIVA (GAS-ACEITE)

6.1 Conceptos Teóricos

6.2 Procedimiento para la Prueba de Permeabilidad Relativa Gas-Aceite

7.- APLICACIONE EN INGENIERIA DE RESERVORIO, DE LOS PARAMETROS OBTENIDOS

8.- CALCULOS ECONOMICOS

8.1 Introducción

8.2 Cálculo de Costo para cada Prueba

8.3 Cuadro Comparativo

9.- ANEXOS - EJEMPLOS PRACTICOS

9.1 Saturación de Muestras

9.2 Presión Capilar (Aire-Agua)

9.3 Resistividad al Agua

9.4 Resistividad a la Roca

9.5 Permeabilidad Absoluta al Agua

9.6 Permeabilidad Efectiva al Aceite a la Saturación Irreductible de Agua

9.7 Permeabilidad Relativa, Agua-Aceite

9.8 Permeabilidad Relativa Gas - Aceite

10.- FIGURAS

11.- BIBLIOGRAFIA

SUMARIO

En el presente Trabajo, damos a conocer como se realizan las pruebas especiales de : Presión Capilar (Método membrana aire/agua), Resistividades (al agua y roca), permeabilidades (absolutas, efectivas, relativas gas/aceite y agua/aceite).

En primer lugar, se muestra un diagrama sobre la secuencia de las pruebas para lograr resultados representativos y además evitar que después las Muestras se deterioren y ya no sirven para otras pruebas.

Luego, veremos como se preparan los diferentes fluídos que se utilizan en las pruebas, asicomo la preparación de las Muestras de roca.

La Muestra ya preparada (lavada, secada y saturada) pasa primeramente por la prueba de presión capilar (Método membrana), esta misma muestra se vuelve a preparar para ejecutar las Pruebas de permeabilidades absolutas, efectivas para concluir con las permeabilidades relativas gas/aceite y agua/aceite.

Se muestra la aplicación de los resultados de estas pruebas en la Ingeniería de Petróleo.

En otro Capítulo, mostramos los cálculos económicos efectuados para cada tipo de prueba y por muestra, asimismo un cuadro comparativo de los costos en relación con otras Cías. de servicio en pruebas de laboratorio.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 1.- Las pruebas Especiales en roca reservorio son de gran importancia para el Ingeniero de Petróleo, mencionaremos algunas de sus aplicaciones: determinación del volumen de hidrocarburo, predicción del rendimiento del reservorio para poder explotarlo, lograr mejorar la calidad del agua requerida para los proyectos de Inyección de agua etc.
2. Como se observa en el punto 8 (Cálculos económicos), si estas pruebas se realizan en el extranjero costaría US\$ 230,560 al año y si lo hacemos en el país costarían US\$ 103,928, se ahorraría US\$ 126,632 al año para un total de 320 pruebas (Ver tabla VII).
- 3.- El costo total de los equipos para efectuar las pruebas mencionadas en la presente tesis es de US\$ 156,528, que se pagarían en 2 años si se efectúan las 320 pruebas al año según se menciona en la tabla VII.
- 4.- El ambiente en el cuál deben desarrollarse estas pruebas, debe tener extractores para evitar que los vapores de las sustancias químicas contaminen al usuario.
- 5.- Tener mucho cuidado en la preparación del agua sintética, esta debe ser en volúmenes estrictamente necesarios para la ejecución de la prueba, así se evitará la alteración del pH con el tiempo.
- 6.- La muestra de roca debe ser saturada con un porcentaje mayor del 90%, antes de ser utilizada en las pruebas.

- 7.- En las Pruebas de Presión Capilar por el método de membrana, cuando se efectúan las pesadas de las muestras en cada presión estabilizada, hay que tener cuidado que las muestras no permanezcan por mucho tiempo en contacto con el medio ambiente, para evitar alteraciones en los resultado.
- 8.- Es recomendable que las pruebas de permeabilidad al agua se efectúen en ambos sentidos para observar si se presentan diferencias de valores, esto indicaría si hay arrastres de granos finos o arcillosidad.
- 9.- Para las pruebas de permeabilidades efectivas al aceite hay que tener mucho cuidado en recuperar el agua que se está desplazando por ambos lados de la muestra.
- 10.- Antes de empezar con las pruebas de permeabilidades relativas gas/aceite y agua/aceite es muy importante que las muestras sean bien saturadas, con aceite.

1.- INTRODUCCION

Una de las herramientas más importantes para el Ingeniero de Petróleo, es el conocimiento de los parámetros petrofísicos, obtenidos con las pruebas que se realizan en el Laboratorio, con ellas se pueden hacer programas de exploración, operaciones de completación evaluación del reservorio, etc.

Estas pruebas las clasificaremos en Convencionales y Especiales.

Las Convencionales se realizan en corto tiempo, con los datos obtenidos podemos determinar la presencia de hidrocarburos (saturaciones de fluidos), capacidad de almacenamiento (porosidad) y habilidad de transmisión de la formación (permeabilidad).

Las Especiales vienen a ser, como una extensión de las Convencionales y se les llaman así, ya que para obtener los datos, se requieren de equipos de laboratorio más sofisticados y además los tiempos de estas pruebas son largos, de 4 a 8 semanas (caso de presión capilar). Entre las pruebas especiales tenemos : presión capilar, resistividad, permeabilidad absoluta al líquido, permeabilidad efectiva, permeabilidad relativa, pruebas de inundación a condiciones de reservorio.

En el presente Trabajo nos ocuparemos sólo de las pruebas de : Presión capilar (método membrana, aire-agua), resistividad al agua y roca, permeabilidad absoluta, permeabilidad efectiva y permeabilidades relativas (gas/aceite y agua/aceite).

Se definirán en forma muy sucinta los aspectos teóricos de todas las pruebas, para el que desee ampliar su teoría lo puede conseguir en los textos que se presentan en la Bibliografía. Cabe indicar que sólo se tratarán de estas pruebas por contar con los conocimientos teóricos, prácticos y los equipos adecuados.

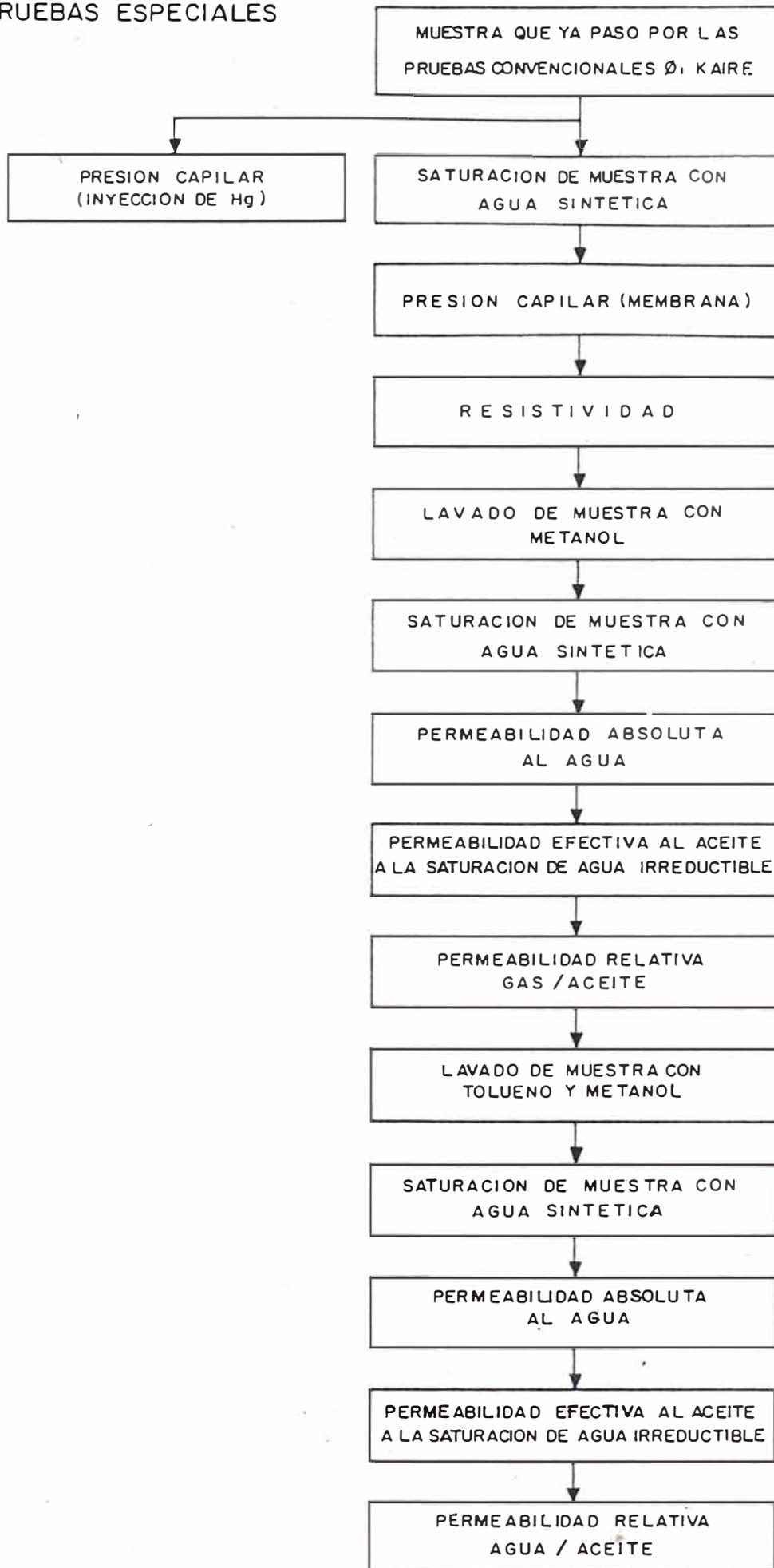
1.1 Diagrama del Proceso de Pruebas Especiales

Para efectuar las Pruebas Especiales en una muestra de roca reservorio hay que cumplir con una secuencia determinada (Ver el Diagrama adjunto), así se evitará que la Muestra se maltrate y ya no sirva para pruebas posteriores.

Una vez que la muestra ha pasado por las pruebas Convencionales (Saturaciones de Fluido, porosidad y permeabilidad) son utilizadas en las pruebas especiales, una parte de las Muestras se emplean en la Presión Capilar (Método inyección de mercurio) y otra parte es preparada para las otras pruebas como

Presión capilar (Método membrana, aire/agua), resistividades, permeabilidades: absolutas al agua, efectivas, relativas (gas/aceite, agua/aceite).

DIAGRAMA DEL PROCESO DE PRUEBAS ESPECIALES



2.- PRUEBA DE PRESION CAPILAR

2.1 Conceptos Teóricos

La presión capilar está definida como la presión diferencial que existe entre dos fluidos (ambos líquidos o un líquido y un gas) como resultado de la tensión interfacial que los separa, donde uno de los cuales moja preferentemente, la superficie de la roca, Matemáticamente se expresa como :

$$P_c = P_o - P_w$$

La presión capilar puede tener un valor positivo o negativo, dependiendo de la preferencia de mojabilidad.

La presión capilar gas-agua la definiremos como la presión en la fase gaseosa menos la presión en la fase del agua

$$P_c = P_g - P_w$$

Cuando en el reservorio están presentes dos fluidos, existen dos procesos DRENAJE e INHIBICION.

Drenaje.- El fluido no mojante desplaza al mojante, en este caso se produce reducción de la saturación de la fase que moja la roca.

Inhibición.- El fluido mojante desplaza al fluido no mojante, en este caso resulta un incremento de la saturación del fluido que moja la roca.

La mayoría de los reservorios en el mundo son mojados preferentemente con agua, en este caso ocurre el drenaje cuando el petróleo migra al reservorio e imbibición cuando producimos el reservorio.

En una prueba de presión capilar, la presión inicial se denomina "PRESION DE ENTRADA" o "PRESION DE DESPLAZAMIENTO".

2.2 Pruebas en Laboratorio (Método Aire-Agua)

2.2.1 Preparación de agua sintética

Según la tecnología, para las pruebas especiales no se utiliza el agua de formación del pozo, se hace preparar el Agua Sintética en la siguiente forma (Ver Fig. 1) :

1. Analizar el agua de formación.
2. Calcular los equivalentes en cloruros.
3. Tener listo los ingredientes : agua destilada, cloruros (calcio, potasio, magnesio, sodio etc.), ácido clorhídrico, hidróxido de sodio, cloruro de mercurio etc.
4. De acuerdo a lo calculado en el punto (2) efectuar la mezcla de los cloruros con el agua destilada.
5. Ajustar el pH de acuerdo a lo obtenido en el punto (1), para ésto, utilizar el ácido clorhídrico para bajar el pH y el hidróxido de sodio para subirlo.
6. Agregar 0.025 gr./lt. de cloruro de mercurio, para evitar la formación de hongos.
7. Filtrar el agua.
8. Determinar la densidad y viscosidad a condiciones ambientales.
9. Desgasificar el Agua Sintética.

2.2.2 Preparación de muestra

EQUIPOS NECESARIOS

Saturador
Bomba de Vacío
Vacuómetro de mercurio
Líneas, válvulas
Bomba de mano
Manómetro
Kitasato con sílica
Agua sintética

PROCEDIMIENTOS PARA SATURACION DE MUESTRA

1. Instalar el equipo de acuerdo a la Fig.2
2. Pesar las muestras secas y colocarlos en el saturador.
3. Cerrar las válvulas (V-1, V-2, V-3) y abrir la válvula (V-4).
4. Accionar la bomba de vacío hasta llegar al 1 TORR.
5. Cerrar V-4 y abrir V-2, hasta llenar el saturador con agua sintética, luego cerrar V-2.
6. Abrir V-1 y V-3, manteniendo cerradas las válvulas V-2 y V-4.
7. Accionar la bomba de mano hasta que en el manómetro marque 2000 psi., cerrar la V-1 y mantener presurizado el saturador por espacio de 48 horas.
8. Despresurizar el saturador, para esto, abrir la válvula (V-1).

9. Sacar la tapa del saturador, así como las muestras, colocar las muestras en un recipiente con agua sintética dentro de la campana de vidrio.
10. Pesar las muestras saturadas, efectuar los cálculos respectivas hasta que se consiga una cifra mayor del 90%.
11. Si no se cumple con el punto anterior, se continúa el proceso llevado a cabo inicialmente de Pasos 1 al 10.

Ver ejemplo práctico en anexo 9.1.

2.2.3 Preparación de Equipo

EQUIPOS NECESARIOS (Fig. 3)

Panel de Control de Presión

Celda

Plato de Cerámica

Presión de Aire

Bomba de Vacío

Agua Sintética

Líneas

PROCEDIMIENTO

1. Saturar el Plato Cerámico.

La saturación del Plato Cerámico puede efectuarse en la misma celda del equipo de la siguiente manera

- a. Sacar la tapa de la celda y colocar el plato cerámico seco.

- b. Colocar la tapa, ajustar el tornillo (T), mantener cerradas las válvulas (V-1, V-8) y abrir la válvula (V-2).
- c. Conectar la válvula (V-2) con la bomba de vacío y hacer vacío por espacio de 8 horas, luego cerrar (V-2).
- d. Conectar V-1 con una manguera hacia un depósito de Agua Sintética (evitar que se introduzca aire), abrir V-1 hasta llenar la celda con Agua Sintética luego cerrar V-1.
- e. Abrir V-6, V-5, V-3 y accinando V-4 llegamos hasta 35 psi.
- f. Abrir lentamente V-8 (se encuentra conectada con el orificio A del panel de control de presión), hasta que el manómetro marque 35 psi., mantener por 24 horas.
- g. Cerrar las válvulas V-2, V-8, abrir lentamente (V-1) hasta bajar completamente la presión.
- h. Sacar la tapa de la celda, sacar el plato cerámico y mantenerlo sumergido en Agua Sintética.
- i. Verificar si el plato está bien saturado esto se consigue de la siguiente forma

Colocar el plato saturado en la celda y asegurarlo con los 6 tornillos.

Conectar la salida de V-1 con una manguera y mantenerlo dentro de un recipiente con agua (la manguera debe estar libre de aire y sólo debe contener Agua Sintética).

De acuerdo al paso f, el panel está con 35 psi. de presión.

Abrir lentamente las válvulas V-8 y V-1.

Si por la manguera de V-1 no sale burbuja de aire, quiere decir que el plato está bien saturado.

Cerrar las válvulas (V-1, V-8) y bajar la presión accionando la válvula (V-4) hasta cero.

2.2.4 Procedimiento de la Prueba

1. Tener las muestras y el plato cerámico saturados.
2. Mantener V-1 conectado a una manguera (libre de aire) y dentro de un recipiente con Agua Sintética.
3. Abrir las válvulas (V-3, V-6, V-7, V-9) accionar V-4 hasta marcar 2 psi. en el manómetro B y accionar V-10 hasta conseguir 1 Psi. en el manómetro C.
4. Abrir V-8 y V-1 lentamente, a 1 Psi. por espacio de \pm 48 horas.
5. Cerrar V-8 y V-1 y abrir lentamente V-2, sacar la tapa la celda, sacar las muestras y pesarlas.
6. Continuar con los pasos 2, 3, 4, 5 y 6 hasta conseguir que se estabilice la presión, esto ocurre cuando la diferencia entre la pesada anterior y la actual es de < 0.02 grms.
7. Conseguida la estabilización a 1 Psi., colocar, sobre el plato cerámico y dentro de la celda.

8. Accionar V-4 hasta que el manómetro B marque 4 Psi., luego manipular V-10 hasta marcar 2 Psi. en el manómetro C.
9. Abrir lentamente V-8 y V-1, manteniéndolo hasta ± 48 horas.
10. Cerrar V-8, V-1 abrir lentamente V-2, sacar la tapa y las muestras.
11. Continuar con los pasos 8, 9, 10 y 11 hasta que la diferencia de pesadas entre la anterior y la actual sea < 0.02 mg.
12. Terminado de conseguir la estabilización de 2 Psi., colocar las muestras, sobre el plato cerámico y dentro de la celda luego colocar la tapa.
13. Accionar V-10 y subir la presión del manómetro C hasta llegar a 4 Psi., cerrar V-7, V-9.
14. Abrir V-5, accionar V-4 hasta que el manómetro B marque 4 Psi.
15. Abrir lentamente V-8 y V-1, dejándolo por espacio de ± 48 horas.
16. Cerrar V-8, V-1 abrir V-2 lentamente, sacar la tapa de la celda, sacar las muestras y pesarlas.
17. Continuar con los pasos 13, 14, 15, 16 y 17 hasta que la diferencia de pesadas entre la anterior y la actual sea < 0.02 mg.
18. Accionar V-4 hasta que el manómetro B marque 8 Psi., colocar las muestras, sobre el plato cerámico y dentro de la celda, luego colocar la tapa de la celda.
19. Abrir V-8, V-1 lentamente y mantenerlo por espacio ± 48 horas.

20. Cerrar V-8, V-1, abrir lentamente V-2., sacar la tapa y las muestras, pesar las muestras.
21. Continuar con los pasos 19, 20 y 21 hasta que la diferencia de pesada anterior a la actual sea de < 0.02 grs.
22. Repetir los pasos del 19 al 22 para 15Psi.
23. Cerrar V-6, accionar V-4 hasta que el manómetro A marque 35 Psi.
24. Colocar las muestras sobre el plato cerámico y colocarlo dentro de la celda luego tapar la celda.
25. Cerrar V-2 abrir lentamente V-8 y V-1 mantenerlo por espacio de ± 48 horas.
26. Cerrar V-8, V-1 abrir lentamente V-2 sacar las muestras y pesarlas.
27. Repetir los pasos del 25 al 27 hasta conseguir que la diferencia de pesadas entre la anterior y la actual sea < 0.02 Grms.
28. Aquí queda terminada la prueba, sacar las muestras lavarlas con metanol y guardarlo para otras pruebas.
29. Sacar el plato poroso lavarlo (desplazándolo con abundante agua) y guardarlo dentro de un recipiente de agua.
30. Con los datos ϕ , volumen bruto, pesada de las muestras, presiones se hacen los cálculos para graficar presiones Vs. saturaciones de Agua Sintética (Ver anexo 9.2).

3.- PRUEBA DE RESISTIVIDAD

3.1 Conceptos Teóricos

3.1.1 Resistividad del Agua.- Es su habilidad para impedir la circulación de una corriente eléctrica a través de si misma.

3.1.2 Resistividad de la Roca.- En ohm-metros es la resistencia en ohmios de un cubo de un metro de lado cuando la corriente fluye entre caras opuestas del mismo.

3.1.3 Indice de Resistividad.- Es la razón entre la resistividad de una muestra saturada parcialmente con agua salada y la resistividad de la muestra saturada 100% con agua salada.

3.1.4 Factor de formación.- Es la razón entre la resistividad de una muestra saturada al 100% con agua de formación y la resistividad del agua de formación.

3.2 Pruebas en Laboratorio en Agua de Formación y Roca Reservorio

3.2.1 Preparación de Muestra

El procedimiento para la preparación de la muestra es similar a lo efectuado para las pruebas de Presión Capilar (método aire-agua) y que figura en el punto 2.2.2.

3.2.2 Procedimiento de la Prueba de Resistividad al Agua de Formación EQUIPO NECESARIO

Resistómetro

Celda

Termómetro

Recipiente con Agua de Formación

PROCEDIMIENTO

1. Prender el equipo (Fig.4) por lo menos 30 minutos, antes de iniciar la prueba.
2. Conectar los cuatro cables de la celda en la parte (8) del equipo de resistividad.
3. En un recipiente limpio y seco, colocar el agua con un termómetro.
4. Introducir la celda (de vidrio) dentro del recipiente de agua, accionar (2) en posición de medida.
5. Accionar (6) hasta que (4) marque "0".
6. Accionar (3) y (5) hasta que en (4) marque "0".
7. En caso de no llegar a "0" accionar el (1) multiplicador, (3) y (5) hasta que en (4) marque "0".
8. Hacer la lectura en (5).
9. Leer en la celda la constante respectiva que será multiplicado por el valor presentado en (5).
10. El valor obtenido en el punto (9) será la resistividad del agua en ohm - mts. (Ver Anexo 9.3).
11. Accionar (2) hasta la posición de test y sacar los conectores de la celda.
12. Lavar la celda con abundante agua destilada y guardarlo.
13. Apagar el equipo y desconectarlo.

3.2.3 Procedimiento de la Prueba de Resistividad de la Roca Reservorio EQUIPOS (Fig. 4 y 5)

Revistómetro

Portanúcleo

PROCEDIMIENTO

1. Prender el equipo por lo menos 30 minutos antes de iniciar la prueba.
2. Conectar los 4 conductores del portanúcleo en el punto 8 del resistivímetro.
3. Colocar el núcleo saturado en el portanúcleo, colocar (2) en la posición de medida.
4. Accionar (6) hasta que en (4) marque "0".
5. Accionar (3) y (5) hasta que en (4) marque "0".
6. Efectuar la lectura en (5), este valor será la resistividad de la roca en ohm.

Esta prueba puede efectuarse paralelamente con la prueba de presión capilar (aire-agua) en cada intervalo de presión, siguiendo los mismos pasos que figuran del (3) al (6) del punto anterior.

Así se conseguirá valores de resistividad en ohm-m, de la roca para diferentes valores de saturaciones de agua de acuerdo a la prueba de presión capilar (plato poroso), Ver ejemplo de cálculo (Anexo 9.4).

4.- PERMEABILIDAD

4.1 Conceptos Teóricos

4.1.1 Permeabilidad

Es una propiedad de los medios porosos de la roca reservorio y es una medida de la capacidad del medio para transmitir fluidos. Se expresa en Darcy.

$$Q = \frac{K A}{\mu} \frac{dP}{dx}$$

donde :

Q = caudal del fluido

K = permeabilidad

A = área transversal al flujo

μ = Viscosidad del fluido

dp

-- = gradiente de presión

dx

Un darcy está definido como la permeabilidad a la cual un fluido de 1cp de viscosidad fluye a un caudal de 1 cm³./seg. a través de una sección transversal de 1 cm²., de área, cuando la gradiente de presión es de 1 atmósfera/cm.

La ley de Darcy se aplica bajo las siguientes condiciones :

- a) Flujo laminar
- b) Flujo lineal
- c) No hay reacción entre el fluido y la roca
- d) Sólo hay una fase presente al 100% de saturación en el espacio poral

4.1.2 Permeabilidad absoluta

Es la permeabilidad del medio poroso, el cuál está saturado 100% con el agua.

4.1.3 Permeabilidad efectiva

Es una medida relativa de la conductividad del medio poroso para un fluido que se encuentra en una sólo fase, cuando el medio está saturado por dos o más fluidos. En este caso, la permeabilidad no es propiedad únicamente de la roca reservorio, sinó también de su saturación e historia de las características de mojabilidad del medio.

4.1.4 Permeabilidad Relativa

Se define como la relación de la permeabilidad efectiva a un fluido específico con respecto a la permeabilidad absoluta. Donde el fluido específico puede ser petróleo, agua o gas.

$$K_{ro} = \frac{K_o}{K} \quad K_{rg} = \frac{K_g}{K} \quad K_{rw} = \frac{K_w}{K}$$

5. Pruebas de Permeabilidad Relativa (Agua-Aceite)

5.1 Pruebas Preliminares

5.1.1 Preparación de Muestra

El proceso de la preparación de muestras es similar a lo descrito en el punto 2.2.2 para la ejecución de las Prsiones Capiiars (método agua).

5.1.2 Permeabilidad Absoluta al Agua

EQUIPOS NECESARIOS (Fig.6)

Panel de Portanúcleo
Panel de Control de Presiones
Porta Núcleo
Acumulador
Bomba de Mano
Balón de Nitrógeno
Agua Sintética Desgasificada
Probeta
Cronómetro

PROCEDIMIENTOS

- 1.- Llenar el acumulador con Agua Sintética desgasificada.
- 2.- Instalar el equipo según diagrama.
- 3.- Pesar la muestra saturada y colocarla en el portánucleo con V-14 abierto.
- 4.- Abrir V-11, accionar la bomba de mano hasta que el manómetro G marque 200 psi. mayor que la presión de flujo.

- 5.- Cerrar V-14, accionar las válvulas del panel de control de presiones de acuerdo a la presión que se necesita en la siguiente forma

Manómetros	Válvulas Abiertas	<u>Regulador</u>
0-400	V-1, V-2	Botella de N2
0-160	V-2, V-5, V-6	Reg. A
0-15	V-2, V-3, V-5, V-7	Reg. B
Agua	V-2, V-3, V-4, V-5, V-8, V-10	Reg. C

- 6.- Abrir las dos válvulas del acumulador y V-15 para que ingrese Agua Sintética a través de la muestra.
- 7.- Recepcionar por lo menos 10 veces el volumen poral, de Agua Sintética a través del Orificio "0".
- 8.- Recoger 4 volúmenes de agua de 1 cc. cada una, midiéndose el tiempo de recepción de cada volumen.
- 9.- Los tiempos medidos (punto 8) deben ser de un rango ± 0.5 para sacar el promedio que será empleado en los cálculos.
- 10.- Teniendo los valores de presión, volumen, tiempo, datos de la muestra (longitud, diámetro), viscosidad del Agua Sintética se calcula la permeabilidad al agua utilizando la ecuación de Darcy. Ver los cálculos en el Anexo 9.5.

5.1.3 Permeabilidad Efectiva al Aceite a la Saturación Irreductible de Agua

EQUIPOS NECESARIOS (Fig.7)

Panel de Portanúcleo

Panel de Control de Presión

- Acumulador
- Bomba de Mano
- Balón de Nitrógeno
- Líneas

PROCEDIMIENTO

- 1.- Instalar el equipo de acuerdo a la Fig.7
- 2.- Llenar el acumulador con Aceite Desgasificado.
- 3.- La muestra que ha pasado por la prueba de permeabilidad absoluta al agua es utilizada en esta prueba.
- 4.- Colocar la muestra en el portanúcleo con V-14 abierto.
- 5.- Abrir V-11 y accionar la bomba de mano hasta que el manómetro G indique 200 Psi. mayor que la presión de flujo.
- 6.- Abrir las dos válvulas del acumulador y accionar las válvulas y reguladores del panel de control de presiones, de acuerdo a la presión requerida y según la tabla adjunta.

<u>Manómetros</u>	<u>Válvulas Abiertas</u>	<u>Regulador</u>
0-450	V-1, V-2	Botella de N2
0-160	V-2, V-5, V-6	Reg. A
0-15	V-2, V-3, V-5, V-7	Reg. B
Agua	V-2,V-3,V-4,V-5,V-8,V-10	Reg. C

- 7.- Colocar debajo del portanúcleo una trampa de aceite y un Erlenmeyer; esta trampa servirá para recepcionar el agua que sale de la muestra.

- 8.- Abrir V-15 y V-14 para desfogar un poco de aceite y así poder quitar burbujas de aire que haya podido quedar en el portánucleo.
- 9.- Recepcionar a través de "0" el agua contenida en la muestra y que está siendo desplazada por aceite.
- 10.- Cuando ya no se recepcione gota alguna de agua se recupera por lo menos 10 volúmenes porales de aceite.
- 11.- Tomar medidas de tiempo para 4 volúmenes de aceite de 1 cc. cada uno.
- 12.- Con los datos obtenidos de presión, volumen, tiempo, viscosidd del aceite, longitud y diámetro de la muestra y aplicando la ecuación de Darcy calculamos la permeabilidad efectiva al aceite a la saturación irreductible de agua (Ver Ejemplo Práctico en el Anexo 9.6).
- 13.- Terminada la prueba cerrar V-15, abrir V-14 y bajar la presión de la bomba de mano, sacar la muestra pasarla y dejarla dentro de un recipiente con aceite.
- 14.- Accionar las válvulas y reguladores para bajar la presión, cerrar el balón de nitrógeno.

5.2 Procedimiento para Prueba de Permeabilidad Relativa- Agua Aceite

EQUIPOS NECESARIOS

Panel de Control de Presión

Panel de Portanúcleo

Cronómetro

Bomba de Mano

Acumulador

Recipientes de vidrios de diferentes capacidades

PROCEDIMIENTO

- 1.- Instalar el equipo de acuerdo a la Fig. 7.
- 2.- Trabajar con una muestra que haya pasado por la prueba de permeabilidad efectiva al aceite.
- 3.- Llenar el acumulador con Agua Sintética desgasificada.
- 4.- Abrir (V-14) introducir la muestra reviamente pesada.
- 5.- Abrir (V-11) accionar la bomba de mano hasta una presión de 200 Psi. mayor que la presión de flujo a utilizarse.
- 6.- Cerrar (V-14), abrir las dos válvulas del acumulador y dar presión de flujo, para esto accionar las válvulas y reguladores del panel de control de presiones de acuerdo a lo siguiente

Manómetros	Válvulas Abiertas	Regulador
0-400	V-1, V-2	Botella de N2
0-160	V-2, V-5, V-6	Reg. A
0-15	V-2, V-3, V-5, V-7	Reg. B
Agua	V-2,V-3,V-4,V-5,V-8,V-10	Reg. C

- 7.- Preparar un tubo de ensayo graduado y colocarlo en la posición según Fig.7.
- 8.- Abrir V-14 y V-15 recepcionar un poco de agua por V-14 para quitar algunar burbujas de aire.
- 9.- Cerrar V-14 y recoger en un tubo graduado agua, cuando salga la primera gota de aceite se coloca el tubo descrito en el punto 7.

- 10.- Se va recepcionando por la parte inferior del portanúcleo agua y aceite, el agua se recibe en tubos de vidrio graduados y el aceite se mide en el tubo que se preparó según el punto 7, así mismo se toma el tiempo.
- 11.- Con el paso (10) se toman medidas de presión (constante), tiempo, volúmenes de aceite para cada medición de agua (1, 3, 6, 10, 25, 50, 100, 200, 400, 800, c.c. etc.) hasta que la relación volumen de agua al volumen total sea mayor o igual a 99.99%.
- 12.- Terminado con el punto (11), sacamos el tubo descrito en el punto (7) y recepcionamos por lo menos 10 volúmenes porales de agua sintética que se ha desplazado a través del núcleo.
- 13.- Medir 4 volúmenes de la 1cc. cada uno con sus respectivos tiempos, calcular la permeabilidad relativa del agua. Pesar la muestra y calcular la saturación final de agua (Ver Ejemplo Práctico en el anexo 9.7).
- 14.- Lavar la muestra con tolueno, metanol o guardarlo para pruebas posteriores.

6.- PRUEBA DE PERMEABILIDAD RELATIVA GAS-ACEITE

6.1 Preparación de Equipo (Fig.9)

EQUIPOS NECESARIOS

Panel de Control de Presiones.
 Panel de Portanúcleo.
 Panel que contiene los recipientes de vidrio
 para medir volúmenes de gas y aceite.
 Cronómetro
 Separador

6.2 Procedimiento para la prueba de permeabilidad relativa gas-aceite

PROCEDIMIENTO

- 1.- Instalar el equipo de acuerdo a la (Fig. 9).
- 2.- Preparar el separador de acuerdo a la (Fig 10) y efectuar lo siguiente :

Cortar un trozo de papel de filtro (Ver fig. (10) y pegarlo en el separador cubriendo el orificio por donde circula el gas.

Cortar un trozo de malla (Ver Fig.10) y pegarlo en el separador.
- 3.- Del panel de recipientes de vidrio, llenarlos con agua de la siguiente forma :

Conectar la salida de V-21 con el recipiente de Agua Sintética desgasificada, abrir V-20 y V-21 hasta llenar la bureta grande de 50 cc.

Cerrar V-20 y abrir V-19 hasta llenar el recipiente "I".

Cerrar V-19 y abrir V-18 hasta llenar el recipiente "H".

- Cerrar V-18 y abrir V-16 hasta llenar el recipiente "F".

Llenar las buretas con aceite de la siguiente forma :

- Conectar la salida de V-24 con la salida de aceite del separador.
 - Colocar el separador en un recipiente con aceite y elevarlo para poder llenar las buretas.
 - Maniobrar la válvula V-23 para llenar la bureta de 5 cc. con aceite hasta 0 cc.
 - Cerrar las válvulas V-24, V-23, V-22.
- 4.- Poner el portanúcleo en sentido horizontal, colocando en su interior la muestra de núcleo (que ya pasó por prueba de permeabilidad efectiva al aceite).
 - 5.- El lado izquierdo de portanúcleo va conectado al orificio P del panel de control de presiones.
 - 6.- La otra salida (gas) del separador va conectado a la bureta de agua.
 - 7.- Abrir V-11 y dar presión con la bomba de mano hasta que el manómetro 6 marque 200 Psi. mayor que la presión de flujo.
 - 8.- Accionar las válvulas y reguladores del panel de control de presiones según la tabla siguiente y de acuerdo a la presión necesaria :

<u>Manómetros</u>	<u>Válvulas Abiertas</u>	<u>Regulador</u>
0-400	V-1, V-2	Botella de N2
0-160	V-2, V-5, V-6	Reg. A
0-15	V-2, V-3, V-5, V-7	Reg. B
Agua	V-2, V-3, V-4, V-5, V-8, V-10	Reg. C

- 9.- Abrir V-21, V-20, V-24, V-23 y V-22, se observará como por un lado de V-21 se desfoga el agua a la vez que va incrementando el aceite en la probeta de 1 cc.
- 10.- Se van tomando las medidas de la bureta de agua y de la bureta de aceite hasta que llegue a 1 cc., y se miden los tiempos respectivos.
- 11.- Continuar la prueba manipulando V-22 para continuar con la bureta de 1.9 cc.
- 12.- Si se termina de vaciar el agua de la bureta grande de agua de 50 cc., se cierra V-20 y abrimos V-19 para continuar la prueba hasta que el recipiente I este vacío, luego cerrar V-19.
- 13.- Al terminar de llenarse la bureta de 1.9 cc. cerrar el paso de V-22 y accionar V-23 para trabajar con la bureta de 5 cc.
- 14.- Abrir V-18 continuar con las mediciones de Agua y Aceite al descargarse el recipiente H cerrar V-18, abrir V-16 continuar con la prueba hasta descargar el recipiente F, luego cerrar V-16.
- 15.- Si se desea continuar la medición de los volúmenes de gas, puede conectarse Z con un medidor de volumen de gas y se continúa la prueba.
- 16.- La prueba concluye cuando la relación entre el volumen de gas al volumen total de fluido es mayor que 99.999%.
- 17.- Con todos los datos obtenidos de volumen de gas, aceite, tiempos, presiones, viscosidades de los fluidos, porosidades, permeabilidades, se hacen los cálculos respectivos con la computadora para determinar las permeabilidades relativas al gas y al aceite (Ver Anexo 9.8).
- 18.- Con la información que se obtiene del computador graficamos en papel semi-log Kg/Ko Vs. saturación media de gas (%) y Krg Vs. saturación de

gas (%), se traza la mejor curva posible y se vuelve a confeccionar una tabla que contenga los valores de K_g/k_o , K_{rg} y saturación de gas.

- 19.- Con la tabla obtenida en el punto (18) se calcula el valor de K_{ro} , luego se confeccionan dos gráficos en papel semi-log, uno de K_{rg} y K_{ro} Vs. saturación de gas y otra de K_g/K_o Vs. saturación de gas.

7.- APLICACION EN INGENIERIA DE RESERVORIOS

- La presión capilar para determinar la saturación de agua en aquellos reservorios en que se cree que existe petróleo en la zona de transición.
- Para relacionar la saturación de agua con la porosidad y permeabilidad y altura encima del contacto agua-petróleo en el reservorio, subsecuentemente esta información es usada para calcular el volumen de hidrocarburo In situ.
- La permeabilidad al agua, indica la sensibilidad de la formación para varios tipos de aguas saladas, esto es usado para evaluar daño de la formación ocurrida por la filtración del fluido utilizado en la perforación o de inyección de agua.
- La resistividad para referir los valores de porosidad y saturación de agua obtenidos de los registros eléctricos.
- La permeabilidad relativa agua-aceite se usa para evaluar el comportamiento del reservorio por waterflood relacionar la recuperación de petróleo como función del corte de agua y volúmenes de agua inyectada.
- Determinar la saturación residual de fluido.
- Cálculo del flujo fraccional y avance frontal para determinar la distribución de los fluidos.
- Determinación de predicción futura cuando están involucrados fluidos de 2 fases.
- La permeabilidad relativa gas petróleo se usa junto con las propiedades de fluidos y ecuaciones de balance de materia para predecir presión, relación gas-aceite, comportamiento productivo para reservorios de gas-drive, también para avance de capa de gas, declinación de la productividad, etc.

8.- CALCULOS ECONOMICOS

8.1 Introducción

Como parte Económica mostramos Tablas del I al VII.

Las Tablas I al V muestran detalladamente como se han obtenido los costos por pruebas y muestras, en ello se mencionan los gastos por : materiales, energía eléctrica, mano de obra y equipos.

En el punto 8.3 Tabla VI se presenta una comparación de los costos por muestra, si lo enviáramos al extranjero, como comparación se ha escogido una Cía. de mayor experiencia a nivel mundial, en los costos no se han considerado los gastos por embalaje de las muestras y los costos han sido obtenidos de la lista de precios a En. 1984 (se adjunta dicha lista).

La Tabla VII muestra la cantidad de pruebas que se pueden efectuar en 1 año, como se observa si estas pruebas se hacen en laboratorios propios se ahorraría anualmente US\$ 126,632 contando con un sólo equipo para cada tipo de prueba.

Se adjunta una lista de precios de los equipos en general para las pruebas en muestras de roca reservorio.

De acuerdo a la economía efectuada y cuyas tablas se adjuntan, el costo total de los equipos para la ejecución de las pruebas mencionadas en esta Tesis es de US\$ 156,528 que se cancelarían en 2 años siempre y cuando se ejecuten las 320 pruebas anuales que se menciona en la Tabla VII.

8.2 Cálculo de costo para cada prueba

A continuación se presentan tablas de los costos de las pruebas.

TABLA I COSTO POR PRUEBA DE PRESION CAPILAR (METODO AIRE-AGUA) Y RESISTIVIDAD

1.- MATERIALES

	<u>US \$</u>
-Tolueno 1/2 Lt. (US\$4.5gal)	0.563
-Metanol 1/2 Lt. (US\$4.5/gal)	0.563
-Distamacea 6 grs. (US\$0.0.06/gr)	0.360
-Agua Sintética 1/2 LT. (US\$4.5/gal)	0.563
Sub-Total	2.049

2.- ENERGIA ELECTRICA (ASUMIENDO US\$ 0.015/Kw-Hr.)

-Centrifuga para lavado de muestras (165Hrs) HP=5, Kw=5 (0.75)=3.75,Kw=Hr=3.75x165=619	9.285
-Calentador para lavado de Muestras (165Hrs) 1080 watts=1.08Kw, Kw-Kr = 178.2	2.673
-Horno para secado de Muestras, (3hrs) 750 watts=0.75Kw,Kw-Hr=0.75x2=2.25	0.034
-Pesada de 1 muestra con Balanza eléct.(10min.) (10/17 Hrs.)1/2HP,Kw=0.375 Kw-Hr=0.375x0.17	0.001
-Compresora para dar presión durante la prueba, 580Hrs.HP=1/2,Kw=1/2(3/4)=0.375,Kw-Hr= 0.375x580=217.5	3.262
-Bomba de vacío para saturación de muestras y plato poroso 24 Hrs.,HP=1/2,Kw=1/2(3/4)= 0.375 Kw-Hr=9	0.135
Sub-Total	15.39

3.- MANO DE OBRA

-1 sola persona sueldo US\$ 500 (8Hrs/día)	86.00
resulta US\$2/Hr, costo por 43Hrs. de trabajo	
Sub-Total	86.000

4.- EQUIPO

Consideramos 15 años de vida para el equipo	
-Presión Capilar costó US\$ 24,878 (1980),	112.48
US\$ 0.19/Hr. utilizaremos 592 Hrs.	
-Resistividad costó US\$4,988,US\$0.04/Hr.,	0.240
utilizaremos 6 Hrs.	
-Centrífuga costó US\$6,887, US\$0.05/Hr,	8.250
utilizaremos 165 Hrs.	
-Calentador costó US\$35,US\$0.0003/Hr,	0.050
utilizaremos 16 Hrs.	
-Horno costó US\$1,545,US\$0.012/HR,utilizaremos	0.036
13 Hrs.	
-Balanza costó US\$ 2,750, US\$0.02/Hr.,utiliza-	0.001
remos 10 min.	
-Compresora costó US\$ 425,US\$ 0.003/Hr, utili-	1.740
zaremos 580 Hrs.	
-Bomba de vacío costó US\$1,080, utiliz. 24hrs.	0.192
Sub-Total	122.989
TOTAL	226.428

TABLA II
COSTO PARA EFECTUAR PERMEABILIDAD ABSOLUTA AL AGUA

1.- MATERIALES

	<u>US\$</u>
-Tolueno 1/2 Lt. a US\$ 4.5/gal.	0.563
-Metanol 1/2 Lt. a US\$ 4.5/gal.	0.563
-Agua Sintética 1/2 LT. a US\$4.5/gal.	0.563
Sub-Total	1.689

2.- ENERGIA ELECTRICA (ASUMIENDO US\$ 0.015/Kw-Hr.)

-Centrífuga para lavado de muestras 165 Hrs. HP=5, Kw=5 (0.75)=3.75,Kw=Hr=3.75x160	9.000
-Calentador para lavado de Muestras 160 Hrs. 1080 watts=1.08Kw, Kw-Kr = 172.8	2.592
-Horno para secado de Muestras, 3 hrs. 750 watts=0.75Kw,Kw-Hr=0.75x2=2.25	0.034
-Pesada de 1 muestra con Balanza eléct.10 min. (0/17 Hrs.)1/2HP, Kw=0.375 Kw-Hr=0.375x0.17	0.001
Sub-Total	11.627

3.- MANO DE OB

1 sola persona sueldo US\$ 500 (8Hrs/día de trabajo) resulta US\$ 2/Hr, costo por 107 Hrs.	214.000
Sub-Total	214.000

4.- EQUIPO

Consideramos 15 años de vida para el equipo

-Equipo de permeabilidad al liquido costó US\$ 30,710 US\$0.234/Hr,utilizaremos 48 hrs.	11.232
-Centrifuga costó US\$6,887,US\$0.05/Hr,utilizaremos 160 Hrs.	0.050
-Calentador costó US35,US\$0.0003/Hr, utilizaremos 160 Hrs.	0.050
-Homo costó US\$1545,US\$0.012/Hr, utilizaremos 3 Hrs.	0.040
-Balanza costó US\$2,750,US\$0.02/Hr, utilizaremos 10 min.	0.010
Sub-Total	19.332
TOTAL	246.648

TABLA III
COSTO PARA PERMEABILIDAD EFECTIVA AL ACEITE

1.- MATERIALES

US \$

-Tolueno 1/2 Lt. a US\$ 4.5/gal.	0.563
-Metanol 1/2 Lt. a US\$ 4.5/gal.	0.563
-Agua Sintética 1/2 LT. a US\$4.5/gal.	0.563
-Aceite de Laboratorio 2 Lts.a US\$ 12/Gal.	6.000
Sub-Total :	7.689

2.- ENERGIA ELECTRICA (ASUMIENDO US\$ 0.015/Kw-Hr.)

-Centrífuga para lavado de muestras 165 Hrs. HP=5, Kw=5 (0.75)=3.75,Kw=Hr=3.75x160	9.000
-Calentador para lavado de Muestras 165 Hrs. 1080 watts=1.08Kw, Kw-Kr = 178.2	2.592
-Horno para secado de Muestras, 3 hrs. 750 watts=0.75Kw,Kw-Hr=0.75x2=2.25	0.033
-Pesada de 1 muestra con Balanza eléct.10 min. (0/17 Hrs.)1/2HP,Kw=0.375 Kw-Hr=0.375x0.17	0.009
Sub-Total	11.715

3.- MANO DE OBRA

1 sola persona sueldo US\$ 500 (8Hrs/día consulta)	
US\$ 2/Hr, costo por 107 Hrs. de trabajo	214.000
Sub-Total	214.000

4.- EQUIPO

Consideramos 15 años de vida para cada equipo

-Equipo de permeabilidad costó US\$30,710 US\$ 0.234/Hr, utilizaremos 120 Hrs.	28.080
-Centrífuga costó US\$6,887, US\$0.05/Hr, utilizaremos 165 Hrs.	8.000
-Calentador costó US\$ 35, US\$ 16 Hrs.	0.050
-Horno costó US\$1,545,US\$0.012/HR,utilizaremos 3 Hrs.	0.040
-Balanza costó US\$2,750,US\$0.02/Hr., utilizaremos 10 min.	0.010

Sub-Total **36.180**

TOTAL **269.584**

TABLA IV
COSTO PARA EFECTUAR PERMEABILIDAD RELATIVA AGUA/ACEITE

1.- MATERIALES

	<u>US\$</u>
-Tolueno 1/2 Lt. a US\$ 4.5/gal.	0.563
-Metanol 1/2 Lt. a US\$ 4.5/gal.	0.563
-Agua Sintética 10 Lts. a US\$4.5/gal.	11.250
-Aceite de laboratorio 5 Lts. a US\$12/Gal.	15.000
-Nitrógeno 1 Balón a US\$60	60.000
Sub-Total	87.376

2.- ENERGIA ELECTRICA (ASUMIENDO US\$ 0.015/Kw-Hr.)

-Centrífuga para lavado de muestras 160 Hrs.	9.000
HP=5, Kw=5 (0.75)=3.75, Kw=Hr=3.75x160=600	
-Calentador para lavado de Muestras 160 Hrs.	2.595
1080 watts=1.08Kw, Kw-Kr = 172.8	
-Horno para secado de Muestras, 3 hrs.	0.023
750 watts=0.75Kw, Kw-Hr=0.75x2=1.5	
-Pesaja de 1 muestra con Balanza eléct. 10 min.	0.090
-Bomba de vacío para saturar las muestras, 48 hrs.	0.270
HP=1/2, Kw=1/2(3/4)=0.375, Kw-Hr=0.375x48=18	
Sub-Total	11.978

3.- MANO DE OBRA

1 sola persona sueldo US\$ 500 (8Hrs/día) resulta US\$ 2/Hr, costo para 125 Hrs.	250.000
Sub-Total	250.000

4.- EQUIPOS

Consideramos 15 años de vida para cada equipo	
-Permeabilidad relativa Agua-Aceite costó 30,710 US\$0.234/Hr, utilizaremos 96 Hrs.	22.464
-Centrífuga costó US\$6,887, US\$0.05/Hr, utiliza- remos 160Hrs.	8.000
-Calentador costó US\$35,US\$0.0003/Hr, utiliza- remos 160 Hrs.	0.050
-Horno costó US\$1,545,US\$0.012/HR,utilizaremos 24 Hrs.	0.029
-Balanza costó US\$2,750,US\$0.02/Hr., utili- zaremos 10 min.	0.200
-Bomba de vacío costó US\$1,080, utiliz. 24 Hrs.	0.380
Sub-Total	31.348
TOTAL	380.702

TABLA V
COSTO PARA PERMEABILIDAD RELATIVA GAS/ACEITE

1.- MATERIALES

	<u>US \$</u>
-Tolueno 1/2 Lt. a US\$ 4.6/gal.	0.563
-Metanol 1/2 Lt. a US\$ 4.5/gal.	0.563
-Agua Sintética 10 Lts. a US\$4.5/gal.	11.250
-Aceite de laboratorio 5 LTs. a US\$12/gal.	15.000
-Nitrógeno 1 balón a US\$ 60	60.000
Sub-Total	87.376

2.- ENERGIA ELECTRICA (ASUMIENDO US\$ 0.015/Kw-Hr.)

-Centrífuga para lavado de muestras 160 Hrs. HP=5, Kw=5 (0.75)=3.75, Kw=Hr=3.75x160=600	9.000
-Calentador para lavado de Muestras 160 Hrs. 1080 watts=1.08Kw, Kw-Kr = 172.8	2.595
-Horno para secado de Muestras, 2 hrs. 750 watts=0.75Kw, Kw-Hr=0.75x2=1.5	0.023
-Pesada de 1 muestra con Balanza eléct.10 min.	0.090
-Bomba de vacío para saturar muestras,68 Hrs. HP=1/2, Kw=1/2(3/4)=0.375, Kw=Hr=0.375x68	3.825
Sub-Total	15.533

3.- MANO DE OBRA

2 personas sueldo total US\$10 () (8 Hrs/día)=US\$4/Hr, costo por 124 Hrs.	496.000
Sub-Total	496.000

4.- EQUIPO

Consideramos 15 años de vida útil

-Permeabilidad Relativa gas/aceite costó US\$34,532

US\$0.263/Hr, utilizaremos 96 Hrs.

5.250

-Centrífuga costó US\$6,887, US\$0.05/Hr, utilizaremos 160 Hrs.

8.000

-Calentador costó US\$0.0003/Hrs, utiliz. 160 Hrs.

0.048

-Horno costó US\$1,545,US\$0.012/HR,util. 2 Hrs.

0.024

-Bomba de vacío costó US\$1,080,US\$0.08/Hr, utilizaremos 68 hrs.

0.544

Sub-Total

33.867

TOTAL

632.776

8.3 Cuadro Comparativo

CUADRO COMPARATIVO DE COSTOS POR MUESTRAS PARA ANALISIS ESPECIALES

TABLA VI

<u>TIPOS DE PRUEBAS</u>	<u>PAIS</u>	<u>US\$</u>
		<u>Extr.</u>
-Presión Capilar (Método, Aire-Agua y Resistividad)	226	500
-Permeabilidad Absoluta al Agua	247	220
-Permeab. Efect. Al Aceite a la Sw irred.	270	490
-Permeabilidad Relativa Gas/Aceite	633	1590
-Permeabilidad Relativa Agua/Aceite	381	1590

Nota Los precios de la Cía.Corelab han sido obtenidos de la lista de precios a En.1984 y no se consideran gastos por transportes

TABLA VII

CUADRO COMPARATIVO DE COSTOS ANUALES POR PRUEBAS ESPECIALES

<u>Tipos de Pruebas</u>	<u>No Prueb.</u> <u>Por año</u>	<u>PAIS</u>	<u>US\$</u>
			<u>Extr.</u>
- Presión Capilar (Método Membrana y resistividad)	56	12656	28,000
- Permeabilidad Absoluta al agua	120	29640	26,400
- Permeabilidad Efectiva al Aceite	48	12960	23,520
- Permeabilidad Relativa Gas/Aceite	48	3038	76,320
- Permeabilidad Relativa Agua/Aceite	48	1828	76,320
TOTAL	320	103928	230,560

9.- ANEXOS - EJEMPLOS PRACTICOS

- 9.1 Saturación de Muestras
- 9.2 Presión Capilar (Aire-Agua)
- 9.3 Resistividad al Agua
- 9.4 Resistividad a la Roca
- 9.5 Permeabilidad Absoluta al agua
- 9.6 Permeabilidad Efectiva al aceite a la saturación irreductible de agua
- 9.7 Permeabilidad Relativa Agua-Aceite
- 9.8 Permeabilidad Relativa Gas-Aceite

ANEXO 9.1 - EJEMPLO PRACTICOSATURACION DE MUESTRADATOS REQUERIDOS

Porosidad (%), (ϕ)	=	16.7
Longitud de Muestra (cm), (L)	=	5.95
Diámetro de la Muestra (cm), (D)	=	3.76
Peso Muestra Seca (gr), (FMse)	=	143.05
Peso Muestra Saturada (gm), (FMsa)	=	153.66
Densidad del Agua Sintética (gr/cc), (ρ_w)	=	1.0478

$$\begin{aligned}
 VP_c &= \text{Volumen Poroso Calculado} = (\phi) (L) (D/2) (\pi) \\
 &= 0.167 (5.95) (3.76/2) (3.1416) \\
 &= 11.0331 \text{ cc}
 \end{aligned}$$

$$VP = (FMsa - FMse) / (\rho_w) = (153.66 - 143.05) / 1.0478 = 10.1250 \text{ cc}$$

$$\begin{aligned}
 (VP / VP_c) \times (100) &= (10.1259 / 11.0331) (100) \\
 &= 91.78\%
 \end{aligned}$$

ANEXO 9.2 - EJEMPLO PRACTICOPRESION CAPILAR (AIRE - AGUA)DATOS REQUERIDOS

Permeabilidad al aire, (md)	= 290
Porosidad, (%)	= 19.3
Peso Muestra Seca, (gr)	= 106.1473
Peso inicial de Muestra Saturada	= 114.667

DATOS DE LA PRUEBA

	Presión (psi)	Peso (gr)	Sat.de agua (%)
	1	113.667	88.57
	2	110.4505	50.69
	4	108.9727	33.28
	8	108.5138	27.87
	15	108.2462	24.72
	35	107.8157	9.65

CALCULOS

$$\text{Saturación} = (P_{Sp} - P_{Ms}) / (P_{St} - P_{Ms})$$

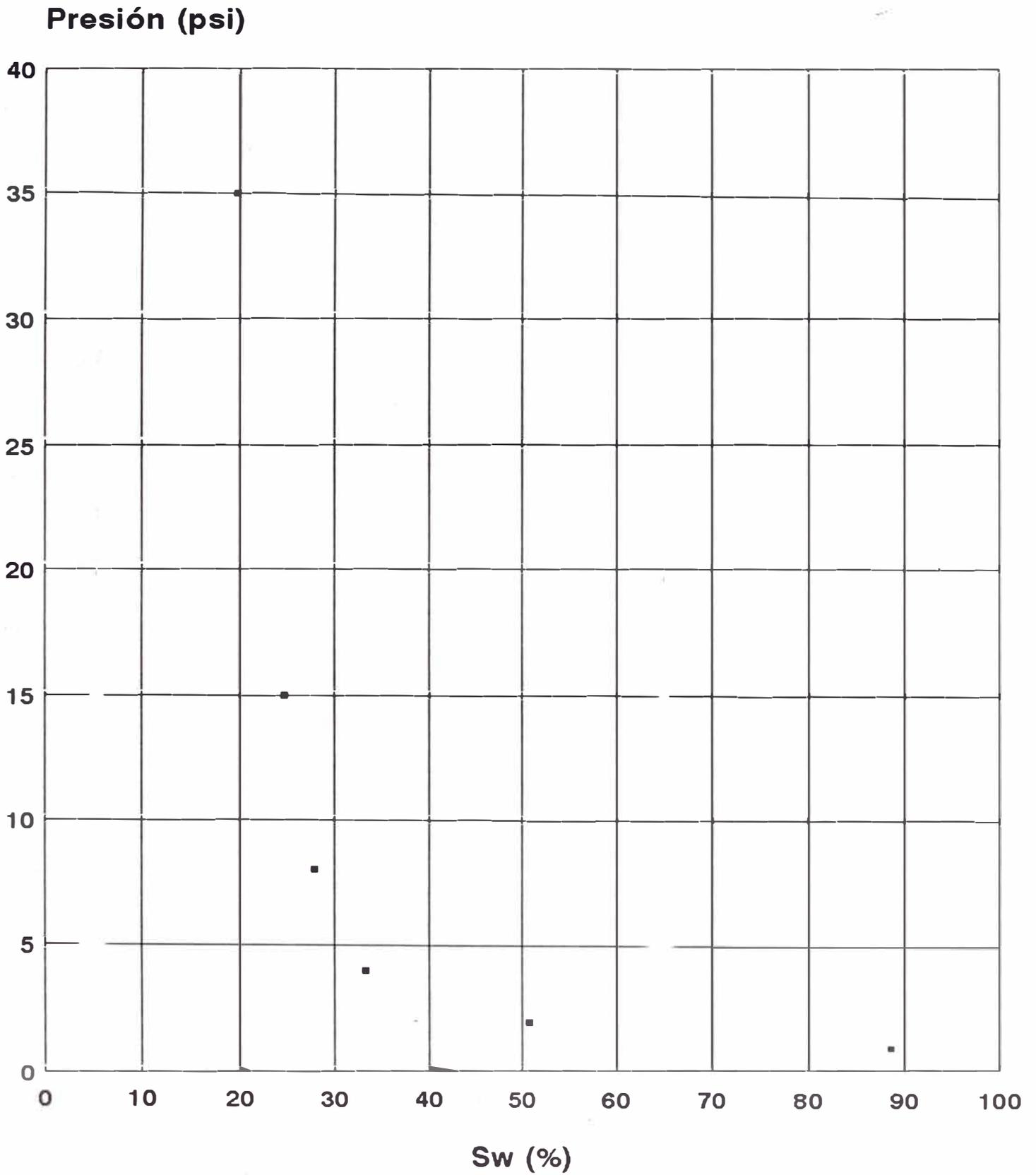
P_{Sp} = Peso de la muestra satur. a una determinada presión

P_{St} = Peso de la muestra saturada al 100 %

P_{Ms} = Peso de la muestra seca

GRAFICO A

PRESION CAPILAR (AIRE-AGUA)



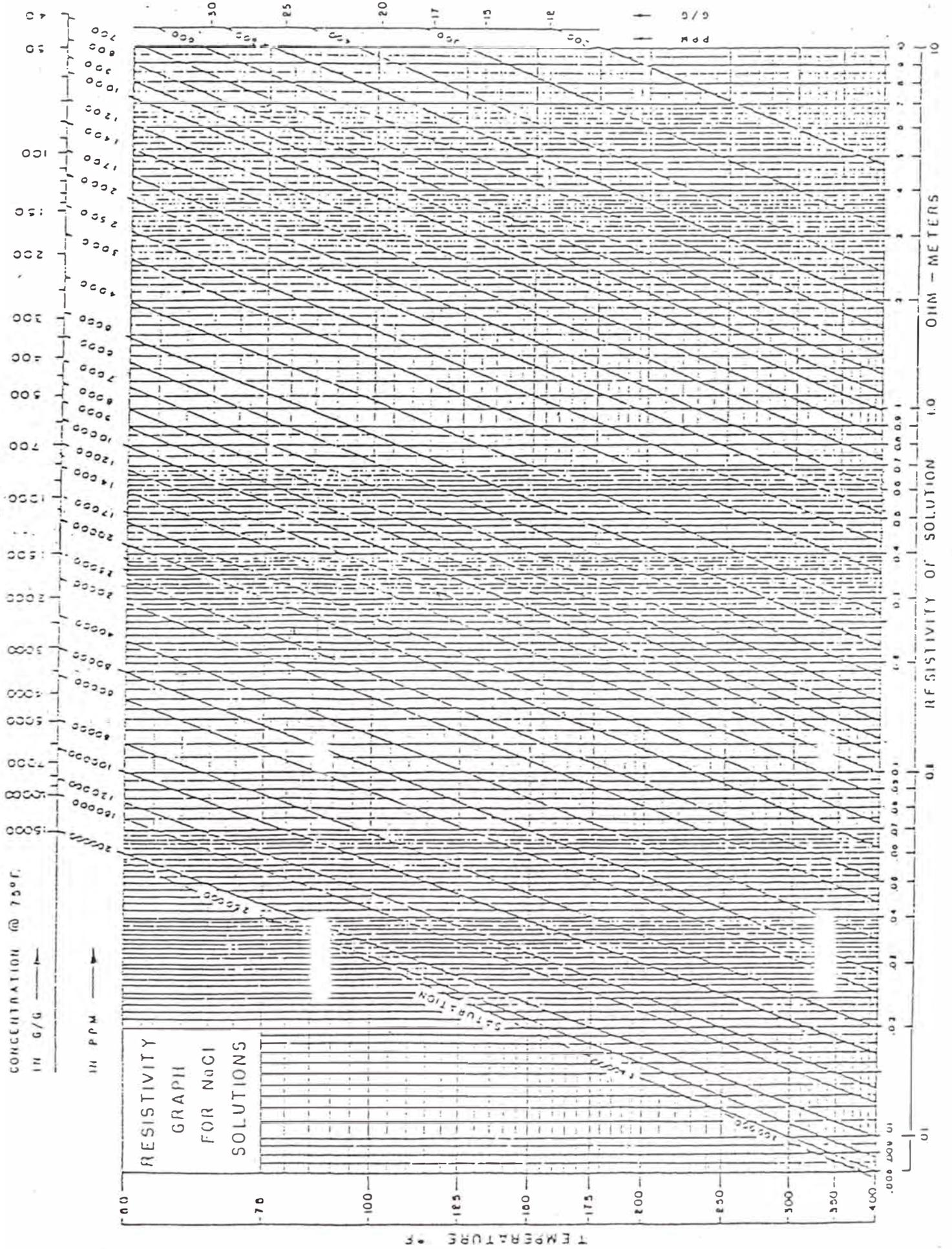
ANEXO 9.3 - EJEMPLO PRACTICORESISTIVIDAD DEL AGUADATOS OBTENIDOS DE LA PRUEBA

Resistividad del agua (ohms), (rw)	= 68
Constancia de la Celda	= 0.001
Temperatura del agua	= 59 °f

CALCULOS

$$\begin{aligned} - \text{Resistividad del Agua (ohms-mts), (Rw)} &= 68 \times 0.001 \\ &= 0.068 \text{ ohms-mts} \end{aligned}$$

Con los valores de Rw y la Temperatura nos dirigimos al gráfico "B" y hallamos la Salinidad del agua en (ppm) en este caso resulta = 150,000ppm.



ANEXO 9.4 - EJEMPLO PRACTICO

RESISTIVIDAD DE LA ROCA

DATOS OBTENIDOS DE LA PRUEBA

Resistividad del agua (ohm), (r_w) = 53.39
 Constante de la Celda (mts) = 0.001
 Temperatura (F), (T_w) = 59

Sw (%)	r_o (ohms)	r_t (ohms)	L (cm)	D (cm)	A (cm ²)	R_o (ohm-mt)	R_t (ohm-mt)	FF	IR
100	42.397	42.397	5.31	3.784	11.24	0.898	0.898	16.81	1
98	48.678						1.0309		1.148
97.8	49.463						1.0475		1.167
94	65.950						1.3967		1.556
86	124.049						2.6272		2.926
83	156.240						3.3089		3.685

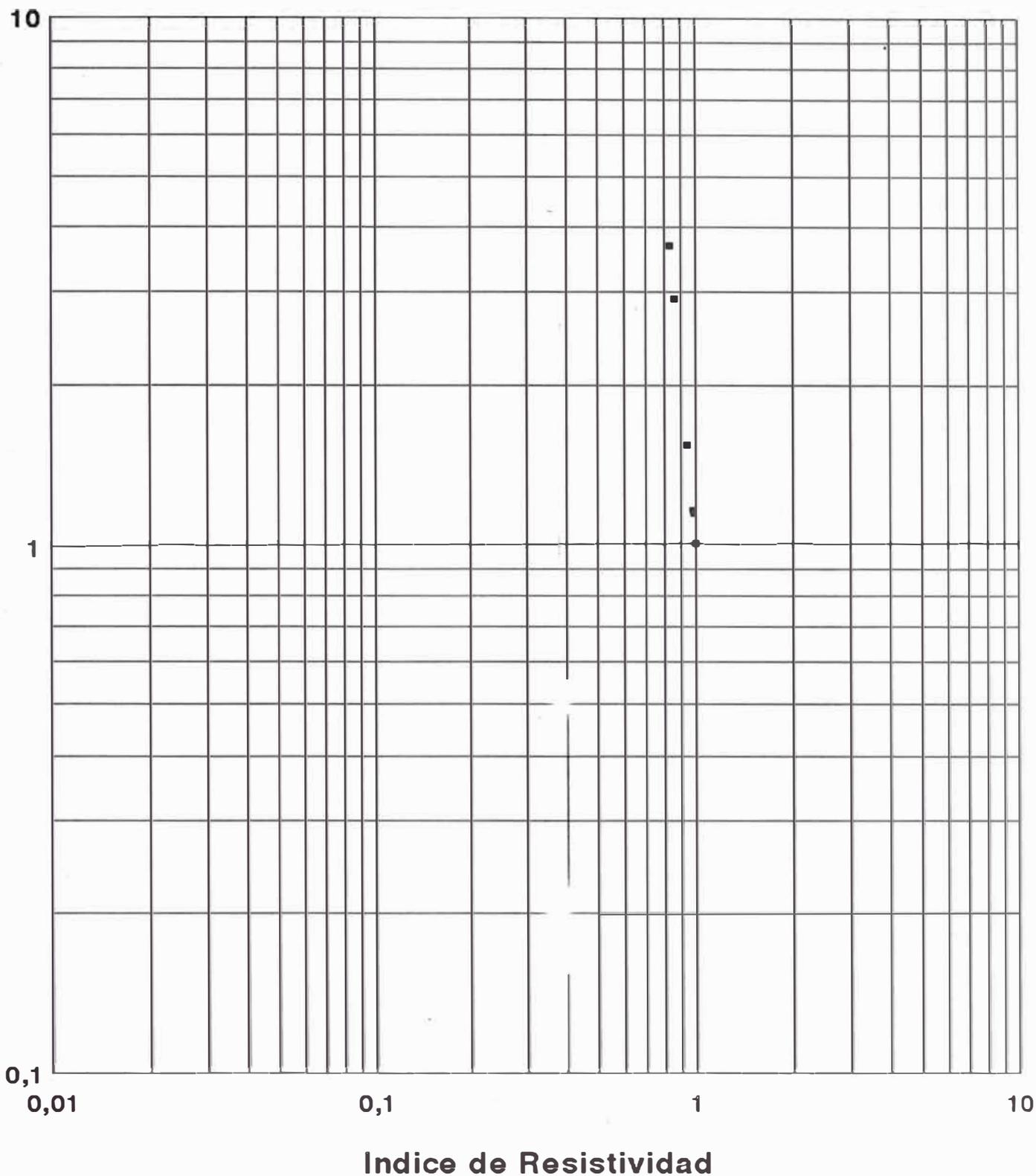
CALCULO

R_o (ohm-mt) = $r_o(\text{ohms}) \times A/100L$
 R_t (ohm-mt) = $r_t(\text{ohms}) \times A/100L$
 Indice de Resistividad (IR) = R_t/R_o
 Factor de Formación de Resistividad (FF) = R_o/R_w

GRAFICO C

RESISTIVIDAD DE LA ROCA

Saturación de Agua (%)



ANEXO 9.5 - EJEMPLO PRACTICOPRUEBA DE PERMEABILIDAD ABSOLUTA AL AGUADATOS

Viscosidad del Agua Sintética (cp), (μ_w)	= 1.28
Longitud de la muestra (cm), (L)	= 5.34
Diámetro de la muestra (cm), (D)	= 3.78
Volumen de agua (cc), (V_w)	= 1
Presión de flujo (psi), (P_f)	= 2
Tiempo (seg), (T)	=35.87
Permeabilidad al aire (md), (K_a)	=163.5
Porosidad (%), (ϕ)	= 15.6
Area (cm ²), (A)	=11.22

$$K_w = V_w \mu_w L (1000) (14.7) / P_f T A$$

$$= (1) (1.28) (5.34) (1000) (14.7) / (2) (35.8) (11.22)$$

$$= 125.1 \text{ md}$$

ANEXO 9.6 - EJEMPLO PRACTICOPRUEBA DE PERMEABILIDAD EFECTIVA AL ACEITE A LA SwirrDATOS

Viscosidad del aceite (cp), (μ)	= 16
Longitud de la muestra (cm), (L)	= 5.34
Diámetro de la muestra (cm), (D)	= 3.78
Volumen de aceite (cc), (V_o)	= 1
Presión de flujo (psi), (Pf)	= 25
Tiempo (seg), (T)	= 39.3
Permeabilidad al aire (md), (K_a)	= 163.5
Permeabilidad absoluta al agua (md), (K_w)	= 125.1
Porosidad (%), (ϕ)	= 15.6
Area (cm ²), (A)	= 11.22
Volumen de agua desplazado (cc), (V_{wd})	= 7.1

CALCULO

$$\begin{aligned}
 K_{eo} &= V_o \mu L (1000) (14.7) / PAT \\
 &= 1 (16) (5.34) (1000) (14.7) / 25 (11.22) (39.3) \\
 &= 110.8 \text{ md}
 \end{aligned}$$

CALCULO DE LA Swirr

$$\begin{aligned}
 Swirr &= (\text{Vol. Por. Calc.} - \text{Vol. Agua Desp.}) / \text{Vol Por. Calc.} \\
 &= ((\phi A L) - V_{wd}) / \phi A L \\
 &= (0.156 \times 11.22 \times 5.34 - 7.1) / 0.156(11.22)(5.34) \\
 &= 4\%
 \end{aligned}$$

ANEXO 9.7 - EJEMPLO PRACTICOPERMEABILIDAD RELATIVA AGUA - ACEITEDATOS REQUERIDOS

Viscosidad del agua (cp)	= 1.16
Viscosidad del aceite (cp)	= 16.8
Porosidad (%)	= 17
Ko a la Swirr (md)	= 113
Area de la muestra (cm ²)	= 11.10
Saturación de agua (%)	= 35

RESULTADOS

<u>Sw(%)</u>	<u>Kw/Ko</u>	<u>Krw</u>	<u>Kro</u>
42.91	0.1866	0.0608	0.3258
45.69	0.3634	0.076	0.2093
50.84	0.8573	0.1045	0.1219
56.59	2.381	0.1424	0.0598
59.65	4.665	0.1709	0.0366
63.48	10.4618	0.2197	0.0210
67.53	28.7698	0.2564	0.0089
70.17	65.7596	0.2922	0.0044
72.63	162.465	0.3138	0.0019
74.21	306.8783	0.3233	0.0011

PERMEABILIDAD RELATIVA AGUA -ACEITE

Wi	Oi	Wi= Wi-Wi-	Oi= Oi-Oi-1	P	Rfi Wi/ Oi	Kw/Ko Rfx w/ o	Vi= Vi=Wi+Oi	Vi= (Wi+ Oi)/2	Vi= Vi-1+ V	Oi= Oi=	Oi/2	Oi-1+ Oi	Foi= /Rfi+1	Si= VixFoi
0.04	1.14			10			1.18							
1.04	1.51	1	0.37	„	2.7027	0.1866	2.55	0.685	1.865	0.185	1.325	0.2701	0.5037	
4.04	2.08	3	0.57	„	5.2632	0.3634	6.12	1.785	4.335	0.285	1.795	0.1597	0.6921	
10	2.56	5.96	0.48	„	12.4167	0.3113	12.56	3.22	9.34	0.24	2.32	0.0745	0.6961	
20	2.85	10	0.29	„	34.4828	2.381	22.85	5.145	17.705	0.145	2.705	0.0282	0.4999	
45	3.22	25	0.37	„	67.5676	4.6654	48.22	12.685	35.535	0.185	3.035	0.0146	0.5182	
95	3.55	50	0.33	„	151.515	10.4618	98.55	25.165	73.385	0.165	3.385	0.0066	0.4812	
195	3.79	100	0.24	„	416.667	28.7698	198.79	50.12	148.67	0.12	3.67	0.0024	0.356	
395	4	200	0.21	„	952.381	65.7596	399	100.105	298.895	0.105	3.895	0.001	0.3135	
795	4.17	400	0.17	„	2352.94	162.465	799.17	200.085	599.085	0.085	4.085	0.0004	0.2545	
1195	4.26	400	0.09	„	4444.44	306.8783	1199.26	200.045	999.215	0.045	4.215	0.0002	0.2248	

PERMEABILIDAD RELATIVA AGUA -ACEITE

$V_{wi}=O_i - S_i$	$S_{wi} = \frac{V_{wi}}{V_P + S_{wirr}}$	T_i	$T_i = T_i - T_{i-1}$	$C_2 = \frac{wL((14.7)10}{AK P}$	$Q_{wi} = \frac{W_i}{T_i}$	$K_{rw} = C_2 \times Q_{wi}$	$S_{wmi} = \frac{O_i}{V_P + S_{wirr}}$
		0		8.086			
0.8213	0.4291	133	133	„	0.0075	0.0608	0.4789
1.1029	0.4569	452	319	„	0.0094	0.076	0.5253
1.6239	0.5084	913	461	„	0.0129	0.1045	0.5771
2.206	0.5659	1481	568	„	0.0176	0.1424	0.6151
2.5168	0.5965	2664	1183	„	0.0211	0.1709	0.6477
2.9038	0.6348	4504	1840	„	0.0272	0.2197	0.6823
3.314	0.6753	7658	3154	„	0.0317	0.2564	0.7104
3.5815	0.7017	13192	5534	„	0.0361	0.2922	0.7327
3.8305	0.7263	23500	10308	„	0.0388	0.3138	0.7514
3.9902	0.7421	33503	10003	„	0.04	0.3233	0.7643

GRAFICO D

PERMEABILIDAD RELATIVA AGUA-ACEITE

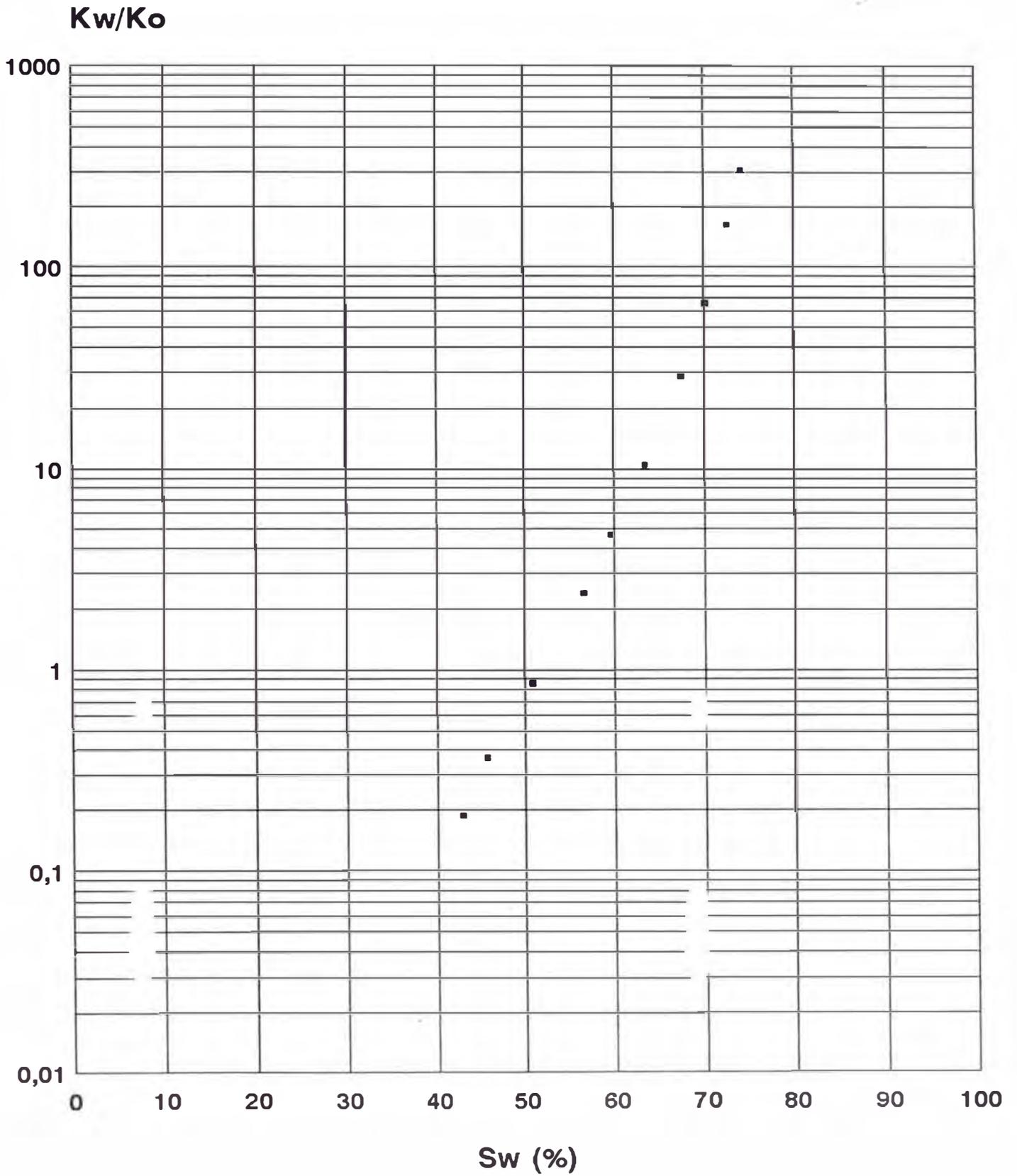
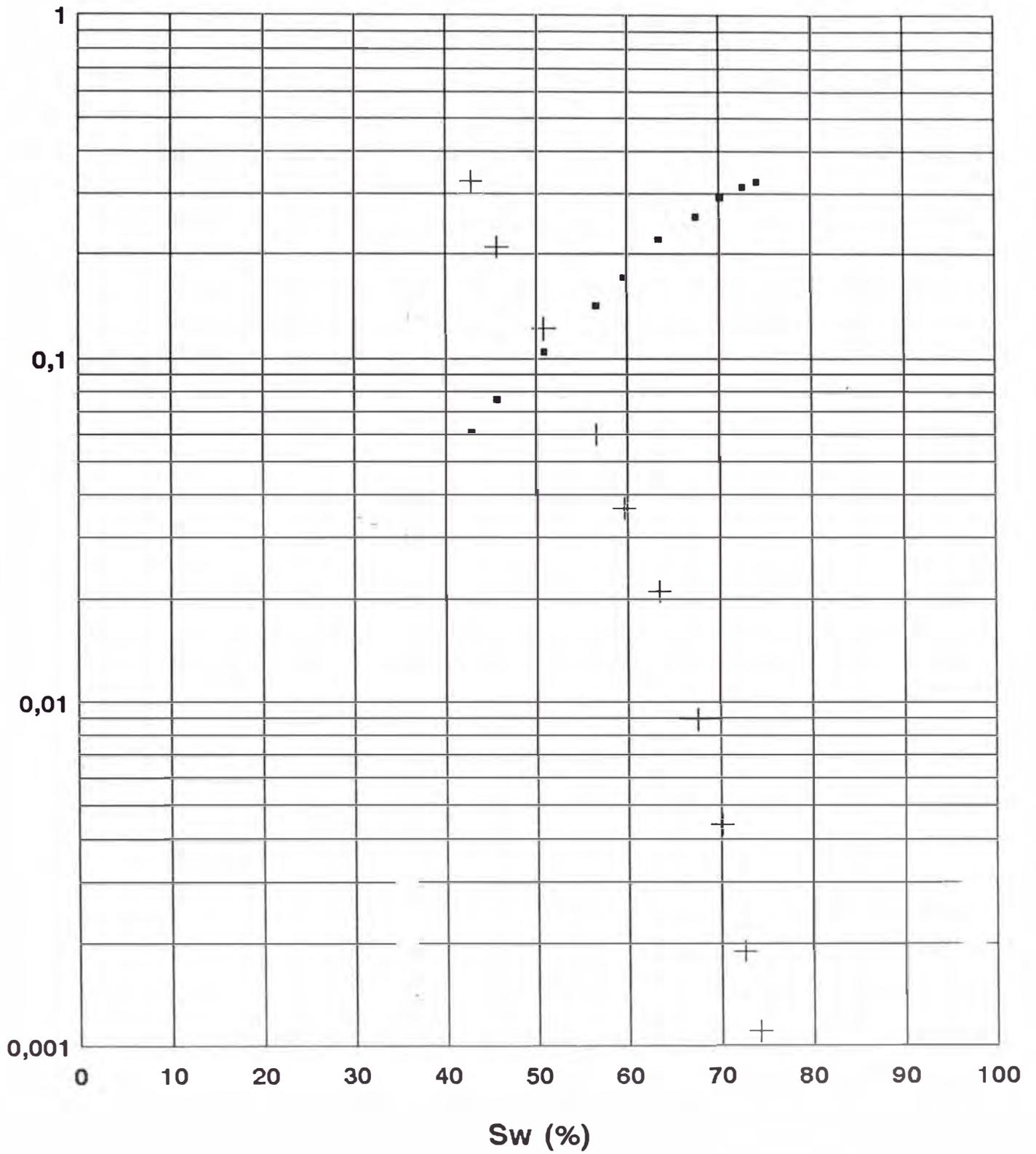


GRAFICO E

PERMEABILIDAD RELATIVA AGUA-ACEITE

K_{rw} - K_{ro}



ANEXO 9.8 - EJEMPLO PRACTICO

PERMEABILIDAD RELATIVA GAS - ACEITE

DATOS REQUERIDO

Viscosidad del gas (cp)	= 0.0175
Viscosidad del aceite (cp)	= 16.8
Porosidad (%)	= 20
Permeabilidad absoluta al aire (md)	= 96
Longitud de la muestra (cm)	= 5.55
Area de la muestra (cm ²)	= 11.10

RESULTADOS

<u>Sg (%)</u>	<u>Kg/Ko</u>	<u>Krg</u>	<u>Kro</u>
8.57	0.016	0.0137	0.8523
8.9	0.023	0.0175	0.7630
9.41	0.0342	0.0207	0.6067
9.97	0.046	0.0253	0.5511
10.74	0.0604	0.0317	0.5239
12.11	0.0882	0.0402	0.4560
14.36	0.1574	0.0501	0.3182
16.96	0.3029	0.0599	0.1978
18.63	0.4324	0.0724	0.1675
21.44	0.7388	0.0904	0.1223
24.18	1.2259	0.1058	0.0863
26.38	1.7533	0.1237	0.0705
31.28	4.2896	0.1331	0.0310
33.48	7.0366	0.1683	0.0239
36.93	16.7110	0.1877	0.0112

PERMEABILIDAD RELATIVA GAS-ACEITE

GI	OI	GI-GI-1	OI-OI-1	P	C1=	Rf=	Kg/Ko	VI=	VI=	OI-OI-1+ OI	OI-OI-1+ OI	GI-VI-OI	
					14.7/(14.7+ P/2 C1x GI/ OI	Rf/ OI	g/ o	VI=GI+OI .414(GI + OI)	VI-1+ VI	OI-OI-1+ OI	OI-OI-1+ OI	GI-VI-OI	
1.57	0.905			3.5	0.8936			2.475					
0	0.98	-1.57	0.075	„	„	-18.7064	-0.0195	0.98	-0.6189	1.8561	0.0375	0.942	0.9136
1	1.038	1	0.058	„	„	15.4072	0.016	2.038	0.438	1.418	0.029	1.009	0.409
3	1.119	2	0.081	„	„	22.0646	0.023	4.119	0.8615	2.8995	0.0405	1.078	1.821
7	1.228	4	0.109	„	„	32.7933	0.0324	8.228	1.7011	5.8201	0.0545	1.173	4.6466
15	1.39	8	0.162	„	„	44.1292	0.046	16.39	3.3791	11.6071	0.081	1.309	10.2981
30	1.621	15	0.231	„	„	58.0271	0.0604	31.621	6.3056	22.6956	0.1155	1.505	21.1901
50	1.832	20	0.211	„	„	84.703	0.0882	51.832	8.3674	39.9884	0.1055	1.726	38.2619
97	2.11	47	0.278	„	„	151.0791	0.1574	99.11	19.5731	71.4051	0.109	1.971	69.4341
193	2.405	96	0.295	„	„	290.8042	0.3029	195.405	39.8661	138.9761	0.1475	2.257	136.7186
337	2.715	144	0.31	„	„	415.0995	0.4324	339.715	59.7443	255.1493	0.155	2.56	252.5893
587	3.030	250	0.315	„	„	709.2199	0.7388	590.03	103.6304	443.3454	0.1575	2.872	440.4729
1015	3.355	428	0.325	„	„	1176.8249	1.2259	1018.355	177.3265	767.3565	0.1625	3.192	764.164
1727	3.733	712	0.378	„	„	1683.2151	1.7533	1730.733	294.9245	1313.28	0.189	3.544	1309.736
2727	3.95	1000	0.217	„	„	4118.0508	4.2896	2730.95	414.0898	2144.823	0.1085	3.841	2140.981
4957	4.245	2230	0.295	„	„	6755.1388	7.0366	4961.245	923.3421	3654.292	0.1475	4.097	3650.195
8727	4.455	3770	0.21	„	„	16042.5532	16.711	8731.455	1560.8669	6522.112	0.105	4.35	6517.762

PERMEABILIDAD RELATIVA GAS-ACEITE

$V_{ml} =$	$F_{of} =$	$G_{mi} = C_1 \times G_i / O_i + G_{mi} \cdot 1 / R_{fi} + 1$	$S_i = V_{ml} \times f_{oi}$	$V_{g_i} = O_i - S_i$	$SG_i = V_{G_i} / VP$	T_i	$T_i - T_i - 1$	$C_2 = (g_L(14.7)10 C_1) / AK_1$	$IQG_i = G_i / T_i$	$K_{rg} = C_2 \times QG_i$	$SG_{mi} = O_i / VP$
						0		0.342			
0.8164	1.7589	-0.0565	-0.0993	1.0418	0.0965	52	52	„	-0.0302	-0.0103	0.0873
0.3655	1.3745	0.0609	0.0838	0.9252	0.0857	77	25	„	0.04	0.0137	0.0935
1.6273	2.7058	0.0434	0.1173	0.9612	0.089	116	39	„	0.0513	0.0175	0.0999
4.1523	5.3258	0.0296	0.1576	1.0159	0.0941	182	66	„	0.0606	0.0207	0.1087
9.2025	10.5115	0.0222	0.2329	1.0761	0.0997	290	108	„	0.0741	0.0253	0.1213
18.9359	20.4414	0.0169	0.3463	1.1592	0.1074	452	162	„	0.0926	0.0317	0.1395
34.1914	35.9179	0.0117	0.4191	1.3074	0.1211	622	170	„	0.1176	0.0402	0.1599
62.0475	64.0185	0.0066	0.421	1.55	0.1436	943	321	„	0.1464	0.0501	0.1826
122.1741	124.432	0.0034	0.4264	1.8311	0.1696	1491	548	„	0.1752	0.0599	0.2091
225.7181	228.278	0.0024	0.5486	2.0114	0.1863	2171	680	„	0.2118	0.0724	0.2372
393.6141	396.487	0.0014	0.5583	2.3124	0.2144	3117	946	„	0.2643	0.0904	0.2661
682.87	686.063	0.0008	0.5825	2.61	0.2418	4501	1384	„	0.3092	0.1058	0.2958
1170.4019	1173.95	0.0005	0.697	2.847	0.2638	6470	1969	„	0.3616	0.1237	0.3283
1913.2174	1917.06	0.0002	0.4654	3.3761	0.3128	9040	2570	„	0.3891	0.1331	0.3559
3261.8761	3265.97	0.0001	0.4834	3.6141	0.3348	****	4532	„	0.4921	0.1683	0.3796
5824.383	5828.73	0.0001	0.3633	3.9867	0.3693	****	6869	„	0.5488	0.1877	0.403

GRAFICO F

PERMEABILIDAD RELATIVA GAS - ACEITE

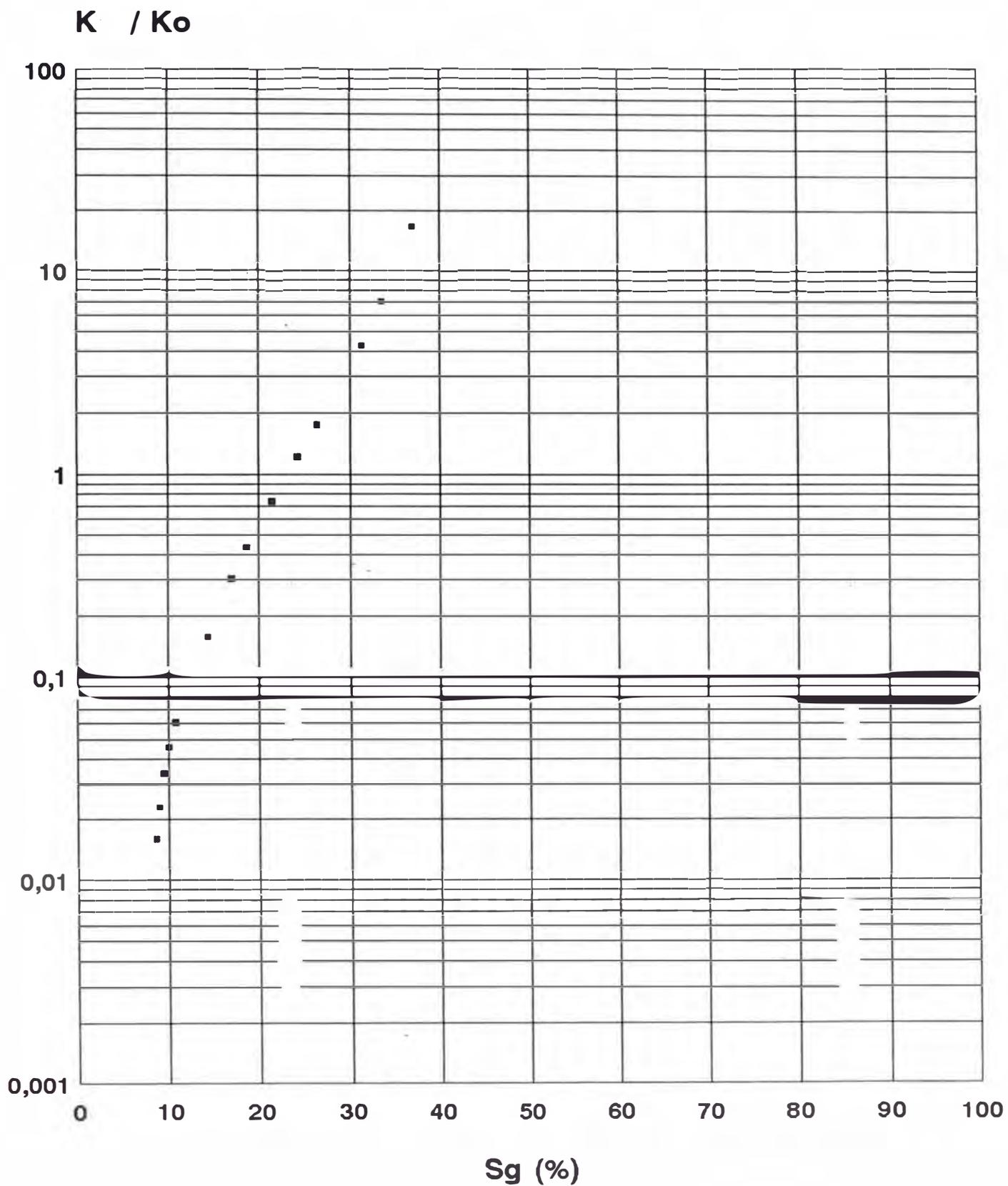
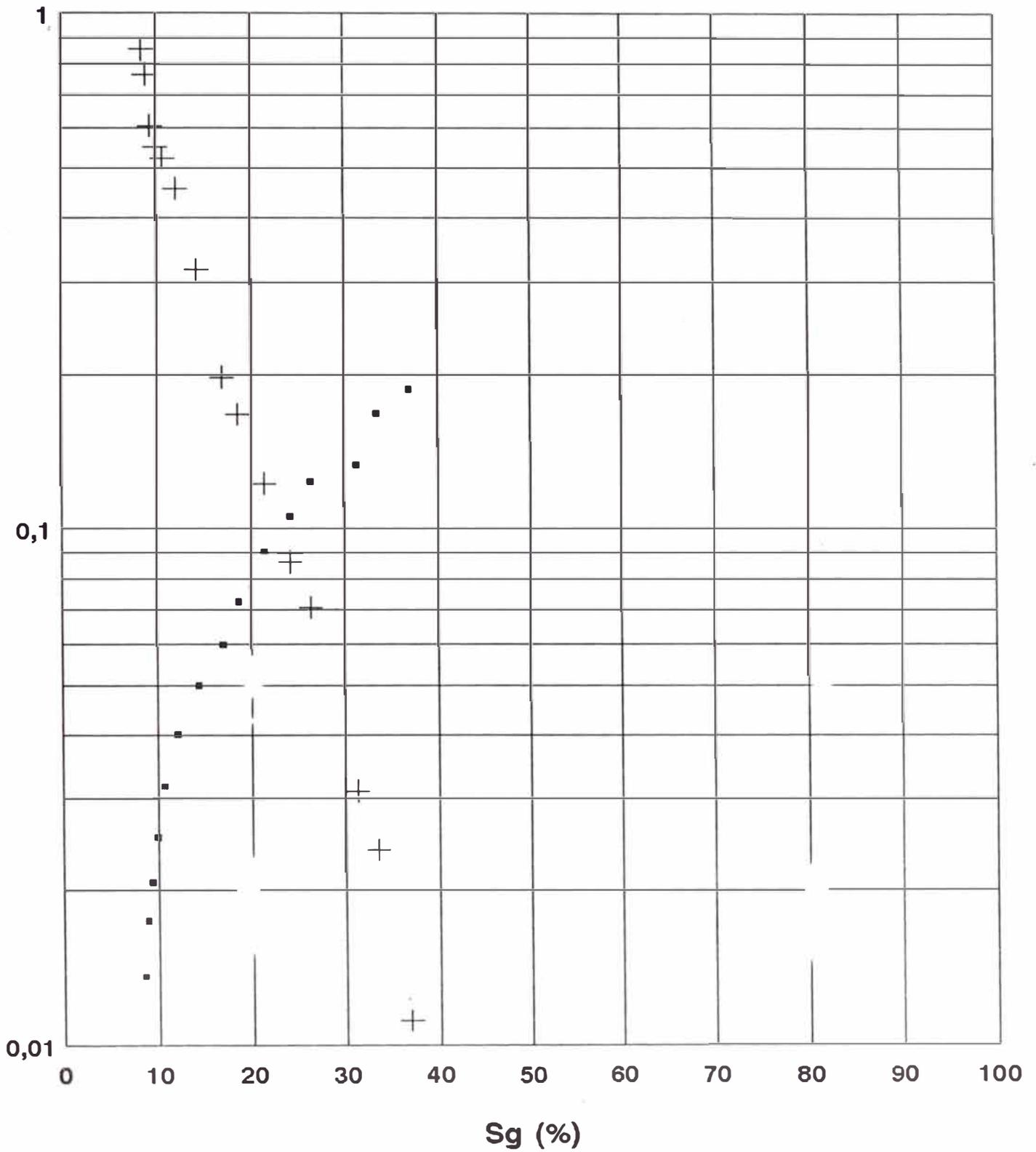


GRAFICO G

PERMEABILIDAD RELATIVA GAS - ACEITE

Krg - Kro



10.-FIGURAS

FIGURA No 2

SATURACION DE LAS MUESTRAS

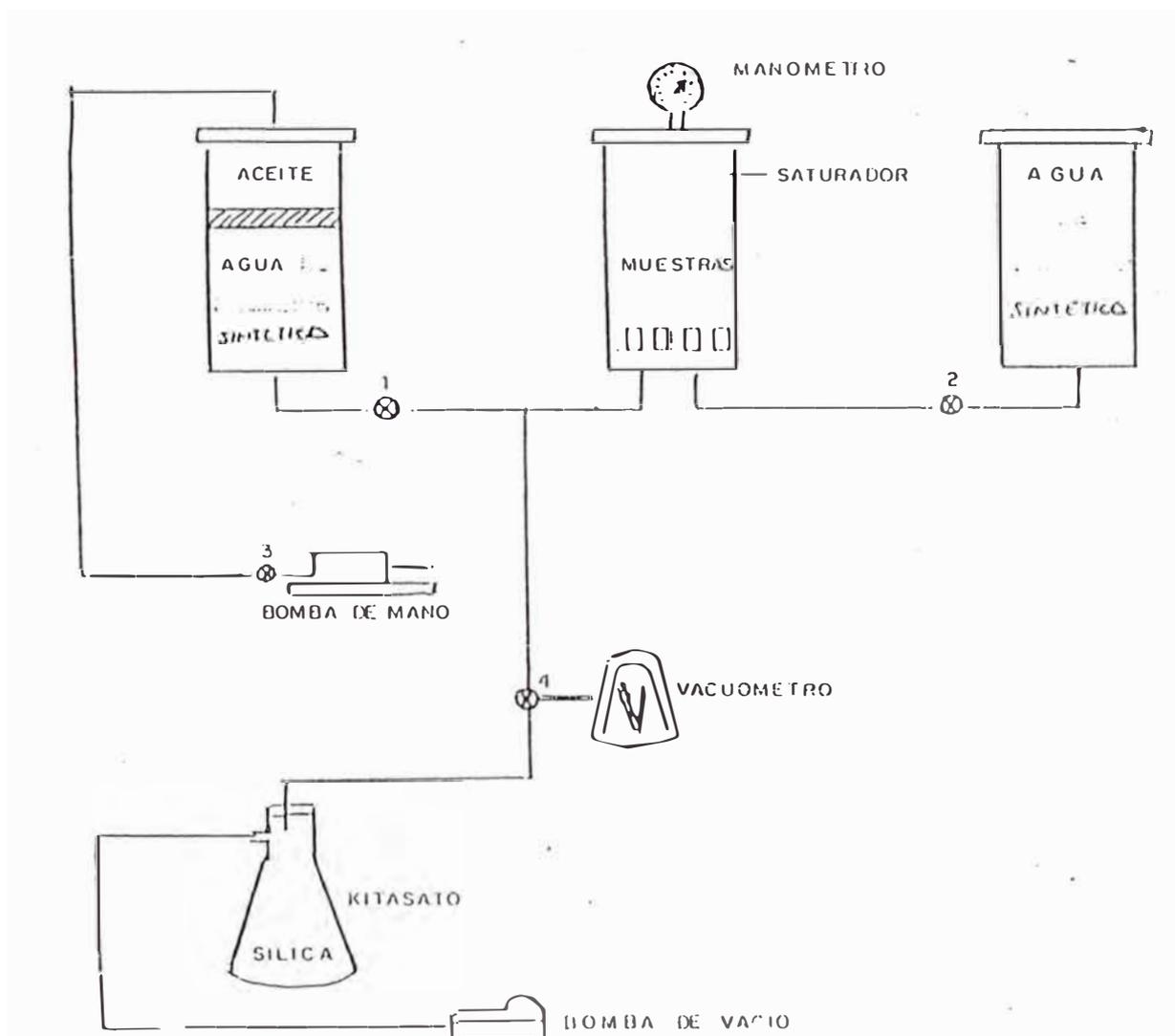
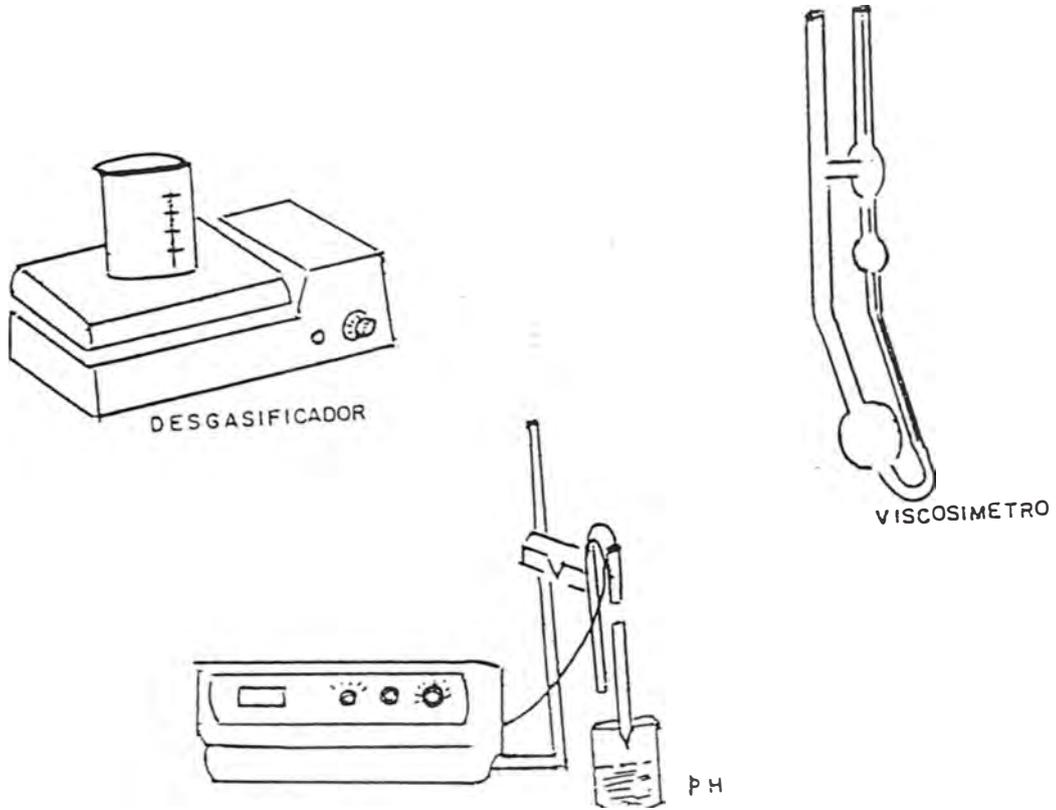


FIGURA No 1

PREPARACION DE AGUA SINTETICA



PREPARACION DEL ACEITE MINERAL REFINADO



2.2.4 Procedimiento de la Prueba

1. Tener las muestras y el plato cerámico saturados.
2. Mantener V-1 conectado a una manguera (libre de aire) y dentro de un recipiente con Agua Sintética.
3. Abrir las válvulas (V-3, V-6, V-7, V-9) accionar V-4 hasta marcar 2 psi. en el manómetro B y accionar V-10 hasta conseguir 1 Psi. en el manómetro C.
4. Abrir V-8 y V-1 lentamente, a 1 Psi. por espacio de \pm 48 horas.
5. Cerrar V-8 y V-1 y abrir lentamente V-2, sacar la tapa de la celda, sacar las muestras y pesarlas.
6. Continuar con los pasos 2, 3, 4, 5 y 6 hasta conseguir que se establezca la presión, esto ocurre cuando la diferencia entre la pesada anterior y la actual es de < 0.02 grms.
7. Conseguida la estabilización a 1 Psi., colocar, sobre el plato cerámico y dentro de la celda.
8. Accionar V-4 hasta que el manómetro B marque 4 Psi., luego manipular V-10 hasta marcar 2 Psi. en el manómetro C.
9. Abrir lentamente V-8 y V-1, manteniéndolo hasta \pm 48 horas.
10. Cerrar V-8, V-1 abrir lentamente V-2, sacar la tapa y las muestras.

FIGURA No 3

APARATO DE PRESION CAPILAR (METODO MEMBRANA)

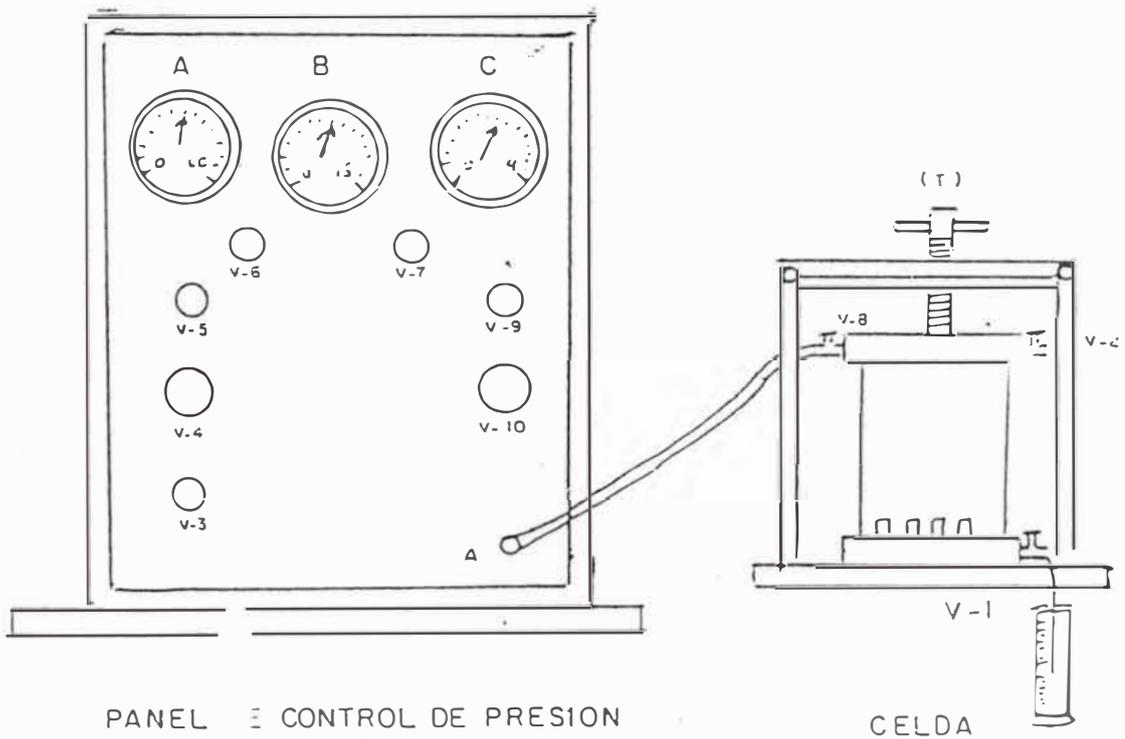


FIGURA No 4

APARATO PARA MEDIR RESISTIVIDAD DEL AGUA

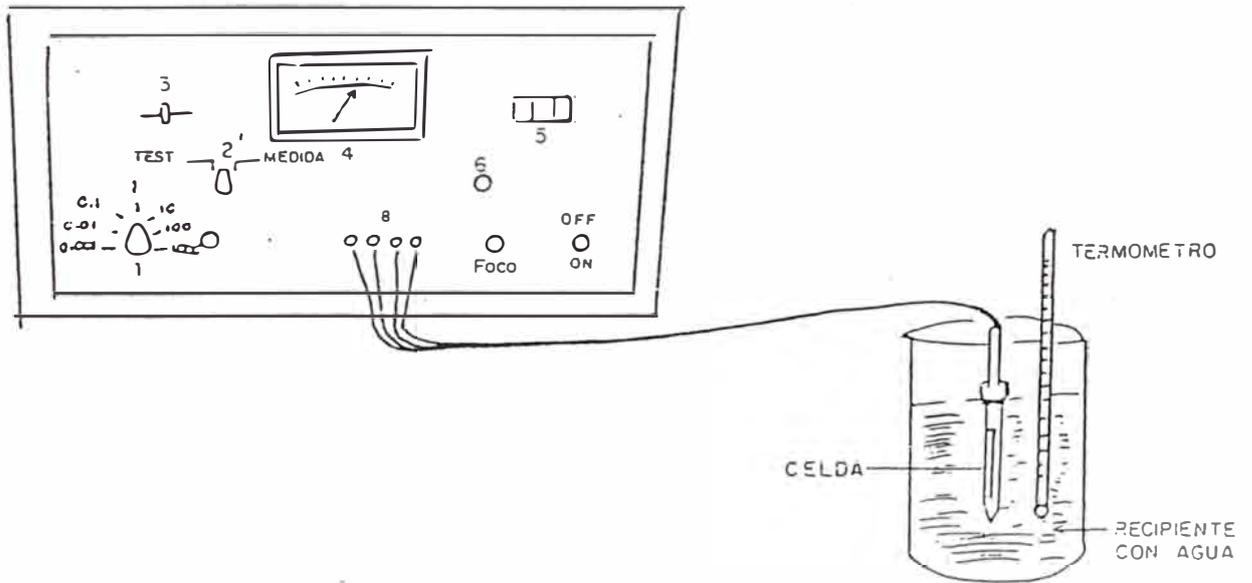
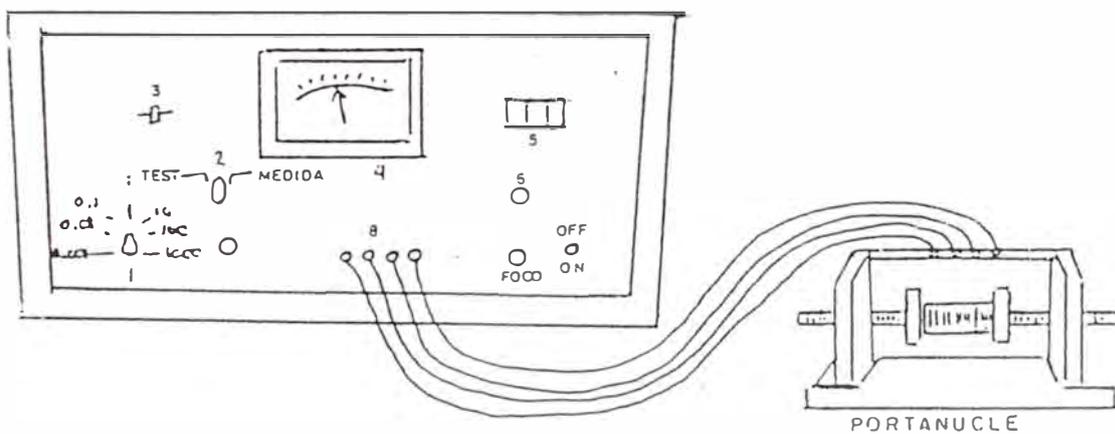


FIGURA No 5

APARATO PARA MEDIR LA RESISTIVIDAD DE LA ROCA



PERMEABILIDAD ABSOLUTA (AGUA o ACEITE) .

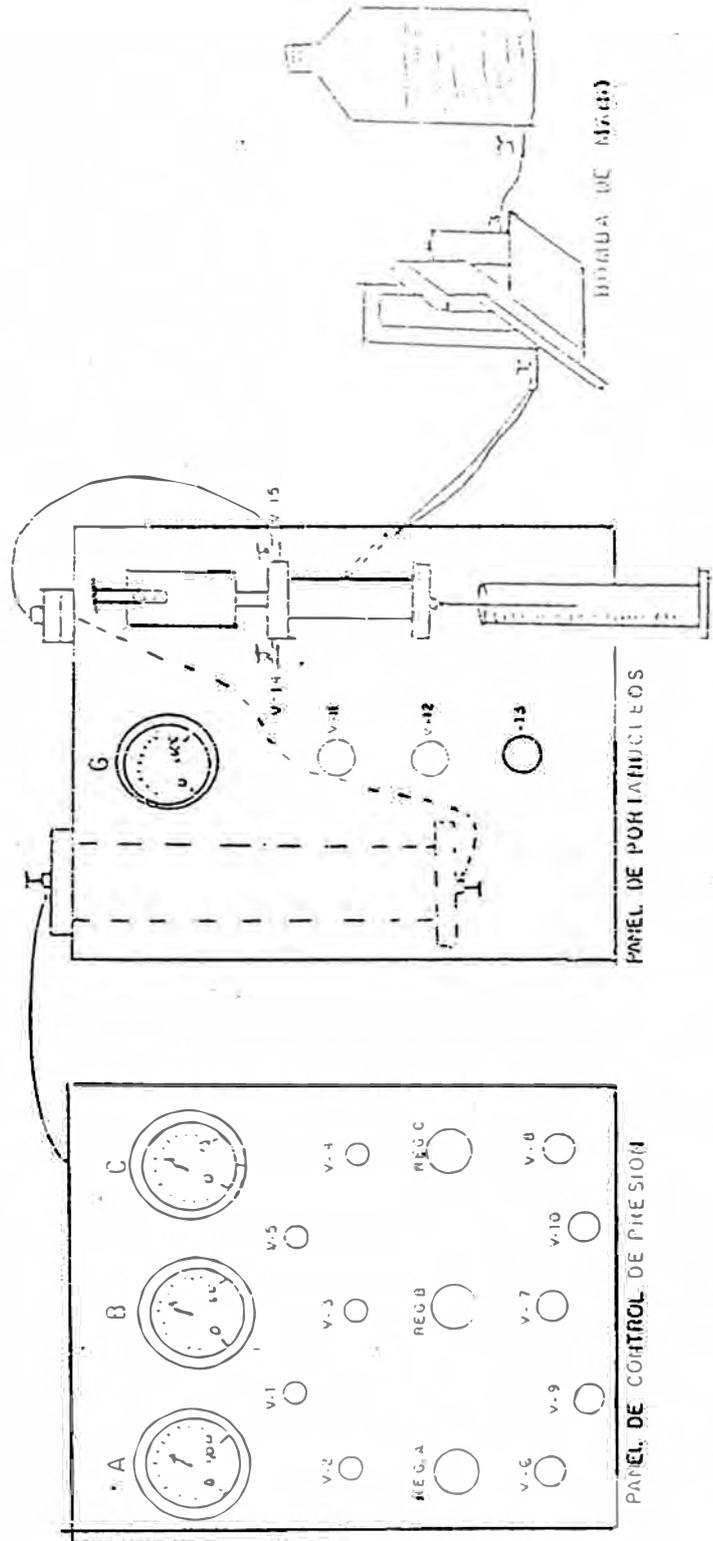


FIGURA No 6

APARATO PARA PERMEABILIDADES EFECTIVAS (ACEITE O AGUA)

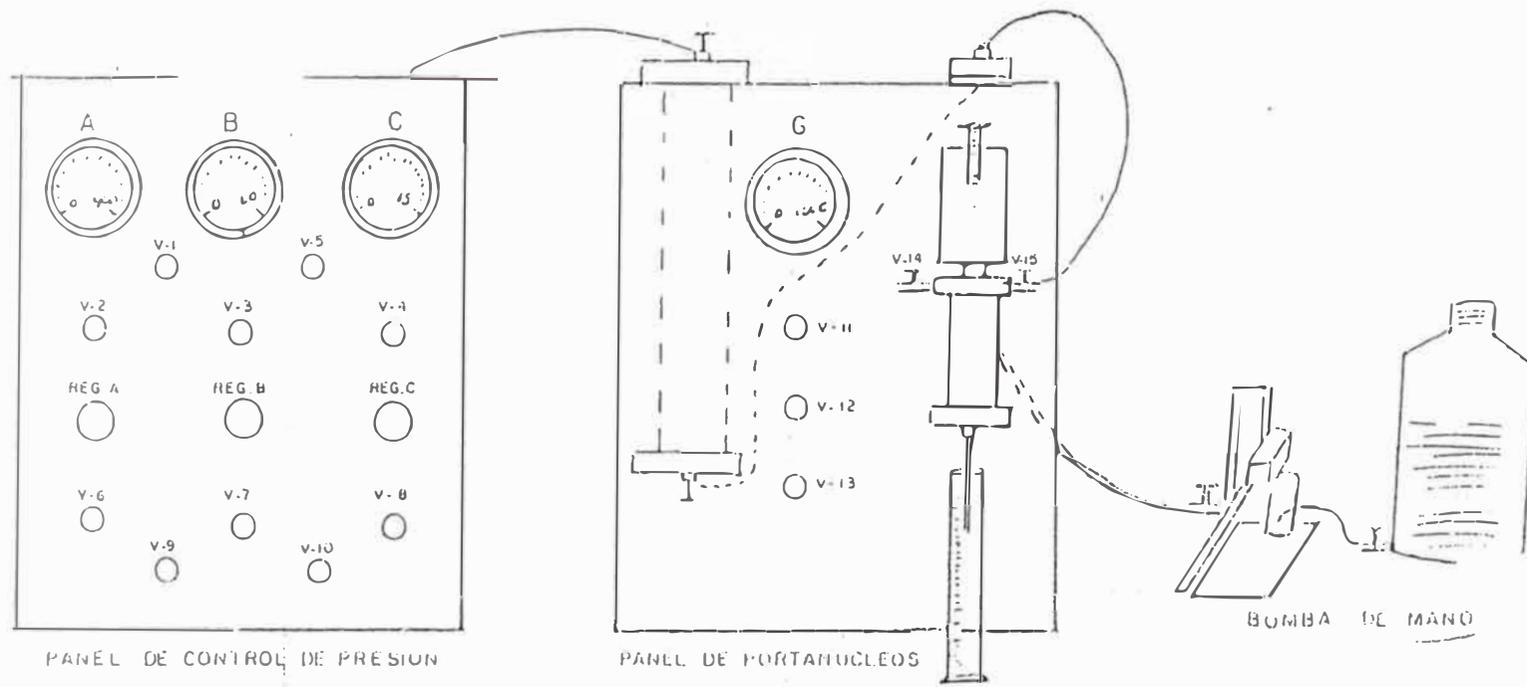


FIGURA No 7

APARATO PARA PERMEABILIDAD RELATIVA AGUA / ACEITE

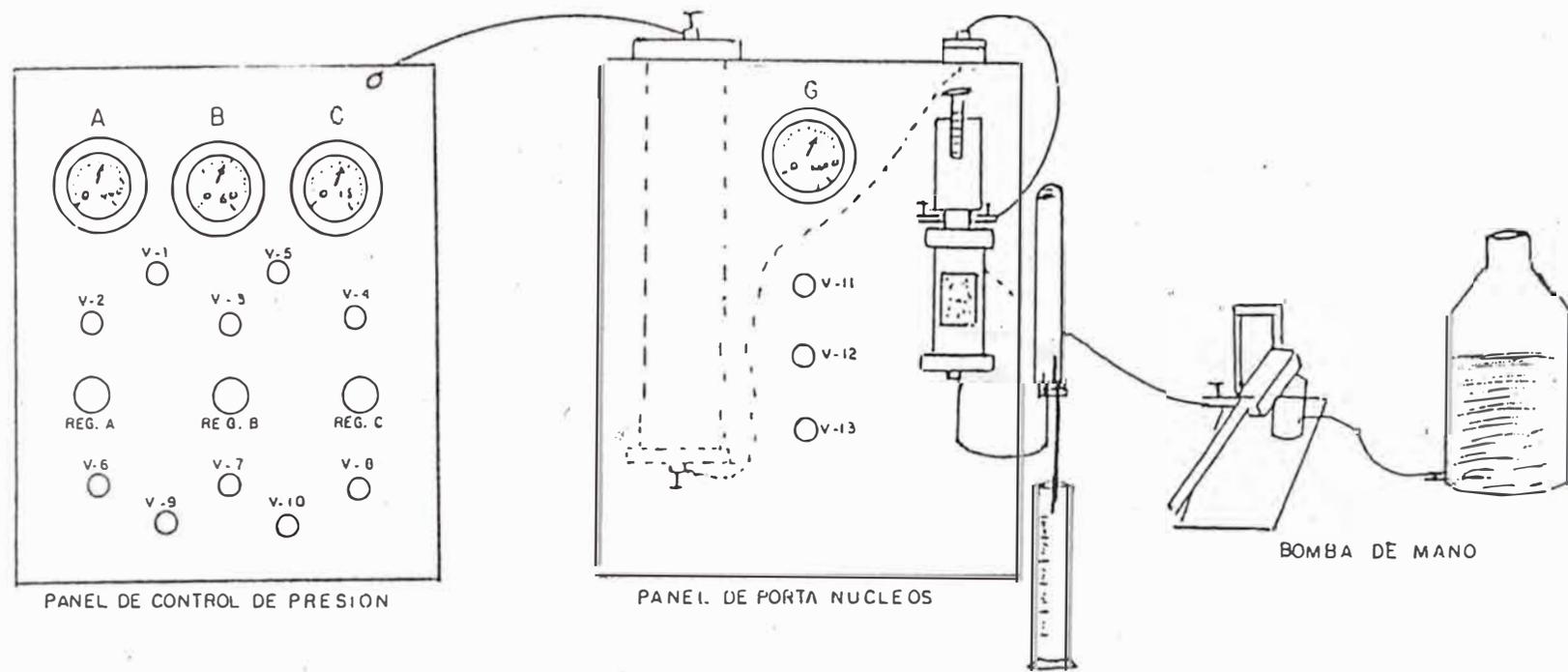


FIGURA No 8

PRUEBAS DE PERMEABILIDAD RELATIVA GAS / AGUA

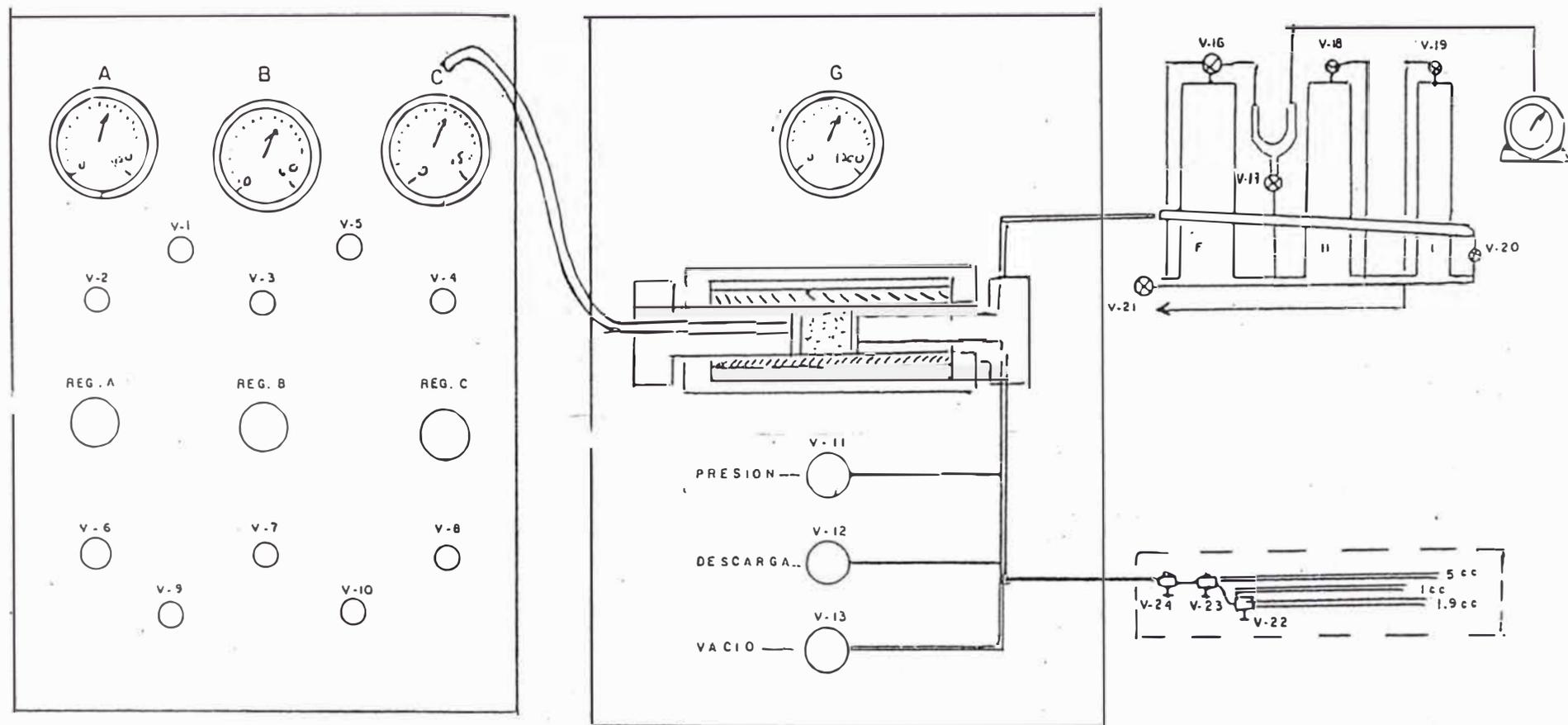
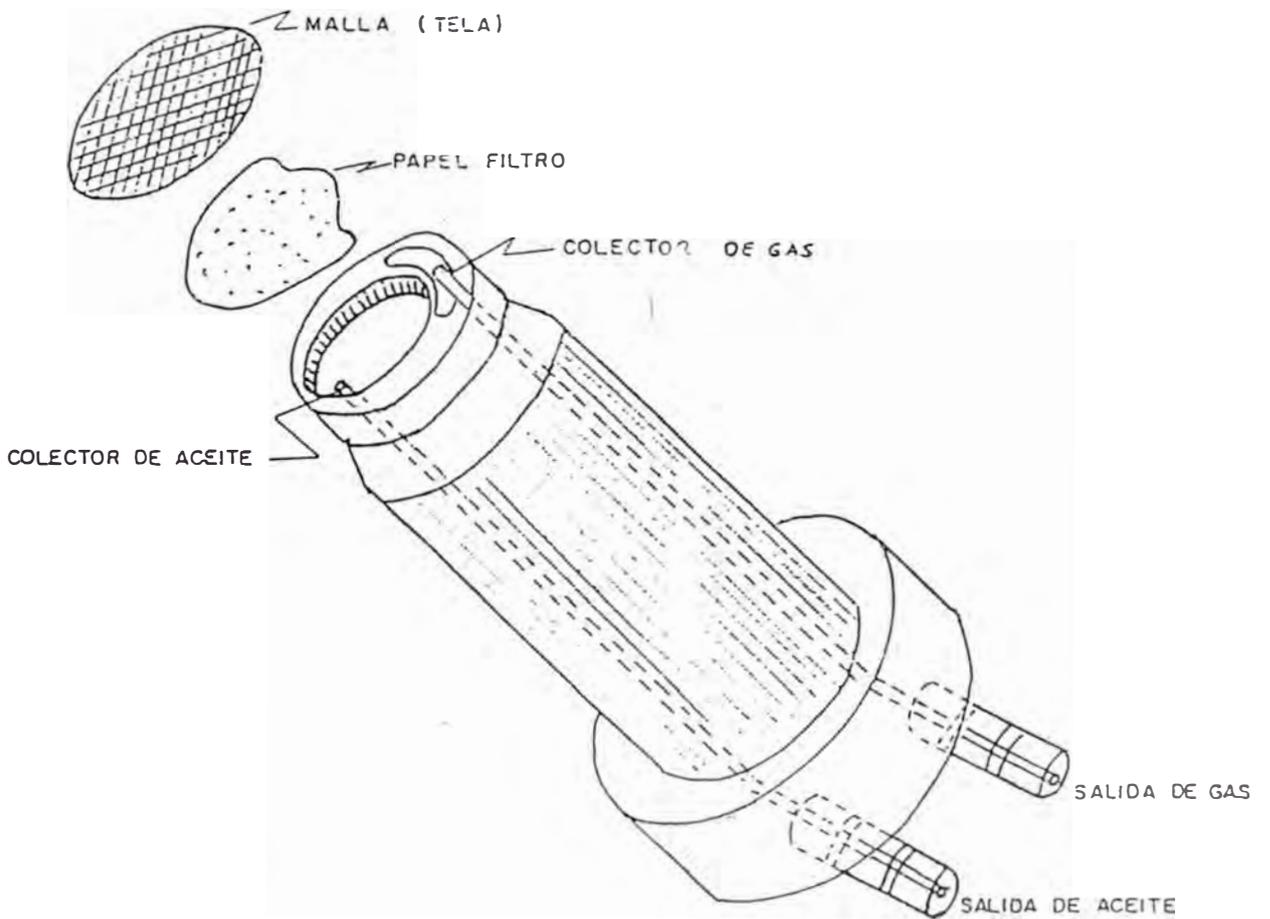
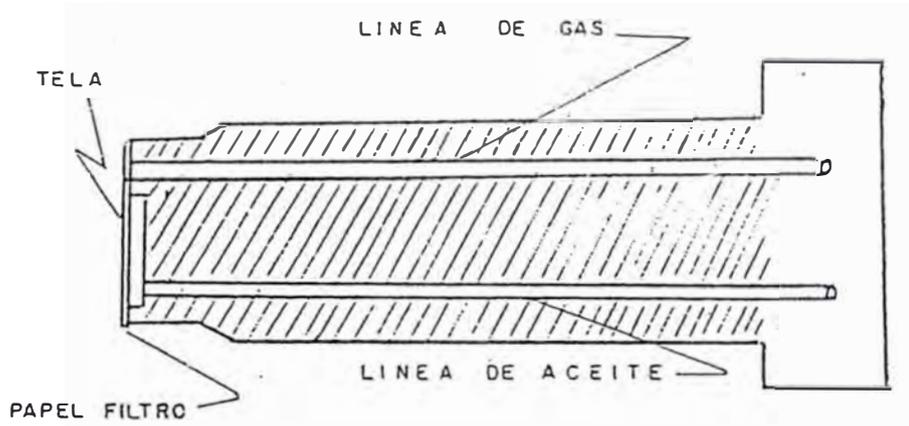


FIGURA No 9

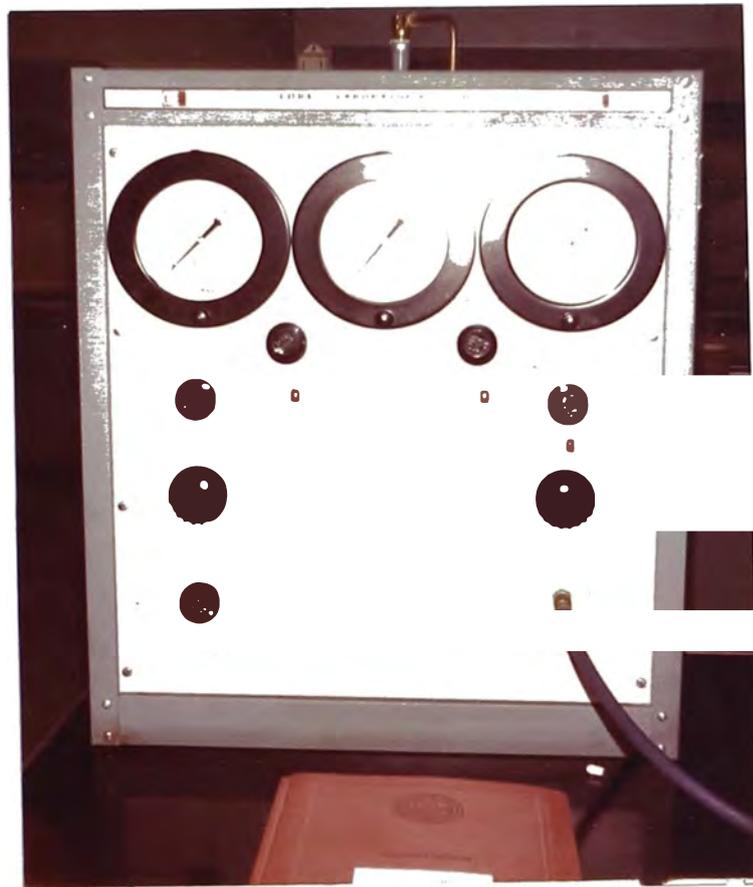
FIGURA No 10

PREPARACION DEL SEPARADOR

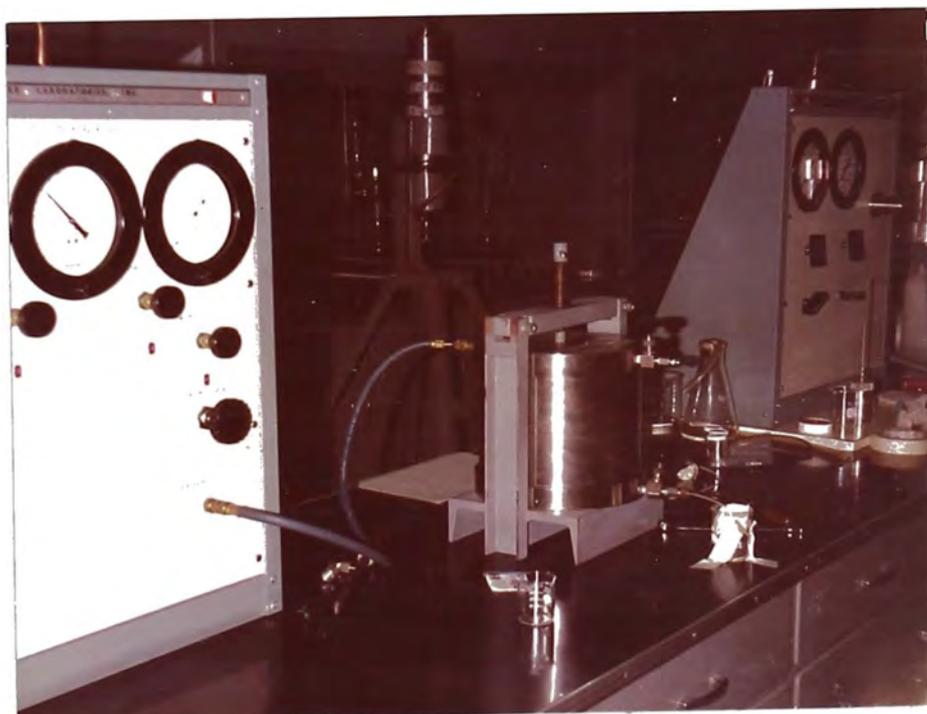


EQUIPO DE PRESION CAPILAR

PANEL DE CONTROL DE PRESION



CELDA

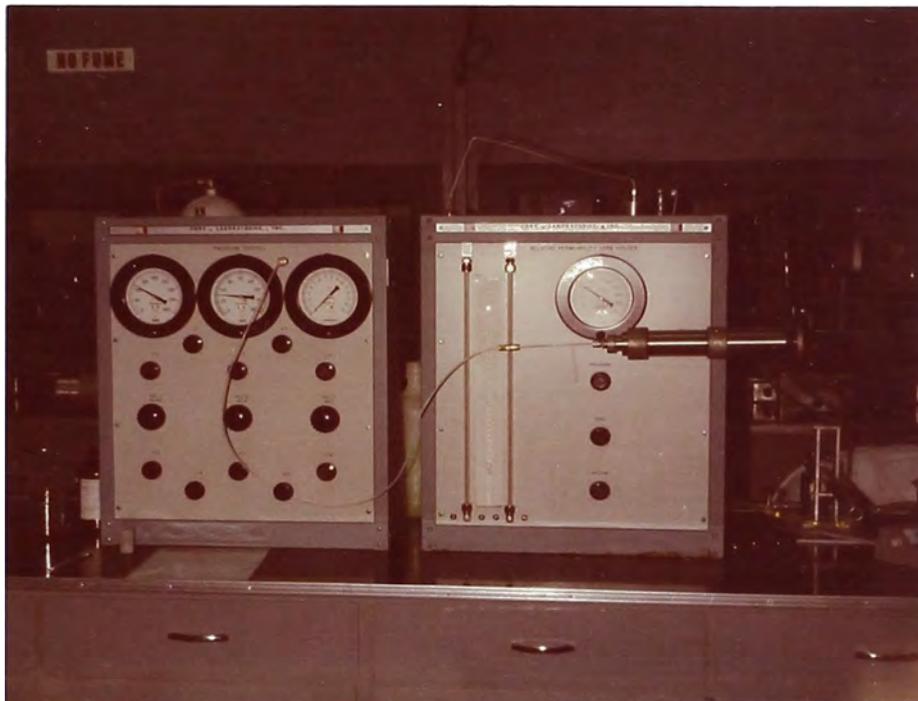


EQUIPO DE RESISTIVIDAD

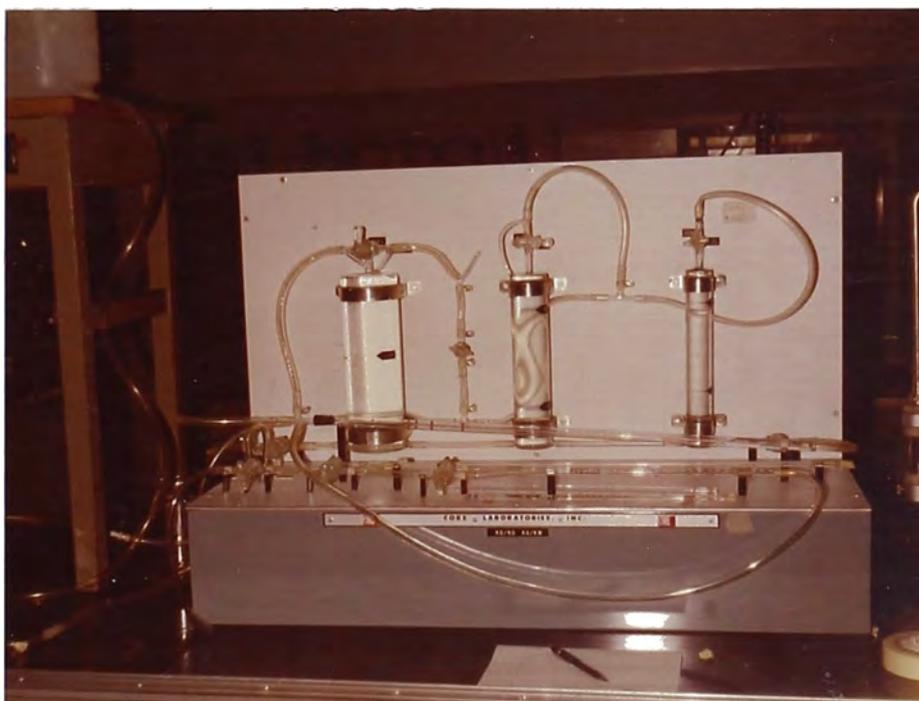


EQUIPO DE PERMEABILIDAD RELATIVA

PANEL DE CONTROL DE PRESION Y PORTANUCLEO



PANEL DE CONTROL DE VOLUMENES DE GAS Y ACEITE



11.- BIBLIOGRAFIA

James W. AMYS, Daniel M. BASS, Robert L., whiting "PETROLEUM RESERVOIR ENGINEERING" Physical Properties.

Pirson, S.D. "OIL RESERVOIR ENGINEERING" Mc Graw-Hill Book Co.

Slider H.C. "PRACTICAL PETROLEUM RESERVOIR ENGINEERING METHODS".

Monicard R.P. "PROPERTIES OF RESERVOIR ROCKS" Core Analysis.

J.G. Richarson K.K. Kerver, J.A. Harfford and J.S. OSOBA "LABORATORY DETERMINATION OF RELATIVE PERMEABILITY".

Fatt and H. Dykstra "RELATIVA PERMEABILITY STUDIES".

E.F. Johnson, D.P. Bassler and V.O. Naumann "CALCULATION OF RELATIVE PERMEABILITY FROM DISPLACEMENT EXPERIMENTS".

Ing. Walter PAQUIONA SH. "METODO PARA DETERMINAR FACTOR DE RECUPERACION".