Zy.38

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

EVALUACION DE ESTABILIZADORES DE ARCILLAS UTILIZADOS PARA MEJORAR LA RECUPERACION DE HIDROCARBUROS

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO PETROLERO

P R E S E N T A

JUAN MANUEL RIAÑO CARAZA

MEXICO, D. F. 1984

Universidad Nacional Autónoma de México
UNAM
Biblioteca Central
Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

C O N T E N I D O

	Página
AGRADECIMIENTOS	ii
CONTENIDO	iii
RESUMEN	viii
INTRODUCCION	ix

CAPITULOS

1. MINERALES ARCILLOSOS	1
1.1 Definición	1
1.2 Conceptos Básicos	1
1.3 Clasificación de los Minerales Arcillosos	2
1.3.1 Grupo de la Caolinita.....	3
1.3.2 Grupo de la Mica	7
1.3.3 Grupo de la Montmorillonita	8
1.3.4 Grupo de la Clorita	9
1.3.5 Grupo de la Palygorskita-Sepiolita-Atapulgita	10
1.3.6 Grupo de Capas Mezcladas	12
1.4 Propiedades de los Minerales Arcillosos..	14
1.4.1 Intercambio Iónico	14
1.4.2 Intercambio Catiónico	15
1.4.3 Intercambio Aniónico	24

1.4.4 Cambios por Temperatura 26
1.4.5 Floculación-Defloculación 27
1.4.6 Adsorción de Compuestos Orgánicos .. 28
1.4.7 Otras Propiedades 30

2. DAÑO O ALTERACION DE LAS FORMACIONES QUE - CONTIENEN MATERIALES ARCILLOSOS 31
2.1 Sistema Agua-Arcilla 31
2.2 Mecanismo de daño a las formaciones que -- contienen arcillas 34
2.3 Daño o alteración por operaciones específicas 44
2.3.1 Operaciones de Perforación 44
2.3.2 Durante la colocación de la tubería- de revestimiento y su cementación .. 45
2.3.3 Operaciones de Terminación 45
2.3.4 Operaciones de Estimulación 46
2.3.5 Operaciones de Limpieza de Parafina- o Asfalto 47
2.3.6 Operaciones de Reparación de Pozos.. 47
2.3.7 Durante la etapa de Producción 47
2.3.8 Programas de Inyección de Agua 48
2.3.9 Programas de Inyección de Gas 48
2.3.10 Programas de Inyección Cíclica de - Vapor 49

2.3.11 Daño ocasionado por Bacterias 49

3. SOLUCIONES ESTABILIZADORAS DE ARCILLA 51
3.1 Propiedades o características 51
3.2 Procesos de Estabilización 53
3.2.1 Hidrólisis de iones metálicos 53
3.2.2 Mecanismo de estabilización con soluciones hidrolizables 58
3.2.3 Mecanismo de estabilización con surfactantes catiónicos 59
3.2.4 Mecanismo de estabilización mediante la adsorción de residuos pesados de-los hidrocarburos 61
3.2.5 Mecanismo de estabilización de las - arcillas utilizando cationes divalentes 62
3.3 Tipo de Estabilización 65

4. TECNICAS DE LABORATORIO PARA DETERMINAR -- LA EFICIENCIA DE LOS ESTABILIZADORES 67
4.1 Pruebas de Inmersión 67
4.1.1 Equipo 67
4.1.2 Procedimiento de Análisis 67
4.2 Pruebas de Desplazamiento 79
4.2.1 Equipos utilizados 80

4.3 Acondicionamiento deseable en las muestras 82
4.4 Procedimiento de Análisis 84
4.4.1 Identificación de los minerales de - arcilla 84
4.4.2 Determinación de la Capacidad de --- Intercambio Catiónico 84
4.4.3 Pruebas de hinchamiento 86
4.4.4 Exámen microscópico de láminas delgadas 87
4.4.5 Medición de permeabilidades 88
4.4.6 Interpretación de datos 90

5. DETERMINACION EN LABORATORIO DE LA CONCENTRACION OPTIMA ESTABILIZADORA 92
5.1 Solución estabilizadora utilizada 92
5.2 Características de las muestras utilizadas 93
5.3 Equipo 96
5.4 Acondicionamiento de las muestras 100
5.5 Procedimiento de análisis 100
5.6 Análisis de resultados 104
5.6.1 Análisis del comportamiento de la -- permeabilidad a nivel de muestra ... 104
5.6.2 Análisis de la variación de la permeabilidad en función de las relaciones de concentración de estabilizador .. 127

CONCLUSIONES 134

RECOMENDACIONES 135

REFERENCIAS 137

R E S U M E N

El presente trabajo está enfocado a aplicar una técnica experimental para evaluar un producto estabilizador de arcillas y definir la proporción óptima de uso en un yacimiento petrolífero sujeto a recuperación secundaria de hidrocarburos por inyección de agua.

La evaluación de la eficiencia del producto estabilizador de arcillas, se realizó comparando el comportamiento de la permeabilidad de la roca a la salmuera antes y después del tratamiento.

Con el objeto de entender mejor el mecanismo de acción de los productos empleados en la estabilización de las arcillas, se revisaron las características estructurales y propiedades de los minerales arcillosos, así como las características mismas de dichos productos.

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

Los yacimientos petrolíferos que son susceptibles de daño en la permeabilidad durante operaciones de perforación, terminación, estimulación, fracturamiento o recuperación secundaria por inyección de agua son bien conocidos en la industria petrolera[6-11]. Los trabajos de investigación y desarrollo de procesos de recuperación secundaria y terciaria deberán considerar la susceptibilidad de los yacimientos al daño en la permeabilidad en la evaluación de dichos procesos.

Una amplia gama de procesos físicos y químicos son responsables del daño en los yacimientos. Algunos tipos de daño pueden ocurrir debido a las propiedades mineralógicas y texturales de las formaciones productoras; otros tipos de daño ocurren como un resultado de las operaciones de perforación y producción en particular.[8]

Las causas del daño que son relacionadas con las propiedades de la roca son:

1.- hinchamiento de arcillas autígenas que reducen el tamaño del poro.

2.- dispersión de arcillas y partículas a tamaño de arcillas

reacomodamiento de las partículas durante el flujo, y -- taponamiento del sistema poroso; y

3.- Una combinación de hinchamiento y dispersión; un ligero hinchamiento promueve el desprendimiento de partículas - y la movilidad de las partículas finas.

Veley[9], utilizó iones metálicos hidrolizables para inhibir - la sensibilidad de las arcillas a la exposición de cationes monovalentes (Na^+ y NH^+, Li^+, K^+), por medio de cationes - - trivalentes de hidro-aluminio y tetravalentes como zirconio.

Mecanismo de estabilización; la atracción entre la carga negativa de la partícula de arcilla y sus cationes intercambiables, esta exponencialmente relacionada a la carga en los cationes. Así, un ión polinuclear con una carga neta de $\pm$ 8, - $\pm$ 12, o más podrá ser más fuertemente atraido por una partícula de arcilla que cationes monovalentes o divalentes,

1. MINERALES ARCILLOSOS

1.1 DEFINICION

La arcilla es un material que tiene la habilidad de mostrar normalmente una marcada plasticidad cuando está húmeda y en general propiedades tales como: adsorción, hidratación, solvatación, intercambio iónico y endurecimiento cuando se seca y se expone al fuego. Las arcillas están constituídas principalmente de materiales inorgánicos de grano fino, incluyendo filosilicatos hidratados con componentes químicos, tales como: SiO_2, Al_2O_3, FeO_3, FeO, MnO, MgO, CaO, K_2, Na_2O, H_2O y/o materiales no cristalinos formados grandemente de substancias químicas, tales como: SiO_2, Al_2O_3, FeO_3, FeO, MnO y H_2O[1]

1.2 CONCEPTOS BASICOS

Para entender mejor la estructura cristalina de las arcillas, es conveniente definir los siguientes conceptos físicos:[1]

PLANO.- Un simple plano de átomos, iones o moléculas de

(1) Referencias al final.

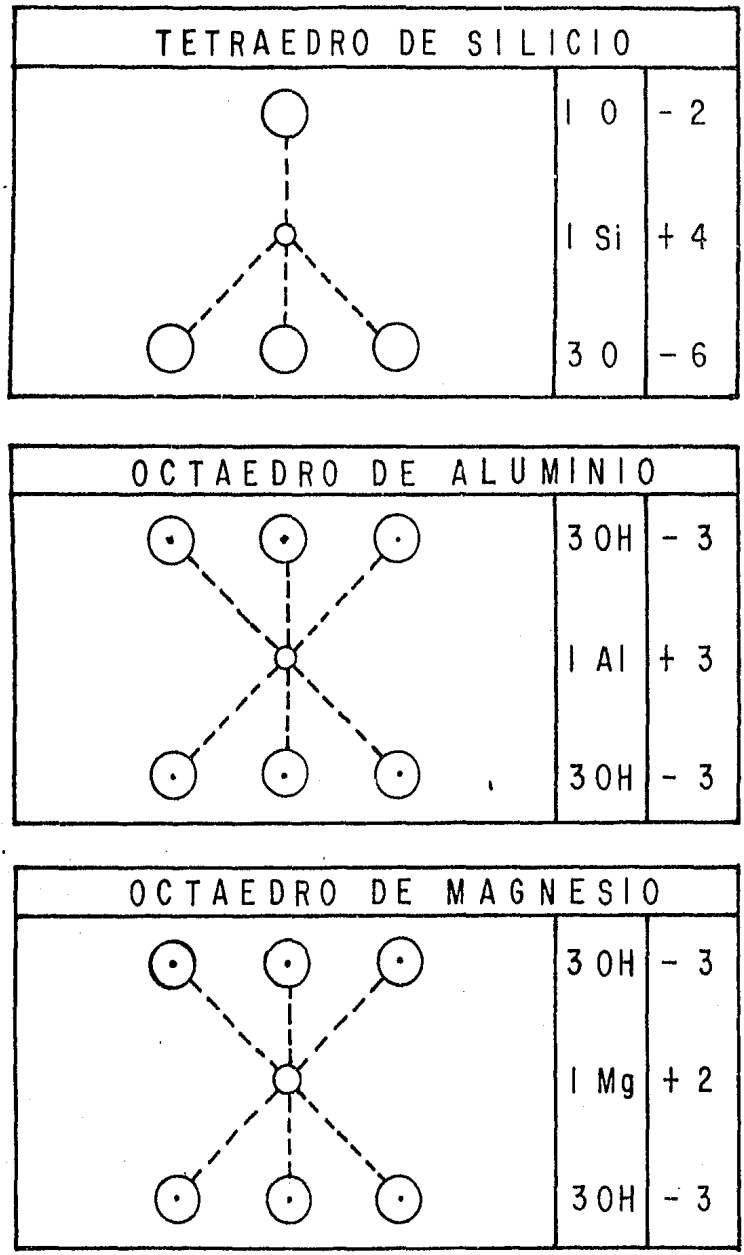


FIG. I. I – REPRESENTACION ESQUEMATICA DE TETRAEDROS Y OCTAEDROS.

agua; es la unidad mínima.

HOJA.- Es una combinación articulada de planos, tetraedros y octaedros. (Fig. I.1).

MANTO.- Es una combinación articulada de hojas. (Fig. I.2, I.3).

MANTO INTERMEDIO.- Como su nombre lo indica, es aquél que divide a dos mantos.

MICELA .- Estructura que está formada por la unión de manto y manto intermedio.

ESPESOR DE LA ESTRUCTURA UNIDAD.- Es la distancia entre los planos basales de la micela, espaciamiento basal "d" (Fig. I.4).

1.3 CLASIFICACION DE LOS MINERALES ARCILLOSOS

Las estructuras micelares se pueden dividir en dos - "tipos", de acuerdo a la relación de tetraedros-octaedros en la micela: micela tipo 2:1 y la micela - 1:1 (Fig. I.2 y I.3). A su vez cada micela se divide

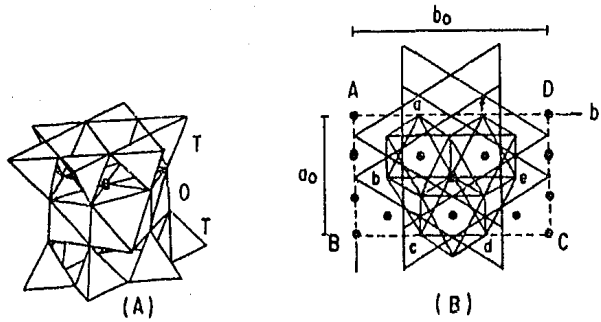


FIG. I.2.- (A) REPRESENTACION ESQUEMATICA DE HOJAS DE TETRAEDROS Y OCTAEDROS 2:1, T: HOJA TETRAEDRAL, O: HOJA OCTAEDRAL, • (OH) HIDROXILOS. (B) PROYECCION NORMAL EN EL PLANO ab. ° (OH) HIDROXILOS. LOS OXIGENOS Y CATIONES TETRAEDRALES SON OMITIDOS.

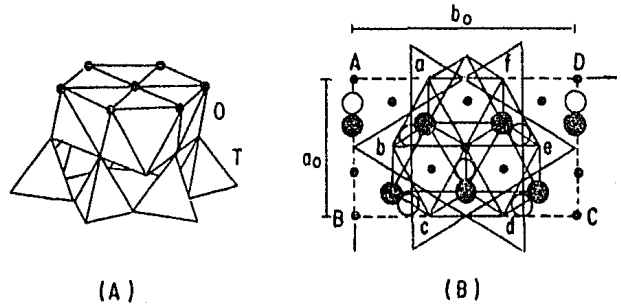


FIG. I.3.- (A) REPRESENTACION ESQUEMATICA DE HOJAS DE TETRAEDROS Y OCTAEDROS, 1:1. PARA LAS NOTACIONES VER FIG. I.2.

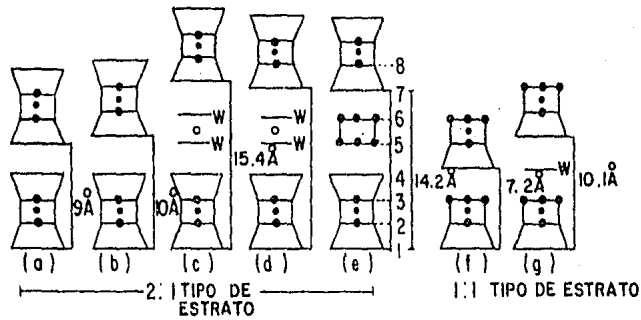


FIG. I.4 - REPRENTACION DIAGRAMATICA DE LAS ESTRUCTURAS DE ARCILLA, PRINCIPALMENTE PARA COMPARAR EL ESPESOR RELATIVO DE LAS ESTRUCTURAS-UNIDAD.

(a) PIROFILITA - TALCO .
(b) MICA .
(c) SMECTITA .
(d) VERMICULITA .
(e) CLORITA .
(f) KAOLINITA - SERPENTINA .
(g) HALLOYSITA .(10 Å).

SIMBOLOGIA

° CATIONES OCTAEDRALES
O CATIONES INTERCAMBIABLES
W PLANOS DE MOLECULAS DE AGUA
● HIDROXILOS .
K ION POTASIC .

en grupos, basándose en las magnitudes de las cargas - intermicelares (1)

El grupo es dividido en dos subgrupos trioctaedral y - dioctaedral, basándose en el número de átomos en la hoja octaedral de la micela.

Otra subdivisión en especies puede ser hecha basándose en sus propiedades químicas, estructurales (politipos) etc.

En la Tabla I.1, se muestra la clasificación esquemática de las arcillas.(1)

1.3.1 Grupo de la Caolinita.

Los cristales de la Caolinita (Fig. I.5), están compuestos por una lámina simple de tetraedros de sílice y una lámina simple de octaedros de - alúmina, y están unidas entre sí en la dirección del eje "c" apiladas una encima de la otra, unidas por enlaces de hidrógeno.(2)

La fórmula teórica de esta estructura es - - $(OH)_8Si_4Al_4O_{10}$.(3) En algunos casos existe la

Tabla 1.1 Esquema de clasificación para los -- minerales de arcilla.

Tipo de manto	Grupo	Subgrupo Tri:Trioctaedral Di: Dioctaedral	Especies
	Pirofilita-Talco	Tri.	Minesotaíta Talco
		Di.	Pirofilita
	Esmectita	Tri.	Saponita Saponita de Fierro Hectorita Sauconita Stevensita
		Di.	Montmorillonita Beidelita Nontronita Volkonskoita
2:1	Vermiculita	Tri.	Vermiculita
		Di.	Vermiculita
	Mica	Tri.	Flogopita Biotita Lepidolita Zinnwaldita
		Di.	Muscovita Paragonita(Al) Paragonita(Fe) Celadonita Glauconita
	Clorita	Tri.	Clorita(Mg) clinocloro Clorita(Fe) chamosita Clorita(Ni) nimita Clorita(Mn) pennantita

(continúa)

Tipo de manto	Grupo	Subgrupo	Especies
		Di.-Tri.	Clorita(Al) sodoita cookeita
		Di.	Clorita(Al) donbasita
	Mica Quebradiza	Tri.	Clintonita
		Di.	Margarita
	Surita	Di.	
1:1	Caolinita-Serpentina	Tri.*	Serpentina(Mg) Antigorita, Lizardita-Crisotilo. Serpentina(Mg,Al) Amesita Serpentina(Fe) Cronstedita Berthierina Greenalita Serpentina(Ni) Garnierita
		Di.**	Caolinita, Dickita, Nacrita Halloisita(7°_{A}) Halloisita(10°_{A})

Estructura en forma de cinta, alargada

Sepiolita
Paligorskita

Minerales no cristalinos y pobremente cristalinos

Alófanos
Hisingerita
Penwitita
Imogolita

* Subgrupo de la serpentina o "minerales de la serpentina".

** Subgrupo de la Caolinita o "minerales del Caolín".

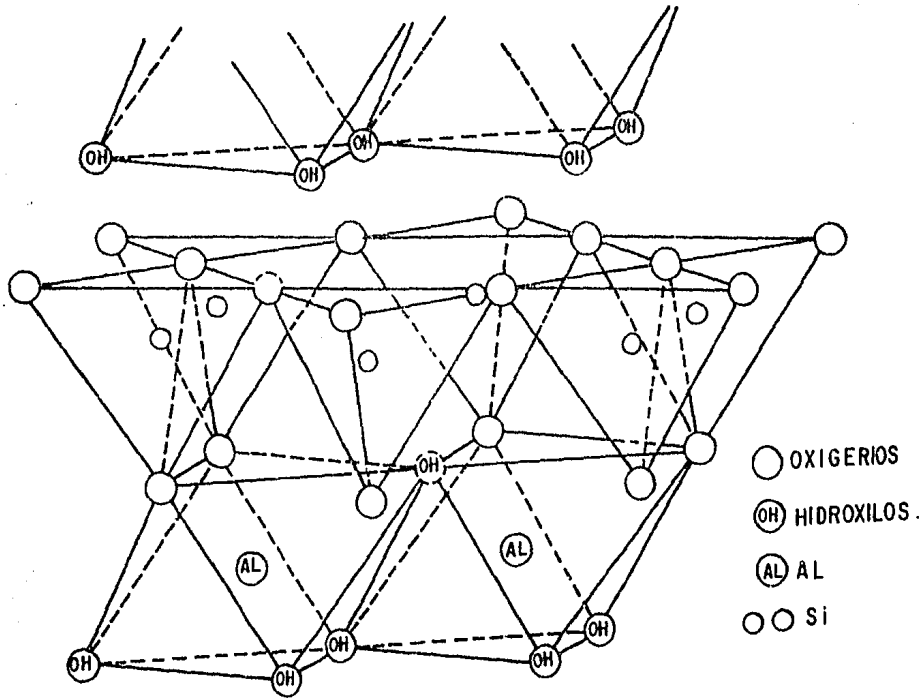


FIG. I.5 – REPRESENTACION ESTRUCTURAL DE LA CAOLINITA .

sustitución leve del aluminio por fierro y/o titanio, en una variedad muy escasa.

Los minerales arcillosos del grupo de la Caolinita pueden dividirse en dos subgrupos: química y estructuralmente similares a la Caolinita, y un subgrupo similar pero con una parte adicional de agua[4].

La Dickita y la Nacrita son de composición química y estructura similar a la de la Caolinita, difieren solamente en el apilamiento de las capas unitarias.[3]

La Halloysita (Fig. 1.6) tiene una estructura similar a la Caolinita que consiste de una secuencia regular de capas de caolinita, separadas por capas intermedias de agua.[4]

Se ha demostrado recientemente que la Anauxita es una forma de Caolinita. Se puede decir que es una caolinita con exceso de sílicie en su estructura.[3]

1.3.2 Grupo de la Mica

El grupo de minerales de las micas puede ser dividido en ígneas, metamórficas y micas de arcilla. Las micas ígneas y metamórficas están divididas en especies, tales como muscovita, biotita y flogopita. El subgrupo de las micas de arcilla puede ser dividido principalmente en ilitas y arcillas de capas o mantos mezclados y a su vez éstas pueden ser clasificadas como dioctaedrales y trioctaedrales.(2)

La mayoría de los minerales micáseos existentes en suelos, rocas sedimentarias y depósitos de material mineral no consolidado, están relacionados a la muscovita.(4)

Otra de las micas comunes es la Ilita (Fig. 1.6) que es el término de campo que se le da a la mica en suelos y sedimentos no consolidados y en las rocas sedimentarias.

Dentro de las micas se tienen también la Biotita, Glauconita, Celadonita y Vermiculita.

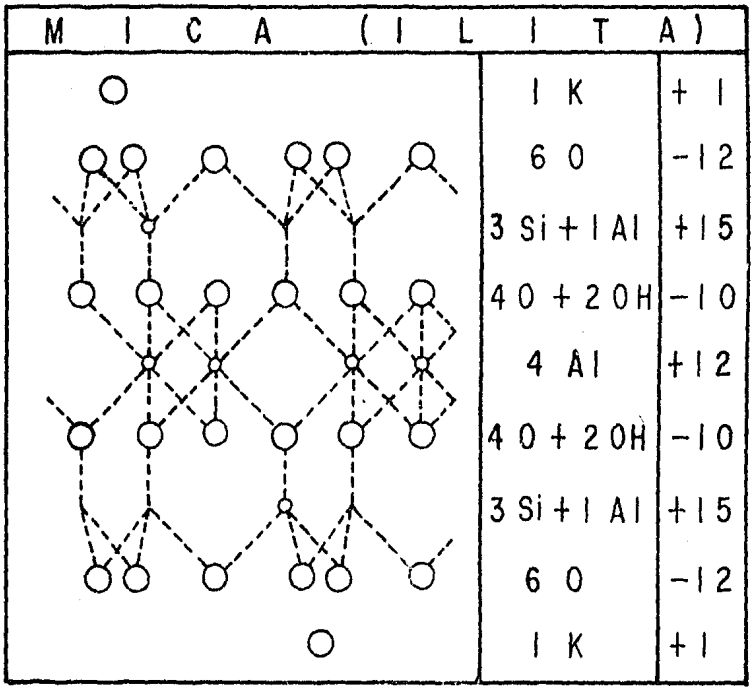


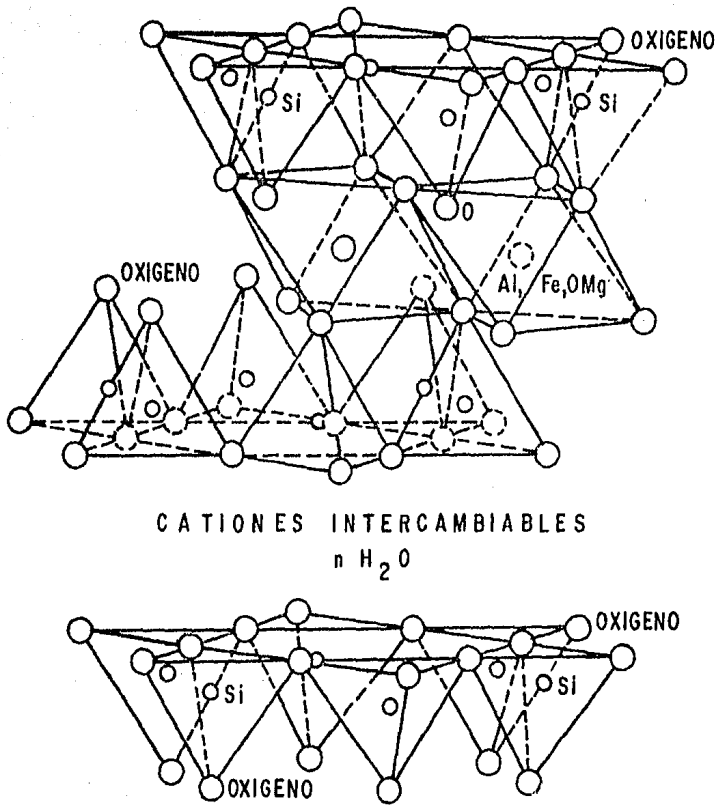
FIG. I .6 – REPRESENTACION ESQUEMATICA DE LA ILITA .

1.3.3 Grupo de la Montmorillonita

Los minerales de arcilla en los cuales las capas componentes no están estrechamente ligadas por - iones de potasio (mica) o magnesio (vermiculita), porque contienen moléculas de agua en el espacio intermicelar, han sido agrupados como montmorillonitas (Fig. 1.7). Todos ellos son de grano extremadamente fino y se hidratan fácilmente al contacto con el agua o líquidos orgánicos. También son conocidos como esmectitas.(4)

Sustituciones isomorfas pueden ocurrir tanto en - la capa de tetraedros como en la de octaedros, - dando como resultado en deficiencias de carga. La deficiencia de carga es neutralizada por cationes intercambiables, de tal suerte que el mineral se hace eléctricamente neutro.

Debido a la infinita variación de posibles reem-- plazamientos isomorfos y consecuentemente en la - cantidad de deficiencia de carga, es impractica-- ble definir alguna especie.(4)



ESTRUCTURA DE LA MONTMORILLONITA
(HOFMANN, ENDELL, WILM, MARSHALL, HENDRICKS).

FIG. I.7 — REPRESENTACION ESTRUCTURAL DE LA MONTMORILLONITA.

La mayoría de las montmorillonitas son dioctaedrales, pero la hectorita, stevensita, sauconita y la saponita son trioctaedrales.

1.3.4 Grupo de la Clorita

Los minerales de arcilla clasificados como Cloritas (Fig. I.8), son filosilicatos trioctaedrales con una relación de las capas estructurales de 2:1, similar al de la mica. La composición general del grupo es $(Mg, Fe, Al)_6 (Al, Si)_4O_{10} (OH)_8$, pero los reemplazamientos isomorfos son frecuentes. Consiste de capas alternadas de mica y de Brucita en una relación de 2:1:1.

La estructura de la Clorita está formada por capas de talco y de brucita, que se encuentran apiladas de varias maneras para formar los politipos.

Una de las variedades de la Clorita es la Clorita hidratable, que exhibe propiedades intermedias entre la clorita normal y la montmorillonita, y algunos tipos de vermiculita.

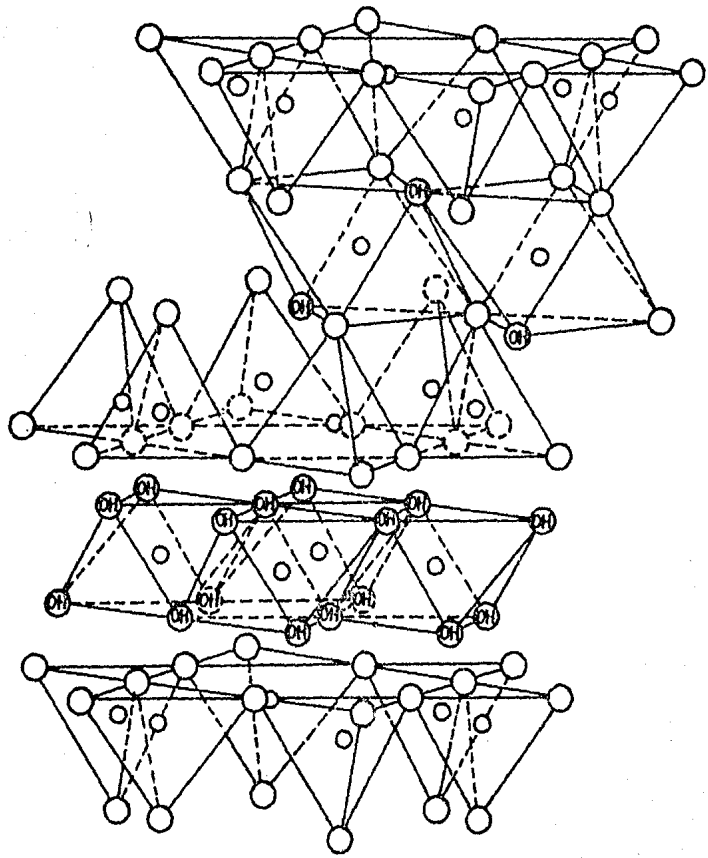


FIG. I. 8 — REPRESENTACION ESTRUCTURAL DE LA CLORITA .

Dentro del grupo de las Cloritas se tiene la chamosita, que es un silicato de fierro de composición algo variable, conteniendo aproximadamente el 40% de óxido de fierro. La chamosita es común en muchas gangas sedimentarias de fierro.

La chamosita es un mineral autígeno, generalmente un politipo de la clorita en el cual el elemento - fierro le da un color verde, que se mantiene aún - en condiciones de reducción y la presencia de materia orgánica en descomposición.

1.3.5 Grupo de la Palygorskita-Sepiolita-Atapulgita

La estructura cristalina de los minerales en este grupo es similar al de los anfíboles; consisten de grandes cadenas dobles de composición Si_4O_{11}, las cuales son paralelas a la longitud de las fibras - del mineral. Las estructuras de los minerales arcillosos difieren unas de las otras en que la estructura de la palygorskita-sepiolita-atapulgita se extiende indefinidamente en una dirección, haciendo partículas con forma de barra. La estructura del - otro mineral se extiende indefinidamente en dos di

recciones haciendo partículas en forma de placa.

La palygorskita ha sido reconocida como un pro-- ducto de la alteración hidrotermal de piroxenos y anfíboles, pero los mayores depósitos son de - origen autígeno.

La sepiolita es conocida como la arcilla "espuma de mar" por su peso ligero y su color blanco o - gris claro.

En el grupo de la sepiolita el magnesio es des-- plazable considerablemente por fierro o aluminio; o sea, agua que está débilmente unida en la es-- tructura cristalina y se pierde a bajas o altas temperaturas.(5)

La estructura de la atapulgita, consiste de cadenas dobles de sílice orientadas longitudinalmente en el eje C, unidas entre sí por medio de oxígeno en sus bordes longitudinales. Los vértices de los tetraedros en cadenas sucesivas señalan - en direcciones opuestas. Las cadenas así unidas forman -

una clase de lámina de estructura doble, con dos hileras de vértices de tetraedros en intervalos - alternados en la parte superior e inferior de las láminas.

Las láminas de estructura doble, están dispuestas de tal manera que los vértices de láminas sucesivas apuntan contrariamente y las láminas se unen por aluminio y/o magnesio en coordinación octaédrica entre los vértices de oxígenos de las láminas. El mineral presenta una hendidura causada por el enlace débil de oxígeno entre las láminas de silicio en la capa de estructura doble.

La Atapulgita, frecuentemente se encuentra asociada con cantidades variables de montmorillonita y posiblemente con otros minerales arcillosos.

1.3.6 Grupo de Capas Mezcladas

Muchos de los materiales arcillosos se componen - de más de un mineral de arcilla y estos pueden - mezclarse de diversas maneras. La mezcla puede -

ser de partículas discretas de minerales de arcilla en la cual no existe orientación geométrica determinada de una partícula con respecto a sus partículas vecinas. Otro tipo de mezcla es la interestratificación de capas de minerales de arcilla, donde la capa individual es del orden de una o pocas láminas de silicato. Estas estructuras de capas mezcladas son el resultado de la similitud de diferentes materiales arcillosos, estando constituídas por capas tetraédricas de sílice y capas octaédricas de oxígenos e hidróxilos.

Las estructuras de capas mezcladas son de dos clases diferentes. La interestratificación puede ser regular, esto es, el apilamiento a lo largo del eje C es una repetición regular de capas diferentes. En este caso, la estructura resultante tiene características distintivas diferentes a las capas componentes, y el conjunto se describe como una especie distinta. Un ejemplo de mineral de capas mezcladas regularmente es la Clorita. La otra clase de minerales de capas mezcladas se debe a una distribución irregular de capas, en la que no existe una repetición uniforme de ellas. Dentro

de esta clase pueden citarse mezclas de Ilita con Montmorillonita y Clorita con Vermiculita.

I.4. PROPIEDADES DE LOS MINERALES ARCILLOSOS

I.4.1. Intercambio Iónico

Los minerales de arcilla tienen la propiedad de adsorber ciertos aniones y cationes y retienen estos en un estado intercambiable, es decir, estos iones pueden ser reemplazados por otros aniones o cationes al tener contacto en una solución acuosa, aunque el fenómeno puede ocurrir algunas veces en un medio no acuoso. La reacción de intercambio es estequiométrica* y no afecta a la estructura del mineral.(3)

La capacidad de intercambio iónico se mide en miliequivalentes por gramo y más frecuentemente en miliequivalentes por 100 grs. de muestra determinándose a un pH neutro.

*Estequiometría : Parte de la Química que trata de las proporciones en que se combinan o reaccionan los cuerpos.

I.4.2 Intercambio catiónico

El rango de la capacidad de intercambio catiónico de los minerales de arcilla está dado en la Tabla I.2.

Partiendo de la consideración de que los factores que tienen influencia en la capacidad de intercambio catiónico no son un simple valor de capacidad sino es una característica para un grupo dado de minerales arcillosos, la capacidad de intercambio catiónico de un tipo de mineral dado, puede variar con muchos factores, por lo que rigurosamente los valores obtenidos son comparables solamente si se obtuvieron por el mismo procedimiento estandard, en un material de textura y estructura - comparables.

- Causas del intercambio catiónico:

a) El rompimiento de enlaces alrededor de las caras de unidades estructurales origina una carga que se neutraliza por adsorción de cationes. A medida que el tamaño de partícula - --

disminuye, el número de enlaces rotos aumenta, provocando un incremento en la capacidad de intercambio. También las fallas en la estructura cristalina tienden a aumentar el número de rompimiento de enlaces, por lo que la capacidad de intercambio se incrementará cuando el grado de cristalinidad disminuya.

TABLA I.2 CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO DE MINERALES ARCILLOSOS (Meq/100 grs)

Caolinita	3 - 15
Halloysita $2H_2O$	5 - 10
Halloysita $4H_2O$	40 - 50
Montmorillonita	80 -150
Ilita	10 - 40
Vermiculita	100 -150
Clorita	10 - 40
Sepiolita-Atapulgita-Palygorskita	20 - 30

b) Sustituciones dentro de la estructura de planos.

La sustitución que puede presentarse en la lámina tetraédrica es la del silicio, ión tetravalente, por el aluminio, ión trivalente, y - en la lámina octaédrica la sustitución de aluminio trivalente por iones de menor valencia (particularmente magnesio), originando un desbalance de cargas en las unidades estructurales de algunos minerales de arcilla. Algunas veces tales sustituciones están balanceadas - por otros cambios en la estructura de planos; por ejemplo, OH por O, o por el llenado de - las dos terceras partes de las posiciones de posibles octaedros, pero frecuentemente son - balanceadas por la adsorción de cationes.

c) El hidrógeno de hidroxilos expuestos, puede - ser reemplazado por un catión que puede ser - intercambiable. Algunos grupos de hidroxilos estarían expuestos alrededor de las aristas - rotas de todas las arcillas y el intercambio catiónico será por la ruptura de ligaduras -

por una parte, y por el reemplazamiento de los hidrógenos de los hidroxilos expuestos. Esta causa de capacidad de intercambio catiónico será importante para la Caolinita y la Halloysita, debido a la presencia de una hoja de hidroxilos en un lado del plano de crucero basal.

En la Montmorillonita y Vermiculita, las sustituciones dentro de los planos, causan cerca del 80% del total de la capacidad de intercambio catiónico.

En la Caolinita y Halloysita el rompimiento de ligaduras son la principal causa de la capacidad de intercambio. En la Ilita, Clorita y Sepiolita-Palygorskita-Atapulgita, la ruptura de ligaduras son una importante causa de la capacidad de intercambio y cuando estos minerales están bien cristalizados y tienen relativamente baja capacidad, podría ser la causa mayor. Sustituciones dentro del plano, particularmente en muestras pobremente cristalinas de Ilita Clorita y Sepiolita-Palygorskita-Atapulgita, podrían parcialmente explicar su intercambio.

Rapidez de la Reacción del Intercambio Catiónico.

La rapidez de la reacción de intercambio varía -- con la arcilla, la concentración de los cationes y la naturaleza y concentración de los aniones. - En general, la reacción para la Caolinita es muy rápida, en algunos casos instantánea. Es lento -- para la Montmorillonita y para la Atapulgita y requiere bastante tiempo, quizás horas, para alcanzar su terminación para la Ilita.

Variación del intercambio catiónico debido al Tamaño de Partícula.

Como se muestra en las Tablas I.3 y I.4, la capacidad de intercambio catiónico de la Caolinita e Ilita se incrementa cuando el tamaño de la partícula decrece. Es generalmente considerado que la capacidad de intercambio catiónico de la Montmorillonita no cambia substancialmente con el tamaño de la partícula.

TABLA I.3 VARIACION EN LA CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO DE LA CAOLINITA CON EL TAMAÑO DE LA PARTICULA[5].

Tamaño de la partícula, micrones	10-20	5-10	2-4	1-0.5	0.5-0.25	0.25-0.1	0.1-0.05
Capacidad de intercambio catiónico, meq/100 grs.	2.4	2.6	3.6	3.8	3.9	5.4	9.5

TABLA I.4 VARIACION EN LA CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO DE LA ILITA CON EL TAMAÑO DE LA PARTICULA.

Tamaño de la partícula, micrones		1-0.1	0.1-0.6	<0.06
Capacidad de intercambio catiónico, meq/100 grs.	Muestra A	18.5	21.6	33
	Muestra B	13.0	20.0	27.5
	Muestra C	20.0	30.0	41.7

- Reemplazabilidad de cationes Intercambiables.

Un fenómeno que llega a reducir la capacidad de intercambio catiónico es el bloqueo de posiciones de intercambio. Algunos agentes que bloquean las posiciones son aluminio, óxido ferroso, azufre y ciertos iones orgánicos.

Los estudios del intercambio catiónico mostraron que bajo una serie de condiciones dadas, varios cationes no fueron reemplazados igualmente y no tuvieron el mismo poder de reemplazamiento. Se concluyó que el poder de reemplazamiento de los cationes se incrementa de acuerdo al ordenamiento siguiente: $Na < K < Ca < Mg < NH_4$. Esto significa que, por ejemplo, a iguales concentraciones el Ca^{+2} desplazará una fracción mayor de Na^{+} que aquélla que el Na^{+} reemplazará por Ca^{+2}. El calcio será más difícil de reemplazar.

Debido a que el fenómeno de intercambio catiónico está afectado por una serie de factores, no existe un ordenamiento universal de reemplazamiento. El ordenamiento depende de las condiciones experimentales de los cationes incluidos y de la clase de material arcilloso. Los factores que lo modifican son:

1) Efecto de la concentración. En general, un incremento de la concentración del catión - reemplazante causa un mayor intercambio. Esto es de esperarse, puesto que el intercambio catiónico es una reacción estequiométrica y la ley de acción de masas es válida.

2) Población de zonas de intercambio. Se ha demostrado que la facilidad de liberación de un ión depende no solamente de la naturaleza del ión, sino también de la naturaleza - de los iones complementarios que llenan el remanente de las zonas de intercambio; depende también del grado de saturación del - ión presente en dichas zonas.

3) Naturaleza del anión en la solución reemplazante. Algunos investigadores han encontrado que el intercambio catiónico, varía con la naturaleza del anión con el que está presente el catión. Por ejemplo, se ha encontrado enorme variación en la sustitución de Na^{+} por Ca^{+2}, cuando se emplea hidróxido de calcio o sulfato de calcio.

4) Naturaleza del ión. El poder reemplazante y la firmeza con la que se adhiere a la estructura un catión de intercambio aumenta con - la valencia del ión; con excepción del H^+, - el cual se comporta como ión divalente. Un - aumento en el tamaño iónico de cationes de - la misma valencia aumenta la potencia de -- reemplazamiento.

5) Efecto de calentamiento. Un calentamiento moderado reduce el poder de reemplazamiento y además cambia el orden del reemplazamiento - relativo.

6) Naturaleza del material arcilloso. Investigaciones hechas en suelos sugieren que la reemplazabilidad de varios cationes varía con la compleja naturaleza de la adsorción, cuando todos los demás factores se mantienen igual.

- Fijación de Cationes.

Es conocido por los investigadores de suelos - que ciertos cationes pueden ser sorbidos por -

las arcillas en un estado no intercambiable ó difícil para el intercambio. El potasio es el ión común que es fijado a un grado considerable y - es el ión que ha sido más estudiado por su importancia en la fertilización de suelos. Wood y Deturk, Bray y Deturk, Stanford y otros han demostrado que la Ilita fijará al potasio, y que la - mayoría de los iones potasio fijados en suelos, se deben probablemente a la acción de este mineral arcilloso.

1.4.3 Intercambio Aniónico

El estudio de reacciones de intercambio aniónico en minerales de arcilla es muy difícil, debido - principalmente a la posible descomposición de la arcilla en el curso de la reacción.

Las investigaciones de intercambio aniónico en - minerales de arcilla han sido considerablemente basadas y asociadas con estudios de la adsorción de fosfatos por los suelos. Así, los estudios de la adsorción de fosfato por Caolinita han sido un argumento considerable para establecer que mu

chos de los resultados observados se deban al -- reemplazamiento de iones hidroxilos en la estructura de la Caolinita por iones fosfato o por la reacción entre fosfato y aluminio, producido por la destrucción de la estructura cristalina de la Caolinita.

A continuación se presentan explicaciones posi-- bles para la reacción de intercambio aniónico:

a) El intercambio aniónico puede deberse al reemplazamiento de los hidroxilos por iones - fosfato, los cuales son adsorbidos por la - Caolinita.

b) Las reacciones pueden deberse a la presencia de enlaces rotos de las caras de las partículas arcillosas. Es lógico que esta ruptura - produzca zonas positivas y negativas en las caras de las partículas arcillosas, de tal - manera que la capacidad de intercambio aniónico sea igual a la capacidad de intercambio catiónico.

c) Otra explicación se basa en consideraciones geométricas del anión con respecto a la geometría de la unidad estructural de la arcilla. Aniones tales como fosfato, borato, arsenato, etc., los cuales presentan la misma geometría y tamaño que las unidades tetraédricas, pueden adsorberse por un ajuste en la lámina tetraédrica. Aniones que no pueden ajustarse en esa unidad no pueden adsorberse por la misma razón.

d) Otra explicación supone que existen zonas de intercambio aniónico (positivas), debido a sustituciones dentro de la estructura interna. Pero tal explicación carece de fundamento porque generalmente las arcillas poseen carga negativa.

1.4.4 Cambios por Temperatura.

Cuando los minerales arcillosos se calientan por encima de la temperatura ambiente, generalmente sufren cambios en su estructura cristalina. Entre 400 y 700°C la estructura de la arcilla pue-

de romperse o alterarse. Por medio de calentamientos a temperaturas del orden de 900°C, la estructura del mineral se destruye, lo cual es seguido algunas veces por su fusión.

A menudo, seguido a la destrucción de la estructura de la arcilla, existe un intervalo considerable de temperatura en el cual se desarrollan nuevas fases cristalinas anteriores a la fusión y vitrificación de los minerales.(3)

1.4.5 Floculación-Defloculación.

Un mineral arcilloso se encuentra floculado, cuando las partículas tienden a unirse para formar conglomerados. Está defloculado cuando estos conglomerados se rompen o separan. Los factores de mayor importancia en el fenómeno de floculación-defloculación son el tipo y concentración del electrolito presente, efectos de intercambio iónico y pH del agua. Además, el grado de floculación-defloculación es controlado por la capacidad de intercambio de iones de la arcilla, concentración de cationes sobre la ar-

cilla y concentración de cationes en el fluído - circundante a la partícula

1.4.6 Adsorción de compuestos orgánicos.

Muchas investigaciones en diferentes materiales de arcilla, han producido evidencia de algún tipo de reacción entre los componentes fundamentales de la arcilla y material orgánico. Debye ha demostrado que muchas moléculas orgánicas no - iónicas son dipolares como un resultado de la - falta de simetría en la distribución de electrones de las moléculas individuales. Tales moléculas actúan como si llevaran centros de cargas - positivas y negativas. Puesto que las estructuras de las arcillas son también polares cuando están en contacto con líquidos, soluciones o - suspensiones que contienen otra substancia po-- lar, los centros negativos en la arcilla atraen los centros positivos en la substancia polar, y los centros positivos en la arcilla atraen los centros negativos de las partículas polares dentro del líquido circundante. La idea anterior - del carácter dipolar es válida como un --------

concepto general. (La molécula de agua es polar, y es el componente polar más importante sorbido por las arcillas). Debido a su gran tamaño, es-- tas moléculas orgánicas pueden cubrir zonas de - intercambio de las partículas de arcilla, evitan do así el intercambio iónico. La capacidad de ad sorción aumenta con la polaridad y en algunos ca sos se llega a desplazar el agua adsorbida.

La adsorción de compuestos orgánicos está contro lada por la estructura de la superficie de la ar cilla, substituciones internas de la estructura cristalina y limpieza de la superficie de la ar- cilla.

Esta propiedad hace que dichos compuestos orgáni cos polares protejan al mineral de arcilla de - los cambios del medio que pudieran presentarse - hasta en tanto no sean removidos.

Además, es conocido el hecho de la formación de complejos de mineral arcilloso-orgánico mediante reacciones de intercambio iónico.

1.4.7 Otras Propiedades

Otras propiedades, tales como las características ópticas y el espectro infrarrojo originado por las arcillas, son particularmente importantes para su identificación. La solubilidad de las arcillas en ácidos y bases son importantes en la utilización de materiales arcillosos en procesos industriales.

2. DAÑO O ALTERACION DE LAS FORMACIONES QUE CONTIENEN MATERIALES ARCILLOSOS.

2.1 SISTEMA AGUA-ARCILLA

La adición de agua en los minerales arcillosos forma una película en la parte externa y entre las láminas estructurales del mineral, como consecuencia de la carga negativa sobre la superficie de la arcilla y la hidratación de los cationes intercambiables.(5)

La pérdida de agua a baja temperatura puede ser clasificada en tres categorías, dependiendo de su relación con los componentes del mineral y de la textura de las arcillas, como sigue: (1) el agua en los poros, en las superficies y alrededor de las aristas de las partículas discretas de los minerales que componen el material arcilloso; (2) en el caso de la Vermiculita, Montmorillonita y la Halloysita hidratada, el agua se encuentra entre las capas de la celda unidad de estos minerales. (Esta es el agua que causa el hinchamiento de la Montmorillonita); y (3) en el caso de la Sepiolita-Atapulgita -Palygorskita, el agua se encuentra dentro de las aber-

turas tubulares de las elongadas estructuras unidad. El tipo (1) de agua requiere generalmente muy poca energía para ser removida, secando solamente a temperaturas un poco arriba de la ambiente para completar su elimina--- ción total.(5)

El tipo de agua (2) y (3) requiere una energía definida para su completa eliminación

Se ha demostrado que esta película de agua presenta una orientación y se une a la arcilla por medio del hidróge no.(5)

El espesor de esta película de agua orientada, depende del tipo de mineral arcilloso y del catión intercambia- ble. Solamente el agua y otros líquidos polares pueden desarrollar esta capa orientada. El fenómeno de expan-- sión de arcillas es el resultado de la formación de la película de agua entre las láminas o capas. Esta pelícu la separa a las láminas y actúa como lubricante entre - ellas. Los cationes intercambiables divalentes o poliva lentes y el hidrógeno, establecen una fuerza atractiva entre las láminas, disminuyendo así el espesor de la pe lícula, mientras que los cationes monovalentes disminu-

yen la fuerza atractiva entre las láminas, lo cual permite que penetre más agua entre ellas.

La relación entre la expansión de la arcilla y composición de la misma se explica mejor por medio del concepto de disociación catiónica. De acuerdo a esta teoría, los cationes adsorbidos tienden a disociarse de la superficie de la arcilla cuando el mineral está en contacto con agua, dejando algunas unidades estructurales cargadas negativamente. Entonces se originan fuerzas repulsivas que tienden a apartarlas y permiten la entrada de agua entre ellas. La expandibilidad de arcillas también varía debido a diferencias en estructura y nivel de degradación. El orden general de expandibilidad de los minerales arcillosos es Montmorillonita > Minerales de capas mezcladas > Ilita > Caolinita. La Caolinita generalmente no presenta expansión cuando se dispersa en agua.

El desarrollo de una película orientada de agua se determina por el tipo de arcilla, la capacidad de intercambio de iones, el tipo de catión y la concentración de éste. Un cambio en el medio ambiente de la partícula de arcilla causado por una variación de la concentración

del catión o por una modificación del tipo de catión, - puede causar un incremento en la cantidad de aqua orien tada y, por ello, incrementará el tamaño de la arcilla[5].

2..2 MECANISMO DE DAÑO A LAS FORMACIONES QUE CONTIENEN ARCILLAS.

El daño o la formación puede ocurrir durante la perfora ción, operaciones de nucleo, terminación, producción, - estimulación y reacondicionamiento del pozo, así como, la inyección subsecuente de agua, aditivos químicos, y la inyección cíclica de vapor para una recuperación secundaria.[6,7,8,9,10,11]

Cuatro tipos de daño a la formación típicamente son encontrados.[11] a) Un tipo incluye el bloqueo de los ca nales porosos por sólidos, introducidos por el lodo de perforación y terminación o fluidos inyectados al pozo. b) Un segundo tipo de daño a la formación resulta de la reacción agua-arcilla que produce la hidratación y es-- ponjamiento de la arcilla, o dispersión de la partícula de arcilla y el taponamiento del poro cuando se mueve - con el fluido de producción o inyección. Aunque los mecanismos de hidratación y dispersión son diferentes, am

bos dan como resultado una baja productividad o inyectividad. c) El tercer tipo de daño a la formación resulta de un bloqueo por líquido que normalmente es causado por agua extraña introducida dentro de la formación por el pozo durante las operaciones de perforación, nucleo, terminación o acondicionamiento, etc. Este bloqueo resulta de una combinación de la permeabilidad relativa y las propiedades retentivas, como la presión capilar que reducen la permeabilidad efectiva al aceite. d) Un cuarto tipo de daño a la permeabilidad es ocasionado por la "excavación" que provoca el flujo de fluidos en el pozo en las formaciones no consolidadas. Lo que da como resultado en una producción de arena hacia el pozo con la subsecuente pérdida de productividad en el pozo.

En el presente trabajo, únicamente se tratará el daño ocasionado por las arcillas y la forma de inhibir éstas para evitar la pérdida en la permeabilidad.

Las arcillas generalmente se encuentran en un estado de equilibrio floculado con la salmuera de la formación.(8) La reducción y/o el cambio en la composición de la salmuera promueve el rompimiento del equilibrio y causa la defloculación de las arcillas.

En yacimientos de arenas, la arcilla asociada con microporos puede ocurrir o presentarse como: detritos laminares, pellets (granos finos) de tamaño de limo, material de cuarzo o en forma autígena (esto es, nuevamente formado o regenerado). La Fig. 2.1 ilustra la distribución de las arcillas dentro del espacio poroso.

En los yacimientos de areniscas las arcillas dispersas son descritas en tres categorías[13], como: (a) partícula discreta, que refleja el modo típico de ocurrencia de la Caolinita en las areniscas. Las partículas se encuentran adheridas a las paredes del poro u ocupando - espacios intergranulares (Fig. 2.2a). (b) las arcillas se encuentran alineadas dentro del poro. Se encuentran adheridas a la pared del poro formando una delgada partícula contínua (menor o igual a 12 micrones) (Fig. - 2.2b). Los cristales de arcilla pueden estar ya sea paralelos o perpendiculares a la superficie de la pared del poro. Se ha observado que la Ilita, Clorita y Montmorillonita se presentan dentro del poro en esta forma. (c) las arcillas se encuentran formando "puentes" (bridging) en el poro. La Ilita, Clorita, y algunas variedades de Montmorillonita, además de estar adheridas a las superficies de la pared del poro, se extienden cerrando un poro o - - - - - - - - - -

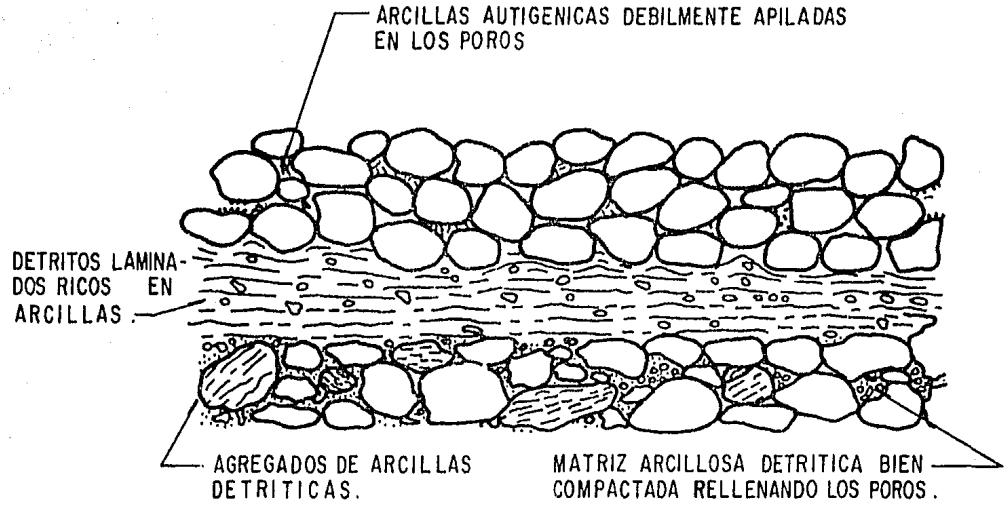


FIG. 2 . I – DISTRIBUCION DE MINERALES ARCILLOSOS EN ARENISCAS

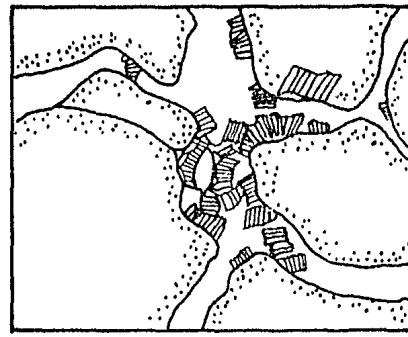


FIG. 2.2a.- EN FORMA DE PARTICULAS DISCRETAS (CAOLINITA).

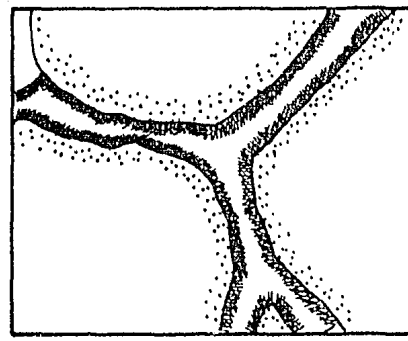


FIG. 2.2b.- ALINEADOS DENTRO DEL PORO (CLORITA).

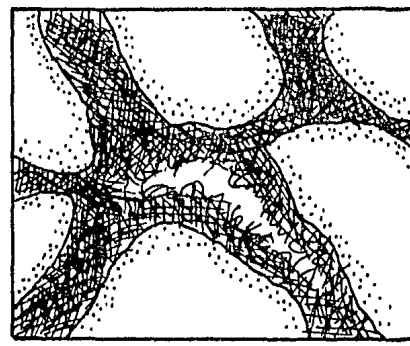


FIG. 2.2c.- FORMANDO PUENTES DENTRO DEL PORO (ILITA)

FIG. 2.2.- LOS TRES TIPOS GENERALES DE ARCILLA DISPERSA EN YACIMIENTOS DE ARENISCA.

garganta del poro para crear un efecto de puenteamiento (Fig. 2.2c).

Los mecanismos de daño de las formaciones de roca, resultan del hinchamiento de las arcillas, de la migración de las arcillas y/o partículas a tamaño de arcilla, o una combinación de estos efectos, dependiendo de la composición de la arenisca.

Por lo tanto, las partículas de arcilla y finos migran a través de los poros con cualquier fluído que fluya en el yacimiento. Y si estas partículas migran, no todas son acarreadas a través de la formación por los fluídos producidos o inyectados, sino que pueden concentrarse en las restricciones de los poros (gargantas), causando severos taponamientos y grandes reducciones en la permeabilidad[14].

Algunas investigaciones[15] demuestran que la mayor parte del daño a la permeabilidad en yacimientos de arenas, que contienen trazas de Montmorillonita y son expuestas al agua dulce, es debido a la dispersión y movimiento de arcillas. Los efectos de daño por hinchamiento son -

significativos cuando los poros son de tamaño pequeño - (microporosidad), encontrados comunmente en estratos de arcilla. Sin embargo, las arenas permeables tienen un - tamaño de poro suficientemente grande para la acumula-- ción y producción comercial de hidrocarburos, y no es - afectado significativamente por este fenómeno. La mayor pérdida en permeabilidad observada en la mayoría de las arenas puede ser por otras causas[15].

Las principales arcillas[10] susceptibles de hincharse: Montmorillonita, Esmectita y arcillas de Mantos mezcla-- dos son consideradas las más esponjables en presencia - de agua. Las arcillas de baja adsorción de agua como -- por ejemplo la Caolinita, Ilita y Clorita son las principales arcillas que migran junto con los finos a tamaño de arcilla (cuarzo, feldespatos y calcita).

En todo sistema agua-arcilla existen factores que tienden a separar las partículas arcillosas y otros a mantenerlas unidas, es decir, algunos factores provocan la - defloculación y otros la floculación. La combinación relativa de estos factores opuestos determina que las arcillas permanezcan separadas o unidas.[3,9,16,17]

Los factores más importantes que contribuyen a unir partículas arcillosas son:

1.- Fuerzas de atracción de Van Der Waalls.

2.- Recristalización y alteraciones químicas.

3.- Adsorción de materia orgánica del crudo.

4.- La Adsorción mutua de cationes intercambiables entre las plateletas (hoja muy fina y pequeña en tamaño).

5.- Una tendencia termodinámica para reducir la energía libre interfacial por reducción de área superficial.

6.- Atracción electrostática entre perfiles cargados positivamente y superficies negativas.

Los factores que contribuyen a la separación de las partículas arcillosas en las formaciones son:

1.- Hidratación de cationes intercambiables.

2.- Hidratación de la superficie de las partículas.

3.- Repulsión de atmósferas interactuantes de cationes

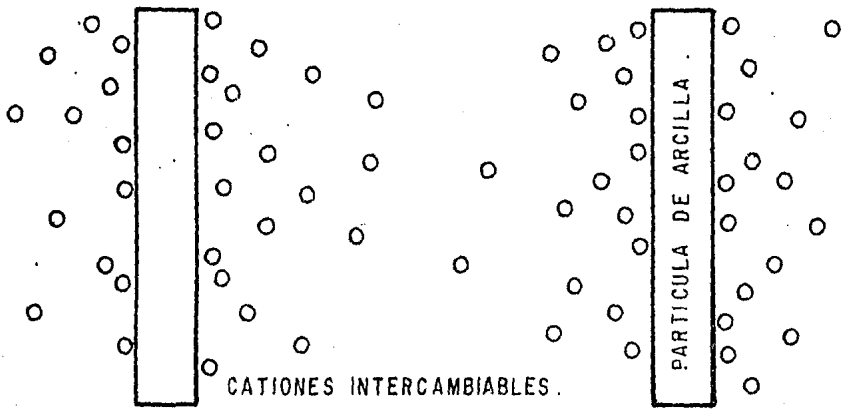


FIG. 2.3 :—DISTRIBUCION DE CATIONES INTERCAMBIABLES ALREDEDOR DE PARTICULAS DE ARCILLA DISPERSA EN AGUA DESTILADA.

intercambiables.

4.- Desorción o remoción química de material enlazante adsorbida.

5.- Neutralización de cargas positivas de perfiles de las partículas.

6.- Esfuerzo mecánico.

7.- Movimiento térmico (Browniano).

Los cationes intercambiables se mueven por medio de - - fuerzas electrostáticas de atracción hacia la partícula cargada negativamente y fuerzas de repulsión entre sí. Como resultado, la distribución de cationes alrededor - de cada partícula será como una atmósfera, siendo densa en la superficie de la partícula y difusa a distancias mayores de ésta (Fig. 2.3)[3,9,17,18].

La relativa expansión o compresión de ésta atmósfera catiónica es críticamente importante para determinar si - las partículas permanecerán floculadas o se separarán. La atracción de cationes hacia la partícula depende de la densidad de carga total de la partícula y la carga -

efectiva total de los cationes. Las fuerzas de difusión son grandemente afectadas por la concentración de iones en el seno de la solución; la repulsión de iones no unidos a las partículas contraresta la repulsión entre los cationes intercambiables y tiende a comprimir la atmósfera catiónica. Por consiguiente, las atmósferas de cationes serán más difusas en agua destilada y comprimidos - en un electrolito de alta concentración.(9) También serán más difusas en una salmuera que contenga cationes - monovalentes que en otra que contenga cationes divalentes, puesto que éstos poseen una mayor capacidad de - - adsorción. (3,9,17,18) Por otro lado, los cationes que exhiben números de hidratación* altos, causan mayor expansión, y aquellos con relación de carga a radio iónico mayor causan menor dispersión.(3) La Tabla 2.1. -- presenta estos valores correspondientes a algunos cationes.

A medida que dos partículas arcillosas suspendidas se - aproximan una a otra, la interacción de sus atmósferas de cationes intercambiables tiende a separarlas. Del -- mismo modo, si agregados de arcilla compactos y orienta

* Número de hidratación, es el número de moléculas de - agua que pueden ser llevadas por el catión a la superficie de la arcilla.

dos son colocados en agua destilada, sus atmósferas de cationes se expanden y crean fuerzas de repulsión que - tienden a separarlos.(9,17)

TABLA 2.1. DIAMETROS IONICOS Y NUMEROS DE HIDRATACION DE VARIOS CATIONES.

CATION	DIAMETRO IONICO	NUMERO DE HIDRATACION.
Sodio	1.90	5 a 11
Potasio	2.66	1 a 4
Amonio	2.86	2 a 4
Calcio	1.98	10 a 22
Magnesio	1.30	12 a 33

Por consiguiente, la permeabilidad de cualquier roca -- que contenga material arcilloso expuesto depende de la forma en que se encuentren ligadas las partículas arcillosas individuales, es decir de su estado de floculación. La permeabilidad será máxima si todas las partículas están unidas en agregados compactos; si éstas partículas están totalmente dispersas y/o expandidas la permeabilidad será mínima.(9)

El daño a la permeabilidad puede ser minimizado estabilizando las partículas de arcilla para prevenir su dispersión. Esto puede ser logrado con un fuerte material catiónico.(18)

Los cationes movalentes de sodio y potasio tienen cargas de +1 y proporcionan una estabilidad mínima a las partículas de arcilla. Los cationes divalentes, tales como Ca^{++} y Mg^{++}, tienen una carga de +2, y son varias veces más fuertes que los cationes monovalentes como agentes estabilizadores.(18)

El ión del metal zirconio lleva una carga de +4. De acuerdo a la regla de Shulze-Hardy la carga adicional por ión de zirconio, podrá ser muchas veces más efectivo como estabilizador de arcillas que los cationes divalentes. En soluciones acuosas las sales de zirconio se hidrolizan para formar iones polinucleares que desarrollan como iones de muy alta carga.

Los enlaces de hidroxilo han creado la estructura que tiene una carga de +20. En soluciones acuosas los iones existen a varias etapas de hidrólisis, teniendo una am-

plia variación de cargas. Debido a la muy alta carga positiva, el ión polinuclear zirconio es probablemente -- varios millones de veces más fuerte como estabilizador de arcillas que las soluciones salinas convencionales - de potasio y calcio.(18)

La dispersión de la arcilla es un resultado del reemplazamiento del catión que forma la atmósfera que rodea -- las "placas"(plateletas) de arcilla, ocasionando esto - una pérdida en la fuerza electrostática de atracción entre las placas de arcilla.(18)

Los iones hidrolizables del metal zirconio producen una atmósfera catiónica extremadamente fuerte que minimiza el daño causado por la dispersión, movimiento y mecanismo de bloqueo (estructuras apiladas en forma de cepi- - llo), dando como resultado en una alta retención de la permeabilidad de la formación.(18)

2.3 DAÑO O ALTERACION POR OPERACIONES ESPECIFICAS.

2.3.1. Operaciones de perforación.

El filtrado de lodo invade el yacimiento alterando su -

permeabilidad,[19] ya sea por: (a) bloqueo con sólidos, (b) formación de emulsiones, (c) así como por cambios en la mojabilidad de la roca. También la acción escariadora de la barrena y los estabilizadores puede sellar las fracturas cerca de la pared del pozo.

2.3.2. Durante la colocación de la tubería de revestimiento y su cementación.

El efecto de incremento de presión contra la formación al bajar la tubería de revestimiento muy rápidamente -- provocará una diferencial de presión adicional contra las zonas productoras, comprimiendo el enjarre y aumentando las posibilidades de perder circulación. Las lechadas de cemento tienen un alto filtrado que puede -- acarrear sólidos adicionales, además de aguas no compatibles con la formación; como por ejemplo, los productos químicos usados para lavar el enjarre delante de -- las lechadas puede ocasionar cambios en la formación.

2.3.3. Operaciones de terminación.

Los sólidos del fluído de terminación pueden taponar las perforaciones de los disparos. La formación alrede-

dor del disparo puede ser también comprimida y compactada, reduciendo la permeabilidad en el túnel del disparo. Al bajar la tubería de producción con el empacador se provoca un efecto similar al originado al bajar la tubería de revestimiento.

Durante la iniciación de la producción la precipitación de sólidos de oxidos y carbonatos, grasa para roscas y todo material sucio que puede acarrear el fluído al ser circulado para limpiar el pozo, puede originar el taponamiento de los poros. Si estos fluídos contienen asfaltos tratados pueden originar cambios en la mojabilidad del yacimiento. Los gastos de producción altos pueden acarrear gran cantidad de sólidos, taponando los canales de permeabilidad y dañando la formación.

2.3.4. Operaciones de estimulación.

Las operaciones de fracturamiento con ácido a veces no son efectivas debido al taponamiento de las fracturas con sólidos finos contenidos en el mismo fluído fracturante, por el uso de fluídos "lavadores" no compatibles con la formación.

2.3.5. Operaciones de limpieza de parafina o asfalto.

Normalmente para este fin se usan solventes; si estos solventes son circulados de tal manera que entren en -- contacto con la zona productora se pueden alterar las - condiciones de mojabilidad de la roca en forma negati-- va. Algunas veces se usan escareadores para limpiar la parafina, y si los residuos de esta operación circulan hacia el fondo y logran penetrar a la formación, es factible su taponamiento.

2.3.6. Operaciones de reparación de pozos.

El daño es similar al originado por las operaciones de terminación de pozos.

2.3.7. Durante la etapa de producción.

En esta etapa muchas veces es necesario utilizar productos químicos para inhibir la corrosión, la depositación de sales o parafina. Debe tenerse especial cuidado en - que estos productos no entren en contacto con la formación, puesto que por lo general afectan la mojabilidad de la

roca. También la precipitación de óxido y sales puede - ocasionar taponamientos.

Los empaques de grava son susceptibles de ser taponados por sólidos o arcillas que migran de la formación. En - las formaciones pobremente consolidadas este problema - es aún mayor.

2.3.8. Programas de inyección de agua.

Generalmente se ocasiona daño en estos casos cuando el agua no está tratada apropiadamente y se inyecta en formaciones sensibles al agua dulce, que rompen el equilibrio floculado de la formación ocasionando pérdidas severas en la inyectividad.

2.3.9. Programas de inyección de gas.

El gas generalmente alcanza flujo turbulento en todas - las instalaciones antes de llegar a la pared del pozo, ocasionando esto un efecto de barrido de grasa para roscas, escamas de corrosión y otros sólidos que taponarán los poros del yacimiento; desafortunadamente los inhibidores de corrosión al ser inyectados con el gas hacia -

la formación reducen su inyectividad, por lo cual se - debe limpiar muy bien el equipo antes de iniciar la inyección.

2.3.10. Programas de inyección cíclica de vapor.

La defloculación, degradación de la arcilla y emulsiones estabilizador arcilla, pueden contribuir a dañar la formación en un ambiente de inyección de vapor. Las altas velocidades de flujo (donde se presenten; asociados con vapor, vapor condensado, o hidrocarburos) pueden debilitar la masa de arcilla y facilitar su movimiento -- dentro de los poros de la roca, lo que se traduce en -- una reducción drástica en la permeabilidad.(10)

2.3.11. Daño ocasionado por bacterias.

Algunas algas y bacterias crecen y se reproducen en la mayoría de las aguas usadas para inyección a los yacimientos cuando el agua está contaminada con ciertos organismos. Estos organismos, tanto vivos como muertos -- son pequeños y permanecen suspendidos en el agua, tapan los poros y se depositan en la pared del pozo. El tama-

ño y distribución de los poros de la roca, concentra-- ción de las bacterias y forma o modo de agregarse, son algunos de los factores que afectan la inyectividad -- del agua en la formación.(20)

Algunas bacterias producen reacciones químicas que causan precipitación de sales. Las bacterias reductoras de sulfatos reducen a éstos a sulfuros con la subsecuente precipitación de sulfuros insolubles. El ión sulfuro -- puede combinarse con hidrógeno para formar ácido sul- - fhídrico o con el fierro para formar el sulfuro ferroso que es un serio agente obturante. Estas bacterias tam-- bién pueden producir azufre libre en estado coloidal.

Por otro lado, el oxígeno presente en el agua es utilizado por la bacteria para producir energía a través de la oxidación de la materia orgánica con desprendimiento de bióxido de carbono. Este compuesto modifica el equilibrio de los carbonatos y bicarbonatos en el agua con posibilidad de obturar la formación.(3)

3. SOLUCIONES ESTABILIZADORAS DE ARCILLA

3.1. PROPIEDADES O CARACTERISTICAS.

El término agente estabilizador de arcillas se da a los cationes o complejos catiónicos y otras especies que inhiben la expansión y/o la dispersión de arcillas.(3)

La estabilización de la formación es un proceso químico por medio del cual se refuerzan los depósitos de arcilla para prevenir su dispersión.(21)

Considerando el mecanismo por medio del cual se provoca el daño a una formación que contiene minerales arcillosos, un producto estabilizador de arcilla debe presentar las siguientes características:

a) Su mecanismo de acción debe ser físico-químico, es decir, la estabilización de arcillas debe lograrse mediante un fenómeno de adsorción.

b) Poseer propiedades catiónicas multivalentes.

c) El catión actuante debe tener el menor número de hi-

dratación.

d) El catión actuante debe tener la mayor relación carga radio iónico.

e) Ser resistente a la acción de compuestos contenidos en el agua de dilución.

f) Ser resistente a la acción de ácidos utilizados en las estimulaciones de la matriz de la roca.

g) Ser resistente a la presión y temperatura. Inclusive altas temperaturas producidas en las operaciones de inyección de vapor.

Desde el punto de vista de su aplicabilidad debe:

h) No ser tóxico o corrosivo y ser de fácil manejo para que no afecte al personal y su preparación sea rápida.

i) Ser de baja viscosidad para su fácil inyectividad matricial a baja presión.

j) Ser de un costo que permita su utilización comercial.

3.2. PROCESOS DE ESTABILIZACION

3.2.1. Hidrólisis de iones metálicos.

Cuando la mayoría de los compuestos iónicos de metales polivalentes se disuelven en agua, los iones metálicos primero se hidratan y posteriormente se hidrolizan. Hidratación e hidrólisis no deben ser confundidos. El término hidratación[9] es aplicado a una adsorción, unión o asociación de moléculas de agua con otras moléculas, iones o superficies. El término hidrólisis significa una reacción química, donde las ligaduras en las moléculas de agua son rotas y nuevas ligaduras son formadas. Tanto la hidratación como la hidrólisis son importantes en este capítulo.

Como se mencionó en el capítulo anterior, la hidratación de cationes intercambiables en la superficie de las arcillas son factores definidos en la primera etapa de separación de las partículas de arcilla. Sin embargo, la atención es ahora dirigida a la hidrólisis, la cual

causa importantes cambios en las propiedades de muchos iones metálicos.

Los iones metálicos hidrolizables reaccionan con el - - agua para producir soluciones ácidas. Estas se asume comunmente que reaccionan de acuerdo a la siguiente ecuación, donde $[M(H_2O)_6]^{+3}$ es un ión metálico hidratado, trivalente e hidrolizable.

$$[M(H_2O)_6]^{+3} + H_2O \rightleftharpoons [M(OH)(H_2O)_5]^{+2} + H_3O^+ \quad \ldots\ldots\ldots (3.1)$$

$$[M(OH)(H_2O)_5]^{+2} + H_2O \rightleftharpoons [M(OH)_2)(H_2O)_4]^{+} + H_3O^+ \quad \ldots\ldots\ldots (3.2)$$

$$[M(OH)_2(H_2O)_4]^{+} + H_2O \rightleftharpoons M(OH)_3(H_2O)_3 + H_3O^+ \quad \ldots\ldots\ldots (3.3)$$

Una ecuación generalizada de estas reacciones podría -- ser entonces:

$$[M(H_2O)_6]^{+3} + 3H_2O \rightleftharpoons [M(OH)_z(H_2O)_{(6-z)}]^{(3-z)+} + (3-z)\, H_3O^+ \quad \ldots\ldots\ldots (3.4)$$

Para muchos propósitos las ecuaciones (3.1)a(3.4) son enteramente satisfactorias. Sin embargo, cuando tratamos - con reacciones de intercambio iónico, incluyendo la rapidez de difusión, propiedades de floculación y reacci<u>o</u>

nes cinéticas, estas ecuaciones no son del todo satis-- factorias. En estas instancias, la hidrólisis del ión - metálico puede ser representada por una ecuación tal co mo:

$$x[\ M(H_2O)_6\ ]^{+3} \quad [\ Mx(OH)y(H_2O)_{(6x-2y)}\ ]^{(3x-y)+}$$
$$+y\,H_3O^{+} \qquad (3.5)$$

donde x varía de 1 a un valor mayor y "y" varía de cero a 3x. El término:

$$[\ Mx(OH)y(H_2O)_{(6x-2y)}\ ]^{(3x-y)+}$$

describe mucho más precisamente los iones metálicos hidrolizables en solución.

La ecuación (3.5) simplemente establece que muchos - -- iones metálicos en solución pueden ser polinucleares y mantener una coordinación séxtuple con moléculas de - - agua y iones hidroxilos (OH). Cada unidad cinética cargada (ión) consiste de un número indefinido de átomos - metálicos encadenados (enlazados) por puentes de hidroxil. La carga total por ión dependerá de la relación -- M:OH y el número de átomos del metal por ión. Las solu-

ciones metálicas trivalentes pueden contener iones ta-- les como:

$$[\ M_6(OH)_6(H_2O)_{24}\ ]^{+12}\ ,\ \acute{o}$$

$$[\ M_{24}(OH)_{48}(H_2O)_{48}\ ]^{+24}$$

cuya carga total por ión es mucho más grande que sus -- igualdades empíricas:

$$[\ M(OH)(H_2O)_5\ ]^{+2} \quad y \quad [\ M(OH)_2(H_2O)_4\ ]^{+}$$

Iones hidratados tales como estos son ilustrados en la Fig. 3.1 , y se cree que se hidrolizan vía la formación de "puentes" de hidroxil. La reacción ha sido llamada polimerización y para los iones coordinados en - - seis, probablemente de algo parecido a esto:

$$[\ M(H_2O)_6\ ]^{+3} + [\ M(H_2O)_6\ ]^{+3} \rightleftharpoons$$

$$[(H_2O)_4\ M(OH)_2\ M\ (H_2O)_4\ ]^{+4} + 2H_3O^{+} \quad \ldots\ldots\ (3.6)$$

o parecido a esto:

$$[\ M(H_2O)_6\ ]^{+3} + [\ M(H_2O)_6\ ]^{+3}$$

$$[\ (H_2O)_5\ M\text{-}OH\text{-}M\ (H_2O)_5\ ]^{+5} + H_3O \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (3.7)$$

El complejo polinuclear de iones en el lado derecho de la ecuación (3.6) y (3.7), puede polimerizarse posteriormente a formas aún mayores de iones con una gran carga neta, pero a una baja carga por átomo metálico en los iones.

La Fig. 3.2 ilustra la unión de iones metálicos hidratados, vía polimerización, dentro de iones polinucleares.

El proceso puede continuar hasta que la concentración del ión hidronio (H_3O^+) llega a ser lo suficientemente alta para romper los enlaces de M-OH-M, tan rapidamente como ella se forma. El equilibrio es algunas veces alcanzado solamente después de semanas, meses o años de espera.

Los ejemplos dados para la hidrólisis de iones trivalen

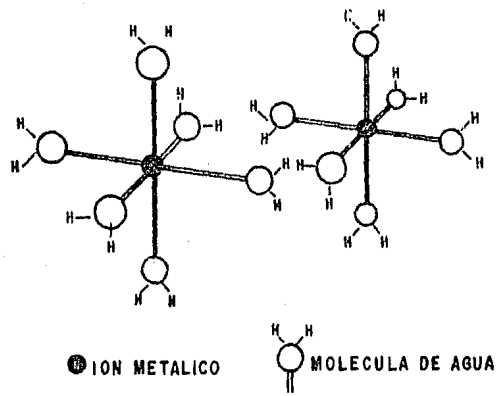


FIG. 3.1 :— COORDINACION SEXTUPLE DE MOLECULAS TIPICAS DE AGUA DE VARIOS IONES METALICOS, ESPECIFICAMENTE IONES TRIVALENTES EN SOLUCIONES ACIDAS FUERTES.

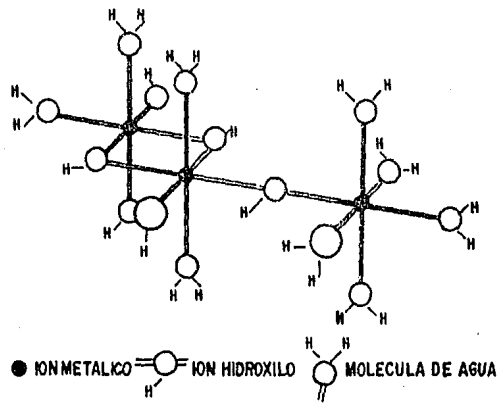


FIG. 3.2 :— ION POLIMERICO TIPICO DE LA PRIMERA ETAPA DE HIDROLISIS Y POLIMERIZACION DE IONES METALICOS HIDRATADOS COMO LOS MOSTRADOS EN LA FIGURA 3.1.

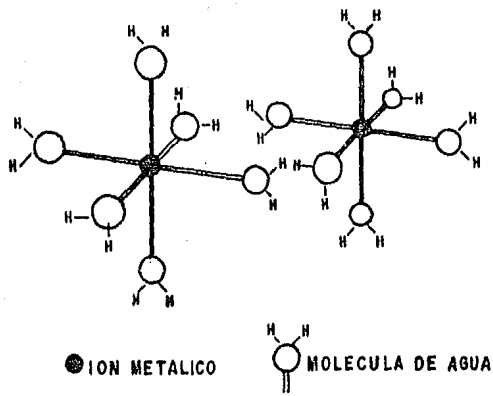


FIG. 3.1 :— COORDINACION SEXTUPLE DE MOLECULAS TIPICAS DE AGUA DE VARIOS IONES METALICOS, ESPECIFICAMENTE IONES TRIVALENTES EN SOLUCIONES ACIDAS FUERTES.

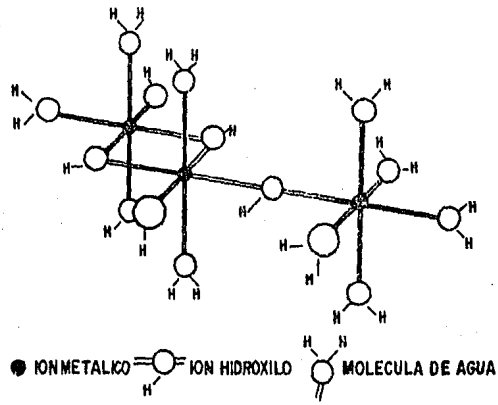


FIG. 3.2 :— ION POLIMERICO TIPICO DE LA PRIMERA ETAPA DE HIDROLISIS Y POLIMERIZACION DE IONES METALICOS HIDRATADOS COMO LOS MOSTRADOS EN LA FIGURA 3.1.

tes se aplica a varios metales comunes incluyendo Fierro, Aluminio, Cromo, y Lantanio, así como varios otros. Los iones tetravalentes, en general, tienen una fuerte tendencia a hidrolizarse y formar iones polinucleares - algo más complicados que los metales trivalentes.

3.2.2. Mecanismo de estabilización con soluciones hidrolizables.

El hinchamiento de las arcillas es prevenido intercambiando iones polinucleares altamente cargados por cationes nativos.(9)

La atracción entre una partícula de arcilla cargada y - sus cationes intercambiables está exponencialmente relacionada a la carga en los cationes. Por lo tanto, un -- ión polinuclear con carga neta de +8, +12, o más, puede ser un millón de veces más fuertemente atraído por una partícula de arcilla que por cationes monovalentes o divalentes. Consecuentemente de las consideraciones electrostáticas solamente, los iones polinucleares podrán - casi inmediatamente desplazar todos los cationes inter-

cambiables y ser muy fuertemente retenidos.[3]

En adición hay alguna evidencia de que los iones metálicos polinucleares se encuentran químicamente enlazados a las superficies de la arcilla. Puede ser que la unión M-O-Si, se forme entre el metal y la superficie de la sílica (S_iO_2). Los sitios de reacción pueden ser grupos de silanol ($\longrightarrow S_i$-OH), cerca de puntos de substituciones isomorfas dentro de los mantos de tetraedros . Tal formación de enlaces M-O-Si podrían ser una forma de polimerización por oxalación, muy común en óxidos hidrometálicos[7] y conocida por formarse entre el gel de sílice y los iones metálicos hidrolizables.[11,12]

3.2.3. Mecanismo de estabilización con surfactantes catiónicos

Muchos métodos de estabilización de las arcillas están basados en la composición iónica del agua o el uso de cationes metálicos hidrolizables (como el método anterior). A continuación se describe el método de estabilización de arcillas por medio de un surfactante soluble en el aceite que recubre a las arcillas con una película de aceite tenazmente adherida.[22]

Dos formaciones alternativas del tratamiento han sido desarrolladas: (1) una emulsión de aceite diesel, conteniendo el surfactante mojante en salmuera (emulsión OC) y (2) un sistema acuoso, consistente de una dispersión del surfactante en la salmuera (dispersión OC). - El segundo método, el cuál usa el aceite residual de - la formación para recubrir las arcillas, es menos caro y es generalmente preferible, sin embargo, no es efectivo con ciertos crudos pesados por lo cual el primer método puede ser utilizado.

La emulsión OC, fué formulada con dos consideraciones en mente; (1) que pueda ser efectiva en la estabilización de las arcillas, y (2) que pueda ser lo suficientemente fina para ser inyectada facilmente dentro de la - formación. El agente que causa que los granos de arena lleguen a ser mojados es un surfactante catiónico, otro agente catiónico es agregado para estabilizar la emulsión, y un agente no iónico para controlar la finura -- de la emulsión. El aceite diesel o el tolueno le dan -- al aceite una baja viscosidad para poder recubrir los - granos de arena.

3.2.4. Mecanismo de estabilización mediante la adsorción de - residuos pesados de los hidrocarburos.

En general, los aditivos interactuan con la superficie de la arcilla y causa cambios significativos en sus -- propiedades fisico-químicas que clásicamente resultan en un daño a la formación.[23]

Este método presenta una estabilización natural de las arcillas que está basado en la adsorción de los resi- - duos (asfaltenos y resinas principalmente).

Los asfaltenos y resinas son adsorbidos tenazmente a la superficie de la arcilla alterando significativamente - sus propiedades fisico-químicas.

Los factores que influencian esta adsorción son: los ca tiones intercambiables en la arcilla, los componentes a base de nitrógeno de los asfaltenos y resinas y el sol vente utilizado para diluir los residuos. Como resulta- do de ésto, la arcilla se vuelve hidrofóbica con una ba ja capacidad de intercambio catiónico, cambian sus pro- piedades a la difracción de Rayos X y no se dispersa en

el agua destilada. Entonces las propiedades que causan que la partícula se disperse y migre (alta carga en la superficie y expandibilidad estructural), son alteradas y las arcillas llegan a ser físicamente "pasivas".

3.2.5. Mecanismo de estabilización de las arcillas utilizando cationes divalentes.

Este mecanismo de estabilización[21] se utiliza para evitar la producción de arena de formaciones pobremente cementadas, o donde el cementante en su mayoría está formado por pequeños cristales de arcilla los cuales están fijados a los granos de arena (cuarzo), formando agregados compactos.

Debido a que los depósitos de arcilla son facilmente rotos, disgregados o dispersados, y si una porción de la formación es físicamente desprendida los depósitos de arcilla son fácilmente fragmentados. También el movimiento de fluídos, especialmente agua, puede causar que los depósitos de arcilla se dispersen,

El sistema de estabilización es a base de hidróxido de calcio. Este sistema reacciona con las partículas finas

y las arcillas que se encuentran entre los granos de arena (granos de cuarzo), produciendo un silicato de calcio, producto relacionado con uno de los componentes activos en el cemento Portland.[21] Una de las ventajas en la formulación es su habilidad para reaccionar con casi todos los tipos de silicatos de la formación. Como se describió, ésto ocurre primero con las arcillas, y posteriormente, después de una larga exposición incluye a los granos de cuarzo.

También es conocida la capacidad del Cloruro de Calcio ($Ca Cl_2$) y Magnesio ($Mg Cl_2$) para controlar el hinchamiento de las arcillas.[24] El comportamiento evidente depende de las propiedades de intercambio catiónico de las arcillas que favorecen la adsorción de Calcio y Magnesio sobre el Sodio. Las arcillas que retienen suficiente Calcio y Magnesio adsorbido resisten la dispersión por agua y consecuentemente el daño en la permeabilidad.

Las razones para este comportamiento son:

1) Las arcillas son intercambiadoras de cationes o son la base del intercambio.

2) Las arcillas cálcicas no son fácilmente dispersables en agua dulce, no así las arcillas sódicas. La forma base para el intercambio de una arcilla es fácilmente alterada fluyendo una solución a través de ella. Por ejemplo, una arcilla sódica puede cambiar su base de intercambio simplemente fluyendo una solución de cloruro de calcio a través de la capa de arcilla. Hay un acuerdo general en que las arcillas de Calcio y Magnesio no son facilmente dispersables en agua -- dulce, y esto se debe a que los iones de Calcio y -- Magnesio no son facilmente ionizables de la superfi cie de la arcilla.(24) Las arcillas sódicas, sin embargo, son conocidas por permitir que los iones de - Sodio de la superficie de la partícula de arcilla se ionicen, lo que permite que la partícula acumule una carga eléctrica negativa lo suficientemente grande - para permitir que las partículas se repelen unas a - otras y, por lo tanto, se dispersen más facilmente.

3.3 TIPO DE ESTABILIZACION

De acuerdo al mecanismo de estabilización se pueden mencionar dos tipos de estabilizadores:

a) Temporales
b) Permanentes

a) Estabilizadores Temporales. Estabilizan las arcillas sustituyendo los cationes monovalentes (Na^{+}) de la superficie de la arcilla, por cationes divalentes (Ca^{++}, Mg^{++}), debido a una reacción de intercambio catiónico que favorece la adsorción de los iones Calcio y Magnesio por los iones de Sodio. La base del intercambio de la arcilla es cambiada facilmente circulando una solución a través de ella.(24)

b) Estabilizadores Permanentes. Estabilizan las arcillas por hidrolización para formar oligómeros altamente cargados, los cuales se intercambian permanentemente con los cationes de la superficie de la arcilla.(25) Este intercambio permanente esencialmente destruye la capacidad de intercambio catiónico de la arcilla. Por lo

tanto, la arcilla llega a ser insensible a otros cationes (Na^+), que normalmente causan hinchamiento y/o dispersión. Todos los agentes estabilizadores de arcillas poliméricos producen una estabilización permanente de la arcilla. La exposición de la arcilla al ácido, también causa una reducción similar en el CIC.[25]

4. TECNICAS DE LABORATORIO PARA DETERMINAR LA EFICIENCIA DE LOS ESTABILIZADORES

4.1. PRUEBAS DE INMERSION

Estas pruebas se utilizan para cuantificar en forma rápida el esponjamiento de las arcillas en presencia de -- agua dulce. Además permiten conocer rápidamente el grado de estabilización de los diferentes fluídos utilizados - como agentes estabilizadores y comparar resultados.(29)

4.1.1. Equipo

El equipo utilizado es una centrífuga y tubos para cen-- trífuga. El material utilizado es: arcilla, soluciones - estabilizadoras, agua salada y agua dulce.

4.1.2. Procedimiento de análisis.

Prueba No. 1

Se miden 50ml. de la solución estabilizadora y se vacían en un tubo de centrífuga. Se pesan 6.0gr. de arcilla y - se introducen en el tubo. Se afora a 100ml. con la misma

solución y se agita el tubo en forma manual hasta lo- - grar la completa dispersión del material sólido. Se centrifuga durante 20 minutos a 1400 r.p.m. y se toma la - lectura del material asentado (en ml).

Prueba No. 2

Se efectúa la prueba de inmersión 1 empleando 4.0gr.* - de muestra. Se decanta la solución estabilizadora. Se - afora a 100ml con agua destilada y se agita el tubo manualmente hasta lograr la completa dispersión de la arcilla. Se centrifuga durante 20 min. a 1400 r.p.m. y se toma la lectura del material asentado.

Prueba No. 3

Se miden 50 ml de salmuera de 50 000 p.p.m. de NaCl y se vierten en un tubo de centrífuga. Se pesan 4.0 gr. de - muestra de arcilla y se introducen en el tubo. Se afora a 100 ml. con la misma salmuera y se agita el tubo manualmente hasta lograr la completa dispersión de la arcilla. Se centrifuga durante 20 min. a 1400 r.p.m., y se - toma la lectura del material asentado.

* Se emplearon 4 gr. debido a que con 6 gr. la lectura del material asentado se salía de la escala del tubo - de centrífuga.

Se decanta la salmuera. Se afora a 100 ml con la solución estabilizadora y se agita el tubo manualmente hasta lograr la completa dispersión de la arcilla. Se centrifuga durante 20 minutos a 1400 r.p.m. y se toma la lectura del material asentado.

Se decanta la solución estabilizadora. Se afora a 100 ml. con agua destilada y se agita el tubo manualmente hasta lograr la completa dispersión de la arcilla. Se centrifuga durante 20 min. a 1400 r.p.m. y se toma la lectura del material asentado.

Se decanta el agua destilada Se afora a 100 ml. con salmuera a 50 000 p.p.m. y se agita el tubo manualmente hasta lograr la completa dispersión de la arcilla. Se centrifuga 20 min. a 1400 r.p.m. y se toma la lectura del material asentado.

Se decanta la salmuera. Se afora a 100 ml con agua destilada y se agita manualmente hasta dispersar completamente a la arcilla; finalmente, se centrifuga durante 20 min. manteniendo la misma velocidad que en las etapas anteriores y se toma lectura del material asentado.

Se comparan los resultados obtenidos en las 3 pruebas - de inmersión efectuadas, analizando el volumen de material asentado en ml.

Los resultados obtenidos son comparativos con los pre-- sentados por las soluciones convencionales, puesto que los métodos experimentales aplicados en las pruebas son los mismos y las soluciones poseen la misma normalidad con respecto al catión. Los resultados de las pruebas - de inmersión se presentan en las Tablas 4.1 a 4.6.(3)

En las Tablas 4.1 y 4.4 se aprecia una expansión y dispersión severa de la arcilla en el agua dulce.

En las Tablas 4.2 y 4.5 se observa que el volumen de -- muestras de arcilla asentada para cada solución, al promoverse la adsorción de cationes e inducirse su remoción con agua dulce, no presenta cambio notable de los iones de hidroxi-aluminio, calcio, potasio y aluminio.

Esto significa que dichos cationes se adhieren fuertemente a las placas del mineral, no permitiendo su remoción. Para el caso de sodio, el incremento observado da lugar a suponer que se manifestó una remoción parcial de este

catión.

De las Tablas 4.3 y 4.6, se puede deducir que la capacidad de los iones de potasio, calcio, aluminio e hidroxi-aluminio no se ve afectada por la presencia de iones monovalentes que saturan a la arcilla y además existe un reemplazamiento efectivo de los iones de sodio por estos cationes, puesto que el volumen registrado en la tercera columna es del mismo orden que el volumen registrado en la segunda columna de las Tablas 4.2 y 4.5. Al inducirse la remoción de los cationes con agua dulce se confirma que los iones de hidroxi-aluminio, calcio y aluminio se adhieren fuertemente puesto que el volumen de la tercera y cuarta columnas no varía considerablemente. Sin embargo, al inducirse una segunda remoción (mediante una variación brusca en la salinidad empleando salmuera y agua destilada), los iones de calcio y potasio no la resisten, esto se observa por el incremento de volúmenes (columnas quinta y sexta de la Tabla 4.6).

De los resultados mostrados en la Tabla 4.6, se puede decir que la solución de tratamiento de hidroxi-aluminio previene efectivamente el daño provocado por la re-

ducción brusca de la salinidad del agua saturante del - medio poroso.

TABLA 4.1

Resultados de la prueba de inmersión 1, utilizando 6 gr. de material arcilloso y soluciones de hidroxi-aluminio.

SOLUCION EN PRUEBA			VOLUMEN DE MATERIAL ASENTADO (ml)
Agua dulce			51
OH - Al	0.1 M*	OH/Al =2.0	15
OH - Al	0.1 M*	OH/Al =2.3	15

* Estas concentraciones son equivalentes a 0.3N de Al^{+3}

TABLA 4.2

Resultados de la prueba de inmersión 2*, utilizando 4 gr. de material arcilloso y soluciones de -- hidroxi-aluminio.

SOLUCION EN PRUEBA	VOLUMEN DE MATERIAL ASENTADO (ml)	
	en la solución	en agua dulce
OH- Al 0.1M OH/Al=2.0	10	9
OH- Al 0.1M OH/Al=2.3	11	10

* En esta prueba se utilizaron 4 gr. debido a que al utilizar 6 gr., la lectura del material asentado se salía de escala en el tubo de centrífuga.

TABLA 4.3

Resultados de la prueba de inmersión 3, utilizando 4 gr. de material arcilloso y soluciones de hidroxi-aluminio.

SOLUCION EN PRUEBA	VOLUMEN DE MATERIAL ASENTADO (ml)				
				Daño Inducido	
	en salmuera de 50 000 p.p.m. de NaCl	en la solución	en agua dulce	en salmuera de 50 000 p.p.m. de NaCl	en agua dulce
OH- Al 0.1 M OH/Al = 2.0	7.2	10.9	10.5	10.5	10.5
OH- Al 0.1 M OH/Al = 2.3	7.2	11.3	11.1	11.1	11.1

TABLA 4.4

Resultados de la prueba de inmersión 1, utilizando 6 gr. de material arcilloso y soluciones convencionales estabilizadoras de arcillas.

SOLUCION EN PRUEBA	VOLUMEN DE MATERIAL ASENTADO (ml)
Agua dulce	51.0
$CaCl_2$ (0.3 N Ca^{+2}) *	10.0
$AlCl_3$ (0.3 N Al^{+3}) *	12.0
KCl (0.3N K^+) *	10.0
NaCl (0.3 N Na^+) *	14.0

* Estas concentraciones se establecieron debido a que la concentración de Al^{+3} en las soluciones de hidroxi-aluminio es igual a 0.3N, esta igualdad de concentraciones implica que los resultados son comparativos.

TABLA 4.5

Resultados de la prueba de inmersión 2, utilizando 4 gr. de material arcilloso y soluciones convencionales estabilizadoras de arcillas.

SOLUCION EN PRUEBA	VOLUMEN DE MATERIAL ASENTADO (ml)	
	en la solución	en agua dulce
$CaCl_2$ (0.3N Ca^{+2})*	7.0	8.0
$AlCl_3$ (0.3N Al^{+3})*	8.0	8.0
KCl (0.1 N K^+)*	7.0	8.0
NaCl (0.1 N K^+)*	9.0	50.0

* Estas concentraciones se establecieron debido a que la concentración de Al^{+3} en las soluciones de hidroxi---aluminio es igual a 0.3N, esta igualdad de concentraciones implica que los resultados son comparativos.

TABLA 4.6

Resultados de la prueba de inmersión 3, utilizando 4 gr. de material arcilloso y soluciones convencionales estabilizadoras de arcillas.

SOLUCION EN PRUEBA	VOLUMEN DE MATERIAL ASENTADO (ml)				
	en salmuera de 50 000 p.p.m. de NaCl	en la solución	en agua dulce	Daño Inducido en salmuera de 50 000 p.p.m. de NaCl	Daño Inducido en agua dulce
$CaCl_2$ (0.3N Ca^{+2})	6	7.0	7.0	8.0	40.0
$Al\ Cl_3$ (0.3N Al^{+3})	6	8.0	8.0	8.0	8.0
K Cl (0.3N K^+)	6	8.0	10.0	10.0	40.0
NaCl (0.3N Na^+)	6	9.0	50.0	50.0	50.0

4.2. PRUEBAS DE DESPLAZAMIENTO

Estas pruebas se realizan con el objeto de estudiar -- las características de estabilización del estabiliza-- dor de arcillas probado. Básicamente consisten en me-- dir las permeabilidades efectivas a los diferentes - - fluídos circulados a través de la muestra y comparar - los resultados de la permeabilidad antes y después del tratamiento con el estabilizador. Por lo tanto una - - prueba de desplazamiento es simplemente un estudio del comportamiento de la permeabilidad a los diferentes -- fluidos circulados a través de la muestra, relaciona-- dos en unidades de volumen poroso.

Las pruebas de flujo y sensibilidad se realizan para - medir la eficiencia de los estabilizadores de arcilla en muestras de material compacto (tapones) o en empa- camientos de arena no consolidada. Las ventajas y desventajas en utilizar tapones o empacamientos se tratarán más adelante.

4.2.1. Equipos utilizados

En general, las pruebas de desplazamiento se realizan en un permeámetro como el que se muestra en la Fig. 4.1 , que consiste principalmente de un porta muestras tipo Hassler, depósitos para los fluídos, líneas de flujo, filtros de acero inoxidable, manómetros y válvulas. El sistema de medición de la presión consiste de un transductor de presión, indicador-registrador (Fig. 4.2).

Existen equipos para trabajar con temperatura alta y controlada (Fig. 4.3), que difieren de los diseñados para trabajar a temperatura ambiente en que el portamuestras se encuentra dentro de una caja (horno) apropiadamente aislada para evitar que descienda la temperatura en el interior. En estos equipos se pueden simular las condiciones del yacimiento, temperatura y presión de sobrecarga, obteniéndose resultados más representativos.

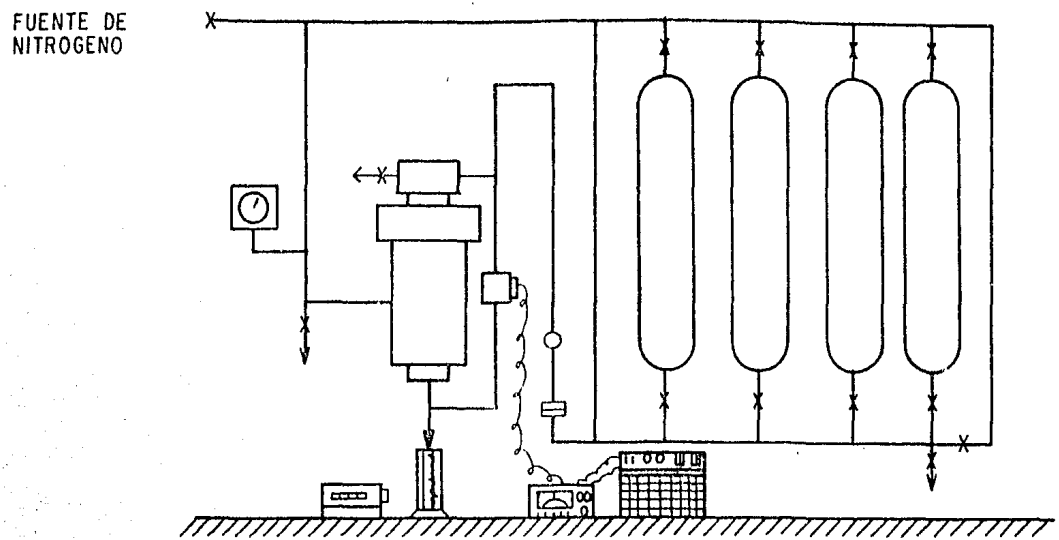


FIG. 4.1 – CROQUIS DEL EQUIPO DE DESPLAZAMIENTO DE FLUIDOS.

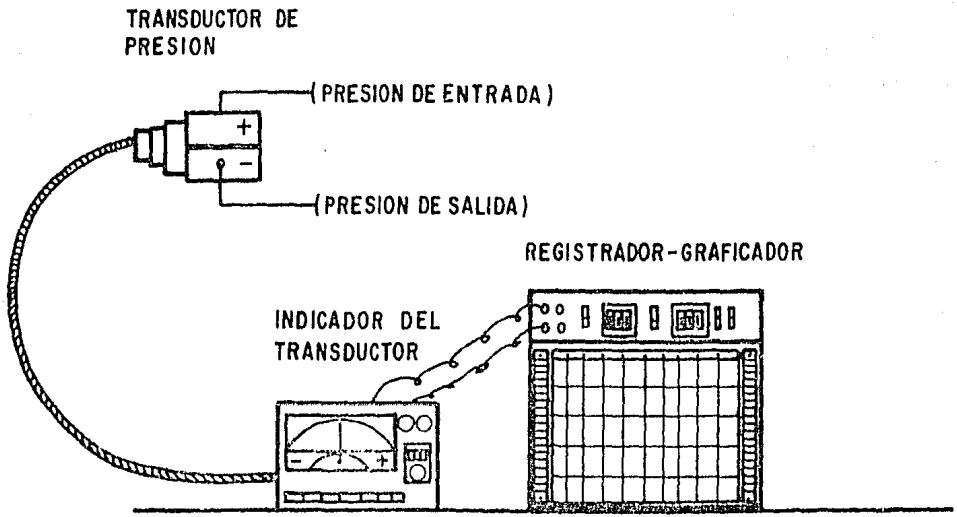


FIG. 4.2 — SISTEMA DE MEDICION DE LA CAIDA DE PRESION.

Para las pruebas de desplazamiento en material no consolidado generalmente se utiliza una celda portamuestras como la mostrada en la Fig. 4.4 . En algunas celdas -- portamuestras los empacamientos se hacen a presión. Estas celdas consisten de un cilindro en el cuál la arena no consolidada es compactada por medio de la presión -- ejercida por dos pistones.

Los estudios reportados en la literatura[25] con material no consolidado han sido utilizados como medio de -- prueba por dos razones; la primera y quizás la más im-- portante razón, es que la cantidad y tipo de arcilla pueden ser identificados en una forma precisa, obteniéndose la cantidad medida de arcilla estabilizada por unidad de volumen de agente estabilizador gastado. La segunda razón, es que se obtienen los elementos clave para el diseño de un tratamiento estabilizador y su aplicación en -- formaciones no consolidadas.

Una descripción más detallada de un equipo de desplaza-- miento se dará en el capítulo siguiente, que es la des-- cripción correspondiente al equipo utilizado en todas -- las pruebas.

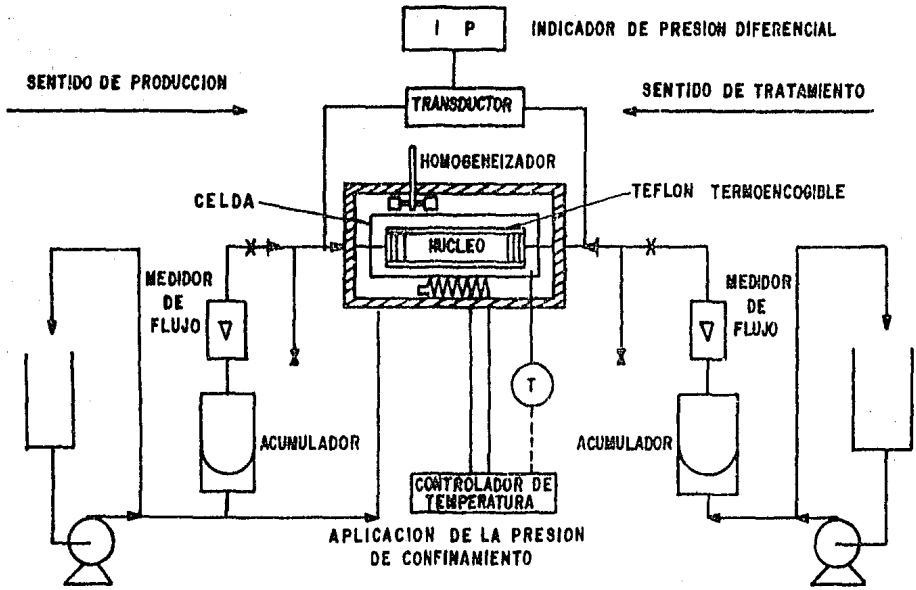


FIG.4.3.- DIAGRAMA SIMPLIFICADO DEL PERMEAMETRO

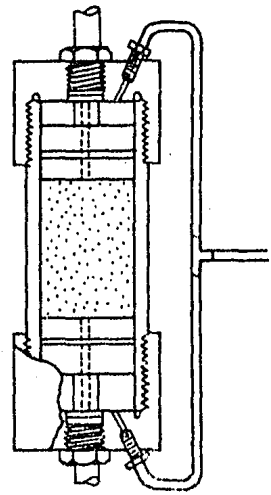


FIG.4.4.- CROQUIS DE UN PORTAMUESTRAS UTILIZADO PARA PRUEBAS CON FORMACIONES NO CONSOLIDADAS.

4.3. ACONDICIONAMIENTO DESEABLE EN LAS MUESTRAS

Dos aspectos del muestreo son importantes en los análisis de sensibilidad de la formación al agua dulce. Uno de estos es la necesidad de obtener datos realmente representativos del yacimiento, realizando un buen programa de nucleo de los intervalos de interés en los diferentes pozos perforados ya que las propiedades mineralógicas y petrofísicas de la roca varían ampliamente en el yacimiento, dependiendo del ambiente de depósito. Por lo tanto el número y espaciamiento de las muestras será dictado por la distribución de los diferentes tipos de roca en el yacimiento.

La segunda consideración en el muestreo es la necesidad de tener muestras semejantes, es decir con las mismas propiedades petrofísicas y mineralógicas para establecer patrones de comparación en todos los estabilizadores utilizados.(8)

Tapones de 1 ½" de diámetro por 2 ó 2 ½" de longitud, son seleccionados para el análisis. El lodo de perforación es limpiado de la superficie del núcleo con un cepillo -

de cerdas de acero si es necesario.(8)

Además de cortar el tapón, del mismo lugar se toman - - muestras para otros análisis que podrán ayudar a encontrar la causa de la sensibilidad (hinchamiento de arcillas, migración de arcillas y finos, o ambas a la vez). El diagrama del muestreo es mostrado en la Fig. 4.5 .- De partes adyacentes a donde se cortó el núcleo se toman muestras que son trituradas y molidas para su análisis mineralógico y las pruebas de hinchamiento.

Los tapones cilíndricos obtenidos se someten a un proceso de limpieza para extraerles los hidrocarburos aún presentes en los poros. El procedimiento de limpieza y el - solvente utilizado, variarán de acuerdo al grado de consolidación y compactación de la muestra y al tipo de hidrocarburo que satura el medio poroso respectivamente. - Para eliminar las sales, se utiliza el solvente mezclado con alcohol (metanol).

Después de limpiar las muestras, se meten a un horno a - una temperatura aproximada de 110-120°C, para extraerles el solvente por evaporación durante 24 horas. Después --

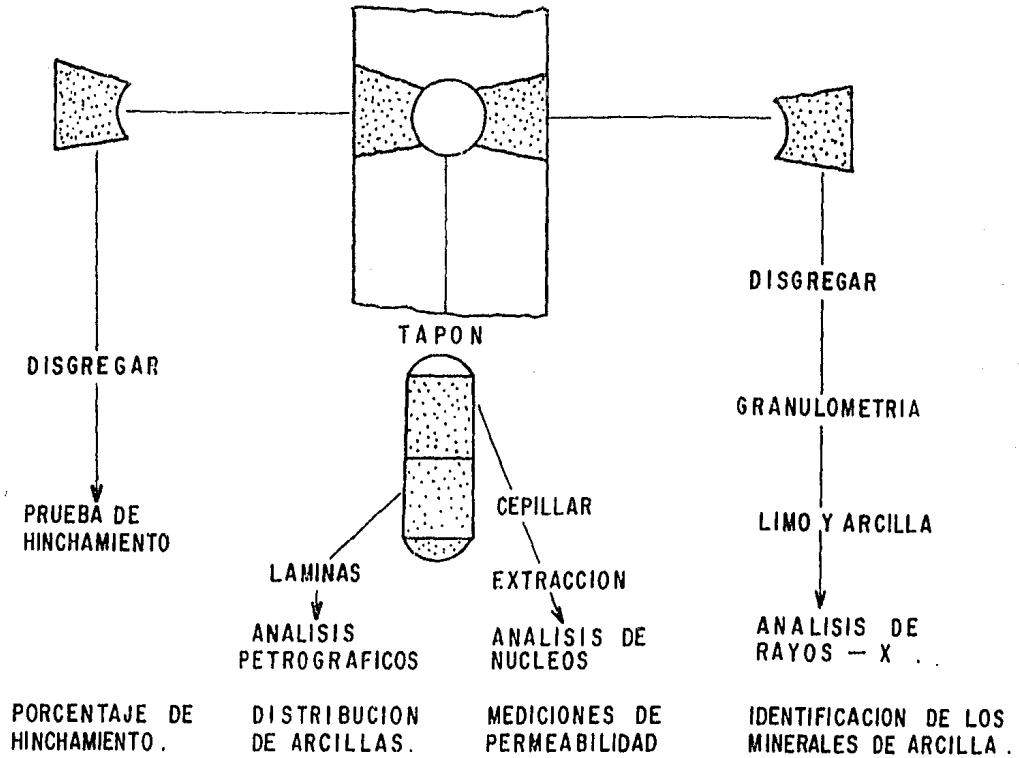


FIG. 4.5 — ESQUEMA DEL MUESTREO Y DIAGRAMA DE FLUJO DE LOS ANALISIS NECESARIOS PARA OBTENER LA SENSIBILIDAD AL AGUA DULCE DE LOS TAPONES.

de ésto se colocan las muestras en un desecador, listas para medirles sus propiedades petrofísicas.

4.4. PROCEDIMIENTO DE ANALISIS

4.4.1.- Identificación de los minerales de arcilla.

La roca es suavemente disgregada a tamaño de grano con un mortero de porcelana. Si el grado de compactación lo permite se obtiene el análisis granulométrico completo, para saber cual es el porcentaje de arcillas y finos a tamaño de arcilla que se tiene en la muestra. La fracción fina es separada de la muestra por un proceso de elutriación,[8] y su peso es calculado como un porcentaje del peso total de la muestra. La fracción fina se saca y coloca en un portamuestras para su análisis por difracción de Rayos "X". Las cantidades de arcilla, en % de peso de la muestra, y de componentes no arcillosos son determinadas a partir de las áreas bajo la curva de los difractogramas.

4.4.2.- Determinación de la capacidad de intercambio catiónico.

Como se indica en el diagrama de la Fig. 4.5 para la -

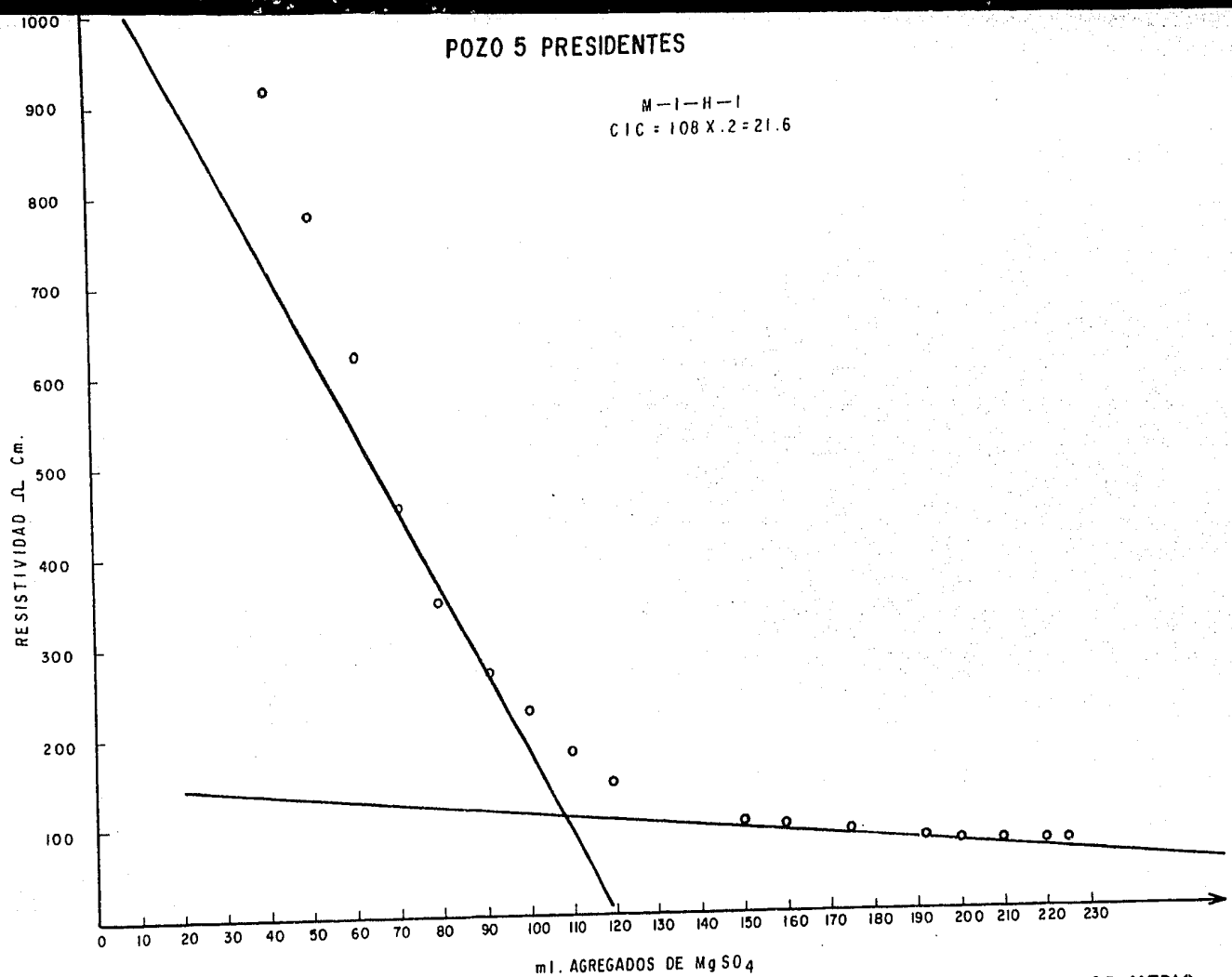


FIG. 4.6 - DETERMINACION DE LA CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO DE LA ARCILLA, POR MEDIO DE UNA TITULACION CONDUCTIMETRICA.

determinación de la capacidad de intercambio catiónico se toma una parte de la muestra a la cual se le eliminan los hidrocarburos que contenga en un equipo de extracción tipo Soxhlet.

Una vez que la muestra se encuentra limpia se disgrega suavemente en un mortero hasta tenerla a tamaño de grano, se pasa por la malla #60 y se pesan 10gr . Se trata la muestra con una solución de Cloruro de Bario con agitación y temperatura durante 4 hrs, se deja en reposo hasta que alcance la temperatura ambiente. Se lava el exceso de cloruro de Bario con una solución de alcohol-agua (50-50), hasta eliminar todos los cloruros.

Se hace una titulación conductimétrica con Sulfato de Magnesio, registrándose los valores de conductividad y volumen de solución agregada hasta que las lecturas de conductividad sean aproximadamente constantes. Se grafican los valores de conductividad (μmhos), contra el volumen agregado de la solución de sulfato de magnesio. Se obtiene una curva como la mostrada en la Fig. 4.6 , y en el punto de intersección de las tangentes a la curva se alcanza el equilibrio. En este punto se toma la lectura, en el eje de las abcisas, de los miliequivalentes

gastados. Como el CIC se reporta en meq/100gr., se multiplica el resultado por 10, y este es el valor de Capacidad de Intercambio Catiónico en meq/100gr . de muestra.

4.4.3.- Pruebas de hinchamiento.

El hinchamiento de la arcilla es indicado por un cambio en el espaciamiento "d" de los análisis de difracción - de Rayos "X". Se realizan los análisis de difracción en forma natural, como se explicó anteriormente. Se somete la muestra a un proceso de glicolación, donde el glicol reemplaza toda el agua que causa hidratación, hinchando la arcilla al máximo.(27) Comparando el espacimiento - - "d" antes y después de la glicolación, da el grado de -- hinchamiento. Un pequeño cambio en el espaciamiento "d", o un patrón de Rayos "X" difuso podrá indicar poco es-- ponjamiento.

Otra prueba consiste en medir dos volúmenes. Un volumen de muestra se coloca en un líquido que evita el hincha-- miento de la arcilla, el otro se coloca en agua dulce para originar el esponjamiento. El asentamiento y empaca-- miento de los granos en los dos líquidos es comparable y cualquier cambio en el volumen puede ser atribuído al es

ponjamiento de la arcilla.(8)

La muestra disgregada es homogeneizada agitándola con -- una espátula. Una "cuchara" se utiliza como medida, quitándole el exceso de material y dejándola rasa. Se debe tener cuidado de no presionar el material dentro de la - cuchara. El material medido se coloca en un papel para transferirlo a una probeta de 25ml que contiene aproximadamente 10ml de fluído. Un volumen de arcilla se coloca dentro de aceite Soltrol Phillips, el otro se coloca en agua destilada. Se debe tener cuidado en que los granos pasen lentamente la interfase del fluído y no atrapen -- burbujas de aire. Las muestras se dejan en reposo durante 24 hrs., se registran los volúmenes y se comparan.

4.4.4.- Examen microscópico de láminas delgadas.

La observación microscópica de la roca se hace en una lámina delgada convencional. La roca se impregna con un -- plástico coloreado para enfatizar los poros, se pule hasta un espesor de 0.03 m.m. y se cubre con vidrio. Una observación cualitativa es hecha de la posición relativa - de las arcillas dentro de los poros. Las observaciones -

son hechas por un experimentado petrógrafo, que esté familiarizado con las propiedades ópticas de los minerales sedimentarios comunes y con la textura común en areniscas y rocas carbonatadas.

4.4.5. Medición de permeabilidades.

Con las muestras saturadas al 100% con salmuera, se les mide su permeabilidad montándolas en un portamuestras - tipo Hassler. El equipo se muestra esquemáticamente en la Fig. 4.1 .

La secuencia seguida se muestra en la (Fig. 4.7).

Prueba de sensibilidad.- El método más comunmente usado[28] consiste en circular salmuera de la misma concentración que el fluído saturante y determinar la permeabilidad a la salmuera. (1a. medición). Después se -- circula agua dulce, aproximadamente 10 volúmenes porosos. Se circula nuevamente salmuera y se determina la - permeabilidad a la salmuera (2a. medición). El porcentaje de permeabilidad perdido entre ésta permeabilidad a - la salmuera con respecto a la primera medición, indica

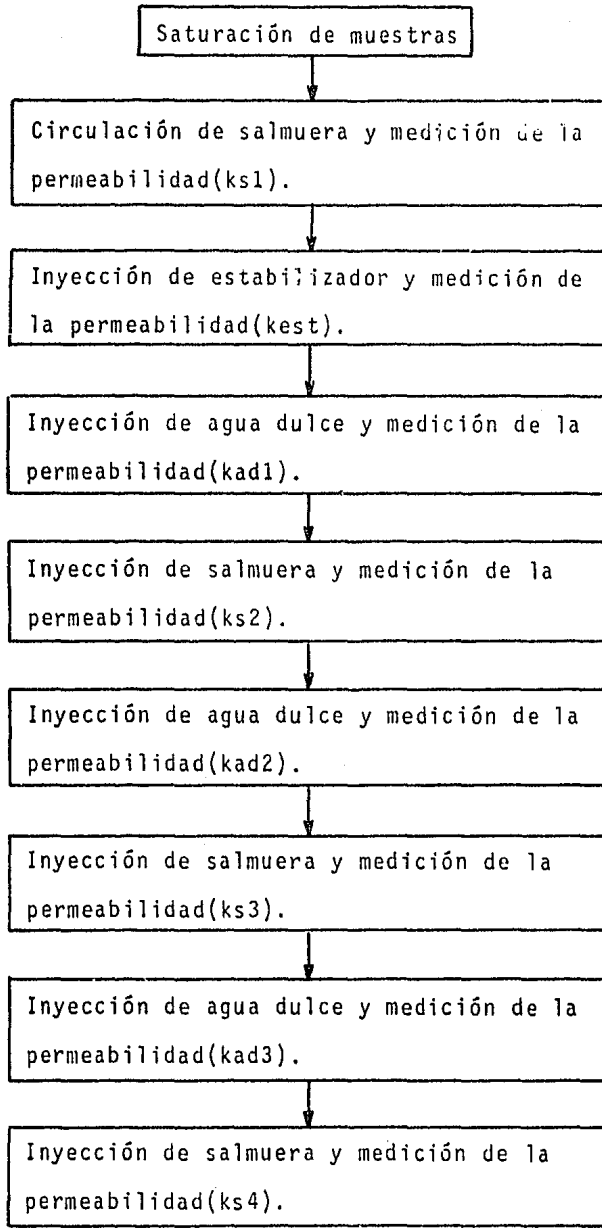


Fig. 4.7 Secuencia seguida en el desarrollo de las pruebas con estabilizador de arcillas.

el grado de sensibilidad de la formación al agua dulce.

Hay otro método para determinar el grado de sensibilidad de la formación a los cambios de salinidad.[8] Consiste en determinar la permeabilidad de las muestras a diferentes salmueras, a las cuales se les va disminuyendo la concentración de p.p.m. de NaCl. Durante la prueba de este método, algunos fluídos son circulados en dirección contraria a los primeros fluídos circulados. -- Está técnica es particularmente usual para detectar el daño ocasionado por la migración de partículas móviles.

4.4.6.- Interpretación de datos.

De los análisis efectuados a las muestras se obtiene: el tipo de arcillas presentes, finos a tamaño de arcilla, - capacidad de intercambio catiónico (CIC), grado de hinchamiento con agua dulce y distribución de las arcillas dentro del poro.

Correlacionando esta información con los resultados obtenidos de la prueba de sensibilidad efectuada a la muestra por medio de circulación de fluídos, se identifica -

si el daño es ocasionado por arcillas esponjables, por - esponjamiento y dispersión de arcillas o por migración de finos móviles.

En la Fig. 4.8 se presenta una tabla que correlaciona -- las técnicas de evaluación mencionadas.

Una vez identificado el tipo de daño a la formación, se puede recomendar el uso de un estabilizador de arcilla - y/o finos a tamaño de arcilla.

La eficiencia del proceso de estabilización, se obtiene comparando las permeabilidades antes y después del tratamiento estabilizador.

Las permeabilidades medidas a los diferentes fluídos inyectados, combinadas con los volúmenes circulados permiten construir una gráfica que proporciona el comporta- - miento de la permeabilidad con la concentración del estabilizador utilizado.

En el capítulo siguiente se verá esto con más detalle.

PETROGRAFIA	DESTRIBUCION DE ARCILLAS	INTERGRANULAR			LAMINADA E INTERGRANULAR			
PRUEBAS DE HINCHAMIENTO	PORCENTAJE DE HINCHAMIENTO	> 10 5		< 10 5	> 10 5		< 10 5	
ANALISIS DE ARCILLAS	HINCHAMIENTO DE ARCILLAS	PRESENTE		AUSENTE	PRESENTE		AUSENTE	
ANALISIS DE NUCLEOS	K.AGUA/ K ∞	< .7	<.7	>.7	<.7	>.7	< .7	>.7
		SENSIBLE HINCHAMIENTO DE ARCILLAS	SENSIBLE TAPONAMIENTO POR PARTICULAS MOVILES	NO SENSIBLE	SENSIBLE HINCHAMIENTO DE ARCILLAS	NO SENSIBLE	SENSIBLE TAPONAMIENTO POR PARTICULAS MOVILES	NO SENSIBLE

FIG. 4.8.- INTERPRETACION DE CUATRO TECNICAS ANALITICAS PARA DETERMINAR LA PRESENCIA Y CAUSA DE LA SENSIBILIDAD AL AGUA[8]

5. DETERMINACION EN LABORATORIO DE LA CONCENTRACION OPTIMA ESTABILIZADORA

5.1.- SOLUCION ESTABILIZADORA UTILIZADA

El estabilizador utilizado es un producto a base de hidroxi-aluminio, desarrollado en la División de Producción de la Subdirección de Tecnología de Explotación del Instituto Mexicano del Petróleo (IMPEA-301), el cual para su - - aplicación se diluye en agua.

Los fluídos utilizados en las pruebas fueron los siguientes:

1.- Salmuera, con concentración de 120,000 p.p.m de NaCl.

2.- Agua dulce, se utilizó agua destilada.

3.- Estabilizador de arcillas.

Se evaluó el producto IMPEA-301 en 14 diferentes concentraciones;

(1:5), (1:13.5), (1:20), (1:35), (1:50), (1:75), ----
(1:100), (1:150), (1:200), (1:500), (1:1000), - - - -

(1:2000), (1:3000), y (1:5000). Estas relaciones son en volumen.

Tratamiento Estabilizador. El estabilizador para su utilización una vez diluído en agua debe ser inyectado a la muestra con un volumen similar de agua dulce y dejarlo posteriormente en reposo, permaneciendo la muestra dentro del portamuestras del permeámetro durante 24 hrs. siendo esta última parte el curado del producto.

5.2. CARACTERISTICAS DE LAS MUESTRAS UTILIZADAS

Se seleccionaron muestras de arenisca Berea por su conocida sensibilidad al agua dulce, manifestada con severas reducciones en la permeabilidad al someterse a la acción de soluciones de cloruro de sodio en las que se varía bruscamente la salinidad. Así como por sus propiedades petrofísicas (porosidad, permeabilidad) y mineralógicas relativamente uniformes.[19,20]

Litología.- Arenisca de color café claro a amarillento, de grano fino a medio, con buena clasificación, formada fundamentalmente por granos arredondados de cuarzo, bien cementados.

Las características y propiedades petrofísicas, así como el tipo y contenido de arcillas y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) de las muestras utilizadas, se proporcionan en la Tabla 5.1 . Para determinar la composición mineralógica se utilizó el método de Difracción de Rayos "X".

Las muestras analizadas se clasificaron en dos grupos de acuerdo con los valores de permeabilidad a la salmuera medidos al inicio de las pruebas.

1.- Muestras con permeabilidades menores a 400 md.

2.- Muestras con permeabilidades mayores a 400 md.

Tabla 5.1 PROPIEDADES PETROFISICAS Y MINERALOGICAS DE LAS MUESTRAS UTILIZADAS

MUESTRA	VOL. POROSO (c.c)	POROSIDAD (%)	PERMEABILIDAD* (mD)	ILLITA (%)**	CAOLINITA (%)**	CUARZO (%)**	CIC (MEQ/100g)
1	13.43	20.2	492				
2	12.16	21.0	221				
3	13.79	21.2	239				
4	16.14	21.6	219	0.5	4.46	95.04	4.8
5	11.74	21.2	187				
6	13.77	20.3	124				
7	12.35	21.2	258	0.71	3.23	96.06	
8	13.36	20.1	238				
9	13.21	20.2	251				
10	13.04	20.1	362				
11	12.39	20.7	401				
12	11.75	21.2	538	Trazas	2.25	97.75	
13	10.65	20.7	456				
14	11.16	20.8	401	0.38	4.74	94.78	4.8
15	12.92	20.5	494				

* En % del peso de la muestra

** Permeabilidad a la salmuera(ks_1)

5.3. EQUIPO

El equipo utilizado en las pruebas de desplazamiento -- fué un permeámetro como el mostrado en las Figs. 5.1 y - 5.2 . La descripción detallada de las partes que lo componen se da a continuación.

1.- Tanque de Nitrógeno.

2.- Válvula del tanque de Nitrógeno.

3.- Regulador de presión, regula la presión de entrada al sistema.

4.- Válvula, permite la entrada del nitrógeno al sistema.

5.- Manómetro de Bourdon con rango de 0-70 (Kg/cm^2), -- indica la presión de entrada al permeámetro.

6.- Válvula, permite la entrada del nitrógeno a presión sobre la manga de neopreno.

7.- Manómetro de Bourdon con rango de 0-70 (Kg/cm^2), indica la presión en la manga.

8.- Válvula, purga el N_2 de la manga de neopreno.

9.- Portamuestras tipo Hassler,

10.- Valvula de dos vías, permite el paso del N_2 a los cilindros o al filtro de gas.

11.- Valvula de cierre rápido, permite el paso de N_2 para desplazar fluídos líquidos de la línea.

12.- Valvula de dos vías, permite alimentar de presión al cilindro A o purgar a la atmósfera.

13.- Valvula, alimenta la presión al cilindro B

14.- Valvula, purga la presión del cilindro B a la atmósfera.

15.- Valvula, alimenta la presión al cilindro C.

16.- Valvula, purga la presión del cilindro C a la atmósfera.

17.- Valvula de dos vías, permite alimentar la presión al cilindro D o purgar a la atmósfera.

18.- Valvula, controla el paso de fluído del cilindro A al filtro (23).

19.- Valvula, controla el paso de fluído del cilindro B al filtro (23).

20.- Valvula, controla el paso de fluído del cilindro C al filtro (23).

21.- Válvula, controla el paso de fluído del cilindro - D al filtro (23).

22.- Válvula, permite cargar o purgar fluídos de los cilindros.

23.- Filtro, elimina sólidos en suspensión de los fluídos de los cilindros .

24.- Filtro, elimina sólidos en suspensión arrastrados - por el nitrógeno.

25.- Válvula micrométrica, regula la entrada de líquidos al cabezal del portamuestras.

26.- Regulador de baja presión de salida, permite la entrada de N_2 al cabezal del portamuestras.

27.- Válvula de dos vías, permite al paso del fluído al cabezal del portamuestras o purgar a la atmósfera.

28.- Válvula, purga el aire o gas N_2 de la línea entre - la válvula (27) a la cara de la muestra.

29.- Válvula, permite el paso del líquido a presión de - la entrada de la muestra al transductor.

30.- Monómetro de Bourdon con rango de 0-28 (Kg/cm^2), indica la presión de entrada del N_2 en la cara de la muestra.

31.- Válvula, aisla los manómetros (32) y (34).

32.- Manómetro de Bourdon con rango de 0-10 ($Kg-cm^2$), - indica la presión de entrada del N_2 en la cara de la muestra.

33.- Válvula, aisla el manómetro (34).

34.- Manómetro de mercurio tipo "U"

35.- Depósito para el mercurio del manómetro (34), cuando se rebase la presión máxima.

36.- Válvula, comunica la presión de la cara de salida - de la muestra al transductor.

37.- Válvula, controla el paso de fluídos a la probeta - de medición.

38.- Transductor de presión.

39.- Indicador de presión diferencial

40.- Graficador.

41.- Probeta

42.- Gasómetro.

43.- Cronómetro.

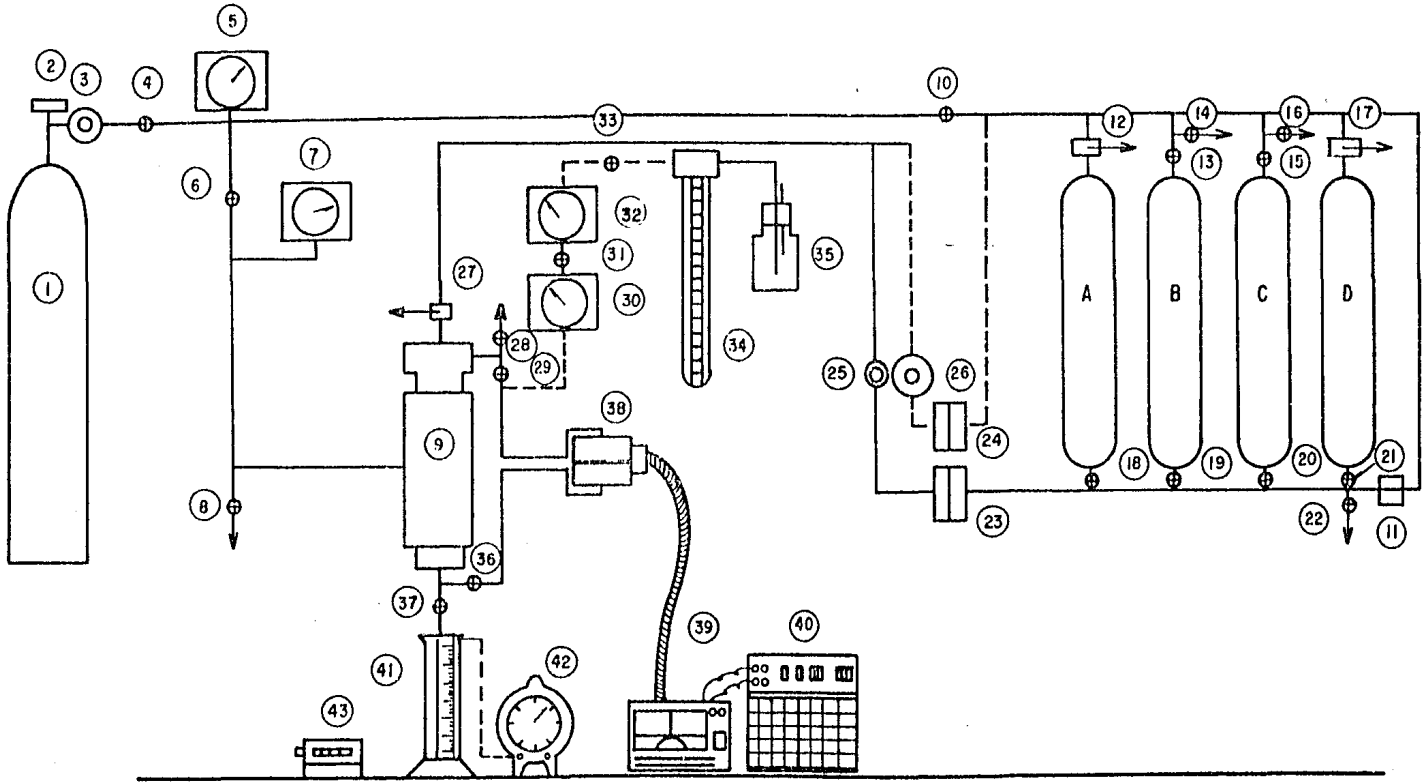


FIG. 5.1 — DIAGRAMA DE FLUJO DEL PERMEAMETRO.

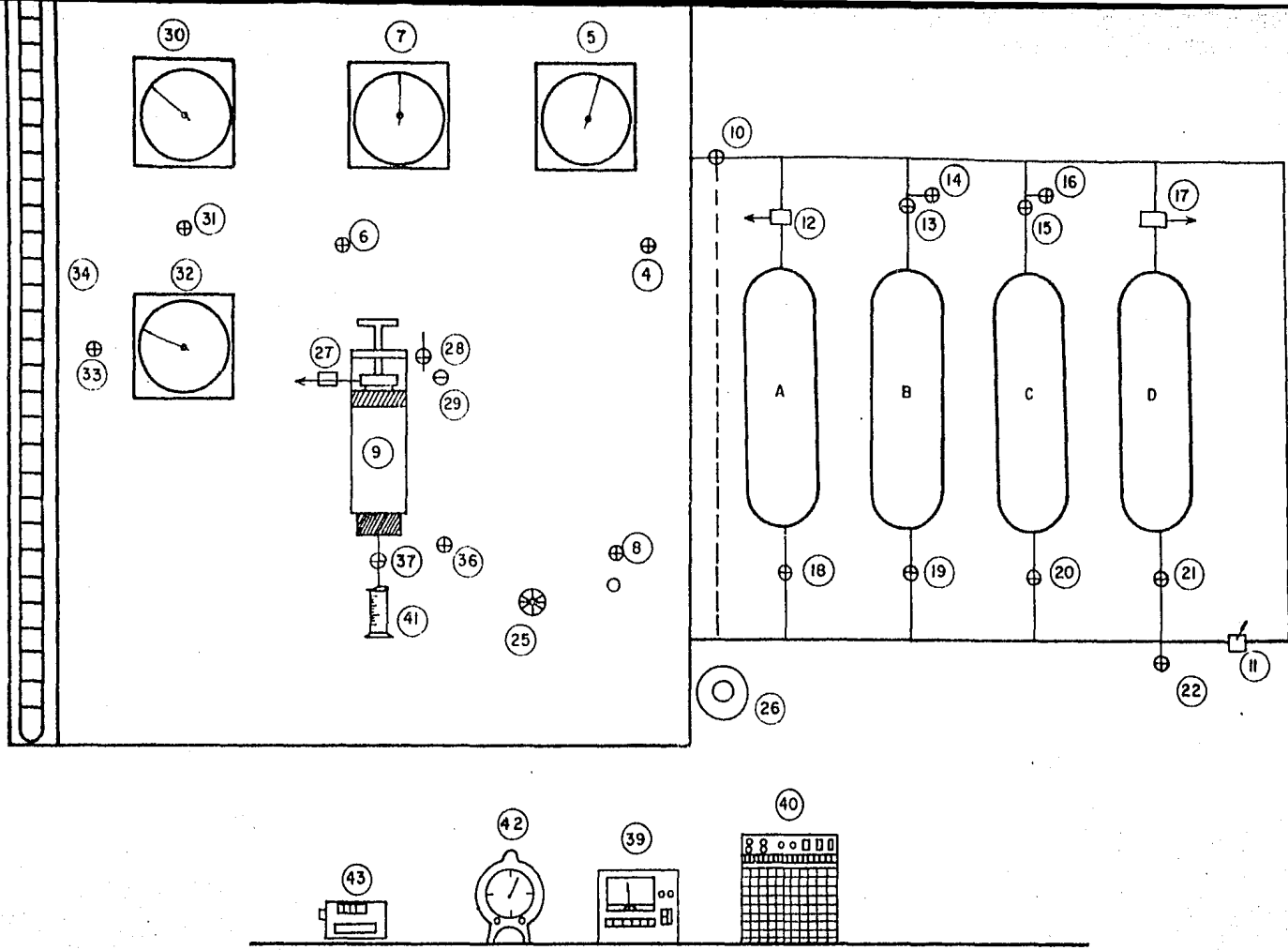


FIG .5.2 – CROQUIS PERMEAMETRO .

5.4.- ACONDICIONAMIENTO DE LAS MUESTRAS

Los tapones cortados y lavados se pesan secos, para posteriormente saturarlos con salmuera. Se mantienen dentro del saturador a 2000 (Lbs/pg^2), durante 48 hrs. Una vez saturadas las muestras al 100% se pesan. De las diferencias de peso de la muestra 100% saturada y seca se obtiene el peso de salmuera que ocupa el volumen poroso, que dividido por la densidad del fluído da el volumen de poros ocupados de la muestra.

5.5.- PROCEDIMIENTO DE ANALISIS (31)

A continuación se describe la secuencia de trabajo indicada en la Fig. 5.3..

1.- Se pesan las muestras secas en una balanza analítica.

2.- Se saturan las muestras en un saturador a una presión de 2000 Lbs/pg^2, mantenida durante 48 hrs.

Una vez saturadas, las muestras se colocan en el permeámetro y se sigue la secuencia de pruebas. Todos los fluídos se desplazan en una sola dirección.

3.- Se circula salmuera y se determina la permeabilidad a la salmuera. Esta permeabilidad se toma como referencia para relacionar los cambios en permeabilidad posteriores.

4.- Se circulan 10 volúmenes porosos del estabilizador, a una relación IMPEA-301; Agua, previamente establecida y se mide la permeabilidad al estabilizador.

5.- Se circulan 10 volúmenes porosos de agua dulce y se determina la permeabilidad. Reposo de 24 hrs., con la muestra dentro del portamuestras.

6.- Se circula la salmuera desplazando el agua dulce, y se mide la permeabilidad.

7.- Se circulan 10 volúmenes de agua dulce desplazando a la salmuera y se mide la permeabilidad.

8.- Se circula salmuera, repitiendo el paso (6).

9.- Se circula agua dulce, repitiendo el paso (7).

10.- Se circula salmuera, repitiendo el paso (6).

Toda la información obtenida en las pruebas de desplazamiento se procesa mediante un programa de cómputo que proporciona los resultados en forma tabulada, así como también en forma gráfica.

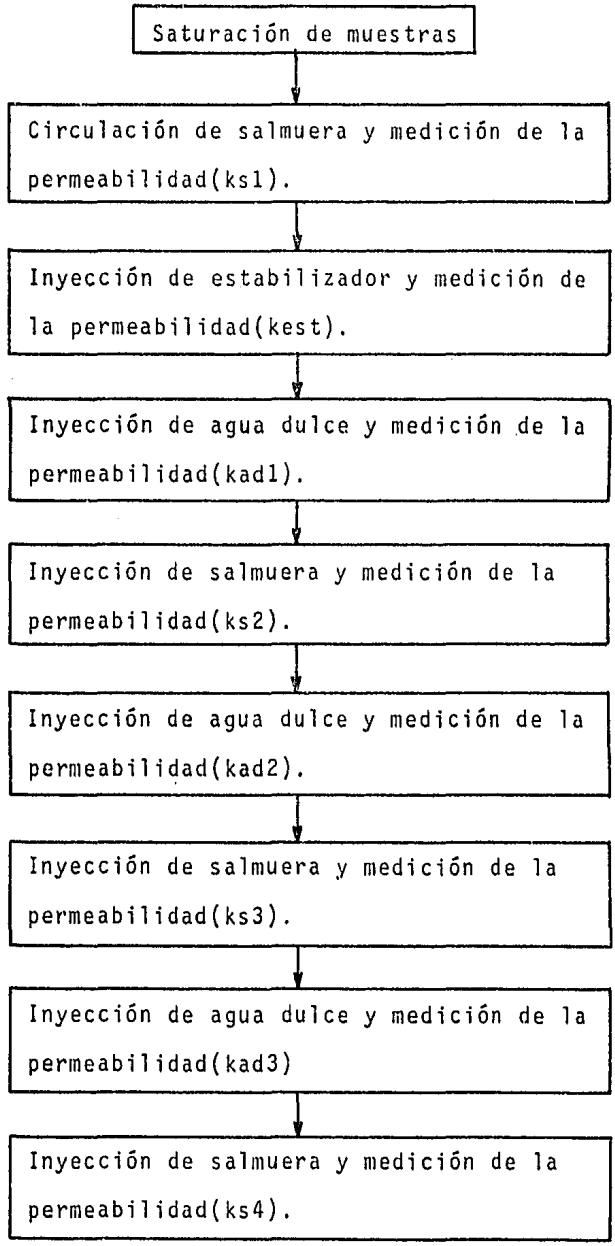


Fig. 5.3 Secuencia seguida en el desarrollo de las pruebas con estabilizador de arcillas.

5.6.- ANALISIS DE RESULTADOS.[31]

5.6.1.- Análisis del comportamiento de la permeabilidad a nivel de muestra.

Los resultados obtenidos en las pruebas se presentan en forma tabulada y gráfica. Se grafican las permeabilidades contra los volúmenes de fluídos circulados a través de la muestra. Las pruebas se iniciaron con las muestras 100% saturadas con salmuera, circulándose posteriormente los fluídos señalados en la secuencia anteriormente descrita.

A continuación se presentan detalles de las variaciones de permeabilidad observadas en las muestras, tanto en la prueba de sensibilidad de las arcillas al agua dulce como en las realizadas con estabilizador.

MUESTRA No. 1

La permeabilidad al agua dulce tuvo una reducción drástica conforme se circulaban los primeros volúmenes, de tal manera que se llegó a una reducción de aproximadamente 100%. - Los resultados se muestran en la Tabla 5.2, y en forma gráfica en la Fig. 5.4.

Tabla 5.2. Permeabilidades promedio a los fluídos circulados en la muestra 1 para producir un daño máximo con agua dulce.

Etapa	Fluído circulado	Permeabilidad promedio (md)	k (%)*
1a.	Salmuera	419	
2a.	Agua dulce	1	-99.8
3a.	Salmuera	2	-99.8

* Respecto a la permeabilidad de la primera etapa.

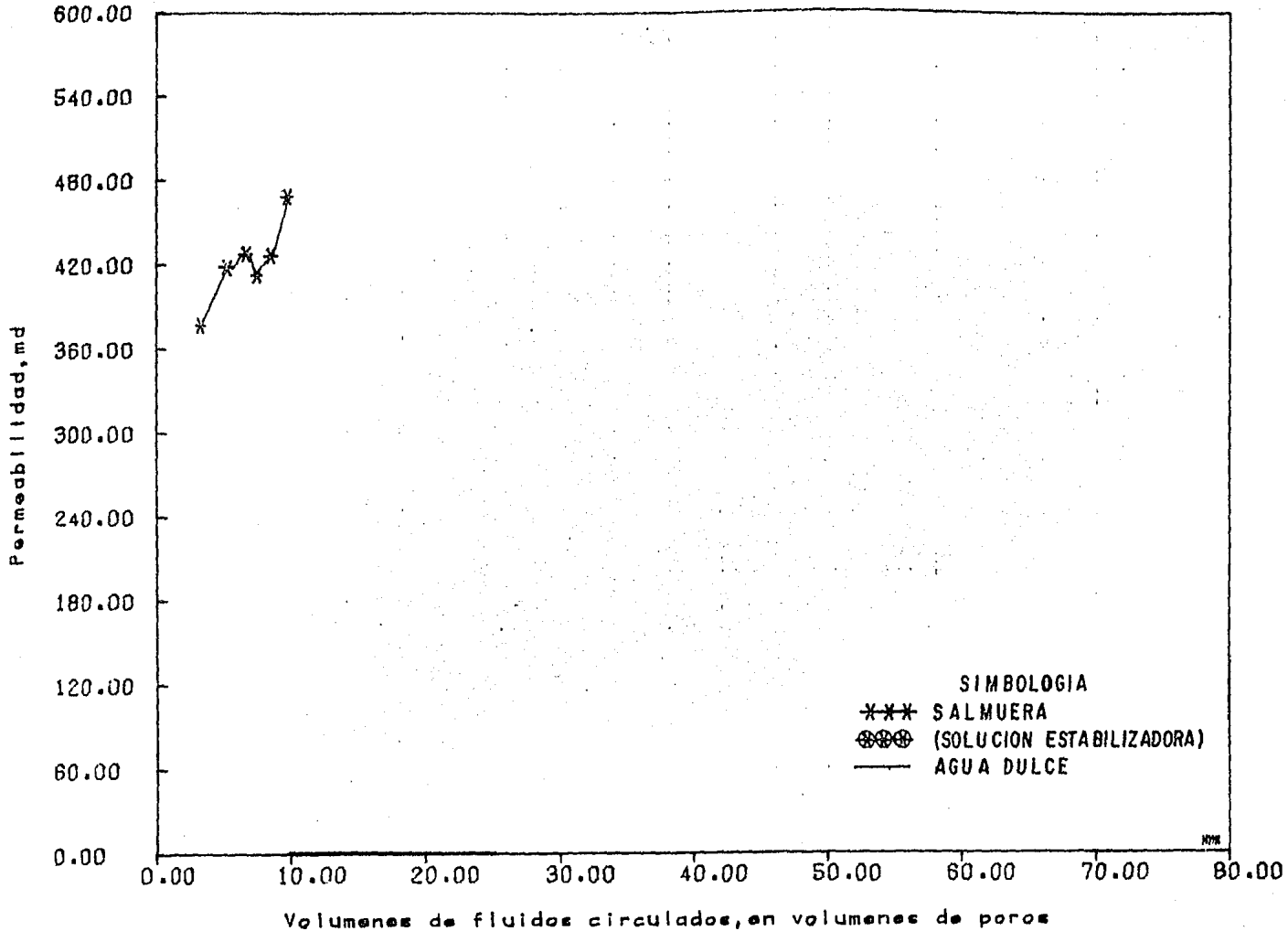


FIG. 5.4.- MUESTRA 1 DANO CON AGUA DESTILADA

MUESTRA No. 2

En esta muestra se probó la relación IMPEA-301: Agua, - (1:5). Los resultados obtenidos se presentan en la Ta-- bla 5.3 , y en forma gráfica en la Fig. 5.5 , obser-- vándose pérdidas en la permeabilidad después del trata- miento estabilizador. Se aprecia una recuperación al final de la prueba (paso 8, circulación con salmuera).

Observaciones.- El sistema estabilizador; agua a esta -- relación es inestable separándose en dos fases: una - -- transparente que es la superior y otra opaca color blan- co, que es la inferior; por lo que los resultados obteni- dos no son confiables.

Tabla 5.3. Permeabilidades promedio a los fluídos circulados en la muestra 2 con una relación de estabilizador IMPEA-301:Agua de (1:5).

Etapa	Fluídos circulados	Permeabilidad promedio (md)	k (%)*
1a.	Salmuera	197	
2a.	IMPEA-301:agua	137	-30
3a.	Agua dulce	136	-31
4a.	Salmuera	161	-18
5a.	Agua dulce	193	- 2
6a.	Salmuera	192	- 3
7a.	Agua dulce	229	+16
8a.	Salmuera	218	+11

* Respecto a la permeabilidad de la primera etapa.

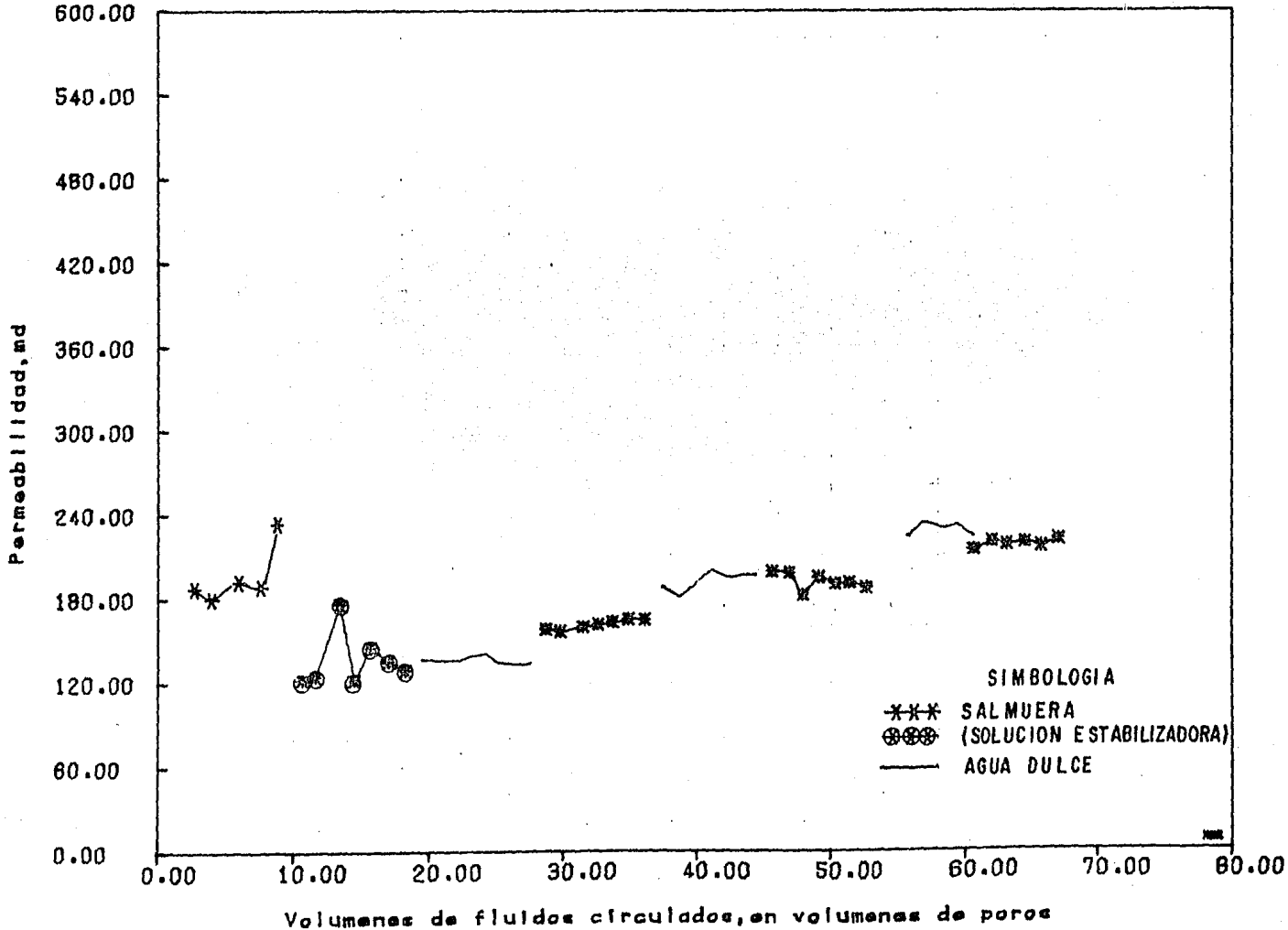


FIG. 5.5.- MUESTRA 2 RELACION IMPEA-301:AGUA (1:5)

MUESTRA No. 3

En esta muestra se probó la relación IMPEA-301: Agua, -- (1:13.5). Los resultados obtenidos se presentan en la -- Tabla 5.4 , y en forma gráfica en la Fig. 5.6 . Se observan pérdidas en la permeabilidad después del tratamiento estabilizador, mostrando una recuperación al final de la prueba, alcanzándose la permeabilidad original.

Tabla 5.4. Permeabilidades promedio a los fluídos circulados en la muestra 3 con una relación de estabilizador IMPEA-301:Agua de (1:13.5).

Etapa	Fluídos circulados	Permeabilidad promedio (md)	k (%)*
1a.	Salmuera	203	
2a.	IMPEA-301:agua	224	+10
3a.	Agua dulce	152	-25
4a.	Salmuera	132	-35
5a.	Agua dulce	132	-35
6a.	Salmuera	125	-38
7a.	Agua dulce	187	- 8
8a.	Salmuera	212	+ 4

* Respecto a la permeabilidad de la primera etapa.

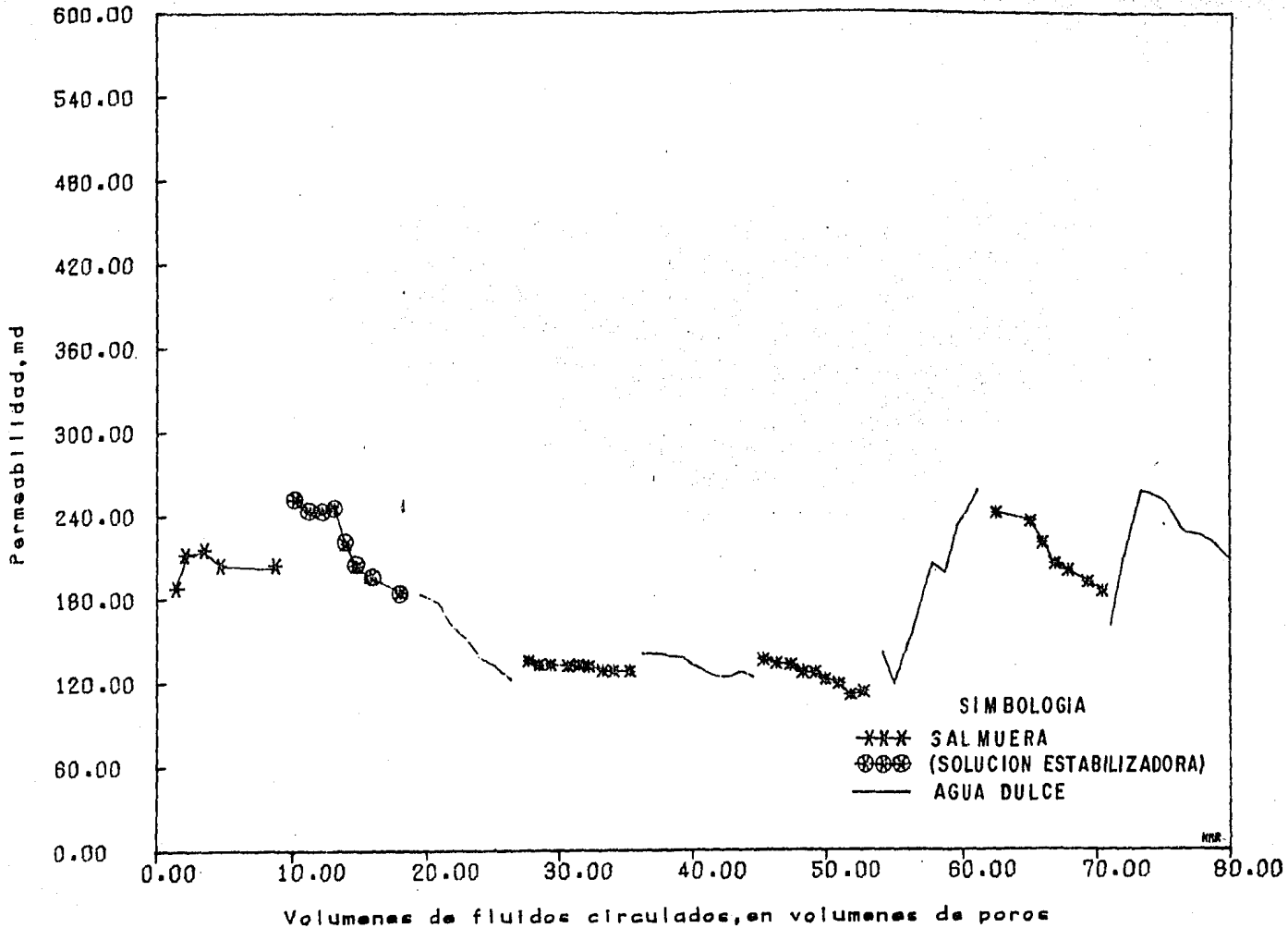


FIG. 5.6.- MUESTRA 3 RELACION IMPEA-301:AGUA (1:13.5)

MUESTRAS Nos. 4 a 9

Se utilizó el estabilizador de arcillas IMPEA-301: Agua, en las siguientes relaciones:

MUESTRA	RELACION
4	1:20
5	1:35
6	1:50
7	1:75
8	1:100
9	1:150

Los resultados obtenidos se presentan en las Tablas --- 5.5 a 5.10, y en forma gráfica en las Figs. 5.7 a 5.12. En general en estas seis muestras después del tratamiento estabilizador se manifiestan considerables incrementos en las permeabilidades a los diferentes fluídos circulados durante las pruebas. En algunos casos estos incrementos llegan a ser mayores a la permeabilidad original.

Observaciones.- El incremento más grande en la permeabilidad, obtenido con el tratamiento estabilizador, se tuvo con la relación (1:50), posteriormente y en orden de importancia: (1:35), (1:20), (1:75), (1:100) y (1:150).

Tabla 5.5. Permeabilidades promedio a los fluídos circulados en la muestra 4 con una relación de estabilizador IMPEA-301:Agua de (1:20).

Etapa	Fluídos circulados	Permeabilidad promedio (md)	k (%)*
1a.	Salmuera	187	
2a.	IMPEA-301:agua	219	+17
3a.	Agua dulce	190	+ 2
4a.	Salmuera	220	+18
5a.	Agua dulce	305	+63
6a.	Salmuera	297	+59
7a.	Agua dulce	356	+90
8a.	Salmuera	322	+72

* Respecto a la permeabilidad de la primera etapa.

Tabla 5.6. Permeabilidades promedio a los fluídos circulados en la muestra 5 con una relación de estabilizador IMPEA-301:Agua de (1:35).

Etapa	Fluídos circulados	Permeabilidad promedio (md)	k (%)*
1a.	Salmuera	159	
2a.	IMPEA-301:agua	179	+ 13
3a.	Agua dulce	268	+ 68
4a.	Salmuera	298	+ 87
5a.	Agua dulce	357	+125
6a.	Salmuera	347	+118
7a.	Agua dulce	387	+143
8a.	Salmuera	360	+126

* Respecto a la permeabilidad de la primera etapa.

Tabla 5.7. Permeabilidades promedio a los fluídos circulados en la muestra 6 con una relación de estabilizador IMPEA-301:Agua de (1:50).

Etapa	Fluídos circulados	Permeabilidad promedio (md)	k (%)*
1a.	Salmuera	106	
2a.	IMPEA-301:agua	148	+ 40
3a.	Agua dulce	181	+ 71
4a.	Salmuera	206	+ 96
5a.	Agua dulce	229	+116
6a.	Salmuera	248	+134
7a.	Agua dulce	267	+152
8a.	Salmuera	257	+142

* Respecto a la permeabilidad de la primera etapa.

Tabla 5.8. Permeabilidades promedio a los fluídos circulados en la muestra 7 con una relación de estabilizador IMPEA-301:Agua de (1:75).

Etapa	Fluídos circulados	Permeabilidad promedio (md)	k (%)*
1a.	Salmuera	219	
2a.	IMPEA-301:agua	270	+23
3a.	Agua dulce	286	+31
4a.	Salmuera	338	+54
5a.	Agua dulce	383	+75
6a.	Salmuera	338	+54
7a.	Agua dulce	398	+82
8a.	Salmuera	379	+73

* Respecto a al permeabilidad de la primera etapa.

Tabla 5.9. Permeabilidades promedio a los fluídos circula dos en la muestra 8 con una relación de estabi lizador IMPEA-301:Agua de (1:100).

Etapa	Fluídos circulados	Permeabilidad promedio (md)	k (%)*
1a.	Salmuera	202	
2a.	IMPEA-301:agua	267	+32
3a.	Agua dulce	337	+67
4a.	Salmuera	266	+32
5a.	Agua dulce	236	+17
6a.	Salmuera	256	+27
7a.	Agua dulce	294	+46
8a.	Salmuera	339	+68

* Respecto a la permeabilidad de la primera etapa.

Tabla 5.10. Permeabilidades promedio a los fluídos circulados en la muestra 9 con una relación de estabilizador IMPEA-301:Agua de (1:150).

Etapa	Fluídos circulados	Permeabilidad promedio (md)	k (%)*
1a.	Salmuera	210	
2a.	IMPEA-301:agua	238	+13
3a.	Agua dulce	234	+11
4a.	Salmuera	225	+ 7
5a.	Agua dulce	265	+26
6a.	Salmuera	238	+13
7a.	Agua dulce	273	+30
8a.	Salmuera	254	+21

* Respecto a la permeabilidad de la primera etapa.

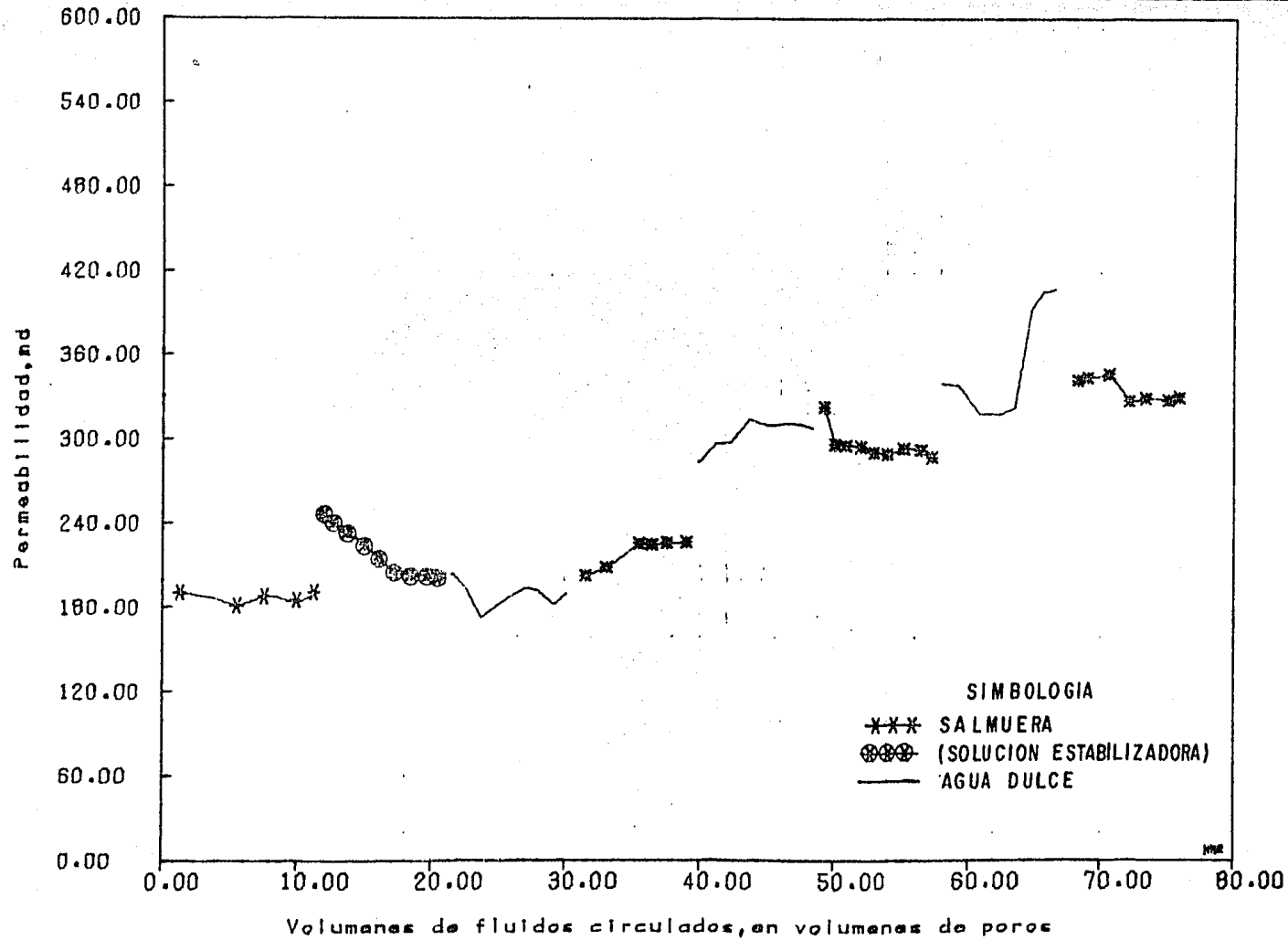


FIG. 5.7.- MUESTRA 4 RELACION IMPEA-301:AGUA (1:20)

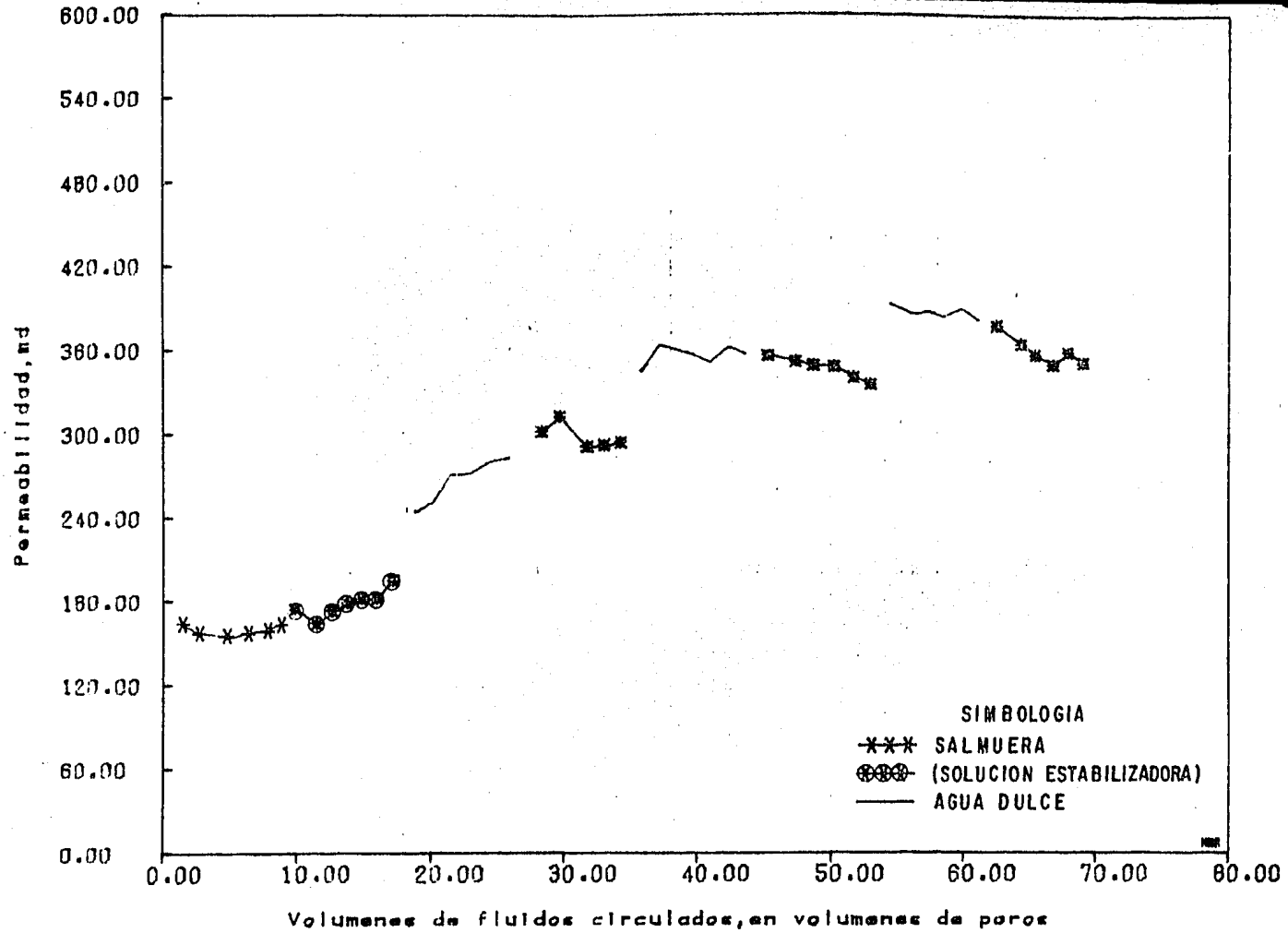


FIG. 5.8.- MUESTRA 5 RELACION IMPEA-301:AGUA (1:35)

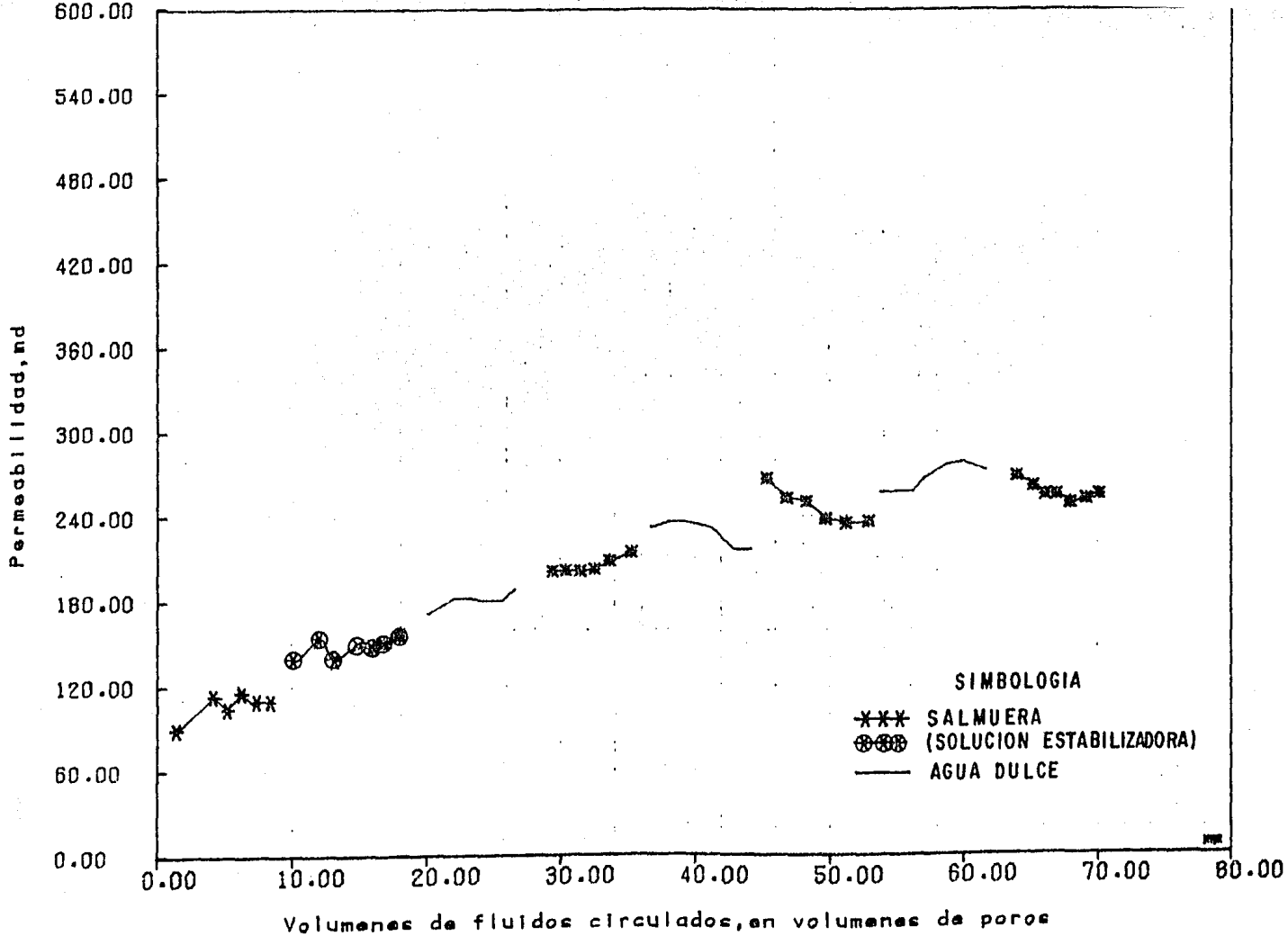


FIG. 5.9.- MUESTRA 6 RELACION IMPEA-301:AGUA (1:50)

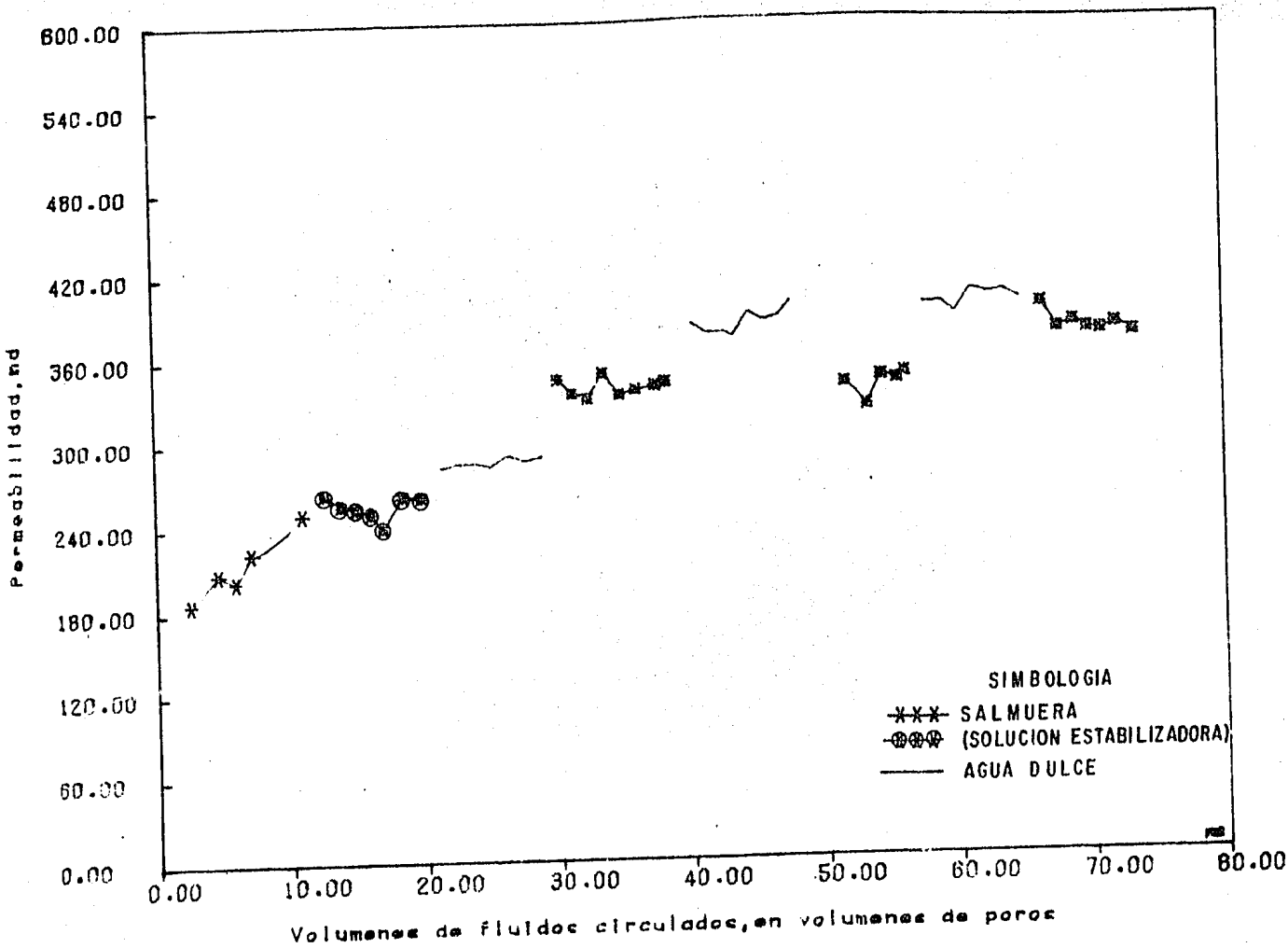


FIG. 5.10.- MUESTRA 7 RELACION IMPEA-301:AGUA (1:75)

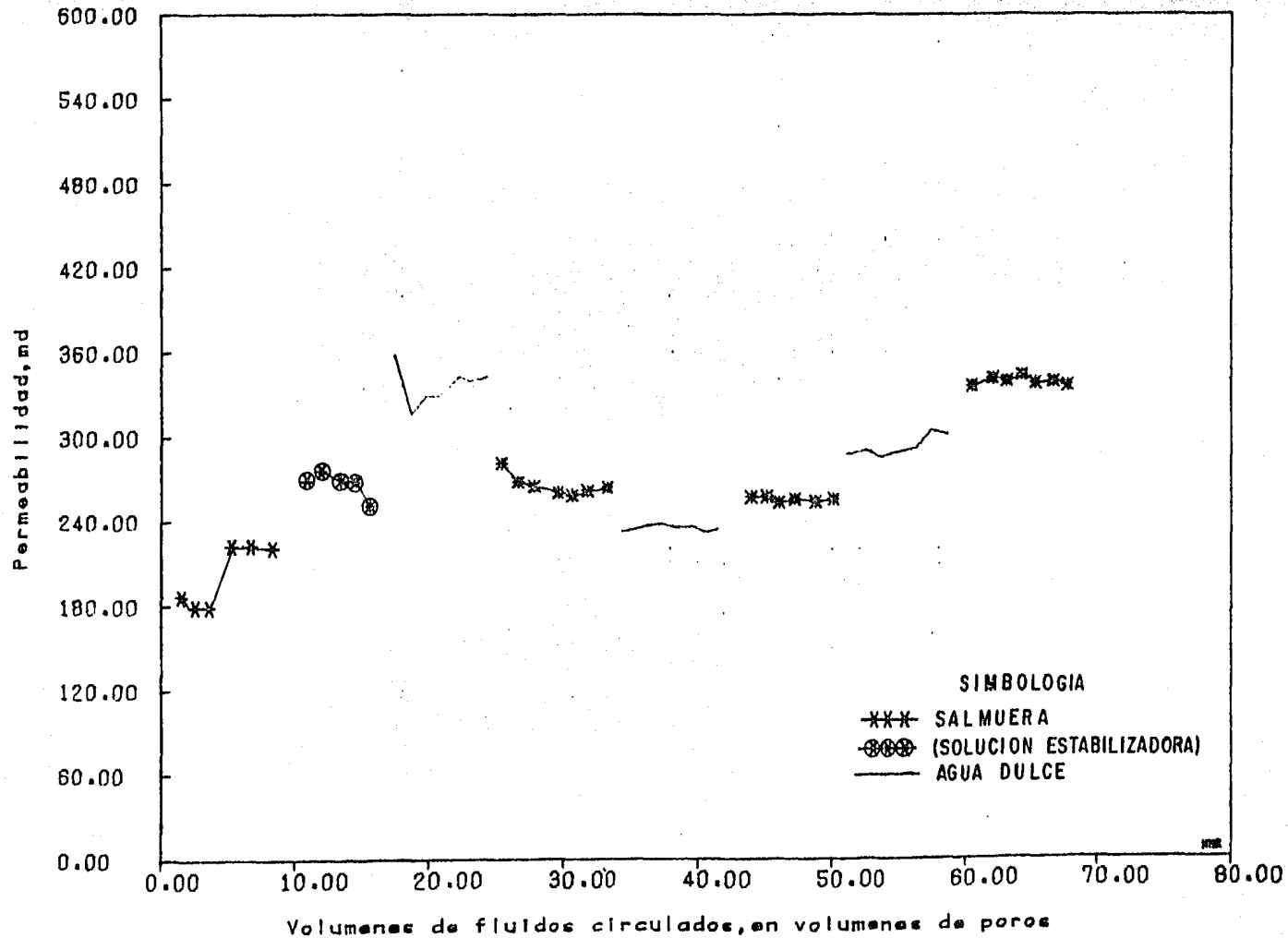


FIG. 5.11.- MUESTRA 8 RELACION IMPEA-301:AGUA (1:100)

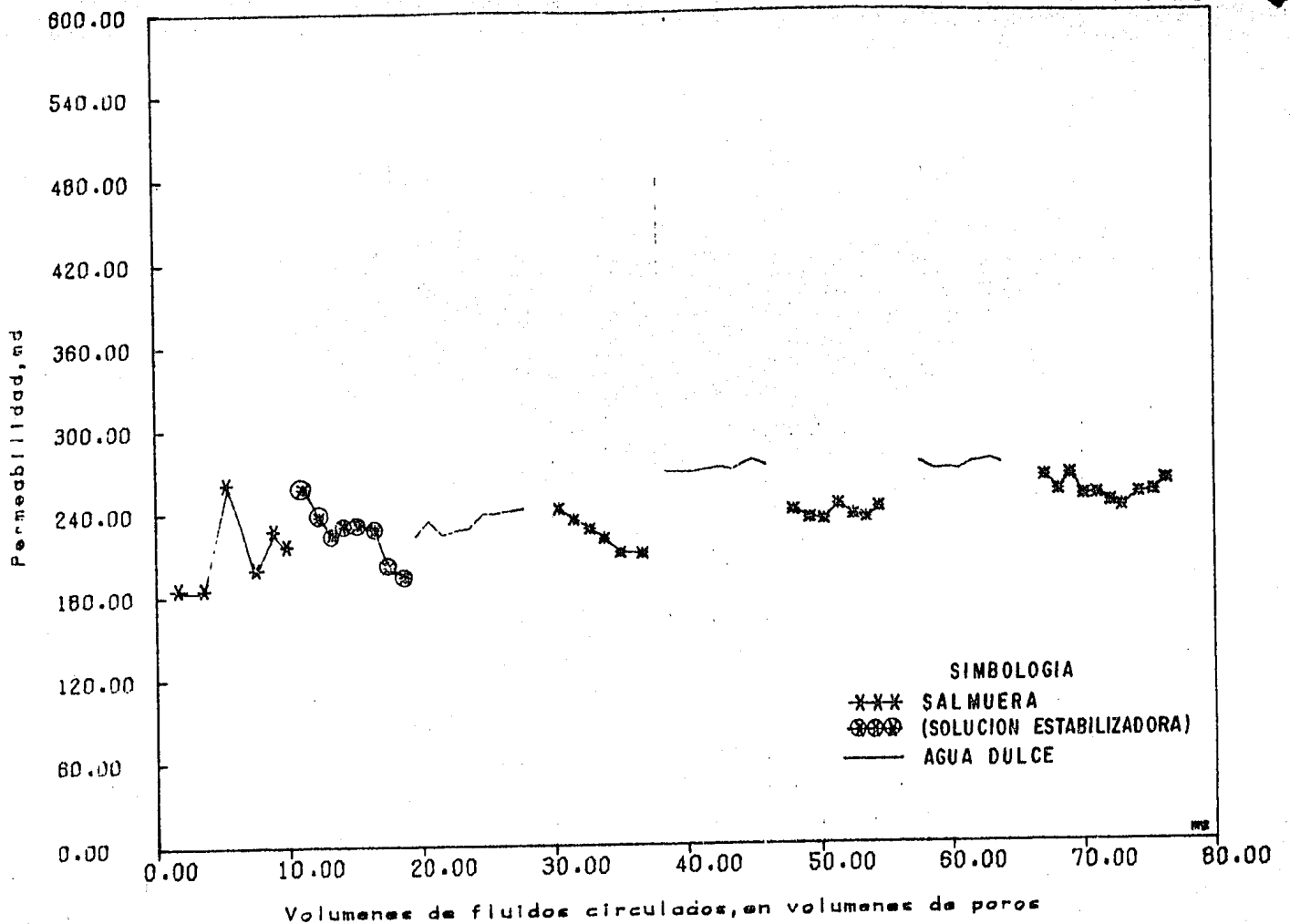


FIG. 5.12.- MUESTRA 9 RELACION IMPER-301:AGUA (1:150)

MUESTRAS Nos. 10 a 15

En estas muestras se utilizó el estabilizador IMPEA-301: Agua, en las siguientes relaciones.

MUESTRA	RELACION
10	1:200
11	1:500
12	1:1000
13	1:2000
14	1:3000
15	1:5000

Los resultados obtenidos se presentan en las Tablas 5.11 a 5.16, y en forma gráfica en las Figs. 5.13 a 5.18.

Generalizando, después del tratamiento estabilizador se tienen pérdidas en la permeabilidad de los diferentes -- fluídos circulados durante las pruebas.

Observaciones.- El daño se va incrementando a medida que aumenta la disolución del estabilizador de arcillas, ob-

servándose claramente si se comparan los resultados obtenidos en la muestra 10 y 11, donde se utilizaron las relaciones (1:200) y (1:500), respectivamente.

Tabla 5.11. Permeabilidades promedio a los fluídos circula dos en la muestra 10 con una relación de estabi lizador IMPEA-301:Agua de (1:200).

Etapa	Fluídos circulados	Permeabilidad promedio (md)	k (%)*
1a.	Salmuera	309	
2a.	IMPEA-301:agua	227	-27
3a.	Agua dulce	217	-30
4a.	Salmuera	190	-38
5a.	Agua dulce	219	-29
6a.	Salmuera	223	-28
7a.	Agua dulce	236	-23
8a.	Salmuera	253	-18

* Respecto a la permeabilidad de la primera etapa.

Tabla 5.12. Permeabilidades promedio a los fluídos circulados en la muestra 11 con una relación de estabilizador IMPEA-301:Agua de (1:500).

Etapa	Fluídos circulados	Permeabilidad promedio (md)	k (%)*
1a.	Salmuera	356	
2a.	IMPEA-301:agua	317	-11
3a.	Agua dulce	295	-17
4a.	Salmuera	254	-29
5a.	Agua dulce	291	-18
6a.	Salmuera	278	-22
7a.	Agua dulce	307	-14
8a.	Salmuera	283	-20

* Respecto a la permeabilidad de la primera etapa.

Tabla 5.13. Permeabilidades promedio a los fluídos circulados en la muestra 12 con una relación de estabilizador IMPEA-301:Agua de (1:1000).

Etapa	Fluídos circulados	Permeabilidad promedio (md)	k (%)*
1a.	Salmuera	458	
2a.	IMPEA-301:agua	378	-18
3a.	Agua dulce	340	-24
4a.	Salmuera	253	-44
5a.	Agua dulce	259	-43
6a.	Salmuera	228	-50
7a.	Agua dulce	306	-33
8a.	Salmuera	291	-36

* Respecto a la permeabilidad de la primera etapa.

Tabla 5.14. Permeabilidades promedio a los fluídos circulados en la muestra 13 con una relación de estabilizador IMPEA-301:Agua de (1:2000).

Etapa	Fluídos circulados	Permeabilidad promedio (md)	k (%)*
1a.	Salmuera	388	
2a.	IMPEA-301:agua	276	-29
3a.	Agua dulce	245	-37
4a.	Salmuera	156	-60
5a.	Agua dulce	190	-51
6a.	Salmuera	134	-65
7a.	Agua dulce	162	-58
8a.	Salmuera	180	-54

* Respecto a la permeabilidad de la primera etapa.

Tabla 5.15. Permeabilidades promedio a los fluídos circulados en la muestra 14 con una relación de estabilizador IMPEA-301:Agua de (1:3000).

Etapa	Fluídos circulados	Permeabilidad promedio (md)	k (%)*
1a.	Salmuera	341	
2a.	IMPEA-301:agua	199	-42
3a.	Agua dulce	83	-76
4a.	Salmuera	23	-93
5a.	Agua dulce	26	-92
6a.	Salmuera	13	-96
7a.	Agua dulce	16	-95
8a.	Salmuera	23	-93

* Respecto a la permeabilidad de la primera etapa.

Tabla 5.16. Permeabilidades promedio a los fluídos circulados en la muestra 15 con una relación de estabilizador IMPEA-301:Agua de (1:5000).

Etapa	Fluídos circulados	Permeabilidad promedio (md)	k (%)*
1a.	Salmuera	421	
2a.	IMPEA-301:agua	200	-52
3a.	Agua dulce	3	-99
4a.	Salmuera	6	-99
5a.	Agua dulce	5	-99
6a.	Salmuera	6	-99
7a.	Agua dulce	6	-99
8a.	Salmuera	6	-99

* Respecto a la permeabilidad de la primera etapa.

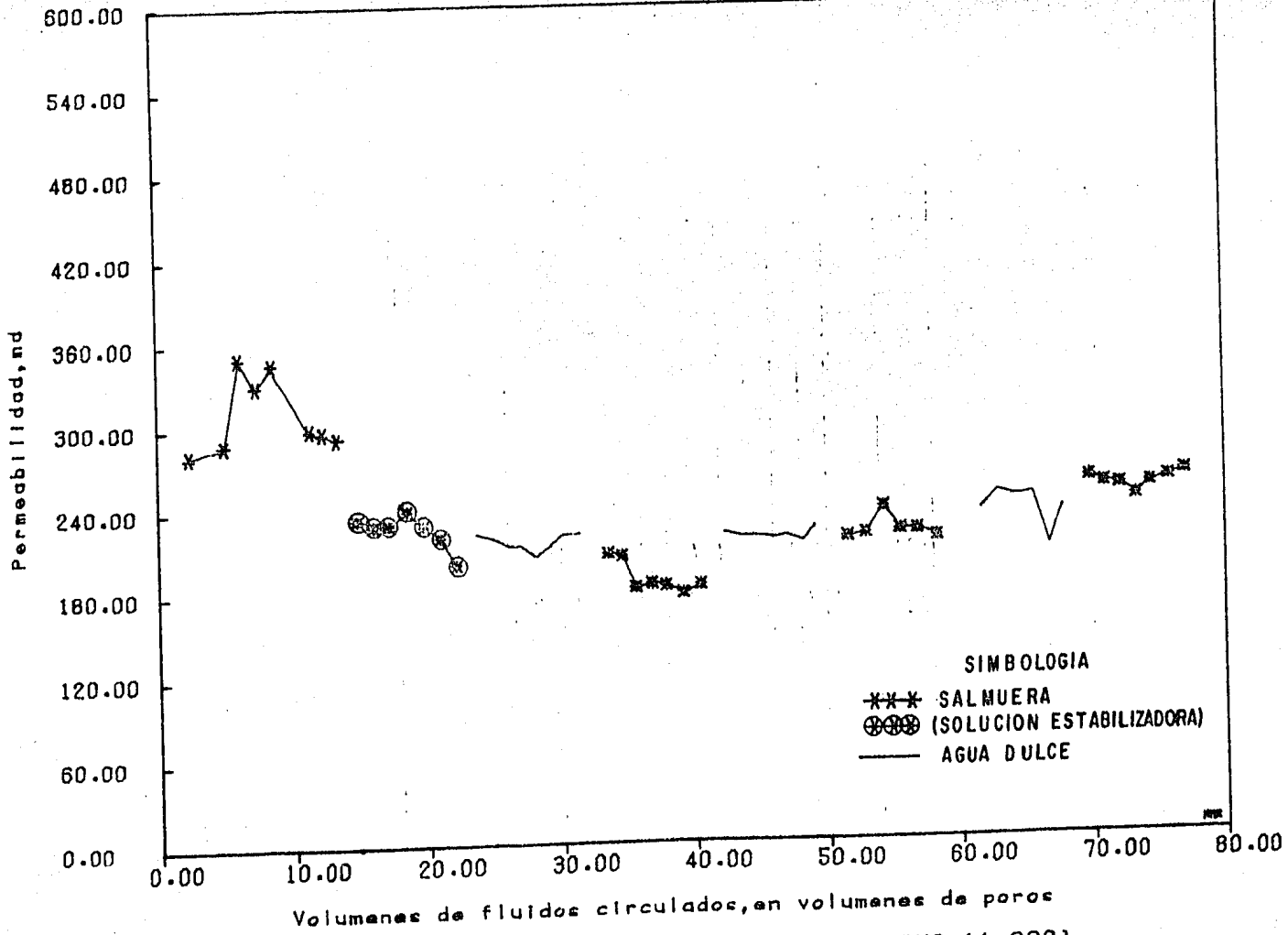


FIG. 5.13 .- MUESTRA 10 RELACION IMPEA-301:AGUA (1:200)

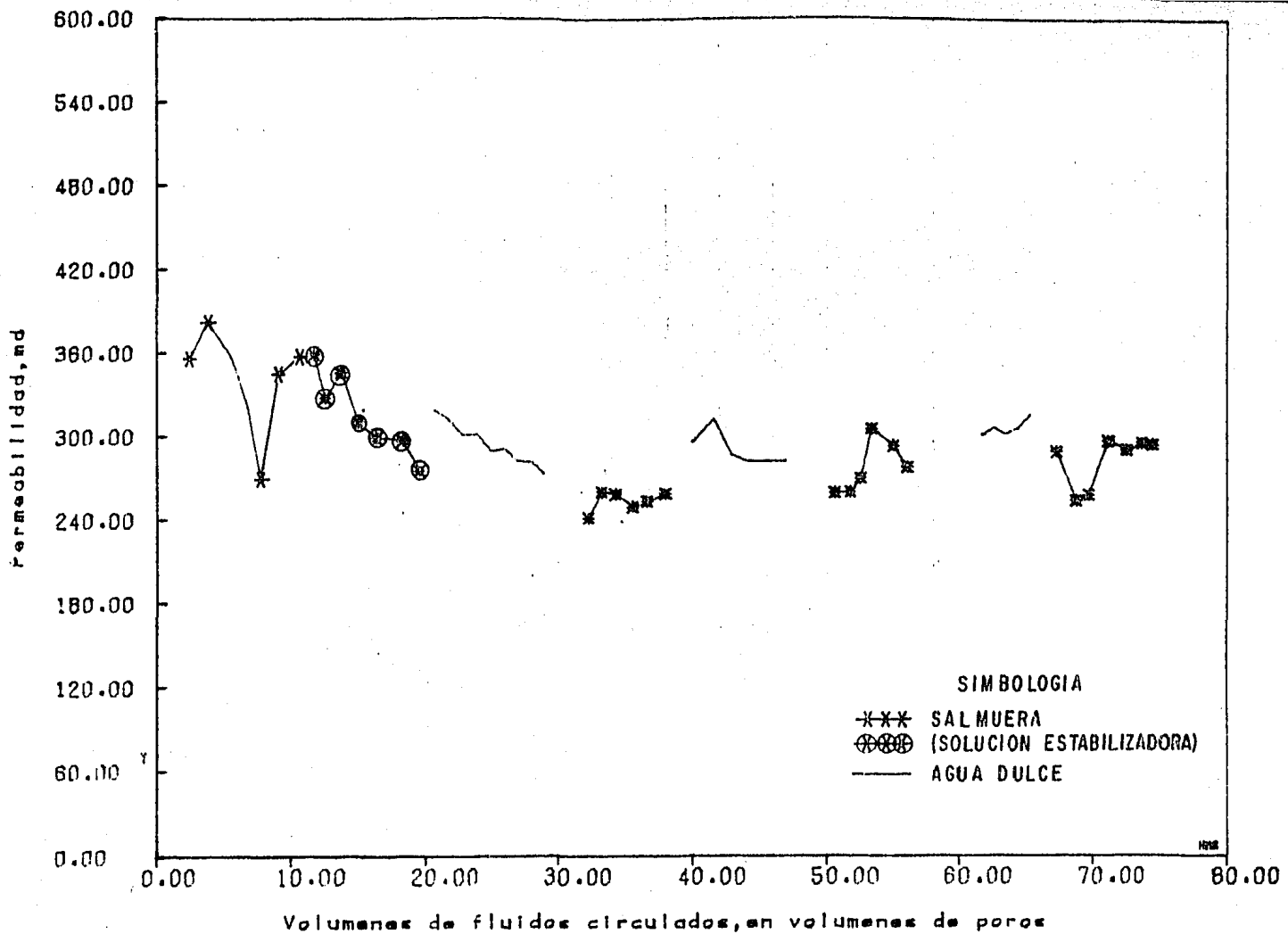


FIG. 5.14.- MUESTRA 11 RELACION IMPEA-301:AGUA (1:500)

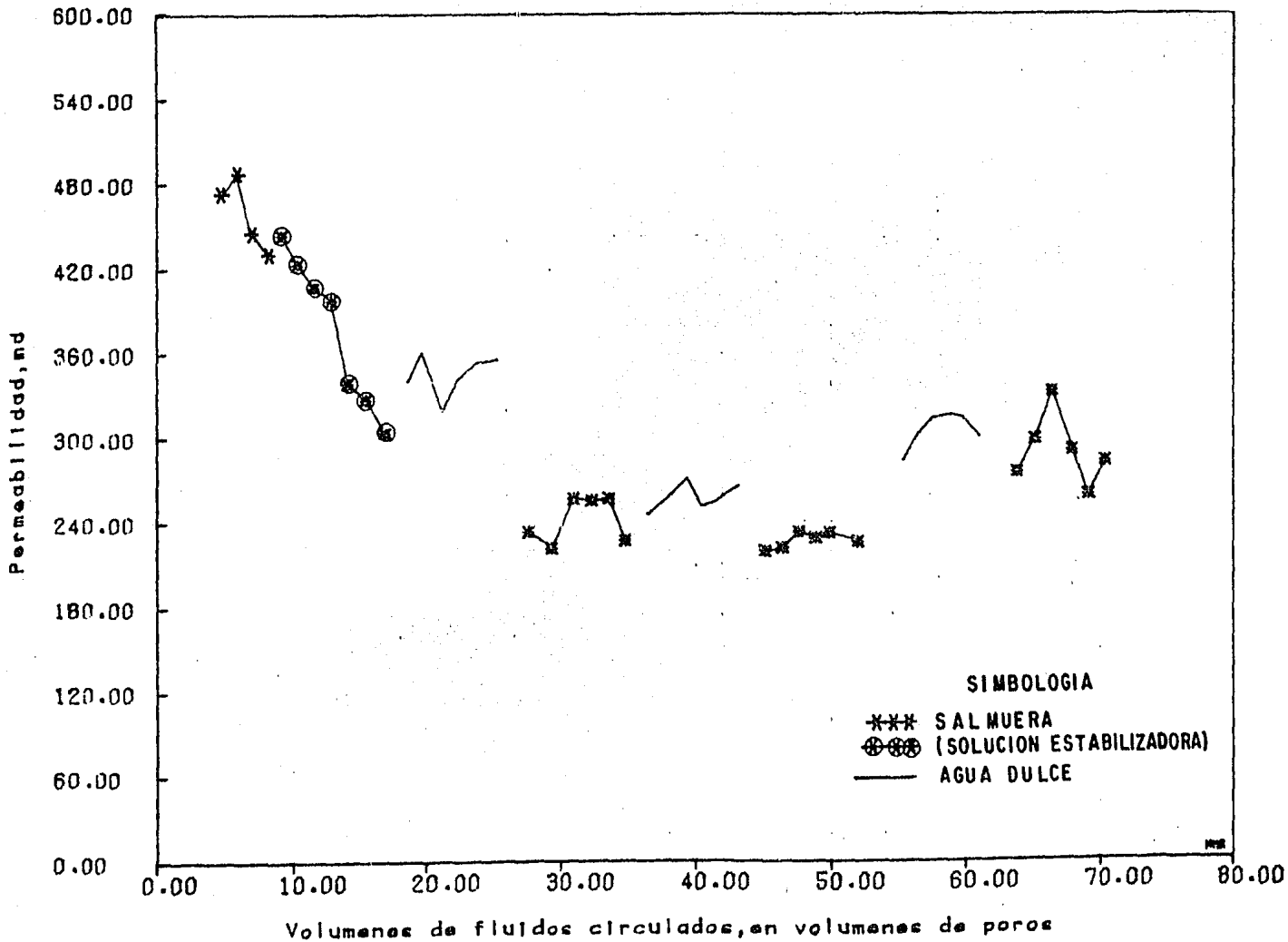


FIG. 5.15.- MUESTRA 12 RELACION IMPEA-301:AGUA (1:1000)

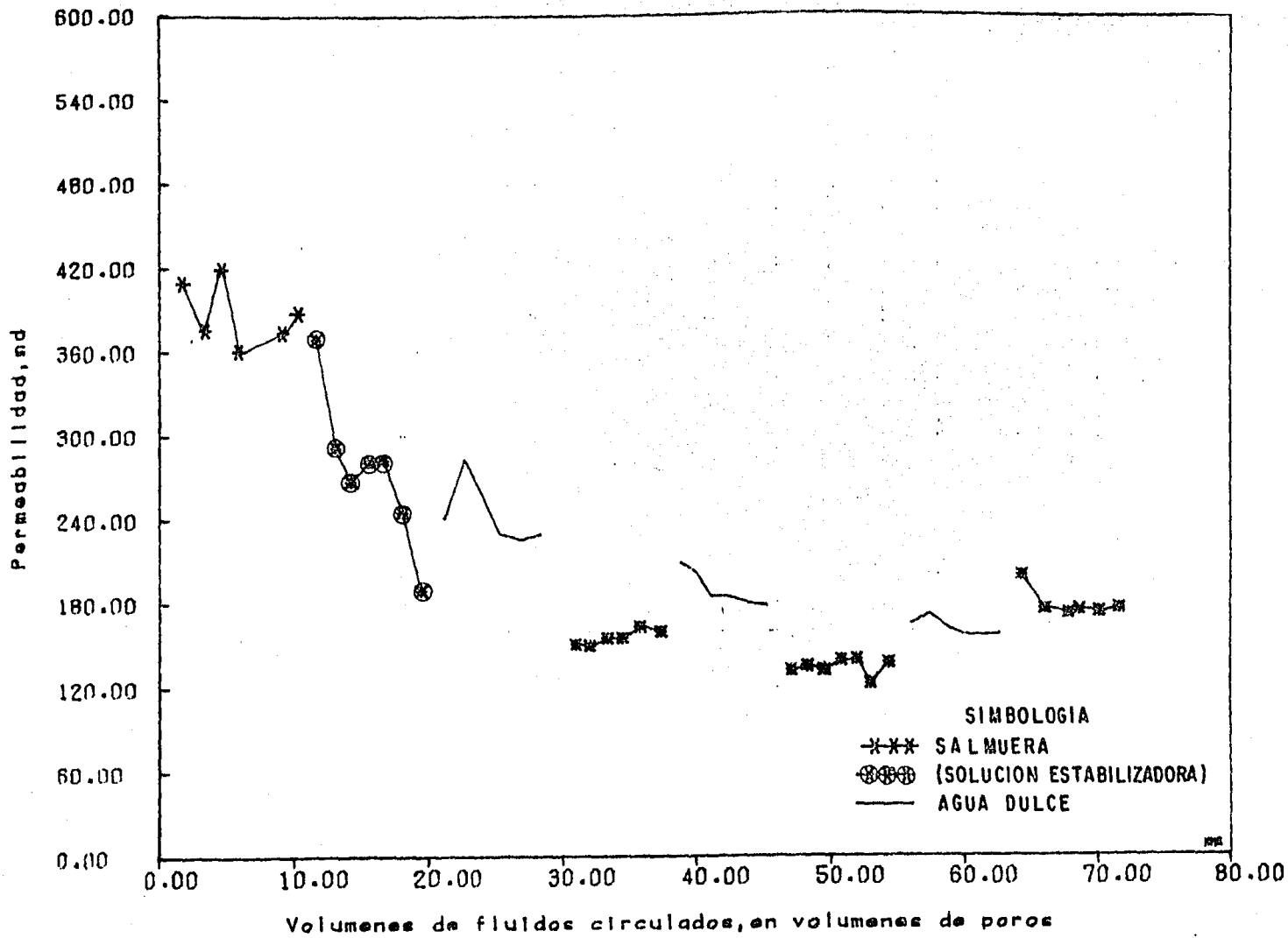


FIG. 5.16.- MUESTRA 13 RELACION IMPEA-301:AGUA (1:2000)

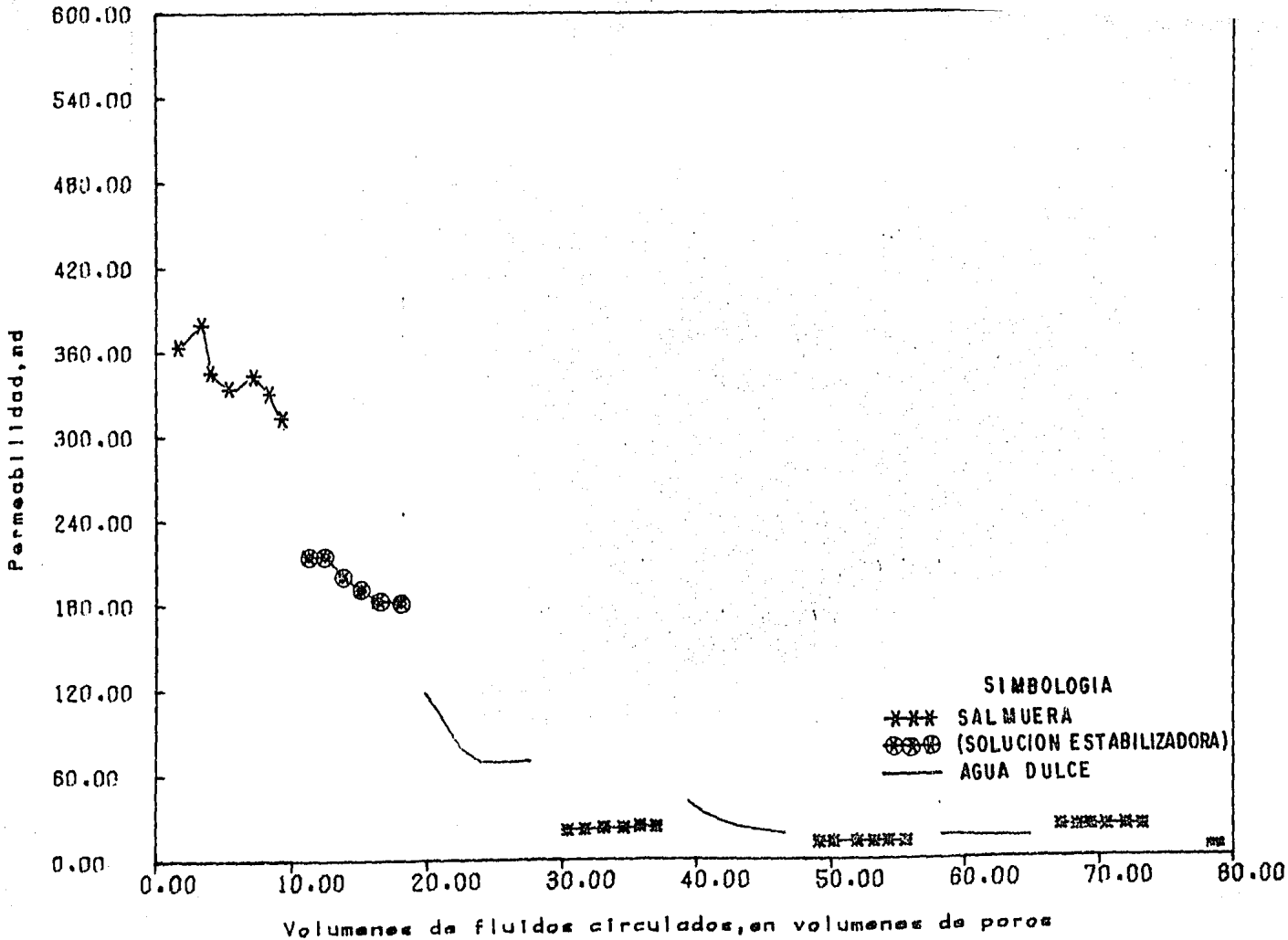


FIG. 5.17.- MUESTRA 14 RELACION IMPEA-301:AGUA (1:3000)

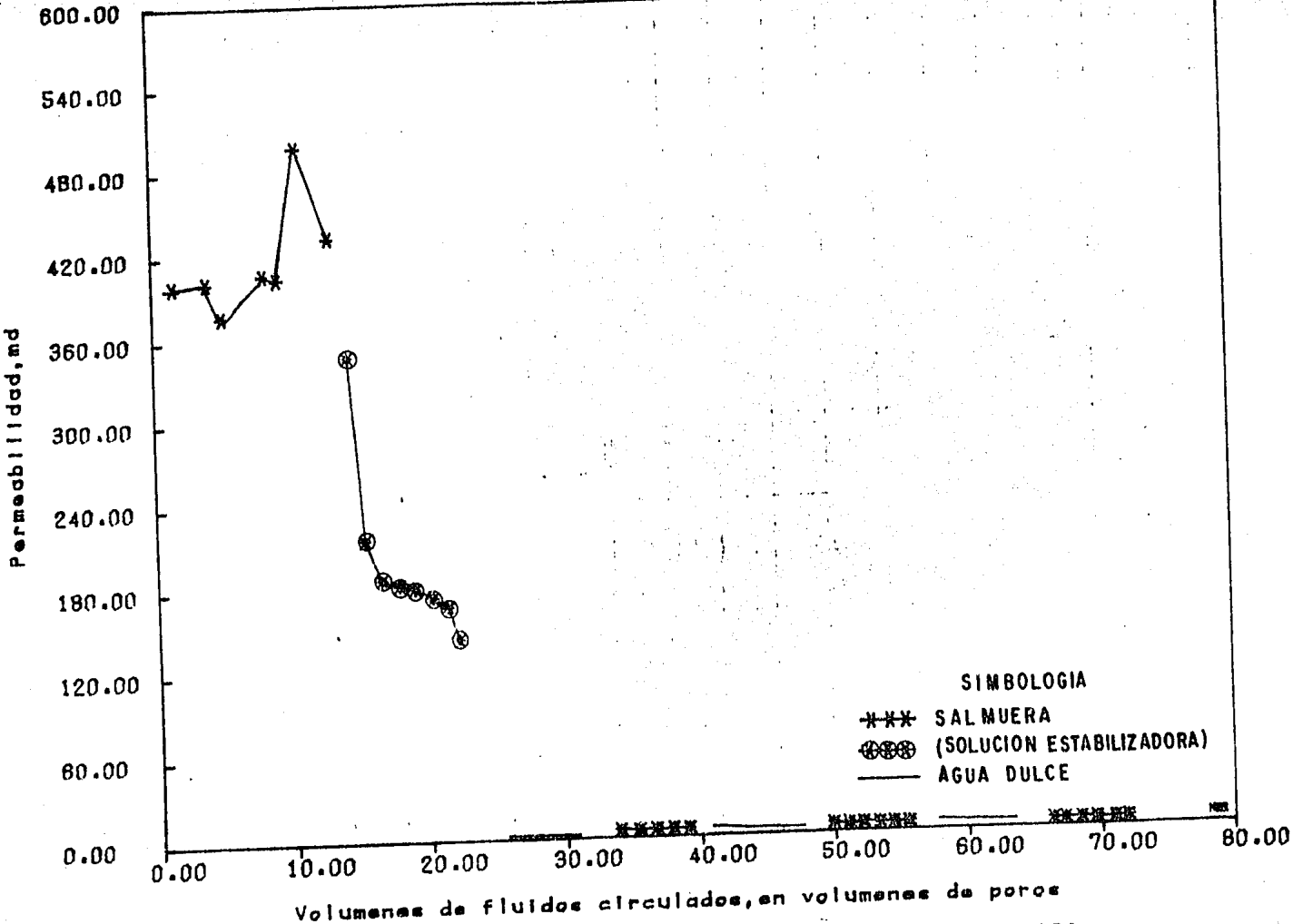


FIG. 5.18.- MUESTRA 15 RELACION IMPEA-301:AGUA (1:5000)

5.6.2.- Análisis de la variación de la permeabilidad en función de las relaciones de concentración de estabilizador.

Para tener una idea más clara del comportamiento de la permeabilidad de las muestras de arenisca Berea al ser tratadas con el producto estabilizador de arcillas - -- IMPEA-301, se construyó una gráfica de los incrementos en permeabilidad, contra las diferentes relaciones de - IMPEA: Agua probadas, mostrándose los resultados en las Tablas 5.17 a 5.21 y en forma gráfica en las Figs. - 5.19 a 5.23 .

Generalizando, se puede dividir esta gráfica de concentraciones en tres zonas, de acuerdo al comportamiento en los cambios de permeabilidad que se observaron en estas pruebas.

Estas zonas son las siguientes:

a) Zona de alta concentración de estabilizador, la cual produce un daño en la permeabilidad efectiva.

b) Zona de concentración media de estabilizador. Encontrándose en esta zona las relaciones que dan los resultados más favorables.

c) Zona de baja concentración del estabilizador. En esta zona la permeabilidad decreció a medida que se diluyó más el producto estabilizador de arcillas.

En la Fig. 5.24 , se muestran las curvas del comportamiento de la permeabilidad contra la concentración vistas en las figuras anteriores. Este comportamiento se explica en base al funcionamiento del producto para estabilizar las arcillas visto en el capítulo 3, correspondiente a la estabilización mediante metales hidrolizables con soluciones de hidroxi-aluminio.

Debido a la polimerización del producto, al irse lavando el exceso adsorbido por el medio poroso aumenta la permeabilidad, de ahí la diferencia entre la permeabilidad a la salmuera en la 4a y 8a etapas.

Tabla 5.17. Análisis de la 4a. etapa.

Muestra	Relación IMPEA-301:Agua	k(%)*
3	(1:13.5)	-35
4	(1:20)	+18
5	(1:35)	+87
6	(1:50)	+94
7	(1:75)	+54
8	(1:100)	+32
9	(1:150)	+ 7
10	(1:200)	-38
11	(1:500)	-29
12	(1:1000)	-44
13	(1:2000)	-60
14	(1:3000)	-93
15	(1:5000)	-99

* Respecto a la permeabilidad de la primera etapa en cada muestra.

Tabla 5.18. Análisis de la 5a. etapa.

Muestra	Relación IMPEA-301:Agua	k(%)*
3	(1:13.5)	-35
4	(1:20)	+63
5	(1:35)	+125
6	(1:50)	+116
7	(1:75)	+75
8	(1:100)	+17
9	(1:150)	+26
10	(1:200)	-29
11	(1:500)	-18
12	(1:1000)	-43
13	(1:2000)	-51
14	(1:3000)	-92
15	(1:5000)	-99

* Respecto a la permeabilidad de la primera etapa en cada muestra.

Tabla 5.19. Análisis de la 6a. etapa.

Muestra	Relación IMPEA-301:Agua	k(%)*
3	(1:13.5)	-38
4	(1:20)	+59
5	(1:35)	+118
6	(1:50)	+134
7	(1:75)	+54
8	(1:100)	+27
9	(1:150)	+13
10	(1:200)	-28
11	(1:500)	-22
12	(1:1000)	-50
13	(1:2000)	-65
14	(1:3000)	-96
15	(1:5000)	-99

* Respecto a la permeabilidad de la primera etapa en cada muestra.

Tabla 5.20. Análisis de la 7a. etapa.

Muestra	Realación IMPEA-301:Agua	k(%)*
3	(1:13.5)	- 8
4	(1:20)	+90
5	(1:35)	+143
6	(1:50)	+152
7	(1:75)	+82
8	(1:100)	+46
9	(1:150)	+30
10	(1:200)	-23
11	(1:500)	-14
12	(1:1000)	-33
13	(1:2000)	-58
14	(1:3000)	-95
15	(1:5000)	-99

* Respecto a la permeabilidad de la primera etapa en cada muestra.

Tabla 5.21. Análisis de la 8a. etapa.

Muestra	Relación IMPEA-301:Agua	k(%)*
3	(1:13.5)	+ 4
4	(1:20)	+72
5	(1:35)	+126
6	(1:50)	+142
7	(1:75)	+73
8	(1:100)	+68
9	(1:150)	+21
10	(1:200)	-18
11	(1:500)	-20
12	(1:1000)	-36
13	(1:2000)	-54
14	(1:3000)	-93
15	(1:5000)	-99

* Respecto a la permeabilidad de la primera etapa en cada muestra.

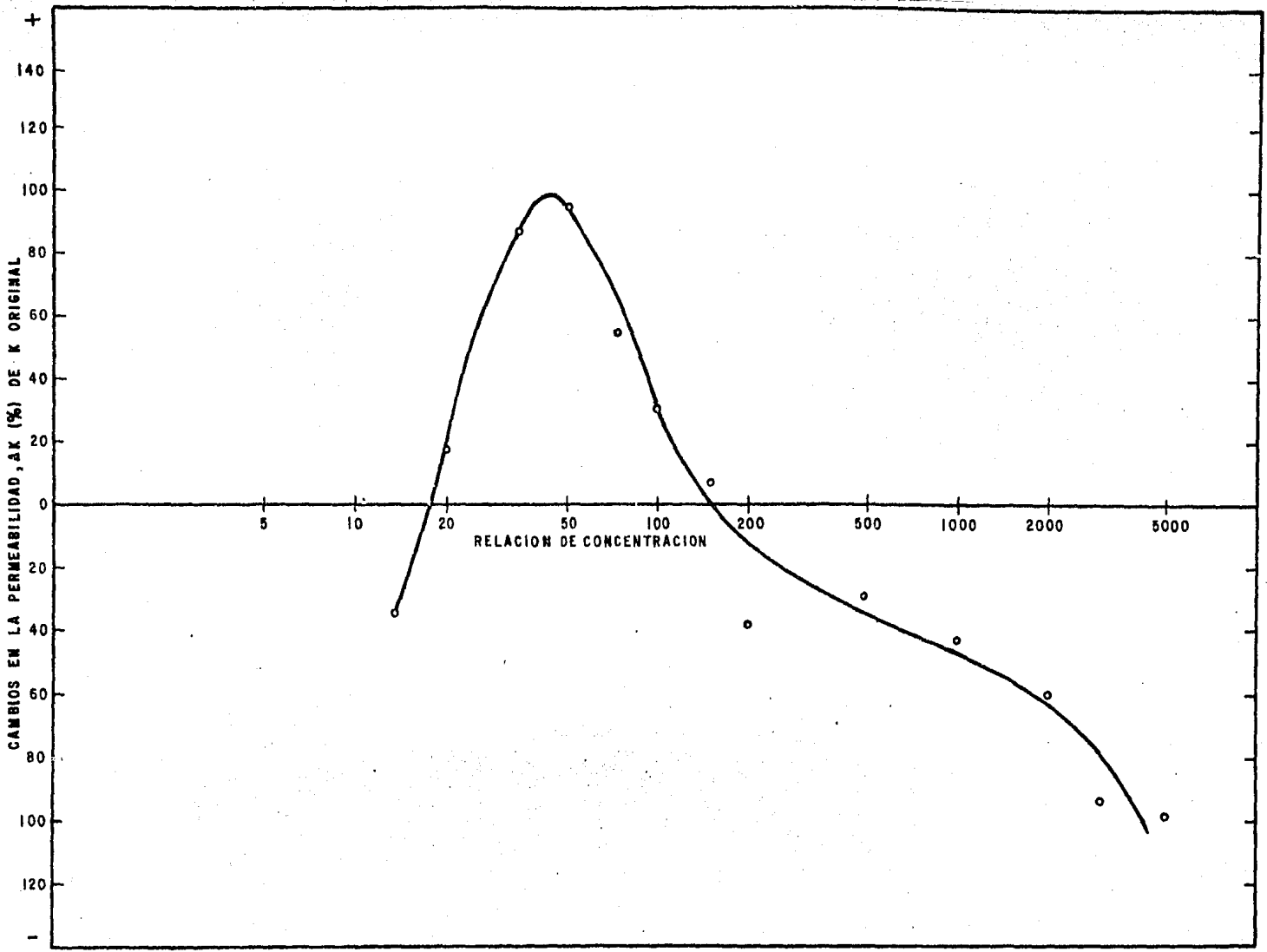


FIG. 5.19 .—ANALISIS DE LA 4a. ETAPA . RELACIONES DE CONCENTRACION VS. CAMBIOS EN LA PERMEABILIDAD.

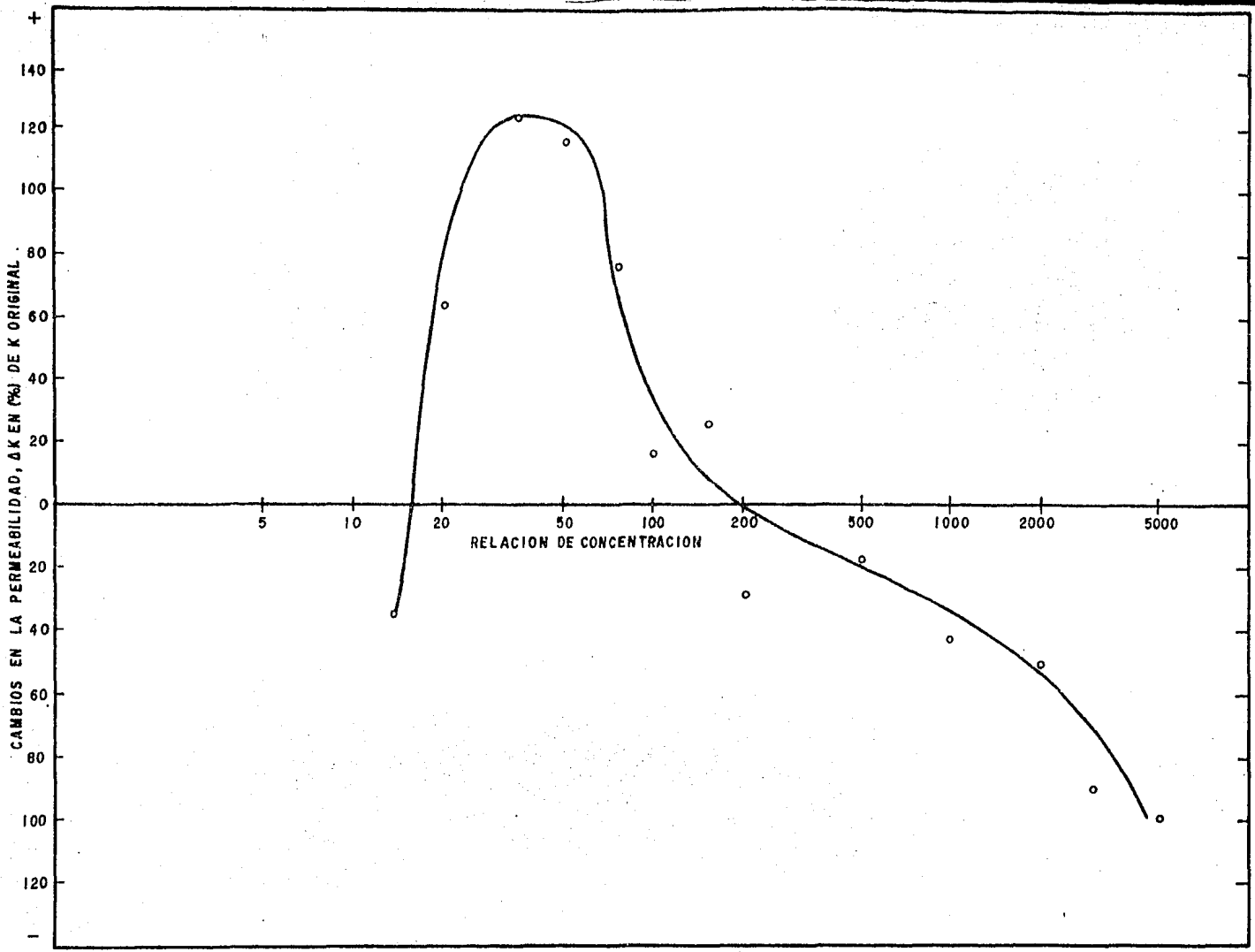


FIG.5.20 :- ANALISIS DE LA 5a. ETAPA. RELACIONES DE CONCENTRACION VS. CAMBIOS EN LA PERMEABILIDAD.

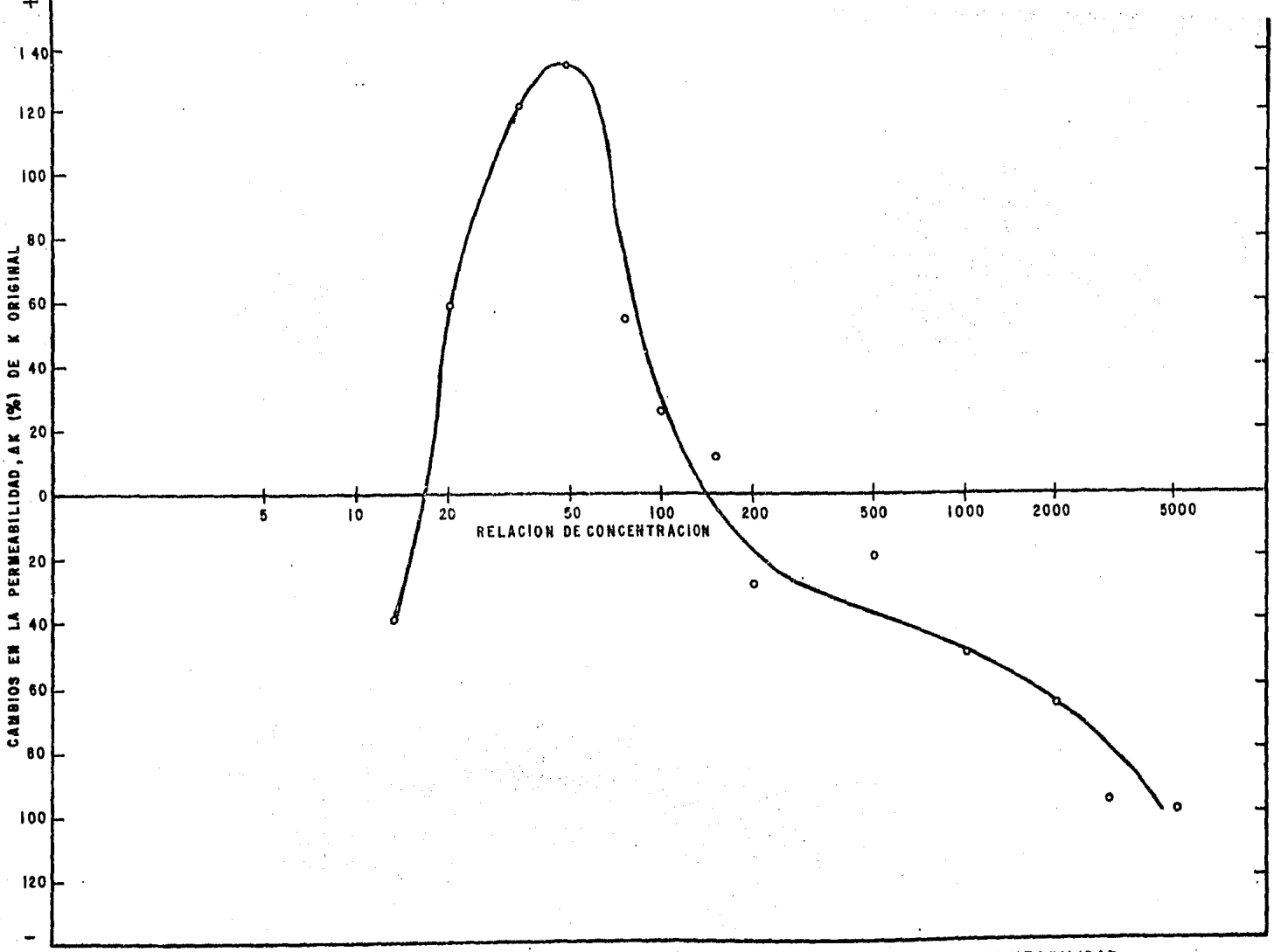


FIG. 5.21 – ANALISIS DE LA 6a. ETAPA. RELACIONES DE CONCENTRACION VS CAMBIOS EN LA PERMEABILIDAD.

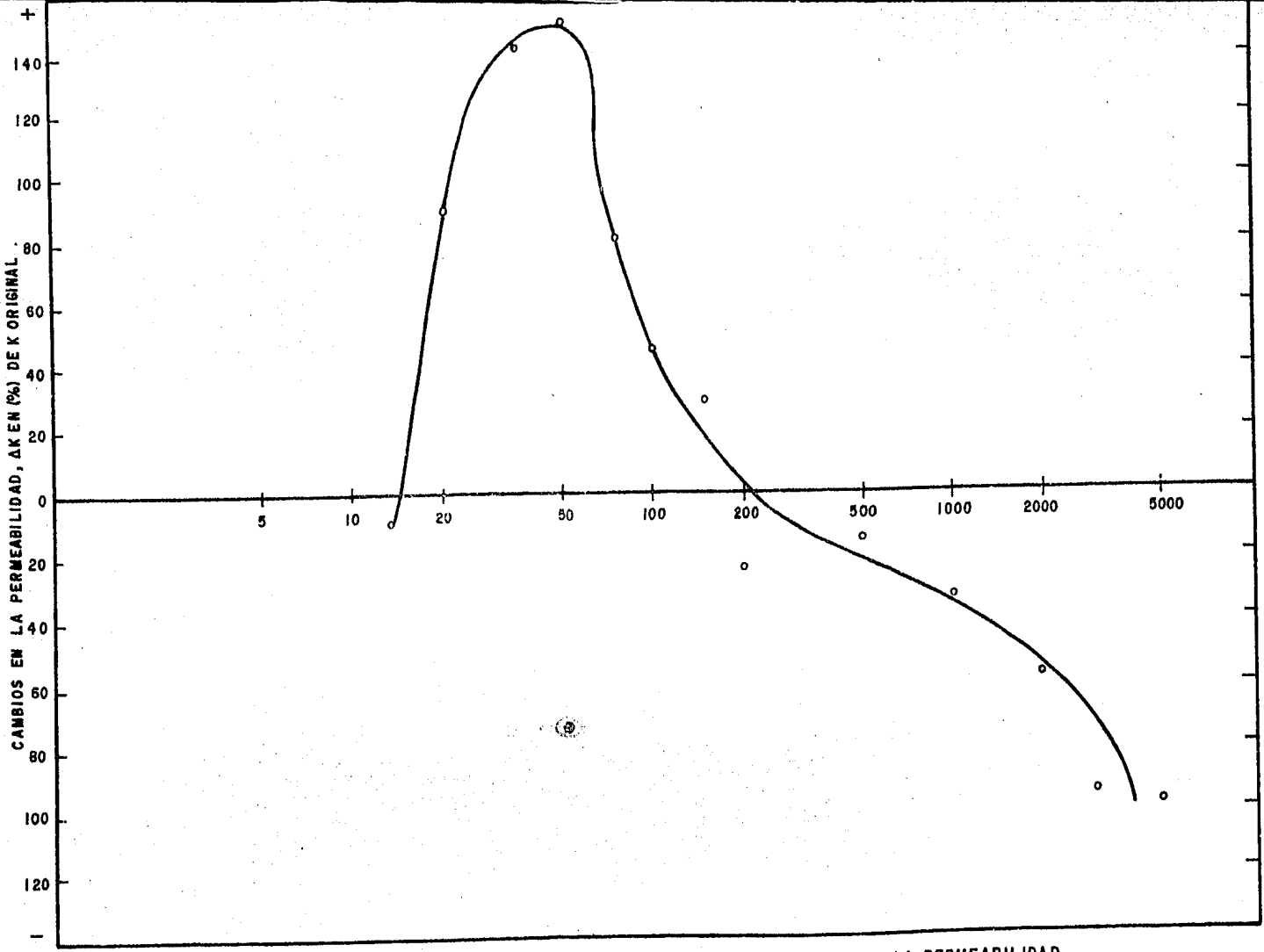


FIG. 5.22 - ANALISIS DE LA 7a. ETAPA. RELACIONES DE CONCENTRACION VS. CAMBIOS EN LA PERMEABILIDAD.

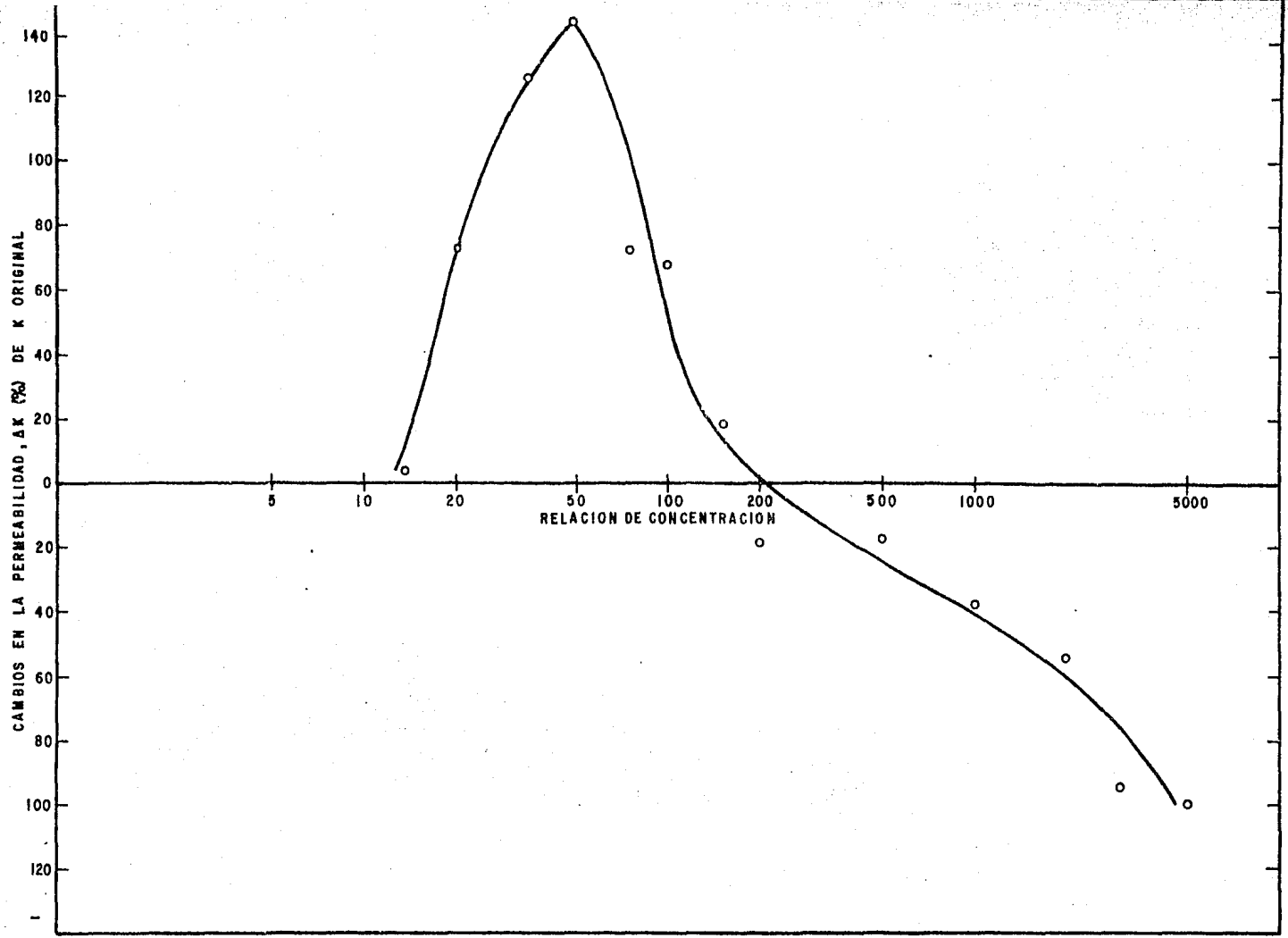


FIG. 5.23.- ANALISIS DE LA 8a. ETAPA, RELACIONES DE CONCENTRACION VS. CAMBIOS EN LA PERMEABILIDAD.

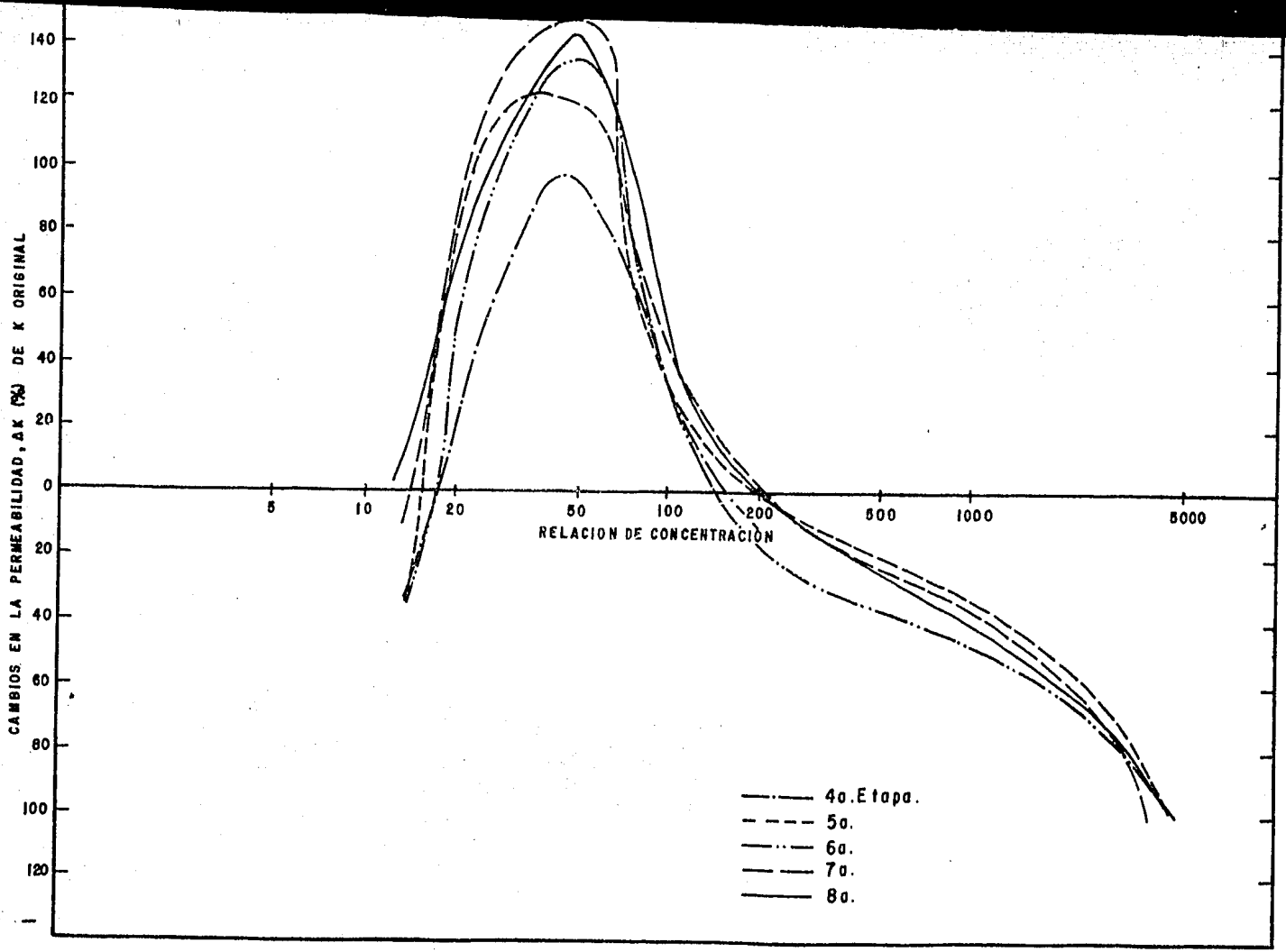


FIG. 5.24.- ANALISIS DE LAS ETAPAS 4 A LA 8, RELACIONES DE CONCENTRACION VS. CAMBIOS EN LA PERMEABILIDAD.

C O N C L U S I O N E S

1.- De acuerdo al resultado obtenido en las pruebas - - efectuadas en las muestras de Arenisca Berea, se puede decir que el daño, manifestado como una pérdida en la - permeabilidad, es ocasionado por la dispersión de las - arcillas (caolinita e ilita) y partículas a tamaño de - arcilla (cuarzo) que se mueven con el fluído circulante hasta que alcanzan una restricción en el sistema poroso, reduciendo drásticamente la permeabilidad.

2.- También con base en los resultados se determinó que la zona intermedia de concentración del estabilizador - da los mejores resultados como inhibidor de las arci- - llas y finos a tamaño de arcilla.

3.- Se concluye también que las técnicas de identifica-- ción del tipo y cantidad de arcilla presentes en las - - muestras, combinadas con las pruebas de desplazamiento - en tapones, proporcionan información suficiente para - - cuantificar el tipo y cantidad de daño a la formación. - Una vez identificado el daño, evaluar un producto esta-- bilizador de arcillas siguiendo la secuencia presentada en este trabajo.

R E C O M E N D A C I O N E S

1.- Basándose en la experiencia de este trabajo, para optimizar la concentración de un estabilizador de arcillas se recomienda contar con un conjunto de muestras representativo, con características similares en composición mineralógica y propiedades petrofísicas del campo a estudiar y además en número suficiente para realizar todas las pruebas necesarias.

2.- Ya que la eficiencia del estabilizador aumenta con la temperatura, si se cuenta con el equipo adecuado es conveniente realizar pruebas a condiciones de yacimiento.

3.- Se recomienda el uso de una combinación transductor-indicador-graficador para llevar un registro contínuo de la variación de la caída de presión con el tiempo de prueba, en lugar de utilizar manómetros que indiquen solo presiones de entrada y salida.

4.- Se recomienda realizar pruebas piloto en el campo con las proporciones estabilizador: agua que arrojan los

mejores resultados en el laboratorio.

5.- Es conveniente hacer estudios como los descritos -- en el presente trabajo cuando se desea evaluar proyec-- tos de recuperación secundaria mediante la inyección de agua.

REFERENCIAS

1.- T. Sudo, S. Shimoda, H. Yotsumoto, S. Aita.
"Developments in Sedimentology", electron monographs - of clay minerals. Kodansha Elsevier, 1981.

2.- W. Arthur White, Ernesto Pichler
"Water sorption characteristics of clay minerals". Division of the Illinois State Geological Survey, circular 266, 1959.

3.- Reséndiz López Fernando
"Estabilizadores de arcillas empleados en la explota-- ción del petróleo".
Tesis profesional, ESIQIE, IPN, 1980.

4.- Dorothy Carroll
"Clay minerals: A guide to their X-ray identification". The Geological Society of America. Special paper 126, 1970.

5.- Ralph E. Grim.
"Clay Mineralogy". McGraw-Hill Book Company 1953.

6. Monaghan P.H., Salathiel R.A., Morgan B.E.
"Laboratory studies of formation damage in sands con- - taining clays". Petroleum Transactions AIME Vol. 216, 1959.

7.- Slobod R.L., Beiswanger U. P.G.
"Use of polymers to control clay swelling". Producers Monthly August, 1968.

8.- Hewitt H. Charles
"Analytical Techniques for recognizing water sensitive reservoir rocks". JPT August, 1963.

9.- Veley D. Carl
"How hidrolizable metal ions react with clays to - - -- control formation water sensitivity". JPT September, -- 1969.

10.- Young M. Bill, McLaughlin C. Horner, Borchardt K. John
"Clay stabilation agents-their effectiveness in high--temperature steam". JPT December, 1980

11.- Keelan D.K., Koepf E.H.
"The role of cores and core analysis in evaluation of formation damage". JPT June, 1976.

12.- Pittman E.D., Thomas J.B.
"Some aplications of scaning electron microscopy to the study of reservoir rocks". JPT November, 1979.

13.- Neasham W. John
"The morphology of dispersed clay in sandstone reservoirs and its effect on sandstone shaliness, pore space and - fluid flow properties".SPE 6858 October, 1977.

14.- Muecke T.W.
"Formation fines and factors controlling their movement in porous media" JPT February, 1979.

15.- Land S. Carlon, Baptist C. Oren
"Effect of hidration of montmorillonite on the permeability to gas of water sensitive reservoir rocks". - - JPT Octuber, 1965.

16.- Williams H. Lewis Jr., Underdown R. David
"New polymer offers effective, permanent clay stabilation treatment". JPT July, 1981.

17.- Ladd C. Charles
"Mechanisms of swelling by compacted clay". Soil - - -- Engineering Division, Department of Civil and Sanitary Engineering, Massachussets Institute of Technology, - - 1957.

18.- Stout Max C., Peters W. Fred
"Preventing formation damage during fracturing of the - Clinton Formation". SPE 6128 Octuber, 1976.

19.- Garaicochea P. Francisco
"Apuntes de Estimulación de Pozos". División de Ciencias de la Tierra. Departamento de Explotación del Petróleo, Facultad de Ingeniería, UNAM, 1983.

20.- Kalish P.J., Stewart J.A., Rogers W.F., Bennett E.O.
"The effect of bacteria on sandstone permeability". - - JPT July, 1964.

21.- Veley Carl, Casey G. David Jr.
"In place clay stabilation cuts formation sand entry". Word Oil June, 1973.

22.- Barkman J.H., Abrams A., Darley H.C.H., Hill J.H.
"An oil-coating process to stabilize clays in fresh -- water flooding operations". JPT September, 1975.

23.- Clementz M. David
"Clay stabilation in sandstones through adsortion of -- petroleum heavy ends". JPT September, 1979.

24.- Jones O. Frank Jr.
"Influence of chemical composition of water of clay - - blocking of permeability". JPT April, 1964.

25.- Thomas R.L., Crowe C.W.
"New chemical treatment provides stimulation and clay - control in sandstone formations". SPE 7012 February, -- 1978.

26.- Coulter A.W., Copeland C.T., Harrisberger W.H.
"Designed aplication of clay stabilizar improves - - -- performance". SPE 6759 February, 1978.

27.- Thomas R.L., Crowe C.W.
"Single-stage chemical treatment provides stimulation - and clay control in sandstone formations". SPE 7124 - - April, 1978.

28.- Thomas R.L., Crowe C.W.
"Matrix treatment employs new acid sistem for stimulation and control of fines migration in sandstone formations". SPE 7566 Octuber, 1978.

30.- William B. Braden Jr.
"Method of treating clay-containing formations". - -- U.S.A. Patent 3 621 913 Texaco, Inc. November, 1971.

31.- Alí Aguirre Blanca E., Riaño Caraza Juan Manuel.
"Procedimiento para determinar la proporción óptima - de un estabilizador de arcillas". En impresión. División de Evaluación de Formaciones, Subdirección de -- Tecnología de Explotación. IMP, 1984.