



201248

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

**PERDIDAS TERMICAS EN ARCILLAS SATURADAS BAJO
LA INFLUENCIA DE SALMUERAS CALIENTES
SATURADAS EN UN ESTANQUE SOLAR**

TESIS MANCOMUNADA

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO QUÍMICO**

P R E S E N T A N :

**JOSE ALBERTO MARTINEZ ALCARAZ
GUILLERMO SEGURA HERNANDEZ**

México, D. F.

1987



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 está 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.

I N D I C E

	Pag.
RESUMEN	1
1.- INTRODUCCION	3
2.- ESTANQUE SOLARES	11
3.- IMPERMEABILIZACION DE LAGUNAS ARTIFICIALES	28
4.- ARCILLAS COMO IMPERMEABILIZANTES	42
5.- COMPORTAMIENTO DE UNA ARCILLA EN UN PROTOTIPO DE ESTANQUE SOLAR	58
6.- PROPIEDADES TERMICAS DE ARCILLAS	81
7.- CONSIDERACIONES SOBRE EL COMPORTAMIENTO QUIMICO DE LAS ARCILLAS	113
8.- OTRAS APLICACIONES DE LAS ARCILLAS COMPACTADAS COMO IMPERMEABILIZANTES	150
9.- CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS	161
AGRADECIMIENTOS	178
REFERENCIAS	179

RESUMEN

Se hace una descripción acerca de los Estanques Solares, aplicaciones y ventajas, así como de los materiales más comunes para impermeabilizar lagos artificiales.

Se estudian las propiedades mecánicas y térmicas de una arcilla tipo CH para saber si puede ser utilizada como impermeabilizante en un Estanque Solar. Se construyó un prototipo de Estanque Solar para conocer el funcionamiento térmico, hidráulico y químico de la arcilla en condiciones aproximadas a las que se encuentra en el fondo de un Estanque Solar real.

Se presentan las mediciones de conductividad térmica y permeabilidad vertical de la arcilla trabajando en el prototipo de Estanque Solar, tanto con agua como con salmuera saturada de

1. INTRODUCCION

Un Estanque Solar es un sistema que permite captar y almacenar la energía solar incidente sobre la Tierra; consiste en una masa de agua salada con una gran superficie expuesta al sol y una profundidad entre 1.5 y 3 m. El sistema consta de tres zonas bien definidas en el sentido vertical.

De preferencia el fondo del estanque es negro u oscuro de manera que la energía solar que no es absorbida por la solución, lo es por el fondo, calentándose el agua que esta en contacto con él, siendo esta una zona convectiva compuesta por una solución saturada en sales, que sirve como un almacén térmico y que es del orden de 1 m o mayor. Arriba de esta zona se localiza una región no convectiva que funciona como un aislante térmico, en la cual existe un gradiente sa-

NaCl a diferentes temperaturas. Se presentan resultados de otras opciones para medir las propiedades térmicas de la arcilla saturada, lo que incluye la medición de la difusividad térmica.

El valor de la permeabilidad vertical encontrado fue de 2.24×10^{-7} cm/seg cuando en la superficie de la arcilla se tuvo agua y de 1.47×10^{-7} cm/seg cuando se tuvo salmuera, ambas a una temperatura de 50°C , así mismo los valores de conductividad térmica obtenidos son de $0.86 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ y de $0.57 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ cuando la arcilla trabajó con agua y salmuera a 50°C , respectivamente.

Se muestran diferentes aspectos acerca del comportamiento químico de la arcilla frente a una salmuera, bajo un gradiente térmico y se nota que durante 3 meses de operación con salmuera saturada de NaCl a 50°C , en los efluentes se detectaron, además de los iones Na^{+} y Cl^{-} que contenía inicialmente la presencia de Ca^{2+} , Mg^{2+} y SO_4^{2-} principalmente, así como un intercambio iónico notable hacia el líquido que estaba en la superficie de la arcilla. Se estudian otras posibiles aplicaciones de las arcillas como impermeabilizantes.

Se llega a la conclusión de que las arcillas presentan grandes ventajas frente a otros recubrimientos, tanto económicas como técnicas.

lino, de manera que su densidad aumenta con la profundidad, permitiendo que se forme un gradiente térmico, alcanzando su temperatura más baja en las cercanías de la superficie y que es solo ligeramente mayor a la temperatura ambiental.

La tercera zona es una capa de algunos centímetros de espesor con una baja o prácticamente nula concentración de sales en donde se dan los fenómenos tanto de convección como de evaporación (ref. 1), la que permite mantener el gradiente salino.

La parte con mayor contenido energético es la capa más profunda, la cual puede llegar a alcanzar temperaturas de hasta 100°C. De esta zona es de donde, por diversos sistemas, se puede extraer energía térmica utilizable para generación de energía eléctrica, para desalar agua, calentar fluidos para calefacción, secado de alimentos y otros, sistemas de refrigeración y cocinado de alimentos entre otros.

Una de las ventajas principales de los estanques solares sobre otros sistemas de captación de energía solar es que, independientemente de la intermitencia de la radiación los estanques solares nos pueden entregar una carga térmica prácticamente continua ya que es un almacén intrínseco de energía. (ref. 1).

Uno de los problemas principales que presenta la construcción de un estanque solar, es la impermeabilización del fondo del mismo de manera que se eliminen o controlen las pérdidas de salmuera, tanto para evitar reponerlas como para no contaminar mantos acuíferos. Una de las soluciones que se proponen para este problema es la impermeabilización por medio de arcillas compactadas y saturadas.

El objetivo de este trabajo es realizar un estudio sobre las propiedades térmicas de las arcillas compactadas en forma experimental, para que se puedan cuantificar las pérdidas térmicas que tiene un estanque solar hacia el subsuelo.

Este objetivo se justifica ya que es de suma importancia conocer el comportamiento térmico del estanque en forma global, y actualmente solo se cuenta con información completa para evaluar las pérdidas térmicas del estanque hacia la parte superior (ref. 2) y para la parte inferior en el caso de que se utilicen plásticos como impermeabilizantes, que es el procedimiento más utilizado en estanques pequeños, pero no el más económico ni necesariamente el más efectivo.

Para impermeabilizar los estanques solares, existe una gran variedad de materiales y técnicas disponibles (capítulo III) de entre los cuales, como ya se dijo, uno de los más utilizados son los plásticos (ref. 3 y 4). El rompimiento de algu-

nos de estos forros ha ocurrido a lo largo de su uso (ref. 3 y 5) en estanques solares, esto junto con el hecho de que su costo es elevado y complicada su instalación, hace que resulte importante estudiar otras alternativas de impermeabilizantes para este tipo de sistemas principalmente si son de gran área.

El uso de arcillas parece una alternativa viable para impermeabilizar estanques solares de grandes extensiones a mucho menor costo. En estudios de costos realizados por diferentes grupos (ref. 6) se estima que los precios por m^2 están entre 31 y 87 dólares incluyendo el estanque solar, intercambiadores de calor y bombas. Al no usar recubrimientos sintéticos como impermeabilizantes se estima un ahorro de 5 a 10 dólares por m^2 según la referencia 7 y según otros estudios (ref. 4 y 8) este se estima que podría ser hasta de 20 dólares por m^2 .

Por otro lado, el comportamiento mecánico de las arcillas nos hace suponer que en un estanque solar estas superarían muchos de los problemas que presentan los demás sistemas (ref. 9) ya que las arcillas presentan plasticidad, baja permeabilidad y en su aplicación forman una capa continua sin necesidad de uniones o juntas. (capítulos III y IV).

Existe información de las propiedades térmicas de las arcillas para diversas aplicaciones, tales como su comportamiento a bajas temperaturas y a congelación, materiales de construcción, suelos secos y saturados, etc. (ref. 10 a 14), pero no se cuenta con dicha información para arcillas trabajando como impermeabilizantes en sistemas con temperaturas de hasta 100°C y con salinidad elevada y constante, que es el régimen que impera normalmente en el fondo de un estanque solar, y se espera que existan modificaciones sustanciales en dichas propiedades causadas por las condiciones mencionadas.

Para alcanzar el objetivo planteado, se propone como parte central de la experimentación, la construcción de un prototipo de estanque solar, como se describe en el capítulo V, que nos permitirá estudiar el comportamiento del suelo arcilloso, bajo condiciones controladas pero semejantes a las que existirían en el campo. De este prototipo se obtendrá además de la información sobre las propiedades térmicas, datos sobre las pérdidas de salmuera y también sobre la estabilidad de la arcilla; mismos que son de gran utilidad en el estudio de este tipo de sistemas.

Además, se utilizarán algunas técnicas para la determinación exclusiva de propiedades térmicas de sólidos. Esto nos servirá para comparar los datos obtenidos por diferentes métodos y también para decidir cual método es el más adecuado pa

ra trabajar con arcillas saturadas y compactadas en futuras determinaciones similares.

Entre los métodos que se implementarán, estará el de obtener la conductividad térmica a partir de la definición de difusividad térmica (ref. 15), determinando en forma experimental la difusividad térmica, la capacidad calorífica y densidad de la arcilla a diferentes temperaturas y contenidos salinos. También determinaremos la conductividad térmica obteniendo experimentalmente todos los parámetros implicados en la expresión de la ley de Fourier (ref. 16).

Se tomarán también en cuenta los datos disponibles en la literatura sobre las propiedades térmicas, correlaciones, gráficas, etc. para tener un conocimiento más amplio sobre las propiedades de las arcillas (ref. 10 a 19).

Una de las experiencias similares o relacionadas al sistema que deseamos analizar, que se encuentra en México, es la impermeabilización con arcillas compactadas de un estanque artificial de enfriamiento (3 km^2) de la planta termoeléctrica de Río Escondido, Coahuila (ref. 9). El revestimiento de arcilla ha funcionado bien durante más de 5 años, presentando filtraciones bajas (del orden de 80 l/s , lo que corresponde a permeabilidades del orden de 10^{-7} cm/s). Sin embargo, sería necesario evaluar las pérdidas térmicas hacia el subsuelo para poder considerar a este material como adecuado para

un buen funcionamiento de un estanque solar, donde se requiere que las pérdidas térmicas sean relativamente bajas.

Otro caso de interés es el de la impermeabilización con arcillas de la laguna de concentración y vasos de cristalización del campo geotérmico de Cerro Prieto, B.C.N. (ref. 9), donde se trabaja con salmueras de KCl y se reporta un buen funcionamiento de la arcilla en cuanto a su permeabilidad y resistencia a la presencia de sales, pero no hay información acerca de las propiedades térmicas de la arcilla, ya que en su caso no tienen gran importancia las pérdidas térmicas debido a que el suelo esta caliente por la actividad geotérmica de la región.

Como un complemento útil para comprender mejor el funcionamiento de nuestro sistema, se estudiará el efecto químico de la salmuera al pasar esta por la arcilla (capítulo VII).

Por un lado se analizarán químicamente los efluentes captados del prototipo de estanque solar y por otro se investigará en la literatura los fenómenos que pudieran tenerse en el interior de la arcilla.

Esto último, aunado a los demás aspectos tratados, nos darán ideas para otros posibles alcances y aplicaciones que pudieran tener las investigaciones realizadas (capítulo VIII).

Algunas de estas son: control de contaminantes en tiraderos de basura, en depósitos de desperdicios industriales sólidos y líquidos, almacenes de diferentes líquidos, etc., al usar arcillas como impermeabilizantes.

2. ESTANQUES SOLARES

Generalidades.

Durante la última década se ha impulsado fuertemente el desarrollo de nuevas fuentes de energía, entre las que destaca el uso de energía solar para generar electricidad, energía mecánica, desalación, secado, conservación de alimentos, refrigeración solar, etc.

Tres de las principales tecnologías térmicas desarrolladas hasta ahora no solo para generar potencia, sino para otras aplicaciones, son la torre central, el sistema de captadores de enfoque distribuidos y el sistema conocido como OTEC (Conversión de energía, usando el gradiente térmico de los océanos). En el sistema de captadores de enfoque distribuidos,

uno de los problemas fundamentales es como entregar la energía captada sobre un gran área hacia una región central de empleo de la energía disponible, evitando lo más posible la instalación de grandes longitudes de tubería.

Dentro del concepto de captadores distribuidos y de torre central existe un gran número de espejos instalados sobre una gran área de terreno, que trabajan únicamente con el componente directo de la radiación solar. La energía proveniente de cada espejo se convierte en térmica, pero necesita ser transportada con muy pocas pérdidas a distancias de 1 km. o mayores; por otra parte, un gran número de estas centrales solares deben integrarse posteriormente a un solo sistema de potencia a fin de utilizarla en forma comercial.

En estos dos sistemas, es necesario contar con un almacén o una fuente adicional de energía para períodos de días nublados, principalmente, si estos períodos se llegan a prolongar durante muchos días.

Por lo que respecta al tercer sistema OTEC, el cual utiliza la diferencia de temperaturas entre las aguas superficiales de los océanos y las capas más profundas, es un tema de investigación actual, en diferentes países desarrollados.

Al respecto, el colector de energía solar es el océano, pero esto no necesariamente implica que sea una fuente de energía

barata y disponible. El problema básico radica en que la diferencia de temperatura entre las capas superficiales y las profundas es de solo unos cuantos grados. (ref. 1).

Lo que se ha aprendido en las plantas OTEC es que la manera racional de usar una gran área de captación es la utilización de una masa de agua. Pero también se ha visto que las grandes masas de agua, como pueden ser, lagos, estanques artificiales u océanos, pueden producir, como ya se mencionó en el párrafo anterior, solo una pequeña diferencia de temperatura que, es inadecuada para conversión de potencia; por tanto, es deseable buscar un sistema que puede producir mayores diferencias de temperatura, y un sistema que cumple con este requerimiento, es el estanque solar no convectivo. (ref. 20 a 24).

En el océano, la radiación solar se absorbe por las capas superiores de agua, quedando más frías las más profundas. Como se indicó, una ΔT grande no es posible; sin embargo, si consideramos un estanque poco profundo (1 ó 2 m de profundidad) con un fondo negro, entonces al penetrar la radiación solar, parte de esta será absorbida en el fondo y su temperatura aumentará. Por el efecto de flotación, el agua más caliente se elevará a la superficie donde el calor será rápidamente disipado hacia la atmósfera; no obstante, si el agua del fondo por algún mecanismo pudiera hacerse más pesada que la superficial, entonces permanecería en el fondo y retendría su calor absorbido.

Dicho efecto se ha podido observar en forma natural en algunos lugares de la tierra, y lo que se halló, fué que el agua contenía sal disuelta en una concentración que aumentaba con la profundidad. Este gradiente salino, tiene el efecto de impedir la convección natural, de tal manera que el agua caliente permanecerá en el fondo del lago. Al respecto, donde por primera vez se pudo observar éste fenómeno es el Lago *Medve* (ref. 24) localizado en Transilvania inclusive con referencias acerca de él en la literatura desde 1902, dando temperaturas hasta de 80°C a una profundidad de 1.32 m. Otro lago con este mismo fenómeno se encuentra en *Israel* cerca de *Elat*, con temperaturas hasta de 60°C en el verano (ref. 21).

FUNCIONAMIENTO

El funcionamiento de un estanque solar es en forma general el siguiente:

Un estanque solar es un cuerpo de agua sumergido en la tierra, dividido en tres regiones; su profundidad varía en el intervalo de 1.5 a 3 m. La región más profunda es del orden de 1 m de espesor y es una zona convectiva compuesta por una solución saturada, sirviendo además como almacén térmico. En la parte intermedia se localiza una región no convectiva que funciona como aislante térmico, con un gradiente salino

de manera que su densidad aumenta con la profundidad; debido a este gradiente salino, se forma uno térmico, y la temperatura aumenta con la profundidad; esta capa no convectiva pue de variar de 1 a 1.5 m de espesor, alcanzándose temperaturas cercanas a la ambiental de la región próxima a la superficie del lago.

La última región, de algunos centímetros de espesor, está formada por agua salada con muy baja concentración o agua pura; en esta capa existe convección y evaporación. Dicha zona es usada para mantener el gradiente salino de la región no convectiva, ya que existe difusión de sales de abajo hacia arriba; además tiene que restituirse continuamente debido a la evaporación, y a que es necesario eliminar las sales que se difunden hacia esta región para conservar el gradiente salino.

En los estanques solares se puede usar sal o salmuera natural. La sal seleccionada debe ser confiable a fin de manejarla y que no contamine el ambiente; los problemas relacionados con su disposición, asociados con toxicidad y contaminación de acuíferos subterráneos, se deben evaluar cuidadosamente.

La sal debe ser barata, estar disponible en las cercanías y no reducir la transmitancia óptica del agua; su solubilidad debe ser fuertemente dependiente de la temperatura y su difu

sividad lo más baja posible; por ejemplo, un estanque solar ideal podría ser un lago funcionando con una solución saturada, un gradiente estable y sin difusión. Los cloruros de sodio y magnesio satisfacen las primeras condiciones. En la figura 1 se observa la dependencia de la solubilidad con la temperatura para diferentes sales, notándose que el KNO_3 y NH_4NO_3 cumplen con el último criterio para un lago saturado, aunque son más costosas que el NaCl o MgCl_2 .

En los primeros experimentos realizados en estanques solares artificiales, se encontró que temperaturas del orden de los 100°C eran factibles en el fondo del estanque; por tanto fue posible calentar fluidos de trabajo a temperaturas de 85 a 90°C con la salmuera del estanque. Si se aplicaran en realidad los conceptos de eficiencia, se vería que si la temperatura en la superficie del estanque es de 30°C y se le considera como el sumidero del calor residual de la máquina térmica, entonces el estanque solar puede suministrar una ΔT de 55 a 60°C .

La absorción en las longitudes de onda más grandes es importante al tomar en cuenta que 27% de la radiación en el espectro solar total es absorbida en el primer centímetro de agua.

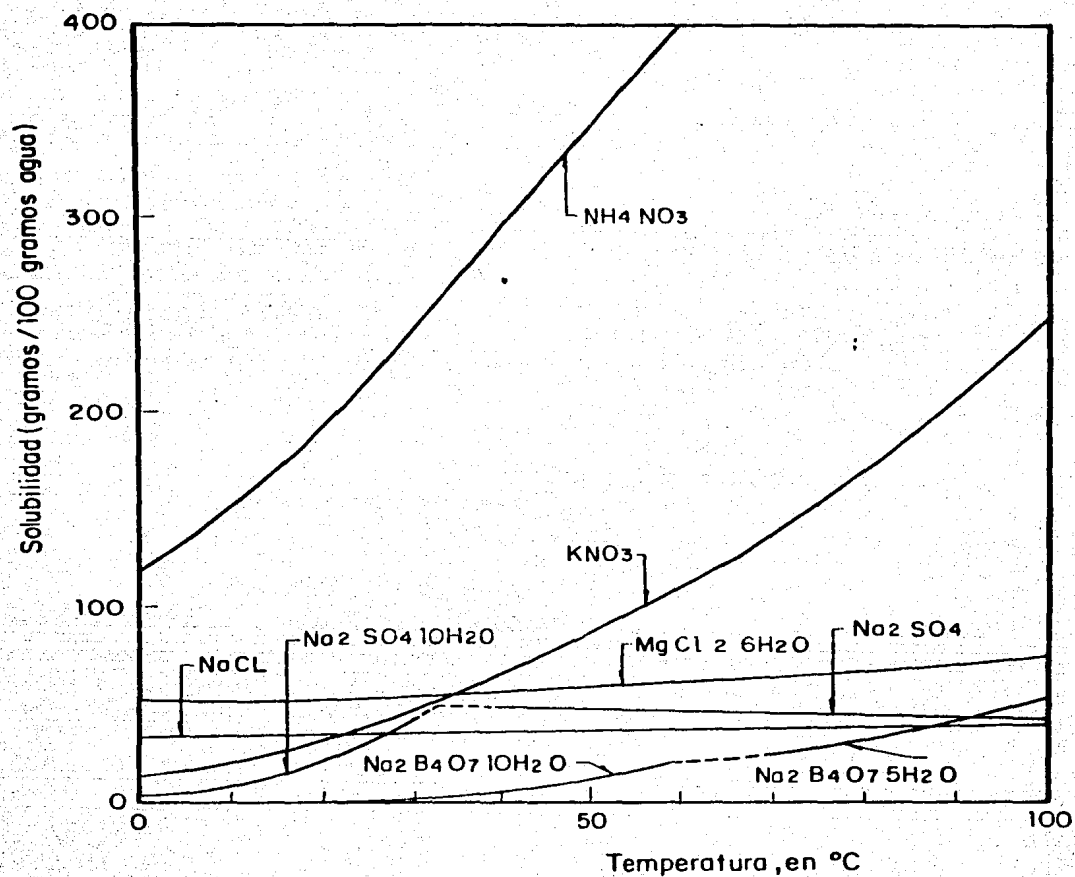


Fig 1 Solubilidad como función de la temperatura

La eficiencia de aprovechamiento, en consecuencia, está limitada a la absorción en la capa con gradientes. Puede demostrarse que la fracción de luz que resta después de atravesar una distancia x de agua clara es

$$f(x) = a - b \ln x, \text{ válida para } x \text{ entre } 1 \text{ y } 1\,000 \text{ cm.}$$

donde $a = 0.73$ y $b = 0.08$. La profundidad x es expresada en centímetros (ref. 25).

Al comparar las plantas OTEC con los lagos solares, se puede decir, que la eficiencia con respecto al segundo sistema es cuatro veces mayor que la del primero. Un aspecto importante que debe tomarse en cuenta es que los intercambiadores de calor, que representan el mayor costo en una planta OTEC, se reducen a menos de un cuarto de tamaño al usar lagos solares.

Actualmente se realizan investigaciones y aplicaciones de lagos solares en Estados Unidos de Norteamérica, URSS, Israel, Australia, India, Suiza y Brasil, entre otras naciones.

La utilización de los estanques solares proporciona cinco ventajas sobre otros tipos de colectores solares:

1. La intermitencia en la radiación solar demanda una forma de almacén térmico. En un estanque solar este problema no existe, ya que su misma masa de agua sirve como alma-

cen intrínseco, por lo que puede entregar una carga térmica tanto a lo largo del día como en la noche, siendo el único sistema que no requiere de almacén adicional.

Actualmente se están realizando estudios para construir lagos solares con profundidades de más de 2 m y de esta forma poder tener un almacén térmico con capacidad para funcionar tanto en verano, como en invierno sin reducir prácticamente la carga térmica a lo largo del año.

2. Debido a la baja densidad de energía de la radiación solar, la utilización de esta es posible únicamente con áreas de captación muy grandes; siendo el estanque solar en sí una gran área de captación.
3. La acumulación de basura y polvo en los vidrios o espejos de los colectores ordinarios, conduce a un mantenimiento constante; en el estanque solar no existe este problema.
4. El transporte de energía desde una gran área de captación hacia una zona central de utilización, es relativamente fácil si se usa el método de decantación. Es conocido que cuando existe un gradiente de densidad sobre un fluido, entonces es posible mover una capa horizontalmente sin causar perturbaciones en capas superiores o infe-

riores; de esta forma es factible decantar la zona caliente del lago y transportar este calor al exterior o utilizar intercambiadores de calor en el fondo del lago.

5. El lago solar es simple en concepto y relativamente fácil de construir. Básicamente se necesitan técnicas conocidas en ingeniería civil, las que se necesitan experimentar y adaptar para trabajar a las condiciones del estanque solar (temperaturas hasta de 110°C y salinidad constante). Para impermeabilizar el lago existen materiales que estan siendo probados, tales como plásticos, arcillas (motivo de este trabajo), concreto asfáltico, etc., su uso depende del tipo de suelo y de su accesibilidad, como se vera en el capítulo posterior.

Algunos de las restricciones del Estanque Solar son:

1. La selección del lugar, ya que no es posible construirlos en cualquier sitio. Es recomendable instalarlos en lugares con latitudes menores de 40° , ya que entre mayor sea la radiación solar incidente, mejor será la eficiencia del estanque.
2. Se debe contar con una fuente de sal, salmuera o salina cercana.

3. El terreno debe ser lo más plano posible o con un perfil adecuado para reducir al mínimo las excavaciones.
4. Se requiere contar con agua disponible para suministrar sobre la superficie y así recuperar la que se pierde por evaporación.

Algunas de las posibles aplicaciones de los estanques solares son:

1. Desalación del agua. De diversos estudios realizados por organizaciones internacionales se puede concluir que se necesitan plantas desaladoras con capacidades de producción del orden de $8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{día}$. El estanque solar en combinación con sistemas tradicionales de evaporación instantánea pueden producir grandes cantidades de agua potable.

En las plantas de destilación el requerimiento de combustible representa el mayor costo, aproximadamente el 58%, en la producción de agua.

Así en las figuras de la 2 a la 4, se muestran diferentes posibilidades de utilizar un lago solar con plantas destiladoras, siendo las dos primeras factibles si se encuentran materiales que resistan salinidades de 20% o mayores.

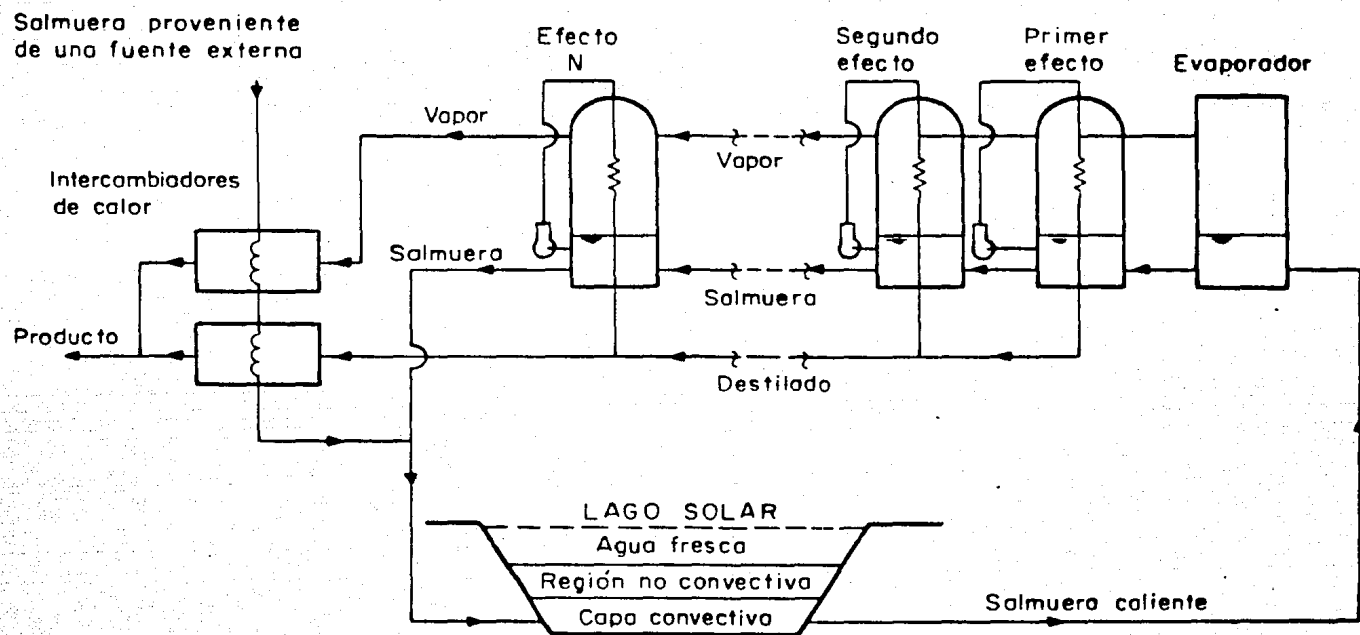


Fig 2 Lago solar asociado a una planta destiladora MED

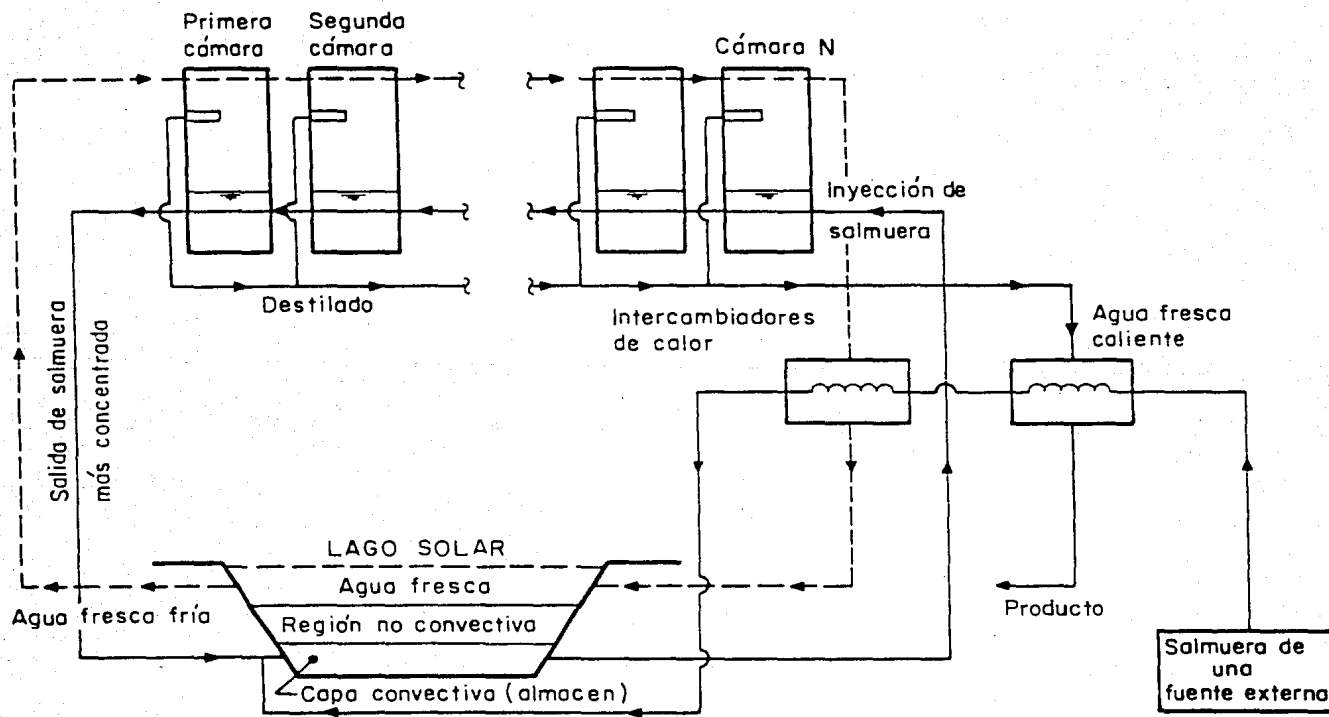


Fig 3 Lago solar asociado a una planta destiladora MSF

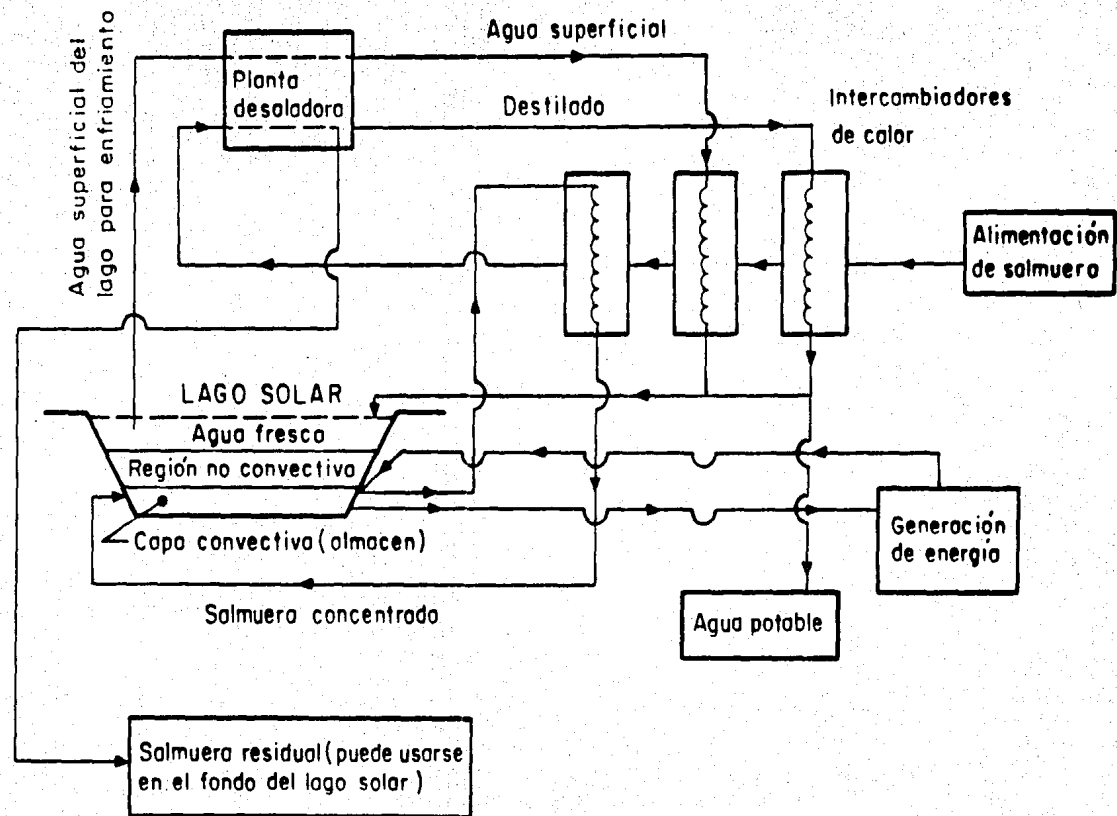


Fig 4 Planta destiladora con calentamiento de la salmuera externa en un intercambiador de calor

La figura 4 presenta un método aplicable al tipo de plantas existentes en México.

También es factible destilar agua para la agricultura y la industria. La OMS especifica un máximo de salinidad de 500 mg/l en agua para uso doméstico. Para uso industrial y agrícola, la salinidad no debe exceder de 1 500 mg/l, y estos requisitos son fácilmente cumplidos en las plantas de destilación (ref. 1).

2. Producción de Sal. La energía solar se ha utilizado durante muchos siglos en la obtención de sal común a partir de agua de mar, salmueras o salinas a través del uso de pozas de evaporación. Siendo por esta razón una de las aplicaciones más atractivas de los estanques solares, la que podría obtenerse en combinación con un evaporador-cristalizador con mejor calidad que la alcanzada en pozas de evaporación convencionales o que la extraída de minas.

Las principales ventajas de utilizar un lago solar son:

- a) La producción de sal por km^2 , sería el doble en lagos solares que las que se obtienen en pozas de evaporación tradicional.
- b) El tiempo de extracción puede considerarse mayor que en

el método tradicional, esperándose que sea de 300 días por año o más, dependiendo de las condiciones climatológicas (ref. 1).

3. Calentamiento de aire. Se puede efectuar con los estanques solares a bajas temperaturas, siendo las principales aplicaciones la calefacción de habitaciones, secado de alimentos, invernaderos, etc.
4. Calefacción de edificios. Ya que para hacerlos confortables se requieren temperaturas relativamente bajas, por lo que sería una aplicación más de los lagos solares. Los dos fluidos más comunes para transferir calor son agua y aire, los cuales pueden emplearse en intercambiadores de calor dentro o fuera del lago solar. Además de que un lago siempre es atractivo desde un punto de vista arquitectónico.
5. Secado solar. Uno de los usos más antiguos de la energía solar ha sido el secado y preservación de excedentes agrícolas. En la mayoría de las comunidades rurales, los campesinos han conservado sus semillas y granos deshidratándolos al sol, haciendo esto más rápido y sencillo si se cuenta con un estanque solar, y estos están siendo desarrolladas actualmente para deshidratar grandes

des cantidades de alimentos.

6. Enfriamiento de edificios. Si se diseña un lago solar que trabaje especialmente para verano, este puede manter una temperatura, seleccionada previamente, para operar los sistemas de refrigeración con poca fluctuación.
7. Cocinado de alimentos. Ya que uno de los principales problemas en diversas regiones del país es conseguir leña u otro combustible para el procesamiento de alimentos, la utilización de los lagos solares podría solucionar en cierta forma el problema, ya que se tendría disponible durante 24 hrs un almacén térmico. Pudiéndose meter las ollas con alimento y selladas a la parte inferior convectiva del estanque, dejándolas el tiempo que requieraran.
8. Generación de electricidad. Esta tecnología es accesible técnicamente y hasta la fecha ha funcionado conforme lo predicho, razón por la que ha sido un punto de enfoque de la comunidad científica internacional. La producción de energía de un lago solar es impresionante, ya que si se considera un lago de 1 km^2 en un lugar soleado, como puede ser México, para una insolación anual de 1 905 kwh térmicos por m^2 (promedio de 450 langley/día) con una eficiencia del lago del 20%, la producción sería de 381 millones de kWhr por año.

3. IMPERMEABILIZACION DE LAGUNAS ARTIFICIALES

Consideraciones generales

Los productos y revestimientos para la impermeabilización de lagunas artificiales se pueden clasificar en tres grandes grupos (ref. 9).

- a) Selladores naturales y tratamientos químicos
- b) Revestimientos rígidos
- c) Revestimientos flexibles

Dentro de cada categoría existe a su vez una gran cantidad de variantes. Otra clasificación se hace de acuerdo a su continuidad o también dependiendo del grado de impermeabilización (Tabla 1).

TABLA 1 PRODUCTOS Y TECNICAS DE IMPERMEABILIZACION

(REF.26)

SELLADORES	REVESTIMIENTOS RIGIDOS	REVESTIMIENTOS FLEXIBLES
Arcillas bentoníticas Tratamientos químicos del suelo Aditivos al agua	Concreto hidráulico Suelo-cemento Concreto asfáltico Concreto lanzado	Membranas sintéticas (plásticos y elastómeros) Membranas asfálticas Paneles asfálticos Suelos compactados
DISCONTINUOS	CONTINUOS	
Membranas sintéticas Membranas asfálticas Paneles asfálticos	Suelos compactados Concreto lanzado Concreto hidráulico Concreto asfáltico Suelo-cemento Arcillas bentoníticas Tratamientos químicos del suelo. Aditivos al agua	
IMPERMEABLES	SEMIPERMEABLES	
Membranas sintéticas Paneles asfálticos	Suelos compactados Concreto lanzado Concreto hidráulico Concreto asfáltico Membranas asfálticas Suelo-cemento Arcillas bentoníticas Tratamientos químicos del suelo Aditivos al agua	

Es común que las lagunas requieran un revestimiento para controlar las pérdidas por filtración que, además de resultar costosas, pueden contaminar el área circundante o hacer fallar la instalación y poner en peligro construcciones cercanas o vidas humanas.

Ciertos tipos de revestimiento reducen además la erosión de los bordos debida a la acción del oleaje o de la lluvia, y sirven de protección contra la socavación de zapatas y cimentaciones de los elementos estructurales que se encuentran dentro del almacenamiento.

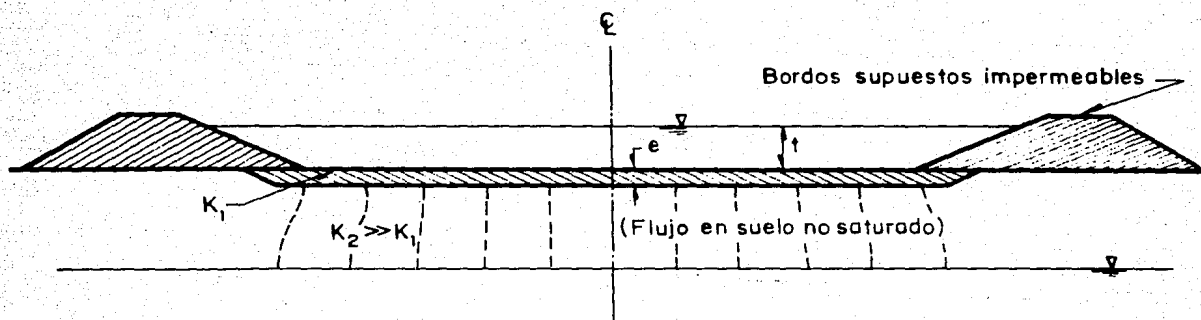
Para analizar las posibilidades de éxito de un sistema de impermeabilización, es necesario considerar que el revestimiento y el medio en que se instala, trabajan en conjunto; el mismo criterio debe seguirse para el caso del estudio de fallas, ya que en la mayoría de los casos la falla del revestimiento es el resultado de una acción y no su causa. El punto más importante es que el revestimiento se coloque sobre una base estable aún en estado saturado y que no sea afectado directamente por el líquido que contiene. Cualquiera que sea el tipo de revestimiento considerado, la participación de un especialista en mecánica de suelos es por lo tanto indispensable.

La presencia de un revestimiento con baja permeabilidad en el fondo de una laguna conduce a un mecanismo de filtración como

el indicado en la fig. 5. Es usual considerar que el flujo a través del revestimiento está regido por la ley de Darcy. El gradiente de carga hidráulica actuante en el revestimiento se considera aproximadamente igual al tirante dividido entre el espesor del mismo. Debe subrayarse que esta consideración es discutible puesto que abajo del revestimiento puede presentarse una zona de flujo no saturado en la que el fenómeno se vuelve más complejo debido en particular a la existencia de fuerzas de succión. La experiencia muestra, sin embargo, que para fines prácticos y por lo menos para revestimientos de suelos compactados, el flujo es de hecho aproximadamente proporcional al tirante, como lo prevee la ley de Darcy. En el caso de existir taponamiento del revestimiento por las razones que se enunciarán más adelante, el coeficiente de permeabilidad irá disminuyendo desde el inicio de la operación hasta alcanzar uno constante en el momento en que se alcance el estado estacionario.

En el caso de revestimientos sintéticos, el flujo se presenta casi exclusivamente por defectos de fabricación o instalación y no es aceptable recurrir a la ley de Darcy para estimar las filtraciones "*a priori*".

Salvo quizá en el caso de que se manejen sustancias altamente contaminantes en el que el costo de la impermeabilización es un factor secundario, la impermeabilización de una laguna



Gasto de infiltración (m^3/s) $Q = k_1 A \frac{t+e}{t}$ (Darcy)

k_1 : Coeficiente de permeabilidad vertical del revestimiento, m/s

A : Área del fondo del almacenamiento, m^2

e : Espesor del revestimiento, m

t : Tirante, m

Fig 5 Estanque con revestimiento impermeable

con un cierto material debe justificarse mediante un análisis económico. El costo de la impermeabilización deberá compararse con los ahorros que esta permitirá realizar a lo largo de la vida útil de la obra para cada caso.

El estudio económico deberá tomar en cuenta los gastos de mantenimiento y operación adicionales que requiera el instalar un cierto tipo de sistema de impermeabilización así como los equipos y depósitos auxiliares.

Será de gran importancia conocer la naturaleza del suelo que existe en el lugar donde se desea situar la laguna y la disponibilidad de materiales naturales en las cercanías del lugar.

Mecanismos de sellado natural y tratamientos químicos.

Se ha observado que el sellado natural de una laguna puede ocurrir por alguno de los mecanismos siguientes:

- a) Taponamiento físico de los vacíos del suelo por sólidos sedimentados;
- b) taponeamiento químico de los vacíos del suelo por intercambio iónico; y

- c) taponeamiento biológico y orgánico por crecimiento microbiano en el fondo del estanque.

Varios productos químicos que se mezclan con el suelo han sido usados con grados de éxito muy variables para sellar lagunas. Los cationes monovalentes (iones de sodio, potasio y amonio) disminuyen químicamente la porosidad del suelo al reemplazar los cationes polivalentes cálcicos. Se ha encontrado que la impermeabilización química puede ser efectiva en suelos con un mínimo de 8% de arcilla y de 10% de limo. Las sales que se usan con más frecuencia para el sellado químico son los polifosfatos de sodio (pirofosfato tetrasódico o tripolifosfato sódico), el carbonato de sodio y el cloruro de sodio (ref. 27). Debido a la compleja y variable composición química de los suelos, los tratamientos de esta naturaleza solamente deben aplicarse después de un estudio de laboratorio que demuestre su efectividad. Se trata en realidad de una técnica incipiente.

Una segunda categoría de productos químicos está constituida por los aditivos que se agregan al agua para reducir las filtraciones. Algunos de estos productos a base de polímeros, aumentan la atracción iónica de las partículas del suelo hacia el agua, con lo que se incrementa el diámetro efectivo de las mismas y se reducen las dimensiones de los poros. Otros son emulsiones de cera que forman una membrana delgada en el

fondo. Estos productos permiten reducir, pero no eliminar las filtraciones. Sus principales atractivos son su bajo costo y la posibilidad que ofrecen al corregir en cierta medida los problemas de filtración, sin tener que vaciar la laguna.

Las arcillas altamente expansivas tales como la bentonita pueden reducir efectivamente la permeabilidad del suelo natural al humedecerse. Para revestir lagunas artificiales, es posible dejar decantar una suspensión de bentonita en agua o mezclar la bentonita en seco con el suelo natural o con arena previamente al llenado. Las capas de bentonita enterradas pueden tener una mayor durabilidad (ref. 9).

Revestimientos rígidos

Los revestimientos rígidos más comunes se hacen a base de concreto hidráulico, suelo-cemento y concreto asfáltico.

Revestimientos de concreto hidráulico y concreto lanzado.- La experiencia con revestimiento de concreto hidráulico es contradictoria. Algunos revestimientos han dado buenos resultados mientras que otros han presentado problemas graves de filtraciones. Los puntos críticos de esta técnica parecen ser los siguientes:

- a) Necesidad de un sustrato de apoyo firme;
- b) composición del concreto que minimice el agrietamiento por contracción;
- c) juntas de contracción suficientemente numerosas (cada 6 a 9 m);
- d) selladores de buena calidad en las juntas de contracción;
- e) llenado lento de la laguna para permitir cierta deformación progresiva del revestimiento.

Los revestimientos de concreto deben clasificarse como semi-permeables.

El concreto lanzado tiene la ventaja de poder aplicarse a su superficies irregulares sin cimbra pero presenta los mismos problemas que el concreto hidráulico tradicional. Además, es sensible a asentamientos diferenciales y las grietas que se forman son difíciles de reparar. Por otra parte, el concreto lanzado es inestable si se presentan presiones hidrostáticas atrás del mismo. Los espesores de concreto varían usualmente entre 2.5 y 10 cm. En pendientes mayores es necesario reforzar el concreto lanzado con una malla tipo gallinero o electrosoldada.

Revestimientos de suelo-cemento.- Por suelo-cemento se entiende una mezcla de suelo arenoso con cemento. Esta mezcla es atractiva por su bajo costo respecto al concreto, si

existe arena en el sitio de construcción. Aunque este tipo de revestimiento haya sido utilizado en ciertas lagunas, no puede clasificarse realmente como impermeable, ya que el sue
lo-cemento presenta siempre grietas de contracción que sola
mente pueden reducirse, pero no eliminarse, mediante un con
trol estricto de compactación, contenido de agua y tiempo
de curado.

Revestimientos de concreto asfáltico.- El asfalto es un com
puesto que se encuentra en distintas proporciones en la mayo
rfa de los petróleos crudos. Es un material cementante en
tre negro y café oscuro que se vuelve líquido al calentarse.
Su densidad es algo más ligera que la del agua. A la tempe
ratura ambiente, el asfalto puede variar de un estado sólido
a semisólido. La mezcla de asfalto con agregados pétreos
se conoce como concreto asfáltico (ref. 28).

Los revestimientos de concreto asfáltico mezclados en ca
liente se han usado con frecuencia como revestimientos en
espesores del orden de 5 cm. Se emplea un concreto asfál
tico análogo al usado para carpetas en carreteras. Sin em
bargo, su contenido de asfalto es mayor (6.5 a 9.5%) y el
porcentaje de relleno mineral más alto; además, se usa un
asfalto de baja penetración (4 a 7 mm). Se obtiene en esta
forma una mezcla de porosidad baja y prácticamente impermea
ble después de compactarse. Sin embargo, es difícil repro-

ducir en el campo el tipo óptimo de mezcla que se haya definido en el laboratorio.

Otros problemas que pueden presentarse son los siguientes:

- a) Agrietamiento por deformación del substrato de apoyo;
- b) deslizamiento sobre los taludes, especialmente durante las épocas de calor. Es difícil lograr simultáneamente la impermeabilidad y la resistencia requerida para evitar el deslizamiento;
- c) agrietamiento por efecto de agentes climáticos en las zonas expuestas;
- d) ataque por ciertos líquidos y en particular los aceites.

Lo anterior hace que generalmente el concreto asfáltico no se use realmente como revestimiento impermeable sino como protección mecánica de otro revestimiento (generalmente a base de arcillas).

Revestimientos flexibles.

Los revestimientos flexibles más comunes son los siguientes:

- Membranas sintéticas
- Membranas asfálticas
- Elementos prefabricados a base de asfalto
- Revestimientos a base de suelos compactados.

Membranas sintéticas.- El empleo de productos sintéticos para el revestimiento de lagunas artificiales se remonta a los años sesenta. Existen muchos tipos diferentes de membranas sintéticas, sin embargo, pueden clasificarse en dos grandes grupos: las fabricadas a base de plásticos y las hechas con elastómeros.

Las membranas plásticas y las elastoméricas son las más populares cuando se busca obtener una permeabilidad prácticamente nula. Se adquieren en grandes hojas que facilitan su instalación. Si (pero solamente si) se seleccionan y se instalan adecuadamente, estas membranas resisten el ataque de la mayoría de los productos químicos y dan lugar a filtraciones muy bajas.

Los productos más utilizados son: Cloruro de polivinilo, (PVC), polietileno (PE), polietileno clorinado (CPE), hule butilo (EPT y EPDM), policloropreno (Neopreno), polietileno clorosulfonatado (Hypalon), poliolefin elastizado (3110), (ref. 9).

Otros materiales que se han usado son el polipropileno, el Nylon y el hule natural.

Membranas asfálticas.- Las membranas flexibles a base de asfalto se forman regando directamente el asfalto caliente o rebajado (disuelto en algún solvente) sobre el terreno natu

ral o sobre una tela o fieltro de refuerzo. La membrana puede protegerse con una capa de suelo. Los resultados obtenidos con esta técnica son muy variables, destacando los aspectos siguientes: Es difícil controlar la temperatura del asfalto o la dosificación del solvente para obtener un material de características homogéneas; las membranas aplicadas directamente sobre el terreno siempre presentan zonas de menor espesor y pequeños orificios que implican fragilidad local y filtraciones; las membranas delgadas no reforzadas se agrietan fácilmente bajo el peso del fluido almacenado; si el suelo de apoyo es inestable volumétricamente, las filtraciones, por mínimas que sean, llevan rápidamente al agrietamiento generalizado de la membrana, si la membrana queda expuesta a los rayos del sol, presenta agrietamiento y tiende a escurrir sobre los taludes.

Todas las limitaciones anteriores pueden superarse ya sea usando una tela de refuerzo, consolidando el terreno, aumentando espesores, dando un mantenimiento frecuente, utilizando aditivos, etc. Sin embargo, se cae entonces en una solución cara que difícilmente compite con otros tipos de revestimiento. Se sabe de una aplicación de esta técnica en México con yute como tela de refuerzo; el costo resultó comparable al de los mejores revestimientos sintéticos (ref. 9).

Elementos prefabricados a base de asfalto.- Las láminas asfaltadas prefabricadas son paneles de 4 a 13 mm de espesor

constituidos por una tela de fibra de vidrio impregnada con asfalto. Las dimensiones de los paneles son relativamente pequeñas para permitir su transporte (0.90 a 1.20 m de ancho y 1.8 a 4.5 m de largo). Lo anterior implica un gran número de juntas que se realizan con traslapes recubiertos con asfalto generalmente colocado en caliente o con mastiques especiales. La experiencia demuestra que se prestan solamente al revestimiento de lagunas pequeñas (ref. 29).

Revestimientos a base de suelos compactados.- Historicamente, el sistema de recubrimiento con el más largo registro de operación exitosa, es el suelo compactado. Además, este resulta ser frecuentemente el más económico. Una capa de suelo nunca es totalmente impermeable pero solamente deja pasar una cantidad controlada de líquido.

Estas filtraciones pueden ser inferiores a las que se presentan con otros sistemas más costosos a consecuencia de defectos de instalación o de fabricación. Una descripción más detallada de este sistema se da en el siguiente capítulo.

4. ARCILLAS COMO IMPERMEABILIZANTES

Para estanques solares el uso de arcillas en forma de suelo compactado, parece ser una de las alternativas más viables ya que este tipo de revestimiento posee las cualidades necesarias de baja permeabilidad, plasticidad y bajo costo, además de que ya existen experiencias de arcillas trabajando como revestimientos en el manejo de líquidos ligeramente calientes (ref. 9).

En mecánica de suelos se considera que un suelo está formado por partículas de arcilla si su tamaño es del orden de 2 μm o menores. Las tres principales clases de arcillas minerales son (ref. 30): kaolinita, montmorilonita e illita, las cuales por lo general contienen aluminio hidratado y silicatos de fierro o magnesio combinados dentro de una estructura cristalina com

plicada.

Las propiedades de un suelo formado por partículas muy finas, como una arcilla, dependen de su contenido de agua. La cual modifica las fuerzas de interacción entre partículas, y, por tanto, influye sobre el comportamiento del material. Un elevado contenido de agua corresponde a una distancia promedio alta entre partículas y a una resistencia baja al esfuerzo cortante. Al disminuir el contenido de agua la resistencia aumenta hasta alcanzar un estado plástico en que el material es fácilmente moldeado; posteriormente, el suelo llega a adquirir las características de un sólido, pudiendo resistir esfuerzos de compresión y tensión.

Para clasificar un suelo en el laboratorio se sigue un sistema ya estandarizado basado en pruebas de límite de consistencia. Para estas pruebas se considera cuál es el efecto sobre la resistencia de un suelo al variar su contenido de humedad. Por ejemplo, en suelos sin consistencia (gravas y arenas) existe poco efecto, pero en suelos con consistencia (limos y arcillas) la variación en humedad puede producir cambios significativos, por ejemplo a una arcilla que se le disminuye su contenido de agua tiende a convertirse más fuerte y menos compresible.

Si se considera un suelo cohesivo con un alto contenido de

agua, por ejemplo, una suspensión con partículas del suelo en agua, entonces este suelo se comportará como un líquido, es decir si un esfuerzo cortante le fuera aplicado habría una deformación continua sin algún indicio de falla, independiente del valor del esfuerzo. Si se empieza a secar este material hasta obtener un suelo que permita una pequeña resistencia al corte y si este esfuerzo se retira, entonces se encuentra que el suelo se ha deformado; se dice entonces que se está comportando como un sólido plástico y no como un líquido. El contenido de humedad en el que el suelo cambia su comportamiento de líquido a sólido plástico se conoce como límite líquido (LL).

Si el suelo continua disminuyendo su humedad entonces presenta una mayor resistencia a mayores esfuerzos cortantes. Finalmente, el suelo ya no presenta deformación plástica y simplemente se fractura, es decir, actúa como un sólido quebradizo y frágil. El límite entre su comportamiento plástico y su falla quebradiza se le conoce como límite plástico (LP).

El índice de plasticidad de un suelo es el intervalo para el contenido de humedad en que un suelo es plástico; entre más fino sea el suelo su índice de plasticidad es mayor. Índice de plasticidad = límite líquido-límite plástico.

$$IP = LL - LP$$

(1)

El grado de saturación de un suelo es una medida de la cantidad de espacios vacíos que se pueden llenar con agua. Si solo el aire está presente en el suelo, entonces éste se considera seco, mientras que si solo el agua está presente el suelo está saturado. Cuando el agua y el aire están presentes el suelo se dice que está parcialmente saturado.

El contenido de humedad o contenido de agua se expresa como su razón a la cantidad de suelo seco

$$W = \frac{\text{peso de agua}}{\text{peso de sólidos}} = \frac{W_w}{W_s} \quad (2)$$

Determinación de los límites líquido y plástico

Para el límite líquido se utiliza el método que usa el aparato de Casagrande (ref. 31), fig 6. Primeramente se seca el suelo y posteriormente es cernido en una malla # 40: el polvo obtenido de este cernido se mezcla con agua destilada hasta obtener una mezcla uniforme. La pequeña charola del aparato se llena con este lodo, después con una cuchilla de 2 mm de ancho se hace un corte a la mitad. La manivela del aparato se rota a 2 revoluciones por segundo, causando que la charola caiga desde una altura de 10 mm. El número de veces requerido para cerrar la hendidura hecha por la cuchilla a una longitud aproximada de 13 mm, se registra y se determina su contenido de humedad. Esta prueba se realiza con diferentes contenidos de agua.

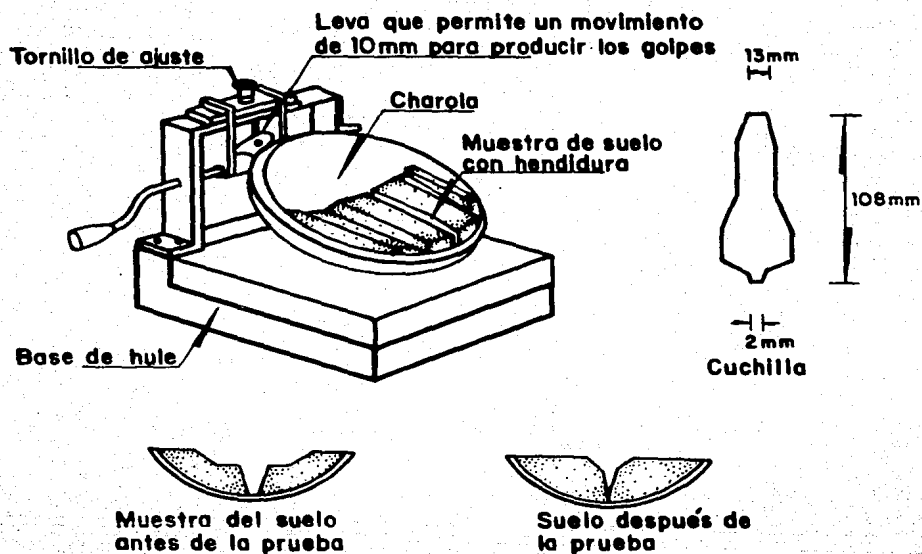


Fig 6 Aparato de Casagrande

Para obtener el límite líquido se grafica el contenido de agua en una escala vertical y el número de golpes se grafica horizontalmente en una escala logarítmica. La humedad contenida correspondiente a 25 golpes se toma como el límite líquido (ref. 31).

Para la determinación del límite plástico se necesitan alrededor de 20 g de suelo. Este se mezcla con agua hasta obtener un sólido plástico que pueda rodarse para deformarlo en una pequeña barra. Se dice que el suelo alcanza su límite plástico cuando empieza a desmoronarse al haber alcanzado la barra un diametro de aprox. 3 mm. En esta etapa se determina su humedad.

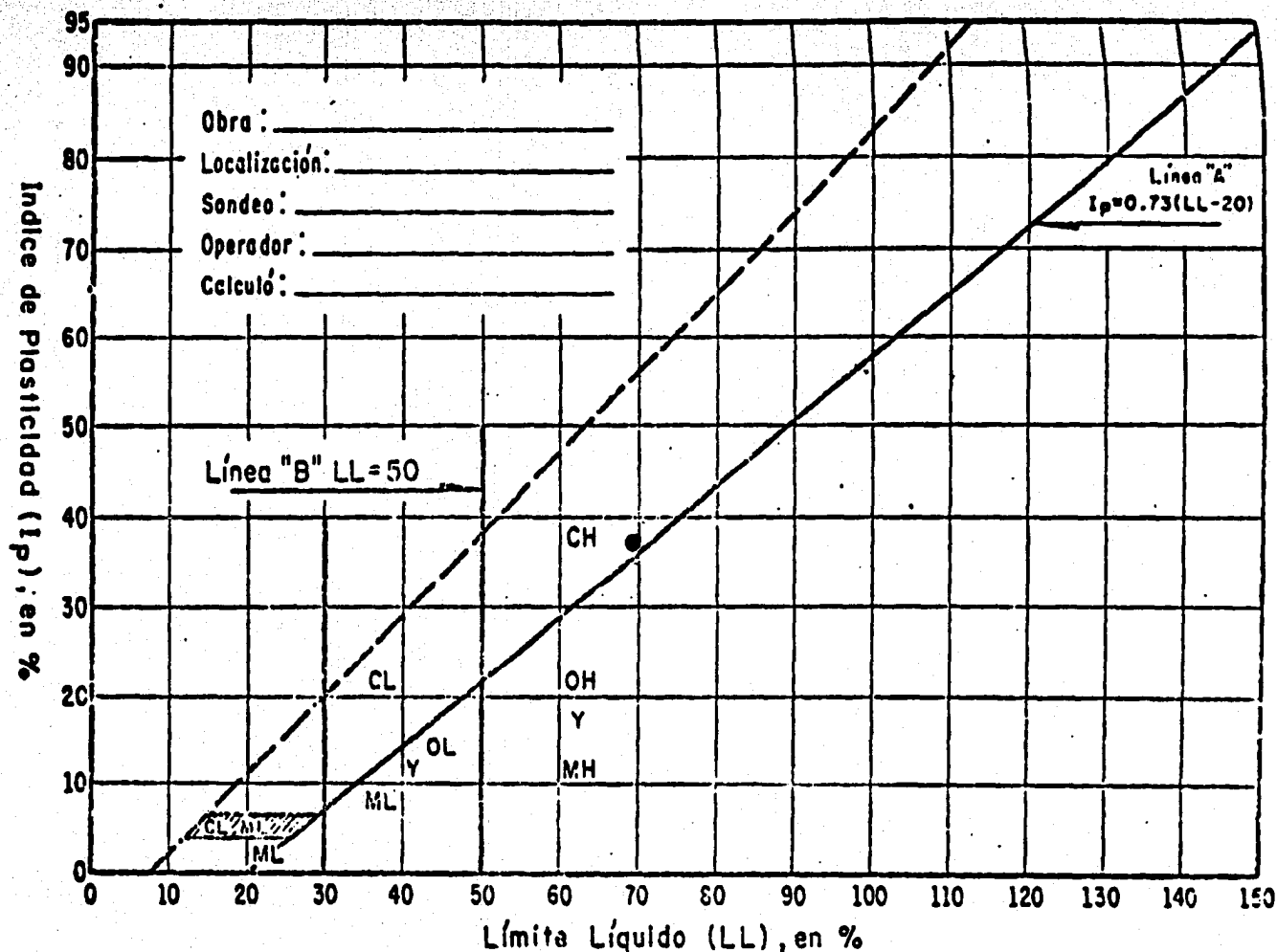
Selección de arcillas.

Para saber el tipo de suelo, una vez realizadas las pruebas arriba mencionadas, se localiza el suelo en la carta de plasticidad mostrada en la fig. 7, donde las coordenadas son LL e IP. La clasificación se lleva a cabo observando la posición del punto relativo a la línea A. La línea A es una frontera empírica que se ha establecido analizando diferentes tipos de suelos.

En investigaciones anteriores realizadas por el Instituto de Ingeniería, se analizaron 3 tipos de suelos del Valle de Mé-

FIG 7 CARTA DE PLASTICIDAD DE SUELOS FINOS

INSTITUTO DE INGENIERIA, UNAM
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS



- ML: Limos inorgánicos y arenas muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillosas ligeramente plásticas
CL: Arcillas inorgánicas de plasticidad baja o media, arcillas arenosas o limosas
OL: Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad
MH: Limos inorgánicos, limos elásticos, suelos micáceos o diatomáceos, arenosos finos o limosos
CH: Arcillas inorgánicas de alta plasticidad
OH: Arcillas orgánicas de mediana o alta plasticidad

xico (fig. 8-10) y de acuerdo a la carta de plasticidad arriba mencionada no tienen las cualidades óptimas, dado que contienen una gran cantidad de limo y baja plasticidad.

Se buscó otro suelo y basándose en la ref. 32, se seleccionó a Querétaro, por la cercanía con el D.F., como la región donde se podrían obtener arcillas con características idóneas para un estanque solar.

La arcilla seleccionada es una arcilla negra o café-grisácea, de consistencia media, firme y dura, fuertemente preconsolidada, que en algunos sitios tiene poca arena fina.

El contenido de agua en este estrato es muy uniforme en todos los sitios estudiados y oscila entre 27 y 60% (grupo CH).

Su peso volumétrico es alto comparado con el que en forma común presentan las arcillas, oscila entre 1 600 y 1 700 kg/m³ (ref. 32).

En la fig. 11 se muestran las pruebas realizadas en el laboratorio a la arcilla obtenida de la región conocida como "Zona Industrial de Querétaro". Puede considerarse que esta arcilla es de alta plasticidad (fig. 7) ya que esta se localiza arriba de la línea A en la zona CH.

OSPA: _____
 LOCALIZACION: _____
 SONDEO N°: _____ ENSAYE N°: _____
 MUESTRA N°: _____ PROF.: _____
 DESCRIPCION: _____

INSTITUTO DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

LIMITES DE PLASTICIDAD
Y HUMEDAD NATURAL

FECHA: 14-VIII-85 OPERADOR: _____ CALCULO: _____

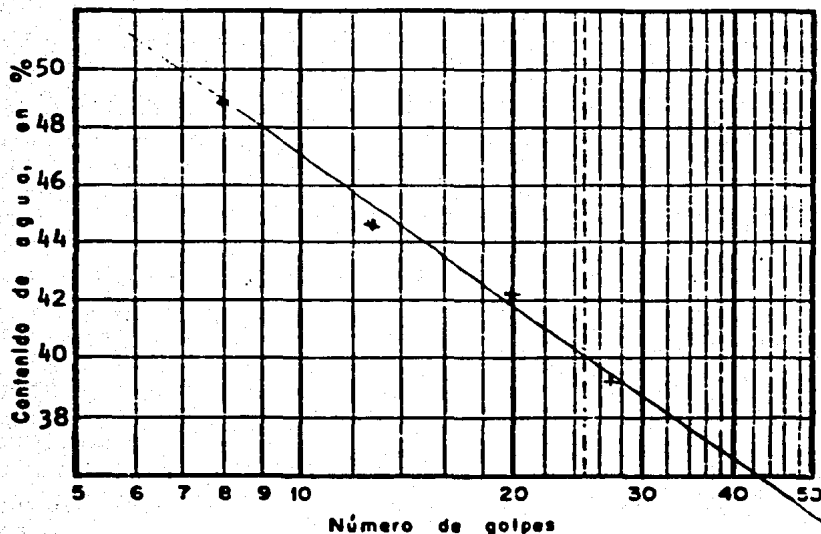
LIMITE LIQUIDO

Prueba N°	Cápsula N°	Número de Golpes	Peso cápsula + suelo húmedo	Peso cápsula + suelo seco	Peso de agua	Peso de la cápsula	Peso del suelo seco	Contenido de agua (w)
			gr.	gr.	gr.	gr.	gr.	%
	41	27	86.535	81.270	5.265	67.913	13.357	39.417
	42	20	86.000	80.530	5.470	67.622	12.908	42.376
	43	13	84.500	79.390	5.110	67.940	11.450	44.628
	44	8	83.690	78.510	5.180	67.970	10.540	49.146

LIMITE PLASTICO

	21		53.530	51.630	1.900	45.389	6.241	30.443
	22		58.287	55.240	3.047	45.231	10.009	30.044

HUMEDAD NATURAL



W = _____ %

LL = 40.00 %

LP = 30.24 %

Ip = 9.76 %

$C_R = \frac{LL - W}{I_p} =$ _____

Fw = _____ %

$T_w = \frac{I_p}{F_w} =$ _____

Clasif. SUCS: _____

Fig 8 Pruebas de modelos y suelos proveniente de las minas de Santa Fe, D.F.

OBPA: _____
 LOCALIZACION: _____
 SONDEO N°: _____ ENSAYE N°: _____
 MUESTRA N°: _____ PROF.: _____
 DESCRIPCION: _____

INSTITUTO DE INGENIERIA
 UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
 DE MEXICO
 LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

LIMITES DE PLASTICIDAD
 Y HUMEDAD NATURAL

FECHA: 22-VIII-85 OPERADOR: A. Sánchez CALCULO: A. Sánchez

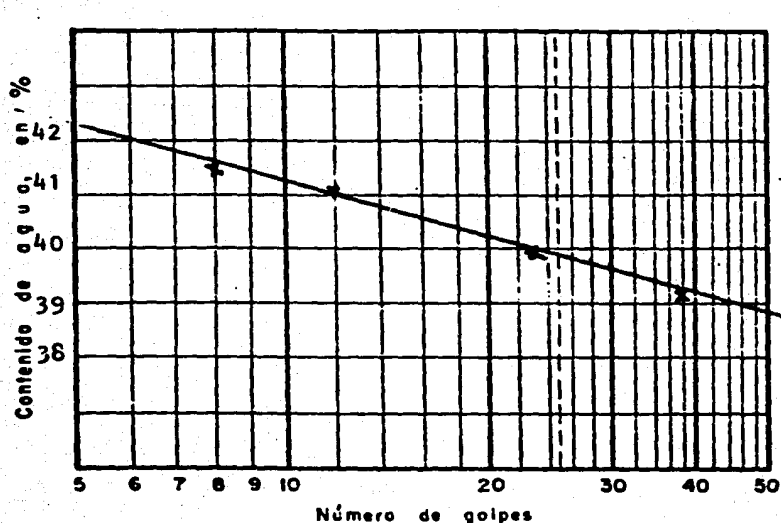
LIMITE LIQUIDO

Prueba N°	Cápsula N°	Número de Golpes	Peso cápsula + suelo húmedo	Peso cápsula + suelo seco	Peso del agua	Peso de la cápsula	Peso del suelo seco	Contenido de agua (w)
			gr.	gr.	gr.	gr.	gr.	%
	45	38	90.538	84.035	6.503	67.427	16.608	39.155
	46	21	86.330	81.090	5.240	67.970	13.120	39.939
	47	12	89.030	82.860	6.170	67.912	14.948	41.276
	48	8	91.190	84.425	6.765	67.998	16.427	11.182

LIMITE PLASTICO

	3		54.930	53.130	1.800	46.863	6.267	28.722
	7		52.040	50.610	1.430	45.601	5.009	28.549

HUMEDAD NATURAL



W = _____ %

LL = 40.000 %

LP = 28.64 %

Ip = 11.360 %

$C_u = \frac{LL - W}{I_p} =$ _____

FW = _____ %

$T_w = \frac{I_p}{F_w} =$ _____

Clasif. SUCS: _____

Fig 9 Prueba de otro de los suelos proveniente de las minas de Santa Fe, D. F.

OBRA: _____
 LOCALIZACION: _____
 SONDEO N°: _____ ENSAYE N°: _____
 MUESTRA N°: _____ PROF.: _____
 DESCRIPCION: _____

INSTITUTO DE INGENIERIA
 UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
 DE MEXICO

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

LIMITES DE PLASTICIDAD
 Y HUMEDAD NATURAL

FECHA: 21-VIII-85 OPERADOR: A. Sánchez CALCULO: A. Sánchez

LIMITE LIQUIDO

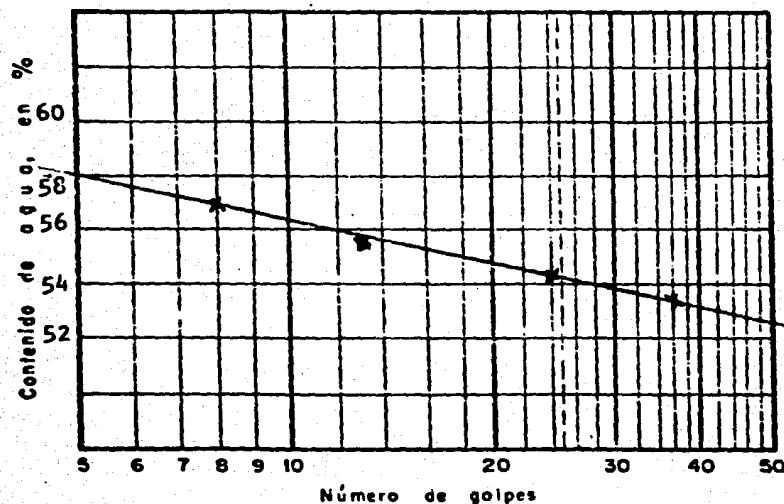
Prueba N°	Cápsula N°	Número de Golpes	Peso cápsula + suelo húmedo gr.	Peso cápsula + suelo seco gr.	Peso del agua gr.	Peso de la cápsula gr.	Peso del suelo seco gr.	Contenido de agua (W) %
	13	36	86.830	81.268	5.562	70.900	10.366	53.645
	14	23	85.980	80.768	5.212	71.150	9.618	54.190
	15	13	89.030	82.530	6.500	70.790	11.740	55.366
	16	8	84.905	79.675	5.230	70.508	9.167	57.052

LIMITE PLASTICO

21	_____	49.760	48.575	1.185	45.389	3.185	37.205
22	_____	52.110	50.300	1.810	45.231	5.069	35.707

HUMEDAD NATURAL

_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____
_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____
_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____



W = _____ %

LL = 54.5 %

LP = 36.456 %

Ip = 18.04 %

$C_R = \frac{LL-W}{I_p} =$ _____

Fw = _____ %

$T_w = \frac{I_p}{F_w} =$ _____

Clasif. SUCS: _____

Fig 10 Prueba del suelo proveniente de Zochaca.

OBRA: _____
 LOCALIZACION: _____
 SONDEO N°: _____ ENSAYE N°: _____
 MUESTRA N°: 5 PROF.: _____
 DESCRIPCION: _____

INSTITUTO DE INGENIERIA
 UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
 DE MEXICO
 LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

LIMITES DE PLASTICIDAD Y HUMEDAD NATURAL

FECHA: 9-IX-85 OPERADOR: Sánchez CALCULO: Sánchez

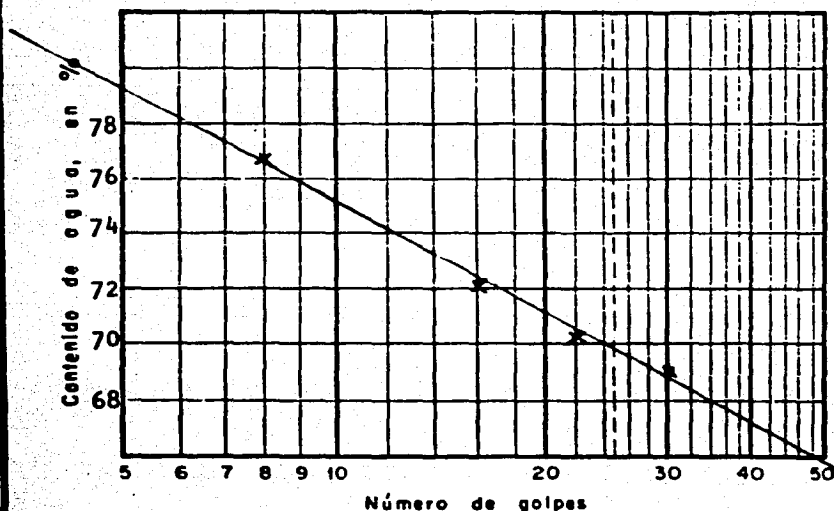
LIMITE LIQUIDO

Prueba N°	Cápsula N°	Número de Golpes	Peso cápsula + suelo húmedo gr.	Peso cápsula + suelo seco gr.	Peso del agua gr.	Peso de la cápsula gr.	Peso del suelo seco gr.	Contenido de agua (w) %
	32	30	79.638	74.770	4.868	67.710	7.060	69.0
	120	22	77.830	72.540	5.290	64.994	7.540	70.2
	122	16	78.920	73.890	5.030	66.910	6.980	72.1
	126	8	73.970	68.070	5.900	60.375	7.695	76.7

LIMITE PLASTICO

	30		50.100	49.020	1.080	45.710	3.310	32.6
	29		46.430	47.450	0.980	44.478	2.972	33.0

HUMEDAD NATURAL



W = _____ %

LL = 69.9 %

LP = 32.8 %

Ip = 37.1 %

$C_R = \frac{LL - W}{I_p} =$ _____

Fw = _____ %

$T_w = \frac{I_p}{F_w} =$ _____

Clasif. SUCS: _____

Fig 11 Prueba de la arcilla proveniente de Querétaro

Suelos compactados.

La compactación de suelos es un método usado para disminuir la permeabilidad de suelos, así como su deformabilidad y además mejorar su estabilidad (ref. 9 y 33). Sin embargo, el método específico utilizado para la compactación es un aspecto importante ya que gran parte de la permeabilidad depende de éste, así como del contenido de agua del suelo. Generalmente estas pruebas se hacen en laboratorio siguiendo el método estandar de Proctor (ref. 31) que consiste en una serie de ensayos que muestran la cantidad de energía por unidad de volumen necesaria para compactar un suelo determinado.

Pruebas de compactación

Se llama compactación al proceso que permite un aumento rápido del peso volumétrico del suelo en consideración; esto se lleva a cabo mediante la aplicación de cargas transitorias de corta duración. Para una energía de compactación dada, el máximo peso volumétrico seco de suelo compactado se obtiene para cierto contenido de agua, llamado contenido de agua óptimo.

La prueba proctor estandar consiste, en compactar, en un molde rígido metálico, tres capas de suelo en forma sucesiva, con veinticinco golpes, en cada capa, uniformemente distribuidos, de un martillo con peso de 2.5 kg. y caída libre de 30 cm. Esta prueba se realiza para el suelo con diferen-

tes contenidos de agua. Se dibuja la gráfica de peso volumétrico seco contra contenido de agua de compactación. En la figura 12 se muestran las pruebas de compactación realizadas a la arcilla proveniente de Querétaro.

Preparación de la arcilla

Para obtener una máxima uniformidad en la humedad de la arcilla, es necesario añadirle agua para lograr la humedad requerida y posteriormente curarla por varios días.

Tomando como base 100 kg de arcilla con su humedad natural (14%) mediante la ecuación (2) y considerando que el peso total W_t es el peso del agua W_w más el peso de sólidos W_s .

$$W_t = W_w + W_s$$

Si W_o es la humedad inicial y W_{to} el peso inicial

$$W_{to} = W_s (1 + W_o)$$

$$W_s = \frac{W_{to}}{1 + W_o}$$

Y si el peso final de la arcilla compactada es W_{tf} , entonces

$$W_{tf} = W_s (1 + W_o)$$

Volumen del cilindro : $2.9326 \times 10^{-3} \text{ m}^3$
 Peso del cilindro : 3.771 kg .
 Peso de tierra seca , $P_s = P_T / 1 + W$
 Peso volumétrico seco , $P_{vs} = P_s / V$
 P_T = Peso total - peso del cilindro

Muestra : Querétaro Elev. m.

Fecha :

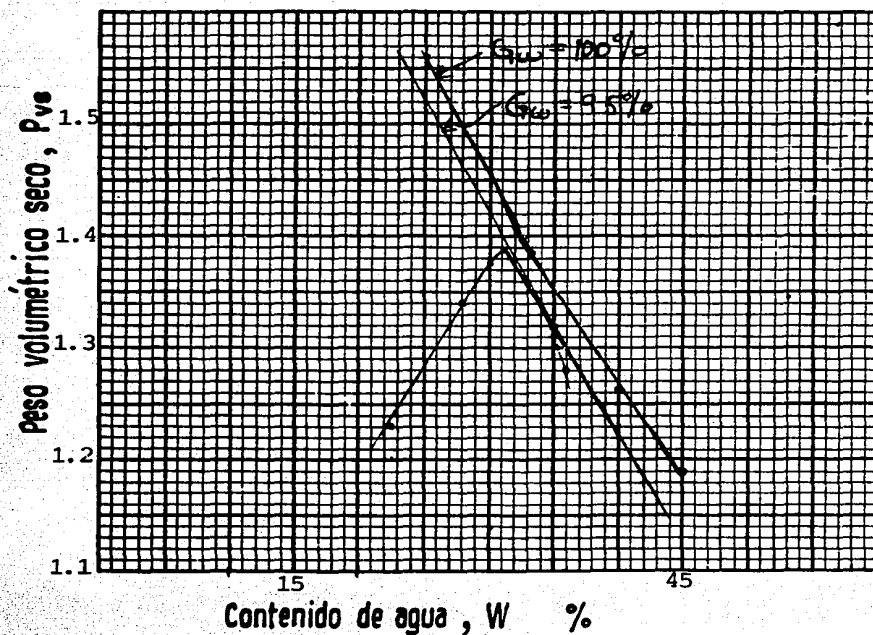
Operador : A. Sánchez

Altura de caída del martillo , $h = 30 \text{ cm}$.

Número de golpes , $n = 25$

Peso del martillo , $P_m = 2.5 \text{ kg}$.

Prueba Nº	Cápsula Nº	Peso tierra húmedo + cápsula	Peso tierra seca + cápsula	Peso de la. cápsula	Peso de agua	Peso seco	W	Peso tierra húmeda + cilindro	Peso tierra húmeda	$\frac{1}{1+W}$	Peso tierra seca	Peso volumétrico seco
—	—	gr.	gr.	gr.	gr.	gr.	%	kg.	kg.	—	kg.	kg.m ³
1	6	1695.2	1421.5	203.8	273.7	1217.70	22.5	5.263	1.492	0.816	1.217	1225.2
2	7	1904.3	1532.9	203.9	371.4	1329.0	27.95	5.479	1.708	0.781	1.333	1342.1
3	-	1947.1	1486.7	177.2	460.4	1309.5	35.16	5.541	1.770	0.739	1.309	1317.9
4	-	1904.1	1449.4	177.3	454.7	1272.1	35.70	5.498	1.727	0.737	1.272	1280.7
5												
6												
7												



Densidad de sólidos, $s = 2.56$

Vol. sólidos, $V_s = \frac{P_s}{s} =$ cm³

Vol. total , $V_T =$ cm³

Rel. de vacíos, $e = \frac{V_T}{V_s} - 1 =$

Observaciones : Contenido de agua que da una máxima densidad volumétrica, 31 % de saturación

por lo que la cantidad de agua que se necesita agregar para lograr 36% de humedad es

$$\Delta W_w = W_{tf} - W_{to}$$

$$W_s = \frac{100}{1.14} = 87.72 \text{ kg}$$

$$W_{tf} = 87.72 \times 1.36 = 119.3 \text{ kg}$$

$$\Delta W_w = 119.3 - 100 = 19.3 \text{ kg} = 19.3 \text{ l}$$

El 36% se obtuvo al observar la gráfica de la fig. 12, ya que aunque el máximo que se lee es 31% se recomienda, por experiencia, estar arriba del máximo de Proctor por alrededor de un 5% (ref. 9).

Una vez mezclada la arcilla con el agua en la proporción de 19.3 litros por cada 100 kg de arcilla original, se dejó reposar por 20 días con el fin de lograr una uniformidad en la humedad, quedando finalmente lista para compactarla, dentro del recipiente donde va a trabajar como impermeabilizante, y, lograr así simular experimentalmente un estanque solar.

5. COMPORTAMIENTO DE UNA ARCILLA EN UN PROTOTIPO DE ESTANQUE SOLAR.

La simulación experimental de pérdidas térmicas hacia el subsuelo en estado estacionario existentes en un estanque real, puede llevarse a cabo en el laboratorio por medio de un dispositivo que involucre en forma real el material que existe en el subsuelo. Los otros tipos de pérdidas térmicas existentes, por ejemplo, hacia la atmósfera y hacia los lados del estanque, deben reducirse de manera que resulten despreciables ante las que se tengan hacia el subsuelo. Para llevar a cabo esto se construyó en el laboratorio un dispositivo como el mostrado en la fig. 13; este dispositivo es una fosa séptica de asbesto que se implementó en la siguiente forma:

a) se forró interiormente la fosa con fibra de vidrio para

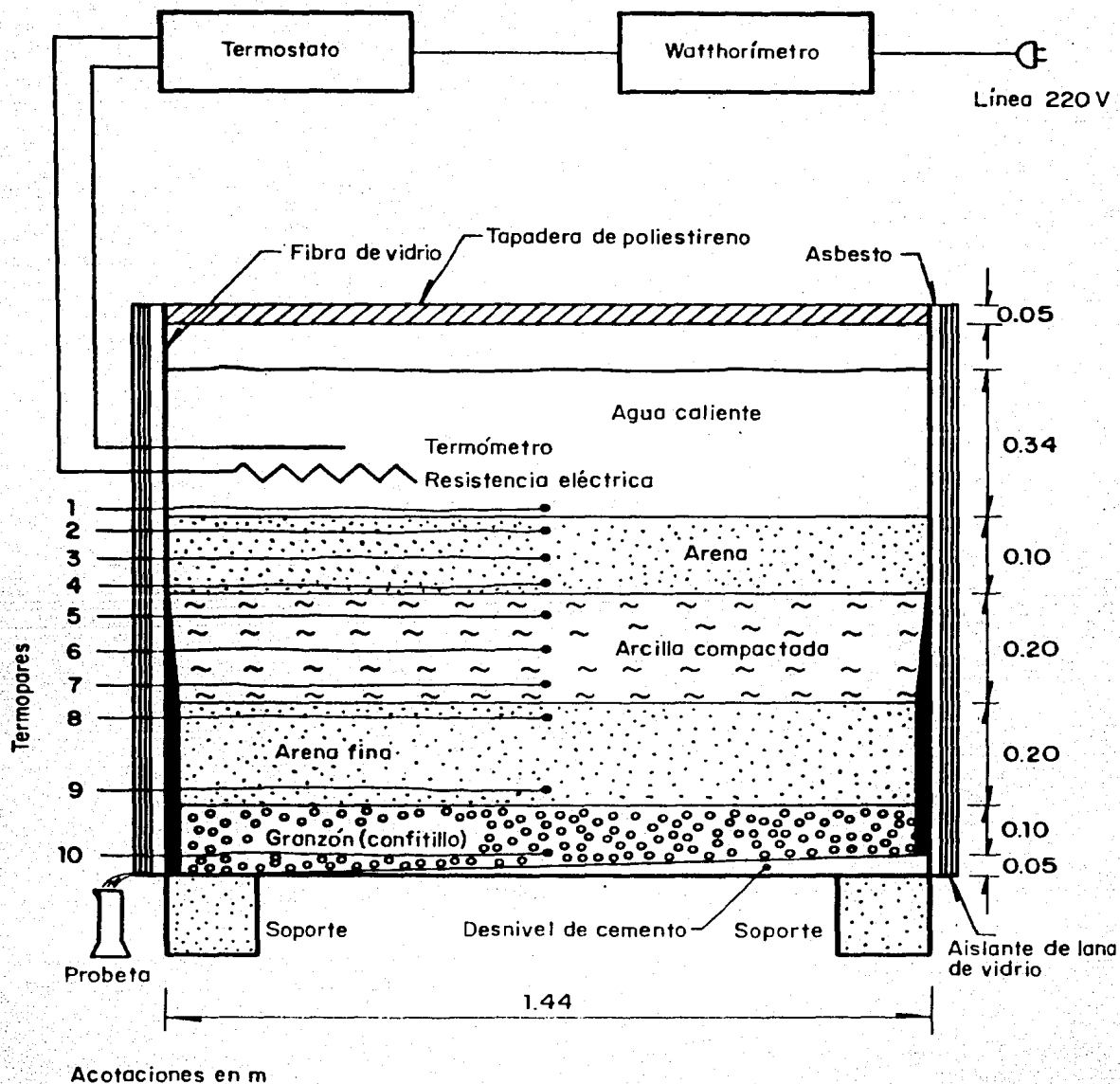


Fig 13 Arreglo general

impermeabilizarlo y además se formó un anillo de lo que será la zona donde estará colocada la arcilla, aproximadamente a la mitad de la altura total de la fosa. Este anillo tiene como objetivo evitar que el agua caliente que estará colocada en la parte superior se llegue a filtrar entre la pared de la fosa y la arcilla; la inclinación de 7° que tiene la sección de este anillo hace que la filtración se elimine en las paredes prácticamente (ref. 34).

- b) En la parte más baja se pusieron 10 cm de granzón seguidos por 20 cm de arena; sobre este se colocaron 20 cm de arcilla compactada con una humedad de 36%, preparada como se mencionó en el capítulo anterior y compactándola por capas de 5 cm.
- c) Encima de la capa de arcilla se puso una capa de 10 cm de arena fina para que sirviera como lastre y evitar con ella posibles daños o deformaciones en la arcilla durante la experimentación.
- d) En la parte superior, inicialmente se mantuvo agua caliente a una temperatura constante de aproximadamente 50°C . Esta agua se pudo mantener a esta temperatura por medio de una resistencia eléctrica que tiene instalado un termostato; se le conecta un wattorímetro para conocer la cantidad de calor que se le está suministrando y

así poder saber cuanto calor pierde al subsuelo.

- e) Como se observa en la figura 13 se colocaron termopares (cobre-constantan, con un compensador de unión fría de la marca OMEGA), distribuidos en forma conveniente a diferentes alturas del prototipo, los cuales no causan perturbaciones al sistema y nos permiten obtener el perfil de temperatura con precisión de ± 0.01 °C (Ref 35).
- f) Se tapó el estanque con una capa de poliestireno, además se aislaron los lados y la parte superior del estanque con 20 cm de lana mineral ($K_t = 0.037$ W/m K a 20°C y con una densidad de 48 kg/m³, Ref 36) para tratar que el flujo de calor fuera principalmente a través de la arcilla y ayudar a conservar la temperatura interior, así como evitar que existieran gradientes radiales de temperatura.
- g) Se colocó un recipiente cerrado a la salida del estanque para coleccionar y medir los efluentes captados en ciertos lapsos de tiempo.

MEDIDAS DE CONDUCTIVIDAD TERMICA Y PERMEABILIDAD VERTICAL A 50 y 60°C CON AGUA CALIENTE

El prototipo de laboratorio una vez puesto en marcha, se acondicionó para trabajar a 50°C con un margen máximo de ± 1.5 °C,

que es la precisión que da el termostato conectado en serie con la resistencia y los watthorímetros como se muestra en la figura 13. El tiempo que se invirtió en alcanzar la temperatura deseada fué de aproximadamente un mes, dado que existieron irregularidades en el suministro de energía, el funcionamiento de la resistencia y el termostato, así como algunas fallas que se fueron presentando a medida que se hacía el calentamiento; finalmente se alcanzó el estado estacionario durante un tiempo suficiente como para que los datos experimentales obtenidos fueran representativos, con lo que se obtuvieron los datos que se muestran en la tabla 2.

En esta tabla se muestran las temperaturas en los extremos de la capa de arcilla (termopares 4 y 8), la temperatura del agua, las lecturas de los watthorímetros y la cantidad de agua filtrada todo esto a diferentes lapsos de tiempo durante el experimento.

De la misma forma se presentan en la tabla 3 las lecturas obtenidas para la corrida a 60°C de temperatura en el agua en estado estacionario.

Aplicando la ley de *Fourier* puede estimarse la conductividad térmica.

$$q = - K A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (3)$$

Tabla 2

Datos Corrida Agua a 50°C

Día	Hora	H ₂ O filtrado lt	kWhr (1)	kWhr (2)	T e r m o p a r		T°C
					1	4	
100686	10:40	_____	78.7	78.4	50.80	44.00	38.62
120686	11:15	1.650	81.3	81.0	49.98	43.83	38.69
130686	10:05	0.720	84.0	83.7	51.48	44.17	38.64
160686	14:00	2.350	89.2	88.9	51.40	44.13	38.74
170686	10:20	0.660	89.2	88.9	50.63	44.15	39.04
190686	08:05	1.555	92.1	91.8	50.13	43.98	39.01

Tabla 3

Datos Corrida Agua a 60°C

Día	Hora	H ₂ O	kWhr. (1)	kWhr. (2)	Termopar		T°C
		filtrado lts			1	4	
240686	09:25	—	107.1	106.9	60.75	51.81	44.52
250686	10:28	0.880	110.1	109.9	60.70	51.88	44.89
260686	09:10	0.750	112.7	112.5	61.03	51.58	44.94
270686	10:48	0.840	113.8	113.6	61.50	51.36	45.09
280686	09:42	0.720	116.1	115.9	60.86	50.80	44.59
300686	08:40	1.360	118.6	118.4	59.50	50.92	44.52
010786	16:21	0.900	120.3	120.1	59.37	50.57	44.65

Donde:

q = Cantidad de calor transferida por unidad de tiempo.

K = Conductividad Térmica.

A = Area.

ΔT = Gradiente de Temperatura.

Δx = Distancia en la que se midió el ΔT .

Con la ley de *Darcy* se calcula la permeabilidad vertical.

$$Q = X \text{ i } A \quad (4)$$

A = área

i = gradiente hidráulico

X = coeficiente de permeabilidad vertical

Q = pérdidas por filtración.

Los resultados obtenidos tanto para la conductividad térmica como para la permeabilidad vertical a las dos temperaturas medidas y con agua simple son las siguientes:

- Cálculo de conductividad térmica a 50°C.

$$K = \frac{q \Delta x}{A \Delta t} \quad (3')$$

q = watts

Δx = espesor arcilla = 0.2 m

ΔT = gradiente de temperatura en la
arcilla
= 4.81 °C

A = área de transferencia = 1.6286 m²

t = tiempo

Tiempo De 10/06/86 --- 10:40

al 19/06/86 --- 8:05

Tiempo = 213.41 hrs = 12805 min.

$$\text{KWH consumidos} = 92.1 - 78.7 = 13.4 \text{ kWhr}$$

$$q = \frac{13\,400 \text{ watt-hr}}{213.41 \text{ hr}} = 62.78 \text{ watts}$$

$$\bar{T}_4 = 43.52 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\bar{T}_8 = 38.71 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$K = \frac{(62.78) (0.2)}{(1.6286) (4.81)} = 1.60 \frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{C}}$$

Permeabilidad vertical

$$X = \frac{Q}{i A} \quad (4') \quad X = \text{coef. de permeabilidad vert. m/s}$$

$Q = \text{pérdidas por filtración m}^3/\text{s}$

$i = \text{gradiente hidráulico}$

$A = \text{área en m}^2 = 1.6286 \text{ m}^2$

$$i = \frac{84}{34} = 2.4706$$

$$Q = \frac{\text{pérdidas}}{t} = \frac{6.935 \text{ lts}}{t} = \frac{0.006935 \text{ m}^3}{(12805) (60)} = 9.02 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$X = \frac{9.02 \times 10^{-9}}{(2.4706) (1.6286)} = 2.24 \times 10^{-9} \frac{\text{m}}{\text{seg}} = 2.24 \times 10^{-7} \frac{\text{cm}}{\text{seg}}$$

$$X = 2.24 \times 10^{-7} \text{ cm/seg}$$

- Conductividad térmica a 60°C

Tiempo De 24/06/86 ----- 9:25 hr

al 01/06/86 ----- 16:21 hr 174.93 hr.

$$\text{KWH consumidos} = 120.3 - 107.1 = 13.2 \text{ kWhr}$$

$$\frac{13200 \text{ Whr}}{174.93 \text{ hr}} = 75.45 \text{ watt}$$

$$174.93 \text{ hr}$$

$$\bar{T}_4 = 50.38 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\bar{T}_8 = 44.18 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Sustituyendo en (3')

$$K = \frac{(75.45) (0.2)}{(1.6286) (6.20)} = 1.49 \frac{\text{W}}{\text{m } ^{\circ}\text{C}}$$

Permeabilidad a 60°C

$$Q = \frac{\Sigma \text{pérdidas}}{t} = \frac{5.45 \text{ lt}}{t} = \frac{0.00545 \text{ m}^3}{(10496) (60)} = 8.65 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{seg}$$

sustituyendo en (4')

$$x = \frac{8.65 \times 10^{-9}}{(2.4706)(1.6286)} = 2.15 \times 10^{-9} \text{ m/seg} = 2.15 \times 10^{-7} \text{ cm/seg}$$

$$x = 2.15 \times 10^{-7} \text{ cm/seg}$$

MEDIDAS DE CONDUCTIVIDAD TERMICA Y PERMEABILIDAD VERTICAL CON
SALMUERAS SATURADAS CALIENTES DE NaCl A 50°C

Para conocer el efecto de una salmuera caliente y saturada sobre la arcilla, tanto en sus propiedades térmicas y mecánicas se preparo ésta para acondicionar el prototipo de laboratorio.

Para tener un espesor de 25 cm de salmuera saturada en el estanque se necesita un volumen de:

$$V = A \times h = 1.63 \text{ m}^2 \times 0.25 \text{ m} = 0.4075 \text{ m}^3$$

$$V = 407.5 \text{ lt}$$

De la ref. 37 tenemos que la solubilidad del cloruro de sodio es:

Temp. °C	Solubilidad g/100 ml
0	35.7
50	37.0
60	37.3
70	37.8
100	39.8

por lo tanto se necesitan

$$g_{\text{sal}} = 407.5 \text{ lt} \times \frac{37.8 \text{ g}}{100 \text{ ml}} \times \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ lt}} = 154035 \text{ g NaCl}$$

kg sal = 154

Esta cantidad de sal es la que se necesitaría disolver para saturar el agua a 70 °C, pero como se preparó con agua a 50°C no fué posible disolverla, aún así, se agregó al estanque el resto de sal y un poco más para asegurarse de que la salmuera estaría saturada a cualquiera de las temperaturas de prueba del estanque.

Para saber el grado de saturación de salmuera se utilizó un salinómetro, que es un densímetro adaptado para salmueras, el cual trabaja a temperaturas de 15 a 20 °C; lo que se hizo fue tomar muestras de salmueras y enfriarlas para poder medir la saturación, de esta manera se comprobó que la salmuera preparada solo llegó a estar al 90% de saturación, por lo que se dejó más tiempo para que llegara a saturarse.

Se acondicionó y se cerró el sistema, tal y como se hizo en las mediciones anteriores; se empezó a calentar hasta lograr una temperatura estable de 50 °C y a partir de este momento se tomaron lecturas de consumo de energía, temperaturas en los distintos puntos del estanque, cantidad de efluentes y la concentración de sales en ellos.

El aumento en la concentración salina de los efluentes que fue observado, se indica en la figura 14.

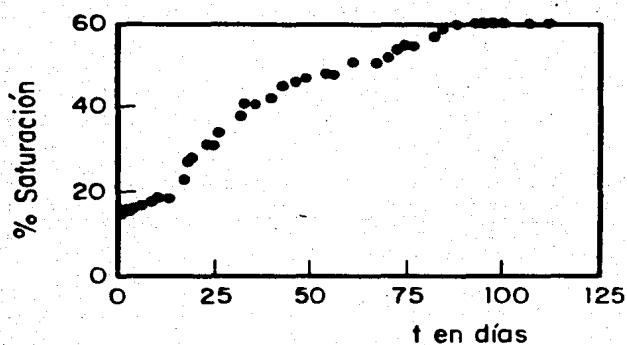


Fig 14 % Saturación de los efluentes vs días transcurridos

Para obtener información del comportamiento de la arcilla a diferentes grados de avance de salinidad en el sistema, se calculó la conductividad térmica y la permeabilidad vertical, tomando intervalos con baja y alta concentración de sales en los efluentes, obteniéndose los resultados que se muestran a continuación:

<u>intervalo de % de sat.</u>	<u>K (W/m°C)</u>	<u>X (cm/seg) x 10⁻⁷</u>
17 a 31	1.43	1.81
41 a 51	1.41	1.62
60 (constante)	1.21	1.47

El último par de datos de la tabla anterior, para el periodo en el que se observó que la concentración de sal en el efluente era constante en 60% de saturación (22.2 g/100ml) se obtuvieron de las lecturas que se muestran en la tabla 4.

- Cálculo de conductividad térmica de arcilla bajo el efecto de salmuera a 50°C.

Tiempo De 29/10/86 -- 14:00

al 24/11/86 -- 14:02 624.03 hr.

KWH consumidos 32.1 kWhr

$$q = \frac{32100 \text{ W-hr}}{624.03 \text{ hr}} = 51.43 \text{ watts}$$

Tabla 4

Datos Corrida Salmuera a 50°C

Dia	Hora	Filtrado lts	kWhr (1)	kWhr (2)	Termopar 1	T°C 4	8	Saturación %
291086	14:00	-----	293.0	287.6	48.58	41.78	36.96	59
311086	10:15	2.400	295.3	290.0	49.00	41.76	36.71	60
101186	13:48	11.390	304.8	299.5	48.84	38.69	32.81	60
141186	14:15	4,010	310.6	305.1	49.25	41.71	36.17	60
171186	10:30	2.650	315.0	309.8	49.91	42.92	37.38	60
191186	17:30	2,220	318.0	312.8	49.00	42.59	37.43	60
211186	13:06	1,570	320.3	315.1	49.19	43.31	37.78	60
241186	14:02	2.700	324.9	319.9	50.50	43.09	37.65	60

$$\bar{T}_4 = 41.64^{\circ}\text{C}$$

$$\bar{T}_8 = 36.45^{\circ}\text{C}$$

sustituyendo en (3')

$$K = \frac{(51.43 \dots) (0.2)}{(1.6286) (41.64 - 36.45)}$$

$$K = 1.21 \quad \text{W/m}^{\circ}\text{C}$$

- Cálculo de permeabilidad vertical de arcilla bajo el efecto de salmuera a 50°C

$$Q = \frac{\Sigma \text{pérdidas}}{t} = \frac{0.02694 \text{ m}^3}{(37442 \text{ min}) (60 \text{ seg/min})} = 1.19 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$$

sustituyendo en (4')

$$X = \frac{1.19 \times 10^{-8}}{(5) (1.6286)} = 1.47 \times 10^{-9} \text{ m/seg}$$

$$X = 1.47 \times 10^{-7} \text{ cm/seg.}$$

Dado que la presencia de sal podría haber afectado las propiedades mecánicas de la arcilla, se decidió extraer dos muestras de la capa del estanque, una de arriba y otra de abajo, para realizarles las mismas pruebas que se le hicieron al inicio (ver fig. 11); los resultados de estas pruebas se muestran en las figuras 15 y 16 para las capas de arriba y de abajo respectivamente.

OBRA: MATERIAL DE QUERETARO
 LOCALIZACION: _____
 SONDEO N°: _____ ENSAYE N°: _____
 MUESTRA N°: _____ PROF.: _____
 DESCRIPCION: _____

INSTITUTO DE INGENIERIA
 UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
 DE MEXICO

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

LIMITE DE PLASTICIDAD Y HUMEDAD NATURAL

FECHA: 23-II-87 OPERADOR: Sánchez CALCULO: Sánchez

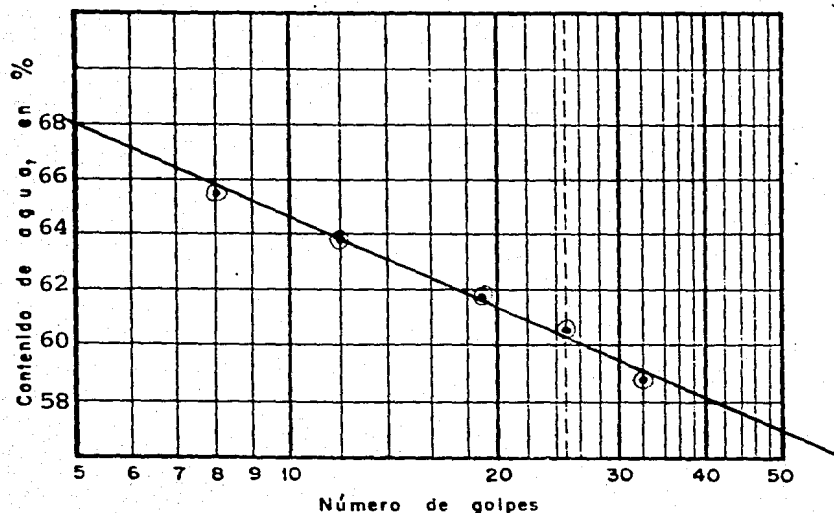
LIMITE LIQUIDO

Prueba N°	Cápsula N°	Número de Golpes	Peso cápsula + suelo húmedo	Peso cápsula + suelo seco	Peso del agua	Peso de la cápsula	Peso del suelo seco	Contenido de agua (W) %
1		32	81.890	77.880	4.010	71.040	6.840	58.6
2		25	79.038	74.820	4.218	67.849	6.971	60.5
3		19	83.240	78.530	4.710	70.899	7.631	61.7
4		12	85.750	79.930	5.820	70.805	9.125	63.8
5		8	83.420	78.280	5.140	70.392	7.888	65.2

LIMITE PLASTICO

1			46.500	45.940	0.560	44.281	1.659	33.8
2			48.040	47.340	0.700	45.155	2.185	32.0

HUMEDAD NATURAL



W = _____ %

LL = 60.0 %

LP = 32.9 %

Ip = 27.1 %

$C_R = \frac{LL - W}{I_p} =$ _____

Fv = _____ %

$T_w = \frac{I_p}{F_w} =$ _____

Clasif. SUCS: _____

OBRA: MATERIAL DE QUERETARO
 LOCALIZACION: _____
 SONDEO N°: _____ ENSAYE N°: _____
 MUESTRA N°: _____ PROF.: _____
 DESCRIPCION: _____

INSTITUTO DE INGENIERIA
 UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
 DE MEXICO

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

LIMITES DE PLASTICIDAD Y HUMEDAD NATURAL

FECHA: 3-III-87 OPERADOR: A. Sánchez CALCULO: A. Sánchez

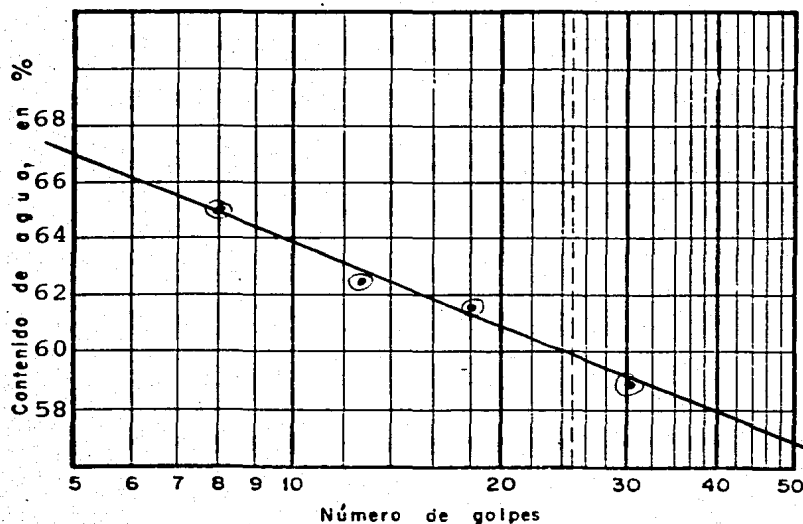
LIMITE LIQUIDO

Prueba N°	Cápsula N°	Número de Golpes	Peso cápsula + suelo húmedo	Peso cápsula + suelo seco	Peso del agua	Peso de la cápsula	Peso del suelo seco	Contenido de agua (W)
			gr.	gr.	gr.	gr.	gr.	%
1	9	30	82.030	77.760	4.210	70.510	7.250	59.0
2	26	18	79.260	74.918	4.342	67.849	7.069	61.4
3	6	13	81.860	77.680	4.180	70.899	6.710	62.3
4	8	8	86.180	80.310	5.870	71.049	9.270	65.0

LIMITE PLASTICO

	1		47.090	46.410	0.680	44.281	2.129	31.9
	2		48.220	47.485	0.735	45.155	2.330	31.5

HUMEDAD NATURAL



W = _____ %

LL = 60.0 %

LP = 31.7 %

Ip = 28.3 %

$C_R = \frac{LL - W}{I_p} =$ _____

Fv = _____ %

$T_w = \frac{I_p}{F_w} =$ _____

Clasif. SUCS: _____

OBSERVACIONES: Fig. 16 Muestra extraída de la parte intermedia del prototipo de Estanque Solar.

Análisis de los resultados

Los datos obtenidos sobre conductividad térmica en la arcilla del prototipo de estanque solar, solo nos dan una idea del orden de magnitud del valor que tendría en la realidad

la conductividad térmica. Se aisló el sistema para procurar que el calor solo fluyera a través de la arcilla, pero no se logró debido a la gran área; solo una parte del calor suministrado fluyó a través de la arcilla, por lo tanto, no se pudo medir el calor que fluyó a través de la arcilla con precisión ya que las pérdidas térmicas no son despreciables, como se pensó al principio y como lo demuestran los siguientes cálculos:

$$q_{cil} = \frac{2 (\pi) (L) (T_1 - T_0)}{\frac{1}{K_1} \ln (D_2/D_1) + \frac{1}{K_2} \ln (D_3/D_2)} \quad (5)$$

$$q_{tapa} = \frac{(\pi) (r^2) (T_1 - T_2)}{E_1/K_3 + E_2/K_2} \quad (6)$$

Donde:

T_1 = Temperatura interior del estanque.

T_0 = Temperatura exterior del cilindro.

T_2 = Temperatura exterior de la tapa = 26 °C = 299 K.

K_1 = Conductividad Térmica del asbesto (fosa séptica) = 0.178 W/mK
(según la referencia 36)

K_2 = Conductividad Térmica de la lana mineral = 0.037 W/m K (ref.36)

K_3 = Conductividad Térmica del poliestireno (tapa) = 0.121 W/m K
(ref. 37)

L = Altura de la sección cilíndrica, en m .

D_1 = Diámetro interior de la fosa = 1.44 m.

D_2 = Diámetro exterior de la fosa = 1.49 m.

D_3 = Diámetro exterior del sistema = 1.89 m (20 cm. de lana mineral)

E_1 = espesor del poliestireno = 0.05 m.

E_2 = espesor de la lana mineral = 0.20 m.

r = radio de la tapa = 0.72 m.

Sustituyendo en las ecuaciones 5 y 6, para cada una de las zonas existentes en el estanque solar, tenemos:

Para la zona uno, parte superior (aire-agua), se tiene una $T_1 = 50$ °C y $T_0 = 27$ °C, con $L = 0.50$ m .

$$q_{cil(z-1)} = \frac{(2)(\pi)(0.50)(323-300)}{(1/0.178) \ln(1.49/1.44) + (1/0.037) \ln(1.89/1.49)}$$

$$q_{cil(z-1)} = 10.92 \text{ Watts.}$$

Para la zona dos, parte intermedia (arena como lastre), se tiene que $T_1 = 45.5$ °C y $T_0 = 27$ °C, siendo el valor de $L = 0.10$ m .

$$q_{cil(z-2)} = \frac{(2)(\pi)(0.10)(318.5-300)}{(1/0.178) \ln(1.49/1.44) + (1/0.037) \ln(1.89/1.49)}$$

$$q_{cil(z-2)} = 1.76 \text{ Watts.}$$

Para la zona tres, parte inferior (arcilla saturada), se tiene que $T_1 = 42^\circ\text{C}$ y $T_0 = 27^\circ\text{C}$, siendo $L = 0.20\text{ m}$.

$$q_{\text{cil}(z-3)} = \frac{(2)(\pi)(0.20)(315-300)}{(1/0.178)\ln(1.49/1.44) + (1/0.037)\ln(1.89/1.49)}$$

$$q_{\text{cil}(z-3)} = 2.85 \text{ watts.}$$

Para la tapa tenemos

$$q_{\text{tapa}} = \frac{(\pi)(0.72^2)(323-299)}{(0.05/0.121) + (0.20/0.037)}$$

$$q_{\text{tapa}} = 6.72 \text{ watts.}$$

Con lo que obtenemos que el calor total disipado es de:

$$q_{\text{total}} = 10.92 + 1.76 + 2.85 + 6.72 = 22.25 \text{ watts.}$$

Al comparar este valor con el consumo registrado por el kilowattímetro, se observa que las pérdidas si son significativas, por lo que los valores reportados para la conductividad térmica de la arcilla no pueden tomarse como verdaderos.

Sin embargo, los datos de conductividad obtenidos son de importancia, si no como valores absolutos, si como relativos que nos muestra la tendencia real de variación de K con la temperatura y con el efecto de una salmuera saturada.

Si restamos el valor calculado para las pérdidas de calor, - del consumo registrado por el kilowattímetro tendríamos una aproximación del calor a través de la arcilla.

Utilizando este dato, obtenemos los siguientes valores de conductividad térmica de la arcilla saturada bajo la influencia de agua y salmuera saturada caliente:

$$K_{\text{arcilla}} (\text{Agua a } 50\text{ }^{\circ}\text{C}) = 1.03 \text{ W/m }^{\circ}\text{C}$$

$$K_{\text{arcilla}} (\text{Agua a } 60\text{ }^{\circ}\text{C}) = 1.05 \text{ W/m }^{\circ}\text{C}$$

$$K_{\text{arcilla}} (\text{Salmuera a } 50\text{ }^{\circ}\text{C, con una saturación de los efluentes de } 17 \text{ a } 31\%) = 0.89 \text{ W/m }^{\circ}\text{C}$$

$$K_{\text{arcilla}} (\text{Salmuera a } 50\text{ }^{\circ}\text{C, con una saturación de los efluentes de } 41 \text{ a } 51\%) = 0.82 \text{ W/m }^{\circ}\text{C}$$

$$K_{\text{arcilla}} (\text{Salmuera a } 50\text{ }^{\circ}\text{C, con una saturación de los efluentes de } 60\% \text{ constante}) = 0.68 \text{ W/m }^{\circ}\text{C}$$

Se observa que respecto a la variación de la conductividad térmica con la temperatura, los resultados no muestran alguna tendencia significativa, pero se nota que la presencia de salmuera provoca una disminución apreciable en dicha propiedad, aunque esto es favorable en cuanto a pérdidas térmicas hacia el subsuelo del estanque solar.

Debido a lo anteriormente mencionado, se hace necesario buscar otras alternativas experimentales para medir la conducti

dad térmica de arcillas para obtener así el valor absoluto
de la misma

6. PROPIEDADES TERMICAS DE ARCILLAS

Un análisis de las propiedades térmicas que se utilizan en este trabajo se presentan a continuación.

Conductividad térmica.

La velocidad a la cual la cantidad de calor q , es transferida de un lugar a otro en un suelo, depende del gradiente de temperatura dT/dx existente y de un coeficiente de conductividad térmica de dicho suelo, esto es

$$q = - K \frac{dT}{dx} \quad (7)$$

donde T es temperatura y x es la profundidad.

El coeficiente de conductividad térmica, caracteriza cuantitativamente la velocidad de flujo de calor transmitido por conducción perpendicularmente a través de un área unitaria (m^2) bajo un gradiente unitario de temperatura ($^{\circ}C/m$), luego entonces las unidades de K son $W/m^2^{\circ}C/m = W/m^{\circ}C$.

La conductividad térmica no es necesariamente una constante, sino que es una función de la temperatura; sin embargo, cuando la conductividad térmica es constante, existe un gradiente lineal de temperatura.

El coeficiente de conductividad térmica de un suelo, es muy sensible al tipo de suelo de que se trate y a su contenido de humedad.

Los valores de K para materiales geológicos (piedras y suelos) son poco conocidos y son generalmente aproximados dentro de un amplio intervalo de valores, ya que puede haber grandes diferencias entre las propiedades térmicas de diferentes especímenes de materiales de la misma composición.

Dado que el contenido de aire en el suelo reduce la conductividad considerablemente, resulta que el contenido de humedad provoca un incremento en la misma, y, por esta razón, la conductividad aumenta con la densidad, dando esto lugar a grandes variaciones en los valores de conductividad.

Es factible hacer estimaciones poco precisas a partir del contenido de humedad, y de la porosidad del sólido, existiendo una diversidad de correlaciones y gráficas para suelos específicos (Ref. 10 a 19).

Difusividad térmica

Cuando el flujo de calor a través de un cuerpo es variable, la temperatura en las diferentes capas del cuerpo, en lugar de permanecer constante, cambia con el tiempo.

La propiedad física que resulta importante en estudios térmicos geotécnicos, en el caso de flujo variable de calor, no es la conductividad térmica, sino la difusividad térmica (Ref. 12).

La difusividad térmica es una propiedad que nos indica la facilidad con la cual un material experimenta un cambio de temperatura y es expresada como

$$\alpha = K / C_p \rho \quad \text{m}^2/\text{hr} \quad (8)$$

donde: K = coeficiente de conductividad térmica cal/m °C hr

C_p = Capacidad calorífica del suelo cal/g °C

ρ = Densidad del material g/m³

Un hecho de importancia práctica, es que en suelos, la difusividad térmica disminuye al aumentar la humedad, porque el producto C_{pp} aumenta más rápidamente que la conductividad térmica (Ref. 12).

En la tabla 5, se encuentran valores de conductividad térmica y difusividad térmica, de algunos materiales secos, según la referencia 12.

Calor Específico

En la mayoría de los casos prácticos, los calores específicos de suelos (arcillas, limos y arenas), se consideran que tienen el mismo valor, aunque varían muy lentamente con la temperatura, disminuyendo al bajar esta (Ref. 13).

Para mezclas de suelos y agua, el calor específico se puede calcular como:

$$C_p \text{ mezcla} = \frac{(100 \times \text{Calor Esp. del Suelo}) + \text{Cont. Humedad}}{100 + \text{Cont. de humedad.}}$$

(9)

donde el contenido de humedad, se expresa como un % del peso seco del suelo.

TABLA 5

Conductividad Térmica K y difusividad térmica α de algunos materiales secos. (Ref. 12).

Material	K cal/(m) (hr) (°C)	α m ² /hr
Arena Seca	0.23	0.00072
Arcillas	0.21	0.0035
Limos	1.58	0.0022
Piedra arenisca	1.4	0.0022
Granito	2.08	0.0027

METODO EXPERIMENTAL

Con el objeto de obtener valores experimentales de la conductividad térmica para la arcilla utilizada dentro del prototipo del estanque solar, por un método diferente al utilizado hasta ahora, se investigaron algunos de los métodos reportados en la literatura (Ref. 10 a 19). Después de analizar cuáles de ellos son aplicables para arcillas húmedas y factibles de realizar con el equipo disponible, se escogieron algunos de ellos.

Una de las alternativas más viables, de fácil implementación y con buenos resultados prácticos, es el cálculo de la conductividad a partir de la definición de difusividad térmica en sólidos (Ref. 15).

Despejando K de la ecuación (8), tenemos:

$$K = \alpha C_p \rho \quad (10)$$

De donde se aprecia que, teniendo los valores de C_p por métodos calorimétricos o equivalentes, la densidad por medición directa, el problema se reduce a obtener el valor de la difusividad térmica.

La determinación experimental de la difusividad térmica de sólidos homogéneos, según la referencia 15, está basada en el segundo teorema de Kondratyev, cuya expresión es

$$\alpha = m_{\infty} \kappa \quad (m^2/s) \quad (11)$$

donde m_{∞} = velocidad de enfriamiento de un cuerpo con un coeficiente local de transferencia de calor, tendiente a infinito.

κ = factor geométrico del cuerpo, que depende de las dimensiones y forma del cuerpo.

α = difusividad térmica.

La condición impuesta de que el coeficiente de transferencia de calor debe tender a infinito, se puede asegurar, poniendo el cuerpo que se está probando en un líquido fuertemente agitado. La agitación se puede omitir cuando la prueba se hace en una fase fluida en ebullición.

El factor geométrico para un cilindro, se determina por medio de (Ref. 15).

$$\kappa = \frac{1}{\left(\frac{2.405}{r}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{L}\right)^2} \quad (\text{m}^2) \quad (12)$$

donde r = radio del cilindro en metros.

L = Longitud del cilindro en metros.

Si el cuerpo geométrico es una esfera, la expresión para el factor geométrico, se reduce a:

$$\kappa = \frac{r^2}{\pi^2} \quad \text{m}^2 \quad (13)$$

donde r = radio de la esfera.

METODO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAR LA DIFUSIVIDAD TERMICA.

El equipo utilizado es:

Dos baños de agua a temperatura constante.

Agitador

Sistema de medición de temperatura con termopares cobre-constantan.

Recipiente metálico cilíndrico

La arcilla se prepara de igual manera que se hizo con la arcilla que se introdujo al estanque solar, compactándola dentro del recipiente metálico cilíndrico hasta el borde; se introduce un termopar delgado que atraviesa la tapa del recipiente y cuya punta estará en el centro geométrico del mismo. Se sella perfectamente con silicón la tapa y la horadación por donde pasa el termopar, de manera que el sistema este cerrado perfectamente, para evitar entrada o salida de humedad, tal como se muestra en la figura 17.

Se prepara un baño a una temperatura aproximadamente 10°C arriba de la temperatura a la cual se desean hacer las mediciones (ref. 15); se introduce el recipiente cilíndrico que se preparó, como se mencionó en el párrafo anterior, cuidando de no mojar las puntas del termopar, dejándolo hasta que se alcance un equilibrio térmico, o sea, que la temperatura del baño sea exactamente igual a la temperatura del centro del cilindro que contiene la arcilla.

Se prepara otro baño de manera que tenga una temperatura constante y aproximadamente menor en 10°C a la del otro baño.

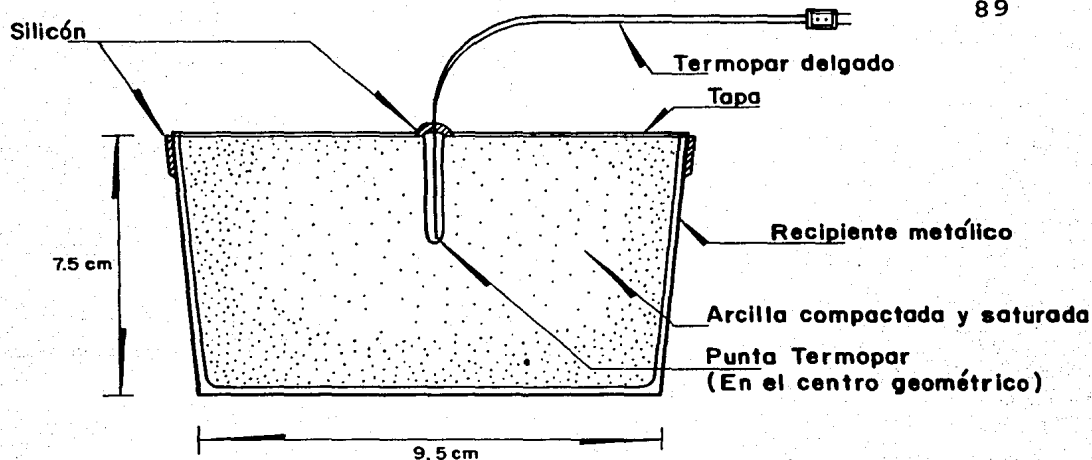


Fig 17 Corte transversal del subsistema para medir difusividad térmica

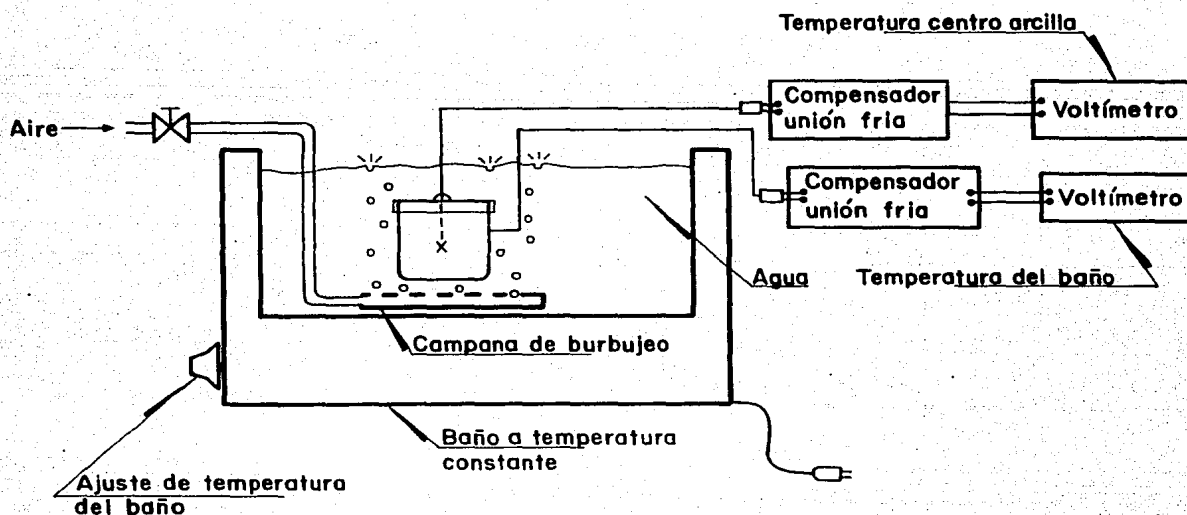


Fig 18 Esquema del montaje del experimento para medición de difusividad térmica

Este baño contará con un sistema de agitación por burbujeo de aire, hasta lograr una turbulencia semejante a la de un líquido en ebullición que asegura el coeficiente local de transferencia de calor tendiente a infinito.

La temperatura a la que se encuentra este segundo baño es a la que se reporta la difusividad térmica.

Una vez alcanzada el equilibrio térmico, se lleva el recipiente del primer baño al segundo que se encuentra agitado y a menor temperatura, por lo que el cuerpo quedará sometido a un gradiente de 10°C , que provocará el flujo de calor del recipiente hacia el exterior, y se medirá la diferencia de temperatura entre el centro del recipiente que contiene a la arcilla, cuya temperatura varía y el medio agitado cuya temperatura se mantiene constante, a intervalos regulares de tiempo, - en nuestro caso cada dos minutos, hasta alcanzar un nuevo estado de equilibrio térmico o se halle cerca de él; el sistema queda montado como se muestra en la figura 18.

La difusividad térmica de la arcilla, es calculada utilizando la fórmula 11. Para determinar la velocidad de enfriamiento del cilindro con un coeficiente de transferencia de calor tendiendo a infinito, los datos de los gradientes obtenidos anteriormente, son usados para crear una gráfica del logaritmo natural del gradiente como una función del tiempo (Figura 19).

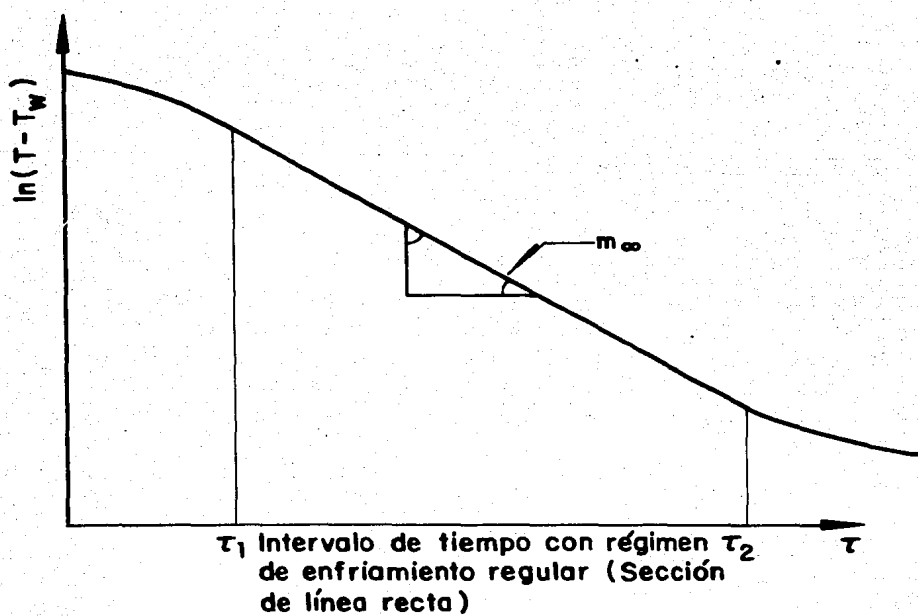


Fig 19 Representación gráfica del tratamiento de los resultados experimentales

De dicha gráfica, se toma la sección recta, que caracteriza un régimen de enfriamiento regular. El valor de m_{∞} es igual a la pendiente de dicha línea recta. La pendiente se obtiene por regresión lineal usando el método de mínimos cuadrados, - con el fin de que la sección de línea recta que dé el mejor coeficiente de correlación sea la utilizada.

El factor κ es una constante e igual a

$$\kappa = \frac{1}{\left(\frac{2.405}{0.0475}\right)^2 + \left(\frac{1}{-0.075}\right)^2} = 0.0002316 \text{ m}^2.$$

Las mediciones hechas se graficaron, figuras de la 20 a la 32; los resultados obtenidos son los siguientes:

Figura	Temperatura del agua T_w (°C)	m_{∞} ($\frac{1}{s}$)	Correlación	Difusividad m^2/s $\times 10^{-7}$
20	15.5	0.0010727	0.9998	2.4844
21	16.5	0.0011157	0.9995	2.5841
22	34.5	0.0012842	0.9984	2.9743
23	50.7	0.0012912	0.9992	2.9899
24	17.2	0.0011078	0.9997	2.5656
25	30.0	0.0011426	0.9996	2.6664
26	39.5	0.0015629	0.9991	3.0197
27	17.2	0.0008357	0.9998	1.9356
28	30.0	0.0011267	0.9994	2.6095
29	39.5	0.0014866	0.9997	3.4430

30	16.5	0.0010037	0.9998	2.3246
31	30.0	0.0010883	0.9995	2.5213
32	40.4	0.0010679	0.9998	2.4733

Los resultados obtenidos a partir de las figuras 20 a la 23 corresponden a la arcilla preparada con agua pura.

Los resultados de las figuras 24 a 26 corresponden a la arcilla preparada con salmuera al 50% de saturación.

Y los correspondiente a las figuras 27 a 29 a las preparadas con salmueras al 90% de saturación.

Finalmente de las figuras 30 a las 32, las mediciones se hicieron con arcilla extraída del estanque, al final de su funcionamiento.

DETERMINACION DE LA DENSIDAD DE LA ARCILLA COMPACTADA Y SATURADA

La determinación de la densidad se hace utilizando el equipo que se usa para la prueba proctor estandar.

Se preparó la arcilla con la humedad del 36%, con agua o salmuera a diferentes concentraciones. Se compacta en el cilindro Proctor, (cuyo volumen es de 993.26 cm³ y su peso vacío de 3.771 kg), como se mencionó en el capítulo 4, que es como se

Gráficas para obtener:

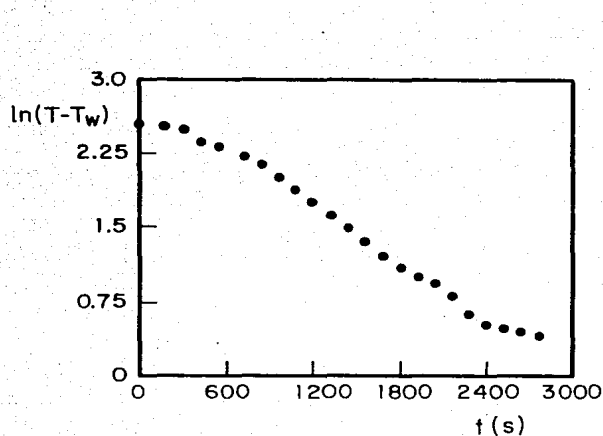


Fig 20 Difusividad térmica de arcilla de Querétaro a $T_w=15.5^\circ\text{C}$ preparada con agua pura

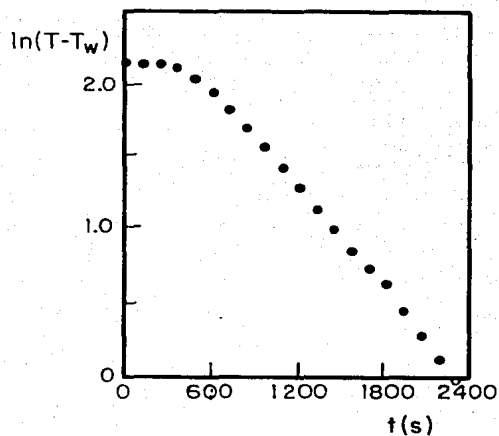


Fig 21 Difusividad térmica de arcilla de Querétaro a $T_w=16.5^\circ\text{C}$ preparada con agua pura

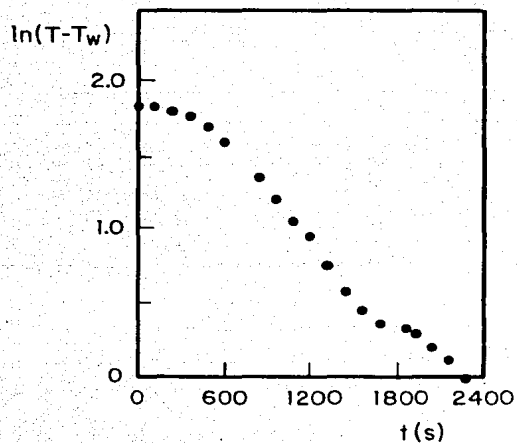


Fig 22 Difusividad térmica de arcilla de Querétaro a $T_w=34.5^\circ\text{C}$ preparada con agua pura

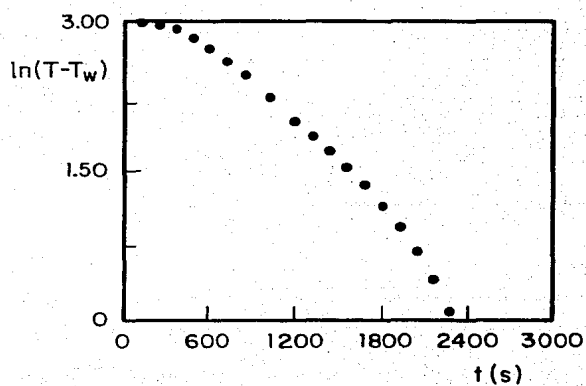


Fig 23 Difusividad térmica de arcilla de Querétaro a $T_w=50^\circ\text{C}$ preparado con agua pura

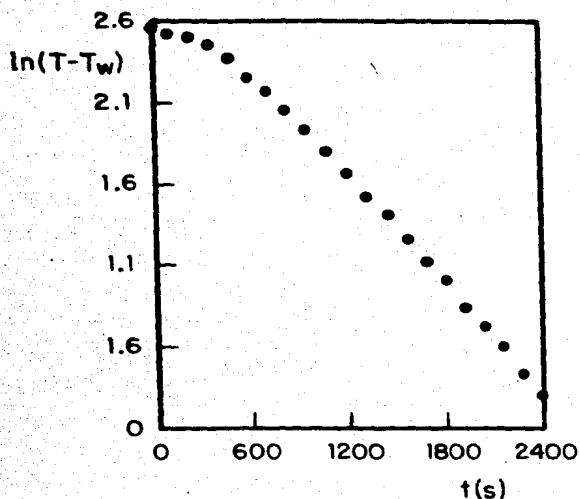


Fig 24 Difusividad térmica de arcilla de Querétaro a $T_w=17.2^\circ\text{C}$ preparada con salmuera de NaCl al 50% de saturación

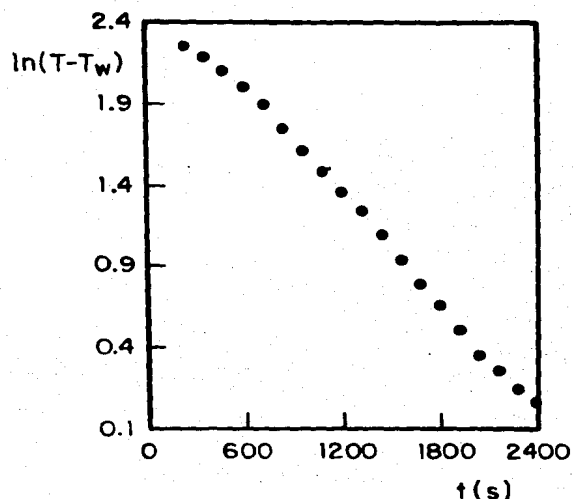


Fig 25 Difusividad térmica de arcilla de Querétaro a $T_w=30^\circ\text{C}$ preparada con salmuera de NaCl al 50% de saturación

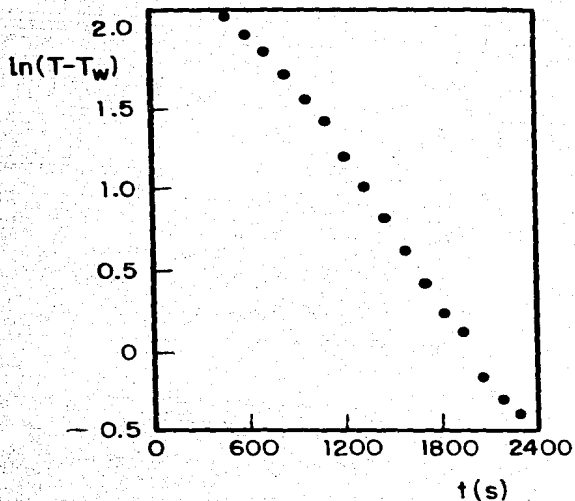


Fig 26 Difusividad térmica de arcilla de Querétaro a $T_w=39.5^\circ\text{C}$ preparada con salmuera de NaCl al 50% de saturación

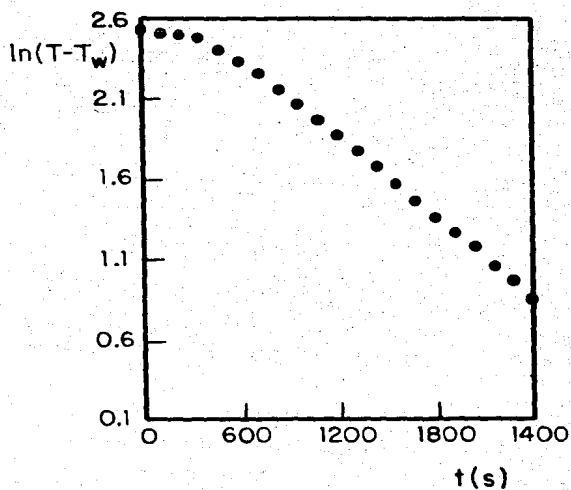


Fig 27 Difusividad térmica de arcilla de Querétaro a $T_w=17.2^\circ\text{C}$ preparada con salmuera de NaCl al 100% de saturación

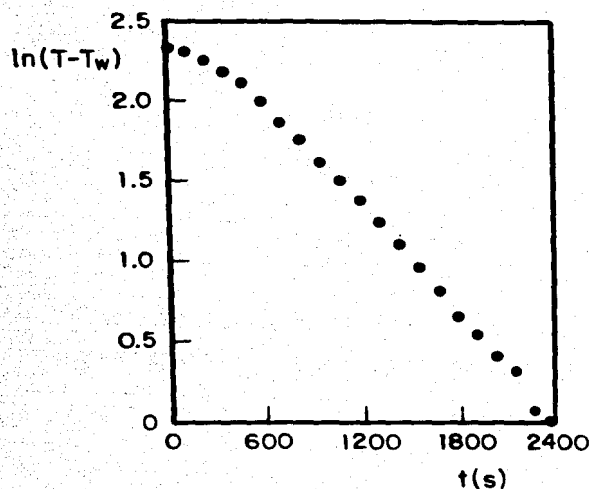


Fig 28 Difusividad térmica de arcilla de Querétaro a $T_w = 30^\circ\text{C}$ preparada con salmuera de NaCl al 100% de saturación

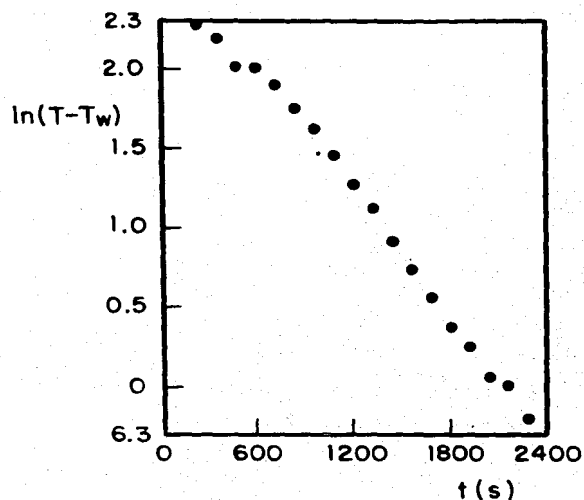


Fig 29 Difusividad térmica de arcilla de Querétaro a $T_w = 39.5^\circ\text{C}$ preparada con salmuera de NaCl al 100% de saturación

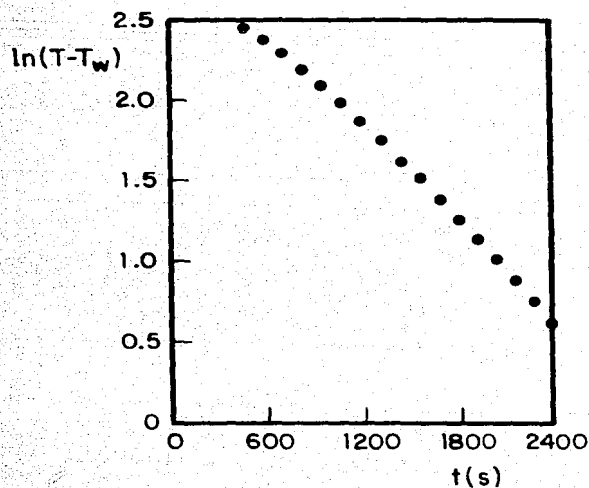


Fig 30 Difusividad térmica de arcilla de Querétaro a $T_w = 16.5^\circ\text{C}$ extraída del estanque solar

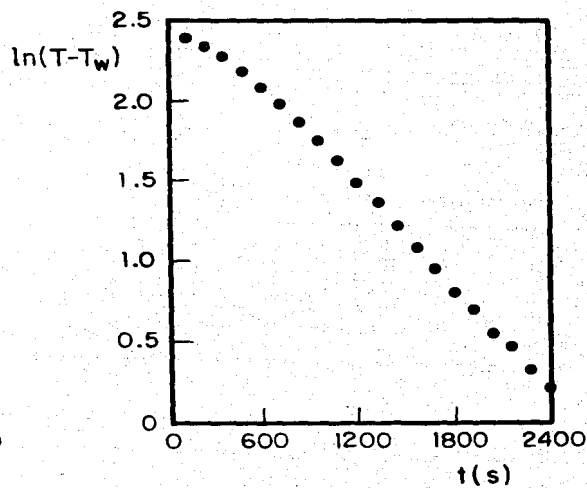


Fig 31 Difusividad térmica de arcilla de Querétaro extraída del estanque solar a $T_w = 30^\circ\text{C}$

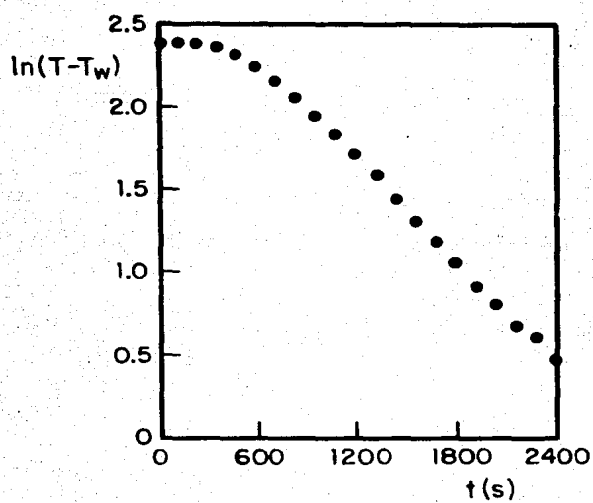


Fig 32 Difusividad térmica de arcilla de Querétaro extraída del estanque solar a $T_w = 40.4^\circ\text{C}$

encuentra en el estanque y en el recipiente cilíndrico donde se determinó la difusividad térmica.

Se pesa el conjunto de cilindro Proctor con arcilla compactada y se le resta el peso vacío, obteniéndose el peso de la arcilla saturada y compactada, que al dividirlo entre el volumen del cilindro Proctor, se obtiene la densidad de la arcilla saturada y compactada.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

- 1) Para la arcilla preparada con agua pura, tenemos:

$$\text{Peso arcilla} + \text{Peso Vacío} = 5\,443.9 \text{ g}$$

$$\text{Peso arcilla} = 1\,672.9 \text{ g}$$

$$\text{Densidad} = 1.6842 \text{ g/cm}^3$$

- 2) Para la arcilla preparada con una salmuera de NaCl al 50% de saturación, tenemos:

$$\text{Peso arcilla} + \text{Peso Vacío} = 5\,576.4 \text{ g}$$

$$\text{Peso arcilla} = 1\,805.4 \text{ g}$$

$$\text{Densidad} = 1.8176 \text{ g/cm}^3$$

- 3) Para la arcilla preparada con una salmuera de NaCl al 90% de saturación, tenemos:

$$\text{Peso arcilla} + \text{Peso Vacío} = 5\,564.6 \text{ g}$$

$$\text{Peso arcilla} = 1\,793.6 \text{ g}$$

$$\text{Densidad} = 1.8058 \text{ g/cm}^3$$

- 4) Para la arcilla proveniente del fondo del prototipo de estanque solar, al final de la experimentación, tenemos:

Peso arcilla + Peso Vacío = 5 476.1 g

Peso arcilla = 1 705.1 g

Densidad = 1.7167 g/cm³

DETERMINACION DE LA CAPACIDAD CALORIFICA A PRESION CONSTANTE

Para la determinación de la capacidad calorífica C_p de la arcilla, se contó con la colaboración del Instituto de Investigaciones de Materiales, donde obtuvieron los valores de C_p , para las diferentes muestras de arcilla, utilizando un analizador térmico diferencial.

Fue necesario secar la arcilla para que el analizador térmico diera un resultado confiable y preciso, con este dato y sabiendo que la humedad de la arcilla utilizada era de 36%, - se obtuvo el valor de la Capacidad Calorífica de la arcilla húmeda y compactada, usando la ecuación 9, para un incremento de humedad.

Los resultados obtenidos son:

- 1) Para la arcilla preparada con agua pura, tenemos:

C_p de la arcilla seca (23.4% humedad) = 0.345 cal/g°C

C_p de la arcilla húmeda = 0.418 cal/g°C

- 2) Para la arcilla preparada con salmuera al 50%, tenemos:

C_p de la arcilla seca (22.5% humedad) = 0.214 cal/g°C

C_p de la arcilla húmeda = 0.308 cal/g°C

- 3) Para la arcilla preparada con salmuera al 90%, tenemos:

C_p de la arcilla seca (23.9% humedad) = 0.242 cal/g°C

C_p de la arcilla húmeda = 0.324 cal/g°C

- 4) Para la arcilla extraída del Estanque Solar, tenemos:

C_p de la arcilla seca (23.0% humedad) = 0.231 cal/g°C

C_p de la arcilla húmeda = 0.319 cal/g°C

CALCULO DE LA CONDUCTIVIDAD TERMICA

De los resultados obtenidos para la difusividad térmica a diferentes temperaturas y grados de salinidad, y los valores constantes de capacidad calorífica y densidad, a diferentes grados de salinidad, podemos calcular la conductividad térmica, utilizando para ello la ecuación 10.

Para la arcilla preparada con agua pura a 16.5 °C tenemos:

Difusividad Térmica = α = 2.5841×10^{-7} m²/s (De la fig. 21)

Capacidad Calorífica = C_p = 0.418 cal/g °C

$$\text{Densidad} = \rho = 1.6842 \text{ g/cm}^3$$

$$K = \alpha C_p$$

$$\text{Ec. 10}$$

$$K = (\text{W/m}^\circ\text{C})$$

Sustituyendo los valores correspondientes:

$$K = (2.5841 \times 10^{-7}) (0.418) (1.6842) (1 \times 10^6)$$

$$(\text{m}^2/\text{s}) (\text{cal/g } ^\circ\text{C}) (\text{g/cm}^3) (1 \times 10^6 \text{cm}^3/1 \text{ m}^3)$$

$$K = 0.1818 \text{ cal/m}^\circ\text{C s}$$

$$(\text{cal/m } ^\circ\text{C s}) * (1 \text{ Watt}/0.23898 \text{ cal/s})$$

$$K = 0.7610 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

Realizando los mismos cálculos con los valores correspondientes para difusividad térmica a diferentes temperaturas y grados de salinidad, C_p y densidad a diferentes grados de salinidad, obtenemos: K en $\text{W/m}^\circ\text{C}$

K (agua pura, 34.5°C) =	0.87
K (agua pura, 50.7°C) =	0.88
K (NaCl 50% saturación, 17.2°C) =	0.60
K (NaCl 50% saturación, 30°C) =	0.62
K (NaCl 50% saturación, 39.5°C) =	0.70
K (NaCl 90% saturación, 17.2°C) =	0.47
K (NaCl 90% saturación, 30°C) =	0.63
K (NaCl 90% saturación, 39.5°C) =	0.84

De la arcilla extraída del prototipo de estanque solar, después de 4 meses de estar funcionando bajo la influencia de la salmuera caliente saturada, los valores de conductividad obtenidos son:

K	(16.5 °C)	=	0.53	W/m°C
K	(30.0 °C)	=	0.57	" "
K	(40.4 °C)	=	0.56	" "

METODO EXPERIMENTAL PARA LA DETERMINACION DE K (EC. *Fourier*)
Otra alternativa experimental que se estudió e implementó, es una variación del método propuesto en la referencia 19, - que utiliza una resistencia eléctrica como fuente de calor, la muestra de arcilla compactada en forma de un disco, una fuente de poder de corriente directa y un multímetro que sirve para medir la resistencia y el voltaje, y calcular con ello el calor entregado por la fuente de poder.

La muestra es aprisionada entre dos placas metálicas del mismo diámetro del disco de arcilla y es colocada sobre la resistencia, colocando termopares en ambas caras de la muestra e introduciendo todo este sistema en un cubo de material aislante, para minimizar las pérdidas a los alrededores y - que el calor cedido por la resistencia solo fluya a través de la arcilla, como se muestra en la figura 33.

El aislante utilizado fue un cubo de poliestireno (unicel) -

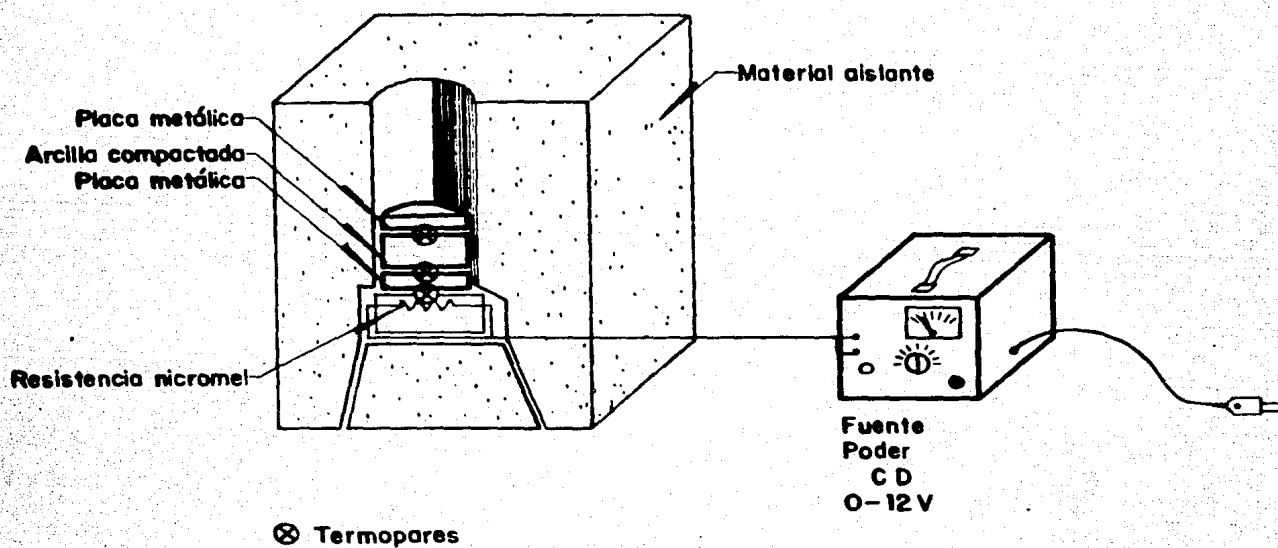


Fig 33 Esquema del instrumento para medir conductividad térmica

en cuyo centro se practicó una horadación cilíndrica con un diámetro igual al de la prueba Proctor Estandar (aproximadamente 10 cm), quedando una pared alrededor de esta horadación de por lo menos 30 centímetros de espesor, lo mismo que para el fondo.

La resistencia eléctrica es un alambre de nicromel en espiral, que a una temperatura de 50 °C registra una resistencia de 2.98 ohms. Mediante la fuente de poder se le aplicó un voltaje de 2.5 volts, con lo que pasado un cierto tiempo alcanzó el sistema el equilibrio térmico, con una temperatura de 50 °C en la base metálica. En este estado se obtuvieron las temperaturas de ambas caras de la muestra mediante termopares.

El calor suministrado se calcula de la siguiente manera:

$$I = \frac{V}{R}$$

$$P = VI = \frac{V^2}{R} \quad (\text{Watts})$$

$$P = 2.09 \text{ watts}$$

donde

Voltaje = V = (volts)

Resistencia = R = (ohms)

Potencia = P = (watts)

Corriente = I = (amperes)

Como las pérdidas térmicas a los alrededores solo son minimi

zadas, mas no eliminadas ni compensadas, se hace necesario calibrar el sistema, haciéndolo funcionar con la horadación tapada con el mismo material aislante y aplicando un pequeño voltaje con la misma resistencia eléctrica, hasta alcanzar una temperatura constante de 50 ° C, o sea, el estado de equilibrio donde la entrada de calor se iguala a las pérdidas térmicas. La potencia calculada para esta calibración se restará de la potencia que se mide cuando se monta el sistema sin tapar la horadación.

Para este caso, los resultados obtenidos son:

Voltaje = 0.9 Volts

Resistencia = 2.98 ohms.

Potencia (Pérdidas) = 0.27 watts

Calor que atravieza la arcilla = 209 - 0.27 = 1.82 watts

Conociendo el área de la sección transversal de la muestra, el espesor de la misma y el gradiente de temperaturas obtenido entre la cara superior e inferior, la conductividad térmica se calcula de la siguiente manera:

$$K = \frac{(q) (\Delta x)}{(A) (\Delta T)}$$

Donde

q = 1.82 watts

A = 0,00817 m²

$$\Delta x = 0.40 \text{ m.}$$

$$\Delta T = ^\circ\text{C}$$

$$K = \text{W/m}^\circ\text{C}$$

Las pruebas se realizaron para diferentes muestras de arcilla, preparada con agua pura, salmuera de NaCl al 50% de saturación y salmuera de NaCl al 90% de saturación, donde únicamente se obtuvieron diferentes valores de ΔT , ya que el espesor, área y calor permanecen constantes. Las mediciones se realizaron un mínimo de tres veces para obtener valores promedio del ΔT observado para cada caso, la T promedio de arcilla fue de 45°C

Los resultados obtenidos son:

Arcilla preparada con Agua pura	$\Delta T = 10.55^\circ\text{C}$	$K = 0.84$	$\text{W/m}^\circ\text{C}$
Salmuera 50 %	$\Delta T = 11.85^\circ\text{C}$	$K = 0.75$	$\text{W/m}^\circ\text{C}$
Salmuera 90 %	$\Delta T = 11.05^\circ\text{C}$	$K = 0.80$	$\text{W/m}^\circ\text{C}$

VALORES DE CONDUCTIVIDAD TERMICA REPORTADOS EN LA LITERATURA PARA DIFERENTES SUELOS.

La conductividad térmica de las arcillas depende de la composición y estructura mineral de la arcilla, la densidad, la humedad y la temperatura.

Hasta ahora diversos autores han desarrollado ecuaciones empíricas o semiempíricas para calcular la conductividad térmica de diferentes tipos de suelos a diferentes humedades y densidades dentro de un cierto rango de temperaturas.

Todas estas ecuaciones estan basadas en las suposiciones simplificadas respecto a la geometría de las partículas en contacto. Estas varian desde las ecuaciones puramente empíricas como la de *Kersten* hasta las que se pueden considerar como ecuaciones más teóricas como las de *De Vries* y *Maxwell-Burger Eucken*.

Ninguna de estas ecuaciones pueden dar resultados fidedignos consistentes ya que solo fueron probadas por sus autores para suelos específicos, al generalizarlas para diferentes arcillas, arrastran errores considerables, aunque pueden dar una idea del orden de magnitud del valor de la conductividad térmica; por lo que en general se recomienda hacer mediciones experimentales de la arcilla que se vaya a utilizar.

Kersten (ref. 10) obtuvo la siguiente ecuación empírica para calcular la conductividad térmica en suelos arcillosos y limosos.

$$K = (1.3 \log_{10} (\text{cont. de humedad}) - 0.29) 10^{0.01S - 3}$$

esta fórmula es válida para suelos no congelados y con un contenido de más de 50 % de arcilla y limo. En esta ecuación *K* está en $\text{W/cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ por centímetro. "*S*" es la densidad seca en lb/ft^3 y el contenido de humedad se toma como un porciento del peso del suelo seco.

Gemant (ref. 13) toma en cuenta el efecto de la densidad, temperatura, composición arena-arcilla y tamaño de partícula para desarrollar su modelo y obtiene la resistividad térmica, es decir, el inverso de la conductividad térmica

$$r = \frac{1}{K} = \left(\frac{1-a}{a}\right)^{4/3} \frac{\tan^{-1} \left(\frac{K_s - K_w}{K_w} \right)^{1/2}}{\left(\frac{m}{2}\right)^{1/3} k_w (k_s - K_w)^{1/2}} + \frac{1 - z_w}{K_s a} f \left(\frac{b^2}{a} \right)$$

donde: $k_s = 58.4 - 0.33p$ = Conductividad Térmica del sólido

p = % de arcilla en la mezcla arena-arcilla

$K_w = 6.00$ = Conductividad Térmica del agua.

m = Contenido de humedad en %

$$z_w = \frac{m}{2b^2}$$

$f\left(\frac{b^2}{a}\right)$ es una función experimental de dimensiones lineales de "a" y "b".

K , K_s y K_w están medidas en 10^{-3} W/cm² °C por cm.

$$a = 1.42408 - 0.00465p$$

$$b = 0.41920 - 0.00313p$$

Sin embargo, Makowsky y Mochlinsky (ref. 13) concluyen que la ecuación de Gemant, se puede reducir a

$$K = (a \log_{10} m + b) 10^{0.01s - 3}$$

dandonos K en W/cm² °C por cm.

Donde los valores de a y b son los mismos que para la ecuación de Gemant.

Makowsky y Mochlinsky (Ref.66) formaron un nomograma para obtener la conductividad térmica como función del contenido de arcilla, la densidad seca y el porciento de humedad en la arcilla. Dicho nomograma se presenta en la figura 34.

En la misma referencia 13 se presenta una tabla donde se muestran los diferentes valores que se obtienen para una cierta arcilla aplicando las distintas ecuaciones (Tabla 5).

Por otro lado, De Vries (Ref. 38) reporta los siguientes resultados:

Conductividad Térmica en $W/m^{\circ}C$

Temperatura $^{\circ}C$ Cont de Hume- dad en %	20	40	60	80
0	0.31	0.31	0.31	0.35
5	0.50	0.65	0.75	1.00
10	1.00	1.25	1.62	2.28
15	1.12	1.34	1.68	2.24
20	1.25	1.37	1.69	2.19

Cuando se requiera que el valor de la conductividad térmica no sea muy preciso, la tendencia es tomar un valor aproximado para suelos en general, por ejemplo, en la referencia 39 (Carslaw

Tabla 5. Cálculo de la conductividad Térmica de Suelos Húmedos.

(W/m°C)

Suelo	Humedad % Peso	Densidad seca (lb/ft ³)	Mickley	Gemant	Burger Eukén	Kersten	Nomograma
Cuarzo Molido	1.9	102.8	2.31	0.39	1.81	0.913	0.85
	4.3	102.7	2.35	1.22	1.87	1.30	1.34
	2.1	119.6	2.85	1.10	2.47	1.42	1.35
	3.7	120.2	2.91	1.97	2.53	1.83	1.95
Arena fina	4.1	99.8	2.25	1.14	1.19	1.19	1.30
	11.8	111.9	2.77	1.99	1.52	2.18	2.00
	14.0	112.8	2.86	1.60	1.68	2.33	2.15
Arcilla Curada	10.7	83.6	1.26	0.84	1.05	0.72	0.88
	22.7	83.6	1.38	1.14	1.17	1.01	1.10
	34.8	80.6	1.46	1.23	1.24	1.02	1.15
Barro	7.49	75.5	1.41	0.786	0.87	0.48	0.85
	14.8	69.2	1.34	0.892	0.85	0.61	0.90
	25.2	77.3	1.62	1.37	1.04	0.91	1.25
Arcilla Limosa	30.0	70	1.00	0.826	0.96	0.817	0.765
	50.0	70	1.17	0.980	1.11	0.963	0.88
	18.0	110	1.66	1.580	1.55	1.67	1.62

y Jaeger) consideran que un valor representativo es de $0.96 \text{ W/m}^\circ\text{C}$.

Para los datos que tenemos de nuestra arcilla utilizada (Arcilla de Queretaro), los cuales son:

Contenido de Humedad = 36 %

Densidad seca = 84.2 lb/ft^3

% de arcilla en la mezcla = 98 %

Se obtienen los siguientes valores calculados de conductividad térmica, para las ecuaciones correspondientes:

<i>Kersten</i>	1.204	$\text{W/m}^\circ\text{C}$
<i>Gemant</i>	2.968	$\text{W/m}^\circ\text{C}$
<i>Makowsky</i>	1.125	$\text{W/m}^\circ\text{C}$

7. CONSIDERACIONES SOBRE EL COMPORTAMIENTO QUIMICO DE LAS ARCILLAS

Para entender el comportamiento químico de las arcillas frente a las salmueras, es necesario revisar algunos aspectos relativos a su composición y estructura.

COMPOSICION MINERALOGICA.

Las partículas arcillosas son, casi sin excepción, producto del intemperismo de rocas, mientras que los granos de arena o grava son fragmentos de minerales predominantes de la fuente y erosionados por el transporte (Ref. 40). En los suelos abunda el cuarzo, son relativamente pequeñas las cantidades de feldspato y mica, y menor aún son las de otros minerales como piroxenos, anfíboles, etc; los depósitos residuales del tró-

pico se distinguen por la presencia de óxidos de fierro y aluminio. La causa de la distribución selectiva de minerales es la solidez de su estructura cristalina (Ref. 58).

Los elementos de la fracción arcillosa (diámetro menor a 0.2 micras) son partículas planas, aciculares o helicoidales, compuestas por series de dos hojas (una de sílice y otra de gibsita o brucita), o bien, por tres hojas (dos tetraédricas y una intermedia octaédrica); la combinación de estas estructuras moleculares con las variantes producidas por la sustitución isomorfa (cambio de Silicio o Magnesio por otro mineral), constituye la estructura cristalina de las partículas. Además en la naturaleza abundan otros materiales arcillosos, los alófanos, que no exhiben arreglo estructural y no tienen composición definida; son formas típicas en los suelos de origen volcánico (cenizas). La tabla 6 es un resumen de los tipos principales de minerales arcillosos (Ref. 40).

SUPERFICIE ESPECIFICA.

Los suelos cohesivos se distinguen por un cambio importante en la forma de los sólidos al pasar de la fracción gruesa a la fina, además del tamaño. Ambos factores explican la notable diferencia que existe en cuanto a la superficie específica (a_m = área total de las partículas o granos por unidad de masa, expresada en m^2/gr). La tabla 7 presenta valores de a_m

TABLA 6. Resumen de características de algunos minerales arcillosos.
(Ref. 40)

b-grupo	Mineral	Fórmula por celda	Capa octaédrica	Capa Tetraédrica	Sustitución Isomorfa	Forma
Alfano	Alfano	Amorfo	---	---	---	Irregular algo redondeado.
G S	Caolinita	$(OH)_8 Si_4 Al_4 O_{10}$	Al_4	Si_4	Poca	Placas hexagonales.
	Haloisita (hidratada)	$(OH)_8 Si_4 Al_4 O_{14} \cdot 4H_2O$	Al_4	Si_4	Poca	Tubos
Montmorililita.	Montmorililita.	$(OH)_4 Si_4 (Al_3 Mg_3) O_{20} \cdot nH_2O$ $Na^{0.66}$	$Al_{3.36} Mg_{.56}$	Si_8	Al por Mg carga neta 0.66/unidad	Placas equidimensionales
Ca hidrata	Ilita	$(K, H_2O)_2 Si_2 (Al, Mg, Fe)_4 O_{20} (OH)_4$	$(Al, Mg, Fe)_{4-6}$	$(Al, Si)_8$	Algunos silicios siempre reemplazados por Al. Compensado por K entre capas.	Placas

= Silice u hoja tetrahédrica

G = Gibsita u hoja tetrahédrica

TABLA 7.- Superficie específica vs. granulometría. (Ref. 41)

Material	Diámetro nominal d_n (mm)	Superficie específica a_m (m^2/g)
Arena	5×10^{-1}	0.5×10^{-2}
Limo	5×10^{-2}	0.2
Arcilla	kaolinita 2×10^{-3}	10 - 20
	halosita	37 - 70
	ilita	65 - 100
	montmorilonita 1×10^{-4}	50 - 800

para diámetros nominales variables de 5×10^{-1} a 1×10^{-4} mm, que comprenden los tamaños de arenas, limos y arcillas (Ref. 41). El extraordinario incremento de la superficie específica en las arcillas con respecto a los valores típicos de una arena o un limo, así como las diferencias de a_m entre diferentes minerales arcillosos, son determinantes de los fenómenos de interacción fisicoquímica.

FUERZAS ELECTRICAS ENTRE PARTICULAS.

Las caras, aristas y esquinas de cada partícula arcillosa exhiben cargas eléctricas negativas debido a la incompleta neutralización de los átomos alojados en dichas fronteras. En presencia de la fase líquida, esas cargas son compensadas por iones disueltos, en su mayoría cationes, que se distribuyen sobre las superficies expuestas y, en ciertos casos, penetran en la partícula arcillosa. Dichos iones no forman parte de la estructura cristalina y pueden ser reemplazados por otros cationes y aniones, siendo este fenómeno de intercambio fuente de variaciones significativas en el comportamiento mecánico de arcillas. Así como de su comportamiento en sus propiedades térmicas.

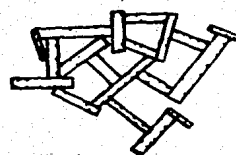
Las partículas cargadas eléctricamente al aproximarse durante un proceso de sedimentación natural o mecánico de compactación generan fuerzas de repulsión (Born) y de atracción (Van der

Walls) que varían con la distancia. La resultante de ambas acciones, una vez alcanzado el equilibrio, constituye un esfuerzo de cohesión, característico de los materiales arcillosos.

ESQUELETO SOLIDO.

De acuerdo con su definición, es el arreglo geométrico que adoptan las partículas y granos componentes del suelo, reflejo de la composición granulométrica, características de los sólidos y del agua intersticial, y del proceso de formación e historia de cargas a que ha sido sometido.

Refiriéndose a las partículas arcillosas, particularmente a las aplanadas, Lambe (Ref. 42) distingue dos formas principales de asociación: floculenta y dispersa (fig. 35). Entre ellas existe gran variedad de posibilidades, siendo la orientación de las partículas el parámetro significativo. Por su parte, Van Olphen (Ref. 43) propone diferentes arreglos basados en la posibilidad de liga entre partículas (cara-cara, cara-arista y arista-arista). El microscopio electrónico ha permitido observar algunas de las formas de agregación antes mencionadas, pero en general el esqueleto sólido es extraordinariamente complejo y variable, debido a la presencia de granos (arena) y al ambiente químico que prevalecía durante la formación de la matriz arcillosa. De ahí las observaciones de Barden y Sides (Ref. 44) sobre macro y microestructura de suelos cohesivos basados en estudios de microscopía electrónica. Si



Estructura floculenta



Estructura dispersa

Fig 35 Modelo de Lambe para el esqueleto sólido de una arcilla
(Lambe, 1959)

bien, los granos del tamaño de las arenas tienen un efecto pronunciado en la distribución y arreglo de las partículas arcillosas, dentro de los límites especificados al definir un suelo cohesivo, es muy probable que la estructura de la fracción fina sea la determinante de su comportamiento mecánico. Esta es la razón, para pensar que el modelo de Lambe, aunque se trate de una concepción muy simplificada del esqueleto sólido, haya facilitado la interpretación cualitativa de resultados diversos que se han obtenido ensayando materiales arcillosos naturales o compactados.

Los procedimientos para medir la orientación de las partículas y los cambios inducidos por diferentes métodos de compactación o a la aplicación de esfuerzos cortantes, requieren de técnicas especializadas (la información lograda en un número limitado de casos carece de la precisión esperada).

Por el momento, los métodos directos propuestos para investigar el esqueleto sólido han sido infructuosos. De ahí la preferencia por la medición indirecta de ciertos parámetros que dependen del arreglo geométrico de las partículas (Ref. 45).

FRACCIONES INERTE Y ACTIVA

De las consideraciones expuestas en los incisos anteriores, se concluye que la fracción gruesa de un suelo cohesivo (inte

grado por granos de composición mineralógica heterogénea, forma predominantemente equidimensional y pequeña superficie específica) constituye una estructura primaria, en general, inconexa, alrededor de la cual la fracción fina desarrolla su esqueleto sólido afectado por la existencia de fronteras irregulares (granos) y la acción mecánica que los granos imponen en la orientación de las partículas de arcilla, cuando el suelo se compacta. Además el esqueleto de matriz arcillosa está condicionado por la composición y cantidad de agua intersticial, y como los fenómenos de adsorción y ósmosis son procesos de difusión, cabe suponer que el tiempo es un factor significativo en el arreglo estructural de las partículas.

Con base a estos razonamientos se infiere que la fracción fina es el material activo y regulador principal de las propiedades mecánicas de un suelo cohesivo, mientras que la fracción gruesa desempeña las funciones de una sustancia inerte. Aún cuando es un tanto arbitraria la división establecida por la malla No. 200 entre las fracciones gruesa y fina (Ref. 43), se estima que ella es aceptable, a menos que, el porcentaje de limo sea tan elevado que reduzca notablemente la acción de las partículas de arcilla. Tales reflexiones nos permiten concluir que la investigación de suelos compactados debiera conducirse por dos etapas, por lo menos:

- 1) Con arcillas que no contengan granos arenosos, para estu-

diar las características fundamentales de su comportamiento, y

- 2) Con mezclas de dichas arcillas y diferentes porcentajes de la fracción gruesa, a fin de conocer su influencia en las propiedades respectivas.

FASE LIQUIDA

Los huecos del esqueleto sólido pueden estar total o parcialmente ocupados por agua, la que en general tiene iones disueltos. La relación del peso del agua al de sólidos de cierto volumen de suelos, expresada en porcentaje, es como ya se dijo, la humedad o contenido de agua y el porcentaje de volumen ocupado por el agua al total de vacíos es el grado de saturación.

ESTRUCTURA DEL AGUA.

La distribución asimétrica de las cargas eléctricas hace que la molécula de H_2O se comporte como un dipolo e interaccione con las vecinas; cada protón de hidrógeno, aún cuando está fuertemente vinculado al oxígeno de una molécula de H_2O , es atraído por el átomo de oxígeno de otra molécula cercana, constituyendo esta acción secundaria lo que se conoce con el nombre de liga de hidrógeno o puente de hidrógeno (Ref. 41); es

por ello, que el agua puede considerarse un polímero de moléculas asociadas entre sí por el hidrógeno. La estructuración es completa y del tipo exagonal en el caso de cristales de hielo, pero se conoce poco sobre el arreglo que adoptan las moléculas de agua en estado líquido. La diferencia entre los calores latentes de fusión (80 cal/gr) y de vaporización (540 cal/gr), revela la magnitud de las fuerzas que operan entre las moléculas del agua a través de las ligas de hidrógeno. Es evidente la importancia de estas ligas en los complejos fenómenos de interacción sólido-líquido.

ADSORCION

En la interfase de dos sustancias, debido a las fuerzas de atracción o repulsión que inducen las moléculas de ambos medios, ocurre un aumento o disminución de la densidad con respecto a la que tienen las fases en su interior, lejos de dicha frontera. Si el proceso es irreversible se produce adsorción química, pero si el cambio no es permanente se denomina adsorción física. Esta última es la condición que se presenta entre el agua intersticial y las partículas de un suelo, siendo las ligas de hidrógeno las promotoras de la estructuración molecular en la capa adsorbida. La adsorción entre agua y partículas arcillosas es exotérmica, y por lo tanto, hay liberación del llamado calor de humedecimiento.

TRANSPORTE DE SOLUTOS

El movimiento de solutos está regido por algunos mecanismos, en suelos muy porosos el más importante es el causado por el flujo de agua subterránea. Los solutos que no interactúan con el medio poroso, son arrastrados por el agua a una velocidad igual a la velocidad de filtración. Este proceso es llamado advección o convección.

La dispersión mecánica de los solutos es causada por las desviaciones de la velocidad promedio de filtración.

La difusión molecular es el movimiento de solutos de altas concentraciones a zonas de bajas concentraciones. Por lo general, nunca se dan aislados los procesos de advección o de difusión, salvo en casos muy especiales. Ambos procesos van acoplados, por lo que se requiere para obtener el movimiento efectivo de solutos, definir el coeficiente de dispersión "D" o coeficiente de difusión efectivo (Ref. 54) que reúne ambos efectos.

Diversos trabajos analíticos han sido desarrollados para determinar el coeficiente de difusión efectivo que da una buena estimación para los perfiles de migración Na^+ y Cl^- , en comparación con los medidos experimentalmente en laboratorio y en campo (Ref. 57).

Una de las soluciones analíticas propuestas para la ecuación de transporte unidimensional de solutos, en el que están acoplados, tanto advección como difusión, esta dada por Ogata - (Ref. 60). La ecuación de transporte mencionada tiene la siguiente forma:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_s \frac{\partial C}{\partial x}$$

donde: C = concentración de solutos

D = coeficiente de difusión efectiva.

v_s = velocidad promedio de filtración.

t = tiempo

x = distancia

El coeficiente D esta descrito por la ecuación:

$$D = \beta v_s + D'$$

donde β = Dispersividad del medio poroso.

D' = Coeficiente de Difusión.

El proceso predominante a altas velocidades de filtración es la advección, mientras que la difusión es el mecanismo dominante a bajas velocidades de filtración.

En el caso de arcillas compactadas donde se registran muy bajas velocidades de filtración, el proceso de difusión domina y el coeficiente de difusión efectivo es igual al coeficiente de difusión.

A partir de datos obtenidos de modelos experimentales con una cierta arcilla, de concentración a diferentes distancias, velocidad de filtración y tiempo, podemos conocer el coeficiente D y una vez con este podemos determinar el espesor de una manera aproximada - recomendable para controlar la concentración de solutos durante cierto tiempo para la arcilla estudiada.

En la referencia 57 señalan que para el suelo estudiado por ellos el valor apropiado para el coeficiente de difusión efectiva para Cl^- varía de 6 a $10 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{seg}$, mientras que para el Na^+ , D varía desde 2.5 hasta $3.5 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{seg}$, para una temperatura promedio de laboratorio de 20°C .

La ecuación señalada de transporte anteriormente, ha sido aplicada a sistemas donde la temperatura no varía con la distancia, lo cual es aceptable en sistemas que trabajan a temperaturas cercanas a la ambiental, sin embargo, en un estanque solar existe un marcado gradiente térmico en la arcilla que no se puede despreciar ni tomar las propiedades a una temperatura promedio ya que es sabido que la difusión molecular varía con la temperatura, así como también las demás propiedades, por ende sería

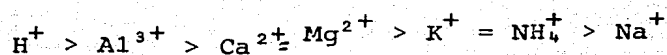
necesario hacer un estudio amplio y profundo, sobre un modelo matemático que tomará en cuenta el efecto de la temperatura en cada una de las propiedades involucradas, no encontrándose hasta el momento, literatura al respecto, solo sabiéndose de un proyecto de desarrollo en el Instituto de Ingeniería en la Universidad Nacional Autónoma de México.

INTERCAMBIO CATIONICO Y ANIONICO.

Algunos conceptos comunes para suelos salinos y/o salinos-sódicos son:

CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO (CIC)

La capacidad de intercambio catiónico se define como la suma de todos los cationes intercambiables adsorbidos por 100 g de suelo seco cuando la capacidad de intercambio se utiliza completamente. Las unidades son meq/100 g de suelo. Este parámetro se debe a que las partículas del suelo, que tienen una carga neta negativa (arcilla y materia orgánica), adsorben y retienen cationes como consecuencia de las cargas eléctricas que existen en su superficie. Las energías de adsorción de varios cationes varían de la siguiente forma



Una vez que los cationes adsorbidos se han combinado químicamente con las partículas del suelo, pueden ser reemplazados por los cationes que se encuentran en la solución del suelo. Esta reacción, según la cual un catión en solución reemplaza a un catión adsorbido, se llama intercambio de cationes.

PORCENTAJE DE SATURACION DE BASES (SB)

Es la proporción de la CIC ocupada por otros cationes distintos al hidrógeno y aluminio, la que a su vez determina la capacidad de adsorber cationes de un suelo sin usar.

$$SB = \frac{(Ca^{++}) + (Mg^{++}) + (Na^+) + (K^+)}{CIC}$$

donde: () = meq/100 g de suelo seco.

El porcentaje de saturación de bases está directamente relacionado con el pH del suelo.

PORCENTAJE DE SODIO INTERCAMBIABLE (PSI)

Se refiere a la proporción de CIC ocupada por el sodio; es decir:

$$PSI = \frac{(Na^+)}{(Na^+) + (Ca^{++}) + (Mg^{++}) + (K^+)} \times 100$$

donde: () = meq/l.

CONDUCTIVIDAD ELECTRICA (CE)

Se define como el recíproco de la resistividad, r , que se experimenta con el flujo de una corriente a través de una solución acuosa, cuando se sumergen dos electrodos paralelos. Simbólicamente se representa como

$$CE = \frac{1}{r} = \frac{1}{\text{ohm cm}} = \frac{\text{mho}}{\text{cm}}$$

La conductividad eléctrica se ha identificado con un contenido de sales y un valor de presión osmótica del suelo de acuerdo con la siguiente relación.

Donde CE esta

Concentración de sales, ppm = 651 x CE, en mho/cm

Donde CE esta

Presión osmótica, atm = 0.35 x CE, en mho/cm

Al determinar las conductividades, ya sea del agua aplicada a un suelo, o del extracto de saturación del mismo, se puede diagnosticar rápidamente el estado de dichos sistemas.

La conductividad eléctrica de los suelos puede clasificarse conforme a la tabla 8.

TABLA 8.- Clasificación del suelo de acuerdo con su conductividad eléctrica. (Ref. 46)

Salinidad	Conductividad eléctrica mmho/cm
Normal	menos de 2
Media	de 2 a 4
Excesiva	mayor de 4

RELACION DE ADSORCION DE SODIO (RAS)

Es un parámetro que se calcula para el extracto del suelo y - agua que esta en contacto con este; se usa para expresar la actividad relativa de los iones sodio en reacciones de intercambio con el suelo.

$$RAS = \frac{(Na)^{+}}{[(Ca)^{++} + (Mg)^{++}]/2}$$

donde las concentraciones de los iones se expresan en miliequivalentes por litro.

SALINIDAD POTENCIAL

Se define como la concentración de cloruro más la mitad de la concentración de sulfato, expresado en meq/1 (Ref. 47).

$$SP = (Cl)^{-} + \frac{1}{2} (SO_4)^{=}$$

CARBONATO DE SODIO RESIDUAL (CSR)

Cuando las aguas contienen una alta concentración de iones bicarbonato, el riesgo de que la proporción relativa de sodio aumente es mayor, lo que conduciría a que se presentara una tendencia del calcio y del magnesio a precipitarse como carbonatos.

El CSR se calcula como

$$CSR = CO_3^{=} + HCO_3^{-} + Ca^{++} + Mg^{++}$$

donde las concentraciones se expresan en meq/1 (ref. 47).

INTERCAMBIO CATIONICO Y ANIONICO.

El tipo y concentración de cationes disueltos en el agua intersticial deben modificar apreciablemente las fuerzas que se generan en la doble capa, causa de cambios en las propiedades fisicoquímicas del suelo. El intercambio de unos cationes por

otros de igual carga eléctrica no afecta la estructura cristalina de las partículas arcillosas.

Los cationes encontrados comunmente en suelos residuales y sedimentarios son Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ , en orden decreciente de abundancia; los aniones más frecuentes son SO_4^{2-} , Cl^- , PO_3^{3-} y NO_3^- . Las causas de intercambio iónico pueden ser:

- 1) Sustitución isomorfa (Si por Al en la hoja tetraédrica y Al por Mg en la octaédrica);
- 2) Ligas rotas, aristas o esquinas, y
- 3) Reemplazo de H por OH.

La capacidad de intercambio catiónico no es fija en cada tipo de arcilla; como puede constatarse en la tabla 9, en general son amplios los intervalos de variación de esta característica asociada con la composición mineralógica de las partículas.

Los iones son reemplazables y este proceso depende de la valencia, abundancia relativa de los diferentes cationes y tamaño de los mismos. Regularmente los cationes más pequeños tienden a desplazar a los mayores ($\text{Na}^+ < \text{Li}^+ < \text{K}^+ < \text{Rb}^+ < \text{Cs}^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+} < \text{Ba}^{2+} < \text{Cu}^{2+} < \text{Al}^{3+} < \text{Fe}^{3+} < \text{Th}^{4+}$), y por otra parte, los cationes trivalentes son retenidos con más firmeza que los divalentes y estos más que los monovalentes.

TABLA 9. CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO (Ref. 40).

Material arcilloso	Capacidad de intercambio (meq/ 100 g)
Caolinita	3 - 15
Haloisita (deshidratada)	5 - 40
Ilita	10 - 40
Nontronita y vermiculita	100 - 150
Montmorilonita	80 - 150

La velocidad de intercambio depende principalmente del tipo de arcilla, concentración iónica y temperatura. La reacción es casi instantánea en el caolín mientras que tarda horas en una illita.

Las arcillas pueden también adsorber cationes y aniones orgánicos; este aspecto es muy importante en los suelos, pero ha sido poco investigado.

El conocimiento sobre intercambio aniónico es limitado. Se cree que con pH bajos, las aristas y esquinas de las partículas presentan cargas eléctricas positivas que provocan la atracción de aniones. Por ejemplo, se usan tanatos para restringir la floculación y estabilizar lodos de perforación.

Los cambios en la concentración del agua intersticial no alteran el equilibrio iónico de la capa adsorbida si la concentración:

- 1) de iones monovalentes guarda una relación igual a la unidad
- 2) es la raíz cuadrada de la cantidad de iones divalentes, o
- 3) resulta la raíz cúbica de los trivalentes. (Ref. 43).

Cuando la doble capa, por ejemplo tiene Na^+ y Ca^{2+} en la misma proporción y se duplica la concentración de Na^+ en la solución (agua libre), a fin de evitar alteraciones en el equilibrio iónico será necesario cuatriplicar la cantidad de Ca^{2+} .

Una forma de la ley de Gapon (Ref. 40) de interés en Mecánica de Suelos es la siguiente:

$$\left[\frac{\text{Na}^+}{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}} \right]_s = c \left[\frac{\text{Na}^+}{[(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/2]^{0.5}} \right]_e$$

donde las concentraciones deben expresarse en miliequivalentes por litro. El cociente del segundo miembro es la RAS (Relación de adsorción de sodio). Conocida la composición de la solución libre (e), puesto que $c = 0.017$ para la mayoría de los suelos (Ref. 40), es posible estimar con esta ecuación la relación cuantitativa de iones mono y divalentes en la doble capa (s). Estudios sobre arcillas dispersivas (Ref. 48) indican que la proporción de sodio en la capa adsorbida tiene influencia importante en la estabilidad estructural del suelo. Se define el parámetro PSI (Porcentaje de sodio intercambiable) como un índice de dicha estabilidad mediante el cociente de la concentración de Na y la capacidad de intercambio catiónico, expresada en porcentaje.

Arcillas con un PSI mayor de 2 por ciento son susceptibles de dispersión espontánea en agua. Las relaciones RAS y PSI están íntimamente vinculadas en gran número de suelos, de modo que se puede estimar RAS a partir de PSI.

GRADIENTES TERMICOS Y QUIMICOS.

Los gradientes térmicos y químicos que existen a través de un

relleno sanitario y algunos recubrimientos de depósitos de - desperdicios industriales pueden llegar a 40 o hasta 70°C durante la estabilización (Ref. 40), mientras que la salmuera almacenada en estanques para el desplazamiento de gases líquidos del petróleo desde las cavernas de almacenamiento salino subterráneo pueden alcanzar temperaturas de hasta 40°C. Los efectos de los gradientes térmicos en la velocidad de filtración, son sin embargo, insignificantes comparados con el gradiente hidráulico, excepto cuando existe un bajo grado de saturación (Ref. 50).

Los flujos acoplados de sal y agua de poro debido a los gradientes químicos osmóticos fueron investigados por Mitchell y colaboradores (Ref. 51) y fue solo detectable en arcillas muy activas como la bentonita. Desde luego, esto se puede deber a que en muchos casos los gradientes hidráulicos dominan el flujo de fluidos de poro.

COMPATIBILIDAD RECUBRIMIENTO - FLUIDO.

Reacciones químicas entre el líquido contenido y los materiales del recubrimiento pueden causar un rompimiento del recubrimiento, o que este llegue a ser más permeable debido a alteraciones estructurales. Procesos de daños físicos como la canalización, pueden acelerar la degradación del recubrimiento. Existe poca información detallada concerniente a la compati-

lidad recubrimiento-fluido a largo plazo.

Matrecon (Ref. 52) y Stewart (Ref. 53) han presentado el estado de la información existente hasta el momento. Los folletos de fabricantes de membranas pueden también recomendar combinaciones recubrimiento-fluido, pero estas están basadas en pruebas a corto plazo, o comparadas con la vida útil de un caso, o bien, de un sitio específico. Un breve sumario de los conocimientos actuales concernientes a la compatibilidad recubrimiento-fluido se presenta en la (Ref. 54) para los diferentes materiales de los recubrimientos, aquí se enfocará la información a las arcillas.

ARCILLAS COMPACTADAS.

Los ácidos y las bases pueden causar disolución de los recubrimientos de arcillas. Los ácidos disuelven aluminio, fierro, metales alcalinos y alcalinoterreos de los materiales de las arcillas, mientras que las bases disuelven la sílica (Ref. 54). Los suelos calcareos, rocosos y agregados son particularmente susceptibles a la disolución por ácidos.

Como ya se mencionó, la textura y estructura de las arcillas compactadas son fuertemente influenciadas por los cationes en los fluidos en los poros y por la estructura mineral de la arcilla durante la aplicación. Incrementos en la concentración

de cationes o valencia causada por la permeación de fluidos puede reducir el espesor de la doble capa difusa de la partícula de arcilla y luego disminuir las fuerzas repulsivas entre partículas. Esto puede provocar encogimiento y fisuramiento, además de incremento en la permeabilidad. La disminución en la concentración de cationes o valencias puede causar una tendencia hacia la dispersión y disminución de la permeabilidad (Ref. 40).

ANTECEDENTES SOBRE EL COMPORTAMIENTO QUIMICO DE ARCILLAS.

Los estudios científicos que se han efectuado sobre el comportamiento de las arcillas frente al paso a través de ellas de soluciones salinas, están enfocados en su mayoría a obtener información para poder diseñar un recubrimiento arcilloso de composición y espesor adecuado para evitar la contaminación de mantos acuíferos por escurrimientos que se presentan en los basureros municipales y en depósitos de desperdicios en general (Ref. 40, 54 a 57), por lo que los modelos experimentales trabajan a bajas temperaturas, alrededor de -20°C cercanas a la ambiental o a la registrada en el fondo de los depósitos de basura, y aunque están presentes pequeños gradientes térmicos en ellos, nunca serán tan notables como los que existen en los estanques solares; pero no se encontró ninguno de estos estudios que nos proporcionara información acerca del comportamiento químico de arcillas a altas temperaturas.

Sin embargo, se encontró en los artículos mencionados, información útil sobre la interacción entre arcillas y salmueras la cual se puede considerar en nuestro sistema, a reserva de verificar experimentalmente si el comportamiento reportado en dichas publicaciones, se conserva cuando el sistema trabaja con un gradiente térmico significativo.

En la ref. 57 se estudia el comportamiento de los tres tipos más comunes de arcilla que son la caolinita, montmorilonita e illita, cuando una lechada típica de los escurrimientos de basura pasa a través de una columna de mezclas arcilla-arena, dicha lechada contiene compuestos orgánicos solubles, aminas y sales, además por provenir de basura tiene metales pesados como Pb, Hg y Cd. El experimento fue diseñado de tal forma que se estudió el efecto químico y físico de la arcilla en forma aislada. De las tres arcillas usadas la montmorilonita resultó tener una mayor capacidad de disminución de contaminantes, coincidiendo con el hecho de que es la que tiene una mayor CIC (que para este caso es de 83.75 meq/100 g), le sigue la illita cuyo grado de disminución es menor y tiene una CIC de 20.5 meq/100 g, y finalmente la caolinita mostró ser la que menos disminuía los contaminantes con una CIC de 11.87 meq/100 g; en los tres casos las arcillas estaban saturadas con calcio, por lo que la concentración de calcio aumentó con respecto a la de la lechada original. Cabe hacerse notar que la disminución de contaminantes guarda una relación con la CIC por lo

que esta se vuelve un parámetro muy importante en el diseño de recubrimientos con arcillas.

Los autores agruparon los diferentes elementos en tres grupos de acuerdo al grado en que fueron adsorbidos por las arcillas; en primer lugar tenemos los que fueron altamente adsorbidos, tales como Pb, Cd, Hg y Zn, en el grupo de los que fueron moderadamente disminuidos se encuentran K, NH_4 , Mg, Si y Fe, y los que fueron pocos disminuidos son el Cl, Na y compuestos orgánicos solubles.

En la ref. 57 comparan el flujo de contaminantes en el suelo arcilloso que esta debajo de un basurero, en el que los datos obtenidos son en 12 años, con un modelo de laboratorio donde se reproduce el tirante hidráulico del basurero utilizando un suelo arcilloso similar al del basurero, pero en vez de lecha da de basura, se pone una solución de NaCl de 15 g/lit en agua destilada. De dicho experimento se ve que en el lapso de un año los cloruros avanzan más rápidamente que los iones sodio, balanceando las cargas con la composición natural de calcio y magnesio que contenía el agua de el suelo arcilloso.

Estos investigadores, de sus estudios concluyeron que para las condiciones específicas del lugar, en un tiempo de 100 años, la máxima profundidad de migración es de 3.5 metros. También realzan el hecho de que en comparación con la migración de clo

ruros las sustancias tóxicas avanzan a mucha menor velocidad. La prueba se realizó a una temperatura de alrededor de 20°C pero sin un gradiente térmico y no se reportan modificaciones en el suelo por la presencia de sales.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Análisis de Salmueras

Para tener una idea del avance la salmuera a través de la arcilla se midió el % de saturación de los efluentes; como se puede observar en la fig. 14, que se puede transformar a unidades de concentración por medio de la solubilidad del NaCl en agua, pero el instrumento utilizado solo esta diseñado para medir con precisión soluciones de NaCl, más sin embargo, nuestros efluentes, dado que se espera que exista un intercambio catiónico se deben de presentar diferentes tipos de iones, razón por la cual los datos de porcentaje de saturación no nos proporcionan suficiente información.

Para obtener una información más completa se analizaron químicamente los efluentes para detectar las cantidades de los principales iones como se puede ver en la tabla 10; los análisis fueron realizados en la facultad de Química, en donde se determina Na y K por flamometría, Ca y Mg por absorción atómica Cl^- por potenciometría y SO_4^{2-} por turbidimetría.

De los datos podemos hacer las siguientes observaciones:

- Se observó en general que el estanque retuvo o intercambió una gran cantidad de Na, ya que existe una gran diferencia entre la concentración de Na de la salmuera adicionada al estanque y los primeros efluentes. Posteriormente esta concentración tendió a aumentar, ya que inferimos que los fenómenos de intercambio, retención y/o disolución iban disminuyendo en magnitud al saturarse la arcilla, como el último dato resulta incongruente respecto a la tendencia observada y a la concepción del sistema, se piensa que esta última muestra puede estar contaminada y por lo tanto se desecha para los demás análisis. La misma tendencia es observada con el cloro.
- Por lo que respecta al Ca y Mg, vemos que las concentraciones que de estos aparecen en los efluentes están en cantidades significativas, ya que estos no se detectaron en la salmuera agregada inicialmente. La concentración de dichos iones disminuye en forma marcada a lo largo del tiempo lo que podría explicarse también por el agotamiento de la CIC de la arcilla.
- Se detectaron cantidades apreciables de sulfatos en los efluentes sin ninguna tendencia. Los iones potasio no fueron detectados por el flamómetro aunque se esperaba su presencia, por lo que se infiere que su concentración es menor a 1 ppm.

- Al final de la experimentación se realizaron los mismos análisis a la salmuera sobrenadante del estanque solar, y al comparar los datos obtenidos con los correspondientes a la salmuera original vemos que las concentraciones de Na^+ y Cl^- disminuyen, mientras que aparecen cantidades apreciables de Ca^{++} , Mg^{++} y $\text{SO}_4=$ lo que nos hace suponer que hubo difusión de iones del suelo hacia el líquido, lo cual es factible dadas las bajas velocidades de filtración.

Hubiera sido deseable analizar cuantitativamente la presencia de carbonatos pero esto no fue posible porque las muestras y el sistema tuvieron exposición prolongada a la atmósfera lo que invalidaría los resultados.

En general cabe señalar que el sistema no fue diseñado específicamente para analizar químicamente el comportamiento de la arcilla, ya que para cuantificar con exactitud los fenómenos de retención e intercambio iónico en dicha arcilla sería necesario obtener muestras de suelo extraídas del prototipo funcionando a diferentes espesores y tiempos, así como manejar adecuadamente dichas muestras.

Análisis del suelo.

Se mandaron analizar muestras del suelo arcilloso tanto del original como del extraído de las capas intermedia y superior

del prototipo de estanque solar al laboratorio de edafología de la Facultad de Ciencias donde se efectuaron las pruebas acostumbradas y cuyos resultados se muestran en las tablas 11 y 12.

Como ya se mencionó uno de los datos de mayor interés desde el punto de vista químico es la CIC (capacidad de intercambio catiónico) ya que es lo que nos da una idea cuantitativa del efecto que sobre un suelo puede tener una salmuera al estar en contacto con él.

Para suelos alcalinos como el nuestro, la forma adecuada de determinar la CIC es la siguiente (método por acetatos):

Un gramo de suelo se trata con una solución 1N, pH7 de NaCl, lavándolo 5 veces centrifugándolo y tirando el sobrenadante en cada ocasión. Se lava con alcohol etílico otras 5 veces para eliminar el NaCl que pudiera estar libre en la arcilla que ahora es sódica. Esta arcilla se mezcla con acetato de amonio 1N, pH7, para cambiar el sodio por el amonio, se recolectan estos nuevos sobrenadantes y se aforan a 100 ml, a los que se les determina la cantidad de Na^+ con un flamómetro. Dicha cantidad se reporta para 100 g multiplicándola por 100.

Para la arcilla original se obtuvo un valor de CIC de $36.2^{\text{meq/}}$ 100g. de acuerdo a la tabla 11. En la misma tabla se muestra

el análisis de textura; se puede ver que el suelo solo cont
ne 42% de arcilla, por lo que se clasifica como un suelo ar
cilloso. Dado que los demás componentes del suelo no inter-
cambian en forma significativa, se podría decir que la CIC
correspondiente a la pura arcilla resultaría tener un valor
de más del doble del reportado, por lo que caería por este -
concepto dentro del rango a las del tipo montmorilonita, co-
mo se puede ver en la tabla 9; sin embargo esto no es conclu-
yente para clasificar la arcilla de nuestro suelo, y sería
necesario para esto un análisis más profundo y cuidadoso por
diversos métodos además de la CIC, como son el análisis tér-
mico diferencial, difracción de rayos X y por microscopio e-
lectrónico.

Comparando la composición de iones de el líquido atrapado en
la arcilla, que viene reportada en las tablas 11 y 12 y ve-
mos que la cantidad de Na^+ es muchísimo mayor para las mues-
tras que tuvieron el efecto de la salmuera en el estanque so-
lar que para la arcilla original, lo que resulta lógico así
como también que la capa superior tenga mayor cantidad de Na^+
que la inferior, dado el avance lento de la salmuera a través
de la capa de suelo compactado.

Respecto a los otros iones no podemos sacar conclusiones rele-
vantes, ya que como se mencionó, el sistema no está diseñado
para observar el comportamiento químico del suelo, frente a

la acción de una salmuera saturada caliente de NaCl.

TABLA 10.

Resultados de los análisis químicos de los efluentes.

Fecha	Na ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁼
18-X-86	2.325	1.401	0.076	0.0	1.358	0.026
14-XI-86	3.925	1.225	0.060	0.0	2.368	0.034
21-XI-86	6.750	0.933	0.051	0.0	3.483	0.024
*3-XII-86	3.325	0.833	0.046	0.0	1.483	0.022
Salmuera interior est. sol. final exp						
16-XII-86	7.420	0.185	0.016	0.0	3.587	0.022
Salmuera inicial	8.400	0.000	0.000	0.0	3.692	0.000

NOTA.- Las concentraciones para cada columna son valores relativos.

* Serie de datos rechazados por incongruencia, posible contaminación por otras fuentes.

TABLA 11

**FACULTAD DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE BIOLOGIA
LABORATORIO DE EDAFOLOGIA**

Cuadro 1 Resultados de los análisis físicos de una arcilla original del estanque solar de Querétaro.

<i>Muestra</i>	<i>COLOR</i>		<i>D.A. g/ml</i>	<i>D.R. g/ml</i>	<i>POROSIDAD %</i>	<i>TEXTURA</i>		
	<i>Seco</i>	<i>Húmedo</i>				<i>% Arena</i>	<i>% Limo</i>	<i>% Arcilla</i>
1	10YR 4/1 Gris oscuro	10YR 3/1 Gris muy oscuro	1.07	2.01	47.0	28.0	30.0 Arcillosa	42.0

Cuadro 2 Resultados de los análisis químicos de una arcilla original del estanque solar de Querétaro.

<i>Muestra</i>	<i>pH en H₂O</i>			<i>pH en KCl</i>			<i>M.O. %</i>
	<i>1:2.5</i>	<i>1:5</i>	<i>1:10</i>	<i>1:2.5</i>	<i>1:5</i>	<i>1:10</i>	
1	8.1	8.2	8.6	7.5	7.4	7.7	0.55

Cuadro 3 Resultados de los análisis químicos de una arcilla original del estanque solar de Querétaro.

<i>Muestra</i>	<i>Ca⁺⁺</i>	<i>Mg⁺⁺</i>	<i>Na⁺</i>	<i>K⁺</i>	<i>CICT[†]</i>
		meq/100g de suelo			meq/100g de suelo
1	7.1	2.4	3.0	1.47	36.2

[†] Determinado por el método de cloruros.

TABLA 12

FACULTAD DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE BIOLOGIA
LABORATORIO DE EDAFOLOGIA

Cuadro 1 Resultados de los análisis físicos de una arcilla
del estanque solar de Querétaro.

<i>Muestra</i>	<i>COLOR</i>		<i>D.A.</i> g/ml	<i>D.R.</i> g/ml	<i>POROSIDAD</i> %	<i>TEXTURA</i>		
	<i>Seco</i>	<i>Húmedo</i>				% Arena	%Limo	%Arcilla
Inter*	10YR 4/1 Gris oscuro	10YR 3/1 Gris muy oscuro	1.31	2.17	39.6	20.0 Migajón	50.4 arcillo	29.6 limoso
Sup†	10YR 4/1 Gris osc. oscuro	10YR 3/1 Gris muy oscuro	1.53	2.15	28.9	24.0 Migajón	37.6 arcilloso	38.4

* Parte intermedia del suelo.

† Parte superior del suelo.

Cuadro 2 Resultados de los análisis químicos de una arcilla
del estanque solar de Querétaro.

<i>Muestra</i>	<i>pH en H₂O</i>			<i>pH en KCl</i>			<i>M.O.</i> %
	1:2.5	1:5	1:10	1:2.5	1:5	1:10	
Inter*	8.5	8.6	9.0	7.8	7.7	7.8	1.20
Sup†	8.5	8.6	9.0	7.8	7.7	8.0	1.06

* Parte intermedia del suelo.

† Parte superior del suelo.

Cuadro 3 Resultados de los análisis químicos de una arcilla
del estanque solar de Querétaro.

<i>Muestra</i>	<i>Ca⁺⁺</i>	<i>Mg⁺⁺</i>	<i>Na⁺</i>	<i>K⁺</i>	<i>CICT[‡]</i>	<i>CICT[§]</i>
		meq/100g de suelo			meq/100g de suelo	
Inter*	8.0	3.0	116.8	0.9	26.0	35.0
Sup†	7.0	6.0	152.2	1.28	26.6	35.0

* Parte intermedia del suelo ‡ Determinado por el método de cloruros.

† Parte superior del suelo. § Determinado por el método de acetatos.

8.- OTRAS APLICACIONES DE LAS ARCILLAS COMPACTADAS

De acuerdo a las propiedades observadas en las arcillas y a lo reportado en la literatura, podemos mencionar otras aplicaciones donde las arcillas pueden jugar un papel muy importante al usarlas como impermeabilizantes.

Es conveniente tratar de implementar el uso de arcillas compactadas como recubrimientos, ya que en México, abundan yacimientos naturales de diferentes arcillas, por lo que al usarlas se tendría un abatimiento de los costos, ya que se buscaría en las cercanías del lugar donde se desea aplicar el revestimiento un suelo arcilloso de buena calidad, por lo que aunque se utilizan grandes cantidades de arcilla, los gastos por transporte serían mínimos.

La tecnología de la aplicación de recubrimientos con arcilla

compactada, es simple y bien conocida, y la maquinaria que se utiliza para aplicarla es en cantidad prácticamente la misma o menor, respecto a los otros sistemas de impermeabilización.

Todas las arcillas sirven como impermeabilizantes, aunque existen unas mejores que otras, pero como ya se mencionó en capítulos anteriores las propiedades de las arcillas varían aún dentro de un mismo tipo; y aunque sus propiedades y comportamiento pueden calcularse en forma teórica, lo más conveniente es realizar pruebas con muestras de la arcilla que se va a utilizar. Una de las pruebas que se debe realizar siempre es la determinación de la humedad óptima de compactación, ya que con esta la arcilla muestra la mayor densidad volumétrica, menor permeabilidad y un mejor comportamiento mecánico; para determinar el espesor óptimo del recubrimiento de arcilla adecuado para las pérdidas de líquidos y/o migración de contaminantes, es necesario obtener el coeficiente de permeabilidad vertical.

Cuando la arcilla vaya a estar en contacto con aguas naturales o salobres, con pH cercano al neutro, no es necesario realizar pruebas de compatibilidad recubrimiento-fluido, sin embargo, si los líquidos son ácidos, alcalinos o no acuosos, es necesario, hacer pruebas experimentales para comprobar que el líquido no ataque o modifique en forma negativa las propiedades de la arcilla.

Acidos y bases pueden causar disolución de los componentes de las arcillas. Los ácidos disuelven aluminio, fierro, metales alcalino y alcalino-terreos, mientras que las bases pueden disolver la sílica.

Algunas de las aplicaciones de las arcillas compactadas como recubrimientos, además de la considerada para estanques solares, son:

- 1) Control de filtración: *en lagunas de enfriamiento*
en lagos existentes (sin necesidad de vaciarlos)
en lagunas de evaporación y cristalización.
en lagos recreativos y arquitectónicos.
en canales de riego.
- 2) Control de migración de contaminantes:
basureros municipales (desperdicios sólidos)
en desperdicios líquidos.
en canales de aguas negras
almacenamiento de líquidos diversos.

LAGUNAS DE ENFRIAMIENTO

Este sistema tiene como fin enfriar grandes volúmenes de agua, aprovechando para ello, la evaporación natural en contacto con la atmósfera, y este sistema se usa cuando se dispone de una gran área de terreno, prácticamente plana y su tamaño depende de las condiciones climatológicas del lugar, del flujo de agua y el ΔT .

El uso de las arcillas compactadas es principalmente para evitar grandes pérdidas de líquidos sin costos excesivos, tanto de material de impermeabilización como del líquido a enfriar.

En México existe un ejemplo de la aplicación de la arcilla compactada como impermeabilizante en lagunas de enfriamiento, en la *Planta Termoeléctrica de Río Escondido, Coahuila* (Ref. 9 y 59) en este sistema se concluyó que una capa de 0.6 mts. de arcilla, cumpliría satisfactoriamente los requerimientos de control de filtración que tendrían que ser menores a 1×10^{-5} cm/seg., se reporta un buen comportamiento de este revestimiento después de tres años de operación.

LAGOS EXISTENTES

Muchas veces los lagos artificiales y presas, presentan una vez que estan llenos filtraciones excesivas o mayores a las

esperadas, que pueden provocar daños a los alrededores o a las estructuras, además de pérdidas considerables de líquidos.

Para poder corregir esta situación, sin necesidad de secar el lago, se pueden agregar arcillas en suspensión, las que se depositan en el fondo formando una capa de menor permeabilidad y taponeando pequeñas grietas o zonas arenosas, en estos casos se usa principalmente la bentonita o arcillas de su tipo (Ref. 9) ya que estas tienen las características de hincharse cuando están en contacto con agua, por lo que al penetrar en los poros e hincharse se logra una impermeabilización más efectiva.

LAGUNAS DE EVAPORACION Y CRISTALIZACION

Estas lagunas se utilizan muy comunmente para las primeras etapas de concentración de salmueras provenientes de campos geotérmicos, salmueras extraídas del subsuelo, agua de mar, aprovechando la evaporación natural sin gastar energía y solo requiriendo áreas relativamente grandes, de acuerdo a los volúmenes manejados.

En estos casos lo importante de tener un buen recubrimiento impermeabilizante es para evitar las pérdidas de salmuera, ya que estas implicarían mayor gasto de bombeo, además de que la salmuera más concentrada se encuentra por lo general en

el fondo, y como ya fue discutido en el capítulo anterior, las arcillas compactadas en presencia de salmuera tienden a incrementar su impermeabilidad y en general son estables (Ref. 59).

Un ejemplo de este tipo de aplicación, en funcionamiento, es la Laguna de concentración y los vasos de cristalización de Cerro Prieto, B.C.N., teniendo una área total de recubrimiento de 800 000 m². En la etapa de proyecto se investigaron y probaron diversos impermeabilizantes en prototipos contruidos expresamente, siendo los principales el riego asfáltico y la arcilla compactada. Sin embargo, dadas las condiciones del terreno que presentaba una alta temperatura, deformabilidad e inestabilidad, formó grietas lo que ocasionó que el recubrimiento asfáltico fuera mucho más permeable que el recubrimiento de arcilla compactada. Finalmente después de las pruebas se llegó a la conclusión de impermeabilizar con un recubrimiento arcilloso de 40 cm. de espesor, que quedará protegido mecánicamente contra desecación mediante una capa de sal de 50 cm. de espesor que se formará progresivamente en el fondo de los estanques.

La arcilla es de procedencia local, compactada y el tipo CL, que trabaja con una salmuera constituida principalmente por KCl, aunque contiene NaCl y CaCl₂; esta salmuera proviene de un campo geotérmico que produce energía eléctrica (75 MW iniciales y proyectados manejar 300 MW a futuro).

LAGOS RECREATIVOS

Dado el gran desarrollo que ha tenido la construcción de gran des zonas turísticas y recreativas, así como el interés por lograr un ambiente más agradable desde el punto de vista ar- quitectónico en las ciudades, se ha visto que es común la creación de zonas lacustres artificiales, en algunos casos se han empleado recubrimientos como concreto, y mampostería, presentando los problemas que ya se mencionaron como son principalmente agrietamiento, hundimiento, lo que provoca pérdi-das excesivas de agua y que dado la plasticidad de la arcilla, se ve que esta es un recubrimiento óptimo, además de los ahorros considerables en costo por metro cuadrado (Ref. 61).

CANALES DE RIEGO

En estos canales es muy importante controlar las pérdidas de agua de riego por filtración, ya que lo que se pretende es llevar el agua a la zona en donde está escasa y hace falta, sin perderla en grandes cantidades. Muchas veces existen sistemas de bombeo que surten agua a dichos canales, estos pueden cruzar por zonas en las que existan suelos porosos con una muy alta permeabilidad, por lo que el uso de un recubri-miento simple y accesible como lo es la arcilla compactada, puede proporcionar grandes ahorros en costos de operación y de instalación.

No es conveniente utilizarlos directamente en zonas de alta velocidad, como pueden ser caídas o zonas de bombeo, donde se haría necesario recubrir con materiales de mayor resistencia a la erosión.

BASUREROS MUNICIPALES

La experiencia a lo largo del funcionamiento de basureros municipales muy grandes, demuestra que existe contaminación grave de mantos acuíferos subterráneos aún lejanos al foco de contaminación, que van desde aumento en la salinidad hasta presencia de metales pesados y sustancias altamente tóxicas como arsénico, sobre todo cuando se manejan desechos industriales; existen también casos graves por contaminación bacteriana (Ref. 54).

Dado que la extracción de aguas subterráneas es inevitable, es necesario tratar de impedir en lo posible contaminaciones, planeando adecuadamente las zonas donde se depositarán dichos desechos. Para tal fin deben buscarse suelos que no sean muy porosos y recubrir el fondo con capas de arcilla compactada, cuyos espesores y características serán de acuerdo al tipo de contaminante y a la humedad de la zona.

A este respecto existe una gran cantidad de información en la literatura, tales como las referencias 26, 27, 52, 53, 55, 47, 49, y 57.

Existen en muchos países disposiciones oficiales y reglamentación para depósito de desechos sólidos, donde se consideran las arcillas como recubrimientos como un requisito, dando algunos espesores óptimos y recomendaciones generales (Ref. 54).

Como ya se mencionó con anterioridad, las arcillas son prácticamente impermeables a compuestos orgánicos de alto peso molecular, metales pesados, microorganismo, etc., permitiendo el paso de iones en forma moderada cuya movilidad depende de su tamaño y grado de ionización, pero como pasan en cantidades pequeñas, al diluirse en el agua de los mantos acuíferos alcanza niveles de concentración aceptables o de impacto menor en la naturaleza.

Existen publicaciones y reglamentaciones que recomiendan espesores estandares de recubrimientos de arcillas compactadas, pero como ya se mencionó, las propiedades de las arcillas varían según la composición y estructura de las mismas, y de las diferentes regiones donde son tomadas.

Es recomendable para no recurrir a exageraciones que pudieran llegar a ser desventajosas respecto a otros recubrimientos, hacer pruebas con la arcilla a utilizar, para obtener el mejor espesor y condiciones de la arcilla (Ref. 54).

Sin embargo, cuando las condiciones climatológicas del lugar,

en donde la precipitación pluvial es muy alta, no es conveniente impedir el flujo de agua hacia el subsuelo en forma excesiva, ya que el basurero se llenaría de agua y rebosaría por los laterales o parte superior, diseminando contaminantes en las áreas aledañas en las épocas de mayor precipitación pluvial. En estos caso, es conveniente conformarse con que la arcilla se limite a dejar pasar cantidades mínimas de sales, que se diluirán al llegar al manto acuífero procurándose en la medida de lo posible que el diseño del recubrimiento haga que la salinidad de las aguas subterráneas no exceda los límites recomendados. Un diseño tan preciso es muy difícil de lograr en la realidad, en estos casos pudiera recomendarse usar un recubrimiento de arcilla en la parte superior.

DESECHOS LIQUIDOS Y ALMACENAMIENTO DE LIQUIDOS.

Para este caso se considerarán básicamente las mismas cuestiones que se trataron en el punto anterior, pero se debe adicionar que en estos casos existirá un tirante hidráulico, que influirá en la velocidad de filtración, como se vió en el estanque solar, debiéndose tomar en cuenta la construcción adecuada de los taludes o bordos de los lechos contenedores.

Dada la naturaleza orgánica de los contaminantes estos tipos de contenedores son usados en zonas de explotación petrolera, refinerías, etc. (Ref. 56).

CANALES DE AGUAS NEGRAS

Debemos agregar, además de las ventajas anteriores que las arcillas evitan en forma total que las bacterias, como las coliformes presentes en las aguas negras llegen a contaminar mantos acuíferos, ya que en el caso de la contaminación por bacterias patógenas las normas sanitarias establecen que no debe de haber ni una sola bacteria de este tipo en aguas destinadas al consumo humano o animal

Estas consideraciones surgieron como inquietudes no consideradas inicialmente, pero que nacieron en el transcurso de la investigación y cada una de ellas podría ser motivo de un análisis más profundo y de interés, ya que su aplicación como se mencionó en forma somera, es de gran importancia, tanto desde el punto de vista económico, como ecológico y sanitario. Esto ayudaría a extender la preferencia por las arcillas compactadas en lugar de otros materiales con más requerimientos de tecnologías extrañas, caras y que en muchas de los casos aunque son comunes no son apropiadas.

CANALES DE AGUAS NEGRAS

Debemos agregar, además de las ventajas anteriores que las arcillas evitan en forma total que las bacterias, como las coliformes presentes en las aguas negras lleguen a contaminar mantos acuíferos, ya que en el caso de la contaminación por bacterias patógenas las normas sanitarias establecen que no debe de haber ni una sola bacteria de este tipo en aguas destinadas al consumo humano o animal

Estas consideraciones surgieron como inquietudes no consideradas inicialmente, pero que nacieron en el transcurso de la investigación y cada una de ellas podría ser motivo de un análisis más profundo y de interés, ya que su aplicación como se mencionó en forma somera, es de gran importancia, tanto desde el punto de vista económico, como ecológico y sanitario. Esto ayudaría a extender la preferencia por las arcillas compactadas en lugar de otros materiales con más requerimientos de tecnologías extrañas, caras y que en muchas de los casos aunque son comunes no son apropiadas.

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Una recopilación de los valores de conductividad térmica de la arcilla de Querétaro, al verse afectada por una salmuera de NaCl son presentados en la tabla A, en la cual se incluyen los valores obtenidos del prototipo de estanque solar bajo diferentes condiciones, los obtenidos por el método directo y por el indirecto, así como los valores que se obtendrían al aplicar las ecuaciones empíricas desarrolladas por el cálculo de conductividad térmica; nótese que estos últimos presentan una gran discrepancia entre sí, y respecto a los obtenidos experimentalmente.

RESULTADOS DE LAS MEDICIONES DE CONDUCTIVIDAD TERMICA PARA LA ARCILLA DE QUERETARO.

PROTOTIPO DE ESTANQUE SOLAR

Arcilla preparada bajo la in fluencia de:	Temperatura Pro- medio Arcilla (°C)	Valor de K (W/m°C)
Agua a 50 °C	41	1.035
Agua a 60 °C	48	1.054
Salmuera saturada a 50°C, concentración efluentes 17-31%	41	0.894
Salmuera saturada a 50°C, concentración efluentes 41-51%	41	0.820
Salmuera saturada a 50 °C, concentración efluentes 60%	41	0.685

METODO INDIRECTO POR DIFUSIVIDAD TERMICA, DENSIDAD y Cp.

Arcilla preparada con:	Temperatura Ar- cilla (°C)	Valor de K (W/m°C)
Agua	35	0.876
Agua	50	0.880
Salmuera 50% saturación	40	0.706
Salmuera 90% saturación	40	0.842
Extraída del prototipo de estanque solar después de su funcionamiento.	40	0.568

METODO DIRECTO, PARAMETROS DE LA LEY DE FOURIER.

Arcilla preparada con:	Temperatura Pro- medio Arcilla (°C)	Valor de K (W/m°C)
Agua	45	0.848
Salmuera 50% saturación	45	0.755
Salmuera 90% saturación	45	0.809

APLICANDO ECUACIONES TEORICAS (No incluye efecto de salinidad y temperatura).

Ecuación	Valor de K (W/m°C)
Kersten	1.204
Gemant	2.968
Makowsky	1.125

Tomando los datos más representativos en cada experimento, se construyó una gráfica donde se presenta la variación de la conductividad térmica con respecto al por ciento de saturación de la solución de cloruro de sodio que contenía la arcilla, ver figura A.

En dicha gráfica se observa en primer lugar la tendencia de la conductividad térmica a disminuir al aumentar la salinidad, dado que este es el comportamiento que se observa en el caso del Estanque Solar que es real, aunque como ya se mencionó el valor numérico no tiene la precisión deseada.

También se aprecia una gran diferencia en la tendencia cuando la conductividad térmica se determinó adicionando NaCl a la arcilla, lo cual evidentemente no representa el estado real de la arcilla en un Estanque Solar, ya que en éste la salmuera atraviesa lentamente la capa de arcilla dando lugar a los fenómenos fisicoquímicos (como son intercambio iónico, disolución y taponamiento), que suceden en el Estanque Solar - mientras que en los otros dos experimentos no se dejó que la arcilla sufriera este tipo de fenómenos.

Sin embargo, observando el punto A, que es la evaluación de la conductividad térmica por el método de difusividad con la arcilla extraída del Estanque Solar al final de la experimentación, la cual ya había estado sujeta realmente a los efec-

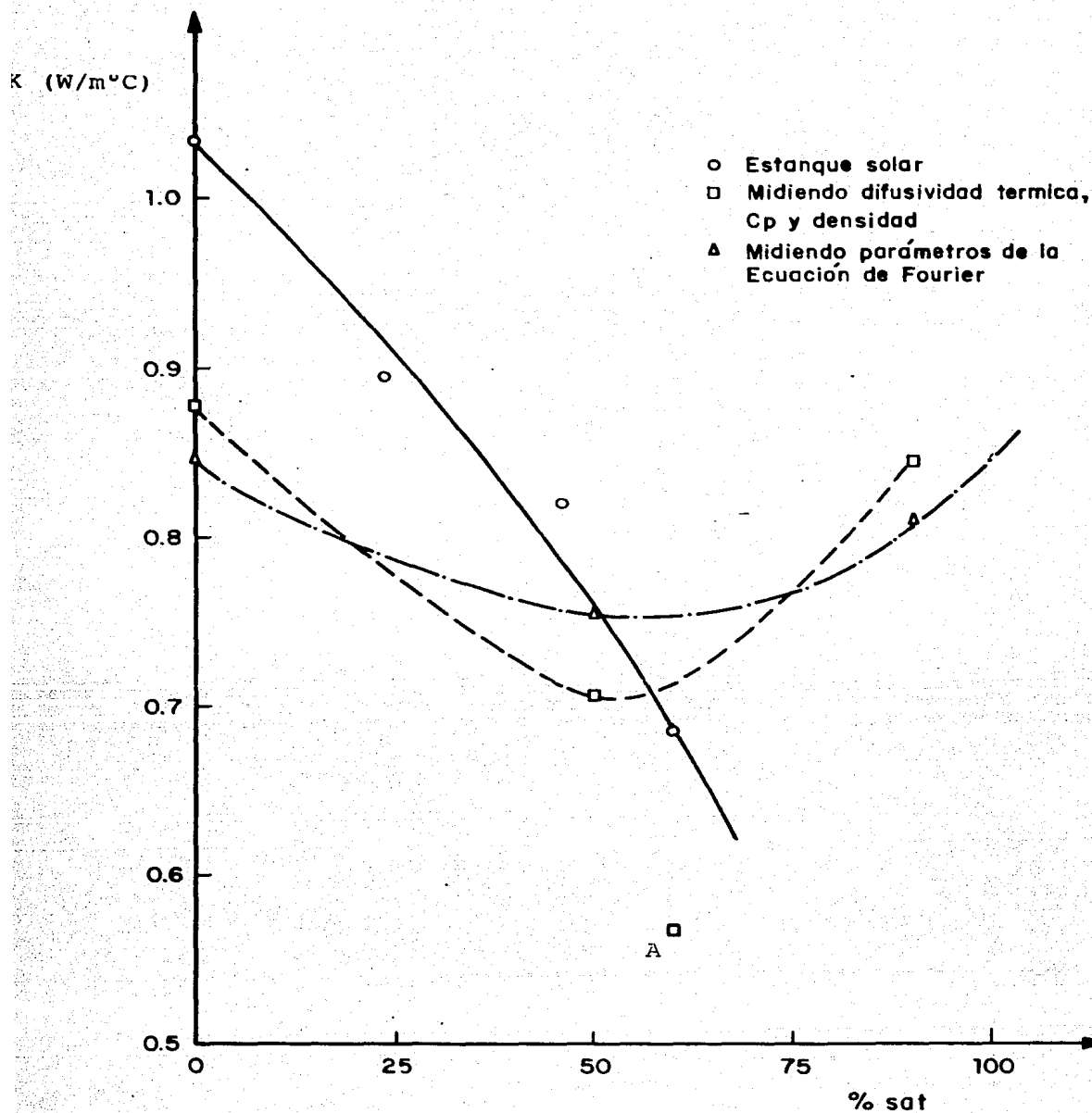


Fig. A. Efecto de la salinidad en la conductividad térmica.

tos naturales del fondo del Estanque Solar, vemos que conserva la tendencia observada para los valores medidos en el prototipo de estanque solar.

En cuanto a la variación de la conductividad térmica con respecto a la temperatura, podemos verla en la tabla B, así como en la figura B; en estas se nota que la conductividad térmica en general, aumenta al incrementarse la temperatura, viéndose una cierta discrepancia en la tendencia de los valores; además dependiendo de las diferentes condiciones de salinidad a las que se halla la arcilla, por lo que se recomienda una experimentación más amplia a este respecto, para poder confirmar dicha tendencia.

De acuerdo a la experiencia adquirida durante la realización de este trabajo, podemos decir que el mejor método para obtener la conductividad térmica y así poder calcular las pérdidas al subsuelo es someter la arcilla a la acción de una salmuera caliente hasta que se tenga un estado estacionario en todo sentido, reproduciendo así las condiciones de un Estanque Solar real; posteriormente se recomienda extraer una porción de ella y medir la conductividad térmica, utilizando el método que se basa en la medición de la difusividad térmica a la misma temperatura que tenía en el Estanque Solar.

En nuestro caso, el valor representativo de conductividad tér-

TABLA B

RESULTADOS DE LAS MEDICIONES DE CONDUCTIVIDAD TERMICA PARA LA ARCILLA DE QUERETARO. EFECTO DE LA TEMPERATURA.

PROTOTIPO DE ESTANQUE SOLAR.

Arcilla bajo la influencia de:	Temperatura Promedio Arcilla (°C)	Valor de K (W/m°C)
Agua a 50 °C	41	1.035
Agua a 60 °C	48	1.054

METODO INDIRECTO POR DIFUSIVIDAD TERMICA, DENSIDAD Y Cp.

Arcilla preparada con:	Temperatura Arcilla (°C)	Valor de K (W/m°C)
Agua	16	0.761
Agua	35	0.876
Agua	50	0.880
Salmuera 50% saturación	17	0.600
Salmuera 50% saturación	30	0.624
Salmuera 50% saturación	40	0.707
Salmuera 90% saturación	17	0.473
Salmuera 90% saturación	30	0.638
Salmuera 90% saturación	40	0.842
Extraída del prototipo	17	0.533
Extraída del prototipo	30	0.578
Extraída del prototipo	40	0.567

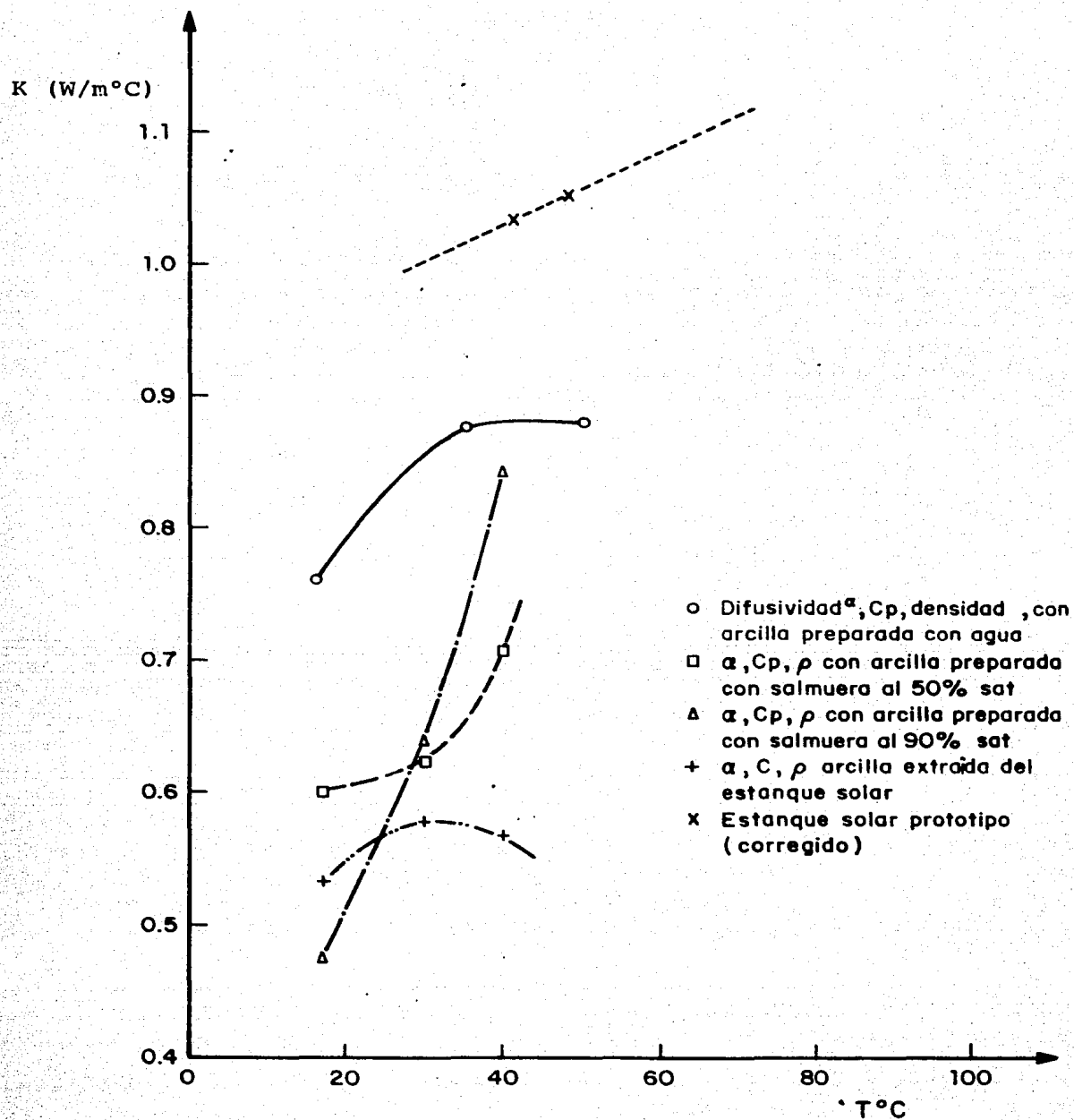


Fig. B. Efecto de la temperatura en la conductividad térmica

mica para una arcilla trabajando bajo la influencia de agua a 50 °C es de 0.87 W/m°C y bajo la influencia de salmuera caliente a 50 °C es de 0.57 W/m °C, que al compararlos con los que se encuentran en la literatura, que se hallan alrededor de 1.0 W/m°C, para arcillas no saturadas y a temperatura ambiente, resultan menores, pero dentro del orden de magnitud.

En lo que respecta a la permeabilidad vertical los valores obtenidos en el prototipo de estanque solar son los siguientes:

Arcilla bajo la influencia de agua a:

T	X
50 °C	2.24×10^{-7} cm/s
60 °C	2.15×10^{-7} cm/s

Arcilla bajo la influencia de salmuera saturada de NaCl a 50°C, de tres diferentes intervalos de porcentaje de saturación en los efluentes.

% Saturación	X
17 - 31	1.81×10^{-7} cm/s
41 - 51	1.63×10^{-7} cm/s
60 (constante)	1.47×10^{-7} cm/s

mica para una arcilla trabajando bajo la influencia de agua a 50 °C es de 0.87 W/m°C y bajo la influencia de salmuera caliente a 50 °C es de 0.57 W/m °C, que al compararlos con los que se encuentran en la literatura, que se hallan alrededor de 1.0 W/m°C, para arcillas no saturadas y a temperatura ambiente, resultan menores, pero dentro del orden de magnitud.

En lo que respecta a la permeabilidad vertical los valores obtenidos en el prototipo de estanque solar son los siguientes:

Arcilla bajo la influencia de agua a:

T	X
50 °C	2.24×10^{-7} cm/s
60 °C	2.15×10^{-7} cm/s

Arcilla bajo la influencia de salmuera saturada de NaCl a 50°C, de tres diferentes intervalos de porcentaje de saturación en los efluentes.

% Saturación	X
17 - 31	1.81×10^{-7} cm/s
41 - 51	1.63×10^{-7} cm/s
60 (constante)	1.47×10^{-7} cm/s

Respecto al efecto de la temperatura, cuando se trabajó con agua, se observa una ligera disminución de la permeabilidad vertical al incrementarse la temperatura, sin embargo, no es un decremento significativo, por lo que no necesariamente este efecto se presentará en la realidad.

En el caso en el que se ocupó la salmuera, el efecto de la disminución de la permeabilidad vertical es más notorio respecto al avance de la salinidad en la arcilla, lo cual era de esperarse debido a que el intercambio iónico (sustitución de un Ca^{++} o Mg^{++} por dos Na^+) que sucede en nuestro caso favorece el taponamiento de la arcilla; además existe el efecto de retención de salmuera por ser un suelo húmedo, siendo este efecto benéfico para el funcionamiento real de un estanque solar, aunque no se puede generalizar que esto vaya a suceder para otros sistemas suelo-salmuera.

Los valores encontrados están dentro del orden de magnitud de los reportados en la literatura para suelos arcillosos compactados (alrededor de 1.8×10^{-7} cm/s, ref. 57).

Para tomar en cuenta el efecto del tiempo a largo plazo, sin tener que experimentar durante años se podría trabajar un modelo similar al prototipo de estanque solar pero aplicándole una mayor presión o utilizando un permeámetro adecuado. Con esto se podría estudiar en forma acelerada el efecto de

la salmuera, además de hacer pruebas a mayor temperatura.

Aún cuando podemos obtener los valores de conductividad térmica, permeabilidad vertical e intercambio catiónico por técnicas de laboratorio como las utilizadas en este trabajo, es de gran importancia contar con un modelo real que reproduzca lo mas fielmente posible las características del fondo de un estanque solar, ya que con éste se pueden corroborar o descartar los valores obtenidos por pruebas aisladas. Además de que las pruebas mencionadas deberán incluir el utilizar muestras de suelo extraídas del prototipo de estanque solar, cuando este ya funcionó durante tiempo suficiente, ya que como se mencionó, no es lo mismo mezclar una salmuera con el suelo, que dejar que este experimente paulatinamente los diferentes efectos que puede causar el flujo a baja velocidad de la salmuera a través de la arcilla.

En este mismo sentido es necesario el uso del prototipo de estanque solar para observar el cambio en las propiedades mecánicas del suelo compactado al pasar la salmuera a través de él, ya que estas no se pueden predecir en base a suposiciones teóricas ni a casos aparentemente similares. En nuestro caso al hacer una comparación entre los límites líquido y límite plástico de la arcilla al inicio y al final del funcionamiento del prototipo, observamos que el límite líquido disminuye de 69.9 a 60.0, mientras que el límite plástico permanece cons-

tante, sin embargo, estos cambios no afectan prácticamente el comportamiento de la capa de arcilla en cuanto a propiedades mecánicas.

De los factores a considerar en el uso de diferentes impermeabilizantes en un estanque solar, el más importante resulta ser la cantidad de fluido que deja pasar, ya que es un hecho que hasta el revestimiento más costoso y sofisticado presenta en un momento dado, filtraciones por su naturaleza o por fallas en la continuidad, en nuestro caso, a pesar de haber utilizado una capa de suelo arcilloso de tan solo 20 cm de espesor, en el prototipo de estanque solar, las pérdidas de líquido por m^2 son aceptables y semejantes a las que se reportan para estanques existentes que fueron impermeabilizados con plástico; sin embargo, al utilizar arcillas vemos que las pérdidas de líquido pueden ser disminuidas tanto como queramos aumentando el espesor de suelo compactado, claro que esto se limita por factores prácticos y económicos.

Otra manera de optimizar la impermeabilización cuando se usan arcillas compactadas, es elegir de entre las arcillas disponibles en la región aquella cuya permeabilidad sea menor, en este sentido, la arcilla que elegimos para el estanque solar, al parecer una caolinita, (Ref.65) aunque da un funcionamiento adecuado no es la mejor opción, tanto por su permeabilidad como por otros factores como los que se observan en la Tabla C, que com

TABLA C.- Relación de las variaciones de distintas propiedades de los tres principales tipos de arcillas.

	Tamaño partícula	Superficie específica	CIC	Permeabilidad	Velocidad reacción int. ion.	Disminución de contami- nantes.
Caolinita	+	-	-	+	-	-
Ilita	↑	↓	↓	↑	↓	↓
Montmorilonita	-	+	+	-	+	+

para en forma relativa los tres principales tipos de arcilla contra diferentes factores a considerarse en un suelo en contacto con un líquido.

En dicha tabla vemos que la caolinita es la de mayor tamaño de partícula mientras que la montmorilonita es la de menor; de este hecho pueden explicarse las demás propiedades, ya que una disminución de tamaño de partícula corresponde un marcado aumento en la superficie específica, que en última instancia es en dicha área donde se llevarán a cabo los distintos fenómenos químicos, como se observa realmente en el caso de la CIC (capacidad de intercambio catiónico), la velocidad de reacción en el sentido de conversión total y por ende la disminución de contaminantes. En el caso de la permeabilidad, un menor tamaño de partícula da como consecuencia una menor porosidad que resulta en una mayor resistencia al flujo.

Por todo lo mencionado anteriormente y por recomendación de investigadores relacionados con este tema, se propone que la mejor opción dentro de las arcillas es el utilizar un suelo a base de montmorilonita como impermeabilizante, por lo que se sugiere realizar las mismas pruebas que se hicieron en este trabajo, pero utilizando una montmorilonita en vez de caolinita. Algunas de las objeciones presentadas respecto al uso de recubrimiento con este tipo de arcilla, se refieren a la propiedad que tienen estas de hincharse al aumentar su contenido

de humedad y de contraerse al disminuir este, aunque la literatura es confusa a este respecto. En el caso de un estanque solar real, este problema no es crítico, ya que la humedad es constante a lo largo del tiempo y no tiene razón de disminuir, sobre todo si se controlan adecuadamente las pérdidas de líquido y para esto las montmorilonitas son las mas impermeables. Otra sugerencia (ref. 62) es la de usar una mezcla de arcillas ya que desde el punto de vista mecánico podrían comportarse mejor. Además es recomendable que sobre la capa de arcilla en un estanque real se deposite una capa de arena de por lo menos 20 cm. Esto es con el fin, no solo de servir como lastre, sino que si llega a ocurrir una falla mecánica, como por ejemplo una fractura, entonces esta se taponée casi automáticamente con la arena que esta arriba (ref. 63).

En cuanto a las consideraciones sobre el comportamiento químico de las arcillas expuestas en este trabajo, podemos concluir que para estanques solares los diferentes parámetros y análisis realizados tienen importancia solo durante el inicio del funcionamiento de un estanque solar. La arcilla puede interaccionar químicamente con la salmuera, porque pasado un cierto tiempo (que dependerá del valor de la CIC, la velocidad de filtración, la concentración de la salmuera, etc.) la arcilla solo actuará como un medio poroso controlando la velocidad de filtración, pero los líquidos que fluyan a traves de esta permanecerán con concentración constante, ya que el medio agota-

r  toda su capacidad de interacción.

Sin embargo, si deseáramos conocer o predecir la duración de este estado transitorio para un sistema real, ser a necesario analizar los efectos que tendr a la salmuera sobre los diferentes elementos que componen un subsuelo de un estanque solar. Dichos elementos ser an por ejemplo: intercambio iónico de la arcilla que junto con la dilución y la absorción de sales por el suelo disminuir an considerablemente la concentración, efectos de las capas geológicas que se encuentran entre la arcilla y los mantos freáticos o manantiales, velocidad del agua en estos, y para fines de contaminación, la concentración de sales permitidas en ellos, entre otros.

El análisis de un sistema tan complejo, requerir a hablar de un caso específico, ya que las condiciones varían de un lugar a otro, pero por ejemplo si quisiéramos estudiar solo el efecto de la arcilla por ser el más importante, ser a necesario montar un experimento donde se aisle éste y se puedan controlar todas las variables que afectan al intercambio iónico. Algunas de las cosas que se deber an tomar en cuenta, es utilizar un soporte para la arcilla que sea inerte o extraer los efluentes antes de que pasen por este, así como tomar muestras de suelo a diferentes alturas y tiempos. Otro punto importante es el evitar contaminación de la salmuera por iones extraños a los que deseamos estudiar, ya que estos pueden interac-

cionar con el suelo alterando el estudio.

Como ya mencionamos, en nuestro caso el efecto de la salmuera sobre la arcilla es positivo, ya que nos disminuyó la conductividad térmica y la hidráulica, pero este fenómeno no será necesariamente válido para otros sistemas salmuera-arcilla. Si se tuviera el caso de un efecto negativo de importancia, sería muy recomendable estudiar el pretratamiento de la arcilla con un ácido ya que al saturar de protones la arcilla, esta se volvería más estable químicamente, por lo que soportaría mejor los embates posteriores del líquido que se desea manejar, aunque esto se reduciría probablemente a pruebas de laboratorio ya que su aplicación práctica debería analizarse desde el punto de vista económico. (ref. 64).

En general podemos concluir que el uso generalizado de un recubrimiento a base de suelo arcilloso compactado en un estanque solar, es una de las mejores opciones en México, dada la abundancia de arcillas de alta calidad que existe en nuestro país, logrando con ello abatir sustancialmente los gastos de inversión que requiere un estanque solar y por lo tanto hacer más rentable el uso de este tipo de sistemas como una fuente de energía barata y sin efectos colaterales nocivos sobre la ecología de la región.

Dada la abundancia de arcilla que existe en diferentes regio-

nes del país y las cualidades ya mencionadas de ellas, conviene promover el uso generalizado de estas en particular como impermeabilizantes para sistemas de almacenamiento de líquidos, manejo de desechos de diferentes tipos, áreas lacustres, etc. lo que incluye tanto usos industriales a gran escala, como también sistemas pequeños a nivel rural.

AGRADECIMIENTOS

Contamos con el apoyo y la valiosa colaboración de distintas personas e instituciones, en especial, la de nuestro director de Tesis, *Rafael Almanza*, al igual que la de *Gabriel Mendoza*.

Tampoco podemos olvidar las aportaciones y dedicación de tiempo de diversas personas del Instituto de Ingeniería, como *A. Sánchez* para la determinación de las propiedades mecánicas - del suelo, así como todas las personas que hicieron posible la edición de este trabajo.

En la Facultad de Química contamos con la colaboración de *Alejandro Baeza* para los análisis químicos de los efluentes.

Al maestro *Nicolas Aguilera* y a sus colaboradores de la Facultad de Ciencias por los análisis físicos y químicos del suelo, y sus valiosos consejos.

Otras instituciones de las que recibimos aportaciones fueron el Instituto de Geología y el Instituto de Investigaciones de Materiales.

Otras personas con aportaciones diversas fueron: *R. Jiménez*, *B. Jiménez*, *R. Peters*, *J. Lara*, *C. Juárez*, *F. Muñoz* y *E. Vi-*

il larreal.

En especial deseamos agradecer a *Gabriel Auvinet y Marcos Mazari* sus consejos y sugerencias.

La mecanograffa estuvo a cargo de *Rosa Marfa Galindo y Ma. Esther Aragón*, a quien se debe la buena presentación de esta tesis.

REFERENCIAS

- 1.- Almanza, R.; Muñoz F.; Lara, J. *Estanques Solares. series del Instituto de Ingeniería No. 476, UNAM, México 1984.*
- 2.- Lara, J. *Modelo Teórico de un Estanque Solar no convectivo aplicable a la República Mexicana. Tesis de la Facultad de Química, UNAM, México 1983.*
- 3.- Lin, E.I. *"A Review of the salt-gradient solar pond Technology". Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology. Publicacion JPL-81-116, 1982*
- 4.- Fynn, R.P.; Short, T.H. *Solar Pond. A basic Manual. The Ohio State University. 1983.*
- 5.- Wittenber, L.J.; Harris, M.J. *"The Miamisburg Salt-gradient solar pond". Proc. Non-convecting solar pond workshop, July 1980.*
- 6.- Reid, R.L. *"Solar Ponds" Mechanical Engineering, Dec. 1983.*
- 7.- Edesess, M. *"On Solar Ponds. Salty Fare for the world's energy appetite". Technology review, Nov-Dec. 1982.*
- 8.- Kaushika, N.D. *"Solar Ponds: A review". Energy Conversion. Vol. 24, No. 4, 1984.*
- 9.- Auvient, G.; Esquivel, R. *Impermeabilización de Lagunas Artificiales. LIMUSA y Soc. Mex. de Suelos. 1986.*
- 10.- Kersten, M.S. *"Thermal Properties of Soils". Bulletin Engineering Experiment Station, University of Minnesota, 1949.*
- 11.- Govaer, D. *"Apparent Thermal Conductivity of a local*

- adobe Building material". Solar Energy. Vol. 38. No. 3
USA, 1987.
- 12.- Jumikis, A.R. *Thermal Geotechnics*. Rutgers University
Press, New Jersey, USA, 1974.
 - 13.- Van Rooyen, M.: Winterkorn, H.F. "Theoretical and Practical
aspects of thermal conductivity of soils and simi-
lar granular systems".
Highway Research Board, Bulletin No. 168, 1957.
 - 14.- Smith, W.O "The Thermal Conductivity of dry soils".
Soil Science, Vol. 53, No. 6 1948.
 - 15.- Nashchokin, V. *Engineering Thermodynamics and Heat
Transfer*.
Editorial Mir. Moscú. 1979.
 - 16.- ASTM. *Heat Transmission Measurement in Thermal Insula-
tion*.
STP 544, ASTM, Philadelphia, USA. 1974.
 - 17.- Kau-Fui, V.M "Measurement of the effective thermal diffusivity
of a water-soil porous medium systems". Proceed-
ings of the International Symposium Workshop on particu-
late and multi-phase processes. Clean Energy Research
Institute, 1985.
 - 18.- Becerril Zavala, A. "Diseño de un aparato de Medición de
Conductividad Térmica". Tesis de la Universidad Michoacana
de San Nicolas de Hidalgo, Mich., México, 1985.
 - 19.- Eckert, E.R.G.; Goldstein, R.J. *Measurement in Heat
Transfer*. 2nd. Edition. Mc Graw-Hill, USA, 1976.

- 20.- Zangrando, F. *"Observation and analysis of a full-scale experimental salt gradient solar pond"*. Tesis de Doctorado en Filosofía, Universidad de Nuevo México. 1979.
- 21.- Tabor, H.; Weinberger, Z. *Nonconvecting solar ponds*. *Solar Energy Handbook*, Editores Kreider, J.F. Kreith F. Mc. Graw-Hill Book, Co. Inc. Nueva York
- 22.- Weinberger, H. *"The physics of the solar pond"*. *Solar Energy*, Vol. 8, No. 2, EUA. 1975.
- 23.- Rabl, A; Nielsen, C.E. *"Solar ponds for space heating"*. *Solar Energy*. Vol. 17 EUA. 1975. 1-12
- 24.- Hull, J.R. *"Physics of the solar pond"*. Tesis de Doctorado en Filosofía. Universidad Estatal de Iowa. 1979.
- 25.- Manrique, José A. *Energía Solar*. Editorial Harla. México, 1984.
- 26.- Kays, W.B. *Construction of linings for reservoirs tank and Pollution Control facilities*. John Wiley. New York 1977.
- 27.- U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service. *"Engineering Standard: Pond sealing or lining. Soil dispersant"*. Washington, D.C. Abril, 1971.
- 28.- Hinkle, R.D. *"Impermeable asphalt concrete pond liner"*. *Civil Engineering*. ASCE, New York. Agosto 1978.
- 29.- Protexa, S.A. *Impermeabilización de Estanques para criadero y reproducción de bagres en regiones áridas del Norte de México*. México, 1978.

- 30.- Smith, G.N. *"Elements of Soil Mechanics for Civil and Mining Engineer"*. Granada. 4th. Edition 1982.
- 31.- Secretaría de Recursos Hidráulicos. *"Manual de Mecánica de Suelos"*. México. 5a. edición. 1970.
- 32.- Ponce, J.A. *"Suelos de Querétaro, Qro."*. VIII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos. Tomo 1. Noviembre de 1976.
- 33.- Marsal, R.J.; Resendiz. D. *"Compactación de Suelos arcillosos, Propiedades Mecánicas de Suelos arcillosos Compactados"*. No. 187 de series del Instituto de Ingeniería. Agosto de 1968.
- 34.- Auvinet, G. Comunicación personal. 1987.
- 35.- Omega Engineering, Inc. *Temperature Measurement Handbook* Omega Group Company, U.S.A. 1982.
- 36.- Kern, D.Q. *"Procesos de Transferencia de Calor"*. CECSA, México, 1984.
- 37.- Perry, R.H.; Chilton, C.H. *"Chemical Engineers Handbook"*. 5th. Edition Mc. Graw Hill, USA, 1973.
- 38.- Leboeuf, C.M. *"Analysis of simultaneous heat and mass transfer in soils below solar ponds"* Solar Energy Research Institute, TP-253-2744
- 39.- Carslaw, H.S.; Jaeger, J.C. *"Conduction of heat in solids"*. Oxford University Press, 2nd. Edition, England, 1959.
- 40.- Mitchel, K. *"Fundamental of soil behavior."* John

Wiley and sons, Inc. New York, 1976.

- 41.- Hillel, D. Soil and water: *"Physical principles and Processes. Academic Press, New York, 1981.*
- 42.- Lambe, T.W. *"Compacted Clay: Structure"* ASCE Transactions, Paper No. 3041, USA 1959.
- 43.- Marsal, R.J. *"Análisis de conocimientos sobre suelos cohesivos compactados. Instituto de Ingeniería, 1984.*
- 44.- Barden, L.; Sieder, G.R. *"Engineering behavior and Structure of compacted clay"* ASCE Journal of the soil mechanics and foundations Division, USA 1970.
- 45.- Seed, H.B.; Chan, C.K. *"Compacted Clays: Structure and strength characteristics".* ASCE Transaction, paper No. 3246, USA, 1960
- 46.- Iturbe, R. *"Salinidad y disposición de aguas residuales en suelos. series del Instituto de Ingeniería No. 500, UNAM, México, 1986.*
- 47.- Castile, B.L.; Phillips, J.A. *"Evaluation of soil systems for land disposal of industry and municipal effluents".* Water Resources Research Institute. University of North Carolina, USA 1976.
- 48.- Casales, V.; Benassini, A. *"Discussion of dispersive clay papers"* ASCE Proc. Specialty Conference on Performance of hear-supported structures, Session II, Vol. III, Purdve University, USA, 1972.
- 49.- Pohland, F.G.; Engelbrecht, R.S. *"Impact of sanitary landfills: an overview of environmental factor*

and control alternatives". Prepared for the American Paper Institute by Georgia Institute of technology and University of Illinois, Urbana-Champaign, IL. 1976.

- 50.- Raudkivi, A.J.; Nguyen, V.U. *"Soil moisture movement at temperature gradient". ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division, 102, GTR, 1976.*
- 51.- Mitchell, J.K.; Greenberg, J.A.; Witherspoon, P.A. *"Chemico-osmotic effects in fine-grained soils". ASCE Journal of the soils Mechanics and Foundations Division, 91 (SM 4) USA, 1973.*
- 52.- Matrecon, Inc. Lining of waste impoundment and disposal facilities Municipal environmental Research laboratroy, Office of Research and Development. U.S. Environmental Protection Agency, Report No. SW-870 Cincinnati, OH, USA, 1980.
- 53.- Stewart, W.S. *"State of the art study of land impoundment techniques". Exxon Research and Engineering Company, prepared for U.S. Environmental Protection Agency, Report No. EPA-600/2-78-196. Cincinnati, OH, U.S.A. 1978.*
- 54.- Folkes, D.J. *"Fifth Canadian Geotechnical Colloquium Control of contaminants migration by the use of liners". Can Geotech. Journal, Vol. 19, Canada 1982.*
- 55.- Griffin, R.A.; Shimp, N.F.; Steele, J.D.; Ruch, R.R.; White, W.A.; Hughes, G.M. *"Attenuation of pollutants in Municipal landfill leachate by passage through clay". Environmental Science and Technology. Vol. 10. No. 13, USA, 1976.*

- 56.- Foreman, D.E.; Daniel, E.D. "Permeation of compacted clay with organic Chemicals". Journal of Geotechnical Engineering, Vol... 112, No. 7, July 1986
- 57.- Crooks, V.E.; Quigley, R.M. "Saline leachate migration through clay; a comparative laboratory and field Investigation". Can. Geotech. Journal, Vol.21 Canada 1984.
- 58.- Grim, R.E. Clay mineralogy. Mc. Graw Hill Book, Co. Inc. New York, USA, 1953.
- 59.- Alderman, S. Soil investigation and test solar pond desing, "Cerro Prieto geothermal salts project, Mexi cali, B.C. Agricultural and industrial minerals, Inc. (Investigación realizada con el Instituto de Investigaciones Electricas) Julio, 1975.
- 60.- Ogata, A. "Theory of dispersion in a granular medium" United States Geological Survey, Professional Paper No. 411-1, USA, 1970.
- 61.- Auvinet, G. "Construcción de un lago recreativo. Revisión del procedimiento constructivo. Informe a la SAHOP, México, 1982.
- 62.- Marsal R.J, comunicación personal, Instituto de Ingeniería UNAM 1987.
- 63.- Alberro J, comunicación personal, Instituto de Ingeniería UNAM, 1987.

- 64.- Jiménez R, Comunicación Personal, Div. Estudios de Posgrado de la Fac. de Química, UNAM, 1987.
- 65.- Villegas M. Comunicación personal, Instituto de Geología, UNAM, 1987.
- 66.- Makowski, M.; Mochlinski, K. An evaluation of two rapid methods of assesing the thermal resistivity of soil. The Proceedings of the institution of electrical engineers. Vol. 103. Part. A No. 11 1956.