

87  
2ej



**Universidad Nacional Autónoma  
de México**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**PRUEBAS DE CALIDAD EN ARCILLAS ACTIVAS  
ESTABILIZADAS CON CAL A MEDIANO PLAZO.**

**Tesis Profesional**  
Que para obtener el título de  
**INGENIERO CIVIL**  
p r e s e n t a

**ALFONSO LOPEZ MARROQUIN**



México, D. F.

1987



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **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.

**INDICE:**

**a) Introducción:**

a.1) Antecedentes . . . . .	1
a.2) Objetivo . . . . .	4

**b) Trabajos de laboratorio . . . . . 16**

**c) Análisis de resultados . . . . . 12**

**d) Conclusiones . . . . . 22**

Recomendaciones . . . . .	27
---------------------------	----

**e) Tablas:**

1.- Humedades del espécimen sumergido con cilindro Porter . . . . .	28
--	----

2.- Humedades del espécimen sumergido con bolsa ranurada . . . . .	29
---	----

3.- Resumen de resultados . . . . .	30
-------------------------------------	----

**f) Figuras:**

1.- Humedad óptima - % cal . . . . .	32
--------------------------------------	----

2.- P.V.S.M. - % cal . . . . .	33
--------------------------------	----

3.- % de expansión lineal . . . . .	34
-------------------------------------	----

4.- Valor relativo de soporte . . . . .	35
---	----

4A.- V.R.S. laboratorio, 2% cal . . . . .	36
---	----

4B.- V.R.S. laboratorio, 4% cal . . . . .	37
---	----

4C.- V.R.S. laboratorio, 6% cal . . . . .	38
---	----

5.- Plasticidad, reacción inmediata . . . . .	39
6.- Plasticidad, sumergido con cilindro Porter . . . . .	40
7A.- % Contracción lineal, sumergido con cilindro Porter . . . . .	41
7B.- % Contracción lineal, sumergido con bolsa ranurada . . . . .	42
8.- Plasticidad, sumergido con bolsa ranurada . . . . .	43
9A.- Espécimen sumergido con cilindro Porter . . . . .	44
9B.- Espécimen sumergido con bolsa ranurada . . . . .	45
g) Bibliografía . . . . .	46

a) INTRODUCCION:

a.1) Antecedentes:

El ritmo acelerado de construcción de vías de comuni-  
cación que ha caracterizado a las últimas décadas, ha pro-  
piciado una búsqueda incesante y tenaz de nuevos y más e-  
conómicos materiales de construcción con iguales o mejo-  
res características de calidad y resistencia, ya que con  
frecuencia el ingeniero se encuentra con el problema de  
que la calidad de los suelos no satisface los requeri-  
mientos necesarios para cumplir con un fin determinado,  
por lo que se puede elegir entre varias opciones, tales  
como:

- Aceptar el material tal como se encuentra, pero tomando  
en cuenta realísta<sup>mente</sup> la calidad del mismo al planear  
su utilización.
- Eliminar el material cuyas características son inadecua-  
das y sustituirlo por uno de mejor calidad.
- Modificar las propiedades del material para que adquie-  
ra las características que se buscan.

Esta última alternativa da lugar a los procedimien-  
tos de estabilización de suelos, que es un proceso median-  
te el cual, a través de medios físicos y/o químicos se mo-  
difican las propiedades de un suelo, haciéndolo más resis-  
tente y durable.

Entre las sustancias que más comunmente se utilizan para la estabilización de suelos, pueden mencionarse las siguientes:

- Cemento
- Cal hidratada
- Productos bituminosos
- Cloruro de calcio
- Cloruro de sodio.

En menor grado se utilizan otras sustancias tales como:

- Algunos derivados de ligninas
- Resinas sintéticas
- Melazas
- Desechos de minas.

Cada una de éstas sustancias estabilizantes, tiene un campo específico de utilización y su uso depende principalmente de factores económicos, gobernados por las características del suelo, tales como plasticidad y granulometría así como resistencia al esfuerzo cortante.

Debido a la variabilidad de los suelos y a sus composiciones, hacen que no siempre se llegue a la solución óptima, por lo que se debe tener siempre en mente el conjunto de propiedades que se desee mejorar y la relación

entre lo que se logrará al mejorarlas, el esfuerzo y dinero que en ello ha de invertirse.

Dentro de las propiedades de los suelos que por lo general se desean mejorar en la estabilización son:

Minimizar los cambios volumétricos

Aumentar la resistencia al esfuerzo cortante

Abatir la compresibilidad

Aumentar la vida útil de la obra.

Mejorando simultaneamente varias de esas propiedades al realizar el tratamiento de estabilización.

El material objeto de este estudio, es una arcilla activa del tipo expansivo, la cual fué sometida a una serie de pruebas de calidad a mediano plazo con distintos porcentajes de cal, sometiendo a saturación las muestras con el fin de comparar sus propiedades antes y después de que hayan estado sujetas a la acción del agua, para poder conocer si el proceso es regresivo, analizarlo y tomar las medidas pertinentes.

a.2) Objetivo:

El presente trabajo, complementa una serie de investigaciones que se han venido realizando con el fin práctico de mejorar las características de calidad de las arcillas expansivas de la Ciudad Industrial de Querétaro - Benito Juárez, por medio de estabilizaciones con diferentes aditivos; en esta investigación, se trata lo referente a pruebas de calidad en arcillas expansivas estabilizadas con cal a mediano plazo, con el fin de conocer si el proceso es reversible, es decir, se busca transformar el suelo de tal forma que sus partículas estén unidas por lazos lo suficientemente fuertes como para minimizar las presiones internas de expansión y que sujetas a cambios de humedad las variaciones de volumen sean mínimas.

Por razones de economía lo más recomendable sería - trabajar con el material natural en grumos, tal y como se presenta en la naturaleza, mezclándolo en seco con la cal para después proceder al humedecimiento, curado, extendido y compactación del material ya estabilizado; sin embargo de esta forma no se lleva a cabo el intercambio iónico completamente, pues para que éste sea posible, - teóricamente sería necesario llegar al tamaño de las partículas laminares de la arcilla, siendo que esto en la -

práctica resultaría de un costo muy elevado, además de - que se complicaría el proceso, que es todo lo contrario a lo que se persigue, por lo que para los fines de esta investigación se llegó a tamaños de grumos tales que pasaran por la malla número 4.

Debe aclararse que, las estabilizaciones con cal cuyo uso se enfoca hacia los suelos finos se pueden usar como pre-tratamiento cuando se desea solo abatir la plasticidad y como tratamiento definitivo si el proceso fuera irreversible, por lo que necesariamente deben satisfacerse todos los requerimientos de una estabilización definitiva.

b) TRABAJOS DE LABORATORIO:

Las pruebas de calidad a las que se sometió el material, son las que a continuación se enlistan:

Granulometría	
Límites de consistencia	Límite líquido Límite plástico Contracción lineal
Prueba Proctor estándar	Peso volumétrico seco Humedad óptima
Prueba Porter estándar.	Peso volumétrico seco Humedad óptima V.R.S. Expansión lineal

- CUADRO 1 -

Antes de proceder al análisis, el material fué extendido para secarlo, con el fin de que se facilitara su disgregación ya que, como el material fué transportado en sacos desde el sitio de muestreo hasta el laboratorio, conservó mucha humedad y al querer disgregar los grumos solo se deformaban sin poder desvaratarlos, debido a que el agua capilar estaba a tensión entre las partículas constituyentes del suelo, lo cual tiende a formar grumos difícilmente disgregables, ya que se trata de una arcilla de alta plasticidad.

Una vez disgregada la arcilla, se analizó su composición granulométrica, encontrándose que el 97.76 % pasó por la malla número 200, es decir, se está hablando de un material fino cuyo tamaño de partículas es menor a 0.074 mm.; o sea que se trata de un suelo de partículas laminares microscópicas cuyo comportamiento no se rige solamente por fuerzas gravitatorias sino por fuerzas electromagnéticas internas.

Con el fin de poder clasificar el material en estado natural, se estudiaron sus límites de consistencia, encontrándose que, por presentar valores altos de límite líquido e índice plástico se localiza en la zona CH de la carta de plasticidad, como se observa en la figura 5. Para mejorar las propiedades de la arcilla se le adicionó cal hidratada en las siguientes proporciones: 2 %, 4 % y 6 % respecto al peso seco del material original, una vez lograda la homogeneidad de la mezcla se procedió al humedecimiento para que, 24 horas después se sometiera a un análisis de plasticidad, encontrándose que, a pesar de que se utilizan bajos contenidos de aditivo su comportamiento se modifica radicalmente, pues como se observa en la figura 5 el comportamiento que presenta con 2 % y 4 % es el de un limo - pues se encuentra en la zona OH ó MH, y con 6 % de cal su comportamiento es completamente distinto al que originalmente presenta, pues cae en la zona OL ó ML, es decir, no

solo se comporta como un limo, sino que además es de baja plasticidad; se caería en un error si se pensara que este es el comportamiento que tendrá el material estabilizado al encontrarse en campo, pues como se observará más adelante, el agua juega un papel de suma importancia en las estabilizaciones de tipo químico, pues en algunos casos el comportamiento puede ser reversible; para poder conocer este efecto, se procedió a mezclar en seco el aditivo y el suelo en las proporciones antes indicadas, una vez homogeneizada la mezcla, se procedió al humedecimiento manteniendo el material estabilizado en una bolsa de plástico para impedir posibles pérdidas de humedad durante 3 días con el fin de que se inicie el intercambio iónico; una vez transcurrido ese lapso, se procedió a tomar lectura de la humedad, observándose que las pérdidas sufridas fueron mínimas, se pudo percibir también un aroma fétido que podría deberse al contenido de materia orgánica de la arcilla en cuestión.

Como se observa en el cuadro 1, tanto el peso volumétrico seco como la humedad óptima fueron obtenidos por medio de dos pruebas diferentes:

Prueba dinámica Proctor estándar

Prueba estática Porter estándar.

Basado en el procedimiento establecido por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (Ref. 1) con el fin de establecer un margen comparativo y poder dar las recomendaciones pertinentes.

Cabe aclarar que solo una de éstas pruebas es la que más se apega a las condiciones reales en campo, ésta es la prueba Proctor estándar ya que es la más recomendable cuando se trabajan materiales finos; ahora bien, las causas por las que se utilizó la prueba Porter son:

Complementación de datos de resistencia y deformabilidad por medio de la prueba de valor relativo de soporte estándar (V.R.S.), así como para tener un rango de humedades y pesos volumétricos obtenidos con una y otra prueba, las diferencias que se obtienen entre ambas, son debido al procedimiento e hipótesis que cada una establece, como se puede observar en las figuras 1 y 2.

Al obtener la humedad óptima y el peso volumétrico seco del material sin estabilizar, ya sea por medio de la prueba dinámica o por la prueba estática, se presenta el problema de la formación de grumos difícilmente disgregables conforme se incrementa la humedad, a tal grado que ésta ocupe casi todos los vacíos del suelo, dificultándose la manipulación de la muestra así como su compactación

este problema se abate considerablemente al adicionarle - cal hidratada, ya que su manejabilidad se facilita conforme se aumenta el contenido de aditivo, pues la muestra es estabilizada con 6 % de cal, que fue la mayor cantidad de - cal utilizada en esta investigación, presentó una textura similar a la del limo, pues la formación de grumos era ca si nula.

Una vez conocida la humedad óptima y el peso volumétrico seco, se procedió a la preparación de los cilindros Porter, mismos que se sumergieron en el tanque de saturación durante 7, 14, 28 y 60 días, transcurrido ese lapso se sacaron los cilindros, notándose de nuevo un aroma fétido debido a la materia orgánica contenida en la muestra presentando gran humedecimiento sobre todo en la parte su perior del cilindro que es donde se facilita el flujo de agua, como se observa en la figura 9A, notándose que el núcleo del espécimen apenas si incrementó su grado de saturación respecto al que tenía al ser preparado el cilindro debido a que, por ser éste un material de baja permeabilidad y además al estar compactado y dentro del cilindro, el agua no pudo fluir entre la muestra, por lo que - la reacción química de la estabilización no fué completa, así que se optó por colocar los cilindros de suelo estabi lizado compactados al 100 % de su peso volumétrico seco -

máximo Proctor, en bolsas de plástico ranuradas como se aprecia en la figura 9 B, en lugar de dejarlos dentro del cilindro de prueba y posteriormente se procedió a sumergirlos en el tanque de saturación durante el mismo intervalo de tiempo.

Para poder analizar la diferencia de comportamiento en una y otra condición, se calcularon los límites de consistencia, los cuales, al ser estudiados se notó una clara diferencia en cuanto a la consistencia que presentaban las muestras sumergidas dentro del cilindro, pues las que se saturaron dentro de las bolsas ranuradas lograron abatir aún más su plasticidad como se observa al comparar las figuras 6 y 8, así mismo se logró mejorar otras propiedades, tales como la contracción lineal, como se observa en las figuras 7 A y 7 B.

c) **ANALISIS DE RESULTADOS:**

**Pruebas Proctor y Porter estándar:**

Puede observarse en las figuras 1 y 2 como, a mayor porcentaje de cal le corresponde mayor humedad óptima y mayor peso volumétrico seco, esto es debido a que la cal puede ocupar los huecos que tenga el material sin estabilizar, mismos que disminuyen al aumentar la cantidad de aditivo por lo que el espécimen tiende a aumentar de peso conservando su volumen (volumen del cilindro de prueba), por lo que esto se refleja como un incremento en el peso volumétrico; ahora bien, en la prueba Porter estándar se obtienen mayores pesos volumétricos con menores humedades mientras que con la prueba Proctor estándar se presenta lo contrario debido a que, la presión de compactación es muy distinta, pues en la prueba Porter se aplica una presión estática de  $140.6 \text{ Kg/cm}^2$  con duración de un minuto, mientras que en la prueba Proctor se aplica una presión dinámica de  $7 \text{ Kg/cm}^2$  aproximadamente.

Los especímenes estudiados con la prueba Porter, fue ron sometidos a saturación durante 7, 14, 28 y 60 días a partir de la preparación del cilindro con el fin de anali zar su comportamiento al aumentar el tiempo de contacto con el agua, una vez transcurrido ese lapso, se procedió a medir tanto la expansión lineal como el V.R.S.

Como se observa en la figura 3, al analizar el material en prueba Porter, resulta ser muy expansivo, ya que, si por ejemplo se tiene un espesor de suelo compactado al 100 % de su peso volumétrico seco máximo de 1.0 m. se expande en presencia de agua del orden de 0.1 m., por lo tanto, éste suelo presenta un grave problema si se tiene alguna estructura encima, pues dicha propiedad de la arcilla podría causarle severos daños en la superficie de rodamiento. Al utilizar 2 % de cal, la expansión lineal no se logra abatir considerablemente pues presenta valores mayores a 7 %; en cambio, al utilizar 4 % y 6 % de cal, la expansión lineal de la prueba Porter llega a presentar valores menores a 1 %; a pesar de la variabilidad que presentan las curvas, por ser ésta mínima, podría tomarse un valor constante del porcentaje de expansión, para cada porcentaje de cal utilizado.

El material sin estabilizar presenta un V.R.S. muy pequeño, del orden de 2 %, como se observa en la figura 4 observándose también como aumenta a mayor cantidad de cal y no solo eso, ya que también su valor tiende a crecer a medida que aumenta el tiempo de saturación, llegando a valores casi de 300 % al utilizar 6 % de aditivo.

En las gráficas de V.R.S. obtenidas en laboratorio -

(figura 4A) tanto el material sin estabilizar como el que tiene 2 % de cal, presentan falla plástica al momento de la penetración, ya que, con muy pequeños incrementos de carga, el material se sigue deformando aún cuando la carga se mantiene constante; a pesar de que éste porcentaje de cal no incrementa notablemente el V.R.S., presenta un aumento de casi 6 veces respecto al valor del material sin estabilizar, aumentando con el tiempo hasta un valor que puede ser considerado aceptable para una subrasante de regular calidad, dicho incremento de resistencia no es infinito ya que como se observa, tiende a un valor constante a pesar de que siga aumentando el tiempo de saturación. Al utilizar 4 % y 6 % de cal, se nota una clara formación de grumos cementados, ya que de las curvas de V.R.S. obtenidas en el laboratorio (figuras 4B y 4C respectivamente) se observa como la falla ahora es de tipo frágil, ya que se presentan grandes incrementos de carga en los primeros milímetros de penetración, descendiendo conforme se avanza para después volver a soportar cargas tan grandes como las primeras experimentadas; de ésta forma se observa claramente la acción de la cementación de los grumos de arcilla con cal, los cuales adquieren mayor resistencia que el resto del espécimen; al desvaratar los grumos con la aguja de penetración, la resistencia disminuye hasta llegar a otra capa cementada que es cuándo -

vuelve a haber un incremento de resistencia; puede decirse que el verdadero intercambio ionico se manifiesta donde se registra menor carga, ya que las "cargas pico" representarían grumos cementados, por lo que el V.R.S., se debería considerar menor al valor tradicionalmente aceptado y que es el que se obtiene de dividir el valor de la carga a 2.54 mm. de penetración entre una constante cuyo valor es de 1360 Kg. ya que, como se aprecia en las gráficas de V.R.S. obtenidas en laboratorio (figuras 4B y 4C), a esa profundidad se encuentra una capa cementada; es sorprendente ver en que forma aumenta el V.R.S., pues con 6 % de cal se llega a valores cien veces mayores que el obtenido en especímenes antes de la estabilización.

Cabe aclarar que el material solo se disgregó hasta pasar por la malla número 4; sin embargo lo mas conveniente sería llegar a tamaños que pasaran por la malla número 200, pero desde el punto de vista práctico, se elevarían los costos de obra considerablemente, además de que se requeriría de una plataforma y equipo especiales para poder realizarlo, es por eso que para fines de ésta investigación el material se disgregó a tamaños que pasaran por dicha malla.

Finalizada la prueba de V.R.S., al quitar las placas de carga, se observó el desprendimiento en escamas de la

parte superior de las muestras que se encuentran dentro - del cilindro, estabilizadas con 4 % y 6 % de cal, debido a los esfuerzos provocados durante la penetración, ya que el volumen de la aguja es proporcional al volumen de suelo desplazado; por la forma de ejecución de la prueba, la muestra solo puede desplazarse en sentido vertical ascendente, a pesar de que dicho movimiento se encuentra restringido por las placas que se utilizan y debido a que la muestra se encuentra cementada, este bufamiento provoca - el rompimiento del espécimen en placas; esto no se presenta al utilizar 2 % de cal pues no se alcanza a cementar, por lo que al bufarse no se rompe en placas, sino solamente se desmorona; una vez sacado el espécimen del cilindro de prueba se toman muestras del mismo con el fin de conocer su humedad en la parte superior, inferior y central, - como se aprecia en la Tabla 1, observándose como varía ésta, pues es mayor en la parte superior y la menor es la - que se presenta en el núcleo del espécimen, cuyo valor es muy cercano al de la humedad óptima; estando en una condición intermedia de humedad la parte inferior del mismo, - puede decirse que ésto es debido a las características - propias del cilindro de prueba, pues se le coloca una placa perforada en la parte superior que permite el flujo de agua hacia el interior del molde, al igual que en la unión del cilindro con el collarín además en la parte infe

rior también se tiene una placa metálica perforada, pero por esta parte, se dificulta un poco el flujo de agua - por la posición que conserva el cilindro mientras se encuentra dentro del tanque de saturación ( figura 9A ).

Para el análisis de los límites de consistencia del material estabilizado, se estudió, en primera instancia, la reacción inmediata que se presenta una vez realizada la mezcla en seco y mantenerla húmeda durante 24 horas - con el fin de que se manifieste la plasticidad (Ref.1), - los resultados obtenidos fueron sorprendentes pues después de que el material sin estabilizar se comportaba como una arcilla de alta plasticidad (con valores altos de límite líquido e índice plástico), pasó a comportarse como un limo como se observa en la figura 5 es decir, se localiza abajo de la línea A de la carta de plasticidad, en la zona OH ó MH, y no sólo eso, sino que con 6 % de cal se comporta como un limo de baja plasticidad pasando al otro lado de la línea B, es decir en la zona OL ó ML, se podría pensar que a pesar de utilizar un bajo contenido de aditivo este reacciona de tal forma que se mejoran sus condiciones de plasticidad, es decir, el rango de humedades en que el material tiene comportamiento plástico, se disminuye considerablemente; pero el agua y en espe -

cial el tiempo que dura la reacción suelo-cal-agua, son factores muy importantes que afectan el comportamiento de la estabilización, ya que, en especímenes que se mantuvieron de 7 a 60 días, en el cilindro Porter dentro del tanque de saturación, presentaron un comportamiento reversible en relación a la reacción inmediata que se presenta a las 24 horas de humedecimiento, ya que tanto el límite líquido, como el índice plástico, aumentan de tal forma que para algunos porcentajes de cal tiende a regresarse hacia la zona CH, como se observa en la figura 6, sin llegar a las condiciones que presentaba el material antes de estabilizar, pero sí con un comportamiento similar cuando se utilizan bajos contenidos de cal. El retroceso más brusco se presenta en la transición entre dejar reaccionar la estabilización con agua durante 24 horas y 7 días, ya que de 7 a 60 días, el retroceso es más lento y paulatino, siendo este comportamiento más representativo que cuando se analiza su comportamiento en las primeras horas de la estabilización, se hace la hipótesis de que esto es debido a que la cal reacciona con el suelo en dos etapas, la primera, que es inmediata e incluye una fuerte captación de iones de calcio por las partículas de suelo penetrando en las capas adsorbidas a causa del incremento en la concentración de cationes en el agua, manifestándose como -

una disminución considerable de plasticidad; la segunda reacción, es a largo plazo y es la reacción propiamente cementante, debida tal vez a la interrelación entre las iones de calcio y los componentes aluminicos y silicosos de la arcilla; de la misma manera, se presenta la variación de la contracción lineal, pues como puede observarse en la figura 7A, en que el material original se comportaba de una manera muy inestable, pues en un espesor de 1.0 m. al secarse, se contrae al rededor de 0.2 m., disminuyendo ésto considerablemente a las 24 horas de realizada la estabilización, volviendo a aumentar hacia los 7 dias de saturación.

Al aumentar el valor del límite líquido, aumenta la superficie libre total de las partículas laminares de la arcilla, por lo tanto hay más captación de agua, entonces el rango de plasticidad aumenta (índice plástico); por lo que se infiere que si aumenta el límite líquido así como el índice plástico, se está regresando a las condiciones del material sin aditivo, por lo que la contracción lineal tiende a aumentar.

Ahora bien, debido a la compactación a la que ha sido sometido el suelo, así como a sus propiedades intrínsecas, presenta muy baja permeabilidad, impidiendo una reacción mas completa entre el suelo estabilizado y el -

agua, si se mantiene dentro del cilindro de prueba, siendo éste un factor de suma importancia, pues entre más humedad exista, mejores resultados se obtienen en la estabilización.

Con el fin de reproducir las condiciones reales a las que estará sujeto el material, se prepararon especímenes con la humedad óptima Proctor y se sumergieron dentro de una bolsa de plástico ranurada, como se aprecia en la figura 9 B, durante el mismo intervalo de tiempo que los del cilindro Porter, obteniéndose valores de humedad mayores como se observa al comparar las tablas 1 y 2; también se obtiene un considerable abatimiento tanto en el límite líquido como en el índice plástico, llegando a alcanzar condiciones de plasticidad que tendría un limo, como se observa en la figura 8 apreciándose también un retroceso en cuanto a estas condiciones, pues el límite líquido y el índice plástico tienden a aumentar, este retroceso no se manifiesta en forma brusca sino que tiende a mantenerse en una cierta zona, dependiendo del contenido de cal utilizado; de manera semejante se presentan los resultados obtenidos de la contracción lineal, como se aprecia en la figura 7 B, pues es menor que la que se presenta cuando se sumerge con el cilindro Porter con distintos porcentajes de cal (figura 7 A), además de esta forma, a

pesar de que tambien se presenta un retroceso en cuanto a su comportamiento, tendiendo hacia el del material original acercándose paulatinamente hacia un valor constante, por lo que puede decirse que el agua juega un papel de su ma importancia, mejorando las condiciones de la estabilización, además de esa forma se semeja a lo que se presenta en campo, pues el material puede estar siempre sujeto a las condiciones atmosféricas prevalectes en el sitio.

d) CONCLUSIONES:

En esta investigación se busca transformar un material de desecho en uno de mejor calidad que cumpla con las características que se desean para las diferentes capas que forman la sección estructural, pero transformándolo de una forma económica, por lo que se optó por estudiar el comportamiento de la arcilla expansiva de la Ciudad de Querétaro estabilizada con cal, que además de ser un material económico es de fácil manejo.

El análisis de la estabilización se efectuó a medio plazo, entendiéndose por esto que las muestras se sumergieron en agua por lapsos comprendidos entre 7 y 60 días, de la siguiente manera:

Una vez seca y disgregada la arcilla, se procedió a analizar su composición granulométrica encontrándose que se trata de un material fino de partículas laminares microscópicas; después de efectuado lo anterior se analizaron los límites de consistencia del material en cuestión resultando ser una arcilla de alta plasticidad.

Algunas propiedades del material se lograron mejorar al agregar cal hidratada en las siguientes proporciones: 2 %, 4% y 6 % en peso seco del material original, observándose que 24 horas después de efectuada la estabilización

lización, la plasticidad disminuye en forma gradual al incrementarse el contenido de cal, tendiendo a comportarse como un limo de baja plasticidad (figura 5).

A medida que aumenta el tiempo de contacto con el agua, la estabilización presenta un caracter reversible en los límites de plasticidad tendiendo hacia el comportamiento del material original, al utilizar bajos contenidos de cal como se aprecia en la figura 6, pues cuando el espécimen es sumergido durante 7, 14, 28 y 60 días dentro del cilindro de prueba, no se permite que la mezcla suelo-cal reaccione libremente con el agua por estar muy restringido el flujo hacia el interior de la muestra como puede observarse en la figura 9A. El comportamiento reversible puede ser minimizado si se permite que el suelo estabilizado reaccione libremente con el agua, ver figura 8, lo cual se logra si el espécimen compactado es sumergido dentro de la bolsa ranurada, pues de esa forma el agua queda directamente en contacto con la muestra, - ver figura 9B.

Para preparar los especímenes antes mencionados, - fué necesario conocer previamente la humedad óptima y el peso volumétrico seco máximo de la arcilla natural y después de estabilizarla, lo cual se efectuó por medio de - dos pruebas: Porter y Proctor estándar. La primera se -

utilizó con el fin de complementar los datos de calidad por medio de la prueba de Valor Relativo de Soporte (V.R.S.) estándar con su correspondiente Expansión Lineal. La segunda prueba se utilizó debido a que es la más recomendable cuando se manejan suelos finos. En ambos casos los especímenes se sumergieron en agua y se compararon sus resultados, se analizó su plasticidad su mergiéndolos con y sin el cilindro de prueba, siendo es to último lo que más se apega a la realidad, pués no so lo se permite que la estabilización reaccione con el agua sino que en sí el espécimen está compactado en forma dinámica como sucede en el campo.

Es conveniente aclarar que al agregar cal se lo-  
gran dos objetivos: uno el intercambio iónico para - -  
transformar las ligaduras débiles en fuertes y el otro  
es la cementación, la cual se pierde al hacer las prue-  
bas de límites pues se remoldea la estructura de la mues-  
tra, quedando solamente el intercambio iónico observán-  
dose que es de carácter reversible; no sucede lo mismo  
en las demás pruebas de calidad.

En base a la serie de pruebas efectuadas puede ob-  
servarse que, a mayor contenido de cal se obtienen mejo-  
res resultados, pués se incrementa el V.R.S. no solo al  
aumentar la cantidad de cal, sino al aumentar el tiempo

de saturación, elevándose hasta más de 100 veces su valor respecto al que inicialmente tiene el material sin estabilizar; como se sabe, un material puede utilizarse como una base de buena calidad si el V.R.S. está entre 80 % y 100 %; de la figura cuatro se puede observar que al utilizar 4 % de cal se obtienen valores cercanos al 100 % a partir de los 14 días de saturación, mientras - que con 6 % de cal aumenta hasta 300 % en las mismas - condiciones siendo 3 veces mayor al valor aceptado para la utilización antes mencionada; cabe hacer la aclaración que estos valores fueron obtenidos bajo las hipótesis en las que se basa la prueba Porter, que como ya se mencionó no es la más indicada para este tipo de material, pero debido a los adelantos tecnológicos en equipo de compactación actualmente con la prueba Proctor estándar se obtienen resultados por debajo de la realidad, por lo que se optó en establecer rangos comparativos de humedad y peso volumétrico seco como se observa en las figuras 1 y 2.

En conclusión se puede decir que:

-El agua juega un papel de suma importancia en las estabilizaciones de tipo químico.

-A mayor contenido de cal, mejores características de calidad del material estabilizado.

-Los contenidos de cal de los que mejores resultados se obtuvieron son 4 % y 6 % en peso seco del material original, observándose que no existe mucha diferencia entre utilizar uno u otro, en cuanto a resultados de calidad se refiere.

-La cal reacciona con el suelo en dos etapas, la primera que se manifiesta de forma inmediata como una brusca disminución de plasticidad y la segunda que se manifiesta paulatinamente al aumentar el tiempo de saturación formándose grumos cementados.

-Se comprueba que la cal no se lava, es decir si se permite que reaccione libremente la mezcla suelo-cal en presencia de agua, el efecto de la cal no se pierde sino que forma parte de la mezcla estabilizada.

RECOMENDACIONES:

En base a las conclusiones anteriores y al resumen de resultados de la tabla 3, puede decirse que:

Los porcentajes más recomendables para realizar la estabilización, son 4 % y 6 % de cal, que como puede observarse, no hay mucha diferencia entre usar uno u otro es decir, con 4 % se tiene un material de características bastante satisfactorias, claro que con 6 % el comportamiento de la estabilización se mejora, pero desde el punto de vista de economía, considerando que si por ejemplo se requiere construir 1 Km de subrasante, con espesor de 0.30 m, con peso volumétrico de  $1.4 \text{ T/m}^3$ , de 11.00 m de ancho de corona y considerando un precio de la cal de \$ 37,500/T, se tiene lo siguiente:

Con 4 % de cal:

$$1000\text{m} \cdot 0.3\text{m} \cdot 11.0\text{m} \cdot 1.4\text{T/m}^3 \cdot 0.04 \cdot \$37,500/\text{T} = \$ 6'930,000$$

Con 6 % de cal:

$$1000\text{m} \cdot 0.3\text{m} \cdot 11.0\text{m} \cdot 1.4\text{T/m}^3 \cdot 0.06 \cdot \$37,500/\text{T} = \$10'395,000$$

Por lo tanto es importante visualizar lo significativo que puede ser el trabajar con uno u otro porcentaje por lo que se recomienda que la cantidad de cal a utilizar sea igual a 4 % en peso seco del material a estabilizar.

COMPARACION DE HUMEDADES DEL ESPECIMEN SUMERGIDO  
COM EL CILINDRO PORTER

CAL %	TIEMPO Dias	$W_0$ %	$W_s$ %	$W_n$ %	$W_i$ %
2	7	21.32	29.10	22.13	28.41
	14	21.01	29.87	22.00	29.04
	28	20.97	31.50	22.02	31.01
	60	21.41	32.00	22.04	29.56
4	7	21.93	31.62	22.41	30.58
	14	22.03	32.01	22.51	31.23
	28	22.43	32.86	23.03	32.19
	60	22.17	34.19	23.15	32.97
6	7	22.87	31.87	23.03	30.44
	14	23.01	32.08	23.87	31.55
	28	22.98	32.88	23.13	30.97
	60	23.03	33.10	23.79	31.12

- TABLA 1 -

$W_0$  = Humedad óptima del espécimen. Porter

$W_s$  = Humedad en la parte superior del espécimen.

$W_n$  = Humedad en el núcleo del espécimen.

$W_i$  = Humedad en la parte inferior del espécimen.

COMPARACION DE HUMEDADES DEL ESPECIMEN SUMERGIDO  
DENTRO DE UNA BOLSA RANURADA.

CAL %	TIEMPO Días	$W_0$ %	$W_s$ %	$W_n$ %	$W_i$ %
2	7	32.10	41.45	34.10	41.07
	14	31.85	42.17	34.87	41.85
	28	31.73	42.82	35.75	42.55
	60	32.21	43.53	36.34	43.21
4	7	35.62	44.73	37.21	44.32
	14	35.43	45.12	37.70	45.10
	28	35.07	46.57	38.42	46.39
	60	35.29	47.35	39.03	47.17
6	7	36.82	47.80	39.21	47.52
	14	36.52	48.05	39.95	48.10
	28	37.11	48.96	40.45	48.87
	60	36.43	49.51	41.32	49.07

- TABLA 2 -

$W_0$  - Humedad óptima del espécimen Proctor

$W_s$  - Humedad en la parte superior del espécimen

$W_n$  - Humedad en el núcleo del espécimen

$W_i$  - Humedad en la parte inferior del espécimen

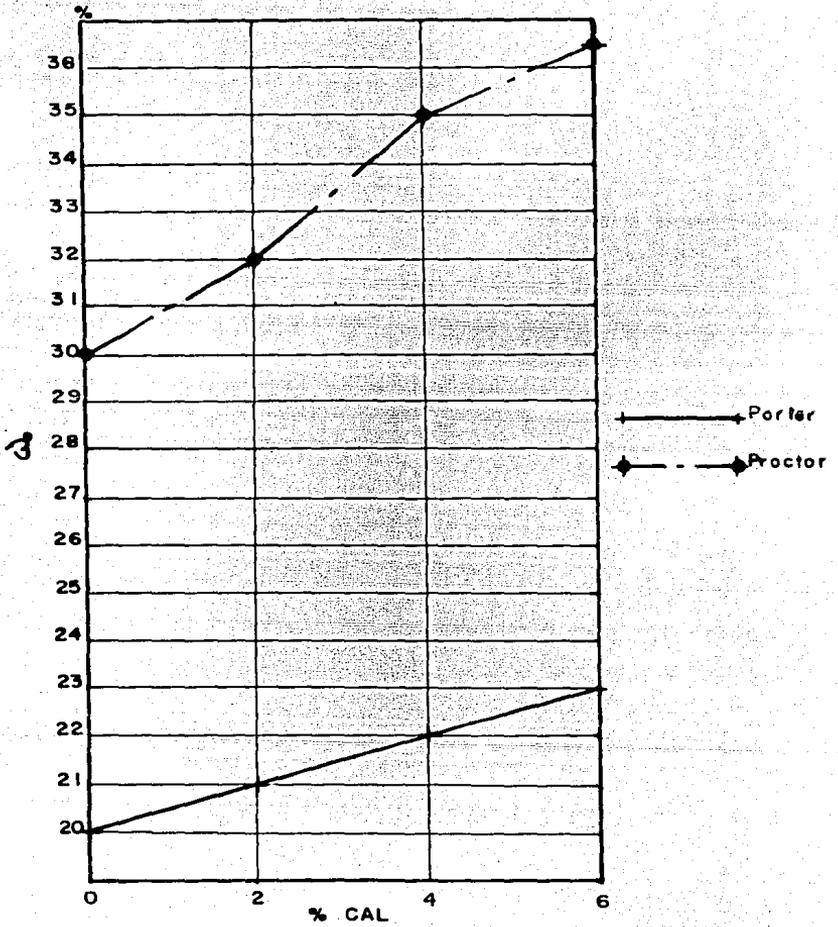
RESUMEN DE RESULTADOS

TIPO DE PRUEBA	DIAS	7	14	28	60
	% CAL				
% VRS ESTANDAR	0	2.21	--	--	--
	2	11.03	14.71	22.06	25.00
	4	85.29	113.24	156.25	161.03
	6	150.70	274.26	293.40	294.12
% EXP. LINEAL	0	9.33	--	--	--
	2	7.93	7.70	7.65	7.86
	4	0.55	0.53	0.50	0.58
	6	0.32	0.15	0.08	0.27
% IL PORTER	0	88.00	--	--	--
	2	81.00	84.00	86.00	87.00
	4	66.00	67.00	71.00	75.00
	6	62.00	65.00	67.00	68.00
% Ip PORTER	0	59.00	--	--	--
	2	45.00	48.00	51.00	54.00
	4	30.00	32.00	37.00	41.00
	6	23.00	26.00	29.00	32.00
% CL PORTER	0	23.19	--	--	--
	2	18.79	20.94	21.71	22.11
	4	14.66	16.73	17.46	17.87
	6	12.56	13.77	14.71	15.28

RESUMEN DE RESULTADOS

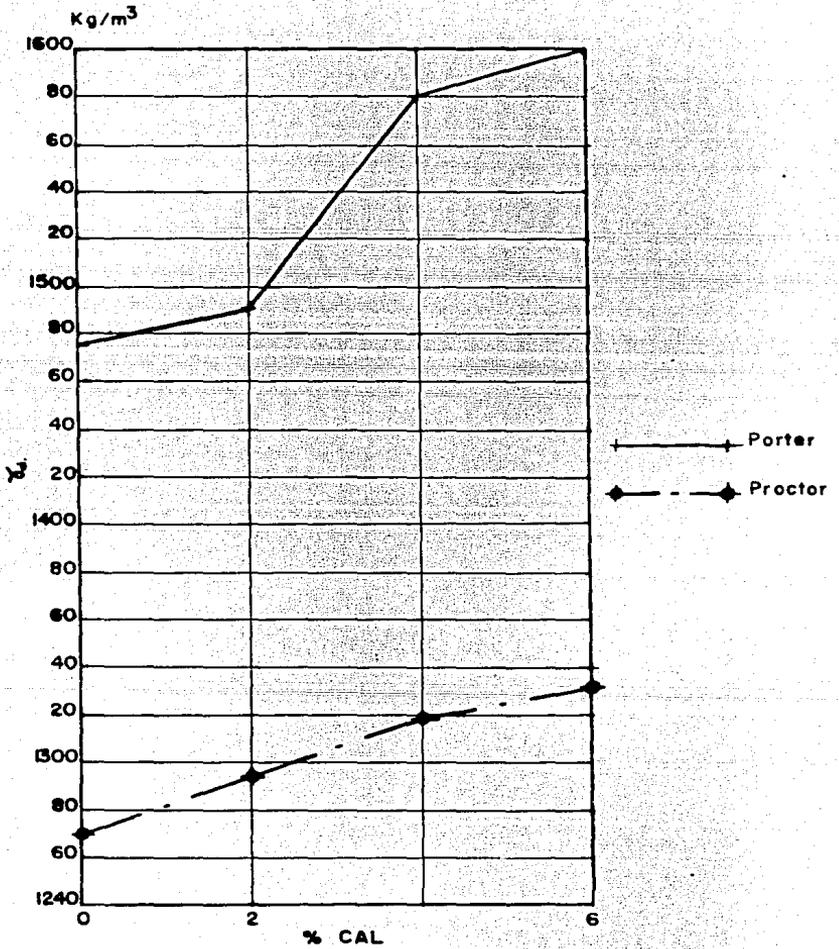
TIPO DE PRUEBA	DIAS % CAL	7	14	28	60
%	2	71.00	73.00	75.00	77.00
LL	4	57.00	58.00	61.00	62.00
SUM	6	55.00	57.00	59.00	61.00
%	2	35.00	38.00	40.00	43.00
Ip	4	18.00	20.00	25.00	27.00
SUM	6	10.00	13.00	18.00	21.00
%	2	17.03	17.87	18.56	19.01
GL	4	13.04	13.90	14.31	14.86
SUM	6	11.50	12.30	12.55	12.77

- TABLA 3 -  
cont.



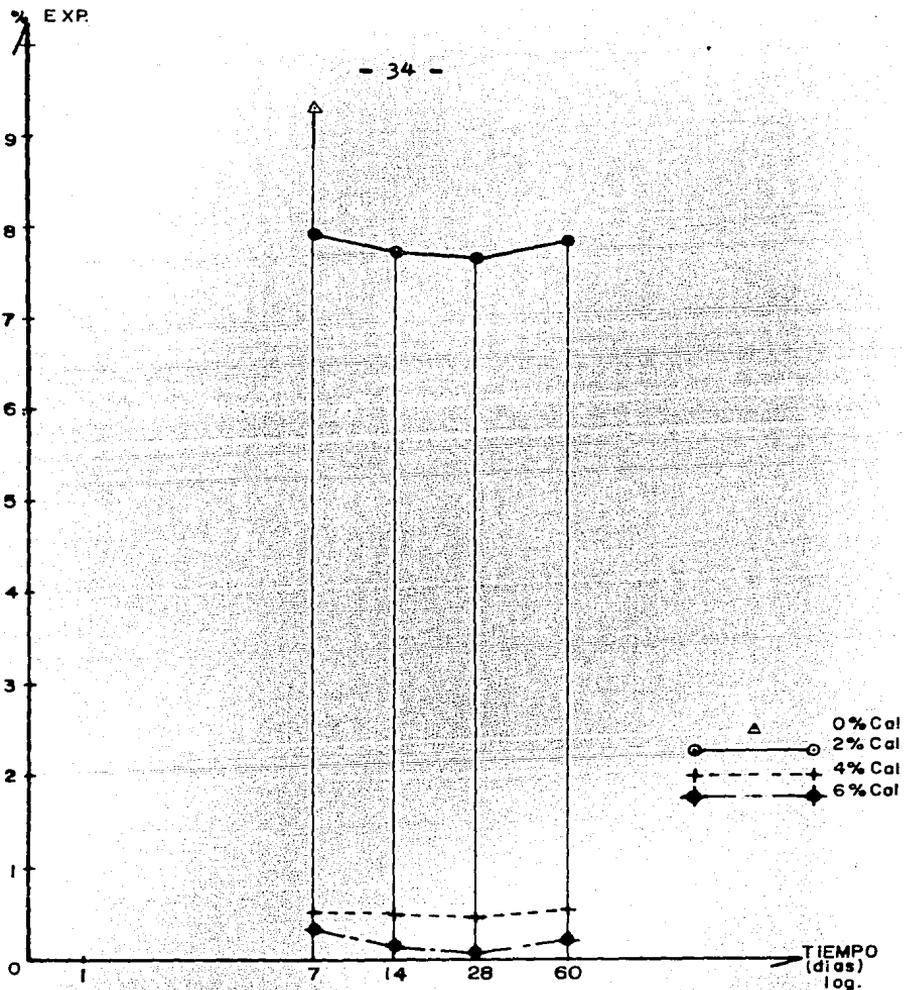
COMPARACION DE HUMEDAD OPTIMA (w) - % CAL.

FIG. I



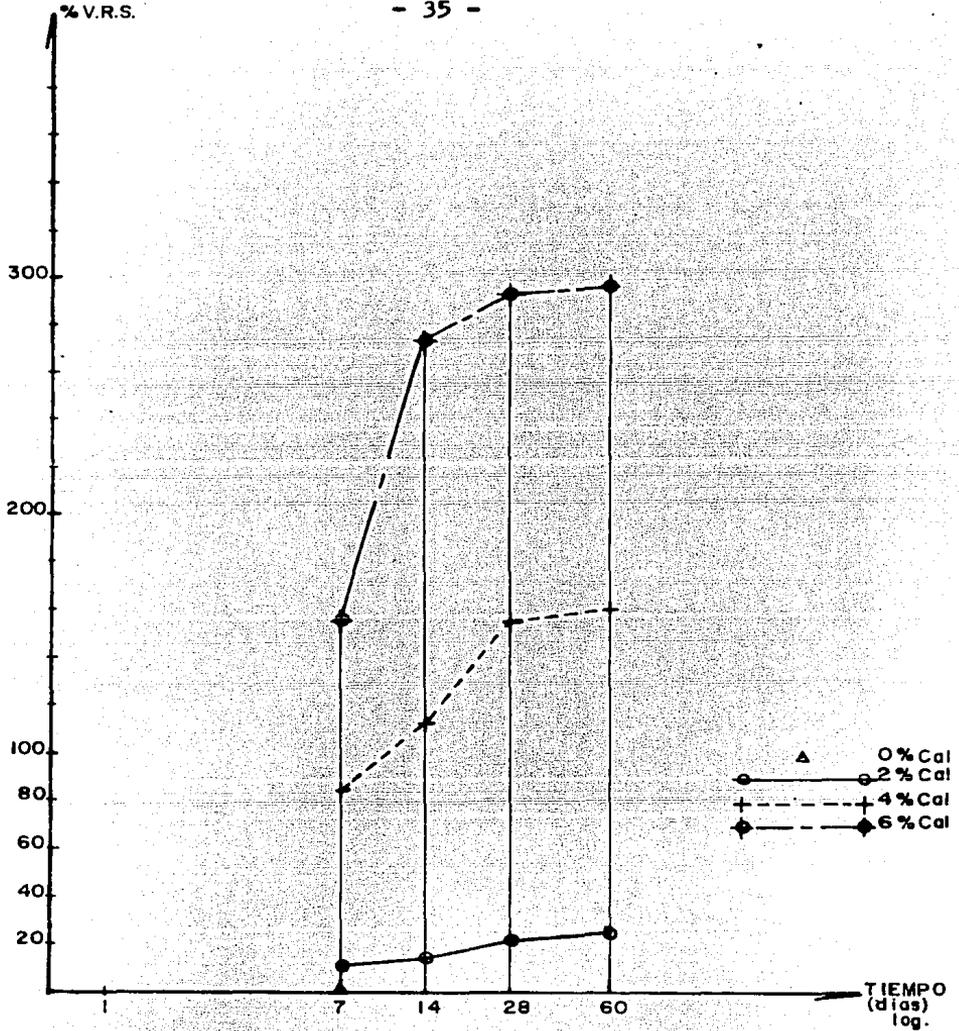
COMPARACION DE PESO VOLUMETRICO SECO MAX. ( $\gamma_d$ ) - % CAL.

FIG. 2



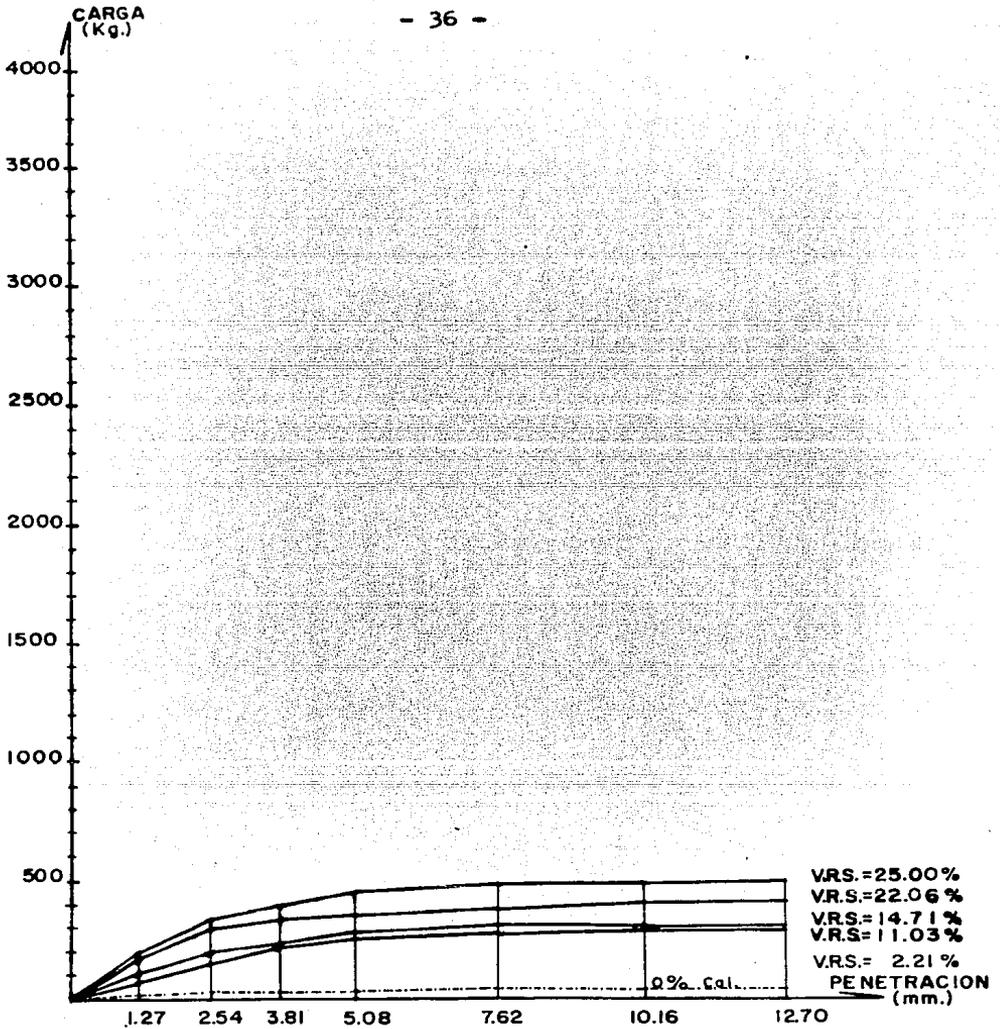
% EXPANSION LINEAL-TIEMPO-% CAL

FIG. 3



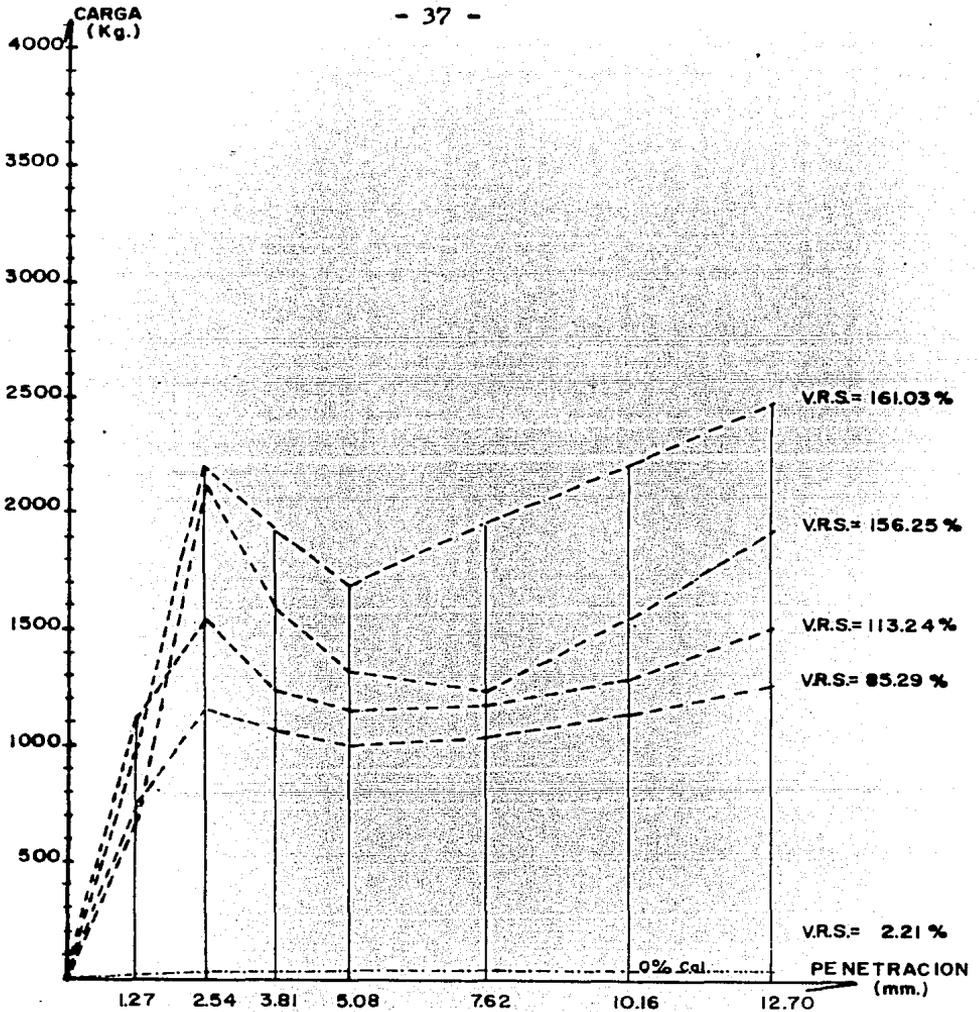
V.R.S.-TIEMPO-% CAL.

FIG. 4



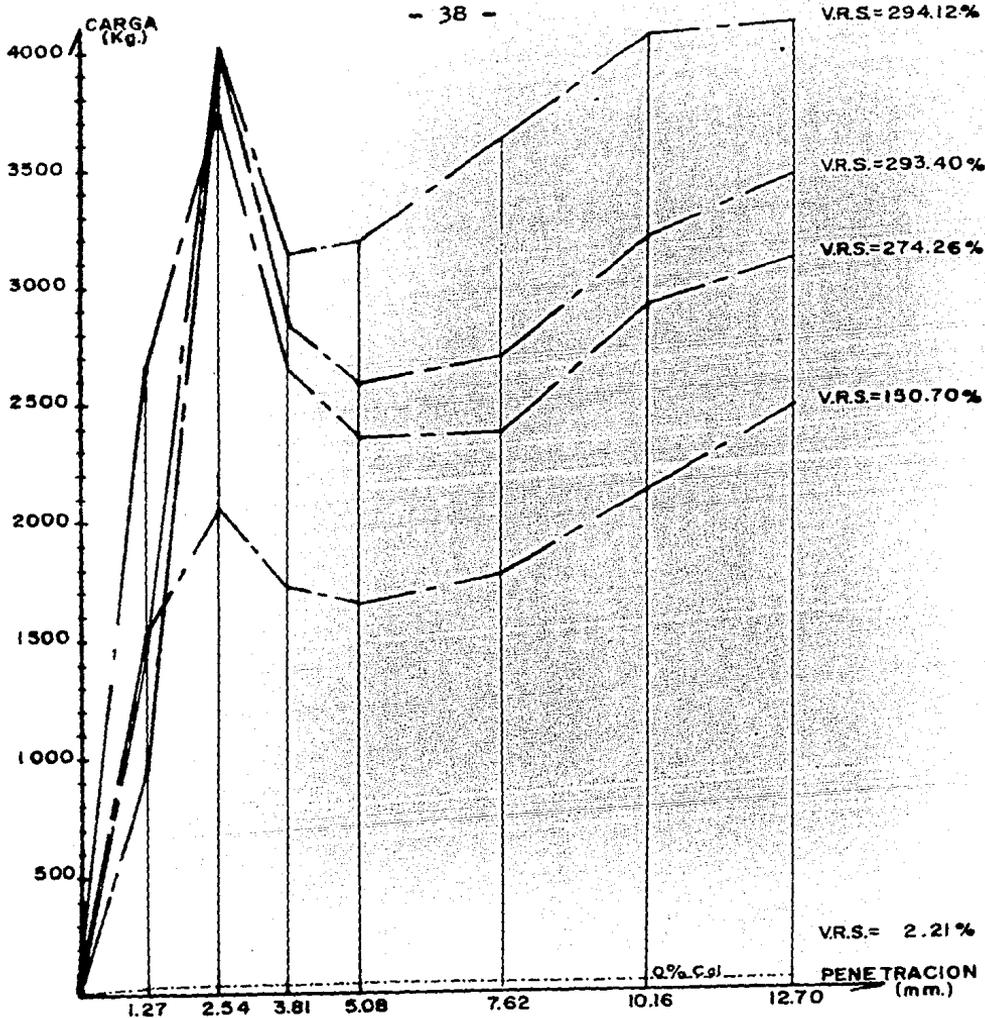
CURVAS DE VRS. OBTENIDAS EN LABORATORIO.  
2% CAL.

FIG. 4A



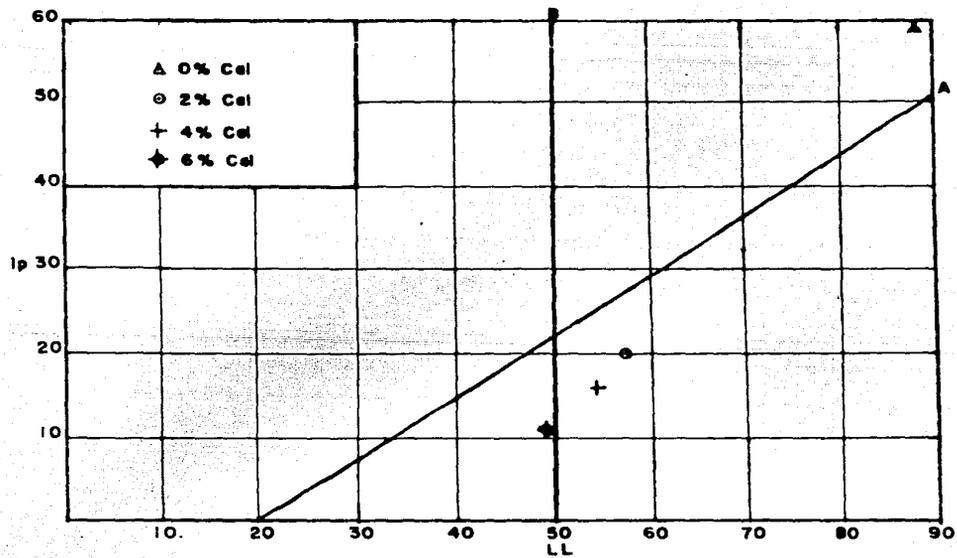
CURVAS DE V.R.S. OBTENIDAS EN LABORATORIO.  
4% CAL.

FIG. 4B



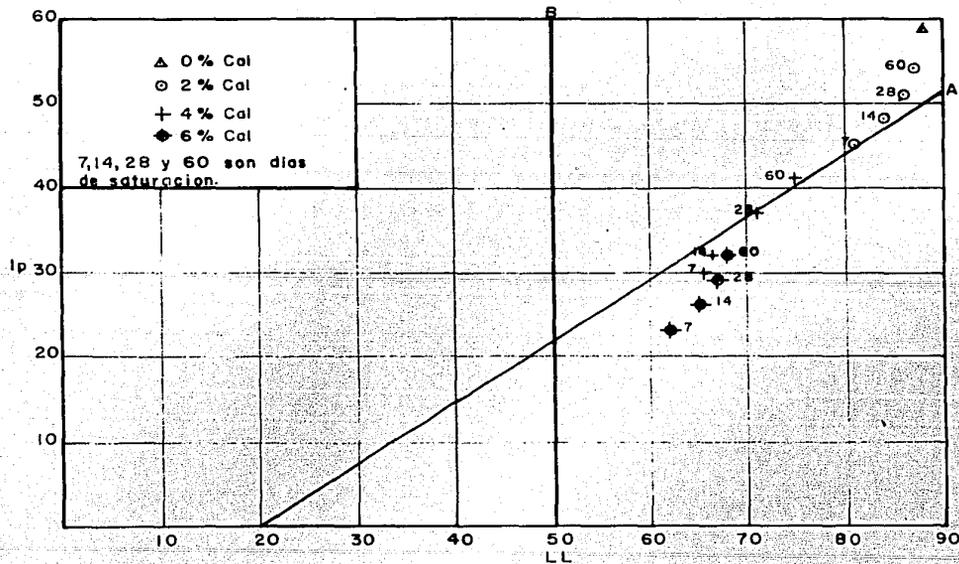
CURVAS DE V.R.S. OBTENIDAS EN LABORATORIO.  
6% CAL.

FIG. 4C.



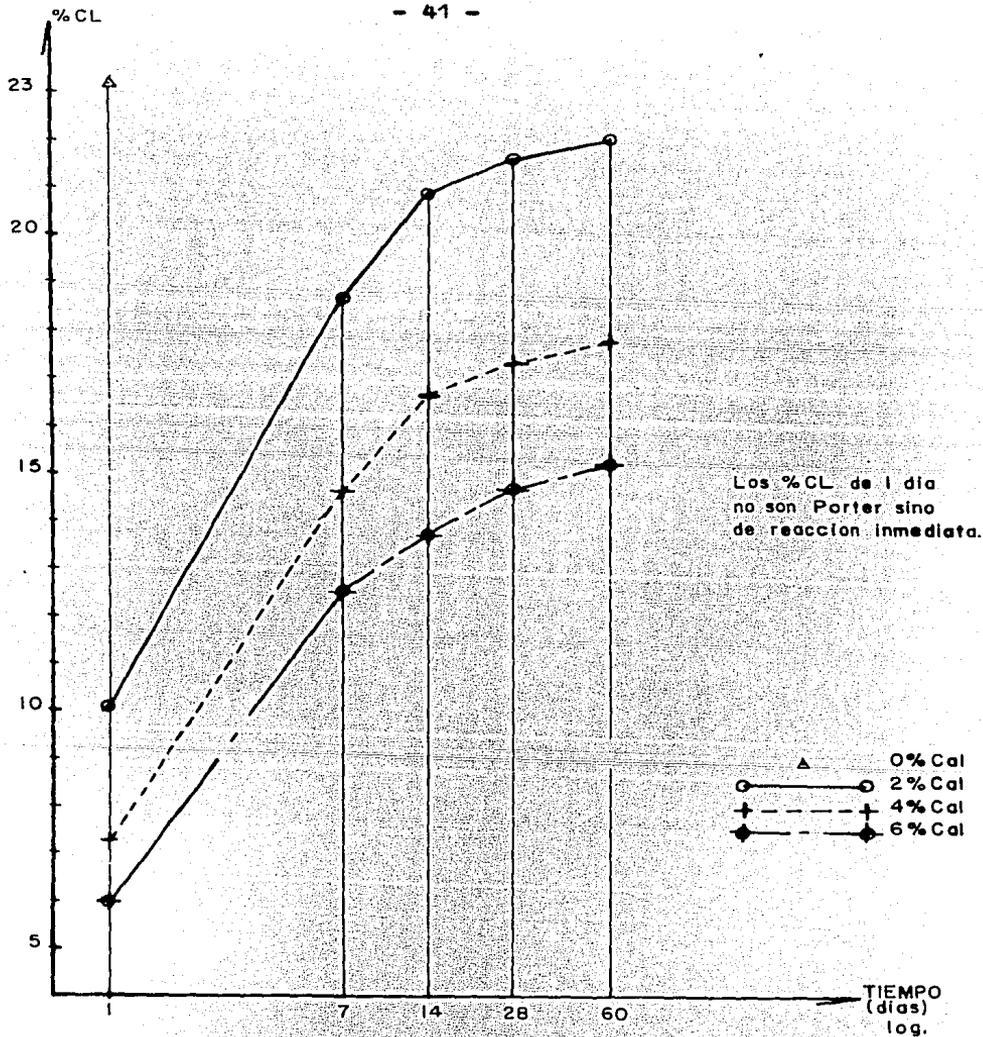
REACCION INMEDIATA DE LA ESTABILIZACION

FIG. 5



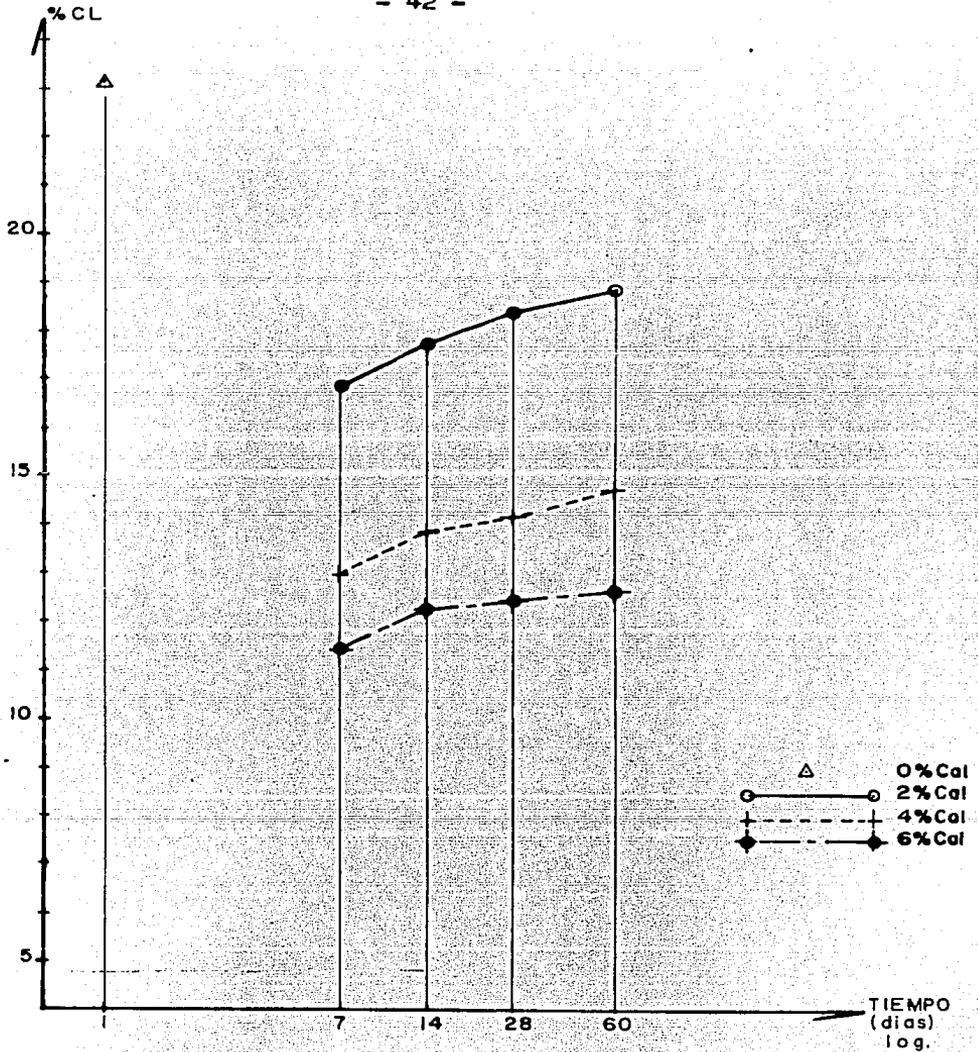
VARIACION DE PLASTICIDAD SUMERGIDO CON EL CILINDRO PORTER.

FIG. 6



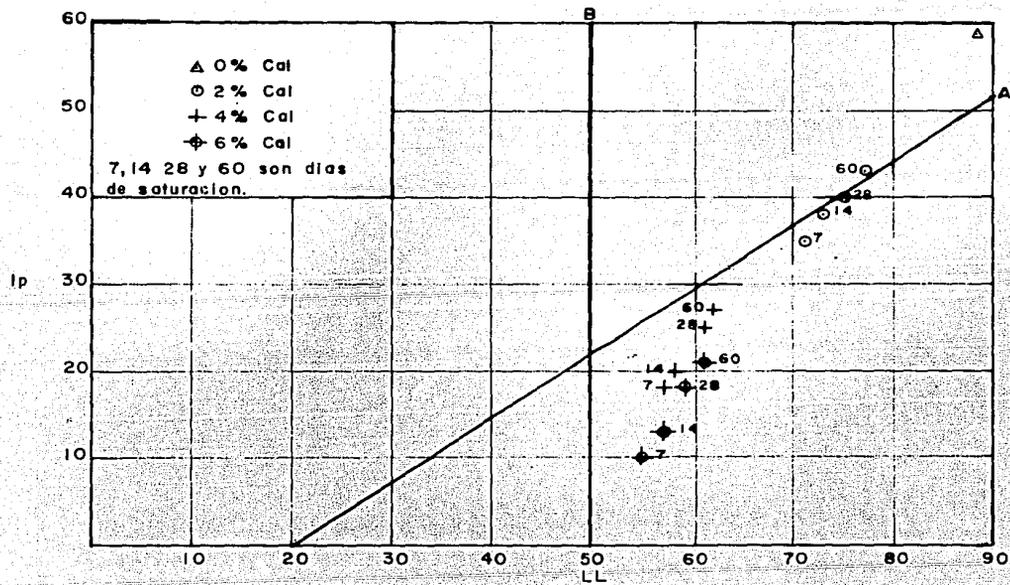
% CONTRACCION LINEAL-TIEMPO-% CAL  
SUMERGIDO CON EL CILINDRO PORTER.

FIG. 7A



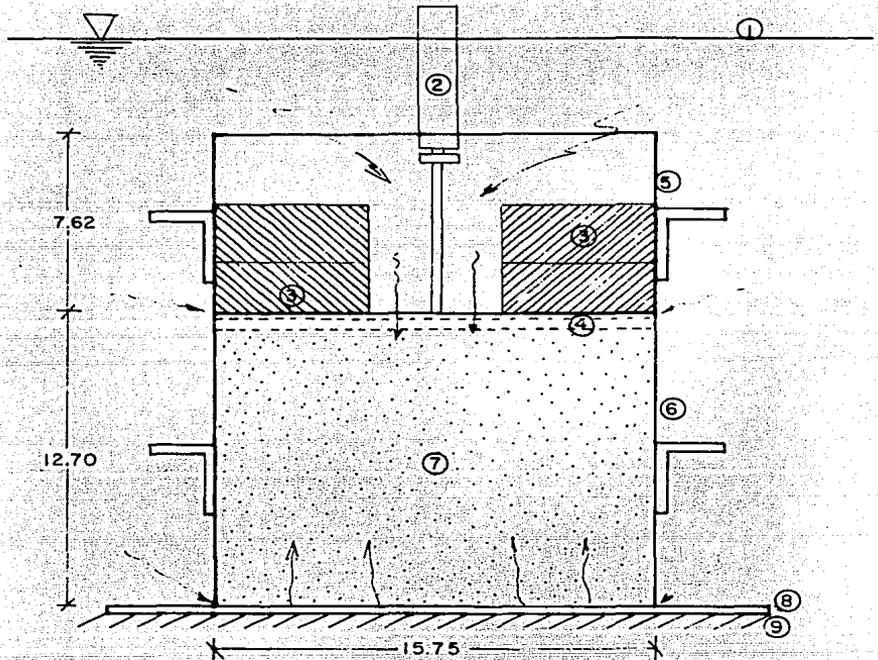
% CONTRACCION LINEAL-TIEMPO-% CAL.  
SUMERGIDO CON LA BOLSA RANURADA.

FIG. 7B



VARIACION DE LA PLASTICIDAD SUMERGIDO CON LA BOLSA RANURADA.

FIG. 8

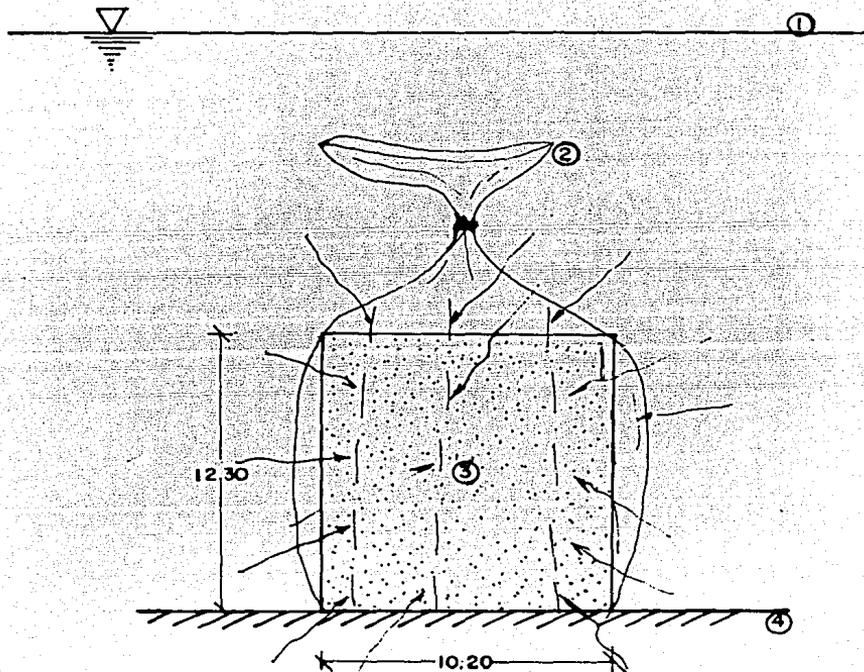


- ① Nivel de agua.
- ② Vástago desplazable.
- ③ Placas de carga.
- ④ Placa metálica perforada.
- ⑤ Collarín.
- ⑥ Cilindro
- ⑦ Especimen compactado.
- ⑧ Placa metálica perforada.
- ⑨ Fondo del tanque.

acof. en cm.

ESPECIMEN SUMERGIDO CON EL CILINDRO PORTER.

FIG. 9 A.



- ① Nivel de agua
- ② Bolsa de plástico ranurada
- ③ Especimen compactado
- ④ Fondo del tanque.

acot. en cm.

ESPECIMEN SUMERGIDO CON LA BOLSA RANURADA.

FIG. 9B

**-REFERENCIAS:**

- 1.- Normas de Construcción. Tomo IX. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. 1981. México.

**-BIBLIOGRAFIA:**

- 1.- Mecánica de Suelos. Tomo I. Juárez Badillo-Rico Rodríguez. 1985. México.
- 2.- La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres. Volumen 2. Rico R.-Del Castillo. 1978. México.
- 3.- Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica. Terzaghi-Peck. 1955. Argentina.