

ESTABILIZACION DE SUELOS
CON GEOTEXTILES

POR
GISELA ELENA GUADALUPE
MARQUEZ BARRAZA

TRABAJO FINAL

que se presenta como parte
de los requisitos para obtener el grado de

MAESTRO EN INGENIERIA
MECANICA DE SUELOS

UNAM



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



DEPA

T. UNAM
1981
MAR

RECONOCIMIENTO

Por este medio quiero agradecer a todas y cada una de las personas que de una manera directa o indirectamente me alentaron para realizar mis estudios de posgrado.

A todos mis maestros, en especial al M. en I. Abraham Díaz Rodríguez y al Dr. Raúl J. Marsal Córdoba, por la valiosa aportación de sus conocimientos.

Con todo mi amor a Eduardo por
apoyarme siempre a realizar mis
proyectos.

A mis hijos:

Giselle, Eduardo y Rolando

A mis queridos padres:

Nereo y Ma. Elena

A mis hermanos:

Emilia, Manuel y Alejandro

I N D I C E

1.	Introducción	1
2.	Geotextiles	10
3.	Características de los Geotextiles	18
4.	Empleo de Geotextiles como Refuerzo de la Cimentación de Carreteras Construidas sobre Suelo Blando	30
5.	Aplicaciones en México	42
6.	Bibliografía	56

1. INTRODUCCION.

1.1 Generalidades

Muchas urbanizaciones y obras de Ingeniería Civil en general se encuentran situadas cerca de estuarios, deltas, lagos, llanuras de inundación o dentro de valles. En estas áreas, por lo general siempre se encuentran localizadas algunas zonas de suelos blandos y compresibles que se caracterizan por su baja resistencia y alta relación de vacíos; o áreas en las que las condiciones climáticas y orográficas favorecen la formación de turberas y pantanos en los que existen suelos con alto contenido de agua y materia orgánica.

Los suelos arriba mencionados pueden denominarse, según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, como: arcillas de alta plasticidad, arcillas orgánicas de plasticidad media a alta y turbas, (CH, OH y Pt), según sea el caso. Todos ellos cuando se pretende utilizarlos como elemento de soporte de cualquier estructura presen

tan problemas de inestabilidad durante la construcción y problemas de asentamientos a largo plazo; es por esto que ha sido preocupación de los ingenieros estudiar las propiedades mecánicas de esos suelos y comprender su comportamiento para proyectar y construir obras de una manera segura y económica.

Los objetivos de este trabajo son: a) presentar una visión general de las aplicaciones de geotextiles para reforzar la cimentación de carreteras y para estabilizar taludes de cortes cuando se construye a través de suelos blandos; b) observar como llegó el ingeniero al empleo de estas membranas dentro del campo de la Geotecnia, buscando soluciones más económicas después de analizar otros métodos de estabilización.

1.2 Antecedentes

A continuación se mencionarán brevemente los métodos más comunes que ha seguido tradicionalmente el ingeniero para mejorar las propiedades del suelo de cimentación y asegurar la estabilidad de terraplenes (Ref. 23):

1.2.1 Construcción del terraplén por etapas

Cuando la resistencia inicial del suelo es bastante baja, esta puede incrementarse gradualmente construyendo el terraplén por

etapas; dando suficiente tiempo entre cada incremento de la altura de la terracería para asegurar una adecuada disipación de la presión de poro y aumentar la resistencia al esfuerzo cortante para soportar los subsecuentes incrementos de carga.

Este método es aplicable cuando el estrato compresible es delgado o cuando la permeabilidad está dentro del rango 10^{-6} a 10^{-7} cm/s. Los suelos en los que puede emplearse este método incluye a limos, limos arcillosos, arcillas con limo y partes de arena, turbas fibrosas, etc. Cuando se cumplen las condiciones arriba mencionadas, puede utilizarse este método en combinación con otros, como por ejemplo: drenes verticales o construcción de bermas para acelerar el flujo y por lo tanto, el proceso de consolidación, en beneficio del tiempo de construcción.

1.2.2 Modificación de las cargas

En terrenos de baja capacidad de carga, es posible mantener el esfuerzo cortante abajo de la resistencia no drenada inicial del suelo por alguna de las siguientes técnicas constructivas: a) uso de terraplenes con taludes muy tendidos, b) uso de bermas y/o c) empleando para relleno de las terracerías materiales de bajo peso volumétrico; Para seleccionar la técnica a seguir hay que tener en cuenta las fuentes de aprovisionamiento de material para la construcción ya que los grandes volúmenes involucrados en los puntos a y b, auna

dos a las distancias de acarreo de aquellos, incrementan el costo por kilómetro de carretera; y los materiales necesarios para el punto c, deben cumplir con ciertas propiedades índice y mecánicas y puede ser que en la región de la obra no exista ese tipo de materiales.

Con la construcción de taludes muy tendidos, o con el uso de bermas, la sección transversal del terraplén adquiere una forma más elongada y la superficie crítica de falla se desarrolla a mayor profundidad. Esto resulta favorable cuando la resistencia al esfuerzo cortante del subsuelo se incrementa con la profundidad.

1.2.3 Empleo de sobrecarga

Sobrecarga, como su nombre lo indica, consiste en cargar al suelo más de lo requerido, construyendo un terraplén con una altura mayor (aproximadamente entre 10 y 20 %) que la altura final del proyecto. Cuando se alcanza el asentamiento primario previsto para la carga de la estructura, se remueve la sobrecarga y se procede a la terminación de la obra.

1.2.4 Drenado del estrato compresible

Los sistemas de drenaje para estabilización de suelos blandos buscan acelerar la consolidación primaria facilitando la evacuación del agua intersticial reduciendo la longitud de la trayectoria de salida.

Dentro de esta clasificación pueden incluirse: a) los drenes verticales b) los drenes horizontales y c) la electro-ósmosis y d) pozos profundos de bondeo; estos métodos se emplean en combinación con el de sobrecarga del terraplén.

a) Los drenes verticales atraviesan el estrato compresible distribuido según las necesidades y pueden ser: perforaciones de arena graduada apropiadamente o de arena previamente empacada en tubos de plástico; drenes de plástico cubiertos por alguna membrana filtrante, drenes de cartón prensado. Cuando el suelo por drenar es una turba o una arcilla orgánica pueden utilizarse tubos de PVC perforados hasta de 2.5 cm de diámetro.

Siempre que se utilicen drenes verticales primero habrá que colocar en la superficie del terreno una capa de material granular que servirá como plataforma de operaciones y como capa-drén del terraplén, ya que en ella se disipará el exceso de presión de poro.

b) Los drenes horizontales son una trinchera rellena de arena graduada en la que puede o no haber tubos ranurados; pueden instalarse longitudinal o transversalmente al camino.

c) La electro-ósmosis es un método ideado por Leo Casagrande (Ref. 33) y se utiliza cuando el suelo cumple con las siguientes condiciones:

- es un limo o limo arcilloso saturado
- está normalmente consolidado
- el agua intersticial tiene baja concentración de electrolitos
- el gradiente eléctrico está en la misma dirección que el gradiente hidráulico.

El método consiste en pasar una corriente directa entre unas varillas o tubos de aluminio o acero (de 1 a 10 cms. de diámetro), que insertadas en el suelo sirven de ánodo y los pozos de bombeo convencional que sirven como cátodo. La corriente tendrá un gradiente de potencial entre 20 y 50 V/m, dependiendo del tipo de suelo; el coeficiente de permeabilidad electro-osmótica medido en cm/seg, bajo la acción de un gradiente potencial de 1 V/cm es mucho más elevado que el coeficiente de permeabilidad para el agua en suelos dotados de contenido coloidal. A fin de terminar el proceso puede ser necesario invertir la polaridad del sistema para producir un grado más uniforme de consolidación del suelo tratado.

Con este procedimiento la cantidad de agua removida del subsuelo es directamente proporcional a la corriente eléctrica y a la resistividad del suelo. En suelos en los que el contenido de agua es bajo, la electro-ósmosis puede emplearse conjuntamente con un tratamiento químico del suelo para acelerar la difusión de iones en arcillas de muy baja permeabilidad; este proceso se denomina electroinyección o tratamiento electroquímico.

ELECTROÓSMOSIS

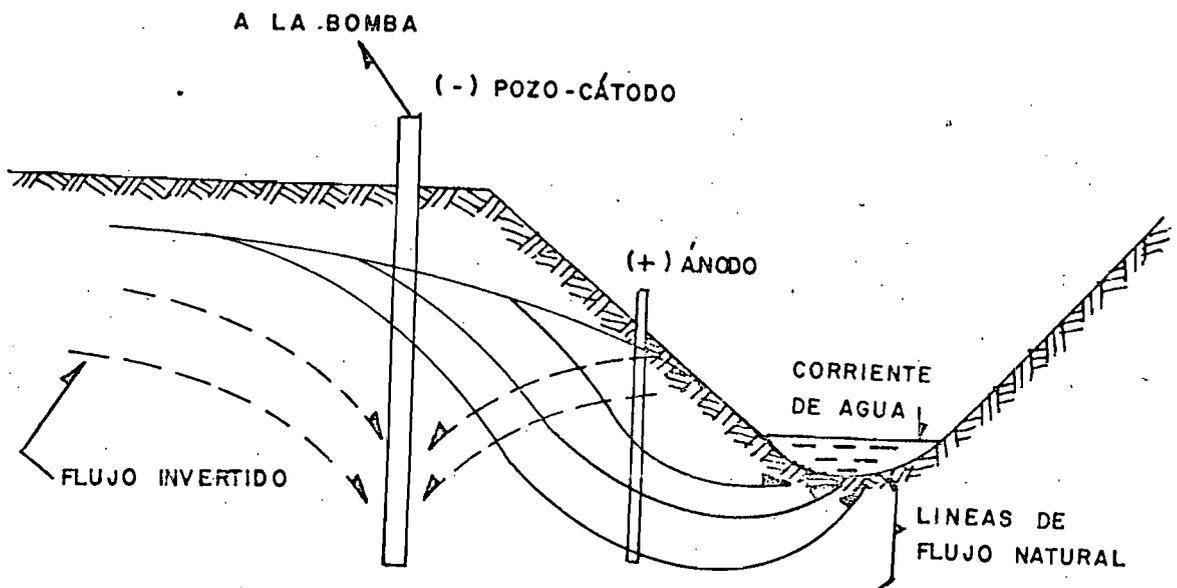


FIG.1.1 Inversión del orden natural del flujo mediante electroósmosis. Líneas punteadas (Ref.31).

1.2.5 Estabilización de estratos de gran espesor de suelos blandos

La estabilización de éstos puede hacerse por bombeo o por la introducción de agentes químicos, como por ejemplo: la cal o algunas resinas. El segundo método consiste en formar columnas de cal a través del estrato compresible; de esta manera se incrementa la resistencia al esfuerzo cortante y se disminuye la compresibilidad del mismo debido al intercambio catiónico y a la reducción del agua libre.

1.2.6 Vibroflotación.- Columnas de arena o de piedra

En un principio se utilizó este método para compactar depósitos de suelo granular suelto; en la actualidad tiene su principal aplicación para reforzar suelos cohesivos al introducirles piedra o arena en el agujero formado por el vibrador, mientras que es extraído (Refs. 39 a 41).

1.2.7 Sustitución del subsuelo compresible

Este método soluciona el problema quitando el material de mala calidad y sustituyéndolo por otro de mejores propiedades mecánicas. El procedimiento constructivo puede ser la evacuación y el relleno subsecuente con material granular o bien desplazar directamente el subsuelo suave por la producción de la falla de cortante bajo la aplicación de la carga del relleno del terraplén.

Es aplicable cuando el espesor de suelo compresible es reducido.

1.2.8 Uso de explosivos

Es un método utilizado para desplazar el terreno de cimentación de baja capacidad de carga, para desplantar el terraplén en un estrato subyacente de mejores características. Esta técnica tiene las siguientes variantes: a) barrenación en el frente de avance; b) barrenación bajo el cuerpo del terraplén; c) método de New Hampshire y d) método alemán. (Todos ellos se describen ampliamente en la Ref. 42).

1.2.9 Otras técnicas

En regiones donde el clima es de tipo ecuatorial o de tipo monzónico, la construcción de caminos secundarios tiene como limitantes el bajo poder de soporte de los suelos en estado humedo, lo cual es una característica común debido al elevado régimen pluvial. Este problema tendría fácil solución si hubiera abundante material rocoso a distancias razonables de transporte y por lo tanto, un costo también razonable para formar una adecuada base del camino; lo anterior sin embargo, no es frecuente, especialmente en regiones naturales denominadas "selva baja".

Es por esto que los ingenieros han tenido que recurrir a soluciones más económicas; tal es el caso de la construcción de caminos forestales en la Amazonía Peruana en los que se han utilizado los troncos de árboles adyacentes al camino y sobre los cuales se coloca una base de piedra de río (Ref. 22). Otro ejemplo es la construcción de la carretera costera de Bangkok a Siracha en Tailandia; una parte de ésta se construyó utilizando "bambú" como refuerzo de la cimentación colocándolo en el contacto terraplén - subsuelo (Ref. 23).

El empleo de los recursos naturales no siempre es lo más adecuado porque a largo plazo se llega a modificar la ecología de una región. Con el desarrollo de técnicas modernas dentro de la industria textil, han surgido membranas sintéticas que en la última década han sido aprovechadas por los ingenieros dedicados a la Geotécnia impulsados por factores económicos y ecológicos, y porque han encontrado que simplifican los procedimientos de construcción.

2. GEOTEXTILES.

2.1 Definición

Geotextiles o membranas para la Ingeniería Civil están definidas por la ASTM como: "Cualquier tela permeable empleada con materiales geotécnicos como parte integral de un proyecto hecho por el hombre, estructura o sistema" (Ref. 16).

2.2 Proceso de elaboración

Comunmente las membranas sintéticas pueden clasificarse por su proceso de formación y por el tipo de fibra que están constituidas. Básicamente, las dos categorías de proceso de formación son "tejido" y "no tejido" y las fibras de composición pueden ser prolipropileno, poliéster, nylon, polietileno o alguna combinación de estos. Dentro del procedimiento "no tejido" se distinguen los métodos de termosegado por altas temperaturas y el de entrelazado mecánico.

2.3 Antecedentes de los usos de geotextiles en la construcción

El uso de membranas naturales en la industria de la construcción probablemente data de décadas o siglos cuando algún innovador individual con la idea de reforzar el suelo blando, decidió enterrar la membrana dentro del material. El concepto de enterrar paja, pieles y troncos en arcilla podría ser considerado dentro de esta categoría.

Señalar el uso de membranas en los tiempos modernos es más difícil, pero puede servir como indicador el número de artículos publicados sobre membranas y sus usos.

Desde 1971, ha habido un rápido incremento en el número de publicaciones referentes al uso de geotextiles. La Administración Federal de Carreteras del Estado de Oregón, E.U.A., publicó un reglamento para el empleo de geotextiles, realizado por Bell y Hicks de la Universidad Estatal de Oregón.

El año de 1977 fue particularmente significativo porque la Escuela Nacional de Puentes y Caminos de Francia organizó el "Primer Congreso Internacional sobre el Uso de Membranas en Geotécnia". Las memorias de esta conferencia aportaron un total de sesenta y seis artículos.

2.4 Clasificación por el tipo de aplicación

Según Koerner y Welsh (Ref. 13), la clasificación por tipo de aplicación de los geotextiles puede tener el siguiente orden:

- separación de materiales
- refuerzo
- drenaje
- control de erosión
- ademes
- membranas impermeables

De estos seis tópicos específicos se hará una breve descripción:

a) Separación

Las membranas son usadas en el sentido de separación, para mantener apartados dos materiales diferentes; hay muchas aplicaciones en la construcción donde esto es importante. Esto es, desde luego, cuando hacen esta tarea de una forma más económica y más fácil que otros métodos comunes; las áreas típicas de aplicación son las siguientes:

- Separación de secciones zonificadas de diferentes materiales dentro de un terraplén, presas de tierra, o enrocamientos.

- Separación entre una base de piedra y una sub-rasante bajo un pavimento para aeropistas, carreteras, estacionamientos caminos secundarios, aceras, etc.; esto es, prevención de la contaminación de suelos.
- Separación del balasto de la vía del ferrocarril y el suelo de la sub-rasante.
- Separación de piedra y otro material que se pone en una base temporalmente para ser subsecuentemente removido, por ejemplo; sobrecargas para suelos blandos o bajada de aguas en bermas para taludes inestables.

b) Refuerzo

Se pretende usar los geotextiles como refuerzo de sub-rasantes de bajo valor relativo de soporte. El concepto es teóricamente legítimo debido a que la membrana decrece el nivel de esfuerzo en el suelo de cimentación debido al esfuerzo cortante horizontal movilizad^o por las cargas verticales. Esto hace que la membrana trabaje a tensión (similar a la acción de una varilla pretensada en concreto reforzado) lo cual distribuye la carga sobre un área más grande y por esto decrece su intensidad, un decremento en el esfuerzo significa menor probabilidad de falla y/o menores asentamientos. En el capítulo 4 se hablará más sobre este punto, ya que existen muchas controversias al respecto.

Empíricamente, se han usado como refuerzo en:

- Construcción de caminos temporales sobre pantanos, ciénegas, turberas y depósitos compresibles en general.
- Todas las áreas con problemas de separación listadas en la sección donde el suelo "in situ" necesita también refuerzo.
- Reducción de la necesidad de remover el suelo existente (de características relativamente pobres) en situaciones marginales.
- Incrementar la estabilidad de terraplenes y bordos.
- Contención de suelos que podrían expandirse lateralmente si se dejaran sin refuerzo.
- Reducción de la propagación de una fractura cuando se usa un concreto asfáltico nuevo en un reencarpetado sobre fracturas, roturas o cualquier otro desperfecto del pavimento existente.

c) Drenaje

Esta es probablemente la segunda gran área de la utilización de membranas, ya que el control de la permeabilidad por ellas ejercido puede ser económico en muchas situaciones de drenaje. Los

ejemplos de aplicación son los siguientes:

- Prevención del movimiento de suelos finos en una grava o en tubos del sistema de subdrenaje. Esto tiene el efecto de eliminar la necesidad de un filtro invertido, consistente de varias capas graduadas de arena y grava.
- Prevención de la penetración y pérdida de un material grueso de alta permeabilidad en el suelo adyacente.
- Eliminación de la necesidad de alguno o de todos los estratos superiores de arena usada en sobre-suelos estabilizados con drenes verticales, para proveer la salida del agua.
- Eliminación de la necesidad de algunos filtros graduados en las construcciones de presas de tierra, en los conductos de drenaje y áreas de las galerías de drenaje.
- Facilitar el drenaje entre muros de retención temporales y permanentes.

d) Control de erosión

En muchos casos, la membrana actúa como ambos: un separador y una capa-drén, pero cuando su función primaria es ayudar en el control de erosión se coloca en una categoría por separado.

Las instalaciones para control de erosión quedan comprendidas entre dos grandes grupos: estructuras para protección de costas y estructuras terrestres.

La función básica de las estructuras protectoras de costas es la de minimizar la erosión del suelo inducida por la acción de oleaje y por las corrientes a lo largo de la costa; así como absorber y disipar parte de las fuerzas inducidas por el agua. Un ejemplo de aplicación es cuando se usa como frontera debajo de una capa de roca, escolleras o gabiones, protección de taludes de márgenes escarpadas.

En estructuras terrestres, se usan geotextiles:

- Como protección a la erosión del agua, por ejemplo "lavaderos" de caminos.
- Como defensa de un depósito de limo o arena bloqueando el movimiento del suelo fino acarreado por agua o viento.

e) Ademes

Los materiales de las membranas pueden actuar como moldes para ser llenados con otros materiales y pueden así satisfacer la forma y topografía de cualquier superficie en la cual son construidos. La permeabilidad controlable permite fácilmente el escape de aire o agua pero contiene el material permanente inyectado.

f) Membranas Impermeables

Un geotextil puede ser transformado por impregnación y/o recubrimiento de vinilo, neopreno, poliuretano, etc., y de esta forma surge un nuevo conjunto de usos de membranas en la construcción.

Este tipo de membranas ha sido clasificado por la ASTM como "GEOMEMBRANAS"; su campo de aplicación es muy amplio y variado; no se mencionarán en las páginas siguientes por estar fuera del enfoque de este trabajo.

3. CARACTERISTICAS DE LOS GEOTEXILES.

En la ingeniería de suelos la aplicación de membranas sintéticas utilizadas como refuerzo a la tensión puede ser estudiada a través de sus características mecánicas, hidráulicas y de resistencia al ataque de agentes químicos.

La Sociedad Americana para Ensaye de Materiales (ASTM) dedica 2 volúmenes completos a ensaye de materiales textiles y un volumen para ensaye de plásticos. Muchas de estas pruebas, aunque no pueden usarse directamente, son una base excelente para proveer ensayos adecuados a las necesidades de la construcción.

En 1977 el Comité D-13 de la ASTM (en textiles) creó un nuevo comité (D-13.61) para evaluar, modificar y/o sugerir métodos de prueba para membranas geotécnicas. Tomando como referencia áreas de métodos comunes de prueba se concluyó que las características de los geotextiles pueden estudiarse en base a sus (Refs. 13 y 28):

- Propiedades mecánicas.
- Propiedades hidráulicas.
- Endurecimiento y propiedades varias.

Puede adicionarse a esta agrupación las propiedades físicas.

Se hará una descripción de cada uno de los tipos de propiedades mencionadas, así como del tipo de prueba correspondiente.

3.1 Propiedades Físicas

3.1.1 PESO. La prueba común de la ASTM para esta propiedad se designa D-1910. El peso de la membrana se expresa por unidad de área; en gramos por metro cuadrado, gramos por metro lineal o viceversa, en metros por kilogramo. En las últimas dos designaciones, el ancho de la membrana debe también establecerse. La determinación del peso puede hacerse con aproximación de 0'01 % del peso del espécimen, y la longitud y el ancho suelen medirse bajo tensión cero.

3.1.2 ESPESOR. El espesor de una membrana es la distancia entre la superficie más alta y más baja del material, medida bajo una presión específica. El método D-1777 de la ASTM estipula que el espesor es, medido con una exactitud de por lo menos 0.001 pulgadas (ó 0.02 milímetros) bajo las presiones indicadas en la tabla 3.1

Tabla 3.1 Guía de presiones necesarias para medir el espesor de una membrana

Tipo de Material	Tipo de Membranas	Intervalo de Presión
Suave	Cobertores, lanas, mem. no tejidas,	0.35 - 35 g/cm ²
Moderada	Mantas, sábanas, tapetes	1.4 - 144 g/cm ²
Firme	Mezclillas, fieltros mem. de asbesto	7 - 700 g/cm ²

Las membranas para la construcción no están incluidas en la tabla 3.1; debido a que el espesor se vuelve particularmente importante cuando se requiere en el cálculo de otra propiedad de la membrana; por ejemplo, la determinación del coeficiente de permeabilidad, requiere el espesor del espécimen a través del cual ocurre el flujo.

3.1.3 COMPRESIBILIDAD. El espesor de una membrana responde a la variación de presión (más bien que una presión específica puede ser medida de acuerdo al método D-1777 de la ASTM como se describió en el inciso anterior. En forma similar para la prueba de compresibilidad en geotecnia, la pendiente de la curva resultante es un módulo de compresibilidad (ó coeficiente) a este último se considera un índice de propiedad física/mecánica.

3.2 Propiedades Mecánicas

Se denominan propiedades mecánicas de los geotextiles a las siguientes características: resistencia a la tensión, módulo de deformación inicial, endurecimiento o tenacidad, resistencia al rasgado, resistencia al punzonamiento y resistencia a la abrasión.

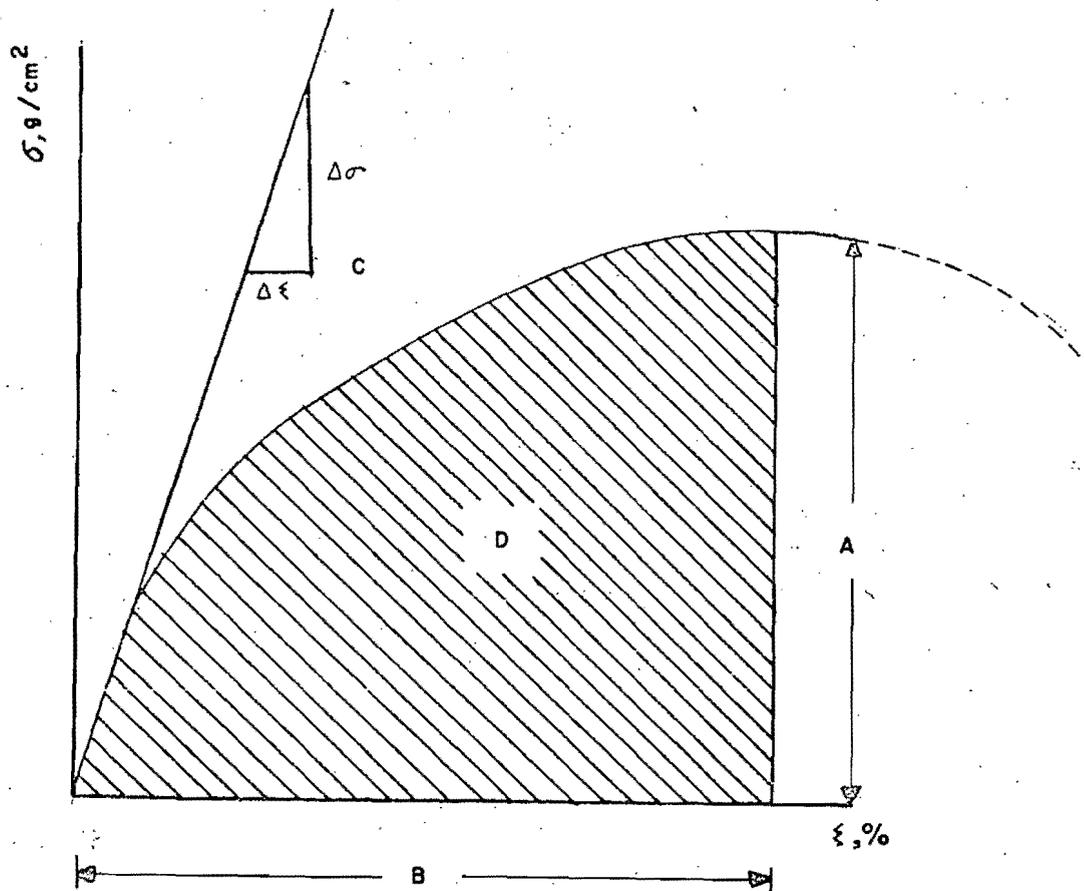
3.2.1 Resistencia a la tensión

Conocida como la resistencia de Grab, se mide con la prueba de resistencia usada comunmente en textiles con los métodos D-1682 y D-751 de la ASTM, en la cual solamente una parte del ancho del espécimen es sostenido entre abrazaderas y ensayado hasta la falla.

Típicamente se usa un espécimen de 4 pulgadas de ancho centralmente sujetado con mordaza de 1 pulgada de ancho. La prueba puede completarse en una máquina de prueba de incremento constante transversal, incremento constante de carga o incremento constante de extensión. La porción no cargada de la tira provee cierta tenacidad transversal.

Las relaciones esfuerzo-deformación se muestran en la figura 3.1; la resistencia a la tensión es el máximo esfuerzo que soporta la muestra de membrana.

FIG. 3.1 Prueba de resistencia a la Tension de Grab. (ASTM-1682)
Curva Esfuerzo - Deformacion



- A = RESISTENCIA ULTIMA
 B = ELONGACION
 C = MODULO=PENDIENTE DE LA CURVA
 ESFUERZO-DEFORMACION = $\frac{d\sigma}{d\xi} = \frac{\Delta y}{\Delta x}$
 D = TENACIDAD= AREA BAJO LA CURVA
 ESFUERZO-DEFORMACION

3.2.2 Deformabilidad bajo tensión (módulo de Grab)

El módulo de deformación influye en la capacidad de soporte del geotextil. En la gráfica esfuerzo-deformación, el módulo de Grab es la pendiente inicial de la curva, es decir, $= \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ (Fig. 3.1).

3.2.3 Tenacidad

Es el trabajo necesario para llevar una muestra a la falla; esto representa la habilidad del geotextil para soportar altas deformaciones y altos esfuerzos. Es el área bajo la curva de resistencia de Grab (Fig. 3.1)

3.2.4 Resistencia al rasgado (rasgado trapezoidal)

Es la fuerza requerida para evitar la propagación de la rotura de algunas fibras del geotextil; se mide con la prueba D-2263 geotextil, de la ASTM que consiste en insertar una muestra trapezoidal de membrana en una máquina de prueba de tensión con el objeto de que las fibras sean llevadas progresivamente al rasgado; para iniciar el proceso se hace un corte inicial de 5/8 de pulgada (Fig. 3.2)

3.2.5 Resistencia al punzonamiento

Es la fuerza que se opone a la penetración de material a través del geotextil. Previene al punzonamiento que pueda originar el

balasto de aristas afiladas; previene la migración de suelos finos hacia el balasto y viceversa.

La resistencia al punzonamiento se mide con la prueba de penetración (ASTM D-751) que consiste en incrustar una varilla de 5/16" de radio en una muestra de geotextil anclada en un molde de 1 3/4" (Fig. 3.3)

3.2.6 Resistencia a la abrasión

Se define como la resistencia a la fricción a largo plazo. Se estudia para prevenir la formación de oquedades producidas a largo plazo por estar en contacto con el agregado. Se estudia con la Prueba Tabor de Abrasión, ASTM D-1175, que consiste en aplicar una carga dinámica (N-1000 y W-1000 g) sobre un agregado que a su vez está colocado sobre una membrana para posteriormente evaluar el procedimiento de peso del material expulsado, debido a la fricción entre una y otra superficie; al final se efectúa la prueba de Grab (Fig. 3.4).

3.2.7 Efecto de las condiciones de prueba sobre las propiedades mecánicas.

Entre los factores más importantes que afectan las propiedades mecánicas de los geotextiles, se encuentran: las dimensiones de la

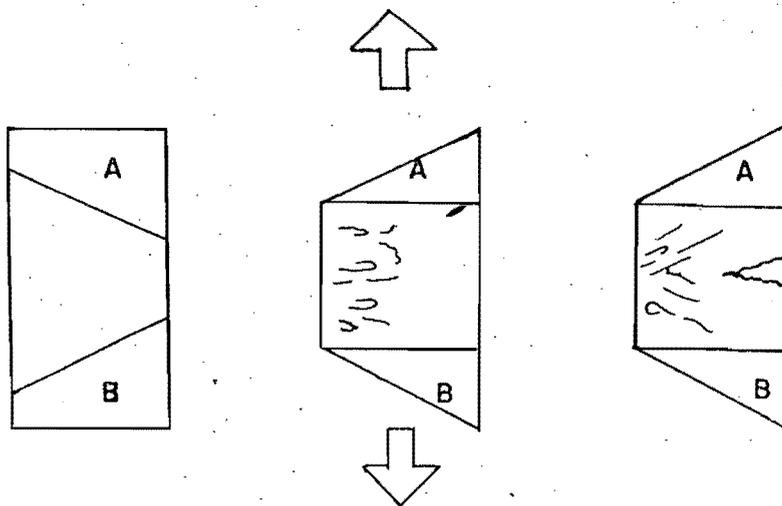


FIG 3.2 Prueba de resistencia al rasgado (ASTM 2263)

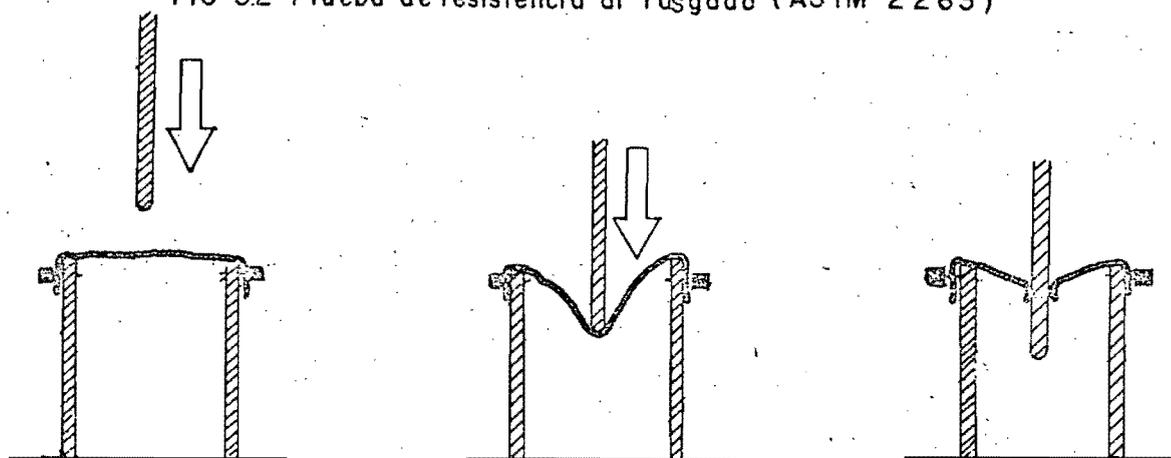


FIG 3.3 Prueba de resistencia al punzonamiento (ASTM D-751)

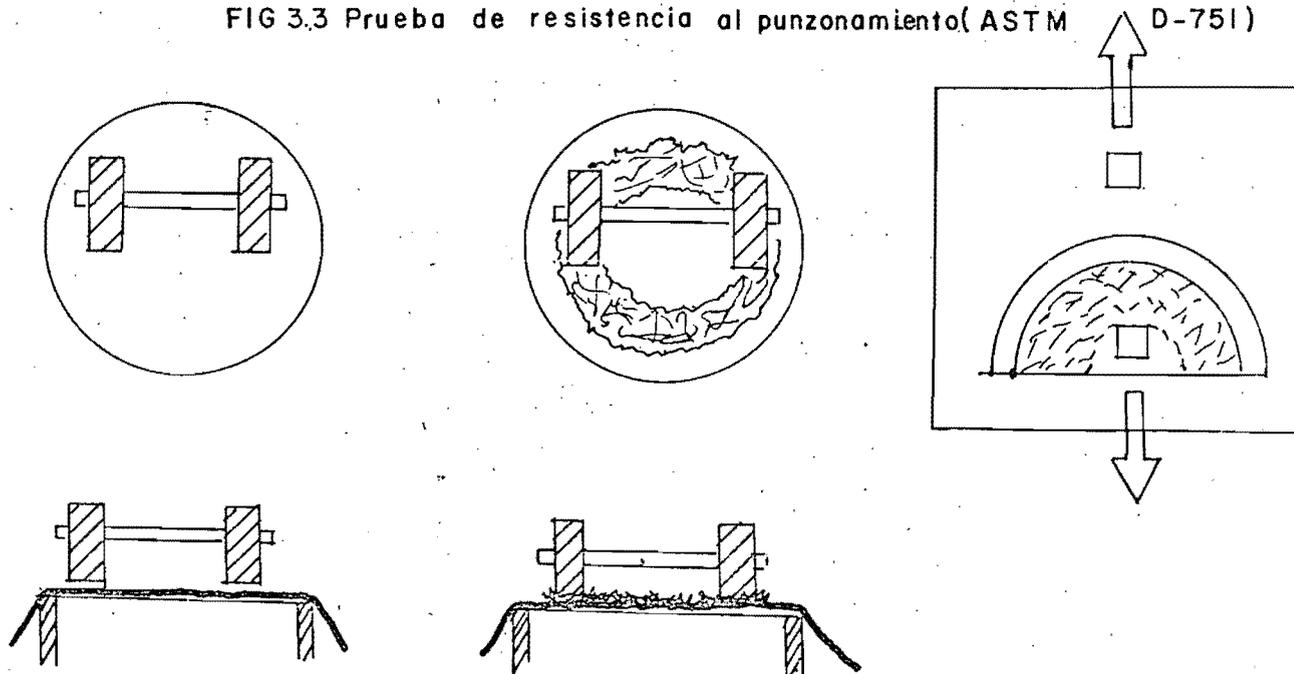


FIG.3.4 Prueba de resistencia a la abrasión (ASTM D-1175)

muestra ensayada, la temperatura, la dirección de la carga, el intervalo de aplicación de la carga y el grado de humedad.

3.3 Propiedades Hidráulicas

Las propiedades hidráulicas que se consideran importantes para aplicaciones en la ingeniería civil son: la permeabilidad inicial, resistencia al taponamiento y resistencia a la tubificación.

3.3.1 Permeabilidad al aire

El método D-737 de la ASTM define permeabilidad al aire como: "el volumen de aire que fluye a través de un material bajo una diferencia de presión entre las dos superficies de la membrana". Es to se expresa en pies cúbicos por minuto de aire por pié cuadrado de membrana.

Se usan frecuentemente presiones equivalentes a 0.5 pulgadas (12.7 mm.) de agua; mayores presiones pueden seleccionarse dependiendo de la membrana. El flujo de aire se toma de cartas de cali bración de pruebas de los fabricantes de equipo para dar un nivel de presión de aire (determinada con un manómetro vertical de aceite con trolado) y el tamaño del orificio de salida de aire.

3.3.2 Permeabilidad al agua

Puede estudiarse con un permeámetro de carga constante efectuando ciertas adaptaciones. Un espécimen de la membrana a probarse se coloca en una base plástica y se acomoda con otro tubo de plástico (4 1/2 pulgadas de diámetro) en la parte superior. El agua se introduce en la parte superior del tubo desde donde fluye hacia abajo a través de la membrana y fuera del sistema. Se mantiene constante la carga, se llevan a cabo 3 pruebas con cargas de 3, 12 y 36 pulgadas, respectivamente. Los datos se grafican de manera convencional para obtener la permeabilidad de la membrana en centímetros por segundo.

3.3.3 Prueba de Relación de Gradiente

Esta prueba designada como CW-02215 por el Cuerpo de Ingenieros mide la relación gradiente y es también un indicador de la resistencia al taponamiento y obstrucción de la membrana. La relación gradiente está definida como la relación del gradiente de filtración a través de la membrana y una pulgada de suelo, al gradiente a través de dos pulgadas adyacentes de suelo.

La prueba es llevada a cabo en el permeámetro de carga constante con la membrana sujeta firmemente a través del filtro y finalmente fuera del permeámetro. El agua corre por 24 horas antes de los datos se tomen para calcular la relación de gradiente.

Es importante conocer la resistencia al taponamiento, ya que el objetivo es evitar la migración de partículas a través del geotextil.

3.3.4 Tamaño de abertura equivalente

El tamaño de abertura equivalente (EOS), como lo refiere el Cuerpo de Ingenieros en la especificación CW 02211, es un índice del diámetro de los canales más largos que están abiertos entre una y otra cara del geotextil (No. de malla equivalente US estandar). Esto se mide con pruebas comunes a la Metalografía cuantitativa, con dispositivos "analizadores de imagen", los cuales rápidamente analizan el espécimen y por reflexión de luz dan el porcentaje de vacíos de la fibra; la determinación final se hace con base a la media estadística de los datos obtenidos.

3.3.5 Resistencia a la tubificación

Si el gradiente de flujo del suelo se vuelve demasiado grande para que la membrana lo retenga, la falla de la membrana se representará haciendo una prueba de laboratorio similar a la prueba de gradiente ascendente; se establece el flujo de modo que genere altos gradientes. Los niveles piezométricos son medidos por toda la columna de suelo bajo la membrana y en ambos lados de ésta. La falla de la membrana ocurre en forma de un "estallido" con el

suelo subyacente fluyendo hacia arriba a través de la membrana fallada.

3.4 Prueba para endurecimiento y propiedades varias

3.4.1 Resistencia a los reactivos químicos

El método D-543 de la ASTM cubre esta área bajo el título "Resistencia a los Plásticos de los Reactivos Químicos". El método de prueba incluye disposiciones para medir cambios de peso, dimensiones apariencia y propiedades de resistencia. Las disposiciones están basadas también para varios tipos de exposición y diferentes reactivos a elevadas temperaturas.

Se trata de evaluar el comportamiento de fibras (acetatos, dacrón, nylon, orlón, rayón, algodón, lana, seda, etc.), bajo una gran variedad de agentes químicos (ácido sulfúrico, ácido hidródrico, ácido nítrico, ácido hidrofúorídrico, ácido fosfórico, ácidos orgánicos, hidróxido de sodio, agentes blanqueadores, agentes abrasivos y detergentes, soluciones salinas, químico-orgánicas, etc.), muchos de los cuales se emplean en diferentes concentraciones y temperaturas. Después de la exposición especificada las muestras son limpiadas, secadas con aire y después acondicionadas a 70° F y 65% de humedad relativa por 16 horas.

Evaluada la resistencia a la ruptura, elongación a la ruptura y tenacidad de las fibras "expuestas" se comparan con los datos de especímenes de control de las fibras que no fueron expuestas a la química.

3.4.2 Resistencia a la luz y a la intemperie

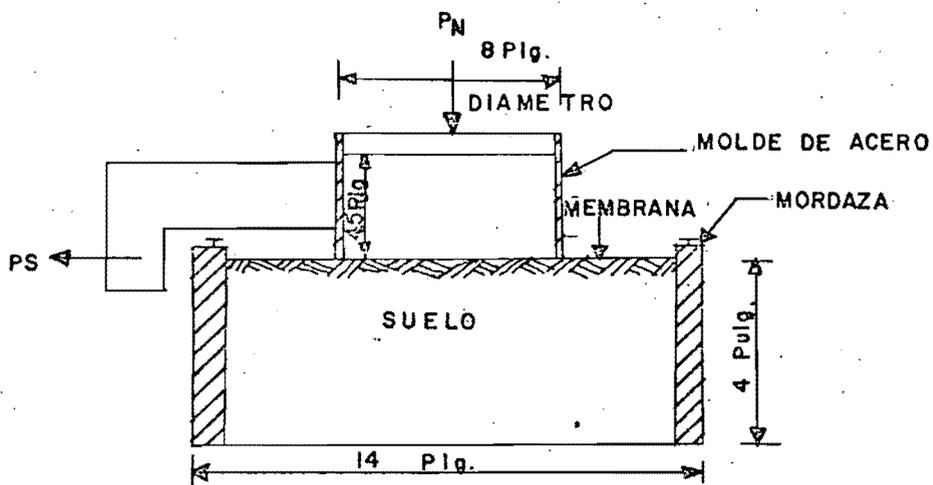
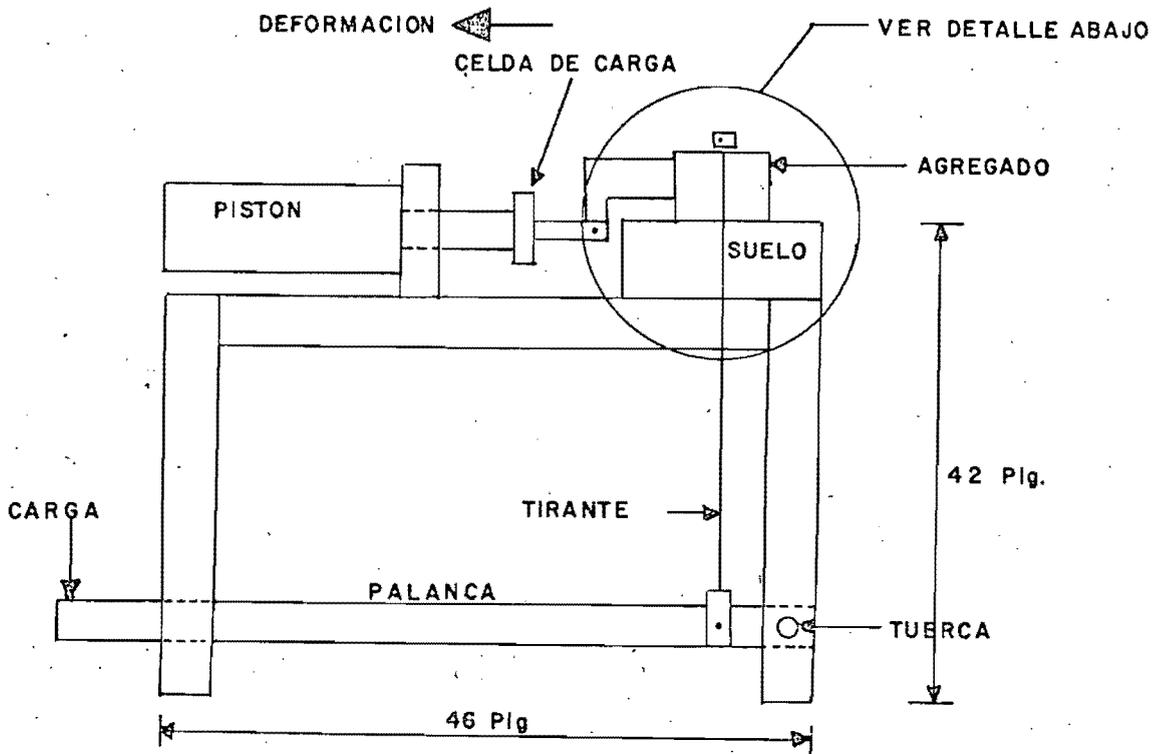
Esta prueba está también cubierta por la ASTM bajo el título de "Intemperismo de Plásticos" y está designada como D-1435. Esto intenta definir condiciones para la exposición de materiales plásticos a la intemperie. Esta es una prueba comparativa que depende del clima, estación del año, condiciones atmosféricas, etc., y como tal da solamente un índice del comportamiento in situ a largo plazo.

Es importante en el uso de membranas de construcción, evitar y/o minimizar la exposición de la luz ultravioleta, puesto que tal exposición puede causar rápida degradación de la resistencia. El polipropileno, si no se trata, puede ser particularmente sensible en este aspecto.

3.4.3 Deterioro de Membranas Enterradas.

El Consejo Nacional de Investigación de Canadá ha ensayado los efectos de enterrar las membranas, ya que el suelo es un material heterogéneo; varía de más o menos 99% orgánico a 100% inorgánico.

FIG 3.5 Aparato para medir la fricción entre la membrana y el agregado o entre dos membranas (Tecnológico de Georgia 1980)



DETALLE DEL APARATO DE FRICCIÓN

Tiene un amplio intervalo de valores de PH y varía grandemente en la composición de sus elementos y contenido de microorganismos. La prueba involucra muestras de membrana de 12 x 12 cm de nylon polipropileno y membranas de bicomponentes nylon y polipropileno. El método de esta prueba se designa como CGSB 4-GP-2, método 28.3 y es similar al método de prueba 30-19-74 de la AATCC y al método 5762 Federal Standard 191.

Las muestras son removidas a intervalos de tres meses y son probadas de acuerdo al diagrama de presión (Ensalte Mullen), prueba fundada en el método D-774 de la ASTM.

3.4.4 Resistencia a la fricción (Ref. 14)

Esta es propiamente una característica mecánica de los geotextiles y existen muchos métodos para estudiarla, por ejemplo el ASTM D 3334, el método de AL Bell, el método de Tecnológico de Georgia, etc. (Fig. 3.5)

Se deben estudiar los efectos de fricción entre el suelo y la membrana o entre el agregado y la membrana, debido a que el geotextil no resistirá fuerzas de tensión si la fricción es muy baja y ocurrirá la falla por deslizamiento. Es importante también medir la fricción entre geotextil y geotextil, esto es importante sobre todo para definir la longitud de traslapes.

4. EMPLEO DE GEOTEXILES COMO REFUERZO DE LA CIMEN- TACION DE CARRETERAS CONSTRUIDAS SOBRE SUELO BLAN- DO.

4.1 Hipótesis sobre el comportamiento

Se ha demostrado que cuando se tiene una subrasante de bajo valor relativo de soporte, el utilizar un geotextil como separador entre aquella y el material que constituirá el pavimento aporta grandes beneficios ya que previene la contaminación entre un material y otro. Se consideró posible que las telas actuaran también como refuerzo de la cimentación de carreteras construidas sobre suelos blandos y como estabilizador de las mismas. Para estudiar esta posibilidad se procedió a efectuar experimentos tanto en laboratorio como de campo.

En el presente capítulo se exponen el principio en que se basa el funcionamiento del geotextil como refuerzo en el sistema: terraplén membrana-suelo; así como algunos de los experimentos que se han

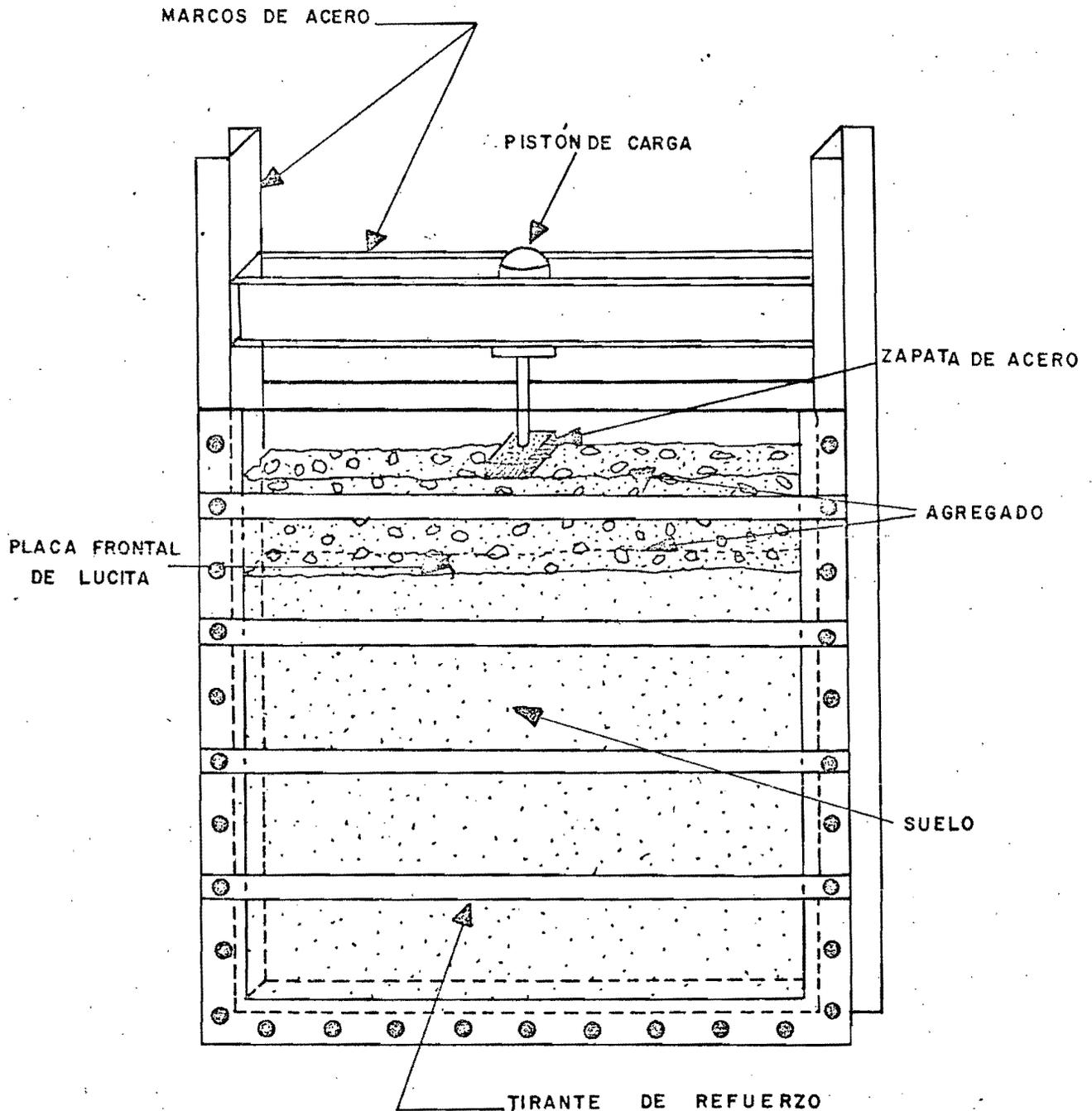
realizado con ese fin, con el objeto de que sirvan de base a futuras investigaciones.

Cuando se trabaja con suelos blandos, específicamente en la construcción de carreteras con material de banco, existe una penetración (penetración se usará como sinónimo de incrustación y endentación) del material que forma el terraplén dentro del terreno de cimentación que está en función del máximo esfuerzo transmitido al suelo en su frontera con el agregado. Por esta razón, se introdujo el empleo de membranas y cualitativamente se observaron las diferencias que surgen al cargar un sistema suelo blando-agregado y un sistema suelo blando-geotextil-agregado, en un principio utilizando modelos a pequeña escala como el que se muestra en la Fig. 4.1 y se midieron sus desplazamientos, Fig. 4.2 (Ref. 14).

Posteriormente se simularon en el laboratorio los sistemas de carga, utilizando como herramienta principal fosas de prueba en las cuales se reproducía, a escala, los sistemas suelo-terraplén y suelo-geotextil-terraplén y se les aplicaban diversas cargas dinámicas para su estudio.

De estas experiencias se observó que en modelos a gran escala (2,5 m de diametro) existe una relación aproximadamente lineal entre la profundidad de incrustación y el número de ciclos de carga en los sistemas sin membrana y en los sistemas con membrana esa linealidad se manifiesta después de los primeros 5 cm de endentación.

FIG. 4.1 Equipo para estudiar la respuesta estructural de los sistemas (Terraplén - Suelo ; Terraplén-Geotextil - Suelo .



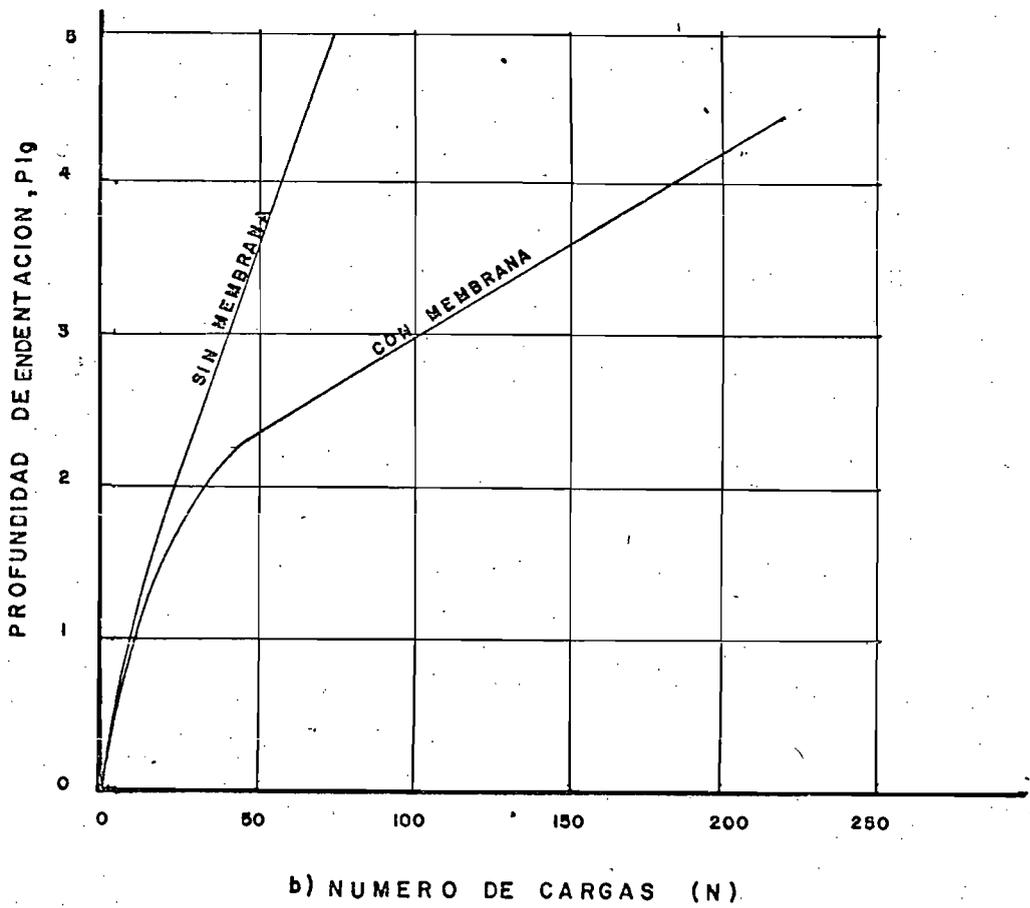
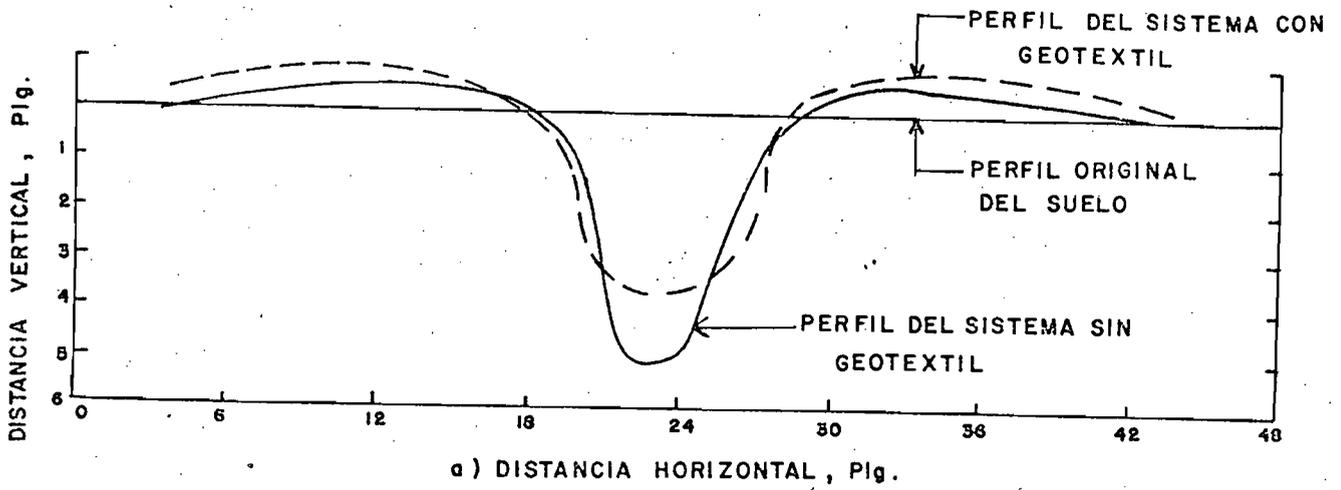


FIG. 4.2 Profundidad de endentación relacionada con :
 a) distancia horizontal y b) repeticiones de carga.

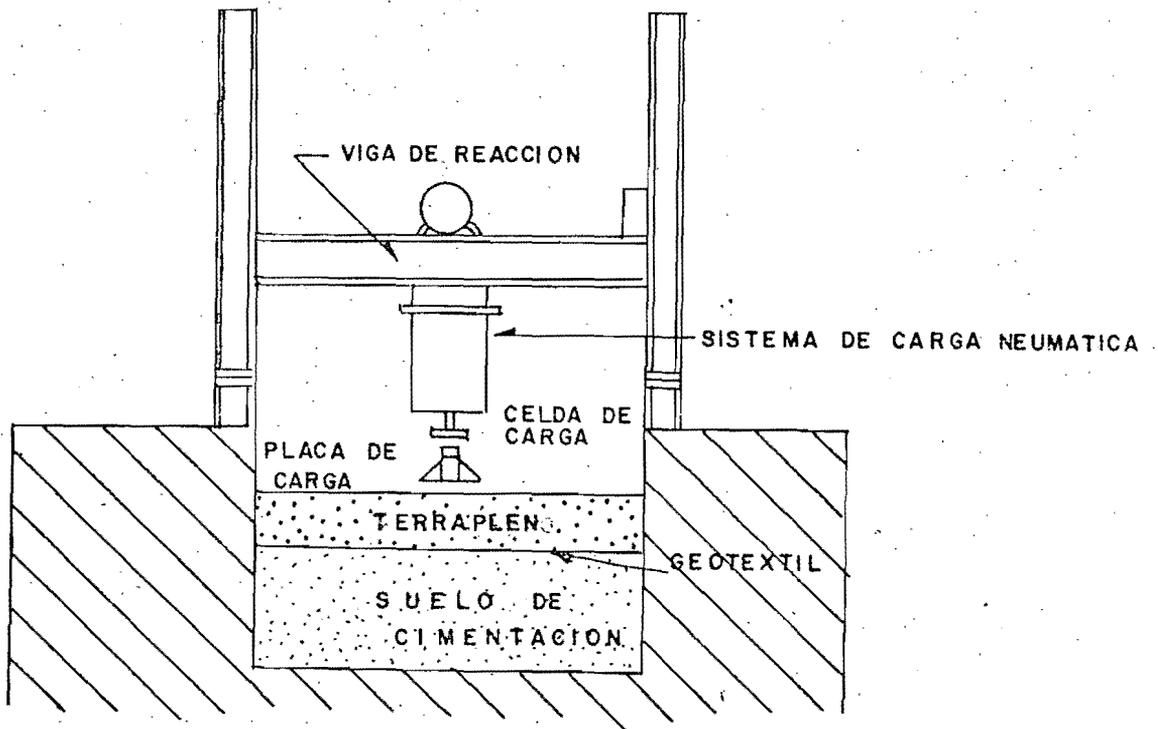


FIG 4.3 DIAGRAMA ESQUEMATICO DE FOSAS DE PRUEBA. SISTEMAS TERRAPLEN-GEOTEXTIL-SUELO ; APLICACION DE CARGA DINAMICA

En las fosas de prueba de menor diámetro (1m aprox.), la penetración a largo plazo en el sistema terraplén-geotextil-suelo es del orden de la séptima parte de la registrada en sistemas terraplén-suelo; en la figura 4.3 se presenta un esquema de las fosas de prueba utilizadas:

Con base en este tipo de experiencias, el Tecnológico de Georgia, E.U.A., propone un modelo para el comportamiento del sistema terraplén-membrana-suelo. El modelo consiste en curvas idealizadas que relacionan la profundidad de endentación y el número de cargas cíclicas; dicho modelo aparece en la Fig. 4.4 y se explica en las Figs. 4.5 a 4.7, (Ref. 15).

La hipótesis de comportamiento sostiene que se desarrollan cuatro regiones o etapas de carga en el sistema terraplén-geotextil-suelo (AGS):

Región 1. Rearreglo Inicial

A pocas repeticiones de carga, la superficie de endentación de la estructura puede presentar formas diversas. Cuando se tiene un espesor pequeño de terraplén y un sistema altamente esforzado, la curva tiene elevada pendiente hasta que ocurren en el sistema deformaciones plásticas; en sistemas con gran espesor de terraplén, la resistencia a la deformación de aquel puede cambiar como resultado de su compactación, y penetración del agregado sobre el sistema geotextil-suelo.

Región 2. Endentación Progresiva

En esta región las deflexiones son pequeñas; el geotextil no recibe aún tensiones significativas. El mecanismo postulado aquí es que la membrana actúa reduciendo las fuerzas verticales y horizontales porque contienen al terraplén y reparten la carga. Esta etapa depende del módulo de deformación inicial del geotextil.

Región 3. Membrana en tensión significativa.

Cuando la profundidad de endentación crece, la membrana que está prácticamente anclada, se elonga absorbiendo parte de la carga debido a que se forma un plano inclinado entre el geotextil en tensión y la línea de acción de las cargas transmitidas. Bajo estas circunstancias el grado de penetración decrece cuando el esfuerzo en el geotextil aumenta.

Región 4. Falla Incipiente

Como continúa la endentación, el agregado no puede repartir más la carga debido a falla por cortante en forma de cono truncado que se encuentra entre la placa de carga y la membrana; el geotextil toma cada vez mayor parte de la carga hasta que falla y en estas condiciones el valor de la endentación aumenta apreciablemente. Los investigadores J. Lai y Q. Robnett, con base en este modelo y en las pruebas de carga cíclica en tanques de diferentes diámetros, concluyen, que la membrana efectivamente sirve como refuerzo y mejora el comportamiento del sistema terraplén-geotextil-suelo (AGS), sometido a las

NUMERO DE CICLOS DE CARGA

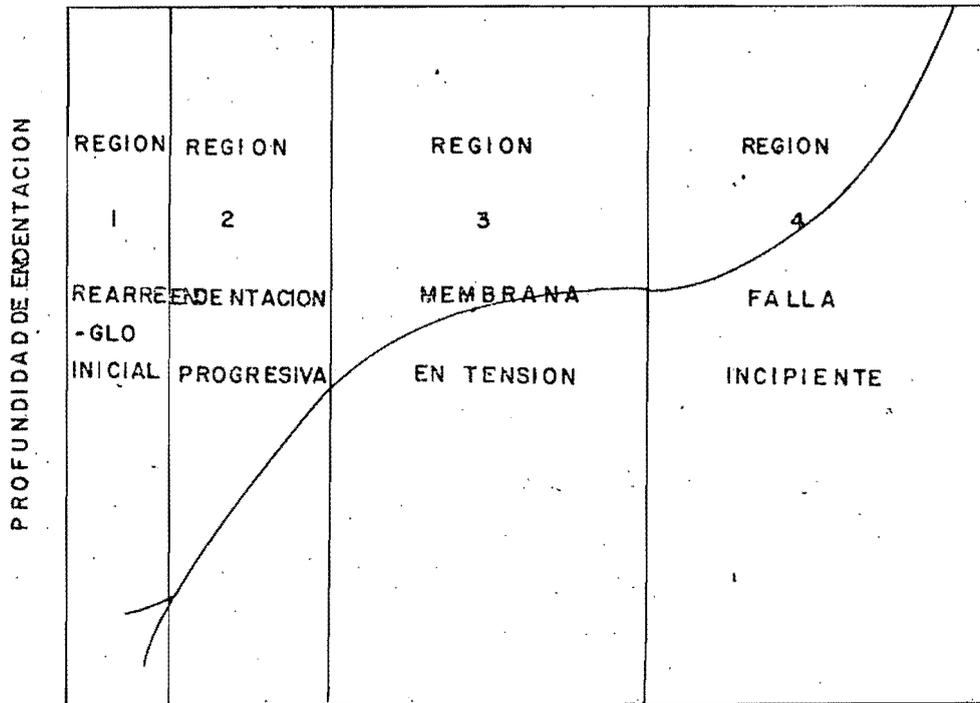


FIG 4.4 MODELO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA AGREGADO-GEOTEXTIL-SUELO.
CURVAS IDEALIZADAS DE PROFUNDIDAD DE ENDENTACION VER SUS NUMEROS DE REPETICIONES DE CARGA .

REGION I : REARREGLO INICIAL .

CUANDO SE TIENE UN ESPESOR PEQUEÑO DE AGREGADO Y UN SISTEMA ALTAMENTE ESFORZADO, LA CURVA TIENE FUERTE PENDIENTE HASTA QUE EL SISTEMA ACUSA DEFORMACION PLASTICA. EN SISTEMAS CON GRAN ESPESOR DEL AGREGADO, LA RESISTENCIA A LA DEFLEXION DE AQUEL PUEDE CAMBIAR COMO RESULTADO DE SU COMPACTACION Y PENETRACION DEL AGREGADO SOBRE EL SISTEMA GEOTEXTIL - SUELO.

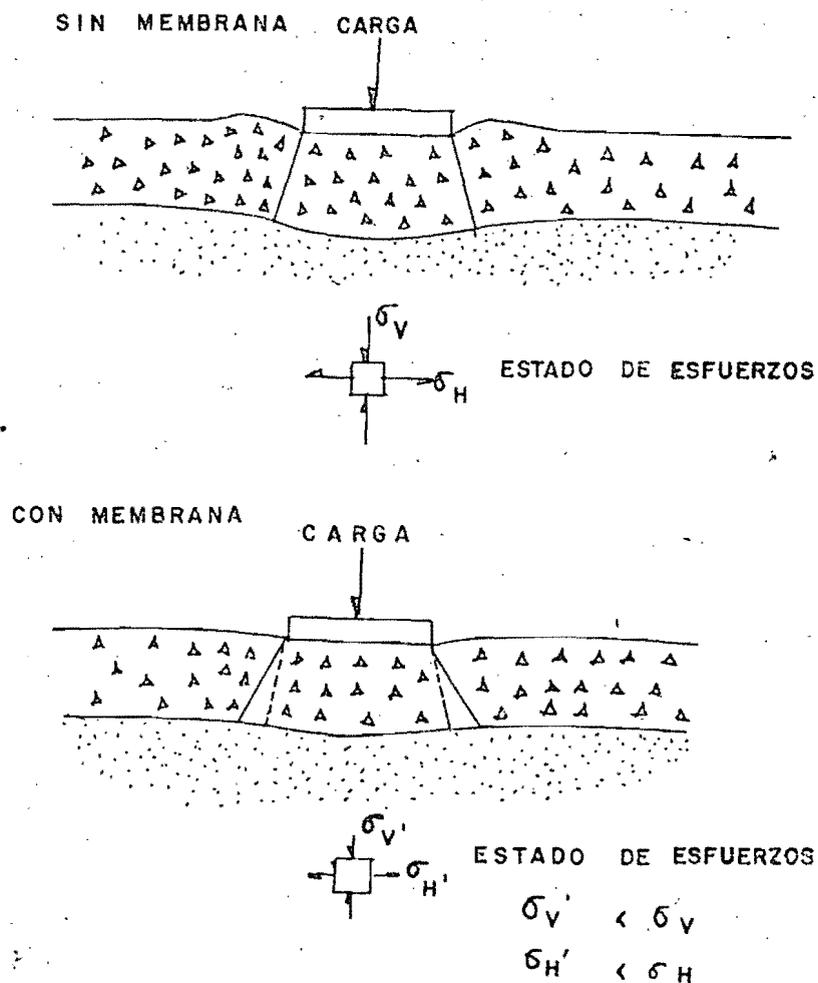
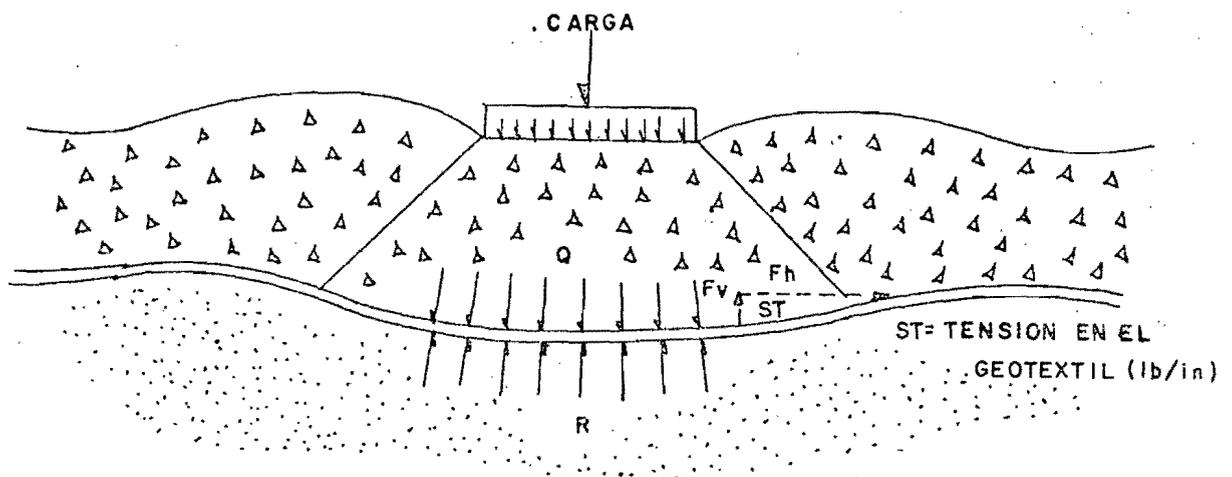


FIG 4.5

REGION 2 ENDENTACION PROGRESIVA

EN ESTA REGION LAS DEFORMACIONES SON PEQUEÑAS, EL GEOTEXTIL NO RECIBE AUN TENSIONES SIGNIFICATIVAS. EL MECANISMO POSTULADO AQUI ES QUE LA MEMBRANA ACTUA REDUCIENDO LOS ESFUERZOS VERTICALES Y HORIZONTALES PORQUE CONTIENE AL AGREGADO Y REPARTE LA CARGA.



R= ESFUERZOS DE REACCION DEL SUELO.
 Q= ESFUERZOS EN EL GEOTEXTIL

$$R = Q - F_v / \text{area}$$

FIG 4.6

REGION 3 : MEMBRANA EN TENSION SIGNIFICATIVA

CUANDO LA PROFUNDIDAD DE ENDENTACION SE INCREMENTA, LA MEMBRANA QUE ESTA PRACTICAMENTE ANCLADA SE ELONGA Y ABSORBE PARTE DE LA CARGA DEBIDO A QUE SE FORMA UN PLANO INCLINADO DEL GEOTEXTIL EN TENSION Y LA LINEA DE ACCION DE LAS CARGAS TRANSMITIDAS BAJO ESTAS CIRCUNSTANCIAS EL GRADO DE IDENTACION DECRECE YA QUE EL ESFUERZO EN EL GEOTEXTIL AUMENTA.

R = ESFUERZO DE REACCION DEL SUELO
 St = TENSION EN EL GEOTEXTIL
 Q = ESFUERZOS SOBRE EL GEOTEXIL

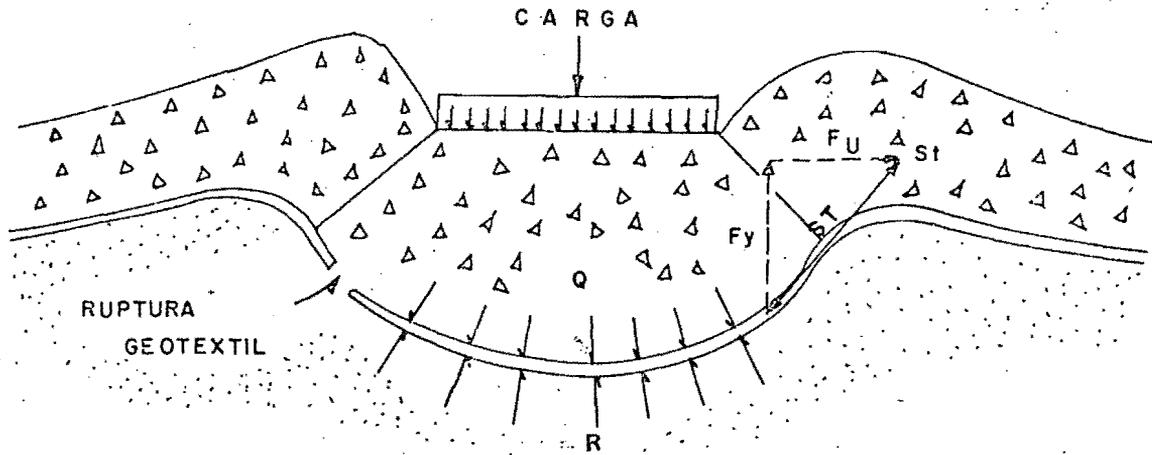


FIG 4.7

REGION 4 : FALLA INCIPIENTE

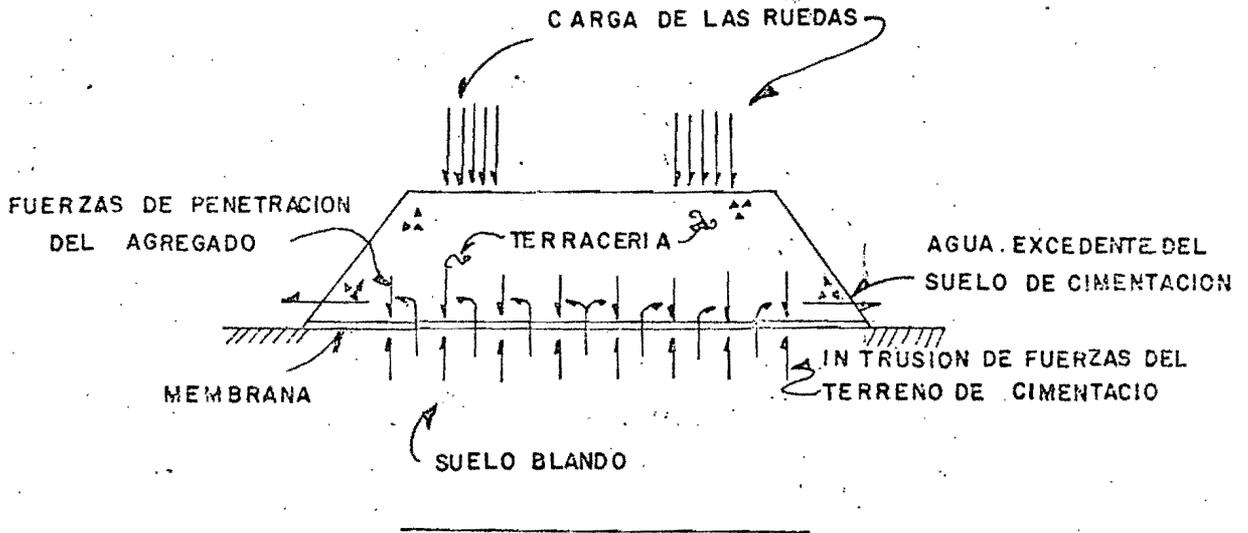
LA EDENTACION CONTINUA Y, EL AGREGADO NO PUEDE REPARTIR MAS LA CARGA, DEBIDO A LA COMPLETA FALLA POR CORTANTE DE LA ZONA DE AGREGADO EN FORMA DE CONO TRUNCADO QUE SE ENCUENTRA ENTRE LA PLACA DE CARGA Y LA MEMBRANA. EL GEOTEXTIL ABSORBE CADA VEZ MAS DE LA CARGA HASTA QUE FALLA; EN ESTA ULTIMA REGION EL VALOR DE LA IDENTACION AUMENTA.

cargas repetidas de los vehículos (esto se puede medir por la resistencia a la deformación del pavimento). Entre los mecanismos que influye deben mencionarse: a) restricción de la membrana sobre el terraplén y el estrato subyacente, b) efecto de membrana, c) fricción desarrollada en la interfase geotextil-agregado y condiciones de frontera y d) refuerzo local (Ref. 16).

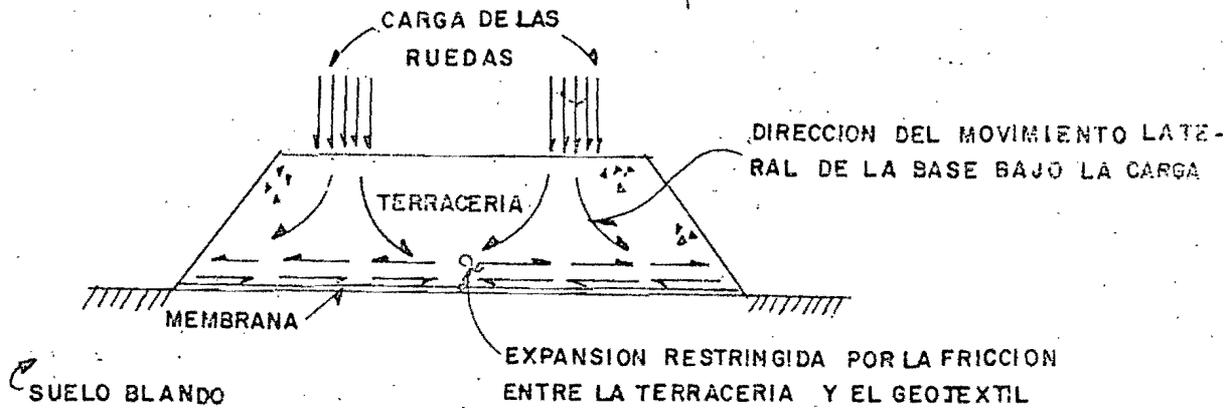
a) Restricción de la membrana: Existen dos tipos de restricción que pueden ocurrir en un sistema AGS. El primero está relacionado a la concavidad de la membrana en la zona donde pasa la rueda y a la presión o sobrecarga aparente aplicada al sistema (Fig. 4.8); tal efecto debe incrementar la resistencia al cortante o flujo plástico del suelo desde el contacto con la rueda. El segundo efecto de restricción ocurre cuando el agregado en la interfase tiende a moverse debajo del área cargada pero su movimiento es restringido debido al refuerzo a tensión de la membrana. La resistencia y módulo del material agregado se afectan positivamente, por este incremento del confinamiento.

b) Efecto Membrana: Cuando la carretera se somete a grandes deformaciones, el geotextil cede y desarrolla esfuerzos de tensión en un plano, dependiendo su magnitud de la resistencia y el módulo de la membrana. Se induce un esfuerzo normal perpendicular al plano de la tela con magnitud igual al esfuerzo en el plano dividido por el ra dio de curvatura inducido al textil. El efecto neto es una reducción en el esfuerzo impuesto al suelo bajo el área de la llanta. Para una carga

a) LA MEMBRANA COMO SEPARADOR PREVIENE EL DETERIORO DE LA SECCION DISEÑADA



b) LA RESTRICCION LATERAL DEL GEOTEXTIL HACE QUE LA TERRACERIA SE CONSERVE



c) EL GEOTEXTIL ABSORBE PARTE DE LA CARGA DE LAS RUEDAS

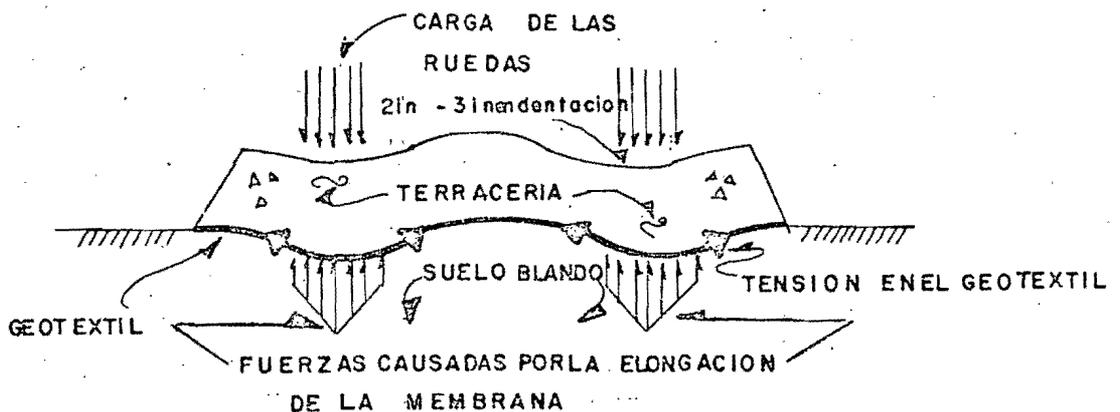


FIG 4.8 MECANISMO DEL EFECTO ESTRUCTURAL DE LOS GEOTEXTILES EN LA CONSERVACION DE LA CARRETERA (I.A. HALLIBURTON)

vehicular dada habrá una reducción en la profundidad de endentación del agregado.

c) Fricción y Condiciones de Frontera: La fricción desarrollada a lo largo de la interfase agregado-geotextil y la adhesión en la interfase geotextil-suelo crea un estrato de frontera; que es dúctil y resistente a la tensión, debido a la presencia del geotextil. La efectividad de este fenómeno está muy relacionada a la magnitud de la fricción/adhesión desarrollada en la interfase.

d) Refuerzo local: Las cargas concentradas debido al peso del agregado y la carga vehicular impuesta puede causar una falla por punzonamiento o falla local en la superficie de contacto agregado-subrasante. El uso de membranas entre el agregado y el suelo blando servirá para distribuir la carga, reducir esfuerzos localizados y en general proveer un incremento en la resistencia al desplazamiento vertical.

Como resultado de los mecanismos (a) a (d), se ha mejorado apreciablemente el comportamiento de las terracerías cuando se refuerzan con geotextiles que tengan las propiedades mecánicas y químicas adecuadas para resistir el medio ambiente en el cual han de colocarse. El grado de beneficio depende en gran medida de las características de la membrana que se use y de los requerimientos específicos del trabajo.

Los modelos matemáticos para estimar la profundidad de endentación de un sistema se basan en los resultados estadísticos de ensayos previos de laboratorio, analizados con técnicas de regresión lineal múltiple disponible en BMD Statistical Package (Biomedical Computer Programs, Depto. de Biomatemáticas, Escuela de Medicina, UCLA, 1979). Una vez establecida la ecuación que relaciona la profundidad de endentación con la resistencia del suelo, se puede proceder a la inversa a fin de determinar el espesor de agregado requerido para no sobrepasar la capacidad de carga del suelo (Ref. 16).

Se dan a continuación, a manera de ejemplo, las ecuaciones que rigen un sistema agregado-geotextil-suelo deducidas a partir de ensayos en una fosa de prueba de 0.9 m de diámetro, aplicando carga cíclica mediante una placa de 15 cm de diámetro, la membrana utilizada fue de polipropileno (TYPAR 3401).

Ecuaciones:

Sin membrana

$$RD = (0.309 + 0.243 (SR)^{0.65} \log N)^2$$

$$r = 0.87$$

$$SE \text{ est} = 0.18$$

$$n = 197$$

Con membrana

$$RD = (0.265 + 0.190 (SR)^{0.65} \log N)^2$$

$$r = 0.83$$

$$SE \text{ est} = 0.21$$

$$n = 229$$

donde

- SR = relación de esfuerzos, T_v/S
 S = resistencia del suelo
 T_v = esfuerzo vertical bajo el centro del área cargada.
 RD = profundidad de endentación en la superficie
 N = número de aplicaciones de carga
 SE est = error estimado estandar
 r^2 = coeficiente de determinación
 n = número de pruebas

Ejemplo numérico:

Si se tiene como límite de deformación de la superficie de rodamiento $RD = 7.6$ cm y una resistencia del suelo de 27.5 kN/m^2 (CBR 0.8) y un número de pasadas de carga equivalente igual a 1000, resolviendo las ecuaciones se obtiene una relación de esfuerzos SR de 2.80 y 4.28 para sistemas sin y con membrana, respectivamente.

Una vez fijado el valor admisible de SR se puede determinar el espesor del material pétreo. En los sistemas con membrana el espesor de agregado es del orden del 25% menor que el requerido en sistemas sin membrana.

Para la aplicación de las ecuaciones es necesario tomar en cuenta el factor de escala y hacer verificaciones de campo (pruebas de carga in situ) a fin de poder aplicarlas directamente al diseño de sistemas (AGS) para carreteras.

4.2 Información sobre aplicaciones en otros países

Existen en la literatura estudios referentes al uso de membranas como refuerzo, en que se han efectuado mediciones ensayando modelos a pequeña escala (3, 11, 14, 15, 16, 17) y en modelos a escala natural; además se han recolectado las experiencias de los constructores para formar un banco de información de utilidad en investigaciones y aplicaciones futuras (2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 18, 19, 22, 24, 25, 26).

4.3 Conclusiones

Resumiendo la experiencia de varios autores, puede concluirse que para la construcción de carreteras sobre suelos blandos y pantanosos en los que al inicio de la construcción su comportamiento se rige por la resistencia no consolidada - no drenada el empleo de geotextiles como refuerzo de la cimentación es benéfico ya que estos toman parte de la carga transmitida (por el terraplén al suelo) al favorecerse la formación de las regiones 1, 2 y 3 mencionadas en el inciso 4.1 (Figs. 4.4 a 4.6).

Durante las primeras etapas de la construcción hay que tener cuidado de no sobrepasar la resistencia del suelo para permanecer en la región núm. 3 (Fig. 4.6) y mantener una forma convexa de la superficie de contacto.

Posteriormente, cuando ha ocurrido el 75% de la consolidación primaria (que en suelos de estructura fibrosa, como los turbas ocurre aproximadamente durante los dos primeros años de construcción), puede aceptarse que la membrana pase a la cuarta región, esto es que falle, una vez que las condiciones de resistencia del suelo mejoraron gracias a la efectividad del sistema AGS inicial.

Algunos autores han tratado de utilizar la membrana en la interfase subrasante-pavimento y han concluido que para intervalos admisibles de endentación de la rueda en el pavimento, el geotextil como refuerzo no es eficiente ya que en dichos intervalos aquel no trabaja a la tensión; sirve únicamente como separador (quedan excluidas de esta observación las geomembranas).

Otros autores han informado que el empleo de geotextiles en suelos arcillosos en los que la incrustación de la terracería es menor, como por ejemplo el subsuelo del Lago de Texcoco, el uso de geotextiles como refuerzo en el contacto terraplén-suelo no es efectivo.

4.4 Uso de geotextiles para estabilizar taludes

La aplicación de geotextiles para estabilizar taludes puede enfocarse desde 2 puntos de vista:

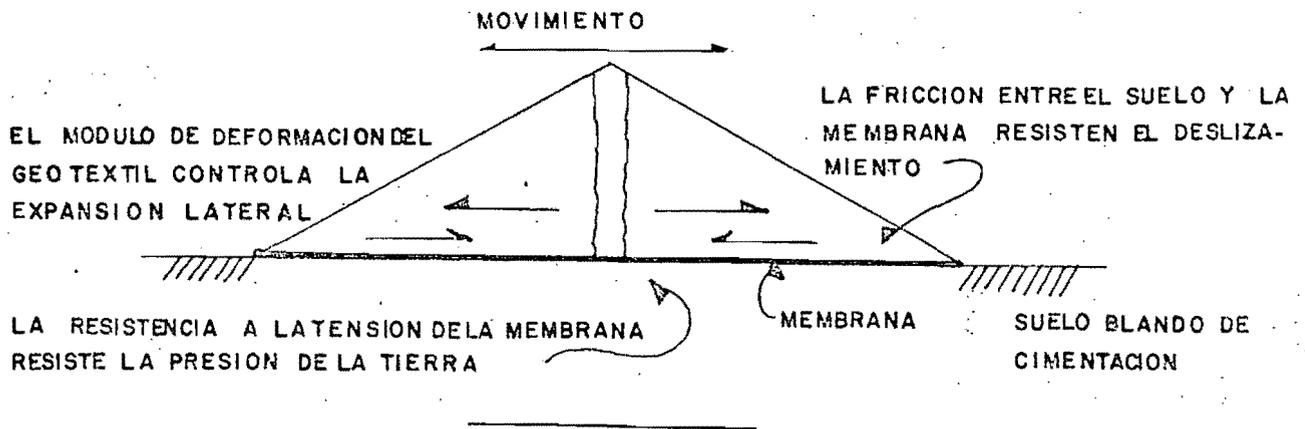
a) Cuando se construye un terraplén y se pone un geotextil como refuerzo de la cimentación, el riesgo potencial de falla puede reducirse por la fricción y adherencia del sistema AGS (Fig. 4.9, Refs. 10 y 13)

b) Cuando en los cortes efectuados para una carretera se tienen suelos de mala calidad, fácilmente erosionables, el uso de geotextiles como recubrimiento es adecuado.

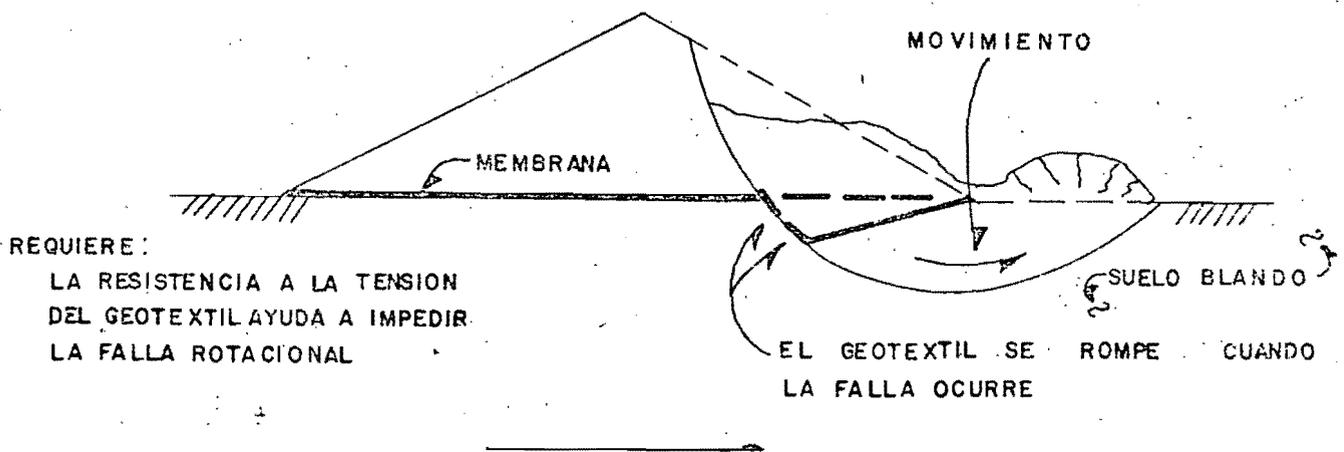
Se coloca el geotextil directamente sobre el suelo, dejando en el hombro del talud una longitud extra para el empotramiento. Posteriormente se recubre la superficie de la membrana con un espesor pequeño de agregado pétreo para protegerla de los rayos ultravioleta; la ventaja es que los taludes pueden construirse con mayor pendiente que cuando no se usa geotextil.

Un ejemplo de esta aplicación está en la Carretera Interestatal # 88 en el Estado de Nueva York, donde el Departamento de Transporte del Estado utilizó los geotextiles para proteger los taludes inestables de los cortes; el caso consistió en que para la alternativa sin membrana había que hacer cortes con taludes muy tendidos y el costo de exca-

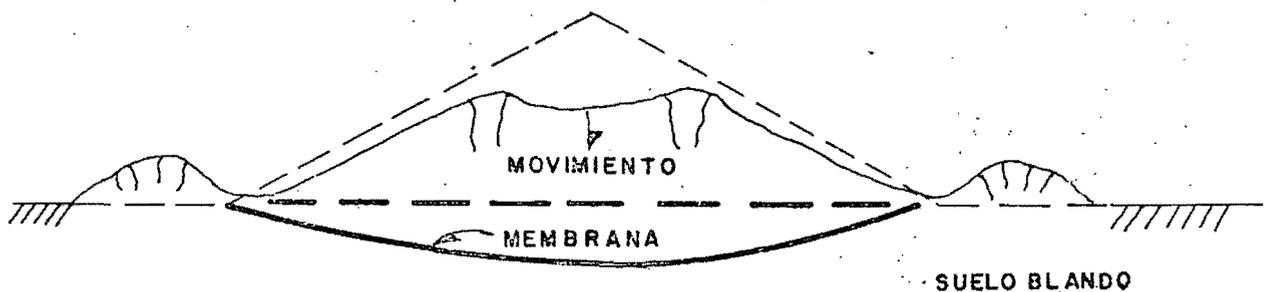
d) FALLA POTENCIAL DEL TERRAPLEN POR DESLIZAMIENTO HORIZONTAL



b) FALLA POTENCIAL DEL TERRAPLEN DE TIPO ROTACIONAL



c) FALLA POTENCIAL DEL TERRAPLEN POR DESPLAZAMIENTOS EXCESIVOS



EL MODULO DE DEFORMACION DE LA MEMBRANA DEBE CONTROLAR EL DESPLAZAMIENTO DE LA CIMENTACION

FIG 4.9

ANALISIS DE DIFERENTES CASOS PARA DETERMINAR LOS REQUERIMIENTOS NECESARIOS PARA QUE EL GEOTEXTIL TRABAJE COMO REFUERZO.

vación era más alto que el de la alternativa de utilizar un sistema de talud con mayor pendiente geotextil-material pétreo para recubrimiento del mismo. El ahorro en la segunda alternativa fue de 20% por pie de carretera construida (Refs. 2 y 13).

5. APLICACIONES EN MEXICO

5.1 Ensayes de laboratorio.

El estudio de geotextiles en México data del año de 1971, fecha en la que el M. en I. Jesús Alberro realizó en el Instituto de Ingeniería de la UNAM el estudio "Refuerzo a la Tensión en el Contacto Terraplén-Cimentación" por encargo de la Secretaría de Recursos Hidráulicos (Refs. 1 y 34).

En esa investigación se estudiaron las características mecánicas e hidráulicas de siete diferentes geotextiles con el fin de utilizarlas como refuerzo en caminos de acceso; cinco de las membranas estudiadas estaban fabricadas en el país, por Corp. Textil Mexicana.

Como conclusión del estudio, se presentó que de las membranas analizadas, las más eficientes eran las fabricadas con 100% de poliéster aunque se recomendaba que de querer utilizar las membranas fabrica-

das en México había que mejorarles sus características físicas y mecánicas.

Se dan también en dicho estudio las especificaciones para colocar el refuerzo en un terraplén de prueba, así como recomendaciones para la instrumentación del mismo. Esta investigación tiene el mérito de haber sido el primero de este tipo que se realizó en el país y como tal, ha servido de base para muchas investigaciones.

Como comentario a ese estudio, cabe mencionar que actualmente han salido al mercado otro tipo de geotextiles como las membranas fabricadas con el proceso de termosellado y 100 % de polipropileno que ofrecen mejores características. También se ha observado que el tipo de máquinas cosedoras para unir tramos subsecuentes de membranas en el campo que han dado mejor resultado, son las que tienen doble bobina porque forman una costura doble y por lo tanto, más resistente.

El segundo estudio hecho en México sobre las características mecánicas y de resistencia al ataque de agentes químicos es el realizado en la Comisión del Lago de Texcoco, SARH, por el Ing. Rodrigo Murillo F. en 1979 (Ref. 21).

Este estudio se analiza la resistencia a la tensión, módulo de elasticidad, y resistencia al intemperismo acelerado de quince geotextiles seleccionados de la siguiente forma:

- Muestras 1 y 2, membranas instaladas en 1973 en el terraplén de prueba del Lago de Texcoco (100% poliéster, Corp. Textil Mexicana).
- Muestra 3, membrana del mismo lote de las colocadas en 1973 pero sin utilizar.
- Muestra 5, 100% polipropileno typar 3401 de Dupont.
- Muestras 6 a 12, muestras de la Corporación Textil Mexicana.
- Muestras 13, 14 y 15 tomadas de la membrana Typar 3401 instalada en el camino al Lago Churubusco; Planta de Tratamiento de Aguas Negras.

En la investigación mencionada, se concluye que las membranas "no-tejidas" de poliéster, tienen mejores características y mayor uniformidad de trabajo en los sentidos longitudinal y transversal que las características evaluadas en las muestras "tejidas" de poliéster.

5.2 Aplicaciones en la construcción de carreteras

a) La primera aplicación en México de geotextiles como refuerzo de la cimentación de carreteras construidas sobre turbas y depósitos fluvio-lacustres, es en la construcción del Camino de Acceso al Puente Coatzacoalcos II, margen izquierda a cargo de SAHOP, DGCF.

A continuación se hace una breve descripción del caso, (Refs. 18, 19 y 24):

La Carretera Minatitlán-Coatzacoalcos, forma parte del Circuito del Golfo y se localiza entre los paralelos 18 y 19 Norte. Esta zona se caracteriza por precipitaciones pluviales altas, del orden de 2,500 mm al año, temperatura media anual de 26° C y sismicidad alta (zonas 2, Mapa Sísmico de la República). Recientemente ha presentado un desarrollo inesperado, pues se han venido creando grandes complejos industriales, todos ellos derivados en su mayoría del petróleo, tales como el Complejo Pajaritos, La Cangrejera y próximamente el de Morelos, así como una gran cantidad de industrias derivadas de la petroquímica. Como consecuencia de ello, la población de esta zona ha tenido una tasa de crecimiento alta y con ello la demanda del transporte, al grado de que las vías de comunicación existentes son insuficientes para soportar el volumen de tránsito generado, causando pérdidas de tiempo por congestionamiento del tránsito e interrupciones en el Puente actual por el paso de embarcaciones.

Esta situación afecta en forma muy sensible el tránsito de paso que tiene como destino otras poblaciones del Sureste y viceversa. Localmente se tienen también grandes problemas de tránsito, porque la carretera se aloja en la zona de Minatitlán y periferia de Coatzacoalcos, que ya es prácticamente urbana.

Lo anterior motivó llevar a cabo estudios y como resultado de ellos, en primer término se localizó un nuevo cruce del Río Coatzacoalcos a 14 Kms aguas arriba del actual, en el sitio llamado Paso Nuevo (Fig. 5.1).

El nuevo cruce demandó las carreteras de acceso, tanto en la margen derecha como en la margen izquierda, que tienen una longitud de 30 Kms; la carretera se proyectó con sección de 22.20 m de ancho para 4 carriles de circulación separados por un camellón de 1.20 m de ancho; libra totalmente a las poblaciones de Minatitlán y Coatzacoalcos.

El proyecto de la margen derecha se desarrolla sobre un terreno firme, y el de la izquierda atraviesa una zona pantanosa de 12 kms de longitud. Esta última, presenta un tirante de agua en forma casi permanente del orden de 0.50 m; esta parte del proyecto es el motivo del estudio. La rasante del proyecto queda 3.0 m arriba del terreno natural.

Para la elaboración del proyecto y de los procedimientos de construcción, se exploró el subsuelo y tomando en cuenta los resultados, el tramo se dividió en tres tipos de terreno, atendiendo a la estratigrafía:

1. Terreno sin suelos orgánicos y compresibilidad alta (Km 17+250 a Km 17+900 y 20+750 a IG: 26+900).

2. Terreno sin suelos orgánicos y de compresibilidad media (km 17+900 a km 20+750).

3. Terrenos con suelos orgánicos (km 26+900 a km 28+638 y de km 28+940 a km 29+280).

En toda la zona el tirante de agua medido fue de 0.50 m

Para la construcción de las terracerías se proyectaron terraplenes de sección "flotante" con bermas y altura máxima de 3.0 m, apoyados sobre una membrana de polipropileno como interfase entre el terraplén y el suelo natural para evitar incrustaciones irregulares y excesivas, así como para favorecer la construcción de una plantilla de trabajo (Fig. 5.2). Se recomendó que se extendiera directamente sobre la membrana y se construyera la plantilla de trabajo en todo lo ancho del terraplén y bermas, avanzando en punta de flecha y descargando el material a volteo; este debía bandearse con 6 pasadas de tractor D-6 extendiéndolo desde el centro hacia los lados hasta llegar a 0.50 m arriba del tirante de agua. El procedimiento de construcción recomendado se describe con más detalle en las Refs. 18 y 19. Factores climatológicos y económicos obligaron a utilizar equipo de construcción de mayor peso que el recomendado en el proyecto; el material se colocó a volteo, siguiendo el procedimiento de punta de flecha simétrica; el equipo utilizado fue: camiones tipo góndola de 22 m³ de capacidad y tractores D-8. Esto obligó a poner capas de espesor mayor al recomendado.

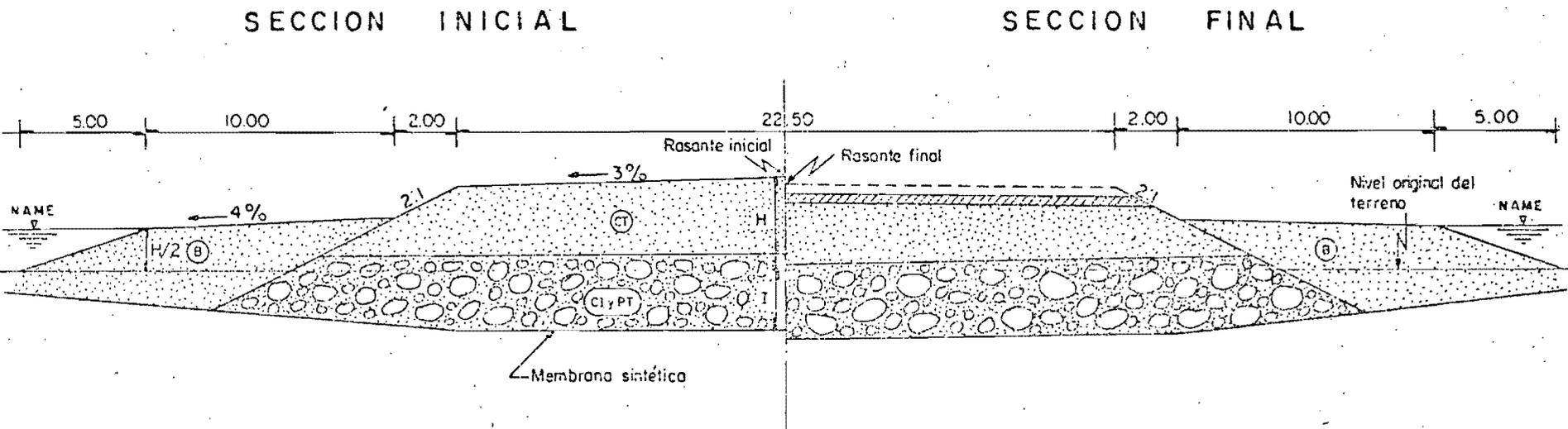


Fig. 5.2 Sección de proyecto del camino

- Simbología:
- SR  Capa subrasante compactada al 100%
 - CT  Cuerpo de terraplén compactado al 95%
 - B  Bermas
 - CIyPT  Capa de incrustación y plataforma de trabajo
 - H  Altura del terraplén
 - I  Incrustación
- Acotaciones en metros

Con el propósito de conocer la influencia de la membrana en el comportamiento del camino, se instrumentaron y efectuaron mediciones en dos secciones, una con y otra sin membrana, separadas 100 m entre sí en la zona de turba, y se está instalando otro par de secciones instrumentadas con las mismas características en la parte de depósitos fluvio-lacustres. Los datos correspondientes a la instrumentación que se describen a continuación se tomaron de la referencia 25.

Las figs 5.3 y 5.4 caracterizan con mayor detalle el subsuelo en los sondeos SS-1 y 2 situados en las secciones instrumentadas en la zona de turba que se realizaron previamente a la construcción. En ambas secciones la turba superficial tiene 3.5 m de espesor. Su contenido de agua alcanza valores hasta de 730% y es mayor que el límite líquido; el peso específico relativo tiene valores tan bajos como 1.5 y el peso volumétrico natural es de 1.0 ton/m^3 , aproximadamente; la relación de vacíos máxima es de 14. La resistencia al corte (0.5 de la resistencia en compresión no confinada) va de 0.03 a 0.08 kg/cm^2 , valores extremadamente bajos.

Los suelos muy compresibles, orgánicos e inorgánicos, se extienden hasta 17 m de profundidad en el sondeo SS-1 y a 13.5 m en el SS-2. En ellos, el contenido de agua suele ser mayor que el límite líquido. Valores de otras propiedades se indican en las figs. 5.3 y 5.4

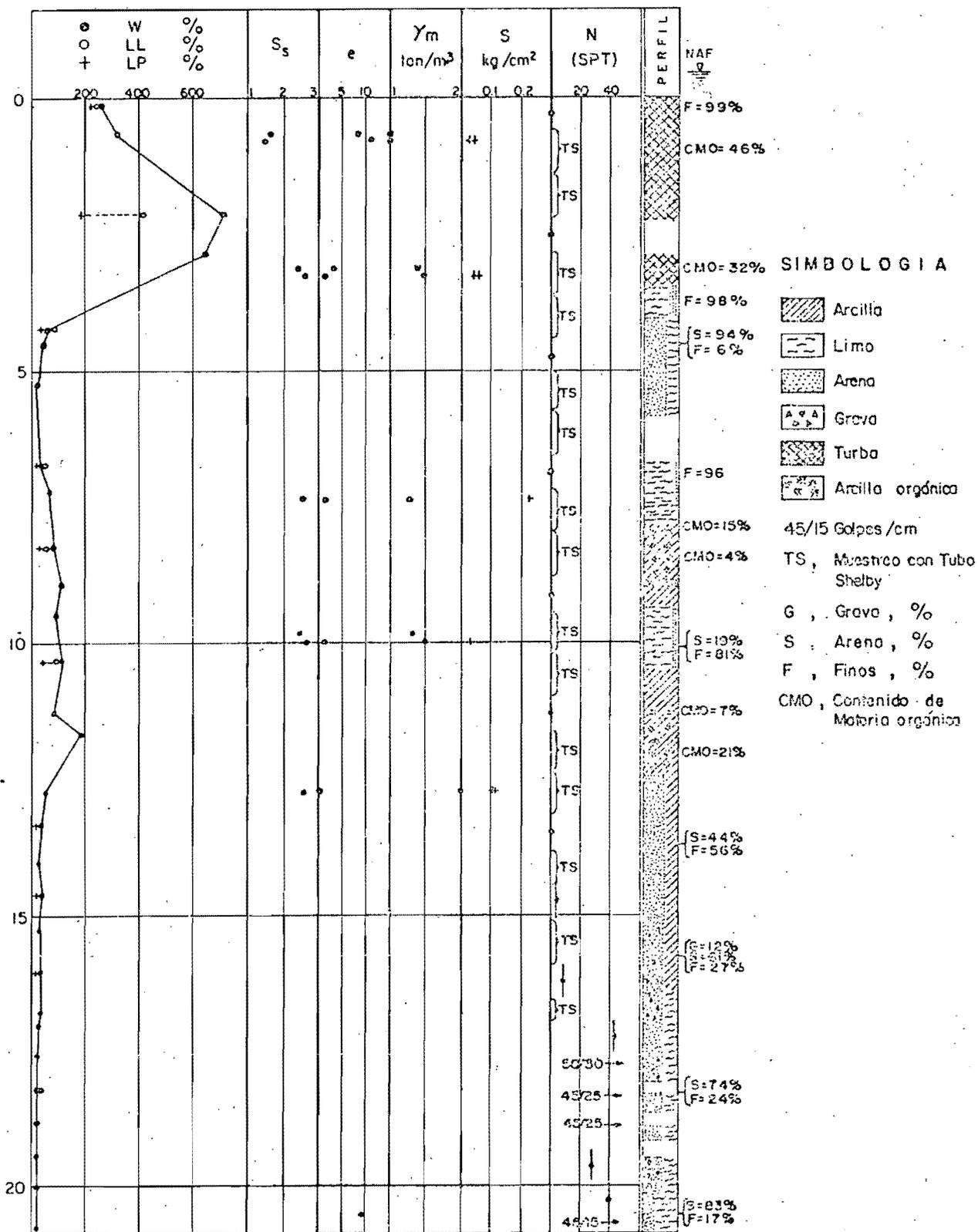


Fig.53 Perfil estratigráfico y propiedades del subsuelo en la Sección 1. Sondeo SS-1. antes de construir la terracería.

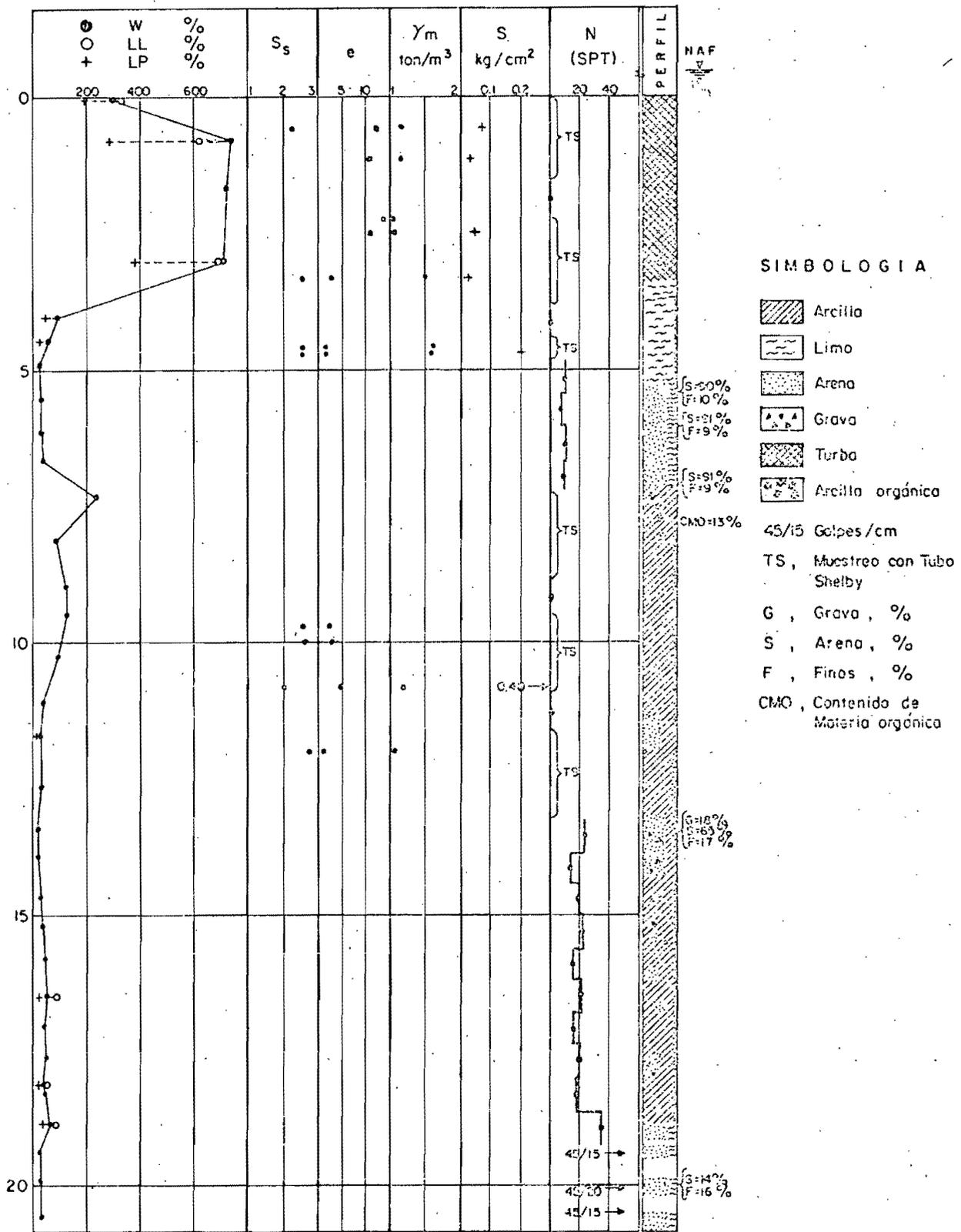


Fig.5.4. Perfil estratigráfico y propiedades del subsuelo en la Sección 2. Sondeo SS-2. antes de construir la terracería...

De las pruebas de consolidación se determinó que el conjunto de depósitos está normalmente consolidado y que la consolidación secundaria es relevante en la turba.

Las figs. 5.5 y 5.6 indican el tipo y posición de los aparatos utilizados. En cada sección se instalaron los siguientes:

- a) Cinco bancos superficiales en terreno natural, fuera de la base del terraplén y cuatro en la superficie del mismo.
- b) Dos bancos con base de placa, desplantados a 2 m de profundidad en la rasante.
- c) Un banco profundo como referencia fija para todas las nivelaciones.
- d) Cinco cajas o celdas hidráulicas de PVC, de 20 x 20 x 18 cms a 2 m bajo la rasante.
- e) Tres piezómetros abiertos tipo Casagrande en suelos permeables y dos neumáticos en los impermeables.
- f) Tres inclinómetros de tubería de aluminio. Las mediciones se realizan con un medidor de péndulo eléctrico digital.

La Sección 1 se instrumentó antes de colocar el relleno, pero los fuertes desplazamientos del terreno inutilizaron los aparatos, excepto

los bancos superficiales situados en terreno natural. Los nuevos instrumentos, antes descritos, se instalaron después de colocado el relleno, después de que ocurrieron los máximos desplazamientos laterales durante la construcción como se indica en la Fig. 5.7

La información que se presenta es precisamente la comparativa entre esas dos secciones de control, pues del terraplén propiamente dicho aún no hay información concluyente por encontrarse en construcción. En lo que sigue se denominará sección 1 a la sección de control construida sin geotextil y sección 2 a la que cuenta con él.

Comportamiento Observado. (Ref. 25, Springall et al)

El comportamiento observado del relleno se trata en dos partes: durante y después de su colocación.

Al respecto, en la sección 1 el relleno alcanzó la elevación reportada en este trabajo el 15 de julio de 1980 y, en la sección 2 el 10 de agosto del mismo año.

Comportamiento Observado al Colocar el Relleno

Las figs. 5.5 y 5.6 muestran la incrustación del relleno, medida a partir de tres sondeos del tipo SPT en cada sección. El relleno se encuentra en estado suelto, con N promedio de 5 golpes, excepto en el primer metro.

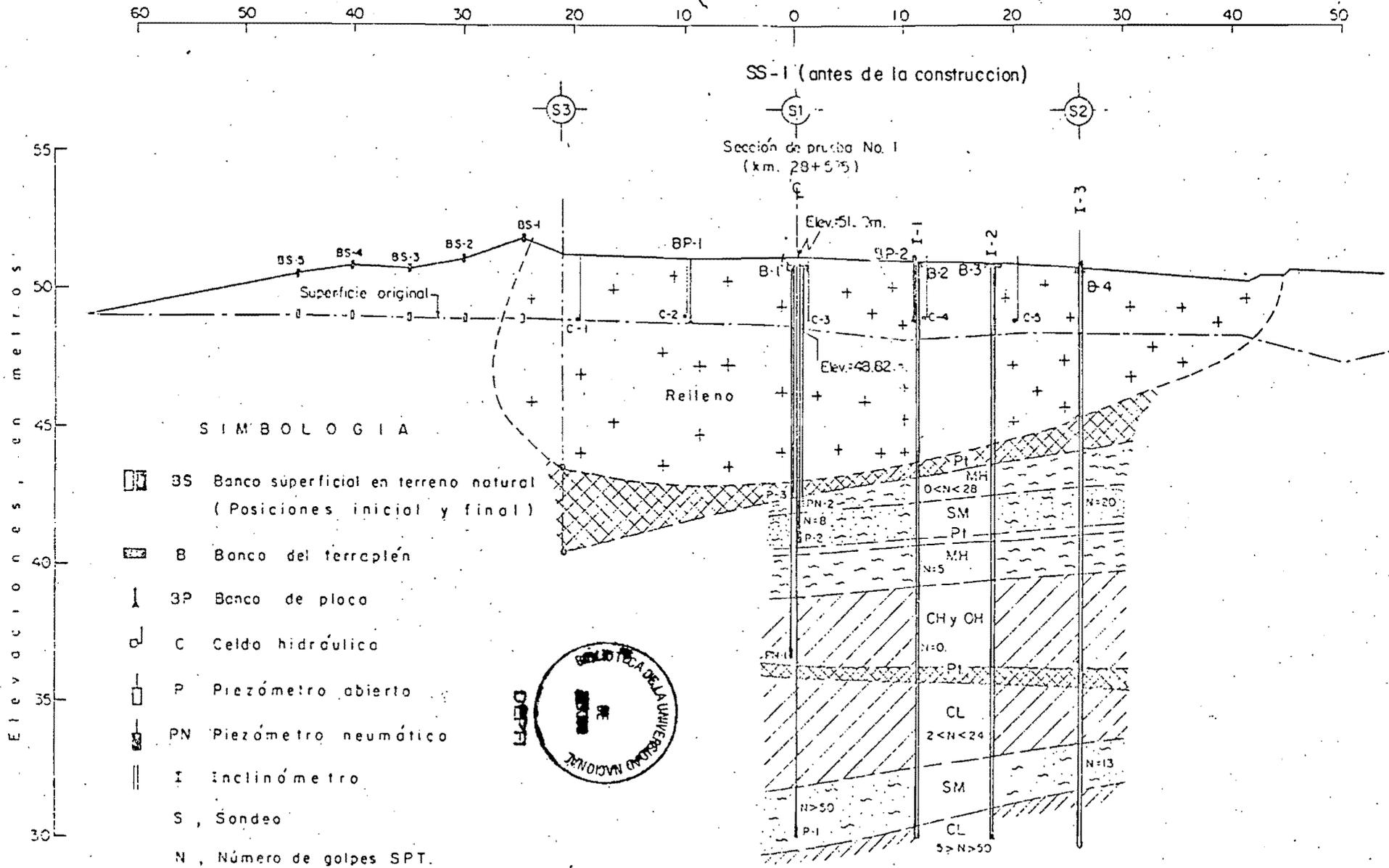


Fig. 5.5 instrumentación en la Sección 1.

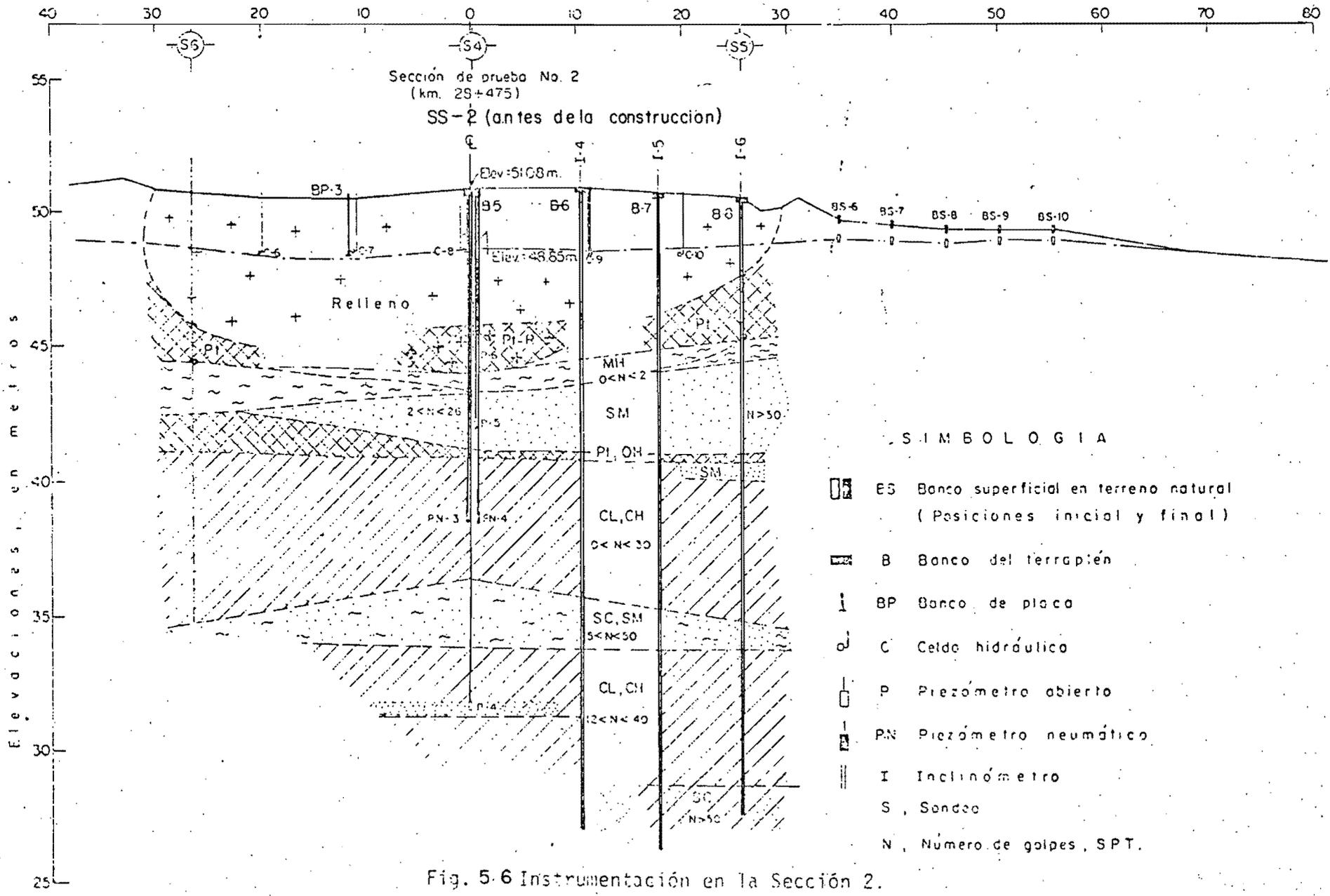


Fig. 5.6 Instrumentación en la Sección 2.

Destacan una profundidad y un volúmen de relleno incrustado mayores de la Sección 1 sin membrana, pero también que el espesor de turba y suelos comprensibles es mayor en ella. La penetración máxima del relleno medida en el sondeo S1 de la Sección 1, fue de 5.2 m y en el S4 de la Sección 2, de 4.5 m, con respecto a la superficie original del terreno. En la última se incluye el espesor de turba contaminada con material de relleno, atribuida a la rotura de la membrana.

También es apreciable que el ancho del relleno es menor en la Sección 2.

En ambas secciones se observa un volumen asimétrico del relleno desplazado hacia la izquierda de las Figs. 5.5 y 5.6. En este sentido son determinantes el buzamiento y el espesor de la capa de arena limosa situada ligeramente abajo del fondo del relleno. La capa está a menor profundidad y es más compacta en la Sección 2.

Los bancos de nivel BS-1 a 5, instalados antes de la construcción, permitieron medir el desplazamiento vertical de la superficie del terreno a un lado de la Sección 1, siendo el máximo de 2.9 m en el BS-1 (Fig.5.7.a). En los bancos de la Sección 2, instalados del lado contrario, el máximo desplazamiento fue de 0.8 m, en el BS-6 (Fig.5.7.b)

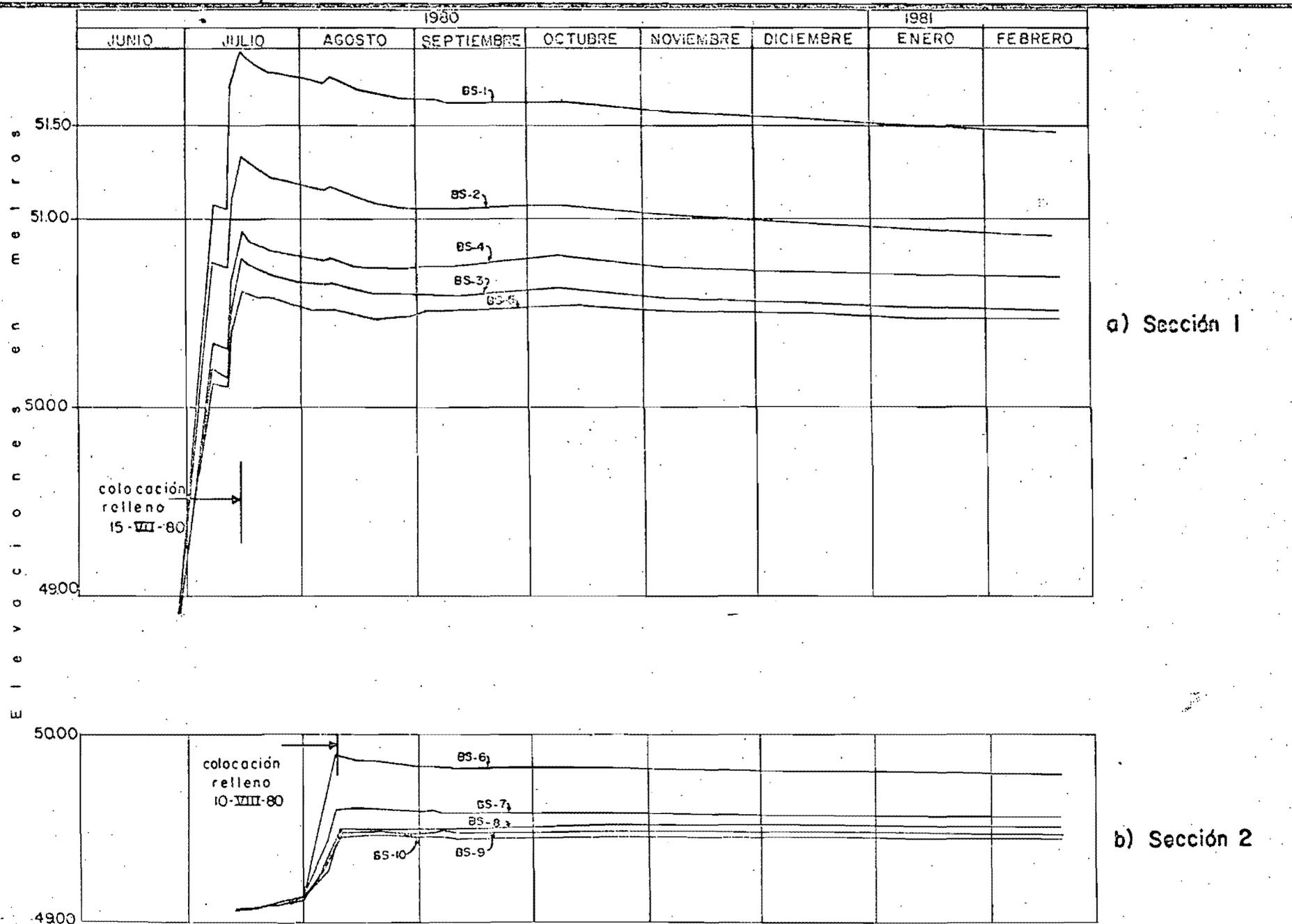


Fig.57 Desplazamientos verticales de bancos superficiales sobre terreno natural.

La colocación del relleno produjo fuerte desplazamiento horizontal de la turba a gran distancia. Postes situados a 50 m del borde del camino sufrieron fuertes desplomes.

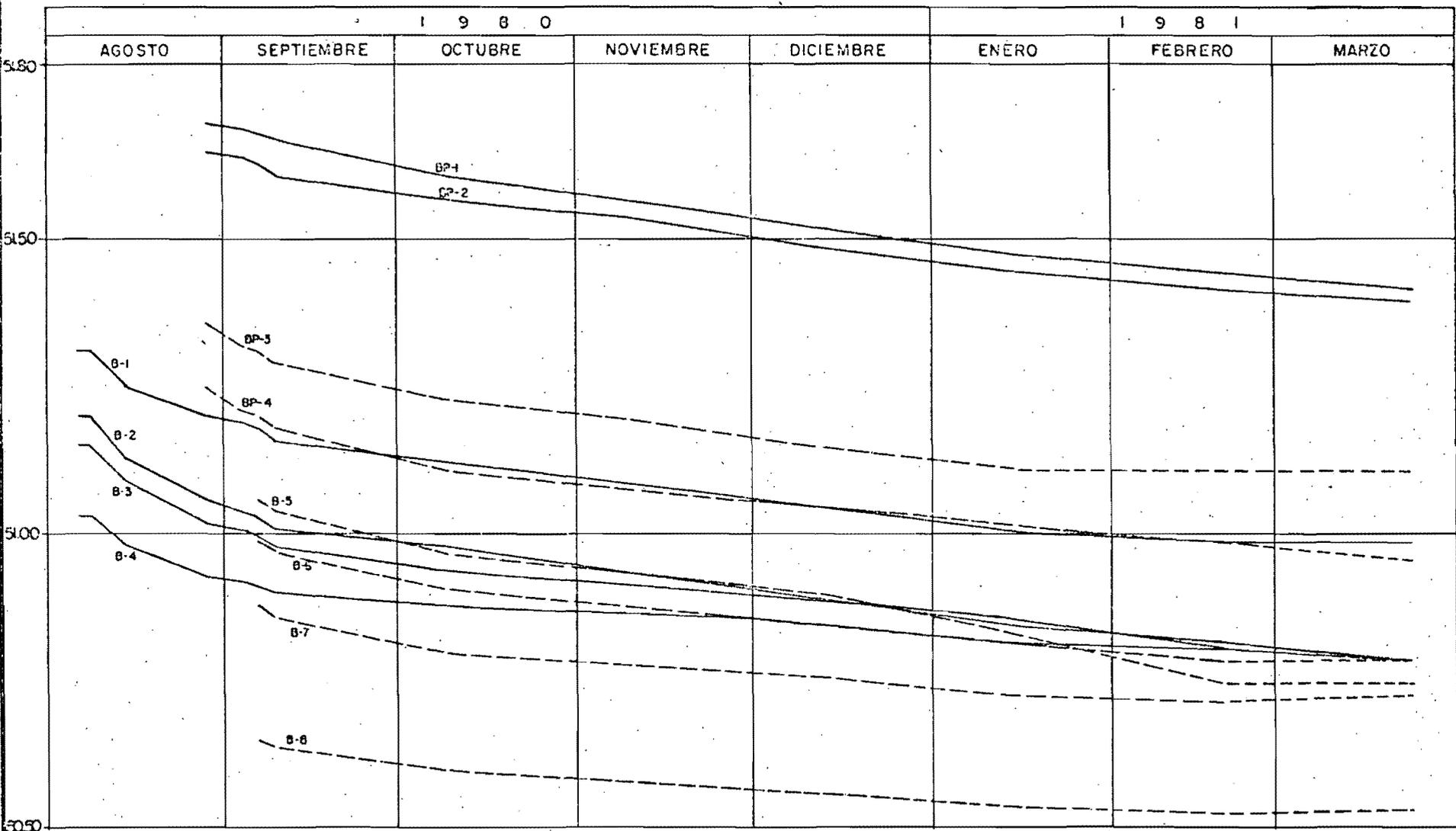
Comportamiento Posterior a la Colocación del Relleno

La evolución del hundimiento de bancos situados en la superficie del relleno (Fig. 5.8), indica la tendencia a disminuir la velocidad en ambas secciones. Al cabo de 2 meses de colocado el relleno ocurre una reducción sustancial de la velocidad, que puede interpretarse como el final de la consolidación primaria. En los bancos B-1 y B-5, situados sobre el eje del camino, el primero en la Sección 1 y el segundo en la 2, ocurrieron las velocidades de hundimiento reportadas en la Tabla 1. El último período es muy corto para asegurar que los movimientos hayan cesado.

Tabla 1. Velocidades de hundimiento de los bancos superficiales B-1 (Sec.1) y B-5 (Sec. 2)

Banco B - 1		Banco B - 5	
Período	Velocidad cm/mes	Período	Velocidad cm/mes
5 ago/9sep '80	13	6 sep/10 oct '80	8
9 sep '80/15 feb '81	3	10 oct '80/19 feb '81	5
15 feb/23 mar. '81	~ 0	19 feb/23 mar '81	0

Las mediciones piezométricas demuestran que la presión de poro tiende a disminuir en ambas secciones. El exceso de presión



- Elevaciones en metros

Fig. 58 Desplazamientos verticales de bancos superficiales del terraplén.

— Sección 1 Relleno colocado 15 jul. 80
 - - - Sección 2 Relleno colocado 10 ago. 80
 B Bancos superficiales
 B P Bancos de placa

de poro es en promedio de 1 ton/m^2 al 23 de marzo de 1981. La evolución observada en el piezómetro P-1 (Sec. 1), es anormal y se atribuye a funcionamiento deficiente.

Un proceso de consolidación también se observa a los lados del camino en el terreno natural desplazado, como se deduce de la Fig. 5.7. Las velocidades son pequeñas en los bancos superficiales BS-1 a 5 de la Sección 1, y prácticamente nulas en los bancos BS-6 a 10 de la Sección 2.

Las curvas que representan los hundimientos a lo largo de las secciones 1 y 2 (Fig. 5.11), muestran que los máximos ocurren al centro y en el lado donde el espesor del relleno y suelos compresibles es mayor. En la Sección 2 las curvas tienen inflexiones más pronunciadas.

Las Figs. 5.9 y 5.10 muestran los desplazamientos horizontales hacia los lados del camino; los máximos suceden en el relleno y en los suelos blandos. Es apreciable la restricción impuesta por el estrato arenoso situado a poca profundidad. Al cabo de seis meses de instalados los inclinómetros, las deformaciones horizontales del relleno son de 3.5 cm en la Sección 1 y de 4.2 cm en la 2. Mayores deformaciones del terreno natural se midieron en la Sección 1, debido al mayor espesor de suelos blandos.

Desplazamientos horizontales, en cm.

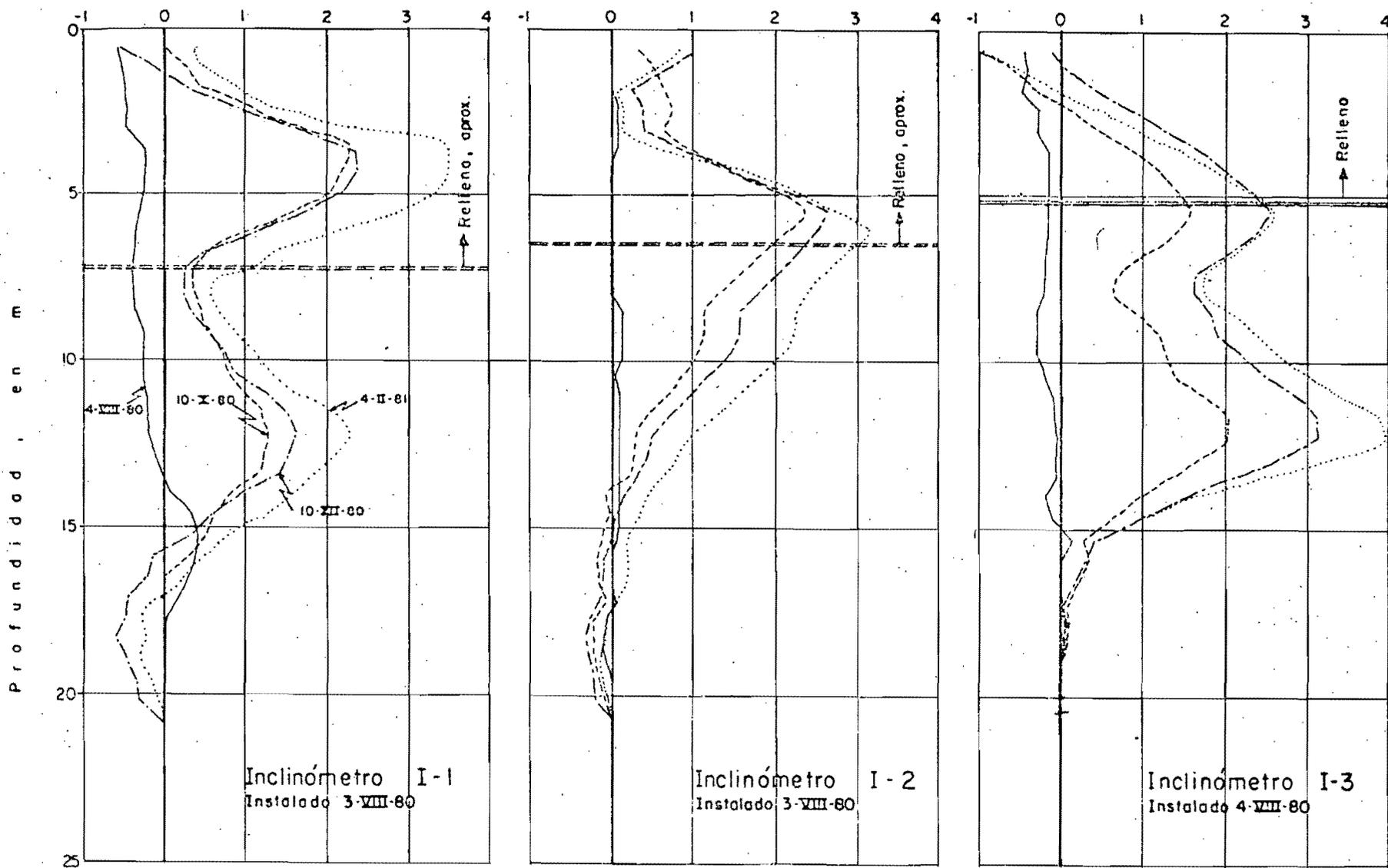


Fig. 5.9 Desplazamientos horizontales de inclinómetros de la Sección 1.

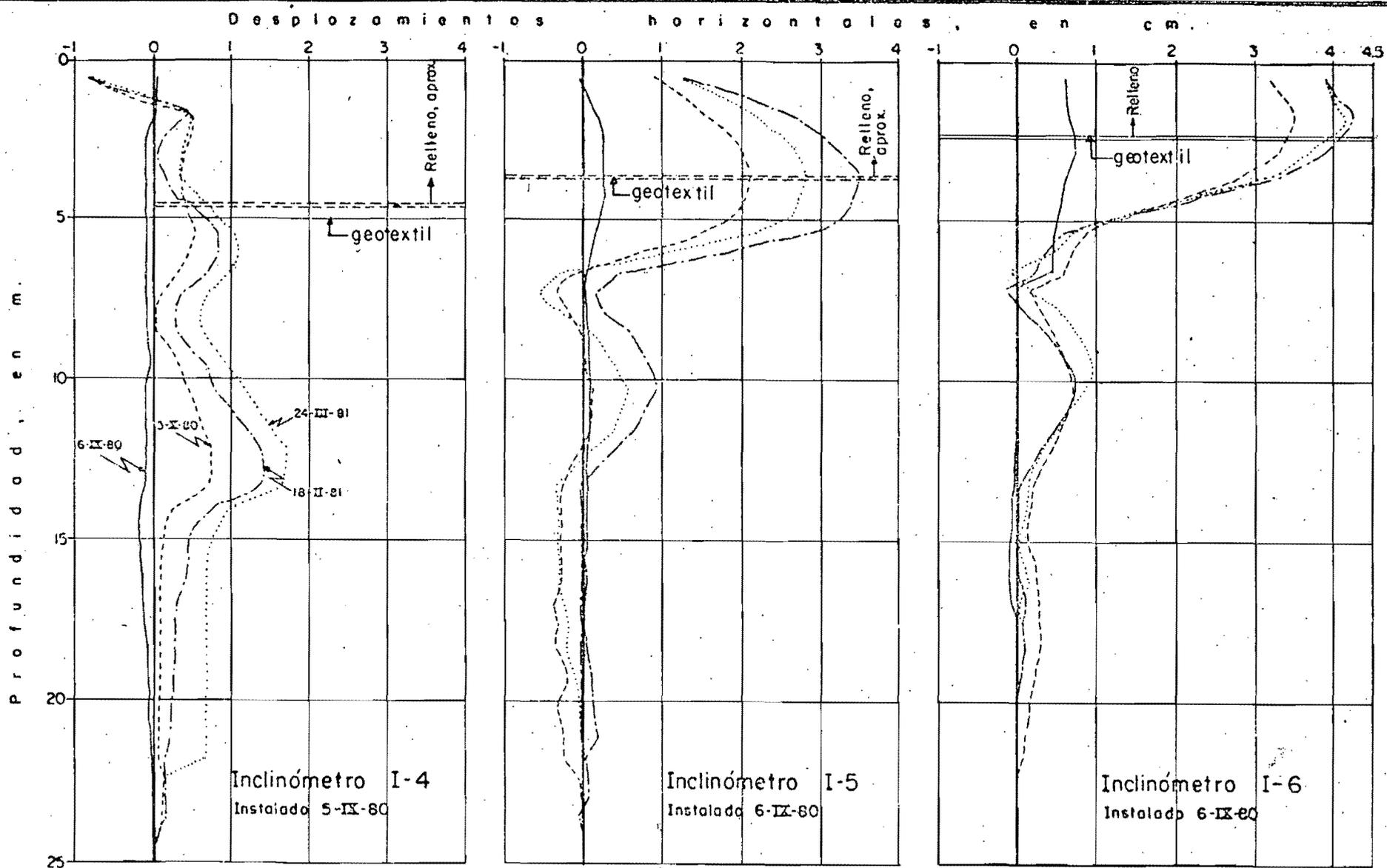


Fig. 5.10 Desplazamientos horizontales de inclinómetros de la Sección 2.

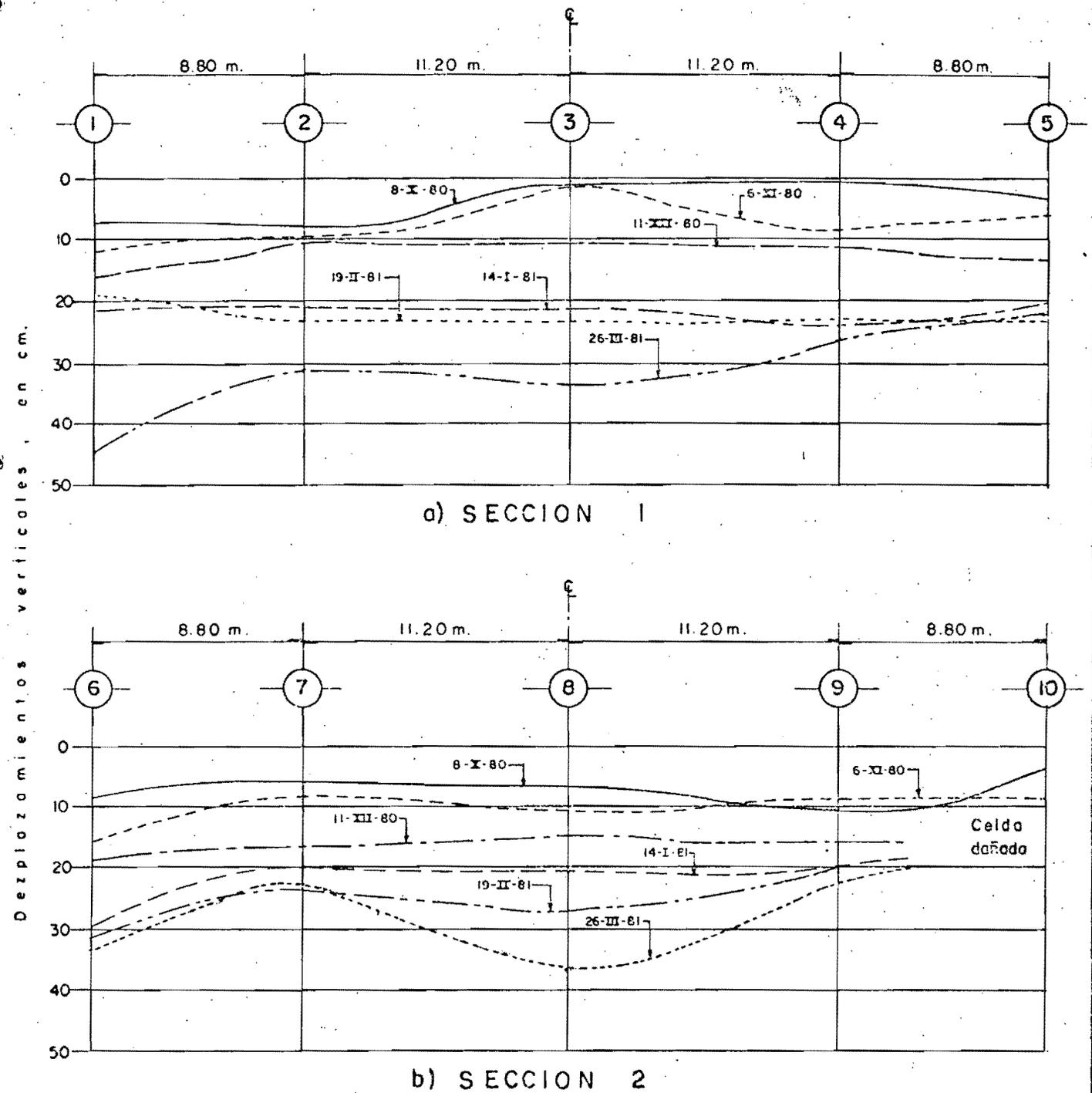


Fig. 5II Desplazamientos verticales en celdas hidráulicas

La información piezométrica no se presenta, pues no hay hasta el momento en ella nada que se aparte de las tendencias usuales en estos problemas.

5.3 Otras aplicaciones

Se usó geotextil como refuerzo de cimentación en:

a) Camino de Acceso a Canal de Irrigación (SARH), en Eba-no, S. L. P. La efectividad de la membrana no se ha podido comprobar debido a que es un camino poco transitado.

b) Tramo de prueba de un camino en Campeche (SAHOP, DGCR) la aplicación tuvo éxito pero fue desechado su uso porque implicaba quitarle trabajo a mucha gente, ya que cortaban los troncos adyacentes al camino para utilizarlos como refuerzo de la cimentación.

c) Estabilidad de taludes, se usó en el Fraccionamiento Lomas Anahuac, D. F.; en una ladera que se localiza frente al Club Deportivo. El talud se estaba deslavando, para evitarlo, se construyó una berma estabilizadora reforzada en su base con geotextil, además de un dren longitudinal al pié del talud.

d) En la construcción de calles de un conjunto habitacional para trabajadores en Cosamaloapan, Ver.

e) Plataforma de maniobras, CEPAMISA, en Michoacán.

f) Se ha empezado a fabricar en México un geotextil con refuerzo de malla plástica o geored (Ref 32), La geored interna es elaborada mediante el proceso de extrusión axial-rotativa de filamentos de polietileno y es cubierta en ambas caras por velos de fibras de poliéster y polipropileno, mediante el procedimiento mecánico de entrelazado.

Está en proyecto la utilización de geotextiles como refuerzo en la construcción de las carreteras: Libramiento Poniente de la Cd. de Tampico, Tamps.; Coatzacoalcos - Minatitlán, Ver.; ampliación del cuerpo actual y en la modernización del tramo Nuevo Teapa-Río Tonalá en el Edo. de Veracruz.

La Comisión del Lago de Texcoco (SARH), tiene en proyecto utilizar geotextiles para estabilizar los taludes en la construcción del Lago Nabor Carrillo F.

En términos generales, estas son las experiencias más importantes que se tienen en México hasta la fecha del presente escrito.

6. BIBLIGRAFIA

1. ALBERRO A. J., DIAZ M. C., "Refuerzo a la Tensión en el Contacto Terraplén - Cimentación". Instituto de Ingeniería UNAM, Octubre, 1971
2. BELOGNIA D. L., PUFFER W. G., "Highway Applications of Geotextiles", Civil Engineering, ASCE, Vol. 51, núm. 5, N. Y., N. Y., Mayo, 1981
3. BARVASOV V. A., BUDANEV V. G., FOMIN A. N., PERKOV JU. R., PUSHKIN V. I., "Deformations of soil foundation reinforced with pre-stressed synthetic fabrics", Proceedings of the International Conf. on the Use of Fabrics in Geotechnics, Ecole Nationale Des Ponts et Chaussées, Paris, France, Abril 20 - 22, 1977

4. BELL J. R., GRENWAY D. R., and VISCHER W., "Construction and analysis of a fabric reinforced low embankment", Proc. of the Int. Conf. on the Use of Fabrics in Geotechnics, ENPC, Paris, France, April 20 - 22, 1977
5. BELLONI L., SEMBENELLI P., "Road embankment on compressible soils constructed with the aid of synthetic fabrics", Proc. of the Int. Conf. on the Use of Fabrics in Geotechnics, ENPC, Paris, France, April 20 - 22, 1977
6. BURWASH W. J., "A Case History Involving the Use of a Geotextile for a Highway embankment on Muskeg", Proceedings of the First Canadian Symposium on Geotextiles, Calgary, Canada, Septiembre, 1980
7. CUEVA O. C., "Informe sobre el Uso de Geotextil en la Carretera Puyo Siguin - Rio Pastaza", Dirección General de Obras Públicas, Quito, Ecuador, Mayo, 4, 1981
8. CRAGG C. B. H., "Geotextile Applications within Ontario Hydro", Ontario Hydro Research Division, Toronto, Canada

9. FERRANTE G., MAGGIOROTTI P., PATTESCHI G., "An Application of the Geotextil Typar in the Foundation of an Asymmetric Road Embankment", Lazio Department of A.N.A.S., Roma, Mayo, 1980
10. HALIBURTON T. A., FOWLER J., "Design and Construction of Fabric-Reinforced Roads and Embankments on Soft Foundation", School of Civil Engineering Oklahoma State University, Stillwater, E.U.A., Julio 1980
11. JARRET P. M., "Large Scale Model Tests on Gravel-Fabric Peat Systems", Dept. of Civil Engineering, Royal Military College, Kingston.
12. JARRET P. M., LEE R. A., "The use of fabrics in road pavements constructed on peat", Proc. of the Int. Conf. on the use of Fabrics in Geotechnics, ENPC, Paris, France, Abril 20 - 22, 1977
13. KCERNER R.M., WELSH J. P., "Construction and Geotechnical Engineering using Synthetic Fabrics", John Wiley and Sons, N. Y., N. Y., 1980

14. LAI J. S., ROBNETT Q. L., "A Study of the use of typar in ground stabilization applications", School of Civil Engineering, Georgia Institute of Technology, Georgia, U. S. A., Junio 1980
15. LAI J. S., ROBNETT Q. L., MURCH L. E., MURRAY C. D. LAVIN J. G., "Use of Geotextiles in Road Construction a Experimental Study", First Canadian Symposium on Geotextiles, Calgary, Canada, Septiembre 23, 1980
16. LAI J. S., ROBNETT Q. L., "Use of Geotextiles to Extend Aggregated Resources", ASTM Symposium on Extending Aggregate Resources, Orlando, Fla., Diciembre 10, 1980
17. LAI J. S., ROBNETT Q. L., "Design and use of Geotextiles in Road Construction", proceedings of the Third Conference Road Engineering Association of Asia & Australia, Taipei, Taiwan, Abril, 20 - 24, 1981
18. MARQUEZ B. G., "Geología de la zona de acceso al puente Coatzacoalcos II", Memoria de la III Reunión Nacional de Geotécnica y Geotermia, Septiembre, 1980

19. MARQUEZ, B. G., OLIVERA B. A., "Proyecto de un tramo de carretera que se desarrolla sobre suelo blando", Memorias del XI Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Noviembre 26 - 30, 1979
20. MURCH L. E., WEIMAR R. D., "Proposed standard test method for wide-width Tensile Properties of Geotextiles", Textile Research Laboratory, Atlanta, Georgia, Enero 16, 1981
21. MURILLO F. R., "Informe sobre las pruebas de Resistencia y de Tensión en Mallas Sintéticas", Información Interna de la Comisión del Lago de Texcoco, SARH, México, D. F., Noviembre 1, 1979
22. Proyecto PNUD/FAO/PER/7'8/003 "Tela Soportante para Caminos Forestales", Nota técnica # 22, Lima, Perú, 1979
23. Road Research, "Construction of roads on compressible soils", A report prepared by an OECD Road Research Group, Paris, Francia, Diciembre, 1979
24. SPRINGALL C. G. y SOSA, G. R., "Estudio Geotécnico para el camino de acceso al puente Coatzacoalcos II, Margen Izquier

- da", Estudio realizado para la Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas, 1978
25. SPRINGALL C. G. y SOSA G. R. "Comportamiento de Terraplenes en suelos blandos del Camino de Acceso al Puente Coatzaocalcos II, Uso de Geotextiles", Estudio realizado para la Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas, 1981
26. VOLMAN W., KREKT L., RISSEEUW P., "Reinforcement with fabrics, a new technique to improve the stability of embankments on weak subsoils", Proc. of the Int. Conf. on the Use of Fabrics in Geotechnics, ENPC, Paris, Francia, Abril 20 - 22, 1977
27. WILMERS W., "Use on non-woven fabrics under embankments Comparison of different makes of fabrics", Proc. of the Int. Conf. on the Use of Fabrics, in Geotechnics, ENPC, Paris, Francia, Abril 20 - 22, 1977
28. RANKILOR P. R., "Membranes in Ground Engineering." Manstock Geotechnical Consultancy Service, LTD; A Wiley Interscience Publications. Chinchester - New York - Brisbane - Toronto, 1981

29. U. S. Department of Transportation. "Guideline for use of fabrics in construction and maintenance of low volume roads" By J. Steward, R. Williamson, and J. Mohney. Report No. FHWA TS-78-205
Washington DC, 1978

30. RAMIREZ M. A. y SANCHEZ P. J. L. "Conferencia sobre el uso de Geotextiles", Ingenieros de la Cía. Dupont. Marzo 31 de 1979, Auditorio SAHOP.

31. KRYNINE D. P. & JUDD W. R., "Principios de Geología y Geotecnia para Ingenieros". Ediciones Omega, Barcelona, 1961

32. PORRAZ J. L. M., MEUREGH H. y PORTA E., "Empleo de Georedes plásticas y geotextiles en diversos proyectos y estructuras de ingeniería civil"; Asamblea Plenaria de FELAC Congreso Latinoamericano de Consultoría; México, D. F., julio 12 - 16, 1981

33. CASAGRANDE, LEO, "Electro-osmotic Stabilization of Soils", Journal of the Boston Society of Civil Engineers; January, 1952

34. DIAZ MORA C., "Aplicaciones de fibras plásticas en obras de tierra y drenaje de suelos", Tesis Profesional, Facultad de Ingeniería, UNAM, México, D. F., marzo de 1972
35. RANKILOR P., "Fabrications"; Ground Engineering; May 1981
36. MC KEAND E. y SISSONS C. R. "Textile reinforcements characteristic properties and their measurements"; Ground Engineering; Octubre 1978
37. HOARE D. J., "Permeable synthetic fabric membranes 1; Their use in the strengthening of soils"; Ground Engineering Vol. II, Núm. 5, Julio, 1978
38. HOARE D. J. "Permeable synthetic fabric membranes 2; Factors affecting their choice and control in geotechnics"; Ground Engineering, Noviembre, 1978
39. HOUGHES J. M. D.; WITHERS N. J. & GREENWOOD D. A. " A field trial of the reinforcing effect of a stone column in soil"; Symposium Ground Treatment by Deep Compaction; Geotechnique; Marzo, 1975

40. MCKENNA J. M., EYRE W. A. & WOLSTENHOLME D. R.,
"Performance of an embankment supported by stone columns
in soft ground"; SGTDC, Geotechnique; Marzo, 1975

41. ENGELHARDT K. & GOLDING H. C., "Field Testing to evaluate stone column performance in a seismic area" SGTDC,
Geotechnique, Marzo, 1975

42. CASAGRANDE LEO "Construction of embankments across peaty soils", Journal of the Boston Society of Civil Engineers, Vol. 53, núm. 3, 1966