

0031

01149

62

DIVISION DE ESTUDIOS SUPERIORES
FACULTAD DE INGENIERIA
U. N. A. M.

Tema para examen de Maestría en Mecánica
de Suelos

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE TERRAPLENES EN
ZONAS PANTANOSAS

Noviembre, 1974

HUGO SERGIO HAAZ MORA

7-9-74
**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



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 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.

CONTENIDO

- I. INTRODUCCION

- II. OBJETIVOS DEL DISEÑO
 - 2.1 Estabilidad
 - 2.2 Deformación
 - 2.3 Factores que influyen en la solución más económica y satisfactoria

- III. ESTUDIOS PREVIOS
 - 3.1 Estudios preliminares y definitivos

- IV. PROPIEDADES DE LOS SUELOS EN ZONAS PANTANOSAS
 - 4.1 Descripción de la turba
 - 4.2 Determinación de las propiedades mecánicas

- V. ESTABILIDAD DE LOS TERRAPLENES
 - 5.1 Tipos y causas, de falla más comunes
 - 5.2 Métodos de análisis de estabilidad

- VI. ASENTAMIENTOS DE LOS TERRAPLENES
 - 6.1 Generalidades
 - 6.2 Efectos de los asentamientos en los terraplenes

VII. METODOS DE CONSTRUCCION DE TERRAPLENES EN ZONAS PANTANOSAS

- 7.1 Remoción y reemplazo del terreno blando
- 7.2 Empleo de materiales ligeros
- 7.3 Sobreelevación de la rasante
- 7.4 Sobrecarga previa del terreno de cimentación
- 7.5 Tratamiento físico-químico del terreno de cimentación
- 7.6 Calcinación del terreno de cimentación
- 7.7 Colocación de entarimados y mallas en la base del terraplén
- 7.8 Bermas de estabilización
- 7.9 Construcción por etapas (controlada)
- 7.10 Drenes verticales de arena
- 7.11 Desplazamiento del terreno compresible por medio de explosivos

VIII. INSTRUMENTACION Y MEDICIONES DE CAMPO

- 8.1 Necesidad de la instrumentación
- 8.2 Requerimientos de instrumentación
- 8.3 Instrumentación de campo en los terraplenes de prueba

IX. CASOS DE TERRAPLENES CONSTRUIDOS EN ZONAS PANTANOSAS

9.1 Terraplenes de prueba en el Lago de Texcoco

9.2 Construcción de los terraplenes en la carretera
Minatitlán-Coatzacoalcos

X. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

REFERENCIAS

FIGURAS

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE TERRAPLENES EN ZONAS PANTANOSAS

SINOPSIS: Este trabajo trata del diseño y construcción de terraplenes en zonas pantanosas, estableciendo los objetivos fundamentales del diseño, señalando algunas consideraciones teóricas, describiendo los métodos de construcción empleados y el uso de la instrumentación y las mediciones de campo. Finalmente, se presentan algunos casos de terraplenes construidos en terrenos blandos.

I. INTRODUCCION

El origen de los problemas en el diseño y construcción de terraplenes en zonas pantanosas, se debe fundamentalmente a la falta de adecuada sustentación del terreno de cimentación, lo que se traduce en problemas de estabilidad y de asentamientos, debidos a la baja resistencia y alta compresibilidad de estos suelos. Estos problemas suelen ser aún importantes en terraplenes de relativa poca altura, y se agravan cuando la altura de los terraplenes aumenta, ya sea por tirante de agua, sobre elevaciones futuras, etc.

Los terrenos pantanosos suelen ser típicos de formaciones fluviales (deltas o llanuras de inundación, lacustres o marinas), comunes en las planicies costeras, y representan un serio obstáculo principalmente en la construcción de vías terrestres.

Los propósitos que se persiguen en lo que sigue son para identificar los -- problemas, discutiendo los métodos alternativos para su solución, enfocando principalmente en la construcción de terraplenes para vías terrestres, bordos, diques, etc.

II. OBJETIVOS DEL DISEÑO

Desde el punto de vista de la Mecánica de Suelos, los objetivos principales del diseño de terraplenes en zonas pantanosas , se refieren a llegar a alcanzar una estabilidad aceptable, vigilando los efectos que produzcan -- las deformaciones y sin perder de vista el factor económico involucrado.

2.1 Estabilidad

Por lo general muchos diseños con factores de seguridad (F.S.) del orden de 1.3 ± 0.2 , dependen de las consecuencias de una falla. Si el análisis bajo las condiciones de la prueba no consolidada-no drenada (UU) indica un valor del F.S. alto, entonces la construcción -- se puede realizar rápidamente, en caso contrario se obtendrá el -- F.S. para el caso de la prueba consolidada-drenada (CD), de tal -- manera de poder conocer el rango de variación del F.S. involucrado.

2.2 Deformaciones

Existen dos problemas generales, que son:

- 1o. El asentamiento excesivo de los terraplenes una vez terminada su construcción, debido principalmente a la consolidación, a la

compresión secundaria así como a las deformaciones laterales; en algunos casos los asentamientos diferenciales son más importantes que los asentamientos totales.

20. El efecto de la construcción de los terraplenes sobre estructuras adyacentes.

2.3 Factores que influyen en la solución más económica y satisfactoria

Los factores que deben tomarse en cuenta, para lograr un diseño -- que sea a la vez que económico, satisfactorio, se enumeran a continuación.

- 1) Características y espesor de los suelos compresibles
- 2) Magnitud de la sobrecarga impuesta al terreno de cimentación
- 3) Tiempo disponible para la construcción (por lo general, al proyectista se le da un tiempo razonable en la construcción de estructuras de tierra). La planeación previa puede reducir considerablemente los costos de construcción.
- 4) Localización del proyecto. Los proyectos en zonas urbanas son por lo general más costosos, que los de zonas rurales, principalmente por la afectación a estructuras adyacentes.
- 5) Materiales de construcción. Los suelos granulares llegan a ser raros en algunas áreas o pueden no existir en otras. El empleo de productos de desperdicio va en aumento así como también los rellenos hidráulicos.
- 6) Requerimientos de Localización y pendiente. El proyectista de-

berá consultar con el especialista de suelos, antes de completar su diseño, ya que pueden ocurrir pequeños cambios que fomenten los problemas en los suelos.

III. ESTUDIOS PREVIOS

3.1 Estudios preliminares y definitivos

Un buen diseño deberá basarse en un conocimiento sólido previo, de las características generales y de las propiedades mecánicas de los suelos que intervienen en él. El programa de trabajos para el estudio de los materiales comprende dos fases: La etapa preliminar y la definitiva.

La información que se obtenga durante la etapa preliminar será de carácter general y será suficiente para llevar a cabo diseños preliminares que permitan efectuar estudios de carácter económico, los cuales dirán la última palabra sobre la costeabilidad de la obra. En esta etapa se deberá recabar información geológica de la zona en estudio, disponibilidad de materiales para la construcción de los terraplenes, particularmente en lo que se refiere a las propiedades mecánicas, volúmenes de acarreo y a las distancias de acarreo.

La etapa definitiva tiene como finalidad la de proporcionar datos numéricos, utilizables directamente en el diseño y construcción. Esta etapa comprende el estudio de la estratigrafía y de las propiedades mecánicas del terreno de cimentación así como de los materia-

les de préstamo para la construcción de los terraplenes.

IV. PROPIEDADES DE LOS SUELOS EN ZONAS PANTANOSAS

Los suelos que se localizan en las zonas pantanosas, usualmente comprenden a limos o arcillas de alta compresibilidad así como suelos de origen orgánico. Las propiedades de estos suelos son muy similares, por lo que en lo que sigue los designaremos como turba.

4.1 Descripción de la turba

Con algunas excepciones, los depósitos de turba varían su coloración desde café a café oscuro y son muy suaves y esponjosos en estado inalterado. Exceptuando la costra superficial, el contenido natural de agua (ω) de tales depósitos es muy alto. En estado inalterado poseen una relación de vacíos elevada y una permeabilidad relativamente alta. Bajo la aplicación de cargas o cuando se alteran tanto la relación de vacíos como el coeficiente de permeabilidad disminuyen a valores sumamente bajos.

Contenido de agua (ω). Dependiendo de su origen y espesor, el contenido de agua varía entre límites muy amplios. La turba por lo general tiene un peso despreciable, por lo que la disminución del ω con la profundidad, es imperceptible.

En la Tabla I se registran algunos valores del contenido de agua para depósitos típicos de turba en diferentes países del mundo.

T A B L A I

LOCALIDAD	CONTENIDO DE AGUA (w%)	RESIST. AL CORTE Kg/cm ²
Canadá (Alberta)	700 - 1400	.05 - 0.12
U.S.A. (Mass.)	400 - 800	.03 - 0.28
Alemania	400 - 800	.01 - 0.49
Suiza	220 - 1460	.05 - 0.15
Inglaterra	800 - 1000	.06
<u>México (Minatitlán)</u>	300 - 700	.05 - 0.3

Plasticidad. La plasticidad de las turbas varía desde baja plasticidad en depósitos completamente intemperizados, hasta plasticidad nula en depósitos altamente fibrosos.

Pocas investigaciones han sido realizadas en relación a la plasticidad de las turbas.

Resistencia al esfuerzo cortante. El resultado de las investigaciones de resistencia al esfuerzo cortante de las turbas, se muestra en la Tabla I.

La mayoría de estas investigaciones fueron realizadas por medio de pruebas de veleta "in situ". Los resultados de las pruebas de compresión no confinada, parecen coincidir razonablemente con los de la veleta.

Los resultados de las investigaciones realizadas parecen mostrar -

que la resistencia al esfuerzo cortante aumenta al disminuir el contenido de agua.

Es interesante hacer notar, que el rango de resistencia del material remoldeado, es aparentemente independiente del contenido de agua, y que la pérdida de resistencia bajo el remoldeo, es mayor para rangos bajos de contenidos de agua, de manera que la resistencia al cortante se reduce en alrededor 1/3 de la resistencia en estado inalterado. Para contenidos de agua mayores, el remoldeo ocasiona una pérdida en resistencia del orden del 50%.

Relación de vacíos y permeabilidad. Ambas propiedades varían dentro de límites bastante amplios. En depósitos de turba superficiales sometidos a secado, la relación de vacíos puede variar entre 2 y 5, en depósitos profundos aumenta entre 5 y 28, estando la mayoría entre 5 y 15.

La información recabada por pruebas de permeabilidad realizadas en muestras inalteradas, reporta que el coeficiente de permeabilidad varía entre 10^{-2} y 10^{-4} cm/seg. Bajo la acción de pequeñas cargas la permeabilidad disminuye rápidamente.

Consolidación. La consolidación de la turba es muy compleja debido a la ocurrencia de compresión secundaria que, para ciertas turbas muestra una relación lineal con el log. del tiempo y parece extenderse indefinidamente, sin embargo, se piensa que los asenta-

mientos deben de cesar .

La literatura consigna ejemplos diversos que muestran que la compresión secundaria puede extenderse por muchos años, e incluso -- exceder a la consolidación primaria. Un número considerable de -- edificios medievales en Europa construídos sobre tales suelos, con tinúan asentándose.

4.2 Determinación de las propiedades mecánicas

La determinación de las propiedades de las turbas, a partir de los-- resultados de las pruebas de laboratorio y/o campo es difícil y esen-- cialmente imposible cuando se busca conocer el comportamiento es-- fuerzo-deformación.

Las dificultades principales que surgen son las de obtención de -- muestras que posean las mismas propiedades mecánicas del suelo-- en el sitio, o lo que es lo mismo, que tengan la misma estructura. Esta perfección podría obtenerse por medio de pruebas realizadas-- "in situ", pero nunca se podría obtener con muestras de laborato-- rio, debido a la alteración de las mismas.

Por otro lado, cómo probar las muestras bajo las mismas condicio-- nes que tenían "in situ", ésto significa que el sistema de aplicación de esfuerzos, la rapidez de aplicación de las cargas y las condicio-- nes de drenaje fueran las mismas. Las pruebas de laboratorio pue-- den empezar a reproducir algunas de estas condiciones en deter---

minadas circunstancias.

Por fortuna, la práctica generalizada ha resuelto estos problemas, y es así como se han desarrollado métodos semi-empíricos para estimar las propiedades de los suelos. Algunos de estos procedimientos han ganado tal aceptación que las limitaciones teóricas y prácticas, han sido olvidadas.

El éxito de los procedimientos empleados, depende de una cancelación fortuita de errores o de una calibración basada en el comportamiento medido en el campo. Más aún, nuevas capacidades teóricas han sido dispuestas mediante el uso de computadoras electrónicas que demandan datos de suelos para los que no existen correlaciones empíricas.

V. ESTABILIDAD DE LOS TERRAPLENES

5.1 Tipos y causas de falla más comunes

a) Deslizamientos superficiales. Debido a las fuerzas naturales que tienden a hacer que las partículas deslicen hacia abajo, se puede presentar un flujo viscoso que generalmente se desarrolla con extraordinaria lentitud.

b) Rotación sobre una superficie curva. Estas fallas pueden ser locales, por el pie del talud o en la base del mismo. Fig. 1

c) Traslación sobre una superficie plana. Ocurren a lo largo de su

perfiles débiles que suelen ser horizontales o poco inclinadas. -

Fig. 1

- d) Falla por erosión. Estas fallas afectan la superficie del terraplén, son provocadas por arrastres de viento, agua, etc.
- e) Falla por licuación. Ocurren cuando los suelos pasan rápidamente de una condición más o menos firme a la pérdida casi total de resistencia al esfuerzo cortante.

Las causas que producen las fallas, se pueden dividir en externas e internas. Las causas externas son aquellas que provocan cambios en la resistencia al esfuerzo cortante, lo cual genera fuerzas no balanceadas.

Las causas internas son aquellas que no producen cambios en las condiciones superficiales. Las causas más comunes son el incremento en la presión de poro y la disminución progresiva de la cohesión de los materiales del terraplén.

Los casos intermedios entre causas externas e internas son aquellos que se deben a la erosión y a la licuación espontánea.

5.2 Métodos de análisis de estabilidad

5.2.1 Esfuerzos efectivos. Se emplean los parámetros C' y ϕ' de terminados de las pruebas consolidadas-no drenadas (CU)

La estimación de las presiones de poro resultantes de las fil

tracciones y consolidación, se emplean como presiones de frontera normales a las superficies potenciales de falla.

El uso del análisis en términos de esfuerzos efectivos se emplea en las siguientes situaciones.

- 1) Estabilidad a largo plazo y vaciado rápido en suelos granulares, permeables e incompresibles, usando ϕ' y despreciando C' . Las presiones de poro se aplican cuando existe nivel de agua o filtraciones.
- 2) En suelos densos, medianamente compactos, usando C' y ϕ' . Se aplica cuando existen filtraciones o presiones de poro debidas a la consolidación, siempre y cuando se instalen piezómetros para verificar las presiones de poro su puestas en el diseño.
- 3) En suelos compresibles, donde ocurre algo de drenaje durante la aplicación de las cargas, cuando c y ϕ de pruebas CU.

5.2.2 Esfuerzos totales. Se utiliza la resistencia al esfuerzo cortante determinada de pruebas de laboratorio no drenadas o de pruebas de veleta. Estas resistencias representan las condiciones iniciales sin considerar el drenaje del agua de poro durante los cambios en resistencia. Los análisis en términos de esfuerzos totales se realizan en las siguientes

condiciones.

1) Terraplenes constituídos por arcillas normalmente consolidadas o ligeramente preconsolidadas, donde ocurre una pequeña disipación de presión hidrostática en exceso a la presión de poro.

2) Análisis de terraplenes con aplicación rápida de carga sobre un estrato cohesivo, sin tener restricciones respecto a drenaje del agua intergranular.

5.2.3 Presiones de poro. Los factores que influyen en la presión de poro durante la construcción de los terraplenes son numerosos: El contenido de agua, sobrecarga, longitud de la trayectoria de drenaje, velocidad de la construcción, etc.

La previsión de drenaje interno o el uso de zonas impermeables relativamente delgadas, retarda el desarrollo de las presiones de poro durante la construcción.

Las presiones de poro durante la construcción se incrementan cuando aumenta el peso del relleno, sin embargo, estas presiones de poro se disipan con el tiempo.

Para contenidos de agua de los materiales en el lado húmedo del ω óptimo, las presiones de poro aumentan rápidamente con el aumento de ω , pero el aumento es algo más mode-

rado debido al drenaje interno.

Finalmente, se recomienda que cada terraplén sea maneja—do en forma individual, analizando desde determinados pun—tos de vista los factores que posiblemente influyen.

5.2.4 Factor de seguridad (F.S.). Los siguientes valores pueden considerarse razonables para efectos de estabilidad de los —terrapienes.

- 1) Para condición de carga permanente, el F. S. no deberá— ser menor de 1.5.
- 2) Para cimentación de estructuras, un valor superior a 2 — es deseable, para limitar los movimientos necesarios de— bidos a la movilización de la resistencia o deformaciones plásticas locales en los extremos de la cimentación.
- 3) Para condición de carga temporal o cuando la estabilidad— alcance un mínimo durante la construcción, los factores — de seguridad se podrán reducir a 1.3 ó 1.25 si se mantie— ne un control de la aplicación de cargas.

VI. ASENTAMIENTOS DE LOS TERRAPLENES

6.1 Generalidades

Posiblemente el problema más grave que entraña un terreno de ci—

mentación muy compresible, es el que se refiere a los asentamientos que se producen en él al aplicarle la sobrecarga de los terraplenes.

Debido a la relativa alta permeabilidad de la turba en estado inalterado, la consolidación primaria se desarrolla rápidamente. Esto se confirma mediante numerosas observaciones de asentamientos realizados en diversas partes del mundo, lo cual muestra que la consolidación primaria de los depósitos de turba se desarrolla prácticamente con la aplicación de la carga.

La consolidación de la turba es extremadamente compleja, y una de las causas de esta complejidad es la naturaleza altamente compresible del material.

Por un período de varios años, la compresión secundaria de un depósito de turbas a menudo excede el asentamiento debido a la consolidación primaria. Más aún, debido a la alta permeabilidad, se observa que gran parte de la consolidación primaria se desarrolla durante la construcción del terraplén. Por estas razones la compresión secundaria de las turbas es más importante que la debida a la consolidación primaria.

El resultado de asentamientos tan grandes, debidos a la compresión secundaria de los depósitos de turba, ocasiona reparaciones difíciles y costosas.

6.2 Efectos de los asentamientos en los terraplenes

Los asentamientos que se producen en el terreno de cimentación, ocasionan los siguientes efectos en los terraplenes.

- 1) Pérdida de bombeo, ya que la presión ejercida por el terraplén, es mayor bajo el centro de la corona que bajo los hombros.
- 2) Aparición de asentamientos diferenciales en el sentido longitudinal, con el correspondiente perjuicio en el pavimento, obras de drenaje, etc.
- 3) Disminución de la altura del terraplén, lo cual se agrava en las zonas inundadas o cuando se llegan a producir problemas de drenaje superficial.
- 4) Agrietamiento de la corona del terraplén, especialmente cuando es muy ancho o tiene bermas.
- 5) Pérdida de la transición entre los terraplenes de acceso y las estructuras, cuando éstas apoyadas en un estrato resistente, no participan del asentamiento general.

En México, existen regiones en donde los asentamientos del subsuelo, juegan un papel tan importante, que todo el proyecto de un camino, incluyendo la posibilidad de cambio de trazo, quedan condicionados a ellos.

NOSAS

7.1 Remoción y reemplazo del terreno blando

En este método, se sustituye el terreno blando y compresible por otro de mejor calidad. El procedimiento se aplica generalmente, excavando hasta el estrato firme. Este método se recomienda únicamente cuando el espesor del estrato compresible es pequeño y no excede los 2.00 m.

7.2 Empleo de materiales ligeros

El problema principal consiste en conseguir, dentro de las distancias de acarreo económicas, bancos de materiales con pesos específicos bajos, tales como tezontles, arenas pumfíticas y suelos producto de la alteración de pizarras, recientemente se han empleado desechos industriales con buen éxito.

7.3 Sobreelevación de la rasante

El método consiste en sobreelevar inicialmente la rasante del terraplén, de manera que después de producirse el asentamiento quede en el nivel requerido. La efectividad de esta solución, depende en primer lugar de que el terreno soporte la sección sobreelevada y, en segundo lugar de que la combinación cantidad de material colocado contra acarreo del mismo sea estable.

7.4 Sobrecarga previa del terreno de cimentación

En este caso, se construye el terraplén con suficiente anticipación-

a las obras definitivas (pavimentación, etc.), permitiendo que ocurra el asentamiento durante un lapso disponible. Cuando gran parte del asentamiento se ha producido, se podrá efectuar un recargue que, preferentemente será definitivo. Esta solución es ventajosa, sobre todo en los accesos a puentes y pasos a desnivel. La limitación que habrá de cumplirse es que la solución sea viable en cuanto a tiempo.

7.5 Tratamiento físico-químico del terreno de cimentación

Estas técnicas están actualmente en sus comienzos, se sabe que -- ciertas sustancias al añadirse al suelo, producen en éste intercambios iónicos entre las partículas minerales y la materia disuelta en el agua interna, que modifican los nexos estructurales mejorando -- la resistencia del suelo y disminuyendo la compresibilidad.

7.6 Calcinación del terreno de cimentación

Este método consiste en calcinar la estructura del suelo, empleando elevadas temperaturas provenientes de la combustión de gases. La calcinación disminuye la compresibilidad y reduce, por tanto -- los asentamientos. Este método no ofrece buenas perspectivas en suelos altamente orgánicos.

7.7 Colocación de entarimados y mallas en la base del terraplén

Este método consiste en fabricar una verdadera balsa abajo del terraplén, de manera de repartir la carga y proporcionar una especie de flotación al conjunto de la superestructura.

7.8 Bermas de estabilización

La colocación de bermas o el empleo de taludes muy tendidos - - - (Fig. 3), permite uniformizar las presiones transmitidas al terreno de cimentación en la zona subyacente a la corona del terraplén, uniformizando también los asentamientos bajo esa zona y, por lo tanto, reducir los asentamientos diferenciales así como las deformaciones laterales. Por otra lado, no hay que olvidar que el asentamiento total es mayor cuanto mayor es el área cargada, por lo que estas medidas tenderán a incrementar los asentamientos totales; la bondad de este método estriba en someter a balance estos factores contradictorios.

7.9 Construcción por etapas (controlada)

En este procedimiento, si el F.S. obtenido para la condición de la prueba UU es muy bajo, el relleno puede colocarse a una altura segura, controlando la construcción a una velocidad adecuada, basada en mediciones de campo, para permitir un aumento en la resistencia del terreno, posteriormente se suspende la construcción por un período de tiempo, para permitir la consolidación antes de colocar una segunda etapa.

Este método, presenta un problema difícil en la mecánica de suelos, ya que deberán hacerse análisis teóricos de alto nivel, apoyados en datos de laboratorio y campo así como de la experiencia.

7.10 Drenes verticales de arena

Las investigaciones realizadas en los últimos 5 años, han permitido disminuir el costo de los drenes de arena, y así su uso ha llegado a aumentar considerablemente, debido a los problemas de estabilidad y de asentamientos. Los drenes de arena instalados apropiadamente, pueden acelerar la consolidación.

Los drenes de arena consisten en excavaciones verticales de diámetros y longitud suficientes, para que sus efectos alcancen la totalidad del manto compresible o, por lo menos, el espesor del estrato que vaya a producir el mayor asentamiento. El diámetro de los drenes usualmente varía entre 30 y 50 cm., la disposición usual es entresbolillo, con espaciamientos del orden de 10 veces su diámetro. Los drenes están constituidos por arenas de alta permeabilidad, de manera de facilitar la salida del agua del estrato compresible.(Fig.4)

Los estudios realizados recientemente por Casagrande y Poulos -- (1969), indican que los drenes de arena son nocivos para el caso de suelos blandos de alta sensibilidad, y que no son de ninguna utilidad para acelerar o controlar la compresión secundaria en depósitos altamente orgánicos. De hecho, los drenes de arena instalados por -- los métodos convencionales pueden ocasionar más perjuicios que -- beneficios, ya que su instalación afecta seriamente la estructura -- del depósito y puede llegar a ocasionar mayores asentamientos.

7.11 Desplazamiento del terreno compresible por medio de explosivos

Uno de los propósitos de esta solución es la de producir una compensación parcial o total, de la carga del terraplén, que actuará únicamente con una presión correspondiente a la diferencia entre el peso del material colocado y el desplazado. Esta solución es más factible cuanto más desplazable lateralmente sea el suelo, por lo que -- rinde sus mejores resultados en suelos altamente orgánicos y turbas.

El desplazamiento del terreno compresible por medio de explosivos, puede realizarse mediante diferentes procedimientos, que son:

- 1) Avance en punta de flecha
- 2) Desplazamiento bajo el terraplén
- 3) Trincheras o zanjas
- 4) Compensación
- 5) Método de New Hampshire
- 6) Método Alemán

1) Avance en punta de flecha. Este método consiste en alterar el sub suelo, mediante una carga de explosivos colocada en la punta del relleno, ver Fig. 5. La cantidad de explosivos por barrenos se determina por experimentación y en condiciones normales no deberá exceder $\frac{h}{2}$ (siendo h la profundidad efectiva de la carga)

Este procedimiento es lento y no siempre garantiza el desplazamiento total del suelo, de manera que pueden quedar atrapadas -

bolsas de material blando entre el relleno.

Los alemanes conociendo estos problemas, desarrollaron recientemente un nuevo método, que consiste en lo siguiente

10. Se coloca al frente del terraplén una plataforma de arena -- (Fig. 6), que permite trabajar sobre la turba.
20. Se perforan barrenos de 10" de diámetro hasta alcanzar el estrato resistente, bajando las cargas correspondientes.
30. Se colocan los cables hacia ambos lados del relleno, para no dañarlos durante las operaciones de relleno.
40. Se empujan los materiales de relleno sobre el área de los -- barrenos, hasta que se alcance la sobrecarga deseada.
50. Se efectúa la explosión y se repite el procedimiento

2) Desplazamiento bajo el terraplén. El procedimiento consiste en romper completamente la costra superficial por medio de explosivos. Después se coloca el relleno y los explosivos son colocados y empujados a través del relleno. Para grandes espesores -- de turba, los expertos en explosivos recomiendan colocar los explosivos por etapas dentro de la turba, en secciones de terraplén entre 30 y 60 m de longitud. Figs. 7 y 8

3) Trincheras o zanjas. Este método se empleaba antiguamente en

los depósitos de turba que no excedían de 4.5 m de espesor. El procedimiento consiste en efectuar una explosión en una trinchera a lo largo del eje del terraplén y en secciones que no excedían de 15 m.

4) Compensación. Este procedimiento considera la explosión en trincheras construídas en ambos lados del relleno, de manera de permitir que la turba escape de la parte inferior del relleno. Normalmente este método se combina con el de explosivos colocados abajo del relleno.

5) Método de New Hampshire. Este procedimiento resulta económico, cuando se tienen espesores de turbas entre 3 y 12 m. cuando la turba posee una costra superficial, deberá romperse previamente con explosivos, después de descargar el relleno. Cuando las secciones extremas de los terraplenes, se encuentran en zonas donde el espesor de la turba es menor a 3 m, éstos se llevan hasta el estrato resistente (Fig. 7).

A lo largo de ambos extremos del relleno se colocan cargas de dinamita, cuya cantidad es del orden de 2 veces el espesor H en metros. Las líneas punteadas de la figura indican el perfil definitivo del relleno y del terraplén.

Este método es ventajoso cuando el cuerpo principal del relleno, está constituido por materiales gruesos.

6) Método Alemán. Dependiendo de la consistencia de la costra su-

perficial, se rompe una franja estrecha a lo largo del eje del terraplén propuesto, como se ilustra en la Fig. 8, o el relleno total se coloca en la longitud total sobre la costra inalterada, como se muestra en la Fig. 7. Las cargas son llevadas a su posición, a través del relleno hasta la parte inferior del mismo. Una explosión simultánea de cargas bajo el relleno, es altamente efectiva para destruir la resistencia del material blando. La explosión levanta el relleno completamente por algunos metros, y después la masa cae sobre la turba alterada, incrustándose y desplazándola.

VIII. INSTRUMENTACION Y MEDICIONES DE CAMPO

8.1 Necesidad de la instrumentación

La necesidad de investigar el comportamiento de los terraplenes sobre suelos blandos, ha surgido debido a los constantes problemas que se presentan en las vías de comunicación, bordos y presas, etc.

Existen algunas razones básicas para investigar el comportamiento de los terraplenes, y son

1o. Checar el comportamiento de los terraplenes durante su construcción, para poder asegurar que los criterios de diseño son satisfactorios.

2o. Observar el comportamiento de los terraplenes una vez termi-

nados, para asegurar su seguridad durante su vida útil.

3o. Obtener Información valiosa para emplearla en el diseño económico de futuros terraplenes en condiciones similares.

8.2 Requerimientos de instrumentación

Los requerimientos necesarios para efectuar una instrumentación en terraplenes, dependen del tipo de información que se desee. La información más esencial para evaluar la construcción de terraplenes incluye

1o. Consolidación

2o. Deformaciones laterales

3o. Resistencia al esfuerzo cortante (no drenado)

4o. Esfuerzos verticales y horizontales

5o. Efecto sísmico

8.3 Instrumentación de campo en los terraplenes de Prueba

A continuación se presentan los aparatos más usuales, que se utilizan en la instrumentación de terraplenes.

Consolidación. Bancos de nivel (superficiales y profundos)

Plataformas de asentamiento

Piezómetros (hidráulico, eléctrico, neumático)

Pozos de observación (nivel freático)

Deformaciones laterales

Estacas de alineamiento

Inclinómetros

Deformímetros

Extensómetros

Resistencia al esfuerzo cortante

Veleta de campo

Esfuerzos verticales y horizontales

Celdas de presión

Sismos

Sismógrafos

IX. CASOS DE TERRAPLENES CONSTRUIDOS EN ZONAS PANTANOSAS

El proyecto de un camino directo entre la Cd. de México y Texcoco, presenta los problemas relacionados con la construcción de los terraplenes en la zona del lago, cuyo suelo está constituido por arcillas blandas de origen volcánico, que exhiben bajas resistencias y alta compresibilidad.

Para determinar los datos necesarios en el diseño y construcción de los terraplenes, se realizaron varios estudios de Mecánica de Suelos, sin embargo, debido a que las teorías actuales, así como la experiencia en la construcción y comportamiento de terraplenes en suelos blandos se consideraron insuficientes, se construyeron terraplenes de prueba que permitieron comparar los resultados de la aplicabilidad de las teorías de

Mecánica de Suelos con el comportamiento del modelo a escala natural.

Los terraplenes se instrumentaron de la siguiente manera: se colocaron 30 testigos superficiales, una línea transversal de inclinómetros tipo --- Wilson, una línea transversal de torpedos verticales, una línea de piezó--- metros neumáticos y una línea de piezómetros abiertos tipo Casagrande.

Los resultados obtenidos de la información obtenida de los aparatos de medición se resumen en lo que sigue

10. La resistencia al esfuerzo cortante determinada por medio de la veta, se incrementó con el tiempo, los análisis de estabilidad muestran que el factor de seguridad aumentó de 1.1 a 1.25 en 30 meses como un efecto de la consolidación.
20. Los asentamientos disminuyeron rápidamente con la profundidad a valores más pequeños que los obtenidos por medio de las teorías tradicionales.
30. La velocidad de la deformación vertical disminuye rápidamente con la profundidad, pero en los niveles inferiores, esta velocidad de deformación permanece constante.
40. Las deformaciones laterales mayores ocurrieron a profundidades entre 5 y 7 m y fueron menores a las esperadas.
50. Las gráficas de consolidación actuales, indican que la consolidación primaria aún no ocurre. Por lo anterior y debido a que se desean co-

nocer los efectos de la compresión secundaria, el programa de medición continúa.

60. Las gráficas que muestran la evolución de los asentamientos, indican que éstos disminuyen rápidamente al principio y que ahora son prácticamente constantes.

9.2 Construcción de los terraplenes en la carretera Minatitlán-Coatzacoalcos

La construcción de la carretera Minatitlán-Coatzacoalcos, planteó el problema de la construcción de los terraplenes en una laguna pantanosa donde se alojan diecisiete de los veintiún kilómetros de esta carretera. Las condiciones hidráulicas de la laguna han permitido la acumulación de materia orgánica y suelos con altos contenidos de agua en el fondo de la laguna, formando un estrato superficial de -- turbas con espesores entre 1 y 5 m.

El método propuesto para construir los terraplenes del camino consiste básicamente en lo siguiente: Se construye un primer relleno -- a volteo con un ancho mínimo B y a una altura H , de tal forma que -- el esfuerzo inducido en la base del terraplén iguale la resistencia al esfuerzo cortante del subsuelo, de manera que el material fluya bajo esfuerzo constante y se presente el hundimiento del terraplén.

Una vez iniciado el proceso de deformación, se tenderá al equilibrio por el efecto estabilizador del material desplazado (Fig. 9) que pasa

rá a ocupar una posición más elevada a ambos lados del terraplen, lo que se traducirá en una mayor sobrecarga que puede considerarse como un incremento en la profundidad de desplante, independientemente del hundimiento efectivo del terraplén. Una vez alcanzada la condición de equilibrio, si el estrato de turba es aún muy grande, se podrá reiniciar el movimiento mediante la adición de material sobre el terraplén, para contrarrestar el efecto estabilizador de los suelos desplazados.

Posteriormente se compacta y confirma la superficie del terraplén. La elevación de la rasante se define tomando en cuenta la altura mínima de los terraplenes sobre el nivel máximo de agua y los hundimientos previstos debidos a la consolidación primaria y compresión secundaria, tanto del estrato de turbas como de los subyacentes.

Los suelos que integran la laguna pantanosa, están constituidos por suelos altamente orgánicos, con contenidos de agua entre 300 y 700%, suaves y ligeramente fibrosos. En estado inalterado poseen altas relaciones de vacíos que fluctúan entre 8 y 13 y una permeabilidad de 10^{-3} cm/seg, al aplicarles carga, estos valores disminuyen rápidamente.

Los resultados realizados en pruebas triaxiales rápidas, indican que estos suelos tienen un comportamiento predominantemente cohesivo bajo cargas rápidas. El valor de la cohesión obtenida de las envolventes de falla oscila entre 0.05 a 0.3 Kg/cm².



DEPFI

Durante el proceso de construcción de los terraplenes, se observaron bufamientos de turba hacia ambos lados del terraplén, pero desgraciadamente no se tiene información que permita estimar los volúmenes desalojados, pudiéndose asegurar que los hundimientos totales al finalizar la construcción, dependerán de los volúmenes desalojados y de la consolidación ocurrida.

X. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

El diseño de terraplenes de diversas alturas, geometría y requerimientos de construcción sobre suelos blandos de composición y profundidad variables, obviamente involucra la consideración de muchos factores y esquemas alternativos. Quizás ésta sea la causa por la cual poco se ha escrito sobre la materia. Los problemas difíciles de diseño requieren un sistema de análisis por aproximación, igualmente la naturaleza de los problemas y las soluciones de diseño varían considerablemente.

Se puede considerar que, ninguno de los métodos de construcción propuestos es una solución universal, de manera que en cada caso será preciso analizar las condiciones particulares, a fin de escoger la solución o combinación de soluciones más convenientes. De hecho, algunos de los métodos propuestos son contradictorios, de manera que la elección del criterio a seguir en cada caso no puede seguir reglas fijas, sino que es materia de juicio del especialista.

Por fortuna, tanto la magnitud de los asentamientos, la evaluación de los mismos y la estabilidad de los terraplenes, se calculan con los métodos-

tóricos de la Mecánica de Suelos. Estos análisis, por cierto, exigen un conocimiento detallado de las propiedades del subsuelo, por lo cual la exploración de suelos ha de ser de tipo especial, incluyendo la obtención de muestras inalteradas, en consecuencia el programa de pruebas de laboratorio será igualmente de tipo especial.

REFERENCIAS

- 1.- BERRY P. L., POSKITT T. J. (1972). The consolidation of peat. *Geotechnique* 22, No. 1, 27 - 52
- 2.- CASAGRANDE L., POULOS S. (1969). On the effectiveness of sand drains. *Canadian Geotechnical Journal*, August 1969
- 3.- CASAGRANDE L. (1966). Construction of Embankments across peaty soils. *Journal of the Boston Society of Civil Engineers* - Vol. 53, No. 3, July 1966
- 4.- JUAREZ B., RICO A. (1969). El fenómeno de la consolidación de los Suelos. *Mecánica de Suelos*. Cap. X, Tomo I.
- 5.- JUAREZ B., RICO A. (1967). Estabilidad de Taludes. *Mecánica de Suelos*. Cap. V. Tomo II
- 6.- MORENO G., BARRAGAN S., OROZCO, J. M. (1970) Estudio Geotécnico preliminar para la ampliación de la carretera Minatitlán-Coatzacoalcos. V Reunión Nacional de Mecánica de Suelos. Tomo II
- 7.- RICO A., MORENO G., GARCIA G. (1969). Test Embankment on Texcoco Lake. *Proc. of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Mexico.

- 8.- SEED B. H. (1967). Slope stability during earthquakes
Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division. Vol.
93, No. SM4, July 1967
- 9.- SKEMPTON, A. W., HUTCHINSON J. (1969). Stability of Na
tural Slopes and Embankments Foundations. State of the Art.
Volume. 7th International Conference on Soil Mechanics and -
Foundation Engineering. Mexico
- 10.- TERZAGHI, K. (1960). Mechanism of Landslides. Engineering
Geology (Berkey) Volume
- 11.- TERZAGHI, K., PECK. R. P. (1969). Proyecto de Terraple
nes, malecones y diques de tierra. Mecánica de Suelos en -
la Ingeniería Práctica. Art. 51
- 12.- WILSON D. STANLEY (1967). Investigation of Embankment
Performance. Journal of the Soil Mechanics and Foundation
Division, Vol. 93, No. SM4, July 1967

F I G U R A S

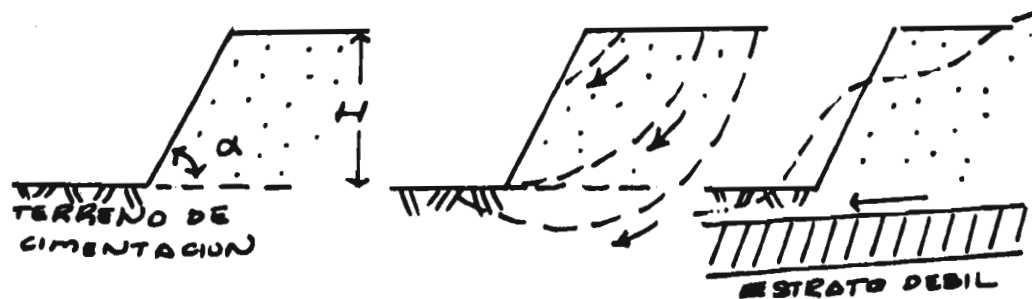


Fig. 1.- Fallas por rotación y translación.

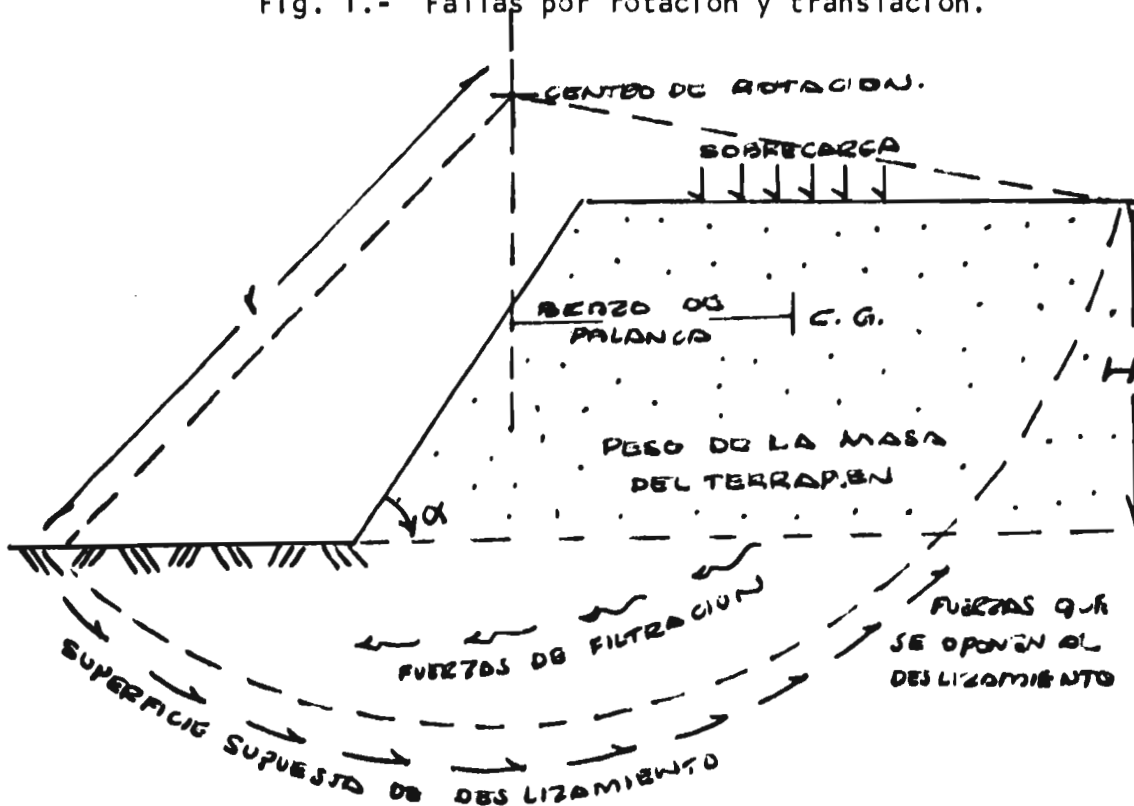


Fig. 2.- Fuerzas que intervienen en la estabilidad de un terraplén.

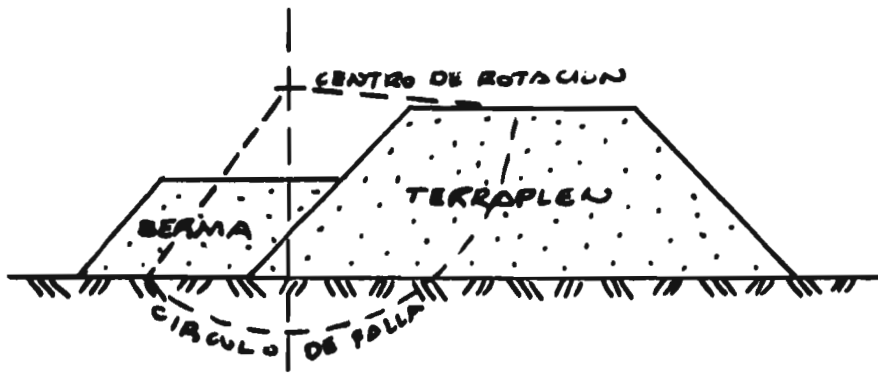


Fig. 3.- Empleo de bermas estabilizantes.

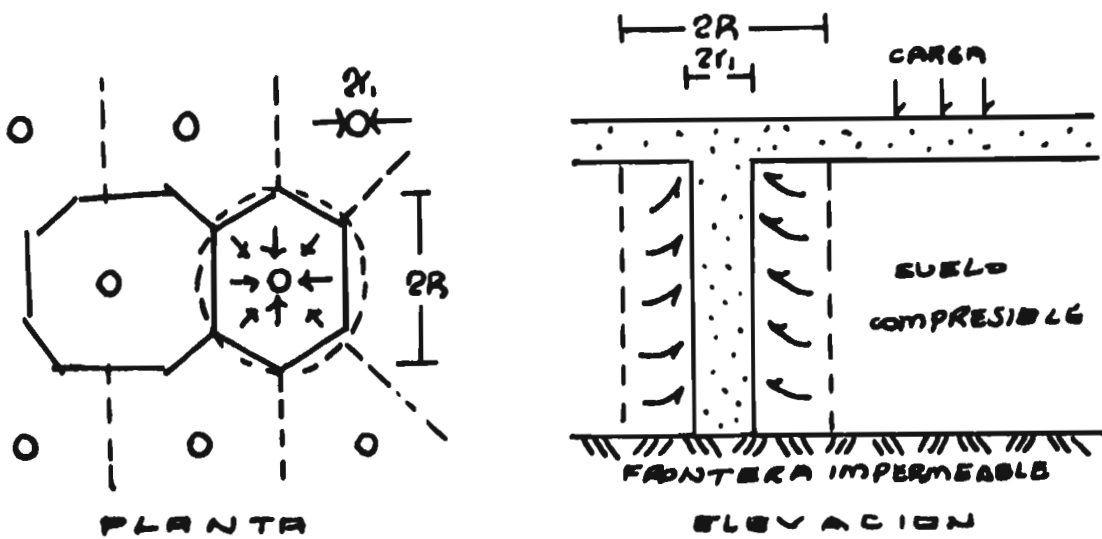


Fig. 4.- Disposición de drenes de arena.

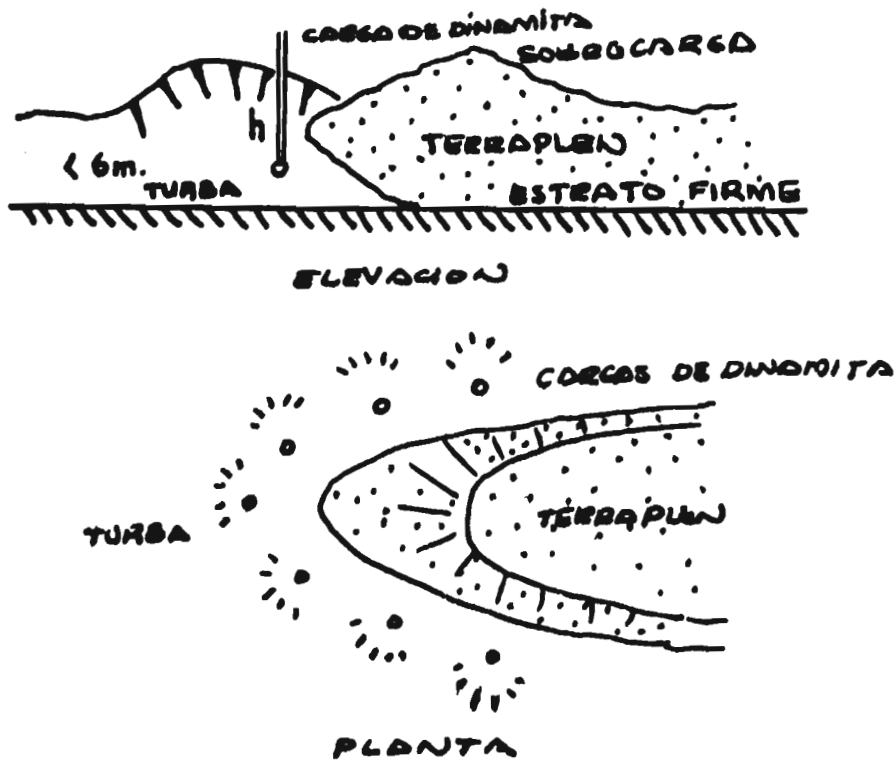


Fig. 5.- Método de avance en punta de flecha.

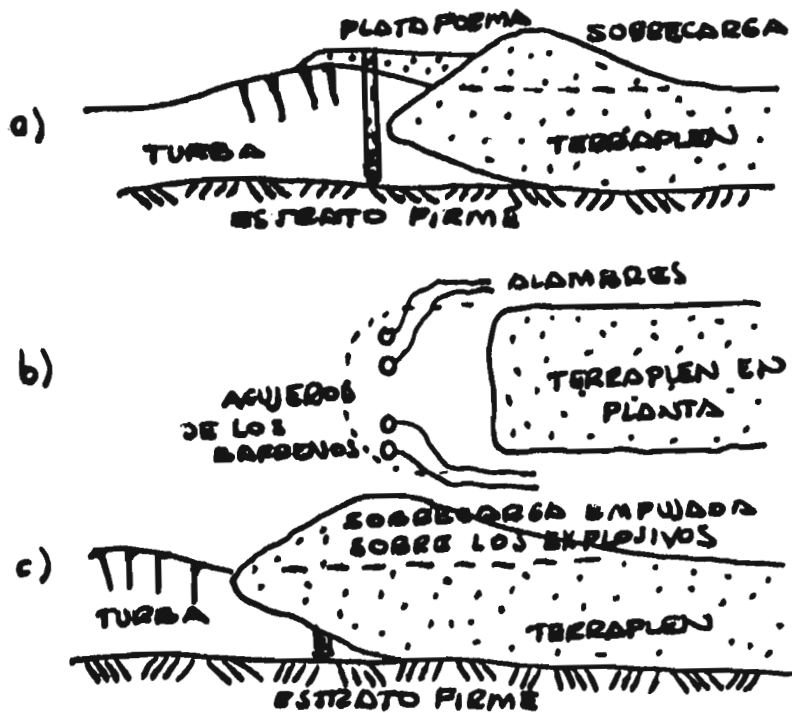


Fig. 6.- Método Alemán de avance en punta de flecha.

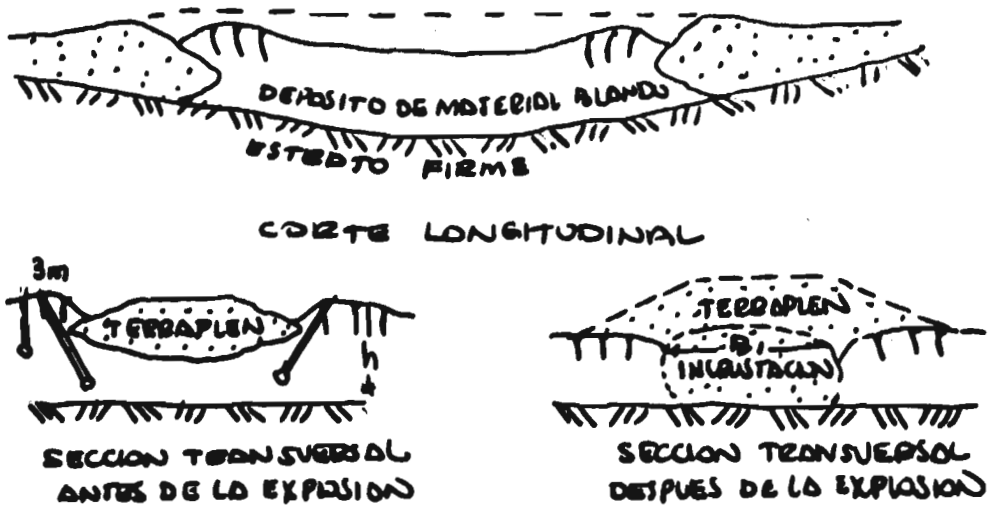


Fig. 7.- Desplazamiento bajo el terraplén.
Método de New Hampshire.

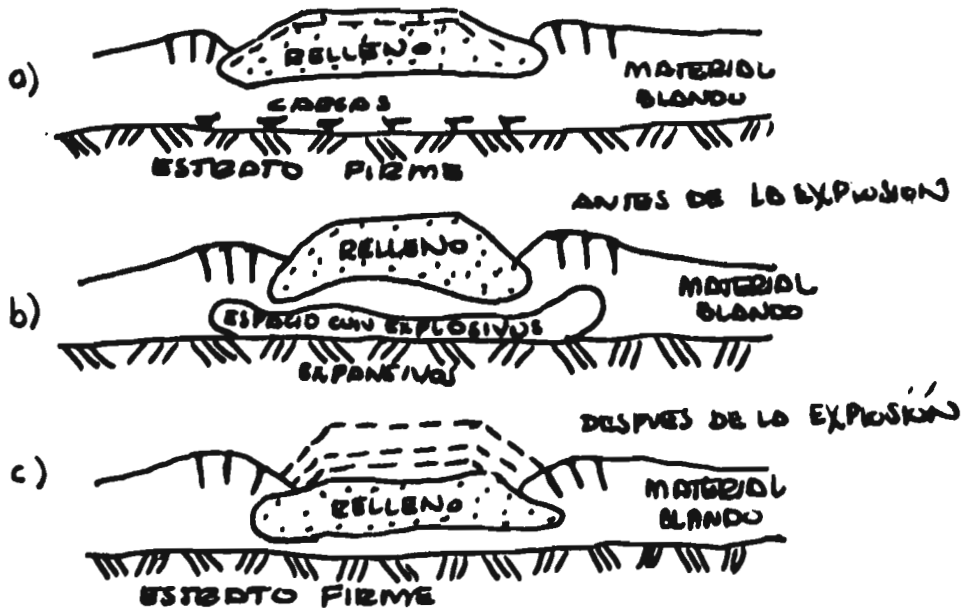


Fig. 8.- Desplazamiento bajo el terraplén.
Método Alemán.

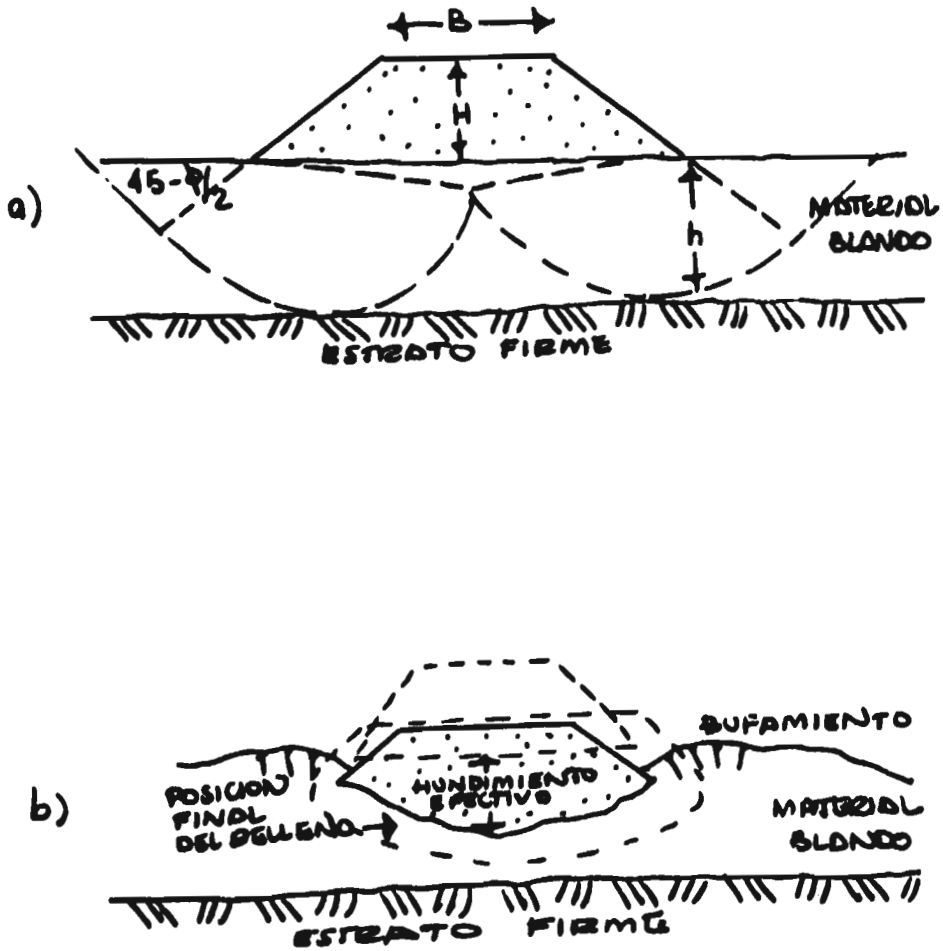


Fig. 9.- Método propuesto en la construcción de los terraplén en el camino Minatitlán-Coatzacoalcos.