



01149
0271
80

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIVISION DEL DOCTORADO

**ALGUNAS EXPERIENCIAS SOBRE EXPANSIONES
Y COMPRESIONES DE TIPO ELASTICO EN
ARCILLAS DEL LAGO DE TEXCOCO**

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO
EN INGENIERIA CON ESPECIALIDAD EN MECANICA
DE SUELOS

PRESENTA:

MIGUEL MADINAVEITIA JURGENSON

México, D. F.

1965

**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.

Este trabajo se realizó con la cooperación Técnica y económica de la compañía SOLUM, S.A. y de algunos de sus empleados. Reciban mi agradecimiento los dirigentes de la empresa por la autorización de la cooperación y los ingenieros y empleados por la buena voluntad mostrada en su ayuda para la realización del trabajo.

I N D I C E.

| | No. de Pag. |
|---|-------------|
| Descripción general del problema..... | 1 |
| Consideraciones generales sobre movimien-- tos producidos por cargas en las arcillas-- del Subsuelo de México, D.F..... | 3 |
| Consideraciones generales sobre movimien-- tos producidos por descargas en las arcil- las del Subsuelo de México, D.F..... | 6 |
| Pruebas 1 a 5- Movimientos producidos por- cargas superficiales..... | 8 |
| Pruebas 11 a 16- Movimientos producidos -- por descargas y su comparación con movimien- tos producidos por cargas..... | 18 |
| Pruebas de laboratorio en que se puede es- tudiar el valor de la relación esfuerzo - deformación (E) de la arcilla para distin- tas condiciones..... | 24 |
| Consideraciones sobre las pruebas de Labo- ratorio en que se observaron las relacio- nes esfuerzo-deformación (E). Comparación con las relaciones esfuerzo-deformación -- observadas en el campo..... | 29 |
| Resumen..... | 33 |
| Apéndice I.- Las pruebas geosísmicas indi- can que el valor del módulo de Poisson es- tá = 0.5..... | 35 |
| Apéndice II.- Cálculo de deformaciones.... | 36 |

DESCRIPCION GENERAL DEL PROBLEMA.

En esta tesis se presentan algunos movimientos observados en pruebas directas de carga y descarga en la arcilla del Valle de México y se comparan con movimientos calculados de acuerdo con la teoría de la Elasticidad; se estudian simultáneamente características tipo elástico del material en pruebas de laboratorio; todo ello con intención de hacer un ejercicio con los conceptos con que se analizan las expansiones del terreno (que siempre acompañan a una excavación o descarga). Como dichas expansiones se consideran producidas por movimientos de tipo elástico se realiza la importancia de estos movimientos al clasificar las deformaciones de la arcilla bajo un criterio particular.

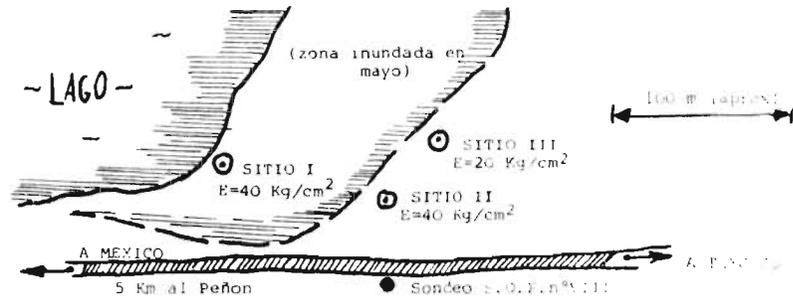
Se empleará la siguiente notación:

E = relación de un incremento de esfuerzo a un incremento de deformación bien sea instantáneo o diferido.

E_1 = módulo de elasticidad lineal de un material $\left[E_1 = \frac{\Delta F}{\Delta L : L} \right]$

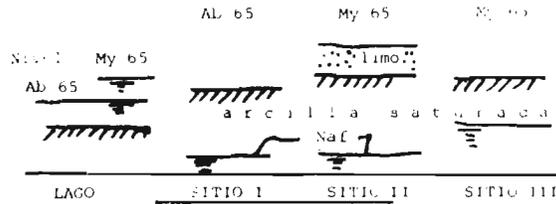
E_v = módulo de elasticidad volumétrico de un material $\left[E_v = \frac{\Delta P}{\Delta V : V} \right]$

Las observaciones se hicieron en pruebas de carga y -- descarga en las orillas del lago de Texcoco, directamente sobre la arcilla. Se escogió el lugar descrito con la fig. A. La superficie del terreno está formada por arcilla de características análogas a la del subsuelo de la Ciudad de México. Se hicieron pruebas en tres sitios del lugar (sitio I, II y III); en los tres sitios el estrato de la arcilla aflora en la superficie y es de gran espesor (vease el sondeo).

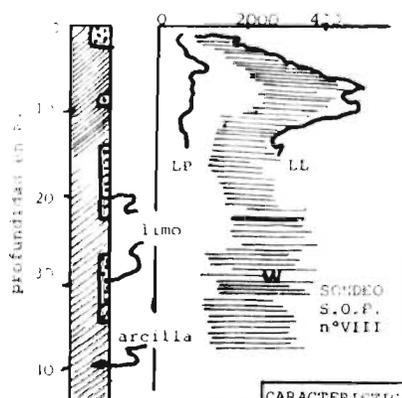


LUGAR DE LAS PRUEBAS

fecha de las pruebas



NIVELES EN CADA SITIO



Resultados promedio de las pruebas en muestras inalteradas tomadas a un metro de profundidad.

| SITIO | W-contenido de agua | LL-límite líquido | LP-límite plástico | e-relación de vacíos |
|-------|---------------------|-------------------|--------------------|----------------------|
| I | 200 | 229 | 71 | 7.3 |
| II | 275 | 229 | 71 | 7.3 |

qu-compresión simple 2.27

pc-carga de precons. 140

CARACTERÍSTICAS DEL TIERRA

FIG.A

CONSIDERACIONES GENERAL SOBRE MOVIMIENTOS PRODUCIDOS POR CARGAS EN LAS ARCILLAS DEL SUBSUELO DE MEXICO, D.F.

Dado el enfoque particular de este estudio (dirigido a movimientos rápidos) conviene considerar que las deformaciones producidas en la arcilla por esfuerzos consecuencia de cargas aplicadas aceptan la siguiente clasificación: 1- Recuperables, tipo elástico. (si son debidas a esfuerzos pequeños) y podran ser simultáneas a la carga o diferidas. 2- No recuperables tipo plástico (si son debidas a esfuerzos grandes) y también podran ser simultáneas a la carga o diferidas. Lo "grande" o "pequeño" de los esfuerzos se debe relacionar en una forma imprecisa con la resistencia al esfuerzo cortante del material, o a la carga de preconsolidación que, teóricamente, es quien la genera. Al cargar el terreno con una carga regularmente "grande" se presentarán en el interior del mismo todos estos tipos de movimiento, puesto que en zonas cercanas a la carga los esfuerzos seran "grandes" y en otras alejadas de la carga los esfuerzos seran "pequeños".

En este trabajo, interesa principalmente los movimientos tipo elástico simultáneos a la carga. Las cargas empleadas fueron pequeñas y seguramente no destruyeron la estructura interna del material; se puede imaginar que las fuerzas que actuan entre las partículas no se alteraron sustancialmente y solo modificaron su magnitud. Las deformaciones fueron, aproximadamente, proporcionales a las cargas y recuperables; (que son características elásticas). Estos movimientos tipo elástico, que pueden ser considerables en comparación a los plásticos, se presentaron simultáneos a la carga en la estructura sólida del suelo; como esta se encuentra incluida e íntimamente ligada con un volumen de agua que es incompresible y que no se puede expulsar fácilmente, se supondrá que el material se deformó pero no cambió de volumen. Lógicamente cabe pensar que las deformaciones fueron como las de un sólido elástico que tiene un módulo de elasticidad lineal $\left[E_L = \frac{\Delta l}{\Delta L} \cdot L \right]$ muy pequeño y un módulo de elasticidad volumétrica $\left[E_V = \frac{\Delta P}{\Delta V} \cdot V \right]$ muy grande. Las leyes de la elasticidad relacionan ambos módulos con la fórmula $E_V = \frac{E_L}{3(1-2\nu)}$

(1) en que ν es el módulo de Poisson. Para que la fórmula (1) se cumpla con la gran desproporción supuesta entre E_L y E_V se necesita que el módulo de Poisson tenga un valor muy próximo a 0.5. Así debe suceder en la arcilla; se comprueba con la

prueba geosísmica que se presenta en el anexo I.

En esta prueba se calculan velocidades de transmisión de onda de más de 700 m/seg. a la cual corresponde forzosamente (de acuerdo con las teorías elásticas y si E_v es del orden de 30-60 Kg cm²) un módulo de Poisson de 0.498. Por lo tanto, para calcular los movimientos elásticos instantáneos, se tomará el valor $\nu = 0.5$. Basándose en él se establecen métodos de cálculo de movimientos superficiales en un sólido seminfinito (anexo II). Al hacerlo se señala que la variación de ν entre sus valores extremos posibles (0.0 y 0.5) implica un cambio de las magnitudes de los movimientos calculados que varían proporcionalmente desde 100% de los valores que se tabularán en las gráficas (para $\nu = 0.5$) hasta 75% si ν fuese nulo.

Simultáneos a la carga de la arcilla y a los movimientos tipo elástico que la acompañan se producen movimientos plásticos; bajo los esfuerzos suficientemente pequeños de las pruebas su magnitud resultó despreciable comparada con la de los movimientos elásticos.

En las pruebas realizadas, al mantener aplicadas las cargas se observaron también movimientos crecientes en el transcurso del tiempo; estos movimientos, al parecer, eran recuperables; no se realizaron pruebas que permitieran determinar si eran o no proporcionales a las cargas. Son los movimientos que se consideran tipo elástico diferidos. No hay elementos para saber si se producen con volumen constante o si el volumen del material se reduce expulsando agua. Pero parece lógico suponer que la razón del retardo del movimiento sea la viscosidad del agua, que frena el movimiento de esta al ser expulsada del interior del material o representa un obstáculo para el acomodo de las partículas sólidas en una nueva posición.

Cuando los valores de los esfuerzos sobrepasan cierto límite (seguramente relacionado con la resistencia al esfuerzo cortante o la carga de preconsolidación) imaginaremos que se altera la estructura interna del material produciendo movimientos que no son reversibles ni proporcionales a las cargas. Son los considerados como plásticos y quedan fuera de este estudio. Igual que los elásticos pueden ser instantáneos, sin cambio de volumen o diferidos por resistencia debida a la viscosidad del agua; consecuencia de esto será que en el movimiento producido en la prueba de consolidación preponderarán las deformaciones diferidas sobre las inmediatas en mayor grado que en un terreno cargado en una fracción de su superficie, ya que en el anillo de consolidómetro no podrán existir movimientos instantáneos sin variación volumétrica, y en el terreno sí.

Se considera que los movimientos plásticos serán siempre mayores que los de tipo elástico para una misma carga, ya que al movimiento aproximadamente proporcional a la carga se añadirán deformaciones causadas por la destrucción de la estructura del material. Se puede suponer que un valor mínimo del movimiento total será el obtenido calculando bajo la suposición de que el material es solamente elástico; este punto de vista aumenta

el interés del estudio de los movimientos tipo elástico de la arcilla.

Al pensar en las deformaciones de las arcillas es costumbre llevar en la imaginación el conocido simil de Terzaghi -- que describe, esencialmente, el proceso de consolidación. --- El simil no sirve para imaginar los movimientos estudiados aquí ya que en él las deformaciones tienen que venir acompañadas forzosamente de cambios volumétricos. Como guía para la imaginación aparece otro simil que liga algunas de las características de los procesos de deformación elástica con otras de la consolidación. Consiste en imaginar un material compuesto de pelotas de hule de paredes más o menos gruesas, perforadas y llenas de agua. Las cargas aplicadas aplastarán las pelotas produciendo deformaciones instantáneas sin cambios de volumen; parte de la carga quedará soportada por la presión en el agua y parte por el hule de las pelotas. Estos serán los movimientos tipo elástico-instantáneos. Si la carga se mantiene aplicada largo rato el agua saldrá de las pelotas lentamente por las perforaciones produciendo movimientos retardados pero recuperables; representa los movimientos elástico diferidos. Si las cargas que se aplican son grandes y rápidas el agua hará reventar algunas pelotas y el movimiento perderá sus características de recuperación. Será plástico.

El simil no pretende ser muy aproximado; solo servir de guía a la imaginación. Representa el caso, de un material imaginario, que puede cumplir unas de las leyes de la elasticidad (movimientos recuperables y proporcionales a las cargas) y otras nó (no acepta las leyes de la superposición de efectos). Tal vez en las arcillas existan fenómenos semejantes.

B.- CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE MOVIMIENTOS PRODUCTOS POR DESCARGAS EN LAS ARCILLAS DEL SUBSUELO DE MEXICO, D.F.

A una cierta profundidad y en un cierto lugar la arcilla está (y ha estado durante mucho tiempo) comprimida por el material que existe sobre ella. Incluso, puede haber estado sometida a presiones mayores por tensiones capilares o sobrecargas que han desaparecido. La compresión es, seguramente, igual en el sentido vertical que en el horizontal. ($k_0 = 1$). Al quitar parte de este material la arcilla se libera de parte de la presión vertical, y, en menor proporción, de presiones horizontales (estas variaciones serán las mismas, pero de sentido contrario, a las que se producen al colocar una carga en la superficie). -- Si la variación de presión fuese igual en ambos sentidos horizontal y vertical y el módulo de Poisson de 0.5 el material no cambiaría de forma ni de volumen. (Ya que E_v es muy grande). Pero por ser menor la reducción de los esfuerzos horizontales que la reducción del esfuerzo vertical se produce una deformación instantánea sin cambio de volumen aumentando las dimensiones verticales del material. Se supone que esta es la causa del levantamiento que, simultáneo a la descarga, se presenta en el fondo de una excavación.

Si se piensa que las descargas grandes pueden alterar la estructura de la arcilla con movimientos plásticos, se puede aceptar para los movimientos producidos por las descargas la misma clasificación que se dió para los movimientos producidos por las cargas. Habrá, por lo tanto, movimientos producidos por esfuerzos pequeños, tipo elástico (instantáneos y diferidos) y movimientos producidos por esfuerzos mayores, plásticos. (simultáneos a la descarga y diferidos).

Sin embargo hay, seguramente, alguna causa que amerita un estudio particular, para que los movimientos plásticos no se presenten fácilmente en las excavaciones (descargas) y es costumbre hacer los cálculos de los movimientos de expansión basándose solamente en movimientos tipo plástico.

Dentro del marco de ideas que se acaba de presentar -- las pruebas de carga y descarga hechas en este estudio quedan -- clasificadas como esfuerzos pequeños que producen movimientos casi únicamente tipo elástico. En las pruebas que duraron varios días se observaron movimientos tipo elástico diferidos. En algunas de las pruebas instantáneas se manifestaron movimientos plásticos que no llegaron a encubrir. (aunque sí a desfigurar) los --

7
resultados tipo elástico que se buscaban. Las pruebas no fueron
suficientemente numerosas para poder llegar a conclusiones irrefutables (que requieren un gran número de observaciones para que los resultados tengan carácter estadístico). Pero las ideas que se derivan de las observaciones hechas pueden tener algún interés directo o tal vez servir para enfocar estudios más amplios y mejor hechos encaminados a analizar el comportamiento tipo elástico de la arcilla del subsuelo de México bajo algún punto de vista diferente a los empleados hasta la fecha.

PRUEBAS 1, 2, 3, 4 y 5: MOVIMIENTOS PRODUCIDOS POR CARGAS SUPERFICIALES.

En cinco tipos de pruebas se vé que, al cargar superficialmente la arcilla con cargas pequeñas (comparadas con la carga de preconsolidación), se producen movimientos recuperables y calculables (aproximadamente) con la teoría de la elasticidad.

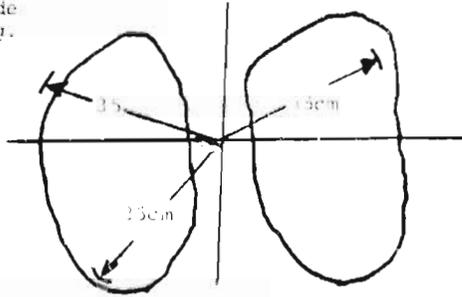
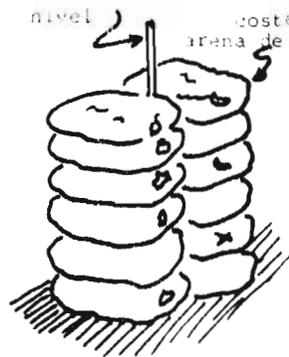
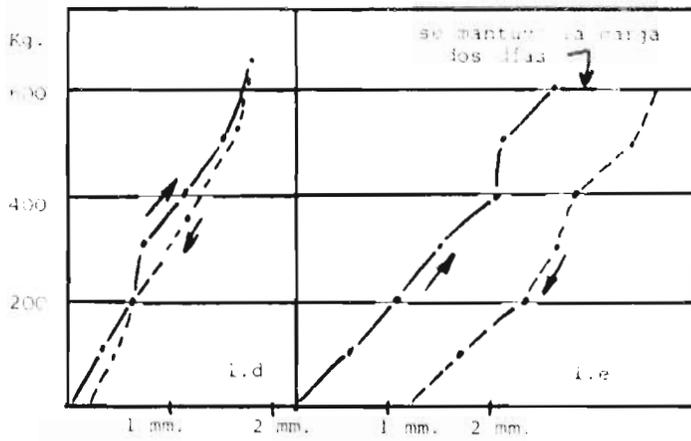
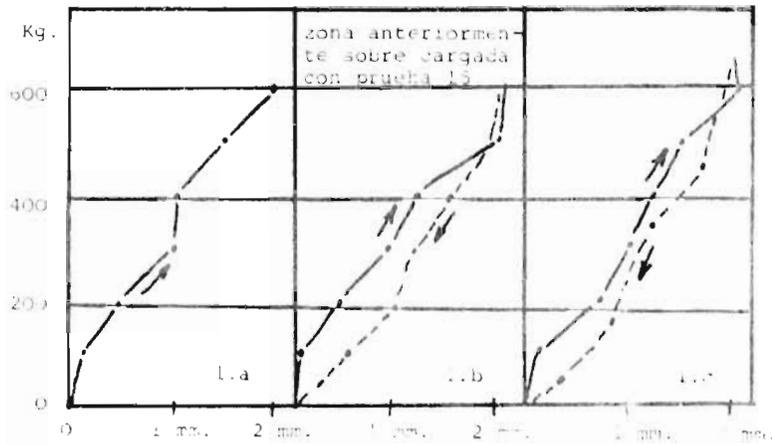
PRUEBAS 1.- Sitio II.- Fig. I.- Las deformaciones se presentan instantáneas, recuperables, proporcionales a la carga.

Amontonando costales en la superficie del terreno tal como indica la fig. I se acusan en la varilla (nivel) clavada a 25 cm. en el terreno los movimientos que señalan las gráficas. Las deformaciones eran instantáneas; en un intervalo corto de tiempo no había deformaciones diferidas comparables a las que se producian simultaneamente a la carga; eran recuperables al quitar la carga y eran proporcionales al valor de la misma.

La prueba 1b. se hizo en el lugar en que se acababa de quitar la carga uniforme de 1 Tm/m^2 que, en un cuadro de $2 \times 2 \text{ m.}$, se mantuvo allí durante tres días en la prueba 15. Se ve que esta circunstancia, no hizo que el movimiento fuese diferente que en las demás.

En la prueba 1e se dejaron apilados los costales durante dos días (48 horas). No se controló el movimiento durante el tiempo de reposo; pero la descarga produjo un movimiento igual e inverso al que había producido la carga lo mismo que en las otras pruebas.

Si se considera la carga de los costales repartida en una base circular de 35 cm. de radio al movimiento registrado corresponde un módulo del terreno de $E=40 \text{ Kg/cm}^2$.



Contacto de los costales con el suelo.

PRUEBAS 0 24 31 20 11

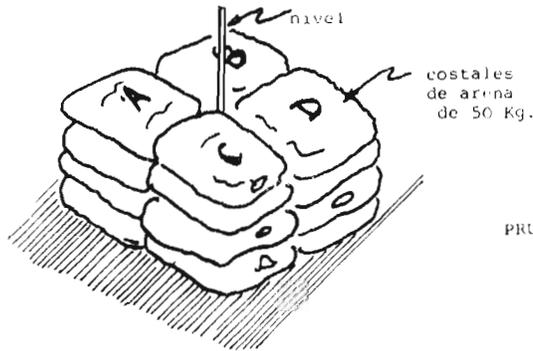
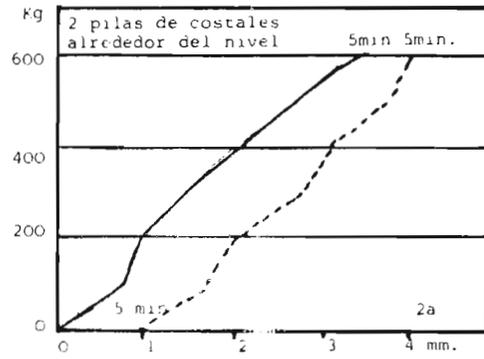
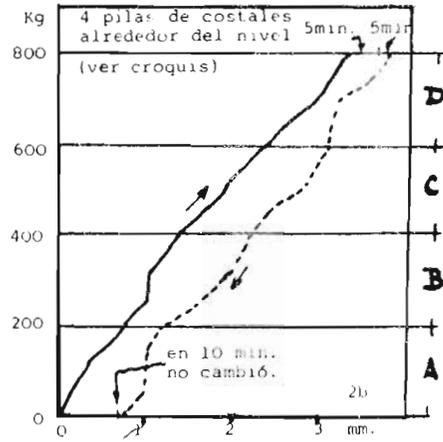
FIG. I

PRUEBAS 2.- Sitio III-Fig. II- Se cumple la superposición de es fuerzos. Aparecen deformaciones plásticas (no recuperables, no inmediatas).

Primero se apilaron los costales como indicó la fig. 1 (en dos pilas) y se obtuvo la gráfica (2a). Se aprecia que los movimientos no eran totalmente instantáneos ni totalmente recuperables (cosa que si se cumplió en las pruebas 1).

Calculado el módulo de elasticidad en la misma forma - que en pruebas 1 resulta ser de 20 Kg/cm^2 . Probablemente en este sitio III la arcilla tiene características de menor resistencia en todos aspectos que en el sitio II.

En la prueba 2b. se apilaron los costales en cuatro pilas como se indica en la fig. II colocando primero 4 costales en A, después en B, después en C y por último en D. Se trataba de comprobar si cada pila que se iba colocando producía el mismo movimiento en el nivel (como era de esperarse si se cumplía el principio de superposición de efectos); hubo deformaciones no instantáneas y no recuperables igual que en la prueba 2a. Pero la gráfica comprueba que la ley de superposición de efectos se cumplió dentro del grado de exactitud que se puede esperar de la prueba. Se puede considerar que el movimiento correspondió a un módulo también igual a 20 Kg/cm^2 .

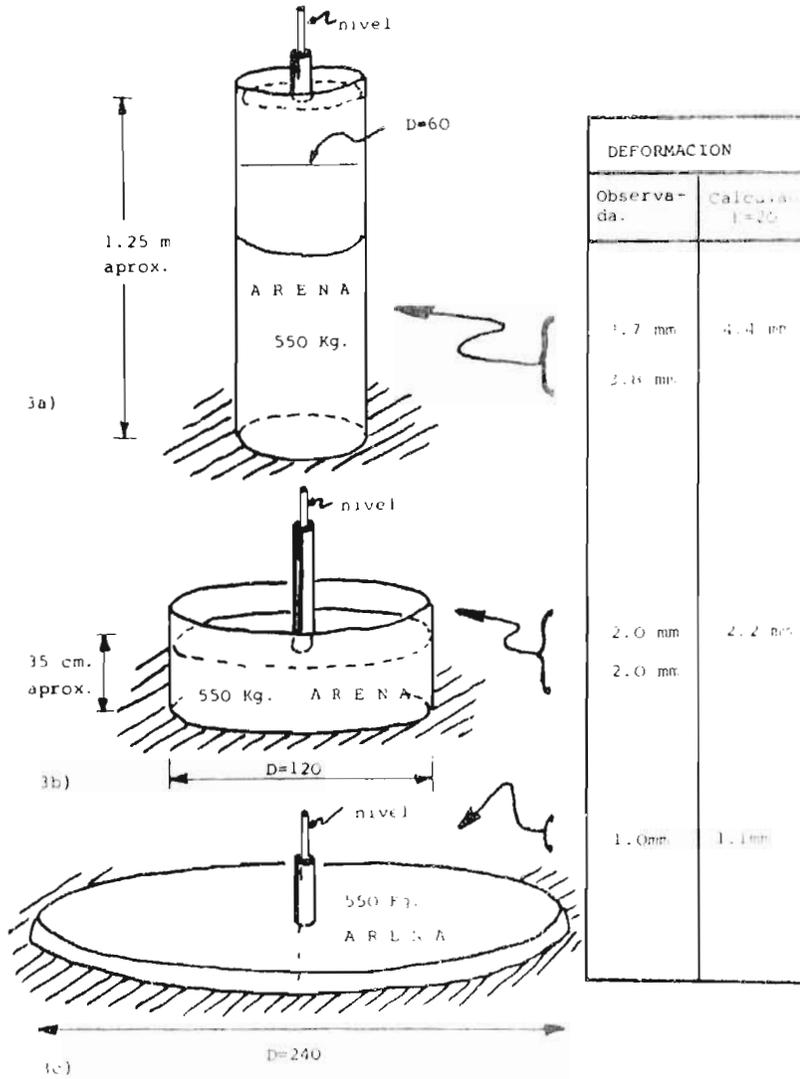


PRUEBAS 2 SITIO III

FIG. II

PRUEBAS 3.- Sitio III.- Fig. III. Se observó que los movimientos de los centros de círculos cargados con carga uniforme, con distintos radios y distintas cargas, eran iguales a los calculados elásticamente con $E=20$

Se dispusieron dos cilindros de lámina de 60 cm. de diámetro y se cargaron con arena en dos diferentes puntos del sitio III. (Fig. IIIa). Se puso la misma carga de arena a dos cilindros de 1.20 m. de diámetro. (IIIb) En uno de estos puntos se quitó la lámina del cilindro y se extendió la arena en un diámetro de 2.40 m (IIIc). Los datos tabulados hacen ver que las leyes de la elasticidad se cumplieron con gran exactitud. Incluso la pequeña diferencia de la prueba IIIa. puede atribuirse a que el arqueado de la arena en el interior del cilindro alejó las cargas que actuaban en la superficie del terreno del centro del círculo.



PRUEBAS 3

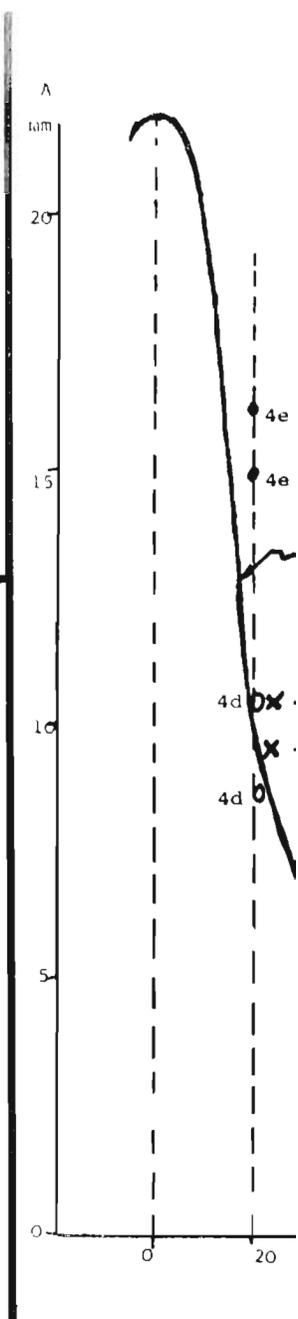
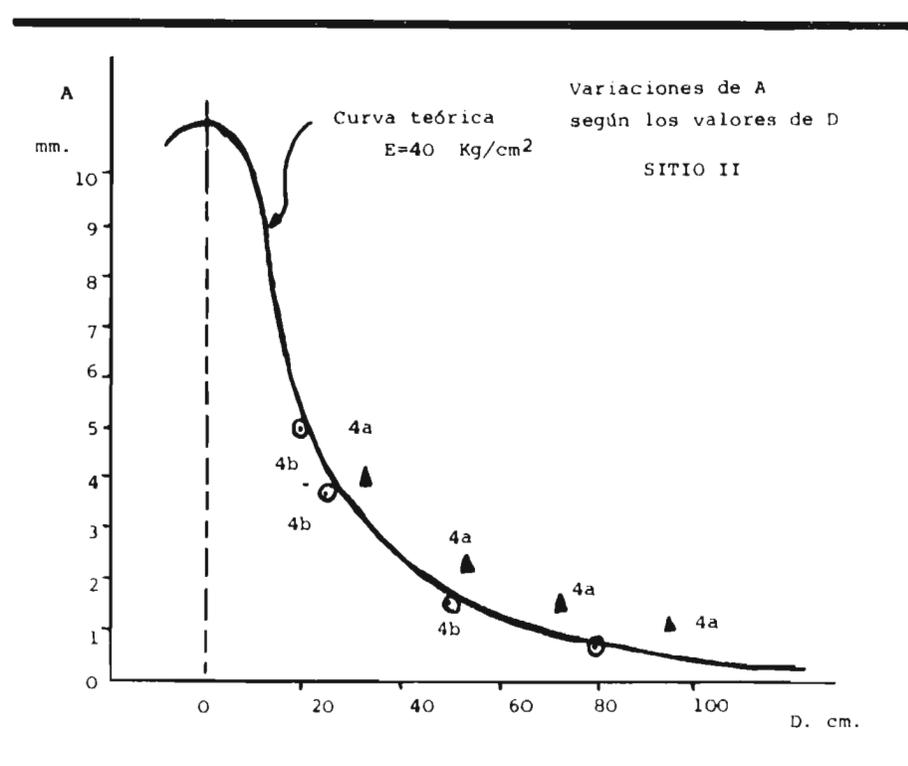
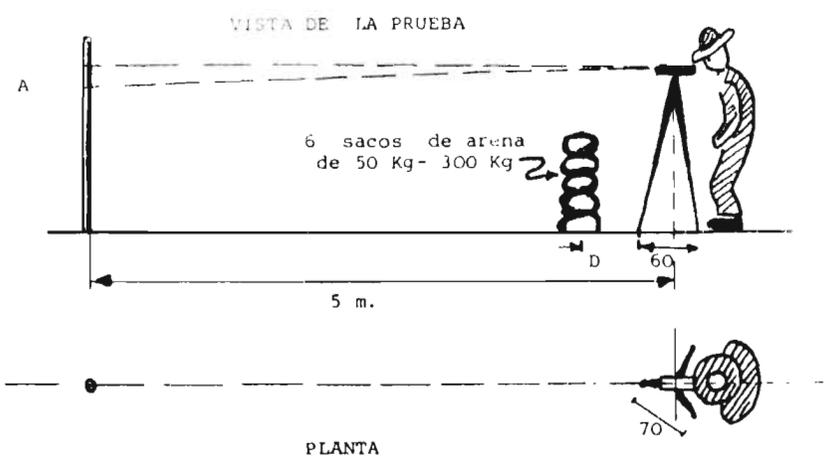
SITIO 111

FIG III

PRUEBAS 4.- Sitio II y III.- Fig. IV. Se comparan movimientos --
producidos por cargas a distintas distancias de un pun-
to.

Para ello se colocaron costales de arena a distancias-
D variables de un nivel y se observaron las inclinaciones que se
produjeron en él midiendo la deflexión A.

Se tabula A vs. D. En el sitio II (pruebas 4a y 4b) -
concuerdan los resultados con la curva teórica. En el sitio III
hay una marcada tendencia a movimientos menores para las distan-
cias D grandes (Pruebas 4c, 4d y 4e; calculos con $E = 10 \text{ Kg/cm}^2$).--
Esta tendencia es cierta incluso para la prueba 4e en que, para
valores pequeños de D, los movimientos observados son mayores --
que los teóricos. Los movimientos producidos por las cargas tu-
vieron siempre una recuperación mínima de un 90%; se tomaron to-
das las precauciones relativas a la influencia de la carga que -
supone el peso del observador.

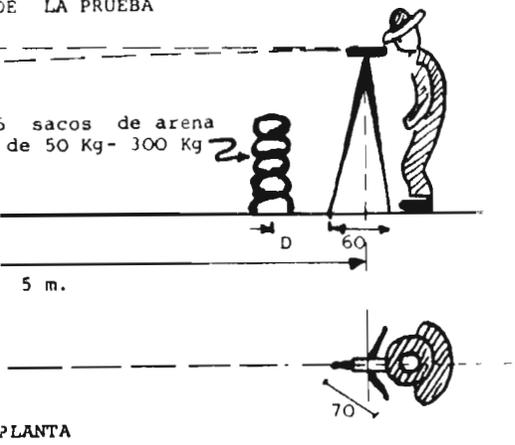


DE LA PRUEBA

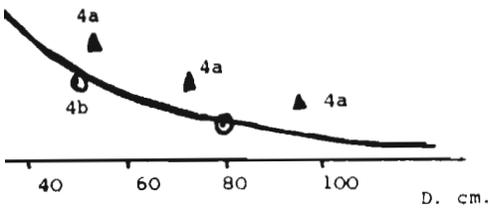
5 sacos de arena
de 50 Kg- 300 Kg

5 m.

PLANTA



Variaciones de A
según los valores de D
E=40 Kg/cm²
SITIO II



A

cm

20

15

10

5

0

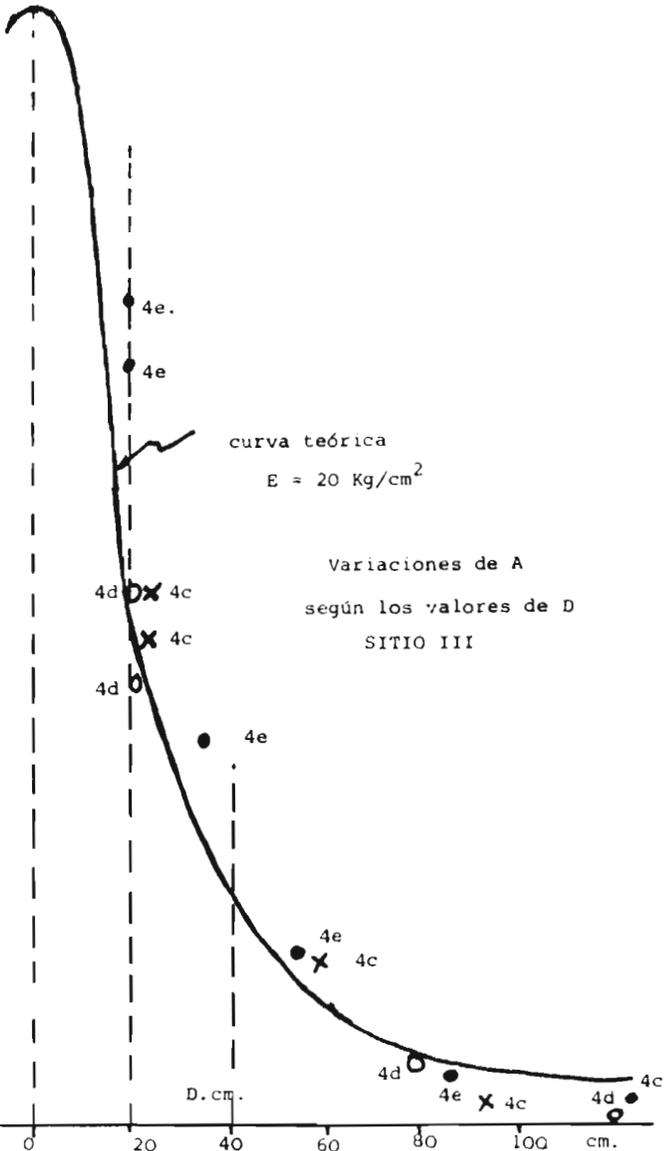
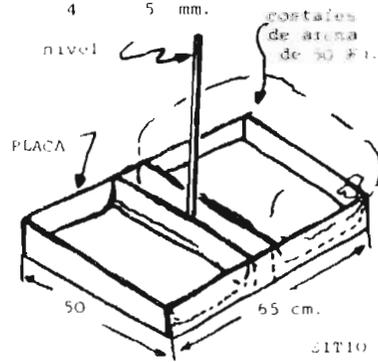
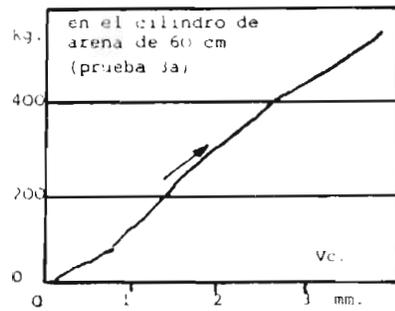
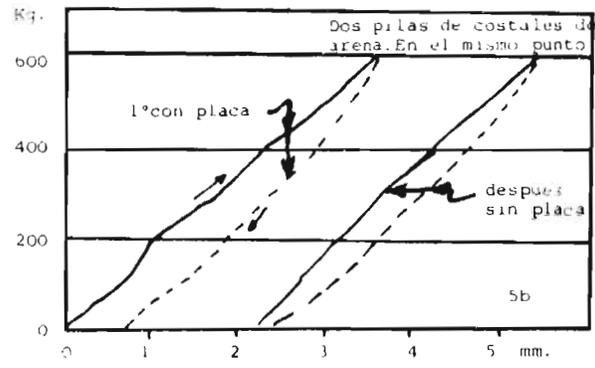
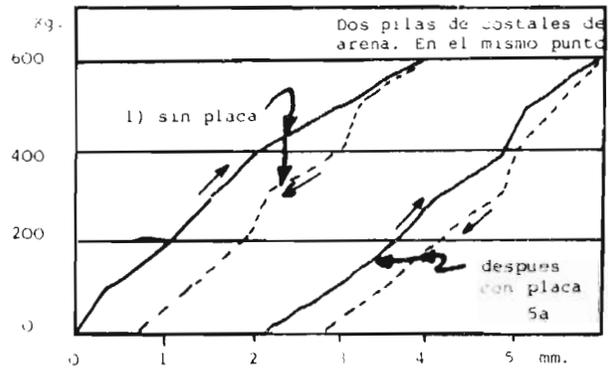


FIG. IV

PRUEBAS 5.- Sitio III- Fig. V.- Se comparan los efectos de distintos contactos de las cargas con el suelo y se ve que no producen diferencias apreciables en los movimientos observados.

Para ver si se cometía algún error en el criterio de como se apoyaban las cargas en el suelo que pudiera afectar los resultados de los cálculos se compararon cargas apoyadas en distintas formas. La fig. Vc presenta los movimientos de uno de los cilindros de 60 cm. de diámetro de las pruebas 3a. En Va y Vb se grafican los movimientos de cargas iguales a las pruebas I pero con distinta forma de apoyo; en la prueba Vb se colocó primero la carga sobre una placa rígida, después se quitaron la carga y la placa y se colocaron los costales directamente sobre el suelo. En la prueba Va se hizo en la misma forma pero en orden inverso. Hubo deformaciones remanentes que no alteran las conclusiones. La poca diferencia de los movimientos observados en unas y otras pruebas comprueba que la forma de hacer contacto la carga con el piso tiene poca influencia en el movimiento del nivel y que, por lo tanto, los resultados de las pruebas no estarán afectados por errores importantes que provengan de esta causa.



SITIO III

FIG.V

Pruebas 11 a 16:

MOVIMIENTOS PRODUCIDOS POR DESCARGAS Y SU COMPARACION CON
MOVIMIENTOS PRODUCIDOS POR CARGAS Fig. VI, VII, VIII.

Las pruebas se llevaron a cabo en los sitios I y II. En todas se procedió en la misma forma (Fig. VIII). Se excavó en el área E pasando la tierra a un área cuadrada C protegida por un alambrado; después se regresó la carga a E. Se registraron los movimientos que se grafican; junto a las gráficas se da la descripción del movimiento de carga y la fecha y la hora de la observación.

La (Fig. VI) compara los movimientos instantáneos observados alrededor de las zonas de carga C con los movimientos calculados teóricamente suponiendo el material elástico, homogéneo e isotrópico. Se nota que en todas las pruebas, a medida que los puntos están más alejados de la zona cargada, los movimientos observados acusan tendencia a ser menores que los calculados.

Esta tendencia corresponde a la observada y descrita en las pruebas 4, en que se desnivelaban los apoyos de un nivel con una carga a distancia variable del aparato. Los movimientos diferidos presentan características semejantes lo que hace pensar que siguen leyes similares.

La prueba 12 discrepa en sus rasgos generales; en ella hubo un movimiento extraordinario, seguramente plástico, que dejó remanente. Se atribuye a alguna característica especial y local del terreno.

En la fig. VII se grafican los movimientos que presentaron en el transcurso del tiempo los centros de las áreas cargadas y los centros de las áreas descargadas; hay bastante semejanza entre unos y otros aunque, en general, son menores los de los centros de las áreas descargadas. Se vé que en las pruebas hechas en un solo día la recuperación del movimiento fué siempre casi total. En las pruebas de varios días se aprecia la recuperación del movimiento diferido. Fué esta una característica de tipo elástico no prevista, pero que concuerda con las ideas establecidas en el planteamiento del problema. En la misma figura se señalan los valores del movimiento calculado teóricamente como si el material fuera elástico con distintos módulos de elasticidad.

Así como para las cargas se pudieron hacer fácilmente muchas pruebas de todos tipos, para las descargas solo se hicieron

ron estas seis dado las dificultades que presentaba la ejecución de las pruebas. En las seis se apuntan las siguientes características de los movimientos.

Los centros de las áreas descargadas tuvieron, como ya se acaba de señalar) movimientos semejantes a los de los centros de las áreas cargadas pero menores.

Para los procesos de descarga los puntos próximos a las zonas descargadas tuvieron movimientos de expansión, menores que los hundimientos de los puntos homólogos próximos a las zonas cargadas con el producto de la excavación. Esto sucedió tanto en movimientos instantáneos como diferidos: incluso en algún caso, el movimiento no fué de expansión. Por lo tanto el cálculo basado en elasticidad, discrepa más con los resultados de las observaciones de movimientos de puntos alrededor de las descargas que lo que discrepaba con los resultados de las observaciones de movimientos alrededor de las zonas cargadas.

Se penso que la causa de la discrepancia pudiera estar en el enjutamiento del material superficial sometido al drenaje que impuso la excavación. Hay dos razones para pensar que esto no fué así y que, en realidad, el comportamiento de la arcilla que se descarga es diferente del elástico.

La primera razón se obtiene de una prueba: al drenar un área del terreno, en forma semejante a como quedaba drenado por las excavaciones pero sin quitar ninguna carga de la superficie del terreno, no hubo asentamientos sensibles. El drenaje se hizo con una serie de perforaciones distribuidas en un cuadro de 2 x 2 m. a las que escurría el agua para ser extraída del terreno; se observó al hacerlo, que el terreno estaba agrietado y que el agua que se extraía provenía, principalmente, de las grietas. El volumen de agua que se extrajo era abundante, del orden de varios metros cúbicos. Era casi igual al que afluyó a las excavaciones hechas para las pruebas de descarga.

La segunda razón es que si se estudian las gráficas de la fig. VIII se advierte que, al regresar la tierra a las excavaciones, los hundimientos de los puntos de alrededor eran parecidos a las expansiones que tuvieron cuando se hizo la excavación. Aceptemos que el movimiento fué, en general, reversible en todos los puntos. Si el movimiento de expansión hubiera sido grande y no se hubiera podido observar por quedar encubierto por una reducción de espesor de la capa superficial (producida por desecamiento), al volver a cargar y producir el movimiento inverso a la expansión los puntos hubieran bajado valores comparables a la bajada de los puntos homólogos colocados en la proximidad de las zonas de carga C. Se vé que esto no fue así; y se concluye que, en realidad, el movimiento de expansión de dichos puntos fué muy pequeño.

En resumen: en las seis pruebas se observó que tanto en movimientos inmediatos como diferidos hubo gran semejanza entre las expansiones y los hundimientos de los centros de las zonas de carga y de excavación, pero, que en general, eran menores

los movimientos de las zonas de excavación.

Los movimientos producidos por las cargas en puntos situados en su alrededor fueron menores que los que indicaría un cálculo elástico y la influencia de las descargas en puntos situados alrededor de su zona fué todavía menor, en ocasiones nula.

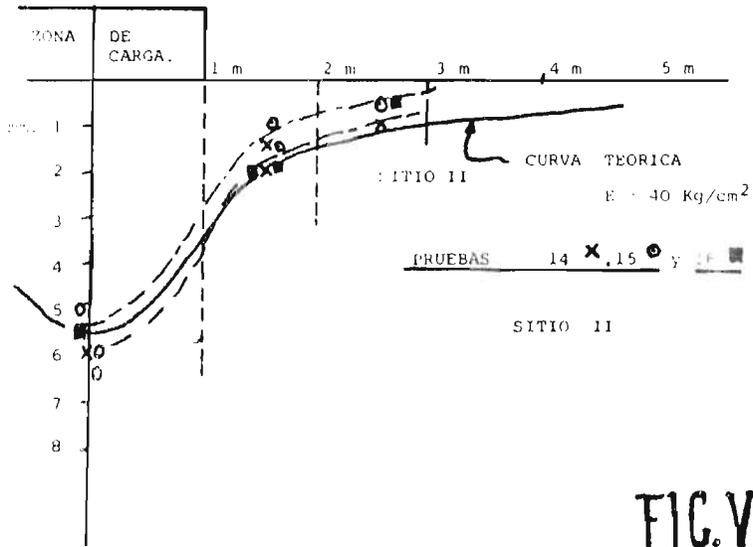
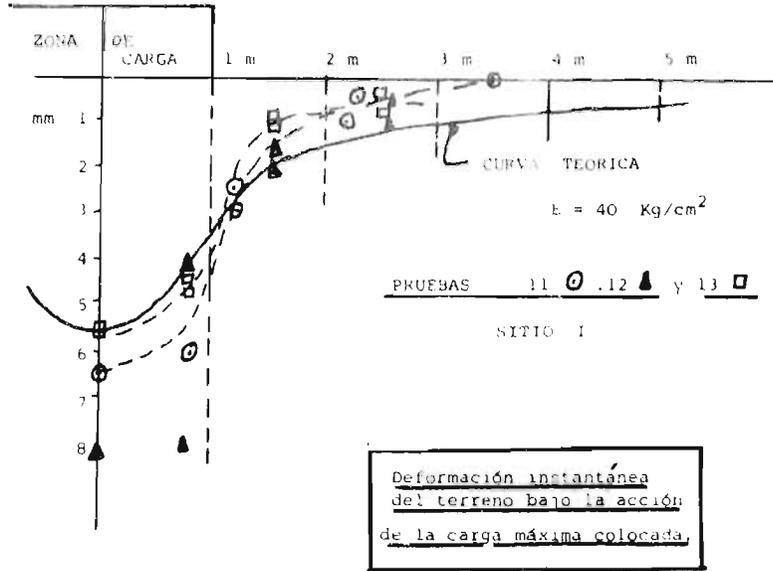
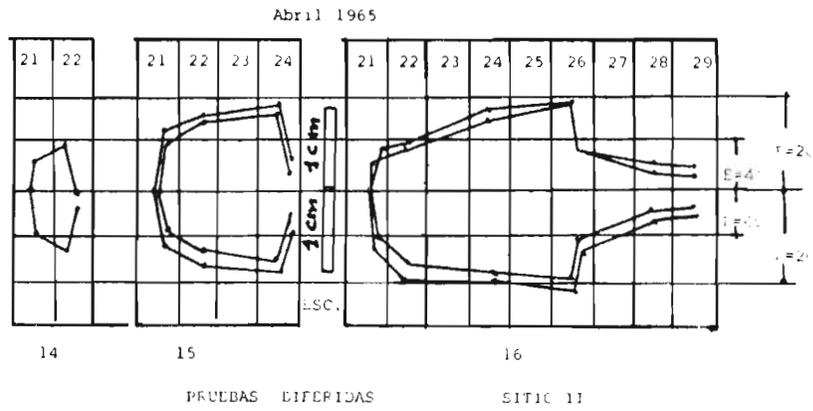
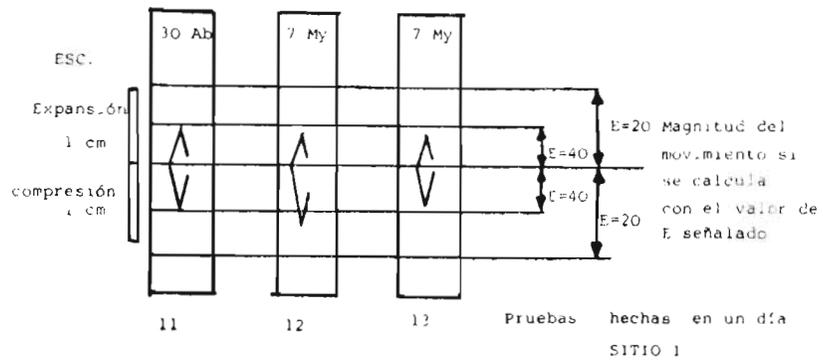
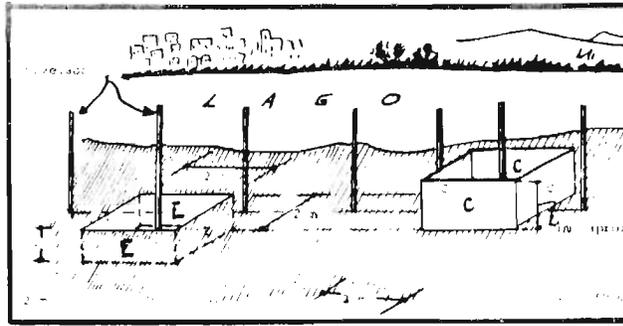


FIG. VI

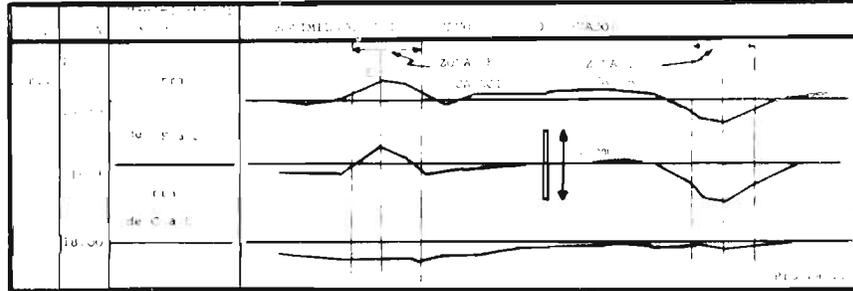


Movimiento del centro de las zonas E y C.

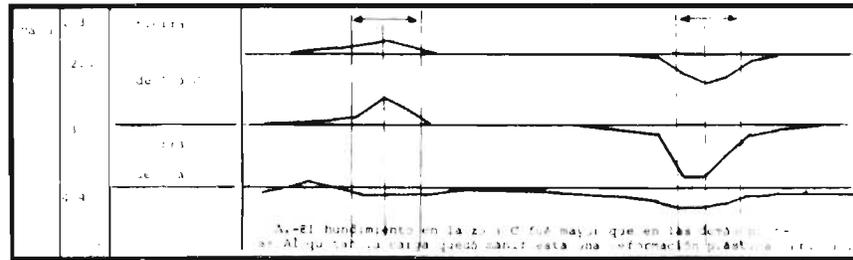
FIG. VII



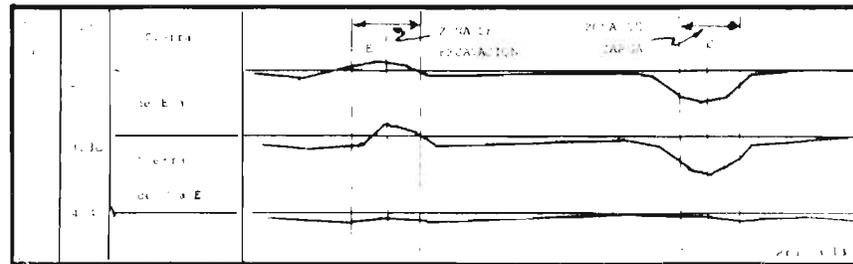
| | | |
|----|-------|----------------|
| 22 | 10.00 | Tierra de C... |
| 22 | 10.10 | Tierra de C... |
| 22 | 10.20 | Tierra de C... |
| 22 | 10.30 | Tierra de C... |

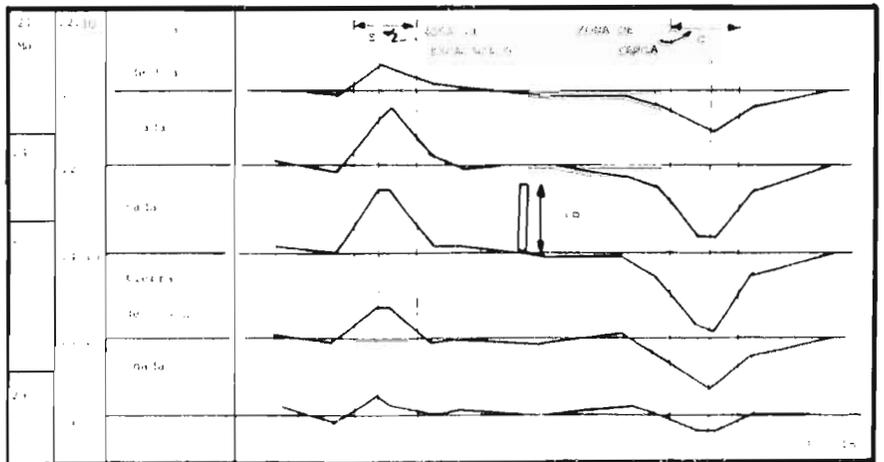
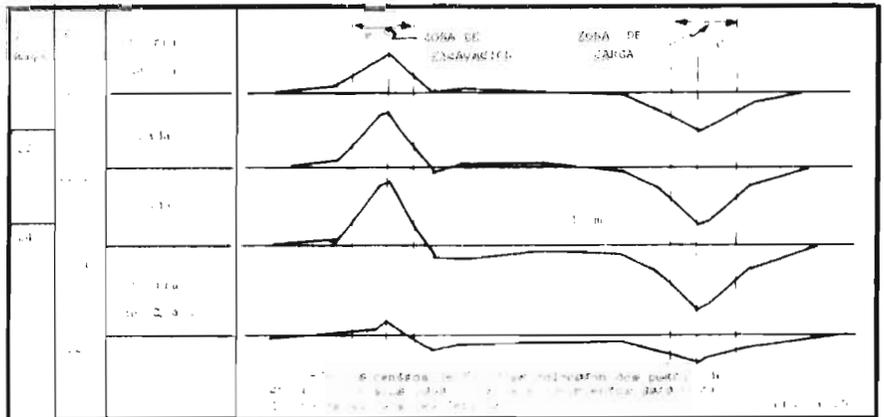
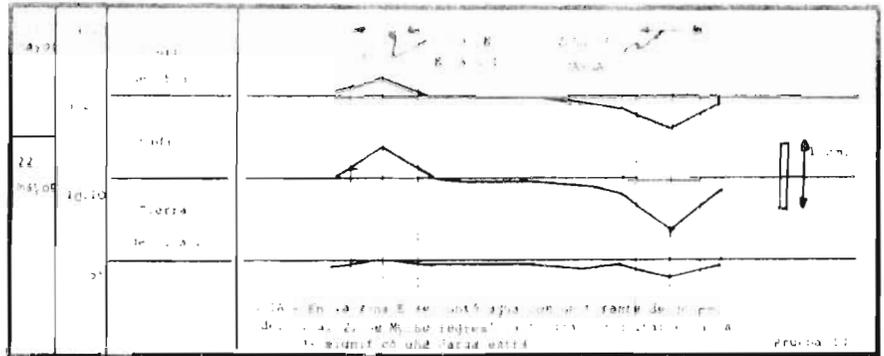
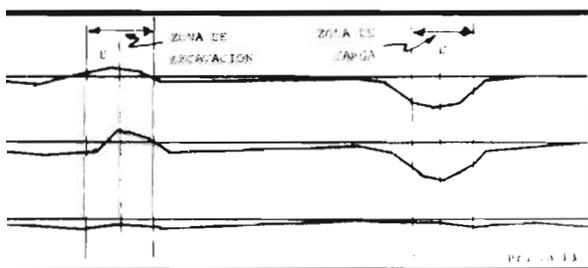
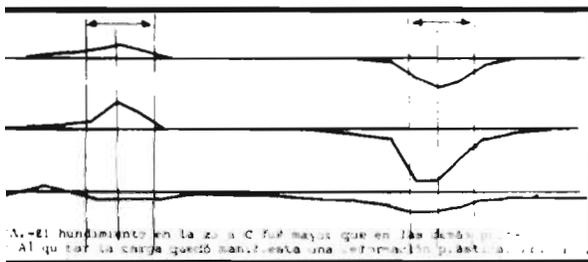
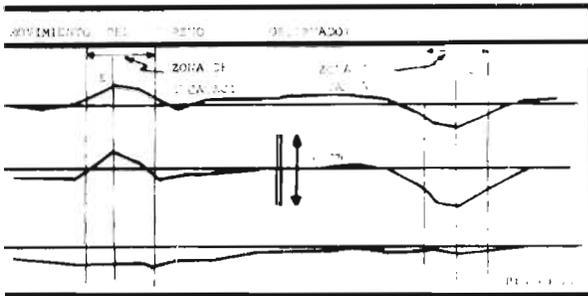
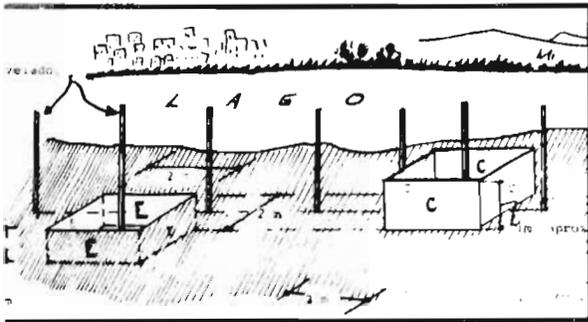


| | | |
|----|-------|----------------|
| 22 | 10.00 | Tierra de C... |
| 22 | 10.10 | Tierra de C... |
| 22 | 10.20 | Tierra de C... |
| 22 | 10.30 | Tierra de C... |



| | | |
|----|-------|----------------|
| 22 | 10.00 | Tierra de C... |
| 22 | 10.10 | Tierra de C... |
| 22 | 10.20 | Tierra de C... |
| 22 | 10.30 | Tierra de C... |





El hundimiento en la zona C fue mayor que en las demás por lo que al quitar la carga quedó manifiesta una deformación plástica.

FIG. VIII

PRUEBAS DE LABORATORIO EN QUE SE PUEDE ESTUDIAR EL VALOR DE LA RELACION ESFUERZO-DEFORMACION (E) DE LA ARCILLA PARA DISTINTAS CONDICIONES.

Se tomaron muestras inalteradas a 1 m de profundidad que se supone eran representativas del terreno. En ellas se hicieron las siguientes pruebas de carga-deformación.

PRUEBAS 21.- Rápidas de compresión axial simple. Fig. IX (a,b,c,d,e).

Velocidad de deformación 1.8 mm/seg. Probetas cilíndricas de 9 cm. de altura por 3.6 cm. de diámetro. (aprox).

Las gráficas permiten apreciar distintos valores de E durante los procesos de carga y descarga con los que se hacen reflexiones más adelante.

PRUEBAS 22.- En cámara triaxial, rápidas consolidadas. Fig. IX (j,g,h,i).

Velocidad de deformación 1.8 mm/seg. Probetas de -- igual forma.

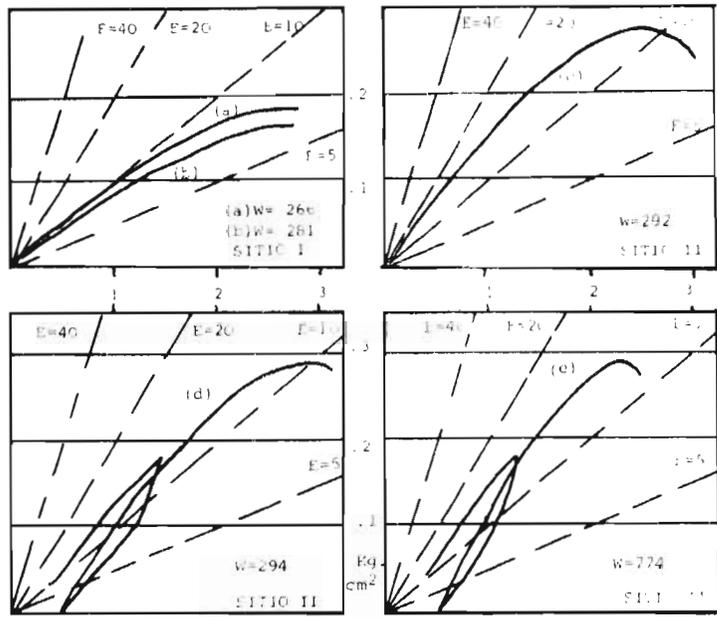
En la cámara triaxial se consolidó la arcilla hasta el 100% de consolidación primaria bajo presiones confinantes de .4 y .5 Kg/cm². Se introdujo un esfuerzo vertical (desviador) y se controlaron las deformaciones. Las gráficas señalan módulos-secantes (E) del orden de 30 ó 40 Kg/cm² (gráficas j,g) ó de 50 ó 70 Kg/cm² (h,i), para un esfuerzo desviador de .1 Kg/cm² (que es aproximadamente el esfuerzo máximo del terreno en las pruebas de carga que se hicieron). Seguramente un módulo tangente (E) en el origen es mayor, del orden de 70-80 Kg/cm². Los resultados están de acuerdo con la idea lógica de que la presión confinante debe reducir la deformabilidad de la arcilla en forma creciente según sea su magnitud. (El resultado de la prueba da, -- efectivamente, esta idea pero presenta la objeción de que para -- otro valor del esfuerzo desviador la conclusión no es tan evidente).

PRUEBAS 23.- (sin mucho valor).- En cámara triaxial. No hay figura.

Cuatro probetas cilíndricas de las mismas medidas -- que las anteriores se dejaron consolidar en la cámara triaxial --

con un confinamiento de .4 Kg/cm² y un esfuerzo desviador que su-
 mado al confinamiento daba .5 Kg/cm². La consolidación se llevó
 hasta lo que pareció el 100% de consolidación primaria. Se reti-
 ró el esfuerzo desviador dejando una presión hidrostática de .4-
 Kg/cm². Al hacer esta última operación se esperaba una expan-
 sión. Dos de las probetas tuvieron una expansión total de 1 mm.
 en dos horas sin cambio sensible del volumen controlado en la bu-
 reta. Considerada esta expansión como elástica correspondería a
 un módulo de elasticidad de 80 Kg/cm². Las otras dos probetas -
 continuaron reduciendo su dimensión vertical como lo venían ha-
 ciendo durante el proceso de consolidación. Esto indica que o -
 bien no se había llegado a la consolidación 100% o bien la conso-
 lidación secundaria era tan importante que la reducción de la --
 carga vertical no detuvo la consolidación total. El error de --
 dos de las probetas quita el valor que se podría dar al resulta-
 do de las otras dos.

Sin embargo la concordancia que hubo entre los resul-
 tados de las pruebas en que hubo expansión, hace pensar en que -
 se cometieron errores en la ejecución de las pruebas y que el --
 procedimiento puede llegar a tener resultados positivos si se --
 llevan a cabo pruebas más numerosas y cuidadosas.



DEFORMACION UNITARIA

PROCESO SIMPLE



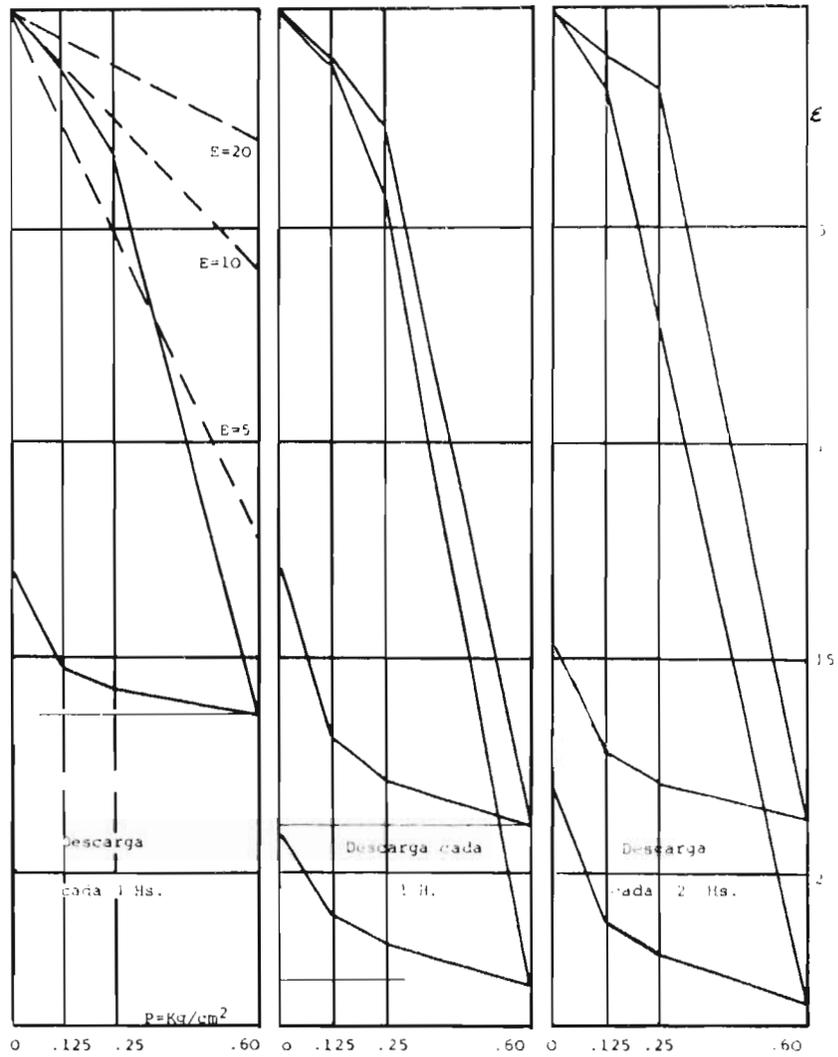
DEFORMACION UNITARIA

ARGILA CONSOLIDADA

FIG. IX

PRUEBAS 24.- De consolidación.- Fig. X.

Se consolidaron cinco probetas en el consolidómetro con cargas sucesivas llegando al 100% de consolidación en cada una siendo la mayor de .6 de Kg/cm^2 . Previamente se habían estimado la carga de preconsolidación en .4 Kg/cm^2 . Después se descargaron dando a la expansión intervalos diferentes de tiempo. En las gráficas se aprecia que la diferencia de velocidad de descarga no afectó sensiblemente el resultado de la expansión total. En ellas se pueden apreciar también diferentes valores de E correspondientes a los procesos de carga y descarga; con ellos --- se hacen reflexiones más adelante.



ϵ en carga = $100 \Delta H : H_0$ (H_0 altura inicial) CONSOLIDOMETRO
 ϵ en descarga = $100 \Delta H : H_1$ (H_1 altura mínima)

FIG. X

CONSIDERACIONES SOBRE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO EN QUE SE OBSERVARON LAS RELACIONES ESFUERZO-DEFORMACION (E). COMPARACION CON LAS RELACIONES ESFUERZO-DEFORMACION OBSERVADAS EN EL CAMPO.

Las gráficas de Figs. IX y X son resultados de pruebas hechas con material del lugar en pruebas de compresión simple, cámara triaxial y en el consolidómetro. En ellas se puede estudiar las relaciones esfuerzo-deformación para diferentes momentos de las pruebas y compararlas con las observaciones hechas en las pruebas "in situ". Al hacerlo hay que tener en cuenta -- que el material varía según el sitio de la prueba.

Las comparaciones presentan varios obstáculos; uno de ellos es el que las pruebas de laboratorio se hicieron con esfuerzos mayores que los que se produjeron en el material en las pruebas "in situ". Los aparatos empleados (normales en cualquier laboratorio de Mec. de Suelos) no permitían trabajar con precisión en esfuerzos tan pequeños.

Otro factor que desvirtúa las comparaciones es el hecho de que los aparatos imponen restricciones a la deformación del material que no existen en el terreno. En el consolidómetro el anillo y la fricción de la muestra con las superficies de las piedras porosas impiden la expansión horizontal de las muestras comprimidas; no puede haber deformación sin cambio volumétrico. En las expansiones (en el mismo aparato) la deformación está restringida solo por la fricción ya que el movimiento horizontal es de enjutamiento y el anillo no lo impide. Esta restricción se supone importante; tal vez su intervención en el proceso de descarga por decrementos coopera para que las deformaciones en las últimas expansiones sean mayores que las primeras ya que en las últimas (especialmente en la final) dicha fricción es menor y -- permite que la probeta se deforme con más libertad que en las primeras expansiones.

Las pruebas de compresión simple y las triaxiales dan mayor libertad a los movimientos que las de consolidación -- aunque quedan también un poco afectadas por la influencia del -- contacto de la probeta en sus extremos. Seguramente los resultados de estas pruebas se pueden comparar con mayores probabilidades de éxito que los resultados de las pruebas de consolidación a los fenómenos de deformación instantánea que se observan en el terreno natural. También pueden dar información sobre deformaciones diferidas que no implican cambio volumétrico; esta posibilidad no existe en las pruebas de consolidómetro por las razo-

nes expuestas anteriormente. Pero tampoco es fácil obtener de estas pruebas datos que reflejen con exactitud las condiciones del subsuelo.

Las dificultades se manifiestan reflexionando en los siguientes conceptos: la desigualdad de los esfuerzos (vertical y horizontal) aplicados al material es la que lo deforma más rápidamente. Esta desigualdad que se puede relacionar con el esfuerzo cortante tiene distintos valores en la masa del suelo. Por ejemplo: el máximo de la diferencia entre los esfuerzos se presenta, en el terreno, a una cierta profundidad; en ese lugar es donde el material tiene su máxima deformación. Esta deformación se producirá, por lo tanto, bajo un cierto confinamiento y con incrementos de presiones en ambos sentidos. A otras profundidades variarán todas estas circunstancias. En ensayos de laboratorio poco numerosos no se podrá reflejar tal cantidad de variables a las que, incluso, hay que añadir la principal: la heterogeneidad del terreno.

Desde otro punto de vista se hacen las siguientes comparaciones: en las pruebas de compresión simple y rápidas con solidadas usualmente se aplica (y así se hizo en estas pruebas) una deformación obligada con cierta velocidad. En cambio en el consolidómetro se aplican cargas que se dejan actuar periodos de tiempo muy amplios. Por esta causa será natural obtener deformaciones mayores en el consolidómetro.

Combinando los efectos de restricción de deformaciones y tiempo de aplicación de la carga se advierte que los movimientos tenderán a ser mayores en el consolidómetro que en las otras pruebas por razón del tiempo en que se mantienen aplicada la carga y menores por razón de las restricciones que impone a la deformación del material. Así en las gráficas del consolidómetro y en las de las pruebas de compresión simple se ve que, en los tramos relativos a compresiones y cuando los esfuerzos y deformaciones son pequeñas (consecuentemente las deformaciones plásticas seguramente tienen poca influencia en los resultados) los valores de E son del mismo orden de magnitud. También podría suponerse que los resultados son parecidos para esfuerzos grandes, si se buscan puntos de igual pendiente en las curvas de ambas pruebas. La comparación no es correcta puesto que la probeta en compresión simple se aproxima a una falla plástica y en la probeta en el consolidómetro se está produciendo una consolidación; la diferencia de concepto es evidente. Tampoco la aproximada coincidencia de las pendientes de las curvas en puntos cercanos al origen tiene un significado claro; en el consolidómetro se manifestaron esencialmente deformaciones diferidas con cambio de volumen; en la prueba de compresión simple se manifestaron, seguramente, deformaciones inmediatas sin cambio de volumen.

Estos puntos de vista son fundamentales para tratar de encontrar en las pruebas de laboratorio la reproducción de los valores de E obtenidos en el campo.

El valor de E obtenido en el campo se puede aproximar

te, de 40 Kg/cm² en los sitios I y II y de 20 Kg/cm² en el sitio III, parecido para cargas y descargas. Se ve que estos valores se manifiestan en algunos de los tramos de las curvas en las descargas, tanto en el consolidómetro como en la prueba de compresión simple, y, que, en las compresiones de las pruebas rápidas consolidadas, se presentaría si se hacen con un confinamiento apropiado. Ninguna de estas coincidencias parece tener un significado interesante, exceptuando las de la prueba rápida consolidada. Las razones expuestas anteriormente quitan valor a los resultados del consolidómetro, tanto para cargas como para descargas, y, por lo tanto, presentan un problema tan grande de interpretación que parece improbable que haya resultados positivos en su estudio. Por otra parte los movimientos observados en el campo eran recuperables; las pruebas de laboratorio en el mismo material (tal vez por haber trabajado en niveles de esfuerzo superiores) no lo eran. En una prueba que sea representativa la coincidencia en el valor de E en compresión debe venir acompañada de la coincidencia de E en expansión. En las pruebas hechas no hay esta doble coincidencia; se necesita emplear toda una serie de justificaciones para hacer coincidir los resultados. Y en las pruebas confinadas que pueden ser las más significativas no se puede prever fácilmente qué confinamiento dará los valores buscados de la rel. esf-def- (E) y que significado tendrá este valor.

Como último obstáculo para comparar los resultados de las pruebas del campo y del laboratorio bajo el punto de vista que se está empleando se puede señalar que, las pruebas de compresión de laboratorio, se llevan a cabo en especímenes muy pequeños sometidos a esfuerzos casi uniformes lo cual no representa las condiciones de las pruebas de campo. En estas últimas se vió que, en general, los movimientos observados diferían de los calculados con la teoría de la elasticidad indicando una concentración de efectos mayor que la teórica. No es fácil prever la razón de este fenómeno; tal vez esté en la diferencia de magnitud de esfuerzos en los distintos puntos; pero tal vez haya una influencia peculiar de las presiones laterales, del confinamiento, de la preconsolidación del material, que tenga efectos importantes en las deformaciones. No hay manera práctica de reproducir, en las pequeñas probetas de laboratorio, todas estas condiciones que rodean al material en el campo; y este último obstáculo puede afectar a las comparaciones en forma importante.

En resumen:

No parece lógico establecer ninguna comparación entre las pruebas hechas "in situ" y las pruebas de laboratorio realizadas en este trabajo.

Es posible que se pueda planear alguna otra prueba que represente mejor que las empleadas los fenómenos aquí estudiados. Pero cualquier prueba (nueva o ya existente) necesitará correlacionarse estadísticamente con muchas pruebas de campo haciendo variar los factores que intervinieren (dimensiones, tiempo, terreno, etc.) para poder ser digna de confianza.

Tal vez una manera de llegar a resultados positivos en el laboratorio sea haciendo pruebas de compresión con esfuerzos muy pequeños y comparando los resultados con resultados de pruebas "in situ" parecidas a las llevadas a cabo en este trabajo. Las comparaciones indicarán si las pruebas se deben hacer sin confinamiento o cual es el grado de confinamiento indicado para una correlación correcta.

R E S U M E N

1).- Las pruebas "in situ" permitieron apreciar que al cargar o descargar la arcilla se presentan deformaciones instantáneas tipo elástico (recuperables y proporcionales a la carga) cuando los esfuerzos que se inducen en el material son pequeños. Al mantener aplicada la carga (o la descarga) se observaron movimientos diferidos que tienen características de ser también tipo elástico (por lo menos fueron recuperables).

2).- Todos estos movimientos tipo elástico fueron, en general, algo menores para las descargas que para las cargas de igual magnitud, pero, en ambos casos, fueron prácticamente recuperables. Las cargas producían en su alrededor movimientos menores que los que se hubieran producido si el material hubiera sido perfectamente elástico. Las descargas manifestaban esta misma diferencia en forma mucho más marcada: los puntos alrededor de las descargas se movían muy poco o no se movían nada.

3).- Estas diferencias de los movimientos observados con los elásticamente perfectos se pueden justificar si se considera que las deformaciones del material no son proporcionales a los esfuerzos y que estos, naturalmente, son de magnitud variable en la masa del terreno. Sin embargo algunas de las pruebas (pruebas 1, 2, 3) hacen pensar que el material, en ciertas condiciones, sí tiene un comportamiento linealmente elástico bajo la acción de cargas pequeñas como las empleadas.

4).- Buscando otra razón que justifique la diferencia se puede pensar que haya características de la arcilla (todavía no estudiadas) que motiven las diferencias de los movimientos observados con los calculados. Las pruebas realizadas en este trabajo no fueron suficientes, ni en número ni en variedad, para permitir aventurar una hipótesis.

5).- Los intentos de correlación entre los movimientos tipo elástico de la arcilla observados en el terreno y las deformaciones observadas en pruebas de laboratorio no tuvieron éxito, en este trabajo, principalmente por la diferencia de las condiciones que rodearon al material de la probeta con las que existían en el terreno natural. De todas formas se considera que deben existir algunas correlaciones entre ambos fenómenos (aunque sean distintos) pero que hubieran tenido que establecerse sobre un número mucho mayor de ensayos que los que se hicieron.

Respecto a "E" (tal como se define en la 1a. hoja de la tesis) se hacen los siguientes comentarios:

1).- Los movimientos instantáneos observados en sitios I y II se pueden comparar con los de un sólido elástico si $E=40$ -tanto en cargas como en expansiones; en el sitio III si $E=20$.

2).- Un cálculo de deformaciones basado solo en el incremento o alivio de esfuerzos verticales en las capas del terreno (sin tener en cuenta las presiones laterales) dá movimientos mayores si se emplea igual E. Se tendría que emplear $E=53$ --- Kg/cm^2 para obtener los mismos resultados.

3).- En muchas excavaciones, en la Ciudad de Mexico, - se han controlado expansiones inmediatas en su parte central que se comparan a movimientos elásticos si se supone que la E del terreno es del orden de 30 - 60 Kg/cm^2 .

4).- Las determinaciones dinámicas del módulo de la -- elasticidad presentadas por el Dr. R. Marsal en su obra "El Sub suelo de la Ciudad de México" dan resultados de un valor comparable. Oscilan también entre 20 y 60 Kg/cm^2 .

5).- Los asentamientos totales de las construcciones - no se calculan (normalmente) llevando un criterio de elasticidad en la imaginación. Se suele considerar que la elasticidad permite calcular los esfuerzos verticales que aparecen en el material. A partir de estos esfuerzos se calculan las deformaciones de las capas del subsuelo aplicando un valor a la relación deformación-esfuerzo obtenida en el consolidómetro que se llama M_v (módulo de deformación volumétrica), diferente en cada capa.

Si comparamos a $M_v (\Delta \epsilon; \Delta p)$ con el inverso de $E (\Delta p; \Delta \epsilon)$ vemos que se están empleando (con o sin justificación) casi todos los conceptos de la elasticidad, exceptuando el tener en --- cuenta el efecto de los esfuerzos horizontales. También los inversos de M_v varían frecuentemente entre valores de 20 - 60 --- Kg/cm^2 .

APENDICE I

LAS PRUEBAS GEOSISMICAS INDICAN QUE EL VALOR DEL MODULO DE --
 POISSON ES $\nu = 0.5$

Se hicieron pruebas para medir la velocidad de transmisión de ondas por métodos geosísmicos. Se determinaron velocidades del orden de 200 m/seg. en la superficie y de 800 m/seg. por debajo de los 10 m.

Se considera que la velocidad real de las ondas en la arcilla es de 800 m/seg. y que superficialmente se reduce por la presencia de grietas. Esta velocidad implica cierta relación entre E_1 y E_v y si se supone que E_1 es el que se obtiene en las pruebas de carga estática (aproximadamente 40 Kg/cm²) el valor de ν difiere menos de 1% de 0.5. En efecto: La fórmula que liga estas magnitudes es

$$v = \sqrt{\frac{E_1}{\rho}} \sqrt{\frac{1-\nu}{(1-2\nu)(1+\nu)}}$$

en que ν = velocidad de la onda
 y ρ = masa específica.

Tomando un valor fijo de la velocidad $\nu = 700$ m/seg. y un valor fijo de $\rho = 1.2$ g/cm³ los valores de E_1 y ν quedan relacionados en la siguiente tabla:

| | | | | | | | | |
|---------------------------------------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| Valores de ν | .500 | .498 | .495 | .480 | .450 | .400 | .20 | 0.000 |
| Valores de E_1 , Kg/cm ² | 0 | 70 | 180 | 660 | 1,600 | 2,700 | 5,400 | 6,000 |

En esta tabla se vé claramente que, si la fórmula de que se deriva es cierta y E_1 en la arcilla tiene un valor parecido al obtenido en las pruebas de carga el valor de ν queda tan próximo a .5 que no se cometerá error sensible si se considera como .5 para los cálculos basados en la teoría de la elasticidad.

APENDICE II

CALCULO DE DEFORMACIONES.

La teoría de la Elasticidad dá la fórmula

$$(I) \quad \delta_1 = \frac{2(1-\nu^2) w R}{E_1}$$

en que δ_1 = hundimiento del centro de círculo en la superficie de un sólido serinfinito.

w = carga uniforme flexible sobre la superficie del círculo.

R = radio del círculo.

El hundimiento δ_1 tiene dos orígenes: deformaciones -- verticales del material producidas por esfuerzos verticales y deformaciones verticales contrarias a las anteriores producidas -- por esfuerzos horizontales que influyen a través del módulo de Poisson. La teoría de la elasticidad demuestra que el valor de los esfuerzos verticales es independiente del módulo de Poisson. Así podemos obtener una fórmula para el movimiento debido a los esfuerzos verticales cualquiera que sea ν haciendo $\nu = 0$. Que

$$da \quad \delta_2 = \frac{2 w R}{E_1} \quad (II)$$

En el caso que nos ocupa en que $\nu = .5$ la fórmula I para el movimiento total se convierte en

$$\delta_3 = \frac{1.5 w R}{E_1} \quad (III)$$

En consecuencia: los movimientos calculados considerando los efectos de los esfuerzos verticales y horizontales inducidos en el material (formula III) resultan 25% menores que los -- que se calculan si solo se tiene en cuenta el esfuerzo vertical -- (fórmula II).

Esto, que es cierto para el centro de un círculo carga do uniformemente, es tambien cierto para cualquier punto próximo a cualquier carga superficial. Se demuestra haciendo ver que -- cualquier carga se puede descomponer en cargas uniformes sobre -- tramos de coronas circulares tan pequeñas como se quiera que tengan como centro el punto cuyo movimiento se estudia. El movi--

miento total del punto, debido a un tramo de corona viene dado -
 por la fórmula $\delta_4 = \frac{1.5 w \Delta R \alpha}{360 E_1}$ (IV) En que ΔR es la di-
 ferencia de los dos radios y α es el ángulo central del tramo -
 de corona circular. Esta fórmula se deriva de la (III) con razo-
 namientos fáciles basados solamente en la ley de superposición -
 de efectos.

Con los mismos razonamientos y a partir de la fórmula-
 (II) (en que se supone $v = 0$) se establece la fórmula

$\delta_5 = \frac{2 w \Delta R \alpha}{360 E_1}$ (V) que dá el movimiento de un punto superfi-
 cial bajo la influencia de una carga uniforme en un tramo de co-
 rona circular si se considera solamente el efecto de los esfuer-
 zos verticales. Así como $\delta_3 = .75 \delta_2$ también $\delta_4 = .75 \delta_5$

Por medio de la fórmula (IV) se han hecho todos los --
 cálculos empleados en este estudio, ya que proporciona un método
 fácil de aplicar, fácil de memorizar y que permite visualizar fá-
 cilmente los conceptos que se manejan.