

01149

134

DIVISION DEL DOCTORADO DE INGENIERIA U. N. A. M.

**RELACION PRESION DE PORO-TIEMPO EN
UNA ARCILLA REMOLDEADA NOR-
MALMENTE CONSOLIDADA**

T E S I S

Que para obtener el GRADO de:

**MAESTRO EN INGENIERIA
MECANICA DE SUELOS**

p r e s e n t a:

RICARDO SANCHEZ BRINGAS

M E X I C O

1 9 6 4

**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.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

PAGINACION

DISCONTINUA

20

A mis padres .

RELACION PRESION DE PORO-TIEMPO EN UNA ARCILLA
REMOLDEADA NORMALMENTE CONSOLIDADA

I N D I C E

	Pág.
Introducción	1
<u>CAPITULO I</u>	
<u>Material: Propiedades índice. Verificación de la reestructuración del material</u>	1
<u>CAPITULO II</u>	
<u>Equipo y Procedimientos: Cámara triaxial. Presión confinante. Montaje de las probetas. Proceso de saturación</u>	3
<u>CAPITULO III</u>	
<u>Aparato de Presión de Poro: Descripción. Causas posibles de errores. Comentario sobre el tiempo de respuesta. Comentario sobre el tiempo de equilibrio</u>	6
<u>CAPITULO IV</u>	
<u>Resultado de las Pruebas: Relación entre esfuerzo desviador-presión de poro-deformación axial. Relación presión de poro-deformación axial-tiempo para un mismo incremento de carga</u>	9
<u>CAPITULO V</u>	
<u>Conclusiones</u>	18
<u>Bibliografía</u>	21

INTRODUCCION

El presente trabajo forma parte de la iniciación de la etapa de investigación del Laboratorio de Mecánica de Suelos de la División del Doctorado de la U.N.A.M. y está sujeto a las limitaciones técnicas y económicas del mismo.

En 1962, Bishop y Henkel, reportaron que para realizar pruebas triaxiales no drenadas con medición de presión de poro en la base, se debían emplear velocidades de experimentación tales que permitieran la completa igualación interna de la presión de poro en la muestra. Esto es tanto como enunciar que para realizar pruebas en probetas de materiales cohesivos de 3.6 cm de diámetro por 9 cm de altura, se requieren varios días para efectuar la sola etapa de falla.

Este estudio está enfocado a discernir si en trabajos de rutina es posible efectuar pruebas triaxiales no drenadas con medición de presión de poro en la base en tiempo menores que aquel recomendado por Bishop y Henkel, en pruebas donde se logre el 100% de igualación interna de presión de poro.

Para ello, fue realizado un pequeño programa de pruebas, formado por ensayos triaxiales consolidados no drenados con medición de presión de poro en la base.

Estas pruebas se realizaron variando el tiempo en que se llevaba a la falla la probeta una vez consolidada, según el siguiente criterio:

1. Pruebas en que se permitió la total igualación de la presión de poro bajo cada incremento de carga antes de efectuar el siguiente incremento.
 2. Pruebas en que los incrementos de carga se hicieron a tiempos fijos, de manera que el tiempo total fuera el 50% del tiempo total requerido en las pruebas anteriores.
 3. Pruebas en que los incrementos de carga se hicieron a tiempos fijos, siendo el tiempo total igual al 25% del tiempo total requerido en las pruebas iniciales.
- Los trabajos efectuados se presentan a continuación.

MATERIAL

Se decidió trabajar en material remoldeado. Se utilizó la arcilla de un sondeo efectuado entre 30 y 40 metros de profundidad, en la ladera izquierda del Río Grijalva, por la S.O.P. Se pesaron 18 Kg y con humedad ambiente y 18 grados de Temperatura Media, se procedió al remoldeo, incrementando el contenido de agua hasta el 70%, correspondiente al Límite Líquido del material. Se obtuvo así, una mezcla homogénea de consistencia pastosa y uniforme. Se determinaron contenidos de agua una vez remoldeado el material, para distintas zonas del mismo, y se obtuvieron valores entre 69 y 70% para 15 determinaciones.

PROPIEDADES INDICE

El material resultante, que llamaremos simplemente arcilla remoldeada, presentó las siguientes propiedades índice:

Límite Líquido	83%
Límite Plástico	39%
Índice de Plasticidad	44%
Densidad de sólidos	2.52

La formación de muestras con el material remoldeado con una humedad igual al 75% del L.L., se logró utilizando un molde de 5 cm de diámetro y 10 cm de altura, el cual se llenaba completamente con la arcilla, mediante una serie de capas lon-

gitudinales de poco espesor, que dejaban espacios cilíndricos cada vez de menor diámetro hasta lograr cerrar por los dos extremos el molde. Por medio de un pistón, se fue presionando la probeta así formada, haciéndola salir poco a poco y cubriéndola al mismo tiempo con parafina. Esta operación llevaba 15 minutos por probeta. Se formaron 45 probetas y durante su proceso, el contenido de agua varió de 69% inicialmente, a 67% en las últimas probetas. Cada 10 probetas se examinaba el acabado interior seccionando una, con lo que se comprobó satisfactoriamente su elaboración, asegurando la no separación de capas de arcilla, en virtud del estado pastoso en que se trabajó. Las probetas colocadas en posición horizontal se guardaron en el cuarto húmedo, durante un tiempo máximo de tres meses.

VERIFICACION DE LA REESTRUCTURACION

DEL MATERIAL

Con objeto de determinar cuándo el material alcanzó una resistencia estable, mediante su reestructuración interna con el tiempo, se efectuó un programa de pruebas de compresión no confinada con diferentes probetas a diferentes edades. Los resultados se resumen en el cuadro 1 y las figuras 1 y 2.

De éstos se concluye:

1. La resistencia alcanza un rango de valores semejantes a partir del tercer día.
2. El material presenta curvas esfuerzo-deformación porcentual, características de un material de falla plástica. (Hirschfeld - 1963).

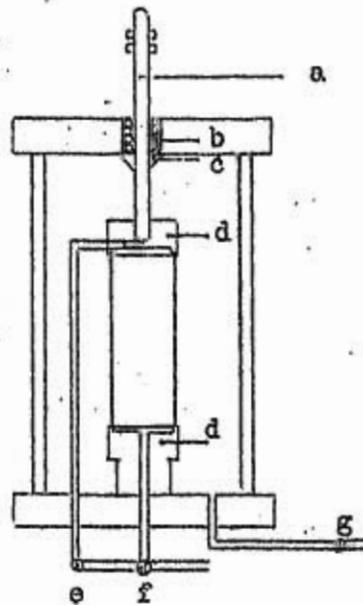
3. La uniformidad en peso, contenido de agua, relación de vacíos, saturación, es razonable.

EQUIPO Y PROCEDIMIENTOS

Cámara Triaxial.

A continuación se presenta el esquema general de las cámaras triaxiales. La carga axial se transmite al suelo por medio de un pistón (a), que corre en un juego de baleros verticales (b) para evitar la fricción. Con objeto de evitar las fugas se usó una junta de hule (c), hule líquido "FlexoFix", que impedía las fugas a través del pistón, pero a su vez, daba origen a una pequeña fricción, para presiones de cámara de 4.0 Kg/cm. Para evitarla, se daba un pequeño giro al pistón (a) antes de efectuar las lecturas. El drenaje superior (cabeza d), se mantuvo independiente del inferior mediante la válvula (e) y se controlaron ambos con la válvula (f) que permitía la expulsión o inyección del agua. La presión confinante se controló con la válvula (g).

DIAGRAMA DEL
APARATO TRIAXIAL



Presión Confinante.

Para evitar la incertidumbre en los resultados obtenidos, con respecto a fugas a través de las membranas impermeables, se optó por usar Aceite de Ricino para aplicar la presión confinante. Es de notar que el trabajo se hace más lento y requiere más cuidado. Para mantener la presión, se usó un sistema de amortiguamiento a base de un volumen varias veces mayor que el de la cámara. Se lograron buenos resultados aún en pruebas cuya duración era de una semana.

Montaje de las probetas.

Las dimensiones de las probetas obtenidas son de 8.5 cm de altura y 3.55 cm de diámetro. El peso por probeta de cerca de 40 probetas es de 135 gr con desviaciones erráticas máximas de 2 gramos. Se utilizó dren ó filtro lateral cuyas dimensiones son las recomendadas por Henkel y Bishop: 1960. Este dren se humedeció hasta su saturación, antes de colocarlo. Mediante un expansor, se colocaron dos membranas cuya impermeabilidad, resistencia y transparencia, habían sido superiores a las de otras marcas. Ligadas convenientemente las cabezas, (en ningún caso se presentó fuga a través de los ligamentos) se montaba la probeta en la cámara, cuyos conductos habían sido previamente saturados con agua desaireada a una temperatura un poco mayor que la ambiente. En las cabezas se colocaron drenes de papel filtro semejante al del filtro late

ral, cuyo diámetro, mayor que el de las cabezas, permitía unir los al filtro lateral, disminuyendo al máximo el aire entrampado entre la probeta, el filtro lateral y las membranas impermeables.

Proceso de Saturación

La cámara triaxial, al permitir el control del drenaje de la probeta, origina un problema serio: la saturación del sistema formado por los drenes superior e inferior, sus conducciones y válvulas de control, el sello entre probeta y membrana, entre membranas y cabezas, y entre probeta y piedras porosas. Gobernado por el tipo de aparatos, el proceso se redujo a lo siguiente:

1. Circulación continua durante 30 minutos, de agua desaireada, desde la salida general de agua, hacia las piedras porosas, manteniendo las válvulas de control totalmente abiertas, e inspeccionando visualmente el recorrido a través de los tubos sarná.
2. Colocación de papeles filtro sobre las piedras porosas, totalmente saturados, manteniendo una película de agua para impedir la entrada de burbujas de aire entre los intersticios de las piedras porosas.
3. Colocación de la muestra, filtro lateral y membranas de látex, haciendo circular agua antes de sellar con ligas las membranas, y manteniendo así saturado el conjunto.

4. Todas las uniones se cubrieron cada vez, con Permatex, para evitar tanto filtraciones de acetato ó aire, como fugas de agua durante todas las etapas.

Etapas de Consolidación.

Todas las probetas se consolidaron con un tiempo semejante de 2 a 3 días. En el caso de expansión, se dejaba el mismo tiempo requerido para la consolidación. Aún cuando las probetas alcanzaban el 100% de consolidación (Criterio de Terzaghi) entre los 600 y 900 minutos, el criterio seguido fue esperar hasta que ya no hubiera expulsión de agua.

APARATO DE PRESION DE PORO

El aparato de Presión de Poro tiene por objeto impedir la entrada ó salida del fluido de los poros de la probeta ensayada y medir la presión generada para lograrlo. Este tipo de aparato está discutido en detalle en el libro de Henkel y Bishop 1957, y en particular el equipo usado está detallado en el artículo presentado por Marsal y Salazar Resines 1960.

Causas posibles de errores en la medición.

1. Aire entrampado entre las probetas y las membranas de látex. A pesar de los intentos para lograr una saturación satisfactoria, siempre, al iniciar la etapa de falla, se notó la existencia de burbujas en el tubo serán que va del dren superior a la salida. Existe una corrección analítica basada fundamentalmente en tres hipótesis, a saber:

- a) La presión del aire ontrampado no difiere de la del agua.
- b) La pérdida de presión de poro por reducción de volumen de las burbujas de aire puede ser deducida de las lecturas realizadas en el aparato.
- c) La presión inicial del aire ontrampado es la atmosférica. Hilf, (1956) en el Imperial College de Londres demostró que éstas hipótesis podrían conducir a errores muy importantes. Por lo anterior no se realiza ninguna corrección.

2. No saturación del aparato de Presión de Poro.

La cámara triaxial está unida al aparato de Presión de Poro mediante un delgado tubo de sarán interceptado por una válvula que al manipularse no desaloja volumen. Dicha válvula se encuentra detallada en el Henkel y Bishop, aunque en realidad, se comprobó que producía un ligero desplazamiento. La conducción se bifurca mediante una "T" y mediante 2 válvulas hacia:

- 1. Tubo capilar para formar el contacto "agua-mercurio".
- 2. Tanque almacenador de agua que por medio de una carga de 40 cm de agua, permite la circulación del agua, a todo el sistema que pone en contacto la cámara con la superficie del mercurio.

Para obtener los mejores resultados, se procedió a hacer circular agua desaireada por medio de vacío, desde el tanque almacenador y contra la gravedad, y posteriormente se permitió el descenso del agua por gravedad, cuando el depósito se había llenado.

Aún así, saturado el aparato listo para trabajar, antes de ser conectado a la cámara triaxial, se calibraba, cerrando las válvulas y midiendo el desplazamiento de la superficie de contacto de "agua-mercurio" cuando la presión aumentaba hasta un valor máximo, limitado por la capacidad del manómetro de 4.0 Kg/cm². De estas calibraciones se puede asegurar que el desplazamiento máximo para el rango de trabajo, (nunca mayor de 2.0 Kg/cm²) no excedió los 9 mm. Se anota que aún conocida esta limitación, se ignora la magnitud del error inducido y su influencia en los resultados medidos.

3. Expansión del aparato de presión de poro por la presión inducida al efectuar la prueba.

Es éste otro de los factores de error, no determinables, que aunados al fenómeno de dilatación por calor, dan origen a las desviaciones en las mediciones.

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS

Relación entre el Esfuerzo Desviador-Presión de Poro con la deformación axial.

1. Se permite el 100% de estabilización de la presión de poro. Este ensayo se realizó permitiendo que tanto la deformación axial como la presión de poro se estabilizaran en cada incremento de carga, antes de colocar el siguiente. Se designa esta prueba como "al 100%".

La figura 3 muestra las relaciones $(\sigma'_1 - \sigma'_3) - \Delta u - s/l$ para el estado normalmente consolidado a una presión de 6 Kg/cm^2 .

La presión de poro presenta un crecimiento que tiende a un valor límite para una deformación porcentual del 14%.

El esfuerzo desviador, $(\sigma'_1 - \sigma'_3)$, alcanza un valor máximo para una deformación porcentual de 13% para la cual la presión de poro crece aún. Esto motiva una discrepancia entre el valor del ángulo de fricción interna referido a esfuerzos efectivos ϕ' , obtenido con el criterio de falla de esfuerzo desviador máximo, con respecto al basado en la relación máxima de los esfuerzos efectivos. Esto ya se ha estudiado (Rosario-1964) para materiales remoldeados, lo mismo que para materiales inalterados (Simons 1960).

2. Prueba con lecturas de presión de poro y aplicación de incrementos de carga al 50% del tiempo requerido para alcanzar la estabilización total de la presión de poro. Este ensayo se realizó aplicando 12 incrementos de carga, esperando para cada incremento, un tiempo de 75 minutos

por incremento, de modo que el tiempo total requerido fue solo el 50% del tiempo total requerido para la prueba al 100%. Esta prueba se designa como la prueba al 50%.

La figura 4 muestra las relaciones $(\sigma'_1 - \sigma'_3) - \Delta u - \delta/\ell$, para el estado normalmente consolidado a 6 Kg/cm^2 . La curva $(\sigma'_1 - \sigma'_3) - \delta/\ell$ es semejante a la del caso anterior en forma. En cambio, la curva $\Delta u - \delta/\ell$ parece sufrir una alteración entre las deformaciones 0% y 6%. Ahora bien, tanto $(\sigma'_1 - \sigma'_3)$ máximo, como en la falla sufren alteraciones en los valores alcanzados en éste caso, con relación a los de la prueba al 100%.

Así $(\sigma'_1 - \sigma'_3)_f^{100\%}$ se reduce en un 8% de su valor en la prueba al 50%, mientras $(\Delta u)_f^{100\%}$ en la falla se incrementa en un 26%.

3. Prueba con lecturas de Presión de Poro y aplicación de incrementos de carga de tal manera que el tiempo total para llevar a la falla el espécimen, fue de la cuarta parte del tiempo total requerido por la prueba al 100%.

Esta prueba será llamada al 25%.

La figura 5, muestra las relaciones $(\sigma'_1 - \sigma'_3) - \Delta u - \delta/\ell$, También en éste caso con una presión de consolidación de 6.0 Kg/cm^2 . Nuevamente la curva $(\sigma'_1 - \sigma'_3) - \delta/\ell$ no sufre alteración en forma y de nueva la curva $\Delta u - \delta/\ell$ sufre una alteración entre las deformaciones 0% y 6%. Esta vez más marcada.

También en esta prueba las variaciones de los valores alcanzados en la falla por el esfuerzo desviador y la presión de poro se hacen más marcados, guardando las siguientes relaciones:

$$\frac{(\sigma_1' - \sigma_3')_f^{25\%}}{(\sigma_1' - \sigma_3')_f^{100\%}} = 0.88 \qquad \frac{(\Delta u)_f^{25\%}}{(\Delta u)_f^{100\%}} = 1.35$$

Los datos en la falla se resumen en el cuadro siguiente:

	$(\sigma_1' - \sigma_3')_f$	$(\Delta u)_f$
Prueba al 100%	4.880 Kg/cm ²	1.515 Kg/cm ²
Prueba al 50%	4.515 "	1.915 "
Prueba al 25%	4.300 "	2.035 "

CIRCULOS DE MOHR

En la figura 6 se presentan los círculos de Mohr correspondientes a las pruebas al 100%, 50%, y 25%. Se observa que los esfuerzos totales varían al variar el esfuerzo desviador máximo para los círculos 1, 2 y 3. Esto da origen a tres círculos cuyo esfuerzo principal menor, σ_3 , es el mismo, 6.0 Kg/cm² pero el esfuerzo principal mayor, σ_1 , aumenta conforme aumenta la velocidad a la que se efectuó la etapa de falla. En cuanto

a los círculos efectivos, caen sobre una única envolvente manteniéndose la relación entre esfuerzos efectivos y totales, mediante la presión de poro, ésta vez medida.

Variaciones relativas entre los desarrollos de la presión de poro durante la etapa de falla, para los casos al 100%, 50% y 25%.

En la figura 7 se presentan las curvas que siguen el desarrollo de la presión de poro contra la deformación porcentual, para las tres pruebas antes comentadas. Se observan en forma más objetiva las alteraciones entre las deformaciones antes mencionadas, para las pruebas al 50% y 25%, con respecto a la trayectoria de la del 100%. Se nota también la posición final de los valores de la presión de poro, invertida, con respecto a la que presentan éstos para el 5% de deformación axial.

Relación entre la presión de poro y el esfuerzo efectivo, en forma adimensional, para las pruebas al 100%, 50% y 25%. Se incluyen en las figuras 3', 4' y 5', la recta de pendiente 3.1, correspondiente a la tercera parte del esfuerzo desviador aplicado, transformado en presión de poro.

En la prueba al 100%, de los puntos experimentales se deduce que la estructura no sufrió casi alteración, siendo solo una parte del efecto del esfuerzo desviador la que influyó para el desarrollo de la presión de poro.

Para la prueba al 50% sucede algo semejante a la anterior, para la primera parte, elevándose la curva hasta alcanzar 0.3 de $\frac{\Delta u}{\sigma_c}$, para 0.75 de $\frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{\sigma_c}$. Para la curva de 25%, ésto se hace más notorio, alcanzando la presión de poro en forma adimensional, un valor de 0.35 $\frac{\Delta u}{\sigma_c}$ para el mismo 0.75 de $\frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{\sigma_c}$.

De lo anterior se puede deducir que al incrementarse la velocidad de deformación con la que se realiza el ensaye, se encontrarán las siguientes características:

1. La curva $\Delta u - \delta l$ sufre alteración de forma entre los valores de la deformación porcentual: 0% y 6%.
2. Los valores de Δu en la falla van siendo mayores a medida que se incrementa la velocidad de deformación.
3. Los valores de $(\sigma_1' - \sigma_3')$ en la falla, van siendo menores cuando la velocidad de experimentación va siendo menor.
4. Los círculos de esfuerzos efectivos obtenidos a partir de los valores observados, definen una sola envolvente de falla independientemente de la velocidad de deformación con que se efectuó la prueba.
5. Los valores de la presión de poro en forma adimensional para la primera parte de las pruebas, presentan solo una parte del efecto del esfuerzo desviador. Esto posiblemente se debió a un efecto de consolidación durante la etapa de falla. Esta consolidación fue tal vez motivada por la presencia de algunas burbujas en la conducción,

por deficiencia en la saturación. Estas burbujas, al disminuir su volumen, tomaron agua de la probeta.

De aquí que:

- a) Solo se pueden hacer mediciones de presión de poro cuando se permita que la presión de poro en la base (zona de medición) alcance el valor de la presión de poro en la zona central (zona de falla) o sea que ocurra la igualación de la presión de poro en la probeta. De lo contrario, la curva $\Delta u - \delta/\ell$ será función de la velocidad de experimentación usada.
- b) Los valores de la presión de poro en la falla parecen alterarse notablemente con la velocidad de ensaye. Ya no en los valores medidos en la base, sino en su valor real en la zona de falla, puesto que también se observan las mismas variaciones en $(\sigma_1' - \sigma_3')$. Esta relación de las variaciones de presión de poro-esfuerzo desviador, confirman el principio de los esfuerzos efectivos.

Relación Presión de Poro-Deformación axial-tiempo para un mismo incremento de carga.

La figura 8 muestra las curvas $\delta/\ell - t$ y $\Delta u - t$ para cada una de las pruebas al 100%, 50%, y 25% para el décimo incremento de carga de éstos ensayos. Se eligió el décimo incremento por ser éste, de los últimos incrementos. Así, se aplicó a los

1560 min en la prueba al 100%

680 min en la prueba al 50%

365 min en la prueba al 25%

es decir, un tiempo tal que la presión de poro motivada por los primeros incrementos ya había alcanzado su equilibrio en el interior de la probeta, y la deformación axial había sobrepasado el 6%.

Las curvas $\Delta u-t$ y $s/p-t$ al 100% tienen la forma típica que han sido encontradas cuando el equilibrio se alcanza. Nótese que en la prueba al 50% éstas relaciones experimentan un marcado crecimiento siendo aún más notable para la prueba al 25%. Visto el desarrollo de la presión de poro en éste incremento aislado, nada hay que permita asegurar que las variaciones señaladas "no se deban" a la suma de los efectos retrazados de incrementos anteriores. Solo en las relaciones correspondientes a las pruebas, como un conjunto, fig 7, puede señalarse como posible una dependencia en el desarrollo de la presión de poro y la velocidad de experimentación.

Comentario acerca del tiempo de Respuesta del aparato.

Para un aparato medidor de presión de poro del tipo indicador mediante nivel agua-mercurio, el tiempo de respuesta es definido por Bishop y Henkel, 1957, como el tiempo "t" requerido por una pequeña presión interna no balanceada en la muestra, Δp para producir un desplazamiento Δx de la superficie agua-mercurio en el tubo capilar indicador.

Bishop 1961; logró expresarlo analíticamente

$$t = \frac{\pi}{4} \gamma_w \frac{1}{k C_v} \left(\frac{d}{D} \frac{\Delta x}{\Delta p} \right)^2$$

donde:

γ_w = Peso unitario del agua

k = coeficiente de permeabilidad del suelo

C_v = coeficiente de consolidación obtenido de la consolidación en la cámara triaxial

d = diámetro del tubo capilar

D = diámetro de la muestra

En el presente trabajo, no se pudo estudiar la influencia en el tiempo de respuesta, de todas esas variables. Sin embargo se pudo comprobar en éste caso, para una arcilla de alta compresibilidad, baja permeabilidad y Δp fluctuando entre 100 y 200 gramos/cm², que el tiempo de respuesta es menor a un minuto. Esto es, si cada incremento motivaba una elevación en la presión de poro correspondiente a la zona central de la muestra de 100 a 200 gr/cm², antes de un minuto, se acusaban desplazamientos en el capilar indicador. Debe recordarse que se usaron filtros laterales.

Comentario acerca del tiempo de equilibrio.

En aparatos triaxiales, debido a las restricciones en las cabezas, la presión de poro que se crea al incrementar el esfuerzo desviador, $(\sigma_1' - \sigma_3')$, no es uniforme en toda la mues

tra, Bishop, Henkel 1957, sino que es mayor en la zona central, de modo que si se hacen mediciones en la base, es necesario si se desea aplicar éstos datos a estudios de estabilidad basados en esfuerzos efectivos, esperar que la presión de poro se haya equilibrado en toda la muestra. En las pruebas realizadas se observó que el tiempo de equilibrio, dependía de:

1. Magnitud del incremento de carga.

La secuela seguida fue la de llegar a la falla con un mínimo de 10 incrementos, siendo los 5 iniciales, el doble en magnitud de los restantes. Así se vió que independientemente de la presión de cámara (se hicieron pruebas con presiones de cámara de 2, 4, y 6 kg/cm^2) los cinco incrementos iniciales tardaban unas tres horas en promedio para alcanzar el equilibrio, mientras que para los finales, solamente era necesaria una hora y media.

2. Situación de los incrementos.

Se notó, en las pruebas realizadas, que el segundo incremento era el de más larga duración, siendo necesarios 310 minutos para alcanzar el equilibrio, en la prueba de 4 Kg/cm^2 , para ése segundo incremento de carga.

Por el contrario, los incrementos cercanos a la falla tomaban cerca de 60 minutos para alcanzar el equilibrio.

CONCLUSIONES

Equipo

Cámara triaxial. El sistema de drenaje, debe ser rediseñado teniendo en cuenta su función. Evitar fugas en todo el sistema, y permitir, mediante trayectorias suaves en conductos y válvulas, el libre paso de fluidos (agua, aire).

Aparato de presión de poro. Deberá modificarse en forma conveniente el sistema de saturación, evitando trayectorias con quiebres en ángulo recto, válvulas, etc. El cilindro metálico que contiene el mercurio, disminuye su volumen mediante la deformación de un diafragma controlado mediante una manivela. Esto permite equilibrar la presión generada en la probeta. Se señalan dos inconvenientes. El diafragma, por su forma de trabajo en cierta posición se deforma bruscamente, dando lugar a desplazamientos de la superficie agua-mercurio, perjudiciales. La revisión de éste diafragma, debe hacerse sistemáticamente, lo cual requiere el total desmontado del aparato, que toma considerable tiempo.

Procedimientos.

Saturación. Deberá idearse otra forma de saturar el conjunto probeta-membranas-cabezas, cuando se usen filtros laterales, para evitar aire entrampado, ó hacer la corrección ne-

cesaria. Filtros laterales. Se puede asegurar que reducen el tiempo de consolidación, aún cuando presentan problemas de saturación.

Resultado de las Pruebas

1. Cuando se realizan pruebas consolidadas no drenadas con medición de presión de poro en la base, es necesario que se permita la igualación de la presión de poro en la probeta, entre la base y la zona de falla. De lo contrario, la presión de poro, será función de la velocidad de experimentación usada.
2. Los valores de la presión de poro en la falla, parecen alterarse notablemente con el tiempo necesario para alcanzar la falla, aumentando con la velocidad de experimentación.
3. Los valores del esfuerzo desviador en la falla disminuyen al aumentar el tiempo necesario para alcanzar la falla.
4. Las relaciones entre el esfuerzo desviador y la presión de poro en la falla representadas mediante el diagrama de Mohr, permiten encontrar una sola envolvente de esfuerzos efectivos, aún variando el tiempo necesario para alcanzar la falla.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a la fundación de Ingeniería, A. C., el haberle permitido mediante una beca, efectuar los estu-

dios, y la presente tesis, para obtener el grado de Maestro en Ingeniería.

También agradece a los profesores que intervinieron en su formación, especialmente al Dr. Eulalio Juárez Badillo, director de éste trabajo.

Muestra su gratitud, para la División del Doctorado de Ingeniería, al permitir desarrollar un programa de investigación en el Laboratorio de Mecánica de Suelos, así también como a la Sección de Mecánica de Suelos del Instituto de Ingeniería.

Expresa finalmente su gratitud, para las personas que directa ó indirectamente hicieron posible este trabajo.

Del programade Investigación de Mecánica de Suelos elaborado en la División del Doctorado de Ingeniería se desprende de la presente tesis. Dicho programa se elaboró en su totalidad conjuntamente por el Ing. Tabaré Rosario Mustafá y el autor.

CUADRO 1. RESULTADOS DEL PROGRAMA DE PRUEBAS DE COMPRESION NO CONFINADA

Probeta No.	Peso inicial grm	Edad horas	ω %	e	G	σ_1 para el 0.05 de δ/l	δ/l para el 0.1 de σ_1	σ_1 para $\delta/l=0.10$	Tipo de falla
1	141.5	0 días	68	1.73	0.99	0.250	20.2 %	0.400	cónica plástica
2	138.0	0 días	67	1.60	1.0	0.290	20.4 %	0.400	cónica plástica
3	137.1	0 días	67	1.73	0.98	0.320	19.8 %	0.400	abombada plástica
5	133.80	3 días	66	1.72	0.97	0.44	17.5 %	0.500	piano a 70° grieta
6	133.8	3 días	68	1.80	0.96	0.55	18.2 %	0.600	cono
7	134.1	9 días	68.5	1.84	0.94	0.465	17.8 %	0.570	falla 60°
8	132.8	9 días	68	1.78	0.97	0.520	17.2 %	0.570	cono al centro

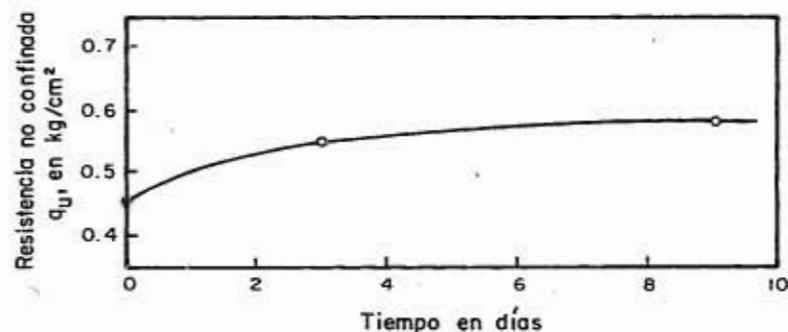


Fig. 1 Resistencia máxima no confinada-tiempo

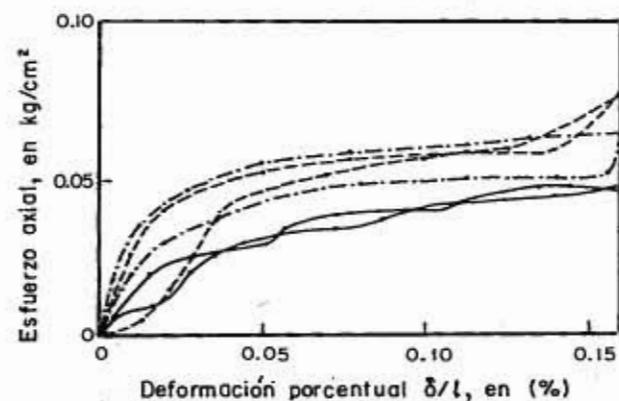


Fig. 2 Curvas esfuerzo-def. porcentual, en pruebas no confinadas

Fig. 3 Curvas esfuerzo desviador - deformación porcentual y presión de poro defor. porcentual

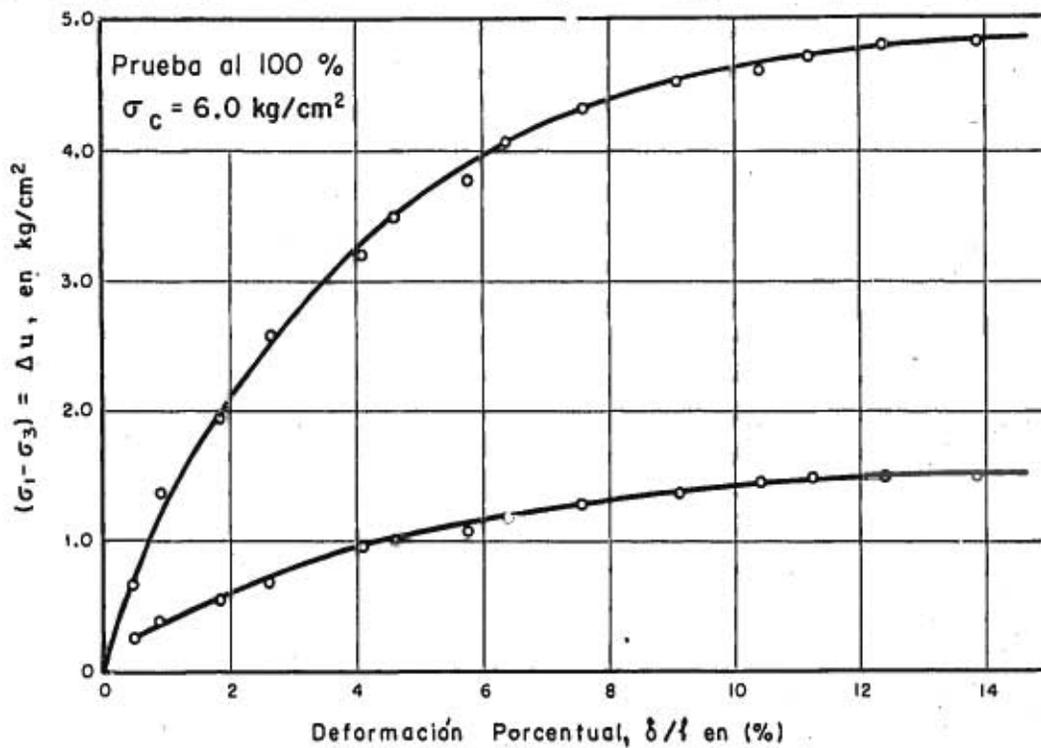


Fig. 3' Relaciones adimensionales entre el esfuerzo desviador y la presión de poro

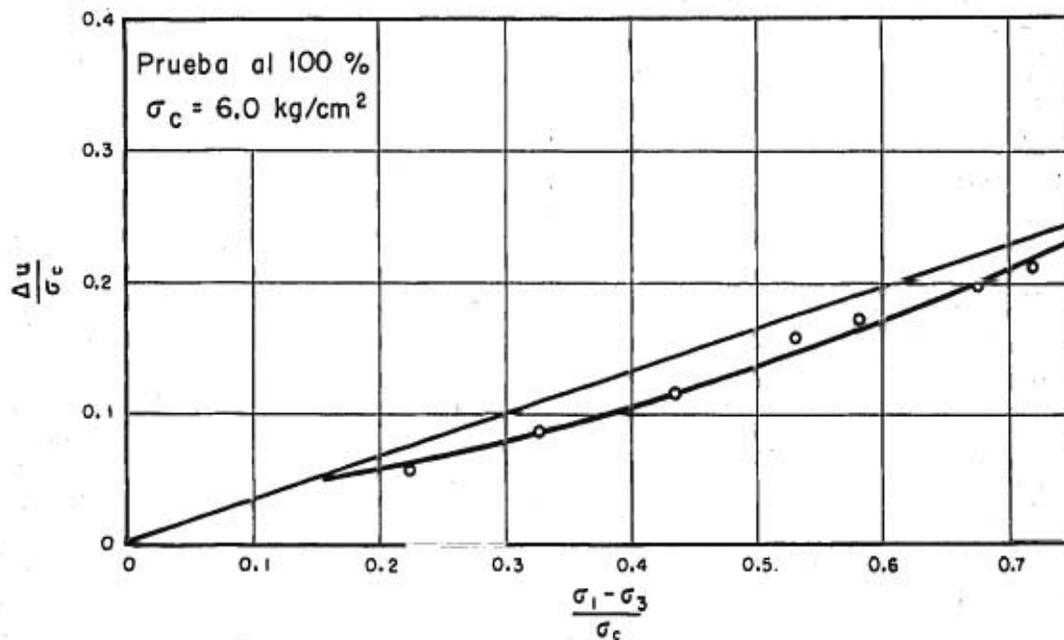


Fig. 4 Curvas esfuerzo desviador - deformación porcentual y presión de poro defor. porcentual

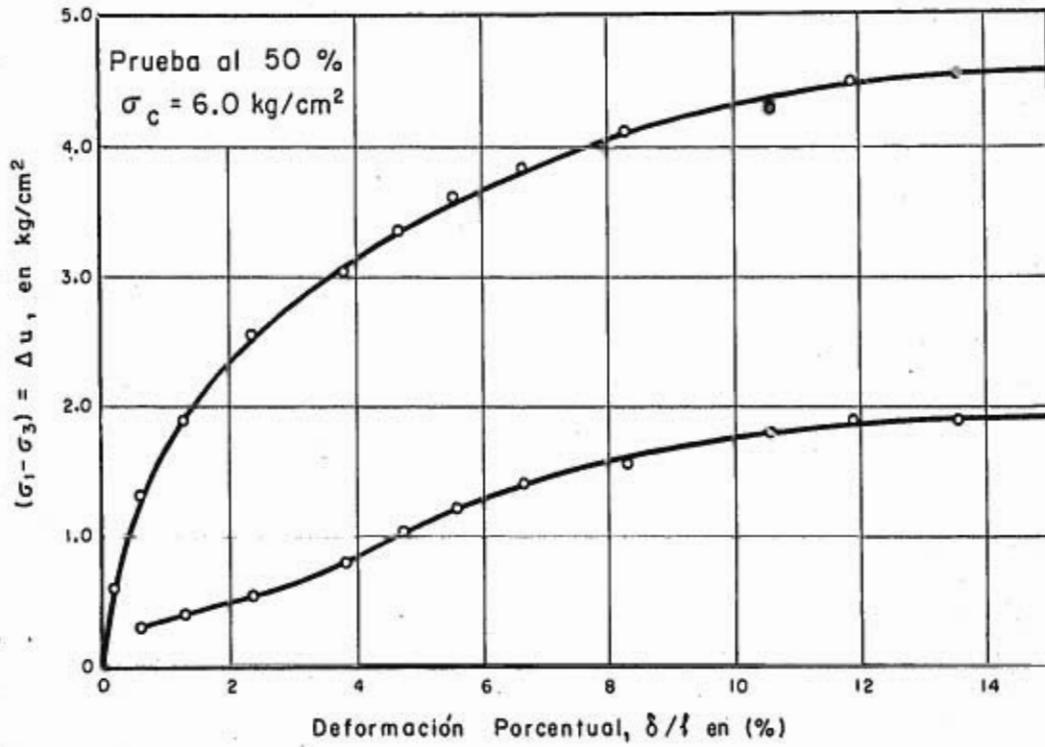


Fig. 4' Relaciones adimensionales entre el esfuerzo desviador y la presión de poro

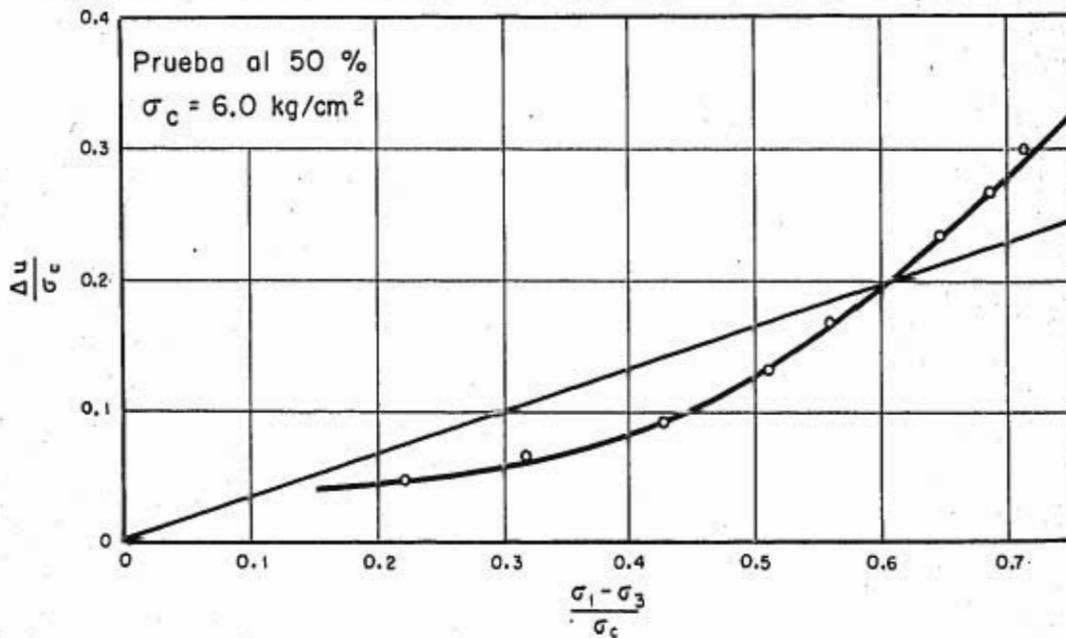


Fig. 5 Curvas esfuerzo desviador - deformación porcentual y presión de poro defor. porcentual

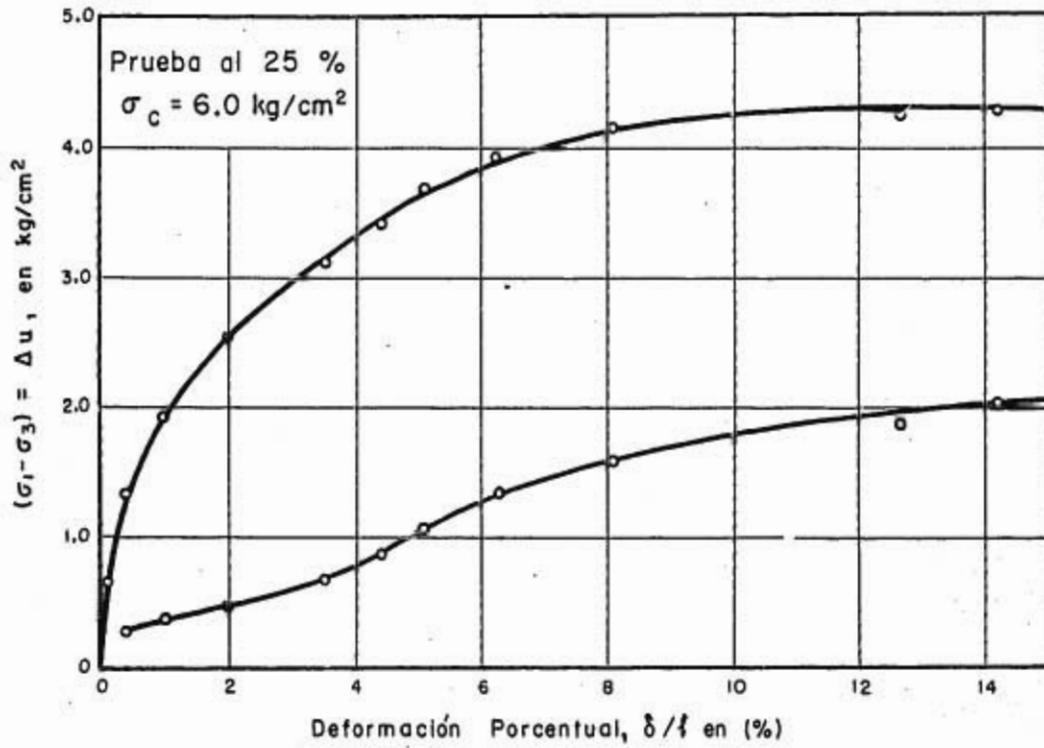
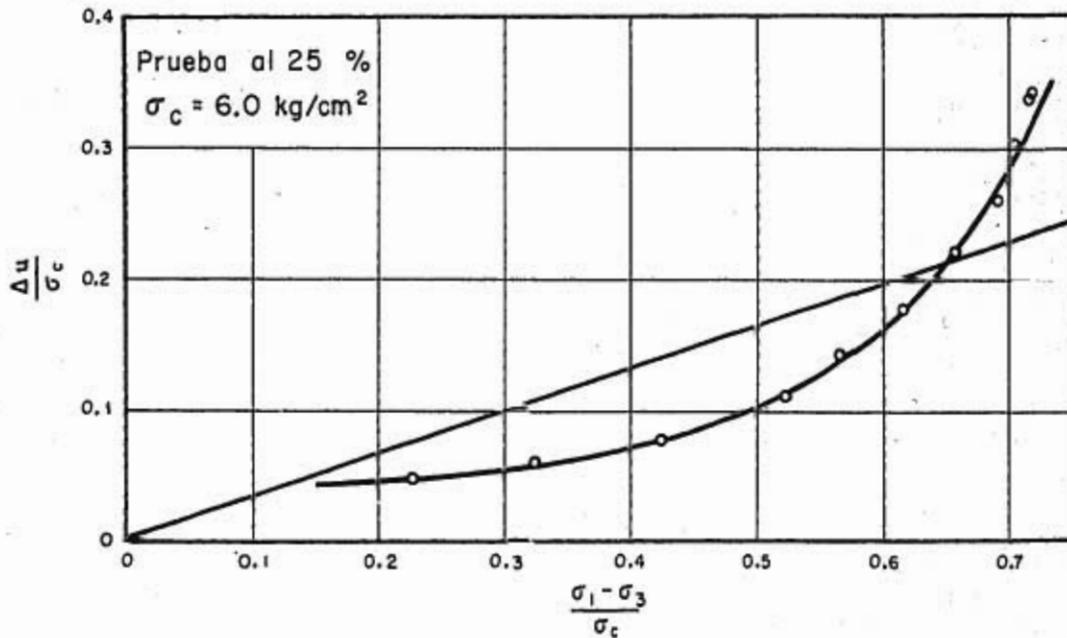


Fig. 5' Relaciones adimensionales entre el esfuerzo desviador y la presión de poro



Prueba	$(\sigma'_1 - \sigma'_3)_m$	Δu_m^k	$\bar{\sigma}_1$	$\bar{\sigma}_3$	σ_1	σ_3
100%	4.880	1.515	9.365	4.485	10.880	6.000
50%	4.515	1.915	8.600	4.085	10.515	6.000
25%	4.300	2.035	8.265	3.965	10.300	6.000

Fig. 6 Diagrama de Mohr, para las pruebas al 100%, 50% y 25%

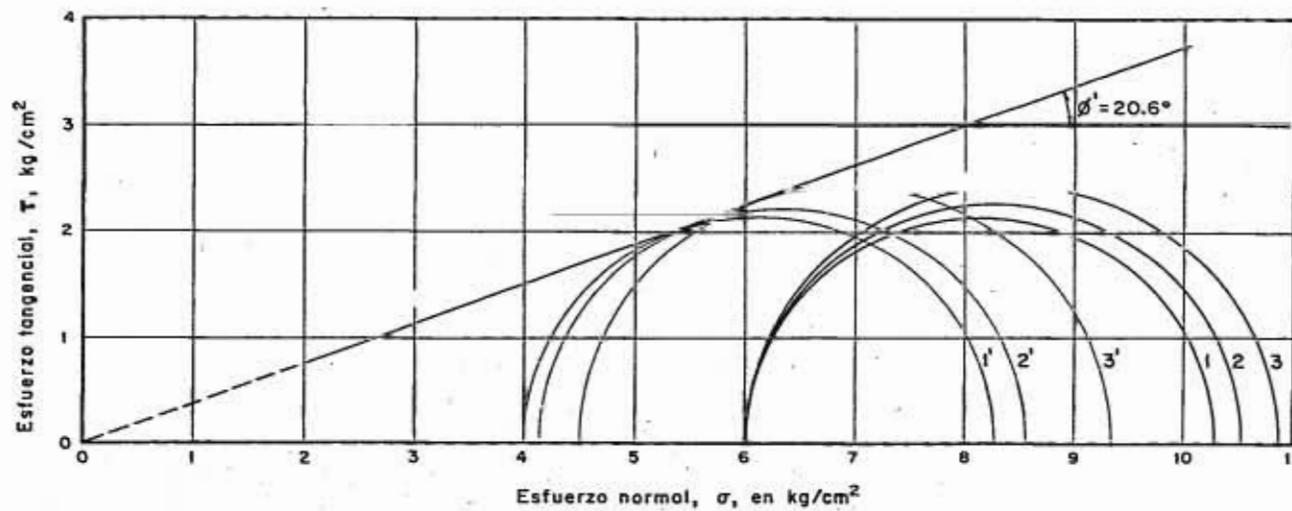


Fig. 7 Curvas presión de poro - deformación porcentual, durante la etapa de falla, para las pruebas al 100%, 50% y 25%

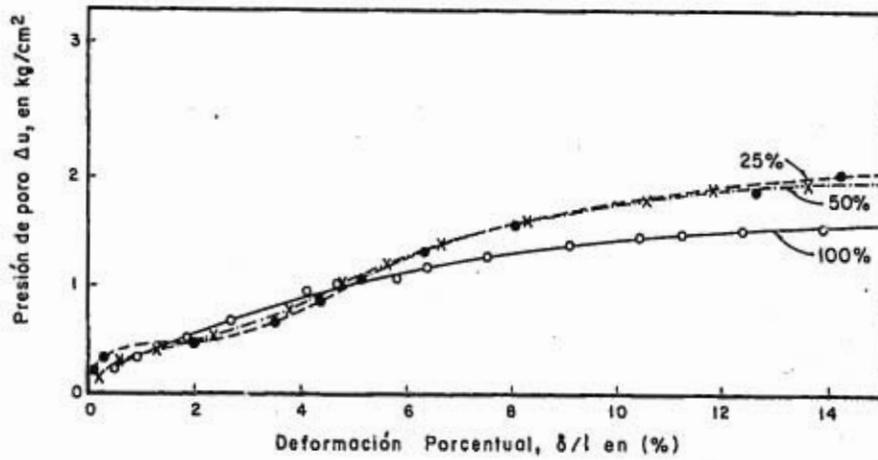
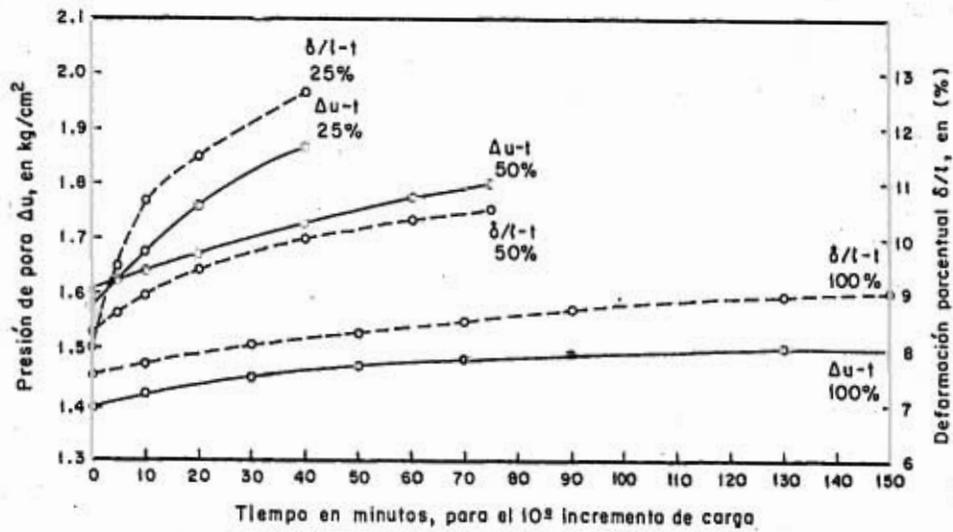


Fig. 8 Curvas presión de poro - tiempo, def. porcentual - tiempo, para el 10^2 incremento, para las pruebas al 100%, 50% y 25%



BIBLIOGRAFIA

1. Bishop A.W. (1960) The Measurement of Pore Pressure in the Triaxial Test. Butterworths.
2. Bishop A.W. and Henkel D.J. (1957) The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test. Arnold.
3. Bishop A.W. and Bjerrum L. (1960) The relevance of the Triaxial Test to the solution of Stability Problems. Shear Conference. Boulder Colorado.
4. Bjerrum L. and Simons N. E. (1960) Comparison of Shear Strength Characteristics of Normally Consolidated Clays. Shear Conference. Boulder Colorado.
5. Henkel D.J. (1960) The Shear Strength of Saturated Remoulded Clays. Shear Conference. Boulder Colorado.
6. Henkel D.J. (1960) The relationships between the Strength, Pore-Water Pressure, and Volumen Change characteristics of Saturated Clays. Geotechnique Vol 9, No. 3, pp. 143-147.
7. Henkel D.J. (1956) The Effect of Overconsolidation on the behaviour of clays during shear. Geotechnique, Vol. 6, pp. 139-150.
8. Hirschfeld R.C. (1963) (Unpublished) Stress-Deformation and Strength Characteristics of Soils.
9. Juárez-Badillo E. (1963) A new approach to the Mechanics of Soil Behaviour. II Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos y Fundaciones. Brasil.
10. Juárez-Badillo E. (1963) Pore Pressure Functions in Saturated Soils. Symposium on Laboratory Shear Testing of Soils. Ottawa, Canada.
11. Juárez-Badillo E. y Rico R. (1963) Mecánica de Suelos. Tomo 1. México.
12. Lo K.Y. (1961) Stress-Strain Relationship and Pore Water Pressure characteristics of a Normally Consolidated Clay. Norwegian Geotechnical Institute. Publication 45. pp.37-44.

13. Marsal R.J. y Salazar R. Pore Pressure and Volumetric Measurements in triaxial Compression tests. Shear Conference, Boulder Colorado, 1960.
14. Rosario T.M. (1964) Influencia del grado de preconsolidación en la resistencia y en el desarrollo de la presión de poro en una arcilla remoldeada. Tesis de Maestría. UNAM.
15. Simons N. E. (1960) The effect of overconsolidation on the Shear-Strength characteristics of an undisturbed Oslo Clay. Shear Conference. Boulder Colorado.
16. Whitman V. R. (1960) Some considerations and data regarding the Shear Strength of Clays. Shear Conference, Boulder Colorado.