

01103
ley
1

**PRUEBAS TRIAXIALES DE COMPRESION NO DRENADAS, EN
ARCILLA INALTERADA DEL VALLE DE MEXICO**

RICARDO CAMPOS CAMPOS

T E S I S

**Presentada a la División de Estudios de
Posgrado de la
FACULTAD DE INGENIERIA
de la
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
como requisito para obtener
el grado de**

**MAESTRO EN INGENIERIA
(Mecánica de Suelos)**

CIUDAD UNIVERSITARIA

1985

**TESIS CON
FALLA DE COPIA**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

CONTENIDO GENERAL.

PRESENTACION.

AGRADECIMIENTO.

TITULO.

INDICE.

LISTA DE FIGURAS.

CAPITULO I.- INTRODUCCION.

CAPITULO II.- PLANTEAMIENTO TEORICO.

CAPITULO III.- TRABAJO DE LABORATORIO.

CAPITULO IV.- RESULTADOS DE LABORATORIO.

CAPITULO V.- OBSERVACIONES GENERALES DE
PROCEDIMIENTO.

CAPITULO VI.- CONCLUSIONES.

LISTA DE SIMBOLOS.

BIBLIOGRAFIA.

ANEXO A.- TABLAS DE CALCULO.

ANEXO B.- RESTITUCION DE LA RESISTENCIA
EN COMPRESION SIMPLE.

I N D I C E

	PAG.
I.- INTRODUCCION.	
I.1.- Antecedentes	1
I.2.- Objetivos	2
I.3.- Alcance	3
II.- PLANTEAMIENTO TEORICO.	
II.1.- Ley de compresibilidad -- bajo estado de esfuerzos isotró- picos	5
II.2.- Teoría de los parámetros α y β	7
II.3.- Resistencia al corte no - drenada	9
III.- TRABAJO DE LABORATORIO.	
III.1.- Equipo y materiales	11
III.2.- Operación y tratamiento de las muestras	17
III.3.- Consolidación en pruebas C U	21
III.4.- Prueba de "compresibili- dad-expansibilidad"	33
III.5.- Medición de la presión - de poro en pruebas C U	40
III.6.- El suelo estudiado	45
Propiedades índice	46
Propiedades mecánicas	47
III.7.- Pruebas realizadas	48
IV.- RESULTADOS DE LABORATORIO.	
IV.1.- Valores representativos	49
IV.2.- Pruebas índice	50
IV.3.- Compresibilidad	52
IV.4.- Parámetros α y β , de la teo- ría de presión de poro	54

	PAG.
IV.5.- Resistencia y relación -- "esfuerzo-deformación axial"	60
IV.6.- Comparación entre valores calculados con los parámetros -- promedio y los valores medidos	66
V.- OBSERVACIONES GENERALES DE PRO-- CEDIMIENTO.	
V.1.- Respecto al suelo	72
V.2.- Respecto al equipo	73
V.3.- Respecto a los resultados ...	75
VI.- CONCLUSIONES.	
VI.1.- Conclusiones	79
LISTA DE SIMBOLOS	82
BIBLIOGRAFIA	85
ANEXO A (Tablas de cálculo)	a.1
A.1.- Resumen de propiedades du- rante la realización de las prue- bas	a.2
PRUEBA "COMPRESIBILIDAD-EXPANSI- BILIDAD":	
A.2.- Cálculo de los puntos expe- rimentales de la curva de compré- sibilidad	a.5
A.3.- Cálculo de la curva teóri- ca de compresibilidad para $\bar{p}=0.42$ y $\bar{p}_p=0.068$	a.6
PRUEBAS CU:	
A.4.- Cálculo de las curvas nor- malizadas entre la presión de cá- mara \bar{p}_{co} , "presión de poro-es- fuerzo desviador"	a.7
A.5.- Cálculo del parámetro α	a.10
A.6.- Cálculo del parámetro β	a.11

	PAG.
A.7.- Curva teórica ($u-A\sigma$); para $\alpha=0.35$ y $\beta=3.5$	a.12
A.8.- Cálculo de las curvas teó- ricas normalizadas entre la pre- sión de cámara σ_{co} , para $\alpha=0.35$ y $\beta=3.5$	a.13
A.9.- Cálculo de r	a.15
A.10.- Cálculo de las curvas: - "esfuerzo desviador-deformación unitaria axial"	a.16
A.11.- Cálculo de resistencia -- teórica para $r=0$, $r=0.016$ y - $r=0.057$	a.19
ANEXO B (restitución de la re- sistencia en compresión simple)....	b.1
B.1.- Comentarios generales	b.2
B.2.- Tablas de cálculo	b.5
B.3.- Curvas esfuerzo-deformación..	b.11
B.4.- Gráfica "restitución de la resistencia-tiempo"	b.17
B.5.- Conclusiones y recomenda- ciones	b.18

LISTA DE FIGURAS.

Número:	Descripción:	Página:
II.1	Esquema de una curva de compresibilidad	5
III.1	Esquema operacional del equipo de prueba	12
III.2	Esquema del sistema de 3 manómetros de mercurio para medir presiones mayores a 3 Kg/cm ²	14
III.3	Dimensiones y colocación de la rejilla de papel filtro	17
III.4	División de las muestras	18
De III.5 a III.12	Curvas de consolidación correspondientes a las pruebas consolidadas no drenadas	22, 23, 24, 26 27, 30, 31 y 32.
De III.13 a III.15	Curvas de consolidación correspondientes a la prueba de "compresibilidad-expansibilidad"	37, 38 y 39.
III.16	Variación del parámetro B, de Skempton, con la presión confinante y la contrapresión	41
III.17	Curvas "presión de poro-presión de cámara", en las pruebas Nos. 2, 3, 4 y 5	44
III.18	Carta de plasticidad	46
IV.1	Curva teórica de compresibilidad y puntos experimentales	53
IV.2	Curvas teóricas "presión de poro esfuerzo desviador" y puntos experimentales	55

Número:	Descripción:	Página:
De IV.3	Puntos experimentales y curvas teóricas "variación de la presión de poro esfuerzo desviador", normalizadas entre la presión de cámara σ_{co}	56, 57, 58 y 59.
IV.7	Círculos de Mohr y envolventes de falla correspondientes a las pruebas consolidadas no drenadas	61 y 62.
y IV.8		
IV.9	Curvas "esfuerzo-deformación axial" de las pruebas consolidadas no drenadas	64 y 65.
y IV.10		
IV.11	Resistencias y presiones de poro en la falla. Pruebas CU	71
De B1 a B6	Curvas "esfuerzo-deformación axial" de las pruebas de compresión no confinadas	de b.11 a b.16
B7	Gráfica "restitución de la resistencia-tiempo"	b.18

I.- INTRODUCCION.

I.1.- Antecedentes.-

Desde hace algunos años, en los momentos en que la Mecánica de Suelos experimentaba un gran desarrollo en el mundo, surgió en México una línea de pensamiento que por novedosa y radical, ha ido dándose a conocer poco a poco hasta la fecha por su autor Eulalio Juárez Badillo.

Para el responsable de esta tésis, estas nuevas ideas son sumamente atractivas por la lógica que presentan, ya que tienden a interpretar los fenómenos del comportamiento mecánico de los suelos en un ámbito unificador. Como ejemplo, se cita el caso de la teoría de los coeficientes α y β , que a diferencia de la teoría de los coeficientes A y B de presión de noro de A. W. Skempton, son valores estables y no cambian como aquéllos, con el nivel de esfuerzo y con el grado de preconsolidación. Otro ejemplo es el coeficiente de compresibilidad λ , que rige tanto la compresión como la expansión de los suelos, manteniendo el suelo en este caso, una cantidad de esfuerzo almacenado.

Aunque ésta y otras ideas, ya han sido checadas por su autor, en resultados de pruebas triaxiales estándar realizadas en la arcilla de Weald, como parte de una serie de pruebas efectuadas en el Imperial College of Science and Technology.- University of London, por los investigadores Gilbert, Plant, Parry y Henkel. La importancia que tiene para los especialistas, la arcilla del Valle de México originó el desarrollo de la presente investigación, donde se trató modestamente de cubrir sólo una pequeña parte de la experimentación antes mencionada, obviamente con todas las limitaciones humanas de tiempo y de equipo existentes. De esta manera, se investigó únicamente el comportamiento de la arcilla del Valle de México en pruebas de compresión triaxial consolidadas no drenadas, con medición de presión de poro.

I.2.- OBJETIVOS:

Los principales objetivos de esta investigación, son los siguientes:

1.- Considerar como material de estudio -- a la arcilla del Valle de México, que -- si bien ha sido estudiada intensamente por algunos importantes investigadores, debido a la gran necesidad que se ha tenido de conocer su comportamiento mecánico, como -- suelo de cimentación del gran asentamiento humano que es el Distrito Federal, cualquier otra investigación de ese comportamiento bajo otras interpretaciones teóricas, como son las teorías de Eulalio Juárez Badillo, en relación a las pruebas de compresión triaxial, que son actualmente las de mayor aplicación en los problemas prácticos, es sumamente importante para el mejor entendimiento de sus propiedades mecánicas.

2.- Seguir el desarrollo de la presión de -- poro durante las pruebas de resistencia al corte no drenada, y compararlo con lo que es de esperarse de acuerdo con la teoría de los coeficientes α y β , del investigador antes mencionado.

3.- Medir e interpretar la resistencia al -- corte no drenada, así como las relaciones esfuerzo-deformación, según la misma línea de investigación.

4.- Realizar experiencias de laboratorio -- que pudieran ayudar a definir algunas -- de las dificultades que pueden presentarse en el seguimiento del comportamiento mecánico del suelo, durante el desarrollo de las pruebas de compresión triaxial consolidada no drenada, con medición de presión de poro.

I.3.- Alcance.-

Este trabajo se basa en la realización de -- 5 pruebas de compresión triaxial consolidadas no drena-- das (pruebas C U'), con medición de presión de poro y una prueba de "compresibilidad-expansibilidad" bajo esfuer-- zos isotrópicos, en probetas de arcilla inalterada obte-- nidas de dos muestras tomadas con tubo de pared delgada_ de 5 pulgadas de diámetro interior a profundidades entre 7.44 m y 7.90 m, en el centro de la Ciudad de México.

Las pruebas antes mencionadas fueron realizadas en_ equipo estándar perteneciente al Laboratorio de Mecánica de Suelos de la División de Estudios de Postgrado de la_ Facultad de Ingeniería de la U.N.A.M.

Los resultados obtenidos fueron procesados e inter-- pretados de acuerdo a las teorías de Eulalio Juárez Badi_ llo, cuyos planteamientos teóricos se presentan en el -- Capítulo II, donde se menciona lo relativo a la ley de - compresibilidad bajo esfuerzos volumétricos; la teoría - de los parámetros α y β , que explica la variación de la presión de poro, durante la realización de una prueba de compresión triaxial no drenada; y la resistencia al corte en el mismo tipo de prueba.

En el Capítulo III, se hace una exposición de los - conceptos y actividades correspondientes al trabajo de - Laboratorio, mencionándose el material y equipo utiliza-- dos, las operaciones de prueba, el suelo estudiado y las pruebas realizadas.

El Capítulo IV, contiene los resultados de las prue_ bas de laboratorio; el Capítulo V, está formado por un - conjunto de ideas que intentan subrayar algunos de los - procedimientos más importantes aplicados en esta investi_ gación; mientras que el Capítulo VI, comprende las con-- clusiones a las que llegó el autor de esta tesis.

Finalmente, se presentan dos Anexos de la manera siguiente: en el Anexo A, las Tablas de Cálculo. Y en el Anexo B, algunas experiencias adicionales sobre la restitución de la resistencia a la compresión simple, en las arcillas estudiadas. Tema que se desarrolló, debido a que el alcance original de este trabajo comprendía igual número de pruebas a las mencionadas en los capítulos anteriores, realizadas en arcilla remoldeada. Lo que no se realizó por falta de suelo adecuado.

II.- PLANTEAMIENTO TEORICO.

II.1.- Ley de compresibilidad bajo estado de esfuerzos isotrópicos.

Eulalio Juárez Badillo, considerando una arcilla remoldeada (isotrópica), postula una ley de compresibilidad -- que es:

$$\frac{dv}{v} = -\gamma \frac{d\sigma}{\sigma} \dots\dots\dots(1)$$

donde γ es el coeficiente de compresibilidad de la -- arcilla.

De esta expresión, llega a:

$$\frac{v}{v_0} = \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{-\gamma} \dots\dots\dots(2)$$

que para la Mecánica de Suelos, escribe como:

$$\frac{1+e}{1+e_0} = \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{-\gamma} \dots\dots\dots(3)$$

Si en dicha prueba, después de alcanzar el máximo es-- fuerzo isotrópico σ_p , el suelo es descargado hasta -- un valor cualquiera σ_c , éste se expande, según la -- figura siguiente:

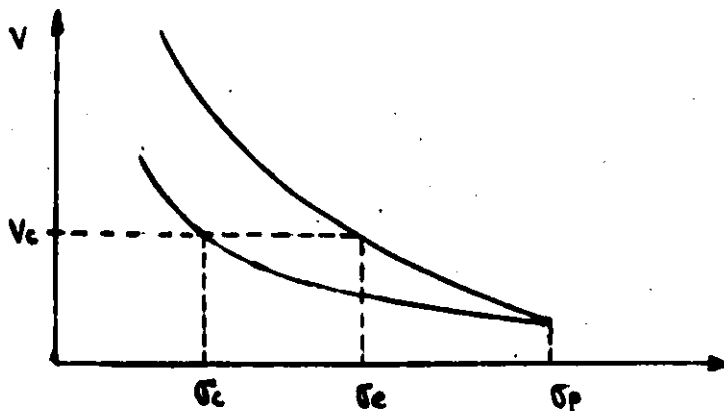


FIGURA II.1.- Esquema de una curva de compresibilidad

Tomando, de la fig. XIII.1., del Cap. XIII, del tomo I - de Mecánica de Suelos, tercera edición. Juárez Badillo-Rico Rodríguez.

La ley de expansión se produce con una liberación parcial del esfuerzo: $(\rho \cdot \frac{d\sigma}{\sigma})$, donde $\rho < 1.0$; quedando la otra parte del esfuerzo, almacenado en la estructura del suelo, y establece:

$$\frac{dv}{v} = -\gamma\rho \frac{d\sigma}{\sigma} \dots\dots\dots (4)$$

llegando a: $\frac{v}{v_0} = \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^{-\gamma\rho}$

si $\gamma \cdot \rho = \gamma_p =$ coeficiente de expansibilidad

$$\rho = \frac{\gamma_p}{\gamma} \dots\dots\dots (5)$$

que llama relación "expansibilidad-compresibilidad".

De la misma figura, para el volumen V_c que corresponde a una presión isotrópica σ_c , en la curva de expansión, la arcilla no soporta σ_c sino que la presión equivalente σ_e en la curva virgen de compresibilidad, quedando en el suelo una presión almacenada $\sigma_s = \sigma_e - \sigma_c$.

Con base en esto, escribe para la curva de expansión:

$$\frac{dv}{v} = -\gamma \frac{d\sigma_e}{\sigma_e} \dots\dots\dots (6)$$

igualando 6 y 4, llega a:

$$\frac{\sigma_e}{\sigma_{e0}} = \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^{\rho} \quad \text{donde} \quad \sigma = \sigma_c$$

Aquí toma como punto inicial el esfuerzo máximo alcanzado en la prueba σ_p (esfuerzo de preconsolidación) y opera algebraicamente de tal manera que llega a:

$$\frac{\sigma_e}{\sigma_c} = \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_c} \right)^{1-p}$$

que es la relación del factor de preconsolidación $\frac{\sigma_e}{\sigma_c}$, con el grado de preconsolidación $\frac{\sigma_p}{\sigma_c}$.

II.2.- Teoría de los parámetros α y β .-

II.2.a.- En arcillas normalmente consolidadas.

En esta teoría, su autor considera que la presión de poro está compuesta por dos sumandos, uno debido a la componente isotrópica $\Delta u = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$

que en las pruebas realizadas en esta tesis, se reduce a: $(\Delta u)_i = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3}$

y el otro, debido a la componente desviadora provocada por la perturbación de la arcilla al cambiar de forma. Ya no pudiendo soportar la presión σ_{co} , por lo que en la falla, el agua tendrá que cargar con una fracción $\alpha \sigma_{co}$.

Donde $\alpha < 1.0$; por lo que resulta: $(\Delta u)_d = \alpha \sigma_{co}$ que durante el desarrollo de la prueba expresa como:

$$(\Delta u)_d = \alpha \sigma_{co} \left[\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_1 + \sigma_3)_f} \right]^p$$

donde $\left[\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_1 + \sigma_3)_f} \right]^p$, la llama función de sensibilidad que expresa en función de los esfuerzos cortantes, por no poderlo hacer en función de las deformaciones tangenciales, por falta de sistemas de medición adecuados.

Así:

$$\Delta u = (\Delta u)_i + (\Delta u)_d$$

Por lo anterior, la presión de poro queda expresada en forma adimensional, como:

$$\frac{\Delta u}{\sigma_{co}} = \frac{1}{3} \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{co}} + \alpha \left[\frac{\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{co}}}{\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{co}} \right)_f} \right]^p$$

II.2.b.- En la arcilla preconsolidada.

En este caso, la expresión de la presión de poro en la falla es:

$$(\Delta u)_f = \frac{1}{3} (\sigma_1 - \sigma_3)_f + \alpha \sigma_{co} \left(\frac{\sigma_{co}}{\sigma_{eo}} \right) - \alpha (\sigma_{eo} - \sigma_{co})$$

donde el segundo sumando, modificado respecto a la perturbación de suelo normalmente consolidado, de tal manera que sea menor conforme la arcilla sea más preconsolidada.

Y el tercer sumando corresponde a la porción de presión almacenada liberada por el suelo en el momento de la falla, donde α , es el mismo factor mencionado en la teoría.

Esta expresión escrita en forma adimensional, queda:

$$\left(\frac{\Delta u}{\sigma_{co}} \right)_f = \frac{1}{3} \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{co}} \right)_f - \alpha \left(\frac{\sigma_{eo}}{\sigma_{co}} - 1 - \frac{\sigma_{co}}{\sigma_{eo}} \right)$$

igualmente, como en el caso de las arcillas normalmente consolidadas, introduciendo la función de sensibilidad, la presión de poro en cualquier momento de la prueba triaxial es:

$$\frac{\Delta u}{\sigma_{co}} = \frac{1}{3} \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{co}} \right) - \alpha \left(\frac{\sigma_{eo}}{\sigma_{co}} - 1 - \frac{\sigma_{co}}{\sigma_{eo}} \right) \left[\frac{\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{co}} \right)}{\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{co}} \right)_f} \right]^p$$

II.3.- Resistencia al corte no drenada.

II.3.a.- Arcillas normalmente consolidadas.

En este caso, considera al material puramente friccionante, así como inclinaciones de las superficies críticas de falla, a 45 grados. Debido a esto:

$$\left(\frac{\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_3}{2} \right)_f = \left(\frac{\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_3}{2} \right)_f \tan \theta$$

$$\text{y si } \bar{\sigma}_1 = \sigma_1 - u \quad \text{y} \quad \bar{\sigma}_3 = \sigma_3 - u$$

$$\text{siendo } u = \Delta u = \frac{1}{3} (\sigma_1 - \sigma_3)_f + \alpha \sigma_{co}$$

en el instante de la falla, para la prueba de compresión aumentando el esfuerzo axial:

$$\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_3 = 2(1 - \alpha) \sigma_{co} + \frac{1}{3} (\sigma_1 - \sigma_3)$$

que sustituida en la expresión de la resistencia, para despejarla y normalizarla con σ_{co} , resulta:

$$\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{co}} \right)_f = \frac{2(1 - \alpha) \tan \theta}{1 - \frac{1}{3} \tan \theta}$$

II.3.b.- En arcillas preconsolidadas.

Aquí considera una presión almacenada $r(\sigma_e - \sigma_c)$, en los planos críticos de falla a 45 grados con la horizontal, que sumada a la presión efectiva, constituye lo que define como presión fundamental:

$$\sigma_{fund.} = \bar{\sigma} + r \sigma_s = (\sigma - u) + r(\sigma_e - \sigma_c)$$

Por lo que la ley de resistencia queda:

$$s = \sigma_{fund.} \tan \theta$$

Con esto establece:

$$\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right)_f = \left[\left(\frac{\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_3}{2} \right)_f + r (\sigma_{eo} - \sigma_{co}) \right] \tan \vartheta$$

si $\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_3 = 2(\sigma_{co} - u) + (\sigma_1 - \sigma_3)$

donde $u = \Delta u = \frac{1}{3} (\sigma_1 - \sigma_3)_f - \alpha \left(\sigma_{eo} - \sigma_{co} - \frac{\sigma_{co}^2}{\sigma_{eo}} \right)$

En el instante de la falla, para la prueba de compresión aumentando el esfuerzo axial:

$$\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_3 = 2 \left[\sigma_{co} + \alpha \left(\sigma_{eo} - \sigma_{co} - \frac{\sigma_{co}^2}{\sigma_{eo}} \right) \right] + \frac{1}{3} (\sigma_1 - \sigma_3)$$

que sustituida en la expresión de la resistencia, para despejarla y normalizarla con σ_{co} , resulta:

$$\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{co}} \right)_f = \frac{2 \tan \vartheta}{1 - \frac{1}{3} \tan \vartheta} \left[1 + \alpha \left(\frac{\sigma_{eo}}{\sigma_{co}} - 1 - \frac{\sigma_{co}}{\sigma_{eo}} \right) + r \left(\frac{\sigma_{eo}}{\sigma_{co}} - 1 \right) \right]$$

III.- TRABAJO DE LABORATORIO.

III.1.- Equipo y materiales.

La experimentación fue realizada en una -- cámara triaxial estándar cuyas dimensiones son:

Camisa de lucita.	diámetro exterior:	10.172 cm
	diámetro interior:	8.850 cm
	espesor :	0.661 cm
	altura :	19.040 cm
Vástago de carga.	carrera :	9.000 cm
	diámetro :	1.266 cm
	área transversal :	1.259 cm ²

El equipo, fue armado de acuerdo al esquema de la - figura III.1 , para que cumpliera con el objetivo de poder usarse en el desarrollo de las pruebas de compresión triaxial, consolidadas no drenadas, con medición de presión de poro en la base y en la cabeza de la muestra; - para esto, debió contar con un sistema que midiera los - cambios de volumen de la probeta, éste se formó con una - bureta de vidrio (probada con una presión de 5 Kg/cm²) - y conductos metálicos, lo más cortos posible y de diámetro pequeño, con el fin de reducir el volumen de las - - vías de agua, así como los efectos en la medición de las presiones, debido a su deformabilidad. También se emplearon para armar este sistema, válvulas sin cambio de volumen. La bureta se graduó en cm, siendo su sección interior de tal magnitud, que cada cm correspondió a un volumen de 0.56 cm³.

El sistema de carga del equipo, consistió en un -- marco de carga equilibrado, conectado en su parte interior con una varilla con soporte o ménsula. Esta varilla era cargada según la equivalencia: "para equilibrar - 1 Kg/cm² de presión en la cámara se requirió en la ménsula un peso de 1.259 Kg." De acuerdo a esto, se equilibraba el vástago que atraviesa la tapa superior de la cámara triaxial, cada vez que dentro de ésta, se aplicaba un esfuerzo de confinamiento.

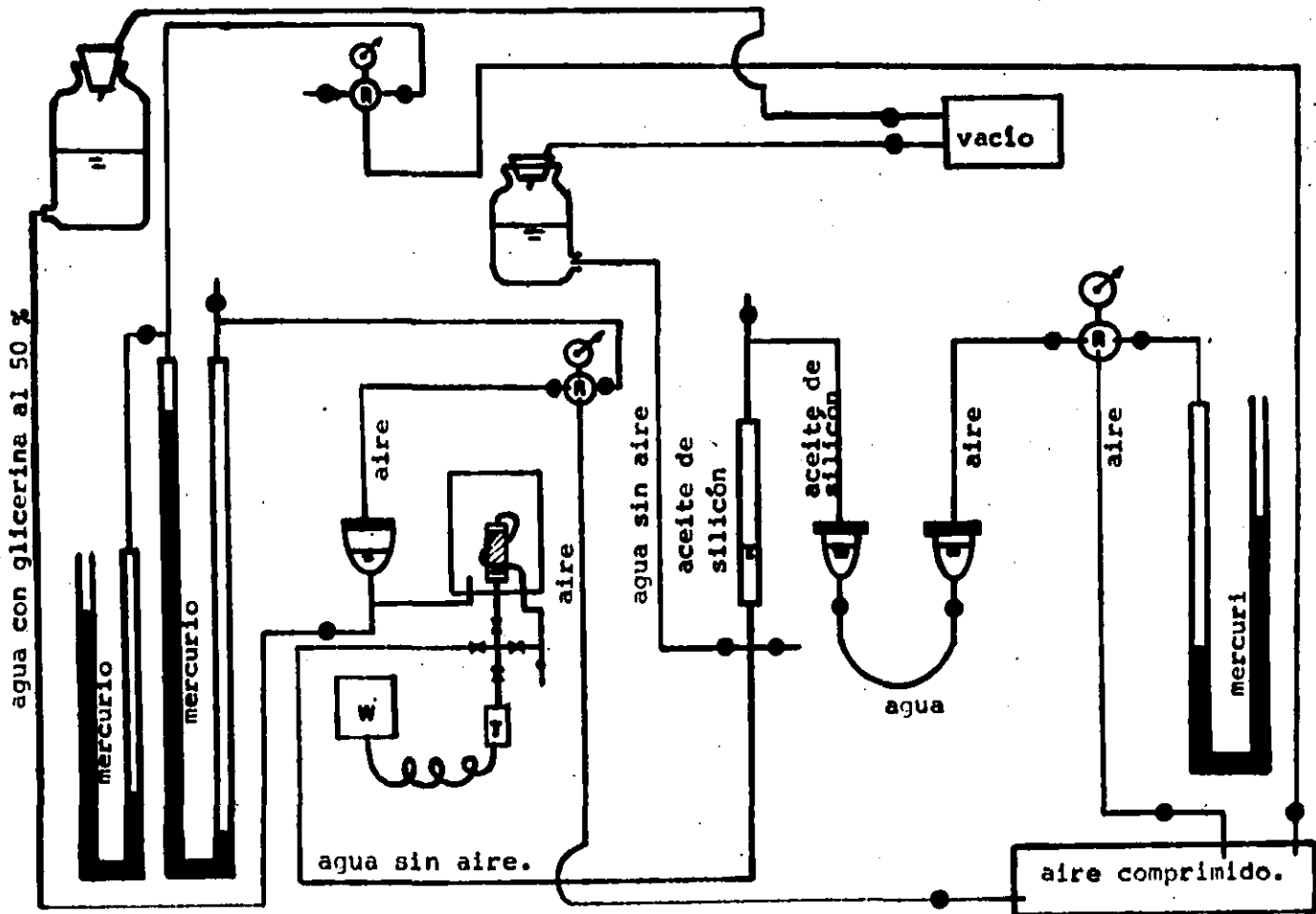


FIGURA III.1 -- ESQUEMA OPERACIONAL DEL EQUIPO DE PRUEBA.

Para el control y medición de las presiones aplicadas al equipo, mediante aire comprimido, fue necesario armar un conjunto de tres manómetros de mercurio, cada uno con capacidad de lectura de 3 Kg/cm^2 ; de los cuales, uno daba el valor de la presión aplicada al interior de la muestra, y los otros dos estaban intercomunicados para poder leer presiones de confinamiento hasta de 6 Kg/cm^2 . La precisión en los manómetros de mercurio fue de 0.01 Kg/cm^2 . El arreglo y funcionamiento de este sistema, se presenta en el esquema mostrado por la fig. III.2.

La naturaleza de los fluidos empleados en el equipo de prueba, así como sus funciones, se explican de la manera siguiente:

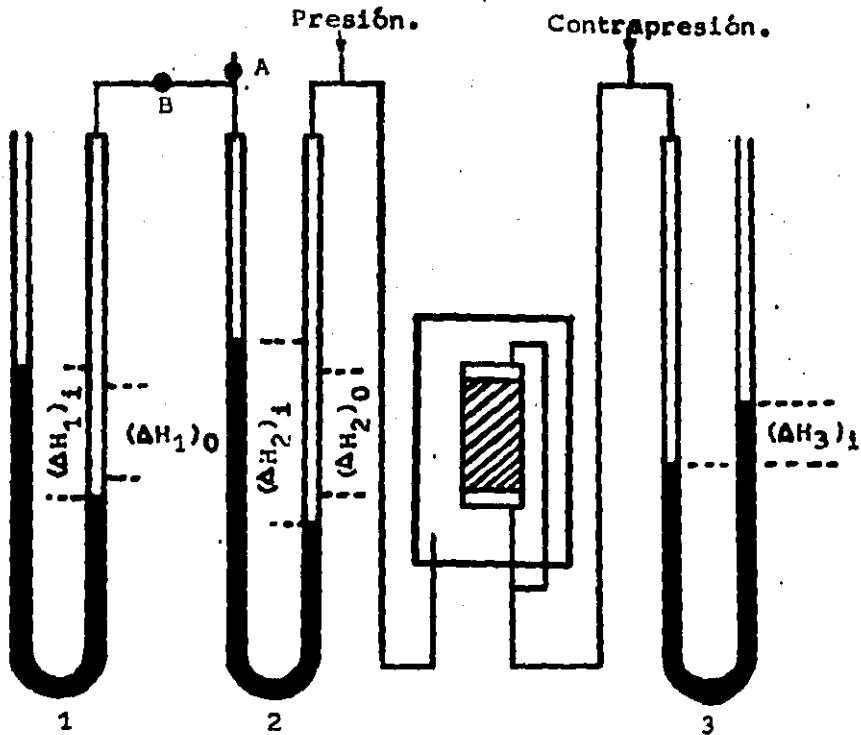
Aire comprimido; que corría de la compresora al vaso de interfase y transmitía la presión al agua.

Agua destilada, a la cual se le extrajo el aire; -- que se alimentaba hacia los conductos, por gravedad, desde un depósito de vidrio conectado a una línea de vacío, y que hacía contacto con el agua interior de la muestra, y con el transductor usado para la medición de la presión de poro.

Aceite de silicón; que se colocó desde la bureta -- graduada hasta un vaso de interfase, para tener un contacto visible "agua-aceite" que indicara con su movimiento, los cambios de volumen.

Mezcla de agua con glicerina al 50%, en volumen; -- mediante la cual se aplicaba la presión de confinamiento en la cámara triaxial, a partir de un vaso de interfase.

Para evitar las fugas del aire comprimido, así como las de los demás fluidos empleados en la operación del equipo, todas las conexiones de éste fueron selladas con cinta de teflón; y en algunos casos, donde el contacto se producía con el aceite de silicón, el sellado se realizó aplicando pasta silex. Para evitar la salida de la



Los manómetros 1 y 2 sirvieron para medir la presión de cámara $\sigma_c = \sigma_{co} + \Delta\sigma_c$

$$\text{Para } u = 0 ; \sigma_c = \bar{\sigma}_{co} + [(\Delta H_1)_0 + (\Delta H_2)_0] \delta_{Hg}$$

El manómetro 3 sirvió para medir la contrapresión aplicada a la probeta

$$\text{Para } u_1 = [(\Delta H_3)_1] \delta_{Hg} ; \sigma_{c1} = [(\Delta H_1)_1 + (\Delta H_2)_1] \delta_{Hg}$$

Para cualquier nivel de contrapresión :

$$\bar{\sigma}_{co} = [(\Delta H_1)_1 + (\Delta H_2)_1 - (\Delta H_3)_1] \delta_{Hg}$$

FIGURA III.2.- Esquema del sistema de tres manómetros de mercurio, para medir presiones mayores a 3 kg/cm^2 .

mezcla de agua y glicerina desde el interior de la cámara, a través del contacto entre el vástago y el buje de la tapa superior, fue necesario aplicar una pequeña cantidad de grasa de silicón a la grasa convencional que -- ordinariamente se emplea. Todas las vías, conexiones, -- válvulas y conductos en general del equipo, se probaron para una presión de 6 Kg/cm^2 , durante 16 horas antes de emplearse en la ejecución de las pruebas.

El sistema de medición de la presión de poro, quedó conectado a las vías que iban hasta la base y la cabeza de la muestra, mediante una purga que permitía el cerrado hermético de los conductos, sin inducir importantes presiones adicionales.

Este sistema consistió en un transductor de membrana que al deformarse provocaba una señal eléctrica que era tomada por un puente de Wheatstone que integraba un aparato que daba lecturas correspondientes a las presiones existentes en las vías de agua. Para saber el valor de esas presiones, fue necesario calibrar al sistema por comparación, con un manómetro de mercurio también conectado a dichas vías, y de esta manera, se encontró un factor de conversión de:

$$F = 0.000267 \frac{(\text{Kg/cm}^2)}{\text{unidades de puente}}$$

Con lo que la presión era conocida con sólo aplicar: -

$$p, \text{ en Kg/cm}^2 = (\text{unidades de puente}) \cdot (F)$$

Las características generales del transductor y -- del puente de Wheatstone, empleados en todas las pruebas realizadas para esta tesis, son las siguientes:

Transductor No. : 1932

Rango de seguridad: 50 libras/pulgada cuadrada.

Rango de trabajo: 0-25 libras/pulgada cuadrada.

Modelo No. PG 769-25.

Resistencia de entrada: 373 ohms.

Voltaje: 5 Volts.

Factor de calibración: 354.2 microvolts/volt/1 libra/pulg².

Temperatura de trabajo: -65 °F a +250 °F.

Marca: Statham instruments, Inc.

Puente de Wheatstone:

Fuente de poder: 110-120 Volts.; 50-60 Hz.; Watts.

Temperatura de trabajo: 30 °F - 100 °F.

Peso: 12 libras.

Dimensiones: 9 1/2 " X 7 3/8 " X 11 3/4 " .

Marca: Vishay instruments, Inc.

La capacidad del transductor, no permitió la saturación del sistema antes de la aplicación del esfuerzo de consolidación en cada muestra, durante la primera etapa de las pruebas. Por tal motivo, los cambios de volumen en cada espécimen, no corresponden totalmente a los cambios medidos de acuerdo a las lecturas de la bureta.

III.2.- Operación y tratamiento de las muestras.

Todas las actividades correspondientes a la elaboración, determinación de la geometría y preparación de las probetas fueron realizadas en el cuarto húmedo. Sólo las actividades de pesado se realizaron fuera de dicho cuarto; pero siempre protegida la probeta con una membrana de hule. La determinación de los diferentes pesos se realizó en una balanza de 1,200 gramos de capacidad con precisión de 0.01 gramos, marca Mettler.

Para acelerar el proceso de consolidación en las cinco pruebas CU, se colocó a cada probeta una rejilla de papel filtro, recortada en dos partes, a partir de discos de 11 cm de diámetro de papel filtro marca Whatman, No. 52.

Después de humedecer la rejilla, era colocada en contacto directo con la probeta, colocándose enseguida las piedras porosas en la base y la cabeza. Dichas piedras estaban también húmedas. Realizado lo anterior, se procedía a la colocación de dos membranas de hule, previamente pesadas. El papel filtro fue cortado en todos los casos de acuerdo a las medidas presentadas en el esquema de la fig. III.3 .

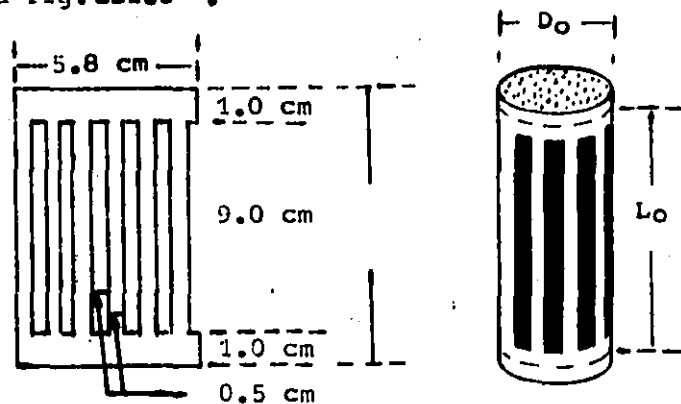


FIGURA III.3.- Dimensiones y colocación de la rejilla de papel filtro.

Para evitar en lo posible las zonas de suelo amasado, debido a la acción del muestreo, se procuró llevar un estricto control sobre la ubicación de cada prisma en que se dividieron las dos muestras, y así poder escoger la distribución de las probetas de acuerdo a las observaciones hechas a la estructura del suelo, esta distribución se muestra en el esquema de la fig.III.4

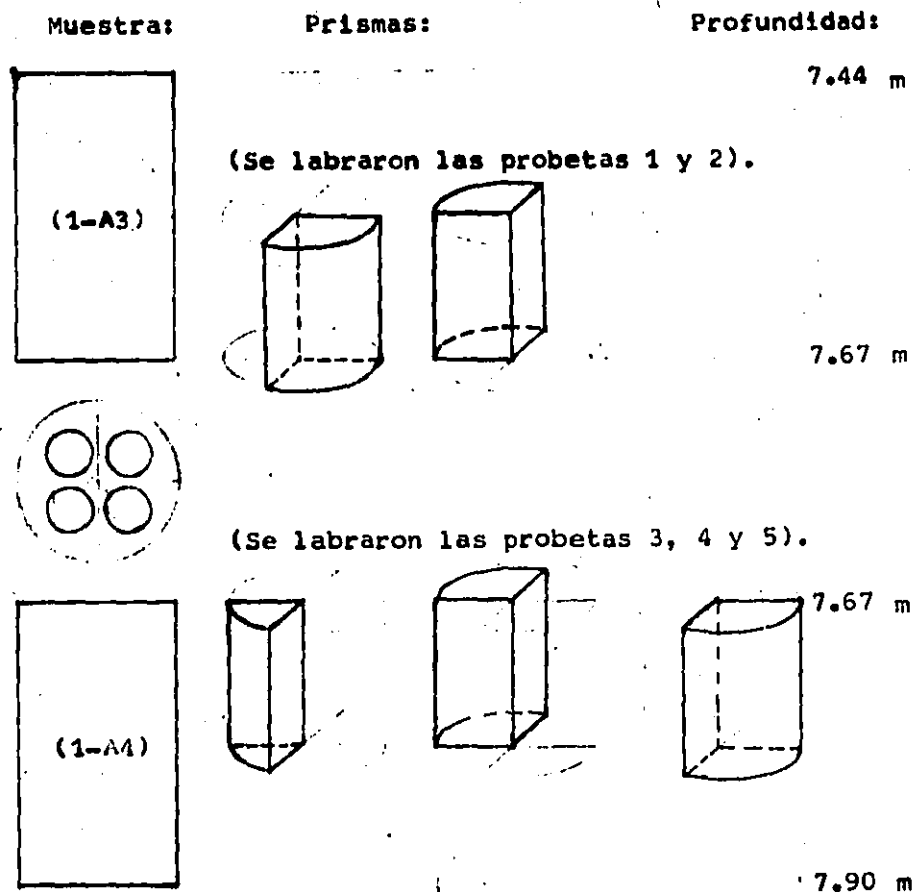


FIGURA III.4.- División de las muestras.

Las relaciones de esbeltez de cada probeta, fueron:

Prueba No.	Relación de esbeltez $\left(\frac{L_0}{D_0}\right)$
1	2.30
2	2.19
3	2.23
4	2.27
5	2.23

Con todas las vías del aparato, saturadas, se colocaba cada probeta dentro de la cámara triaxial y se fijaba la lectura del micrómetro que controlaba la longitud de la muestra, también se fijaba la posición de la interfase "agua-aceite" en la bureta graduada. De esta manera, se iniciaba el proceso de consolidación del suelo a la presión σ_{co} , programada de acuerdo a la tabla siguiente:

Prueba	σ_p (Kg/cm ²)	σ_{co} (Kg/cm ²)	$\frac{\sigma_p}{\sigma_{co}}$
1	1.00	1.00	1.0
2	1.47	1.47	1.0
3	2.25	2.25	1.0
4	2.25	1.125	2.0
5	2.25	0.50	4.5

Excepto en la prueba No. 1, los esfuerzos σ_p , se aplicaron mediante un solo incremento; lo mismo se hizo para dar las presiones σ_{co} , en el caso de las muestras preconsolidadas.

En la prueba No. 1, el esfuerzo σ_c , se aplicó mediante tres incrementos, los cuales fueron, 0.20 Kg/cm^2 , 0.50 Kg/cm^2 y 0.30 Kg/cm^2 .

La consolidación de las muestras en las cinco pruebas, se controló mediante los cambios de volumen registrados en la bureta, de acuerdo a las curvas de consolidación respectivas, las cuales aparecen en las figuras de la III.5.a la III.12.

Al terminar en cada caso la etapa de consolidación, se procedía a conectar el transductor y el puente de Wheatstone para empezar a medir los valores de la contrapresión que se aplicaría en la siguiente etapa de cada prueba. Al inicio de esta operación, siempre se registró una presión adicional que en promedio fue de 0.03 Kg/cm^2 , debida al cerrado hermético de la purga del transductor. Lo que se manifestaba en el puente, con una lectura inicial.

A partir de esa lectura en el puente, se procedía a saturar el sistema mediante la aplicación de contrapresión por la conducción a la que pertenecía la bureta, en incrementos de 0.2 Kg/cm^2 , correspondientes a los mismos incrementos de presión confinante. La saturación que se realizó fue propiamente del aparato, ya que el grado de saturación inicial calculado a todas las muestras, resultó casi del 100%.

Para realizar lo anterior, se iban comparando los incrementos de presión de cámara, $\Delta\sigma_c$, con el valor del incremento de presión de poro medida por el puente, Δu , de tal manera que el factor B, de Skempton tendiera a la unidad. El máximo valor de B, alcanzado en alguna de las pruebas fue de 0.98, excepto en la prueba realizada a la muestra No. 1, donde no fue efectuado este procedimiento, desconociéndose por lo tanto el grado de saturación en el sistema, al inicio de la aplicación del esfuerzo desviador.

III.3.- Consolidación en las pruebas C U .

Prueba No. 1 (ver figuras III.5, III.6 y III.7)

Registro de consolidación: $(\sigma_c)_{\text{inicial}} = 0.00 \text{ Kg/cm}^2$.1^{er}. incremento: $\Delta\sigma_c = 0.20 \text{ Kg/cm}^2$; $\sigma_c = 0.20 \text{ Kg/cm}^2$.

Bureta (cm)	Micró- metro. (mm)	ΔV_w (cm^3)	Tiempo en minutos.
17.73	24.00	0	0
7.73		5.60	0.25
6.39	23.85	6.35	0.50
5.59	23.82	6.80	1
4.59	23.77	7.36	2
4.48	23.71	7.42	4
4.19	23.70	7.58	8
4.09	23.68	7.64	15
3.89	23.67	7.75	30
3.84	23.59	7.78	200
3.80	23.55	7.80	1,000

2^o. incremento: $\Delta\sigma_c = 0.50 \text{ Kg/cm}^2$; $\sigma_c = 0.70 \text{ Kg/cm}^2$.

3.80=21.40	23.55	0	0
21.00	23.30	0.224	0.25
20.80	23.23	0.336	0.50
20.60	23.22	0.448	1
20.30	23.21	0.616	2
20.00	23.20	0.784	4
19.60	23.15	1.008	8
19.10	23.11	1.288	15
18.70	23.10	1.512	30
18.10	23.05	1.848	60
17.70	23.03	2.072	120
17.20	23.01	2.352	240
17.10	23.00	2.408	303
16.70	22.98	2.632	1,128
16.22	22.93	2.900	1,740
15.06	22.71	3.550	4,050
13.50	22.39	4.424	9,100

3^{er}. incremento: $\Delta\sigma_c = 0.20 \text{ Kg/cm}^2$; $\sigma_c = 1.00 \text{ Kg/cm}^2$.

13.50	22.39	0	0
13.40	22.36	0.056	0.25
13.35	22.35	0.084	0.50
13.30	22.34	0.112	1
13.20	22.32	0.168	2
13.10	22.29	0.224	4
12.80	22.22	0.392	8
12.60	22.17	0.504	15
12.30	22.10	0.672	30
11.90	22.01	0.896	60
11.70	21.96	1.008	90
10.30	21.62	1.792	955
10.02	21.55	1.950	1,680
9.30	21.38	2.352	3,150

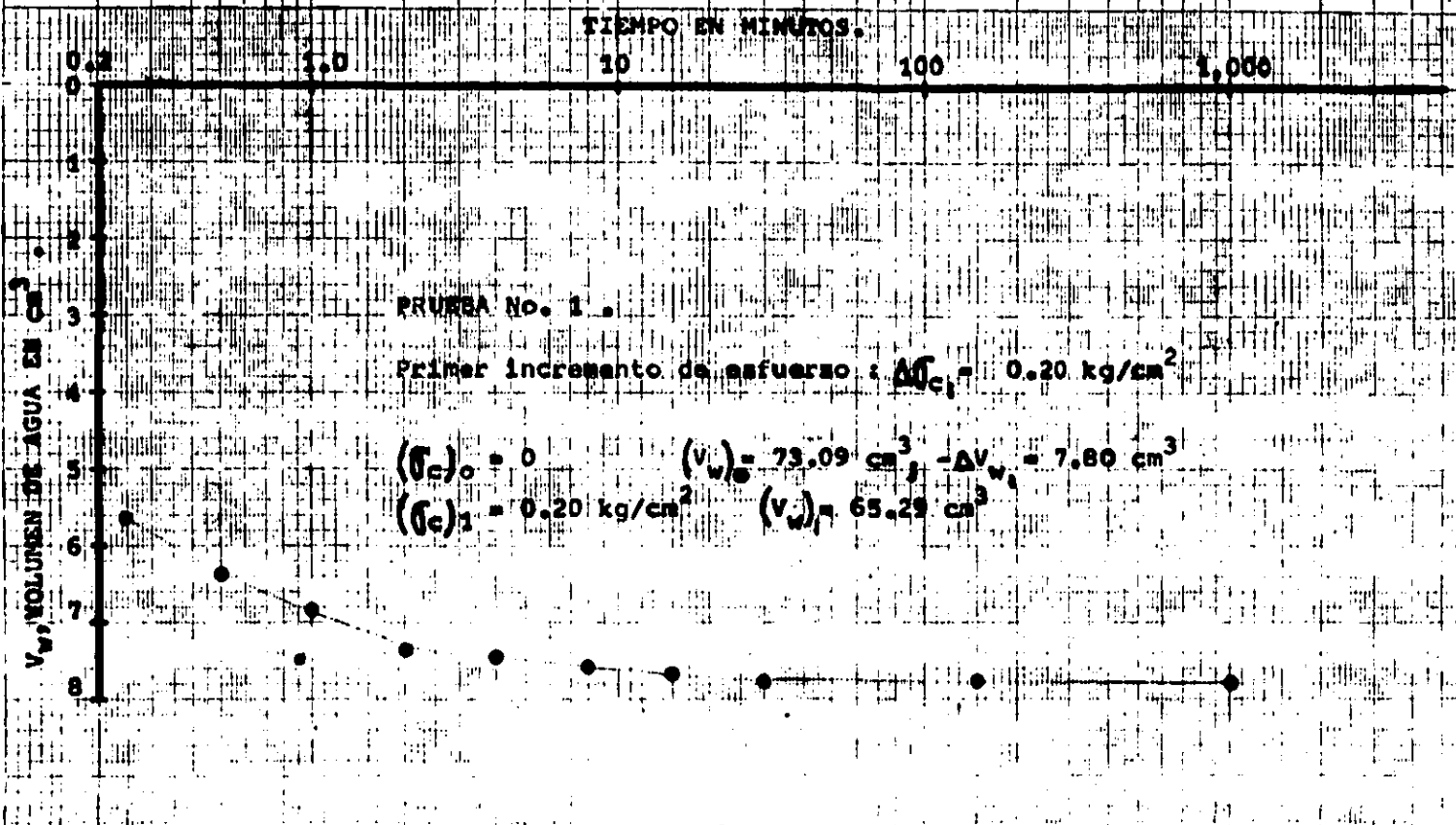


FIGURA III.5.- Curva de consolidación, correspondiente al primer incremento de esfuerzo en la prueba C U, No.1.

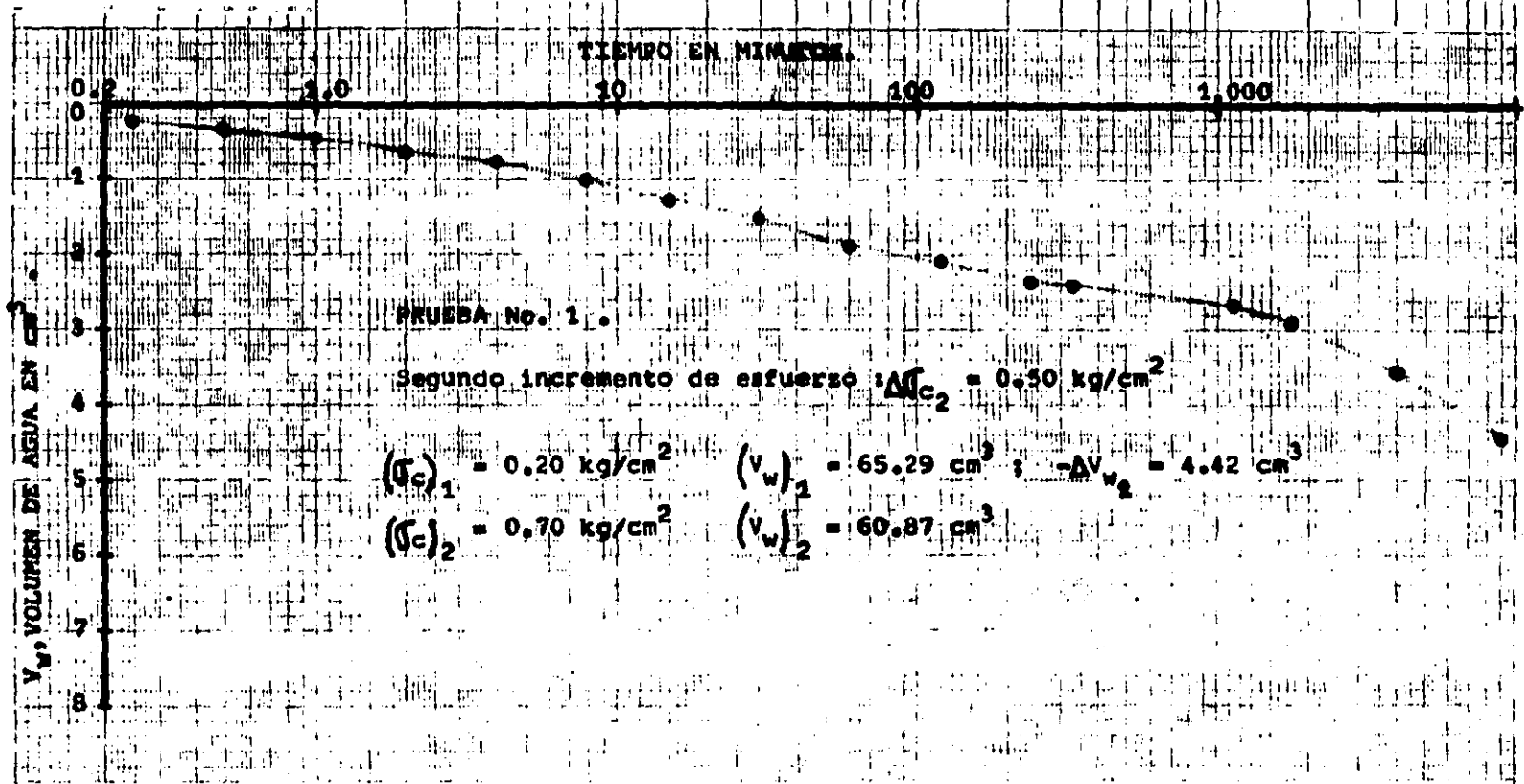


FIGURA III.6.- Curva de consolidación, correspondiente al segundo incremento de esfuerzo en la prueba CU No.1.

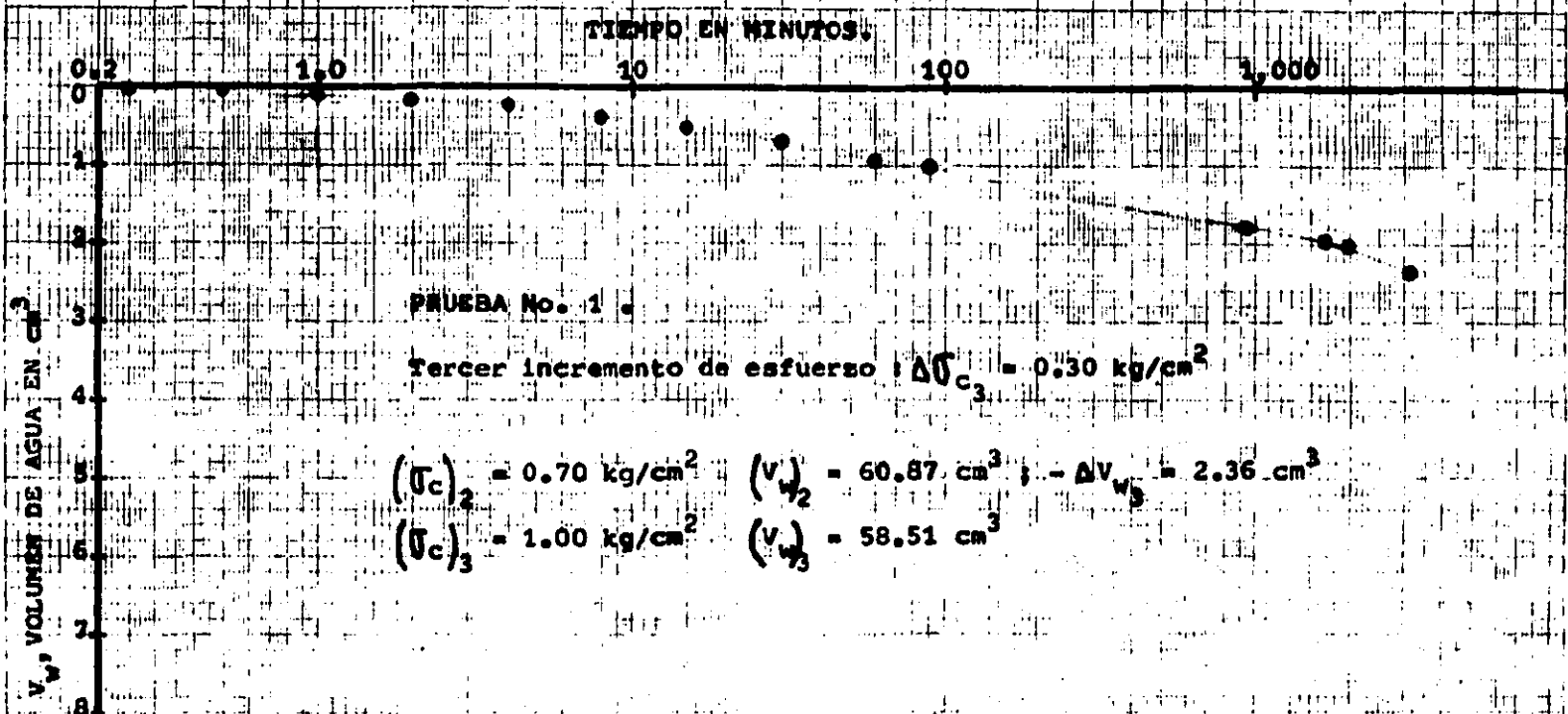


FIGURA III.7.- Curva de consolidación, correspondiente al tercer incremento de esfuerzo en la prueba CU No.1.

Prueba No. 2

(ver figura III.8)

Registro de consolidación: $(\sigma_c)_{inicial} = 0.00 \text{ Kg/cm}^2$.Incremento único: $\Delta\sigma_c = 1.47 \text{ Kg/cm}^2$; $\sigma_{co} = 1.47 \text{ Kg/cm}^2$.

Bureta (cm)	Micró- metro. (mm)	ΔV_w (cm^3)	Tiempo en minutos.
25.30	24.00	0	0
21.00	23.81	2.41	0.25
19.80	23.65	3.08	0.50
19.10	23.55	3.47	1
17.80	23.32	4.20	2
16.00	22.00	5.21	4
13.10	22.58	6.83	8
9.20	22.07	9.02	15
4.05=25.00	21.40	11.90	30
19.46	20.53	15.00	60
13.57	19.57	18.30	120
11.25	18.99	19.60	160
8.30=26.00	18.19	21.25	230
21.54	17.62	23.75	470
18.41	16.90	25.50	1,100
17.88	16.89	25.80	1,410
16.30	16.08	26.68	3,000

Prueba No. 3

(ver figura III.9)

Registro de consolidación: $(\sigma_c)_{inicial} = 0.00 \text{ Kg/cm}^2$.Incremento único: $\Delta\sigma_c = 2.25 \text{ Kg/cm}^2$; $\sigma_{co} = 2.25 \text{ Kg/cm}^2$.

Bureta (cm)	Micró- metro. (mm)	ΔV_w (cm^3)	Tiempo en minutos.
25.00	25.00	0	0
22.70	24.40	1.30	0.25
22.10	24.30	1.62	0.50
21.20	24.14	2.00	1
20.00	23.97	2.80	2
17.50	23.68	4.20	4
12.86	23.30	6.80	8
6.79=25.00	22.35	10.20	15
14.29	21.76	16.20	44
10.89	21.20	18.10	60
3.48=24.40	19.535	22.25	120
12.88	18.920	28.70	360
8.78	18.38	31.00	600
7.26	18.24	31.85	720
6.45	18.13	32.30	897
5.92	18.11	32.60	942
3.24	17.88	34.10	1,787
2.88	17.84	34.30	1,992
1.63	16.445	35.00	3,000

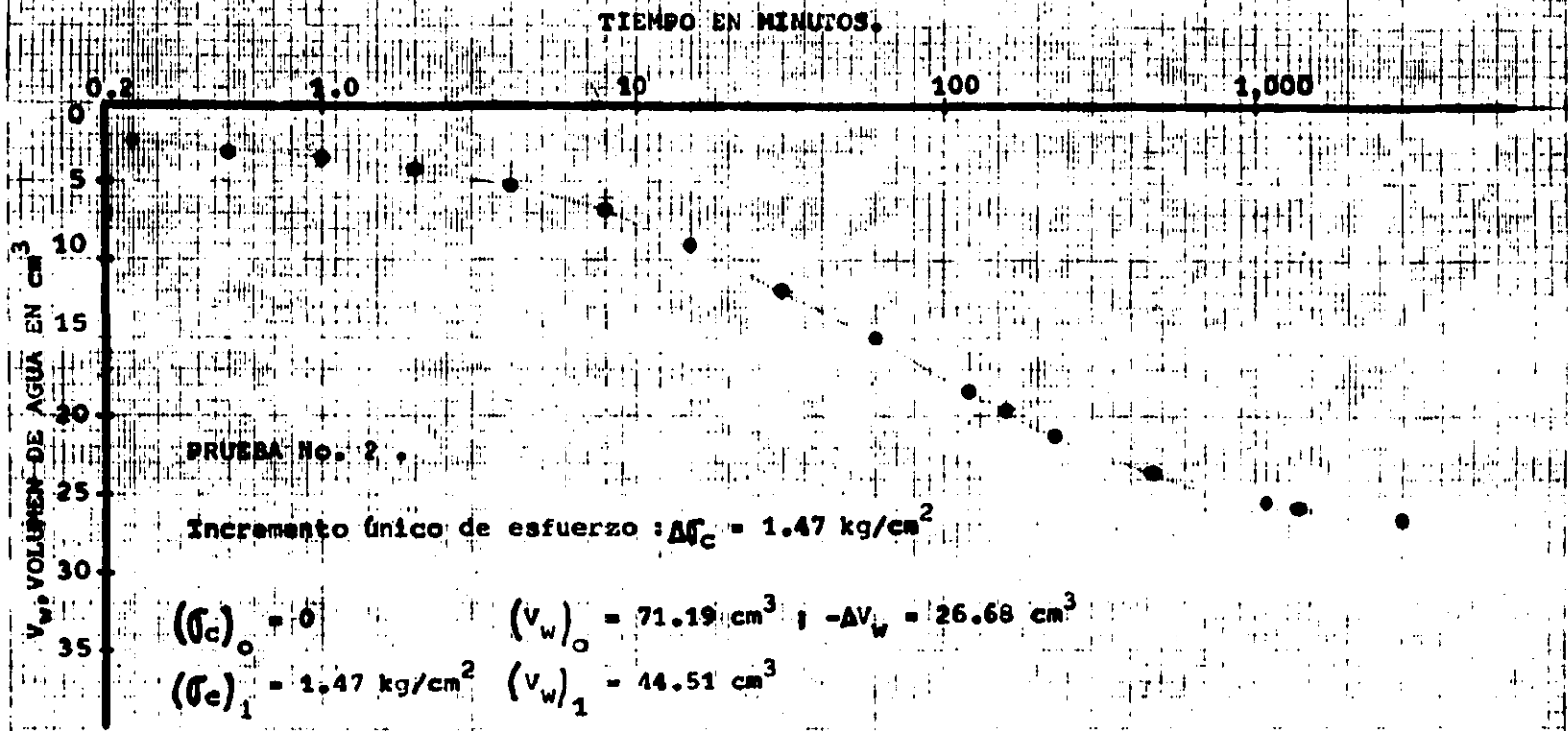


FIGURA III.8.- Curva de consolidación, correspondiente al incremento único de esfuerzo en la prueba CU No.2.

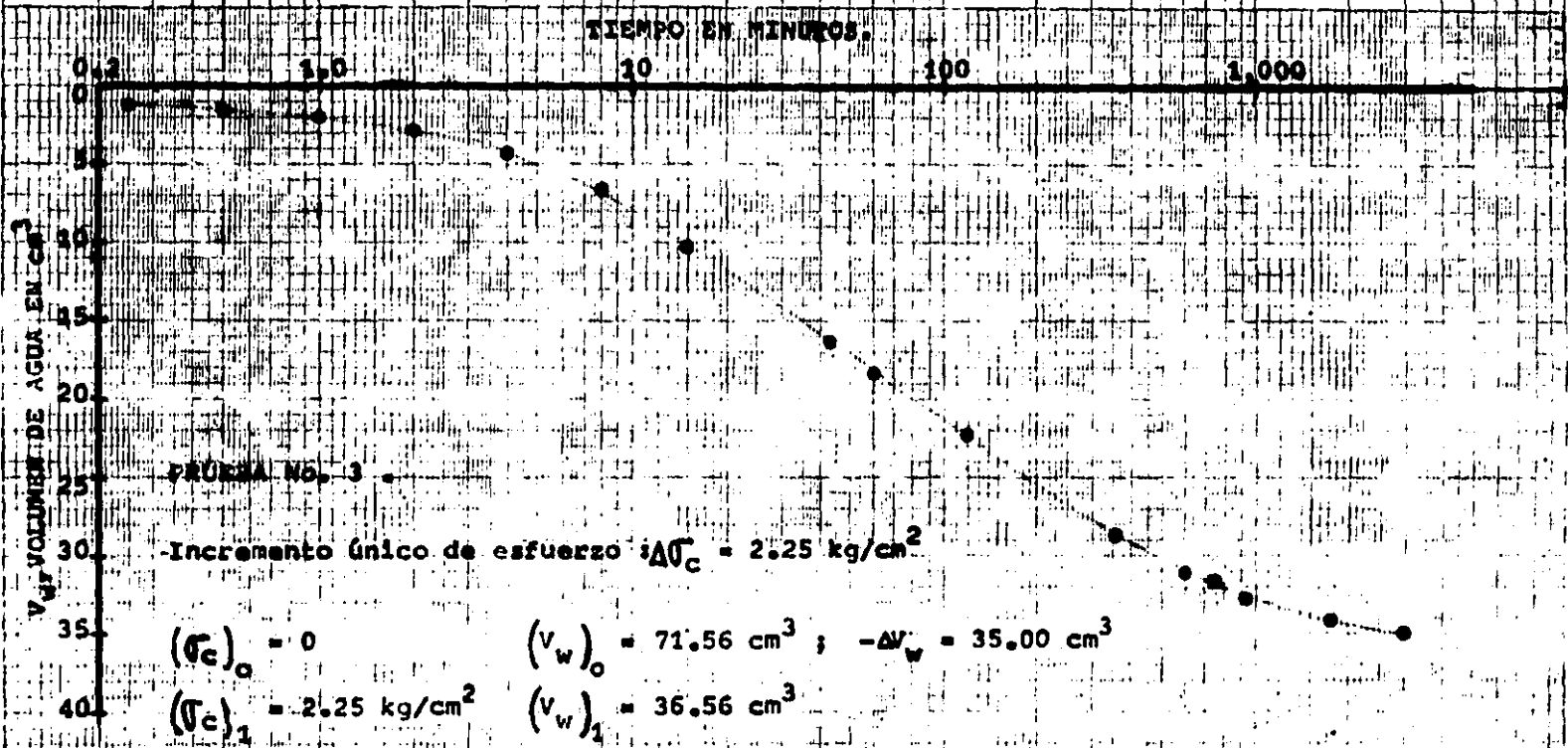


FIGURA III.9.- Curva de consolidación, correspondiente al incremento único de esfuerzo en la prueba CU No. 3.

Prueba No. 4 $\frac{\sigma_p}{\sigma_{co}} = 2.00$ (ver figura III.10)

Registro de consolidación: para (σ_c) inicial = 0 Kg/cm²

Incremento único: $\Delta\sigma_c = 2.25$ Kg/cm² ; $\sigma_p = 2.25$ Kg/cm²

Bureta (cm)	Micrometro (mm)	ΔV_w (cm ³)	Tiempo en minutos.
30.00	24.20	0.00	0
26.61	23.87	1.90	0.25
25.98	23.81	2.25	0.50
24.27	23.64	3.21	1
21.88	23.41	4.55	2
18.55	23.09	6.41	4
13.00	22.55	9.52	8
7.32=30.00	22.00	12.70	15
21.91	21.22	17.23	30
11.77	20.23	22.91	60
1.34=30.00	19.22	28.75	120
25.14	18.38	33.61	240
14.91	17.76	37.20	480
11.52	17.43	39.10	700
9.02	17.19	40.50	1,100
8.13	17.10	41.00	1,500

$$\Delta V = \frac{\Delta V_w}{G\%} = \frac{41.00}{0.9952} = 41.20 \text{ cm}^3 ; \Delta H = 7.10 \text{ mm}$$

Expansión: (σ_c)₁ = 2.25 Kg/cm²; ($\Delta\sigma_c$)_e = 1.125 Kg/cm²;

$$(\sigma_c)_2 = 1.125 \text{ Kg/cm}^2.$$

8.13	17.10	0	0
9.74	17.29	0.90	300
10.63	17.40	1.40	800
10.90	17.44	1.55	1,100
11.43	17.50	1.85	1,800

$$\Delta V_e = \frac{(\Delta V_w)_e}{G\%} = \frac{1.85}{0.9952} = 1.86 \text{ cm}^3 ; (\Delta H)_e = 0.40 \text{ mm}$$

(ver figura III.12)

Prueba No. 5 $\frac{\sigma_p}{\sigma_{co}} = 4.50$ (ver figura III.11)

Registro de consolidación : para (σ_c) inicial = 0.00 Kg/cm²

Incremento único: $\Delta\sigma_c = 2.25$ Kg/cm² ; $\sigma_p = 2.25$ Kg/cm²

Bureta (cm)	Micro- metro (mm)	ΔV_w (cm ³)	Tiempo en minutos
25.00	28.70	0.00	0
22.22	28.22	1.50	0.25
21.30	28.06	2.00	0.50
19.44	27.73	3.00	1
17.59	27.41	4.00	2
13.89	26.77	6.00	4
8.33	25.80	9.00	8
2.78=25.00	24.84	12.00	15
16.11	23.29	16.80	30
6.48=25.00	21.62	22.00	60
14.81	19.85	27.50	140
8.33	18.72	31.00	240
4.26=30.00	18.01	33.20	382
26.67	17.44	35.00	625
25.37	17.21	35.70	740
23.33	16.86	36.80	1,000
22.41	16.70	37.30	1,700
21.28	16.499	37.91	2,950

$$\Delta V = \frac{\Delta V_w}{G\%} = \frac{37.91}{0.9924} = 38.20 \text{ cm}^3 ; \Delta H = 12.201 \text{ mm}$$

Expansión: $(\sigma_c)_1 = 2.25$ Kg/cm²; $(\Delta\sigma_c)_e = 1.75$ Kg/cm²;

$$(\sigma_c)_2 = 0.50 \text{ Kg/cm}^2.$$

21.28	16.50	0.000	0
17.39	17.15	2.100	900
14.13	17.70	3.863	1,400

$$\Delta V_e = \frac{(\Delta V_w)_e}{G\%} = \frac{3.863}{0.9924} = 3.893 \text{ cm}^3 ; (\Delta H)_e = 1.2 \text{ mm}$$

(ver figura III.12)

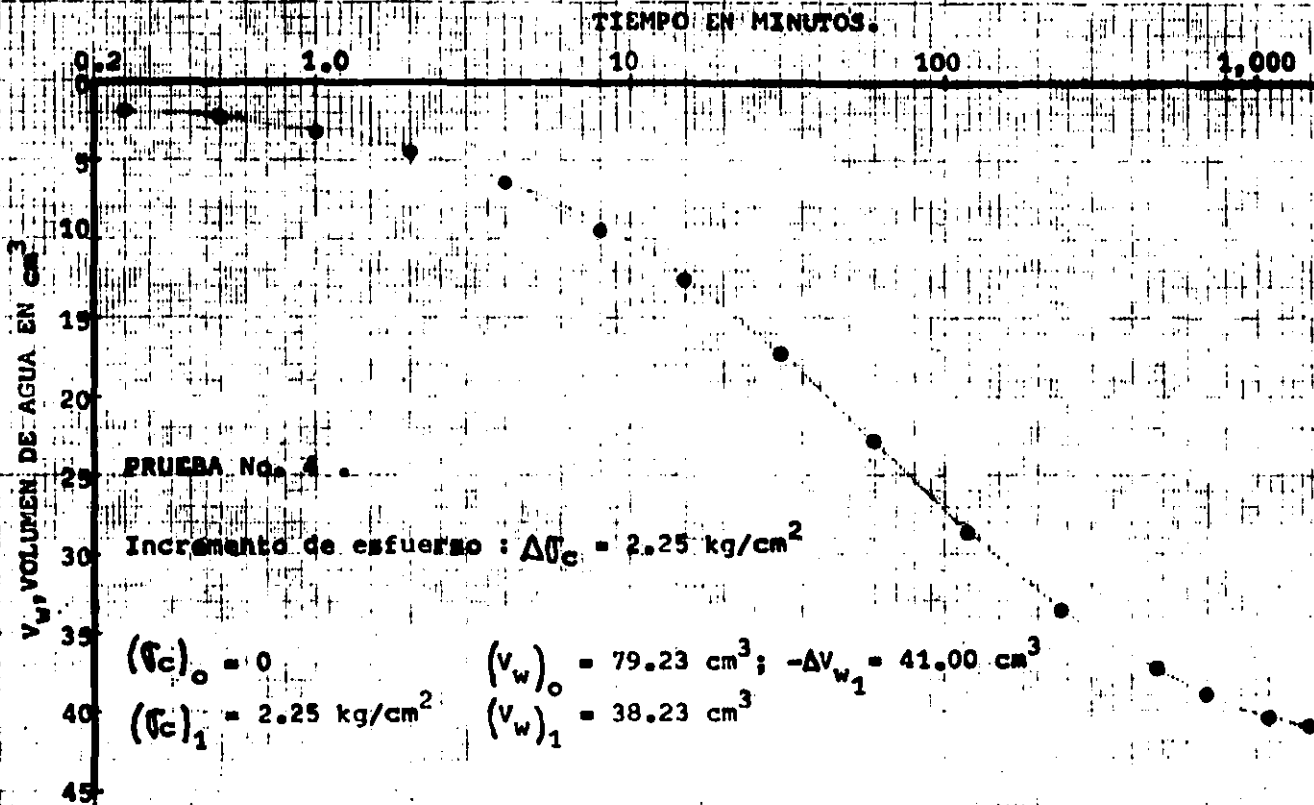


FIGURA III.10.- Curva de consolidación, correspondiente al incremento único de esfuerzo en la prueba CU No.4.

TIEMPO EN MINUTOS.

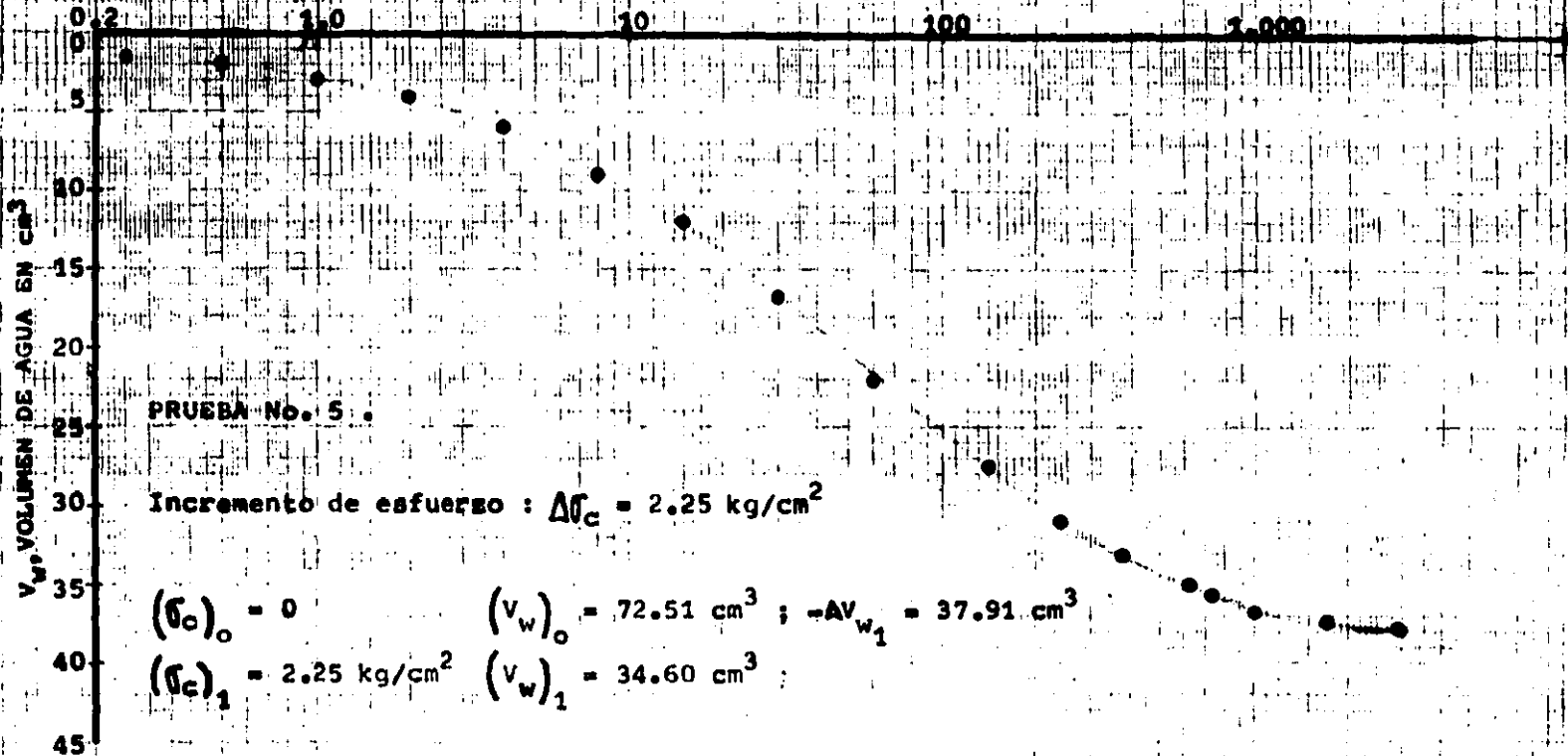


FIGURA III.11.- Curva de consolidación, correspondiente al incremento único de esfuerzo en la prueba CU No.5.

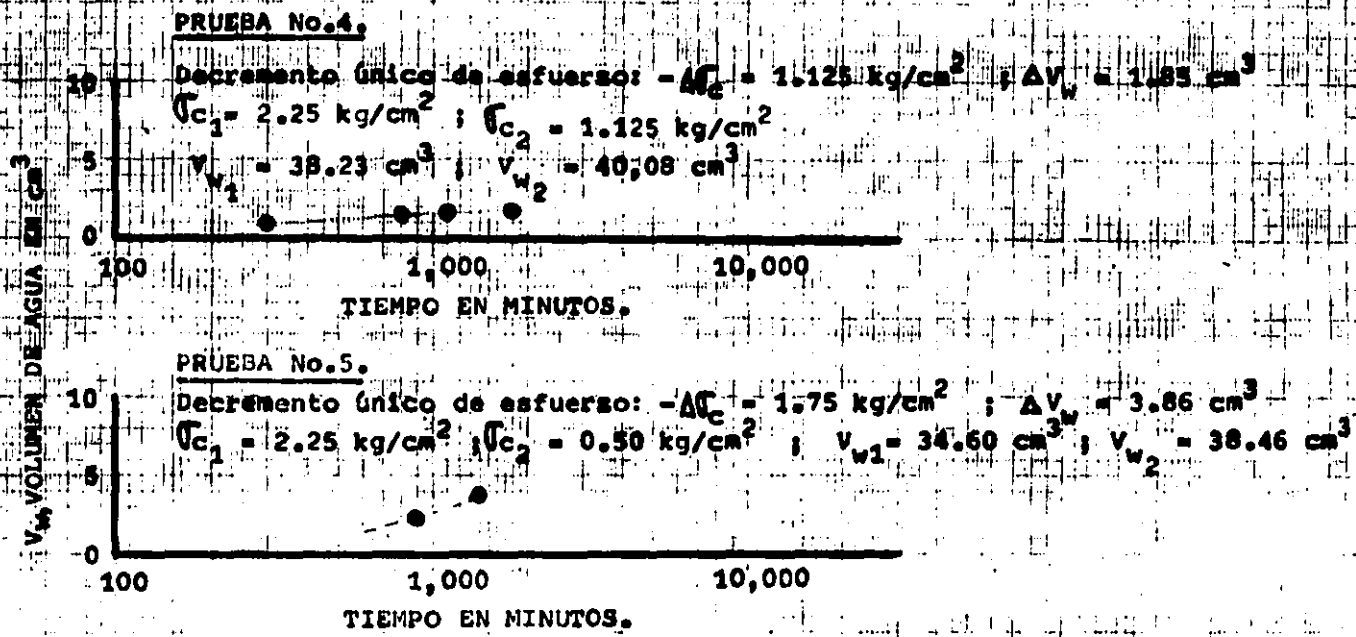


FIGURA III.12.- Curvas de expansión en el tiempo, correspondientes a decrementos únicos de esfuerzo en las pruebas CU Nos. 4 y 5.

III.4.- Prueba: "Compresibilidad-expansibilidad".

Registro de consolidación:

1er. incremento.-

$(\sigma_c)_0 = 0.00 \text{ Kg/cm}^2$; $\Delta\sigma_{c1} = 0.60 \text{ Kg/cm}^2$; $(\sigma_c)_1 = 0.60 \text{ Kg/cm}^2$.
(ver figura III.13)

Bureta (cm)	Micrómetro (mm)	ΔV_w (cm^3)	Tiempo en minutos
30.00	23.32	0.00	0
27.00	23.10	1.68	0.25
26.10	23.03	2.18	0.50
25.20	22.94	2.69	1
24.10	22.83	3.30	2
22.50	22.66	4.20	4
20.90	22.47	5.10	8
19.20	22.29	6.05	15
17.60	22.12	6.94	30
16.30	22.02	7.67	60
15.30	21.93	8.23	120
14.60	21.88	8.62	240
14.30	21.79	8.79	400

$$\Delta V_1 = \frac{(\Delta V_w)_1}{G_w\%} = \frac{8.79}{0.9937} = 8.85 \text{ cm}^3; \Delta H_1 = 1.53 \text{ mm}$$

2o. incremento.-

(ver figura III.13)

$(\sigma_c)_1 = 0.60 \text{ Kg/cm}^2$; $\Delta\sigma_{c2} = 0.40 \text{ Kg/cm}^2$; $(\sigma_c)_2 = 1.00 \text{ Kg/cm}^2$.

14.30	21.79	0.00	0
13.00	21.72	0.73	0.25
12.80	21.70	0.84	0.50
12.30	21.63	1.12	1
11.70	21.56	1.46	2
10.90	21.43	1.90	4
9.40	21.29	2.74	8
7.80	21.12	3.64	15
5.70	20.92	4.82	30
3.30-11.00	20.69	6.16	60
8.60	20.47	7.50	120
6.60	20.26	8.62	240
	20.25	9.35	700
4.70	20.03	9.69	1,700

$$\Delta V_2 = \frac{(\Delta V_w)_2}{G_w\%} = \frac{9.69}{0.9937} = 9.75 \text{ cm}^3; \Delta H_2 = 1.76 \text{ mm}$$

3er. incremento.-

(ver figura III.14)

 $(\sigma_c)_2 = 1.00 \text{ Kg/cm}^2$; $\Delta\sigma_c = 0.40 \text{ Kg/cm}^2$; $(\sigma_c)_3 = 1.40 \text{ Kg/cm}^2$.

Bureta (cm)	Micro- metro (mm)	ΔV_w (cm^3)	Tiempo en minutos
4.70	20.03	0.00	0
4.10	19.92	0.34	0.25
3.90	19.89	0.45	0.50
3.70	19.85	0.56	1
3.30	19.77	0.78	2
2.70	19.67	1.12	4
1.80-18.50	19.52	1.62	8
16.60	19.32	2.68	15
14.80	19.04	3.69	30
12.60	18.73	4.92	60
10.20	18.37	6.27	120
7.90	17.99	7.56	240
6.60	17.79	8.28	360
6.00	17.71	8.62	436
3.10	17.15	10.25	1,334

$$\Delta V_3 = \frac{(V_w)_3}{Gw\%} = \frac{10.25}{0.9937} = 10.31 ; \Delta H_3 = 2.88 \text{ mm}$$

4o. incremento.-

(ver figura III.14)

 $(\sigma_c)_3 = 1.40 \text{ Kg/cm}^2$; $\Delta\sigma_c = 0.45 \text{ Kg/cm}^2$; $(\sigma_c)_4 = 1.85 \text{ Kg/cm}^2$.

3.10-30.00	17.15	0.00	0
29.40	17.04	0.34	0.25
29.20	17.02	0.45	0.50
29.10	16.99	0.50	1
28.90	16.94	0.62	2
28.50	16.85	0.84	4
28.00	16.74	1.12	8
27.30	16.61	1.51	15
26.50	16.42	1.96	30
25.40	16.19	2.58	60
24.00	15.92	3.36	120
22.50	15.60	4.20	240
21.20	15.35	4.93	401
18.80	14.79	6.27	1,286
18.30		6.55	1,556
18.25	14.68	6.58	1,631
18.10	14.65	6.66	1,706
17.20	14.43	7.17	2,729

$$V_4 = \frac{(\Delta V_w)_4}{Gw\%} = \frac{7.17}{0.9937} = 7.22 \text{ cm}^3 ; \Delta H_4 = 2.72 \text{ mm}$$

5o. incremento.-

(ver figura III.14)

$$(\bar{V}_c)_4 = 1.85 \text{ Kg/cm}^2; \Delta\bar{V}_c = 0.40 \text{ Kg/cm}^2; (\bar{V}_c)_5 = 2.25 \text{ Kg/cm}^2.$$

Bureta (cm)	Micró- metro (mm)	ΔV_w (cm ³)	Tiempo en minutos
17.20	14.43	0.00	0
17.00	14.40	0.11	0.25
16.90	14.39	0.17	0.50
16.80	14.37	0.22	1
16.75	14.34	0.25	2
16.60	14.30	0.34	4
16.40	14.24	0.45	8
16.10	14.18	0.62	15
15.80	14.10	0.78	30
15.35	13.99	1.04	60
14.70	13.86	1.40	120
13.90	13.61	1.85	240
12.65	13.38	2.55	480
11.10	12.91	3.42	1,457

$$\Delta V_5 = \frac{(\Delta V_w)_5}{\text{Gw\%}} = \frac{3.42}{0.9937} = 3.44 \text{ cm}^3; \Delta H_5 = 1.52 \text{ mm}$$

EXPANSION:

1er. decremento:

(ver figura III.15)

$$(\bar{V}_c)_0 = 2.25 \text{ Kg/cm}^2; (\Delta\bar{V}_c)_1 = 0.40; (\bar{V}_c)_1 = 1.85 \text{ Kg/cm}^2.$$

11.10	12.91	0.00	0
11.37	12.95	0.15	60
11.70	13.00	0.34	120

$$\Delta V_1 = \frac{(\Delta V_w)_1}{\text{Gw\%}} = \frac{0.34}{0.9937} = 0.34 \text{ cm}^3; \Delta H_1 = 0.09 \text{ mm}$$

2o. decremento:

(ver figura III.15)

$$(\bar{V}_c)_1 = 1.85 \text{ Kg/cm}^2; (\Delta\bar{V}_c)_2 = 0.45 \text{ Kg/cm}^2; (\bar{V}_c)_2 = 1.40 \text{ Kg/cm}^2.$$

11.70	13.00	0.00	0
12.25	13.14	0.31	120
12.74	13.27	0.58	240
12.90	13.31	0.67	600

$$\Delta V_2 = \frac{(\Delta V_w)_2}{\text{Gw\%}} = \frac{0.67}{0.9937} = 0.67 \text{ cm}^3; \Delta H_2 = 0.31 \text{ mm}$$

3er. decremento:

(ver figura III.15)

$$(\sigma_c)_2 = 1.40 \text{ Kg/cm}^2; (\Delta\sigma_c)_3 = 0.80 \text{ Kg/cm}^2; (\sigma_c)_3 = 0.60 \text{ Kg/cm}^2$$

Bureta (cm)	Micro- metro (mm)	ΔV_w (cm ³)	Tiempo en minutos
12.90	13.31	0.00	0
17.40	14.42	2.52	120
18.60	14.64	3.19	240
19.10	15.10	3.47	480
19.20	15.10	3.53	900

$$V_3 = \frac{(\Delta V_w)_3}{Gw} = \frac{3.53}{0.9937} = 3.55 \text{ cm}^3; \quad H_3 = 1.79 \text{ mm}$$

Resumen:

$\Delta\sigma_c$ Kg/cm ²	σ_c Kg/cm ²	ΔV_w cm ³	V_w acumulado cm ³	V_w cm ³
0	0	0	0	79.37
0.60	0.60	- 8.79	- 8.79	70.58
0.40	1.00	- 9.69	- 18.48	60.89
0.40	1.40	-10.25	- 28.73	50.64
0.45	1.85	- 7.17	- 35.90	43.47
0.40	2.25	- 3.42	- 39.32	40.05
-0.40	1.85	+ 0.34	+ 0.34	40.39
-0.45	1.40	+ 0.67	+ 1.01	41.06
-0.80	0.60	+ 3.53	+ 4.54	44.59

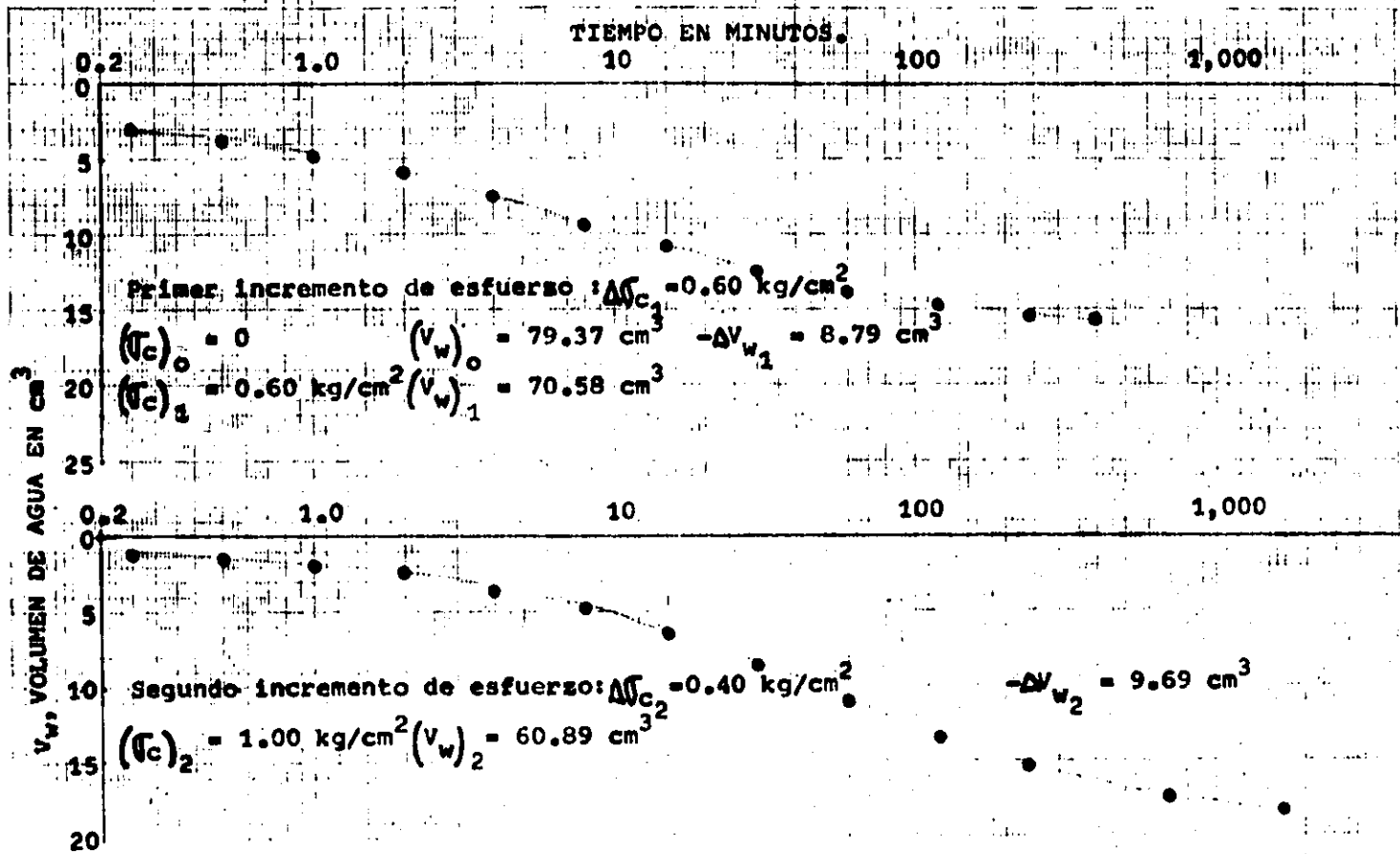


FIGURA III.13.- Curvas de consolidación, correspondientes al primero y segundo incrementos de esfuerzo, en la prueba de "Compresibilidad- Expasibilidad".

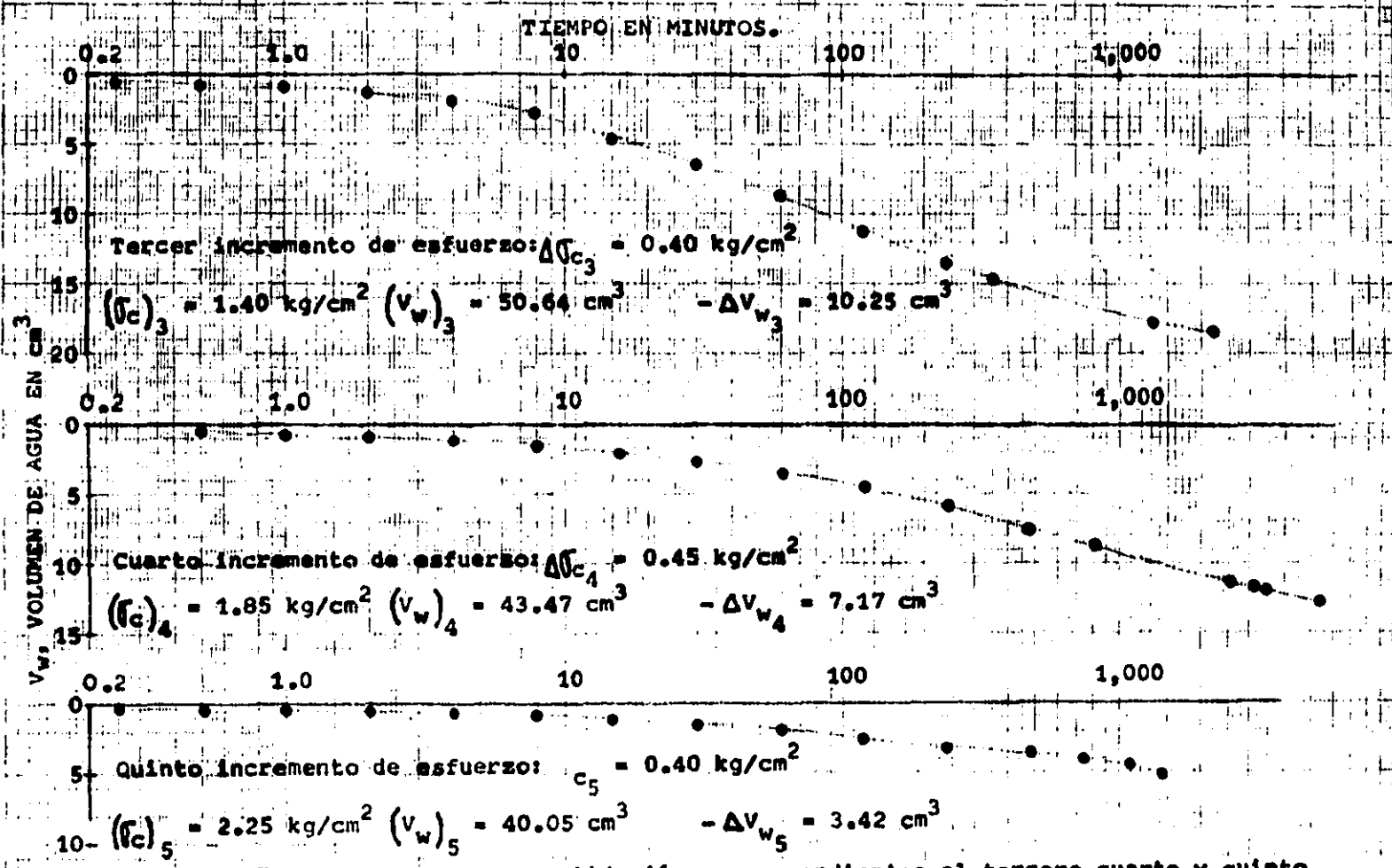


FIGURA III.14.- Curvas de consolidación, correspondientes al tercero, cuarto y quinto incrementos de esfuerzo, en la prueba de "Compresibilidad-Expansibilidad".

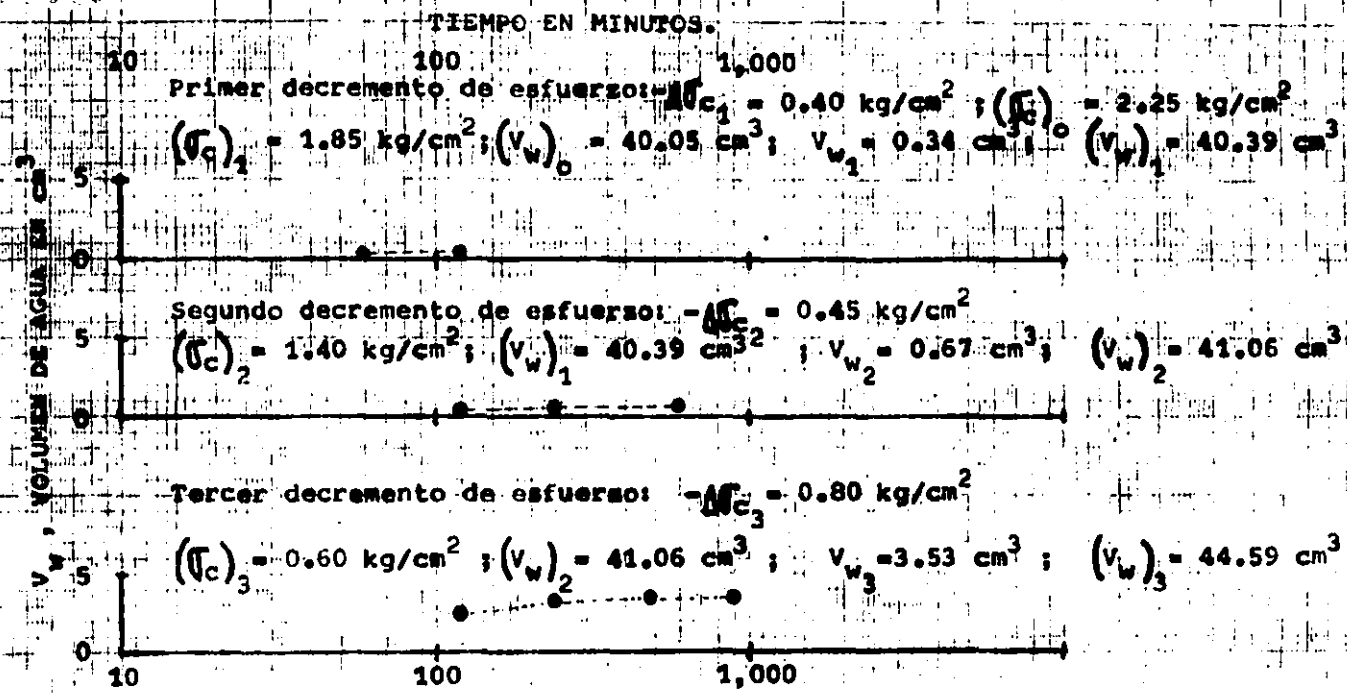


FIGURA III.15.- Curvas de expansión en el tiempo, correspondientes al primero, segundo y tercer decrementos de esfuerzo, en la prueba de "Compresibilidad - Expansibilidad"

III.5.- Medición de la presión de poro en las pruebas C U .

Como la capacidad de trabajo del transductor es de 3.5 Kg/cm^2 , no fue posible saturar aún más al sistema -- en las diferentes pruebas, ya que faltaba en cada caso -- acumular a la contrapresión el incremento de presión de poro que provocaría la aplicación del esfuerzo desviador.

Terminada la etapa de saturación, se procedía a -- aplicar el esfuerzo desviador en un número de incremen-- tos tal y como se indica en la tabla siguiente:

Prueba	No. de incrementos de esfuerzo desviador.
1	12
2	15
3	18
4	23
5	20

La medición de la presión de poro se realizaba entonces, a partir de una lectura inicial, que correspondía al valor de la contrapresión aplicado en cada caso, relacionada con las lecturas del puente, y la presión final alcanzada en el momento de la falla de la muestra, de la manera mostrada a continuación:

Prueba	Lectura de puente inicial.	Presión inicial. Kg/cm^2 .	Lectura de puente final.	Presión final, Kg/cm^2 .
1	- 820	0.219	- 2,000	0.534
2	- 9,139	2.440	-13,520	3.610
3	- 7,637	2.039	-14,040	3.749
4	-10,890	2.909	-13,890	3.709
5	-12,560	3.353	-13,680	3.653

Durante estos procedimientos, se notó que la lectura en el micrómetro que controlaba la longitud de cada muestra no presentó en ningún caso movimiento alguno; en cambio, la interfase "agua-aceite" en la bureta, indicó pequeñas oscilaciones que representaban cambios de volumen del orden de 0.10 cm^3 .

Los resultados obtenidos en los procesos de saturación, se presentan gráficamente en las figuras III.16 y

III.17.

- .- Prueba No. 2
- .- Prueba No. 3
- ▲.- Prueba No. 4
- ◆.- Prueba No. 5

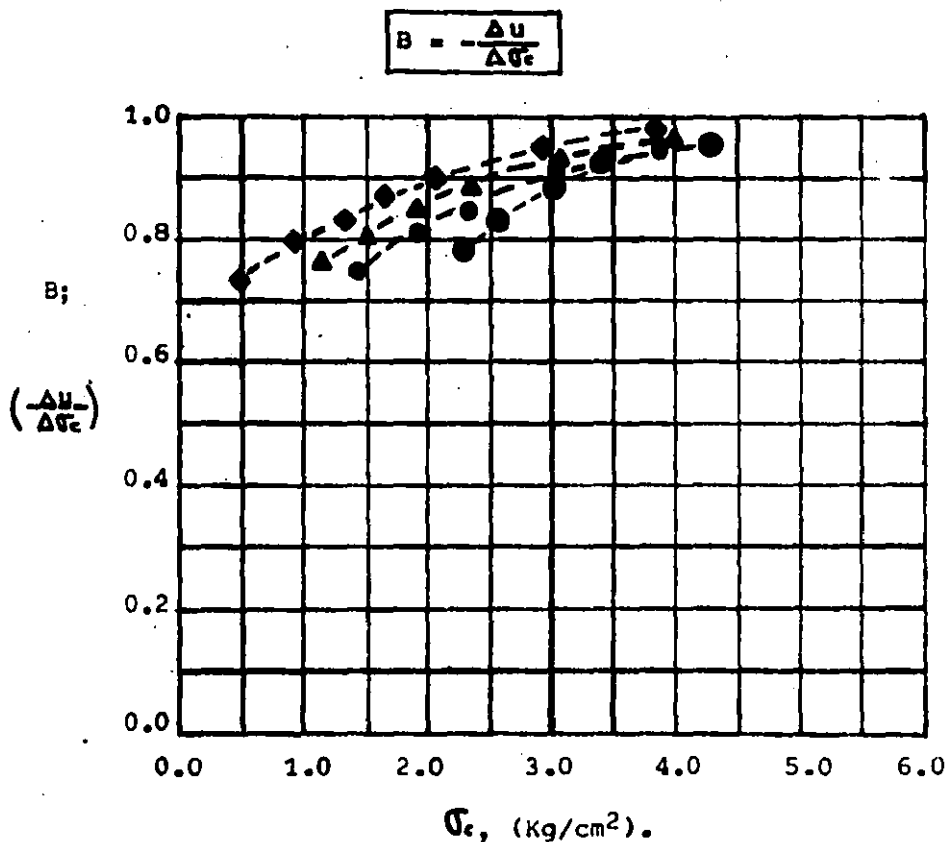


FIGURA III.16.- Variación del parámetro B, de Skempton, con la presión confinante y la contra presión.

Saturación aplicando contrapresión.-

Prueba No. 2.

$$\sigma_{co} = 1.47 \text{ Kg/cm}^2.$$

σ_c (Kg/cm ²)	Δu (Kg/cm ²)	B	u (Kg/cm ²)
1.47	0	----	0
1.67	0.1500	0.750	0.1500
1.87	0.1620	0.810	0.3120
2.07	0.1640	0.820	0.4760
2.27	0.1700	0.850	0.6460
2.47	0.1750	0.875	0.8210
2.67	0.1780	0.890	0.9990
2.87	0.1810	0.905	1.1800
3.07	0.1830	0.915	1.3630
3.27	0.1848	0.924	1.5478
3.47	0.1866	0.933	1.7344
3.67	0.1884	0.942	1.9228
3.87	0.1900	0.950	2.1128

Prueba No. 3.

$$\sigma_{co} = 2.25 \text{ Kg/cm}^2.$$

σ_c (Kg/cm ²)	Δu (Kg/cm ²)	B	u (Kg/cm ²)
2.25	0	----	0
2.45	0.1620	0.810	0.1620
2.65	0.1650	0.825	0.3270
2.85	0.1700	0.850	0.4970
3.05	0.1760	0.880	0.6730
3.25	0.1802	0.901	0.8532
3.45	0.1850	0.925	1.0382
3.65	0.1862	0.931	1.2244
3.85	0.1880	0.940	1.4124
4.05	0.1900	0.950	1.6024
4.25	0.1910	0.955	1.7934
4.35	0.096	0.960	1.8894

Prueba No. 4.

$$\sigma_{co} = 1.125 \text{ Kg/cm}^2.$$

σ_c (Kg/cm ²)	Δu (Kg/cm ²)	B	u (Kg/cm ²)
1.125	0	-----	0
1.325	0.1560	0.780	0.1560
1.525	0.1620	0.810	0.3180
1.725	0.1670	0.835	0.4850
1.925	0.1700	0.850	0.6550
2.125	0.1750	0.875	0.8300
2.325	0.1770	0.885	1.0070
2.525	0.1810	0.905	1.1880
2.725	0.1840	0.920	1.3720
2.925	0.1860	0.930	1.5580
3.125	0.1870	0.935	1.7450
3.325	0.1890	0.945	1.9340
3.525	0.1908	0.954	2.1248
3.725	0.1920	0.960	2.3168
3.925	0.1930	0.965	2.5098
4.000	0.1936	0.968	2.7034

Prueba No. 5.

$$\sigma_{co} = 0.50 \text{ Kg/cm}^2.$$

σ_c (Kg/cm ²)	Δu (Kg/cm ²)	B	u (Kg/cm ²)
0.50	0	-----	0
0.70	0.1522	0.761	0.1522
0.90	0.1600	0.800	0.3122
1.10	0.1620	0.810	0.4742
1.30	0.1650	0.825	0.6392
1.50	0.1700	0.850	0.8092
1.70	0.1740	0.870	0.9832
1.90	0.1770	0.885	1.1602
2.10	0.1800	0.900	1.3402
2.30	0.1830	0.915	1.5232
2.50	0.1850	0.925	1.7082
2.70	0.1870	0.935	1.8952
2.90	0.1900	0.950	2.0852
3.10	0.1920	0.960	2.2772
3.30	0.1930	0.965	2.4702
3.50	0.1946	0.973	2.6648
3.70	0.1956	0.978	2.8604
3.80	0.196	0.980	3.0564

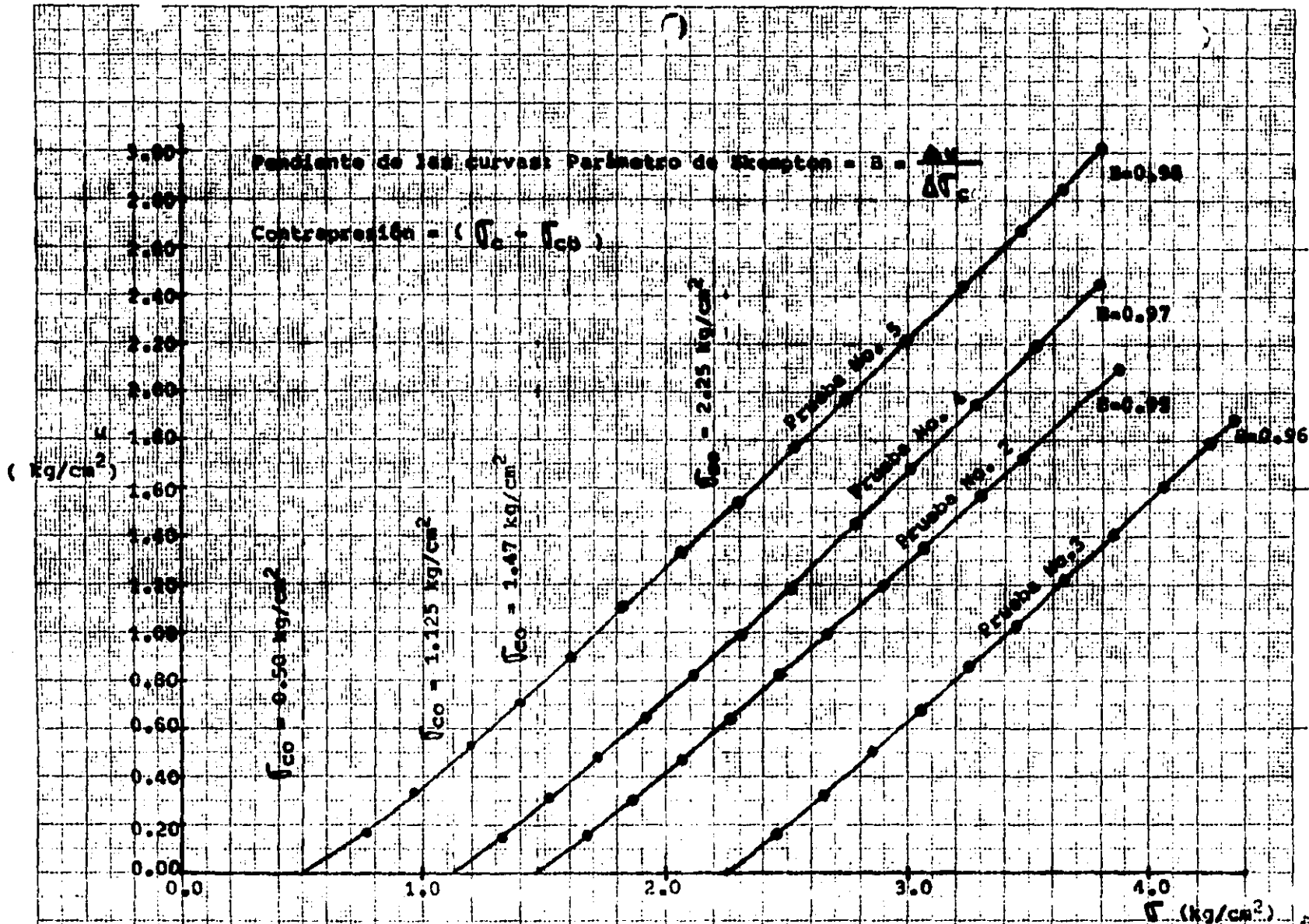


FIGURA III.17.- Curvas "Presión de poro-Presión de cámara, en las pruebas CU Nos.2,3,4 y 5.

III.6.- El suelo estudiado.

Clasificación general:

Arcilla de alta compresibilidad, color gris verdoso.

Localización:

Centro de la ciudad de México.

Profundidad del muestreo:

Muestra (1-A3), de 7.44 m a 7.67 m

Muestra (1-A4), de 7.67 m a 7.90 m

Tipo de muestra:

Inalterada, mediante tubo de pared delgada, de 5 pulgadas de diámetro interior.

Manejo y preparación de las muestras:

En el cuarto húmedo, se extruyeron las dos muestras - de sus respectivos tubos, mediante la realización de una gran cantidad de perforaciones realizadas en la periferia de cada muestra, y mediante el recorrido - de un alambre delgado de acero, que separó totalmente a la muestra de la pared metálica del muestreador. Ya libres las dos muestras, se cortaron a la mitad de su altura, y en cruz respecto a su sección transversal, con lo que se formaron 16 prismas que fueron inmediatamente protegidos con papel aislante y autoadhe- rible "EGApac" y papel aluminio. Enseguida, fueron - introducidos en tres envases metálicos en cuyo inte- rior se colocaron previamente pedazos de algodón húme- do exprimido (el cual era revisado periódicamente pa- ra tratar de controlar algún cambio de humedad dentro de los envases). Las tapas de estos recipientes fue- ron colocadas y selladas con cinta adhesiva.

Propiedades índice:

De acuerdo al promedio aritmético realizado con todos los valores obtenidos de la arcilla estudiada, se --
presentan los siguientes resultados:

LL%	=	385	±	25	
LP%	=	100	±	10	
IP	=	275	±	25	
C_r	=	-0.056	±	0.044	
δ_m	=	1.14	±	0.02	(en Ton/m ³)
Ss	=	2.55	±	0.07	
Gw%	=	99.11	±	0.65	
e_o	=	9.99	±	0.37	
Wo%	=	389	±	19	

Todas las mediciones de los límites de Atterberg --
hechas a las dos muestras de suelo, quedan relacionadas --
en la carta de plasticidad, mostrada en la fig. III.18 .

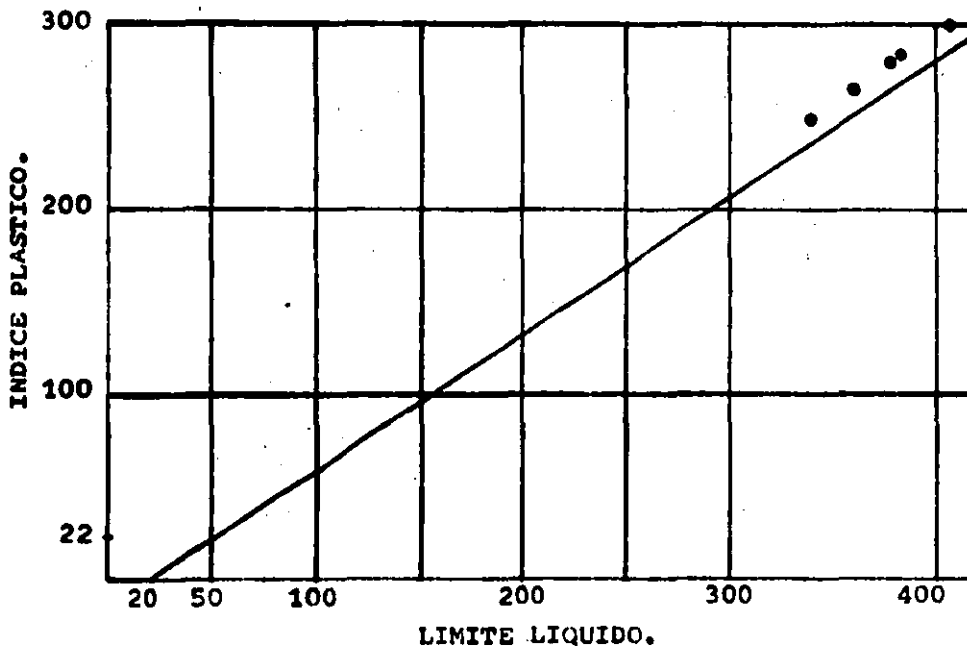


FIGURA III.18.- Carta de Plasticidad.

Propiedades mecánicas:

De acuerdo a la columna estratigráfica del sondeo a que pertenecen estas muestras, el esfuerzo efectivo se estimó como $\sigma_{01} = 0.7 \text{ Kg/cm}^2$. Asimismo, se estableció el esfuerzo crítico de la arcilla estudiada como $\sigma_b = 1.0 \text{ Kg/cm}^2$.

También se hicieron determinaciones en las dos caras superior e inferior de cada muestra, de la resistencia mediante la aplicación del penetrómetro de bolsillo, obteniéndose que q_u , tenía valores entre 0.5 y 0.7 Kg/cm^2 .

Todos estos datos fueron proporcionados conjuntamente con las muestras utilizadas en esta investigación. Las cuales fueron amablemente cedidas por el Dr. Leonardo Zeevaert W. , lo que constituyó una amplia garantía de la calidad de las mismas.

III.7.- Pruebas realizadas.

Pruebas CU en muestras inalteradas:

Ensaye No.	σ_p (Kg/cm ²)	σ_{co} (Kg/cm ²)	$\frac{\sigma_p}{\sigma_{co}}$
1	1.00	1.00	1.0
2	1.47	1.47	1.0
3	2.25	2.25	1.0
4	2.25	1.125	2.0
5	2.25	0.50	4.5

Prueba de "Compresibilidad-expansibilidad", bajo esfuerzos volumétricos:

Ensaye No.	Muestra inalterada.	Muestra remoldeada
1	x	---

Pruebas de compresión simple:

Ensaye No.	Estructura	Tiempo de reposo a partir del remoldeo (días).
1	Remoldeada	8
2	Remoldeada	8
3	Remoldeada	18
4	Remoldeada	40
5	Remoldeada	90
6	Inalterada	--

IV.- RESULTADOS DE LABORATORIO.-

IV.1.- Valores representativos.

En este capítulo se presentan todos los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio, que formaron -- básicamente el trabajo experimental de esta tesis. Se muestra además, una comparación entre los valores medidos y los valores teóricos, calculados con los parámetros promedio, siguientes:

Para la compresibilidad: $\gamma = 0.42$
 $\gamma_p = 0.068$
 $\rho = 0.16$

Para la presión de poro: $\alpha = 0.35$
 $\beta = 3.50$

Para la resistencia : $\theta = 38^\circ$

(Para esfuerzos efectivos y superficies críticas de falla a 45° con la horizontal).

De acuerdo a la línea
 F de Casagrande: $\theta_F = 47^\circ$

La inclinación del plano de falla respecto a la horizontal resultó ser en promedio, de 45° .

IV.2.- Pruebas índice.

Humedad natural y límites de Atterberg.

Pruebas CU:

Probeta	Wo %	LL %	LP %	IP
1	387	360	95	265
2	405	410	110	300
3	373	340	90	250
4	380	386	101	285
5	394	380	100	280

Prueba "Compresibilidad-expansibilidad".

Probeta	Wo %	LL %	LP %	IP
Unica	375	380	83	283

Ss = 2.55

Pruebas CUI

Probeta	γ_m	Gw%	e_o
1	1.140	99.75	9.89
2	1.133	99.62	10.36
3	1.131	98.46	9.62
4	1.140	99.52	9.74
5	1.132	99.24	10.12

Prueba de "compresibilidad-expansibilidad".

Probeta	γ_m	Gw%	e_o
Unica	1.140	99.37	9.62

IV.3.- Compresibilidad.-

De la prueba de "compresibilidad-expansibilidad", bajo esfuerzos isótrópicos, se obtuvieron los datos:

$$\begin{aligned} \nu &= 0.42 \\ \delta p &= 0.068 \\ \rho &= 0.16 \end{aligned}$$

En la fig. IV.1, se presenta la curva de compresibilidad correspondiente a los valores de la tabla siguiente:

Tramo de compresión:

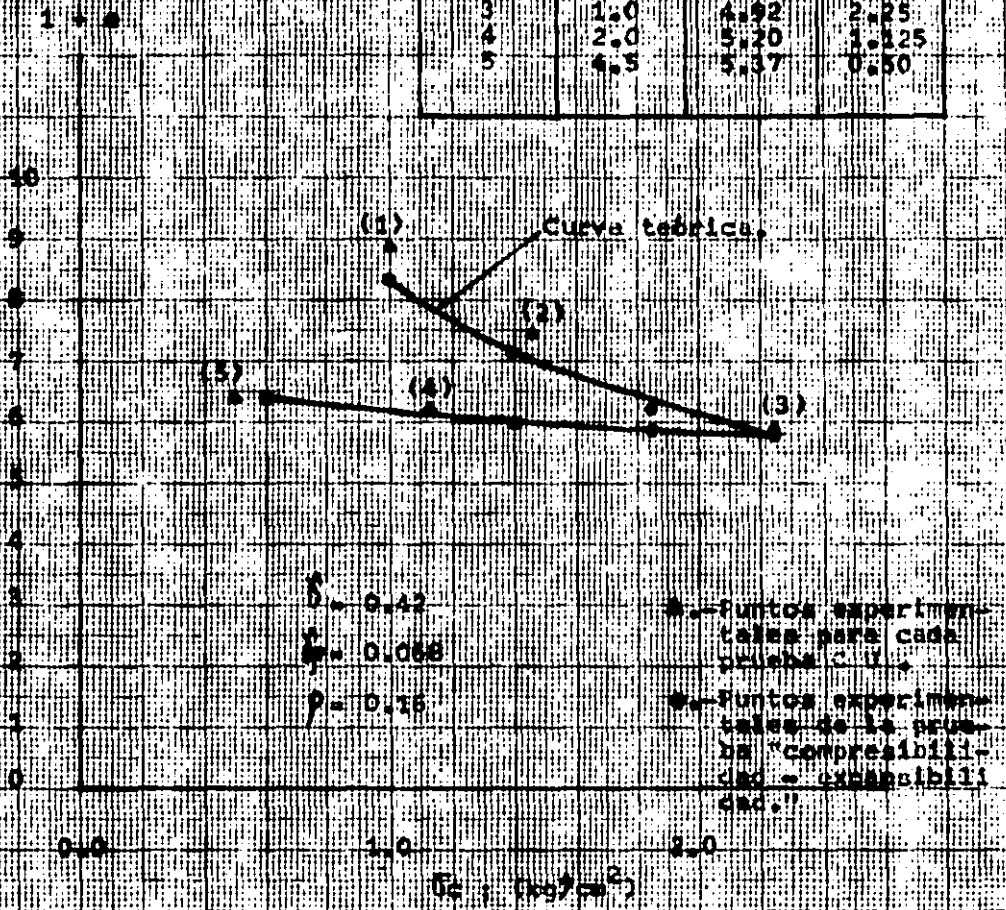
σ_c (Kg/cm ²)	e
0.00	9.62
0.60	8.55
1.00	7.38
1.40	6.14
1.85	5.27
2.25	4.85

Tramo de expansión:

σ_c (Kg/cm ²)	e
2.25	4.85
1.85	4.89
1.40	4.98
0.60	5.40

La curva teórica se determinó en base a la tabla de cálculo de la página a.6 del Anexo A.

Prueba No.	$\frac{\sigma_p}{\sigma_{co}}$	α	σ_{co} kg/cm ²
1	1.0	7.92	1.00
2	1.0	6.48	1.47
3	1.0	4.92	2.25
4	2.0	5.70	1.125
5	4.5	5.37	0.50



$$\frac{\sigma_p}{\sigma_{co}} = \left(\frac{\sigma_{co}}{\sigma_{co}} \right)^{1-\rho}$$

Expresión de la curva teórica.

$$\frac{\sigma_{co}}{\sigma_{co}} = \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_{co}} \right)^{\frac{1}{1-\rho}}$$

Relación entre el factor de preconsolidación y el grado de preconsolidación.

FIGURA IV.1.- Curva teórica de compresibilidad, y puntos experimentales.

IV.4.- Parámetros α y β , de la teoría de presión de poro.

Prueba C U :	α	β
1	No	No
2	0.35	3.00
3	0.31	3.70
4	0.40	3.40
5	0.32	3.60

Para el trazo de las curvas teóricas, se escogen los valores:

$$\alpha = 0.35$$

y

$$\beta = 3.50$$

En la figura IV.2, se muestran las curvas teóricas - "Presión de poro-esfuerzo desviador" así como los puntos experimentales obtenidos en las cinco pruebas C U.

En las figuras IV.3 a IV.6, se presentan las variaciones de la presión de poro, medidas respecto al esfuerzo desviador, ambos normalizados por la presión de confinamiento σ_c ; también se presentan las curvas teóricas correspondientes.

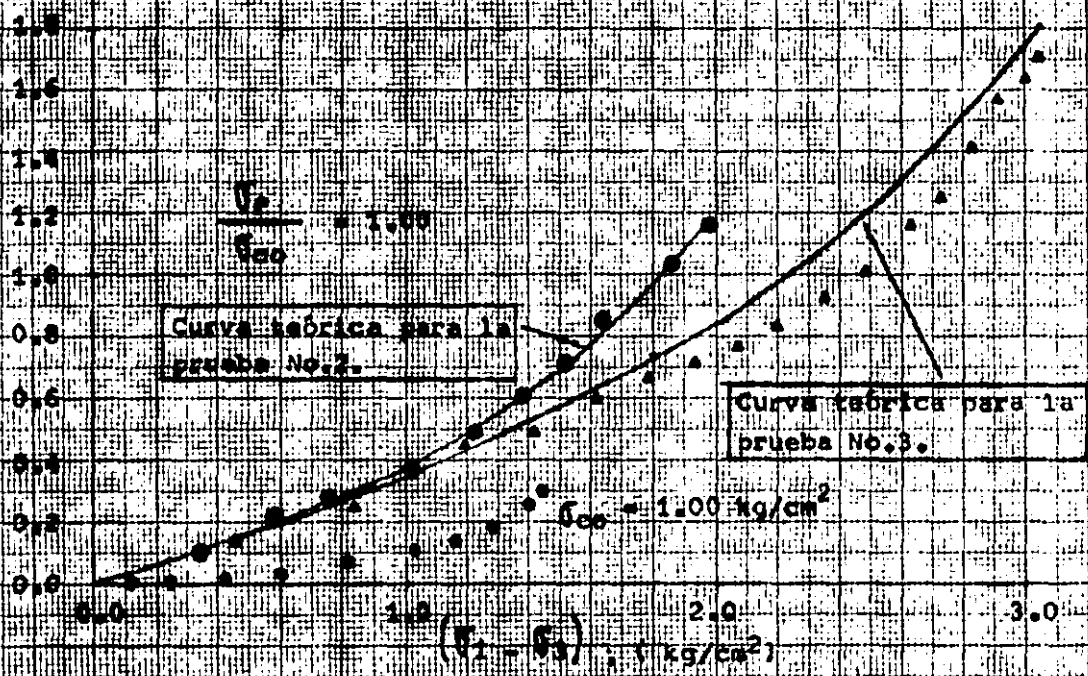
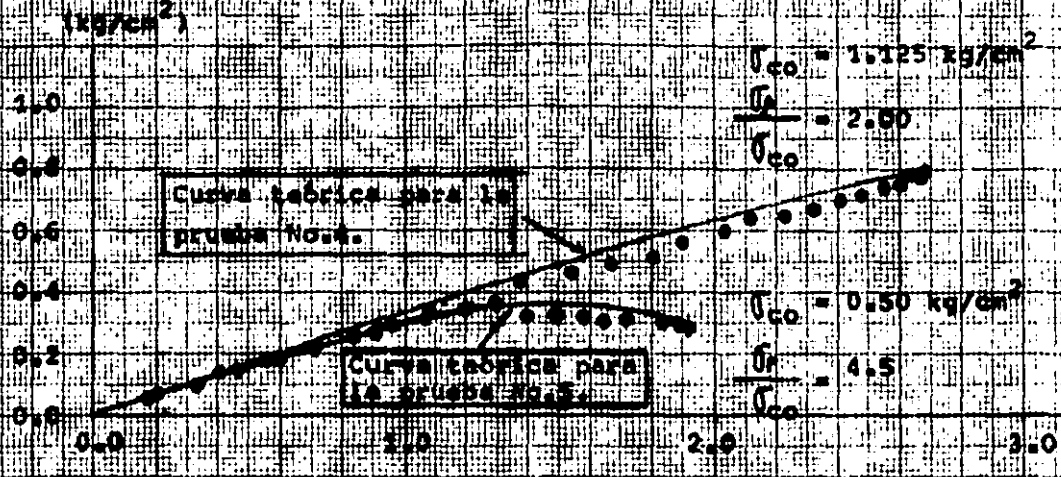


FIGURA IV.2.- Curvas teóricas "Presión de paro - Caudal desviador", y puntos experimentales.

Prueba C.U., No. 1
 $\bar{\sigma}_{co} = 1.00 \text{ kg/cm}^2$
 $\frac{\sigma}{\bar{\sigma}_{co}} = 1.0$

Nota.-- No se aplicó contrapresión, por lo que se supone que no se alcanzó la saturación completa.

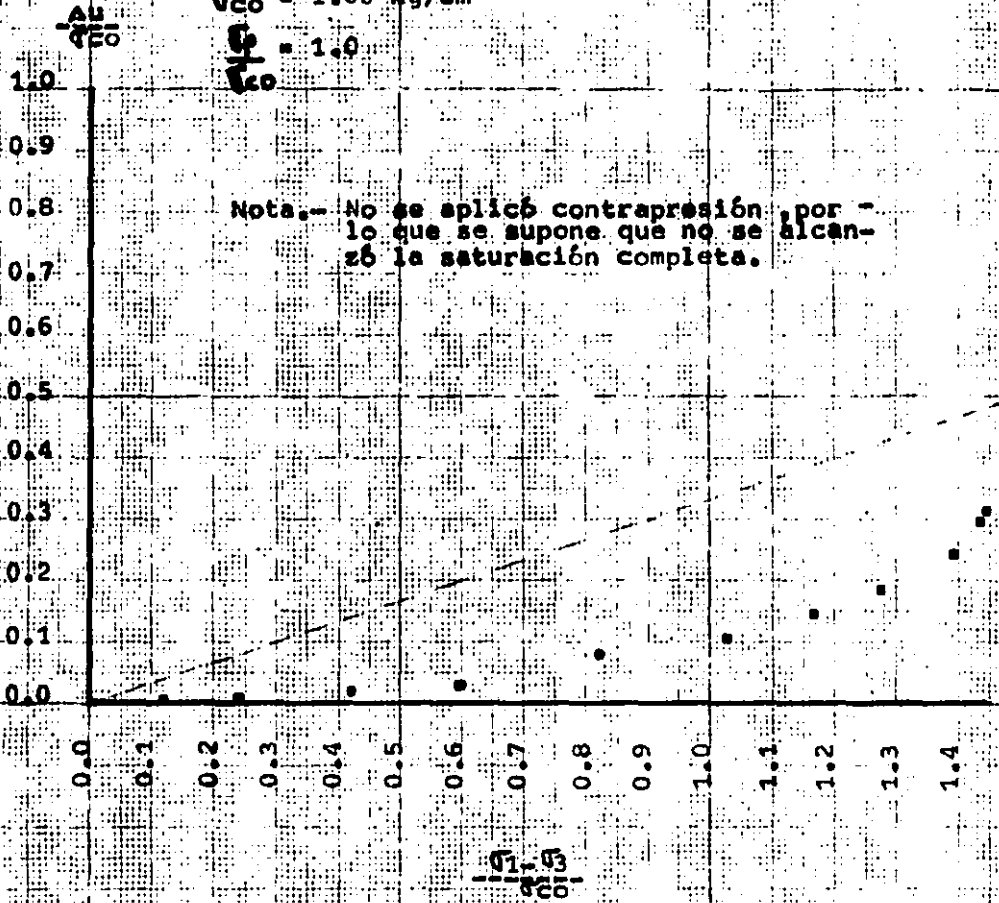


FIGURA IV.3.- Puntos experimentales de la variación de la presión de poro con el esfuerzo desviador, normalizados entre la presión de cámara $\bar{\sigma}_{co}$, en arcilla normalmente consolidada.

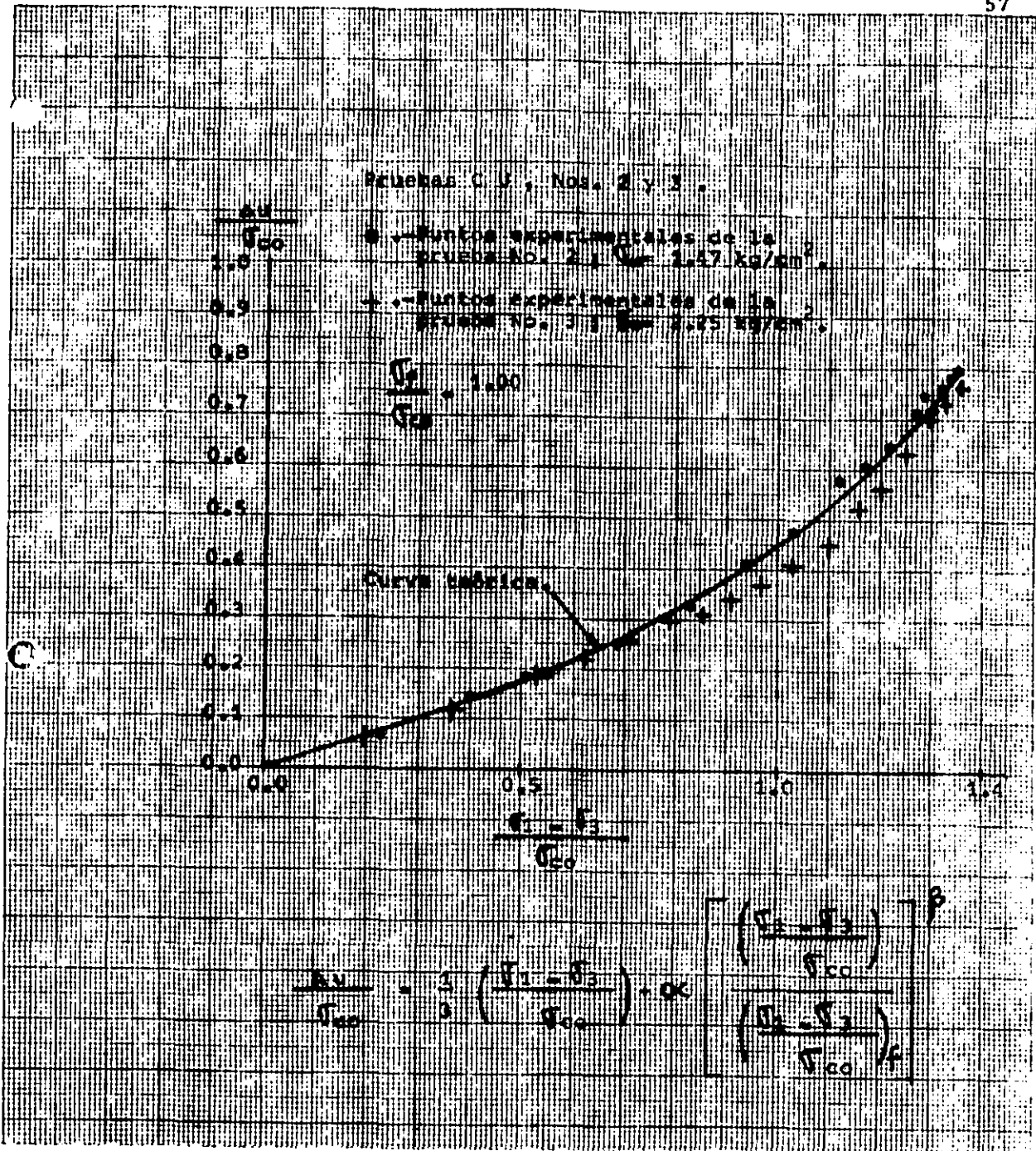
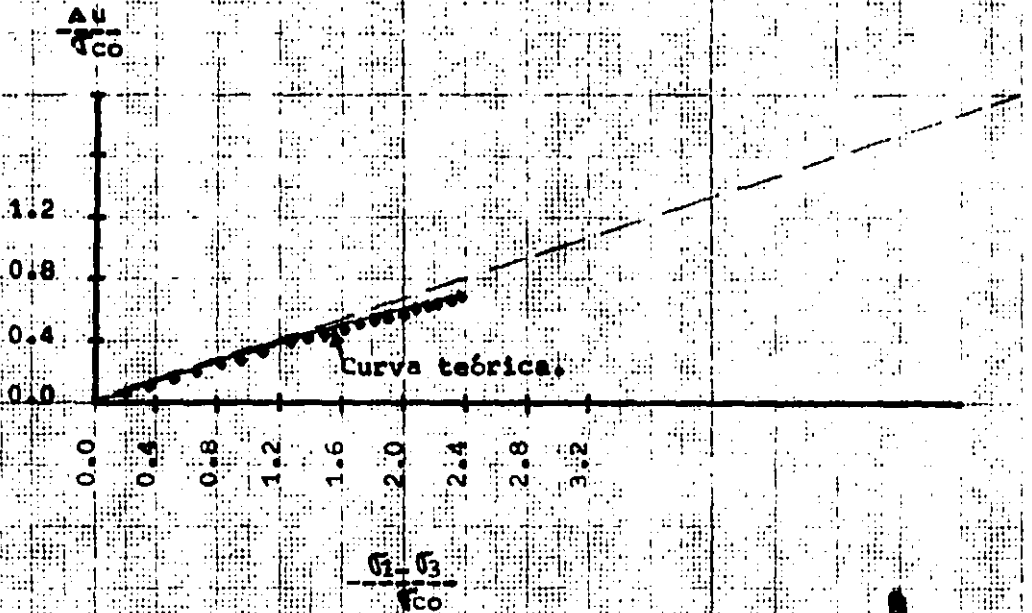


FIGURA IV.4.- Curva teórica y puntos experimentales de la variación de la presión de poro con el esfuerzo desviador, normalizados entre la presión de cámara σ_c , en arcilla normalmente consolidada.

Prueba CU, No.4 .

$$\sigma_{co} = 1.125 \text{ kg/cm}^2$$

$$\frac{\sigma_p}{\sigma_{co}} = 2.0$$



$$\frac{Au}{\sigma_{co}} = \frac{1}{3} \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{co}} \right) - \alpha \left(\frac{\sigma_{co}}{\sigma_{co}} - 1 - \frac{\sigma_{co}}{\sigma_{co}} \right) \left[\frac{\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{co}} \right)}{\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{co}} \right)_f} \right]$$

FIGURA IV.5.- Curva teórica y puntos experimentales de la variación de la presión de poro con el esfuerzo desviador, normalizados entre la presión de cámara, en arcilla preconsolidada.

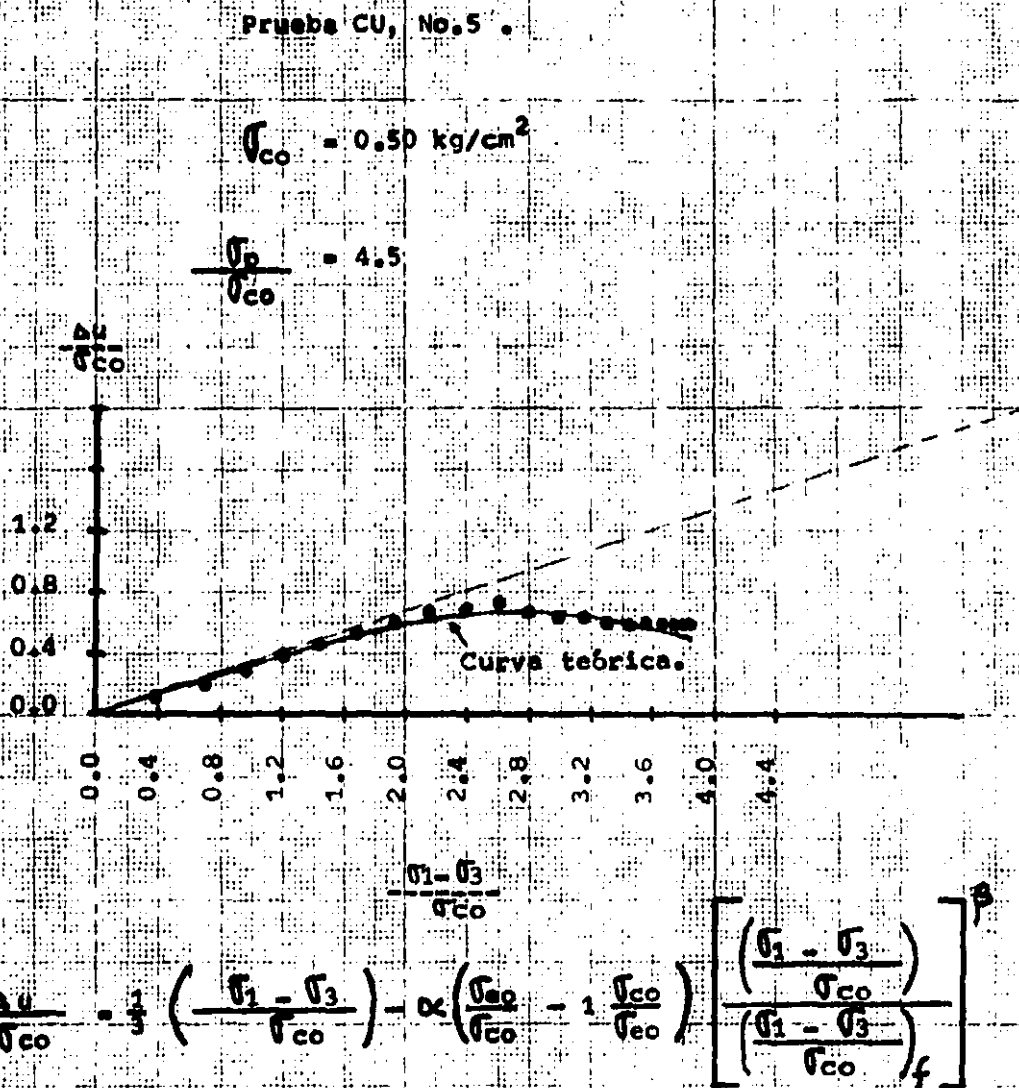


FIGURA IV.6.- Curva teórica y puntos experimentales de la variación de la presión de poro con el esfuerzo desviador, normalizados entre la presión de cámara σ_{co} , en arcilla preconsolidada.

IV.5.- Resistencia y relación esfuerzo-deformación axial.-

Prueba C U	$\frac{\sigma_p}{\sigma_{co}}$	$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ (Kg/cm ²)	u_s (Kg/cm ²)	ϵ_f
1	1.0	1.45	0.32	0.08150
2	1.0	1.98	1.17	0.1254
3	1.0	3.05	1.71	0.1100
4	2.0	2.68	0.80	0.0580
5	4.5	1.92	0.30	0.0300

De las cinco pruebas C U, se encontró un ángulo de fricción interna para esfuerzos efectivos y superficies críticas de falla a 45°, de: $\beta = 38^\circ$.

El ángulo de fricción interna β_f (Casagrande), correspondiente a la envolvente tangente a los círculos de Mohr, en esfuerzos efectivos, (línea F) quedó comprendido entre 47° y 51° de acuerdo a las cinco pruebas realizadas.

En las figuras IV.7 y IV.8, se presentan los círculos de Mohr y las envolventes de falla.

Las curvas "esfuerzo desviador-deformación axial", se trazaron de acuerdo a los valores calculados que se consignan en la tabla de la pág. No.63; y se presentan en las figuras IV.9 y IV.10. En dichas figuras se señalan los valores de deformación unitaria correspondientes a los esfuerzos máximos alcanzados en cada prueba.

τ
(kg/cm²)

Prueba.	$\frac{\sigma_1}{\sigma_3}$	$(\sigma_1 - \sigma_3) \phi$ kg/cm ²	$u \phi$ kg/cm ²	σ_3 kg/cm ²	σ_1 kg/cm ²	σ_3 kg/cm ²	τ kg/cm ²
1	1.0	1.48	0.32	1.0	2.48	0.68	2.18
2	1.0	1.98	1.17	1.47	3.45	0.30	2.38
3	1.0	3.08	1.71	2.28	5.36	0.24	2.69

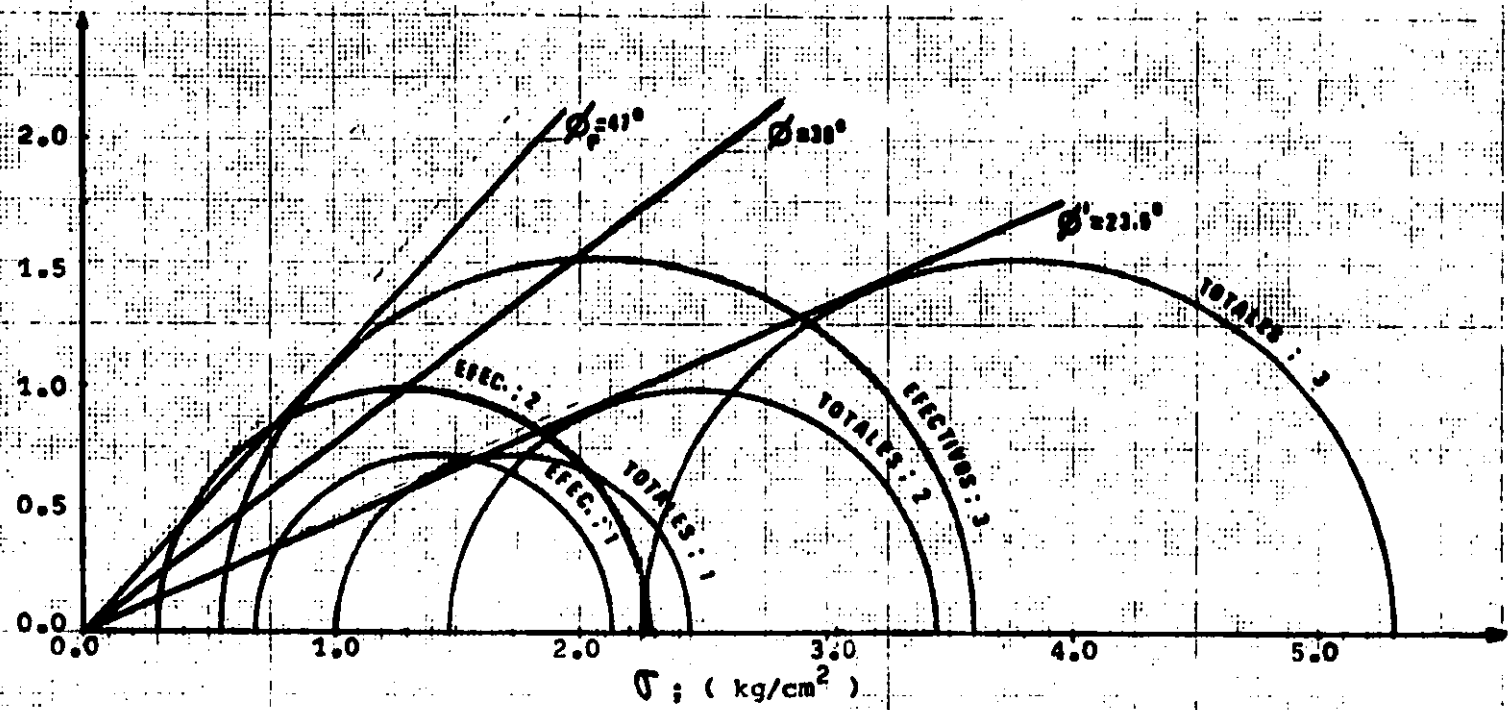


FIGURA IV.7.- Círculos de Mohr y envolventes de falla, correspondientes a las pruebas CU Nos. 1, 2 y 3.

Prueba.	$\frac{\sigma_1}{\sigma_3}$	$(\sigma_1 - \sigma_3)_c$ kg/cm ²	U_c kg/cm ²	σ_3 kg/cm ²	σ_1 kg/cm ²	$\bar{\sigma}_1$ kg/cm ²	$\bar{\sigma}_3$ kg/cm ²
(4)	2.0	2.68	0.90	1.13	3.01	0.33	3.01
(5)	4.5	1.92	0.30	0.80	2.42	0.20	2.12

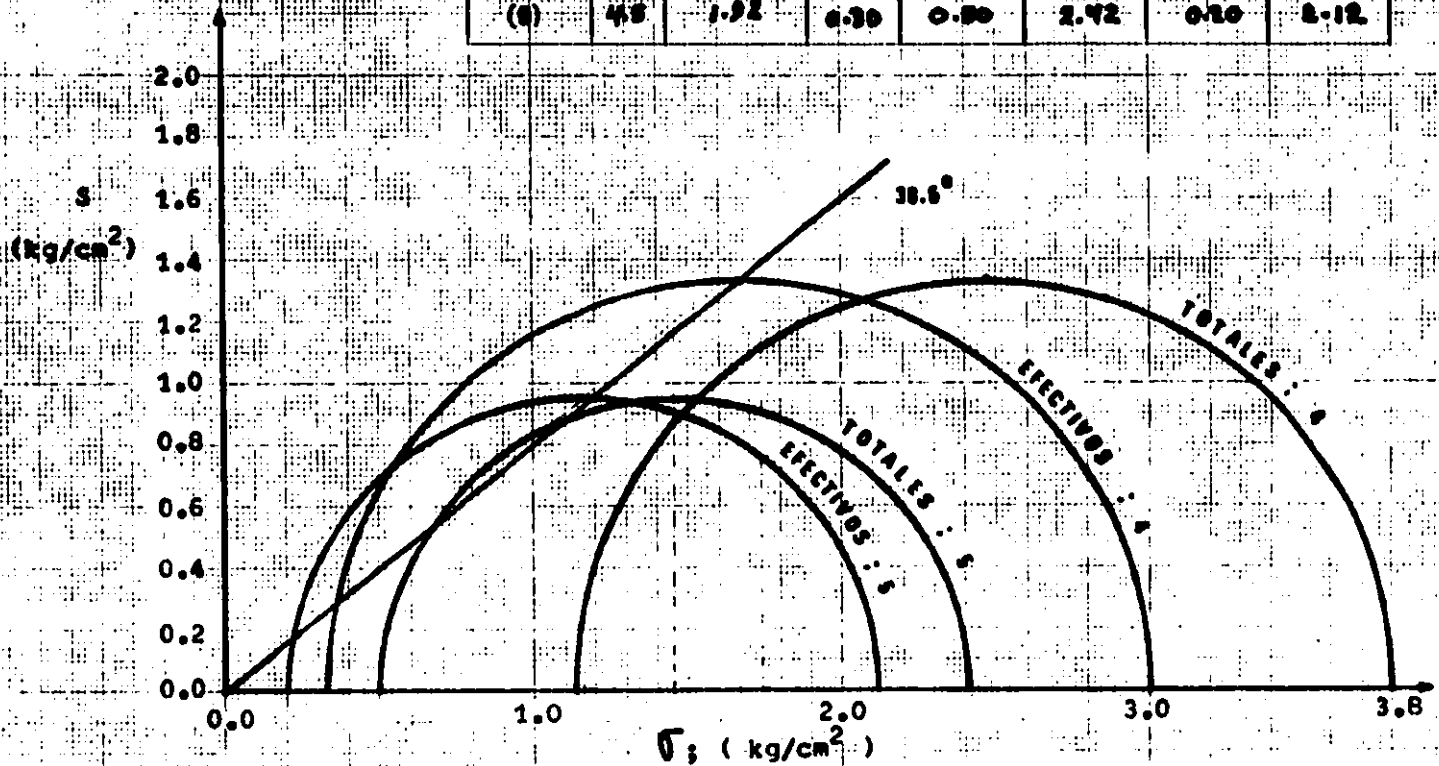


FIGURA IV.8.- Círculos de Mohr y envolventes de falla, correspondientes a las pruebas CU Nos. 4 y 5.

CURVAS ESFUERZO-DEFORMACION EN LAS PRUEBAS CU:

Incremento de carga.	No.1		No.2		No.3		No.4		No.5	
	$\sigma_1 - \sigma_3$ Kg/cm ²	ϵ	$\sigma_1 - \sigma_3$ Kg/cm ²	ϵ	$\sigma_1 - \sigma_3$ Kg/cm ²	ϵ	$\sigma_1 - \sigma_3$ Kg/cm ²	ϵ	$\sigma_1 - \sigma_3$ Kg/cm ²	ϵ
0	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.0000
1	0.12	0.0031	0.34	0.0038	0.46	0.0029	0.21	0.0010	0.19	0.0012
2	0.24	0.0042	0.59	0.0070	0.84	0.0070	0.40	0.0018	0.34	0.0015
3	0.42	0.0071	0.75	0.0116	1.20	0.0105	0.56	0.0025	0.47	0.0022
4	0.60	0.0121	1.02	0.0165	1.42	0.0140	0.72	0.0034	0.60	0.0026
5	0.82	0.0165	1.22	0.0240	1.61	0.0175	0.91	0.0035	0.72	0.0029
6	1.03	0.0235	1.38	0.0325	1.79	0.0205	1.07	0.0055	0.84	0.0033
7	1.17	0.0330	1.52	0.0410	1.94	0.0240	1.22	0.0062	0.96	0.0036
8	1.28	0.0391	1.64	0.0510	2.07	0.0275	1.38	0.0070	1.08	0.0045
9	1.40	0.0530	1.72	0.0605	2.20	0.0300	1.53	0.0075	1.20	0.0048
10	1.44	0.0720	1.79	0.0700	2.35	0.0350	1.67	0.0090	1.30	0.0057
11	1.452	0.0815	1.86	0.0820	2.49	0.0395	1.80	0.0113	1.40	0.0065
12	1.420	0.1061	1.90	0.0945	2.64	0.0460	1.92	0.0135	1.49	0.0075
13			1.96	0.1050	2.73	0.0550	2.30	0.0160	1.58	0.0090
14			1.97	0.1165	2.83	0.0645	2.13	0.0185	1.65	0.0110
15			1.98	0.1254	2.92	0.0750	2.23	0.0215	1.72	0.0125
16					2.95	0.0840	2.32	0.0250	1.78	0.0150
17					3.00	0.0940	2.41	0.0290	1.83	0.0190
18					3.05	0.1100	2.48	0.0335	1.87	0.0225
19							2.55	0.0380	1.90	0.0255
20							2.60	0.0435	1.92	0.0300
21							2.64	0.0480		
22							2.66	0.0530		
23							2.68	0.0580		

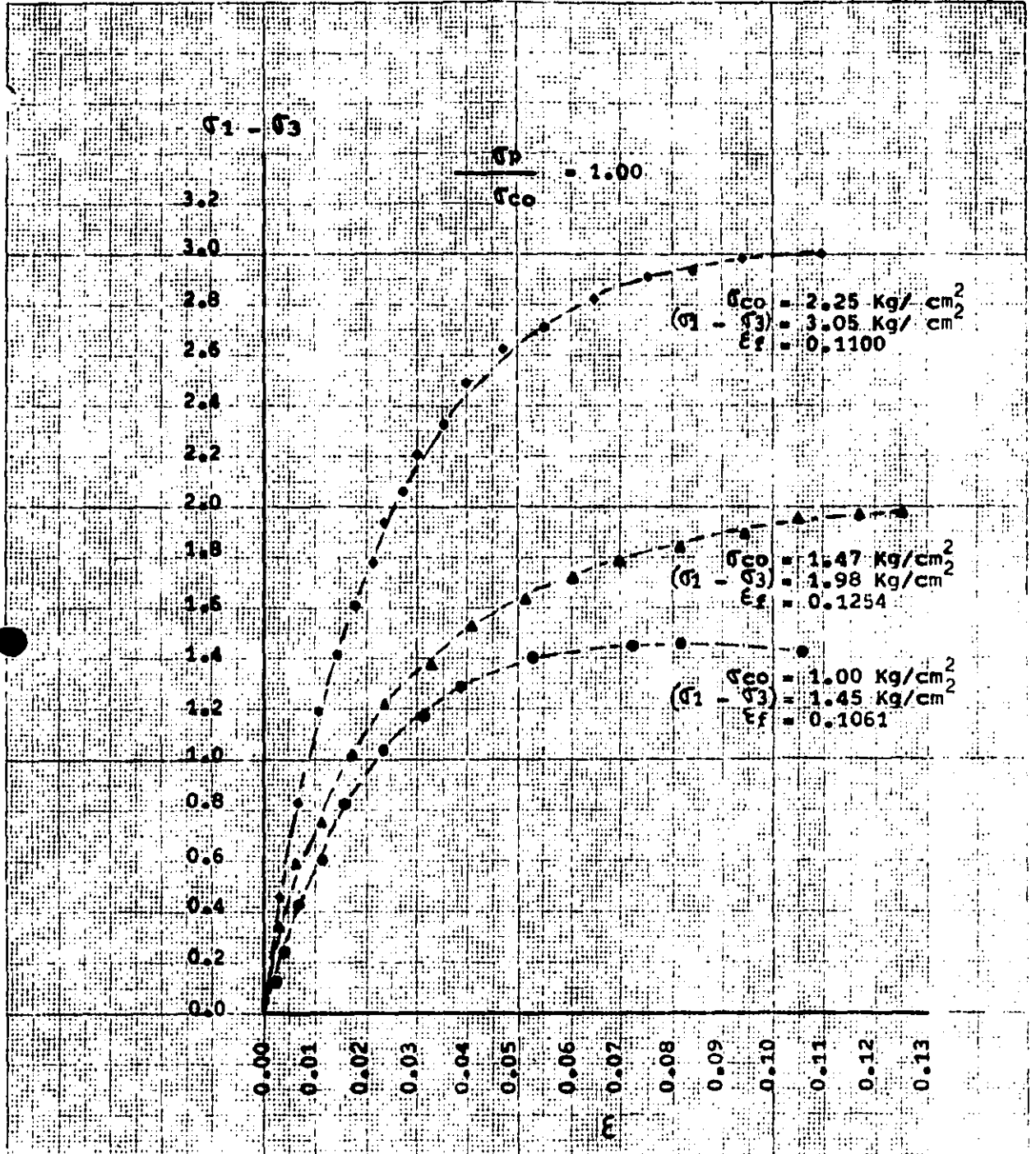


FIGURA IV.9.- Curvas "Esfuerzo desviador - Deformación axial unitaria", correspondientes a las pruebas CU, Nos. 1, 2 y 3.

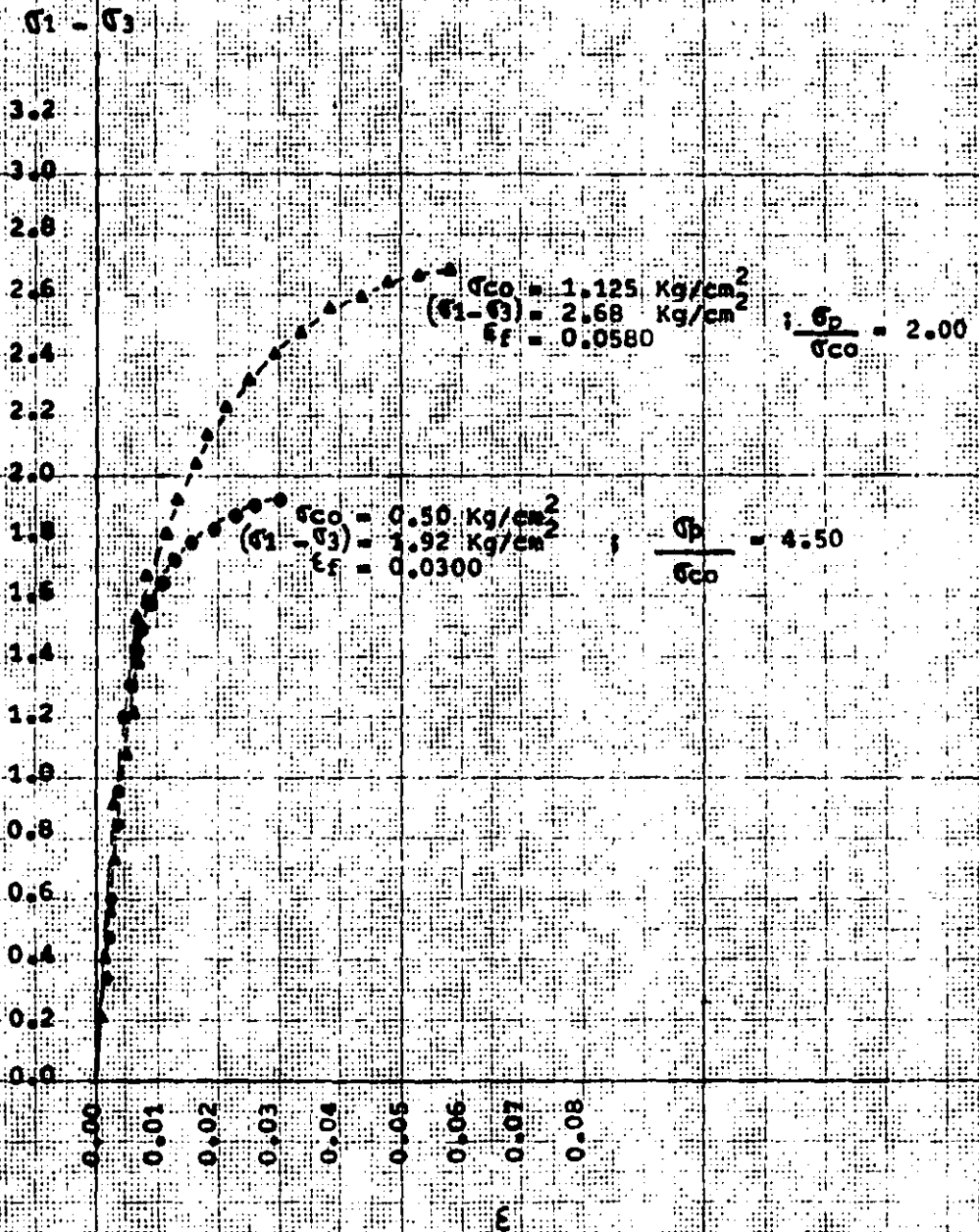


FIGURA IV-10.- Curvas "Esfuerzo desviador - Deformación axial unitaria", correspondientes a las pruebas CU, Nos. 4 y 5.

IV.6.- Comparación entre valores calculados con los parámetros promedio, y los valores medidos.

Determinación de $\frac{\sigma_e}{\sigma_c}$:

$\frac{\sigma_p}{\sigma_c}$	2	4.5	OBSERVACIONES
$\left(\frac{\sigma_e}{\sigma_c}\right)_{\text{exp.}}$	1.77	3.44	Determinados directamente de la curva de compresibilidad correspondiente a la prueba de "compresibilidad-expansibilidad".
$\left(\frac{\sigma_e}{\sigma_c}\right)_{\text{teor.}}$	1.79	3.54	Calculados, considerando $\rho = 0.16$
Relación:	0.989	0.972	Relación consistente.

Determinación de $\left(\frac{\sigma_{eo}}{\sigma_{co}} - 1 - \frac{\sigma_{co}}{\sigma_{eo}}\right)$:

$\frac{\sigma_p}{\sigma_c}$	2	4.5	OBSERVACIONES
$\left(\frac{\sigma_{eo}}{\sigma_{co}} - 1 - \frac{\sigma_{co}}{\sigma_{eo}}\right)_{\text{exp.}}$	0.205	2.1493	Calculado con los $\left(\frac{\sigma_e}{\sigma_c}\right)_{\text{exp.}}$
$\left(\frac{\sigma_{eo}}{\sigma_{co}} - 1 - \frac{\sigma_{co}}{\sigma_{eo}}\right)_{\text{teor.}}$	0.2313	2.2548	Calculado con los $\left(\frac{\sigma_e}{\sigma_c}\right)_{\text{teor.}}$

Determinación de α :

$\frac{\sigma_p}{\sigma_c}$	2	4.5	OBSERVACIONES
$\alpha_{exp.}$	0.40	0.32	Calculados con $\log\left(\frac{\sigma_e}{\sigma_c}\right)_{exp.}$
$\alpha_{teor.}$	0.350	0.30.	Calculados con $\log\left(\frac{\sigma_e}{\sigma_c}\right)_{teor.}$

Se toma $\alpha = 0.35$ Determinación de β :

$\frac{\sigma_p}{\sigma_c}$	2	4.5	OBSERVACIONES
$\beta_{exp.}$	3.20	3.60	Se calcularon con $\alpha_{exp.}$
$\beta_{teor.}$	3.20	3.60	Se calcularon con $\alpha_{teor.}$

Se toma $\beta = 3.50$

Determinación en la falla, de la resistencia y la presión de poro:

Valores experimentales.

Esfuerzo desviador y presión de poro en la falla.	σ_{co} ; (Kg/cm ²)		
	1.00	1.47	2.25
$\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{co}}\right)_f$	1.45	1.35	1.36
$\left(\frac{\Delta u}{\sigma_{co}}\right)_f$	0.32	0.80	0.76

Valores experimentales.

Esfuerzo desviador y presión de poro en la falla.	Grado de preconsolidación		
	1	2	4.5
$\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{co}}\right)_f$	1.39	2.38	3.84
$\left(\frac{\Delta u}{\sigma_{co}}\right)_f$	0.78	0.71	0.60

■.- Valores promedio.

Valores calculados con los parámetros promedio y las propiedades de la curva teórica.

Esfuerzo desviador y presión de poro en la falla.	$\bar{\sigma}_{co}$ (Kg/cm ²)		
	1.00	1.47	2.25
$\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\bar{\sigma}_{co}} \right)_f$		1.37	
$\left(\frac{\Delta u}{\bar{\sigma}_{co}} \right)_f$		0.81	

Valores calculados con los parámetros promedio y las propiedades de la curva teórica.

Esfuerzo desviador y presión de poro en la falla.	Grado de preconsolidación		
	1	2	4.5
$\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\bar{\sigma}_{co}} \right)_f$	1.37	2.38	3.87
$\left(\frac{\Delta u}{\bar{\sigma}_{co}} \right)_f$	0.81	0.71	0.50

Para intentar una comparación gráfica de las resistencias y presiones de poro en la falla, tanto teóricas como experimentales, de acuerdo al factor de preconsolidación $\frac{\sigma_{eo}}{\sigma_{co}}$, y el grado de preconsolidación $\frac{\sigma_{po}}{\sigma_{co}}$, se

realizó el cálculo de la resistencia teórica, para $r=0$, $r=0.016$ y $r=0.057$, de acuerdo a los datos que aparecen en las tablas anteriores, con lo que se presentan los siguientes valores de la resistencia:

r	$\frac{\sigma_{eo}}{\sigma_{co}}$; $\frac{\sigma_{po}}{\sigma_{co}}$		
	(1.0) ; (1.0)	(1.79) ; (2.0)	(3.54);(4.5)
0	1.37	2.28	3.78
0.016	--	2.31	3.87
0.057	--	2.38	4.09

Con base en estos datos y los obtenidos de las tablas antes mencionadas, se hizo la comparación gráfica que aparece en la figura IV.11 .

De acuerdo a esta figura parece que el valor de $r=0.016$, es el que da valores de la resistencia teórica más próximos a los valores reales, por lo que pudiera suponerse que en la arcilla estudiada en el momento de la falla el valor del parámetro r podría no ser nulo, lo que indicaría que en las direcciones de los planos de falla hubo presión almacenada, la que pudo inducir tensión de poro adicional en el agua intersticial.

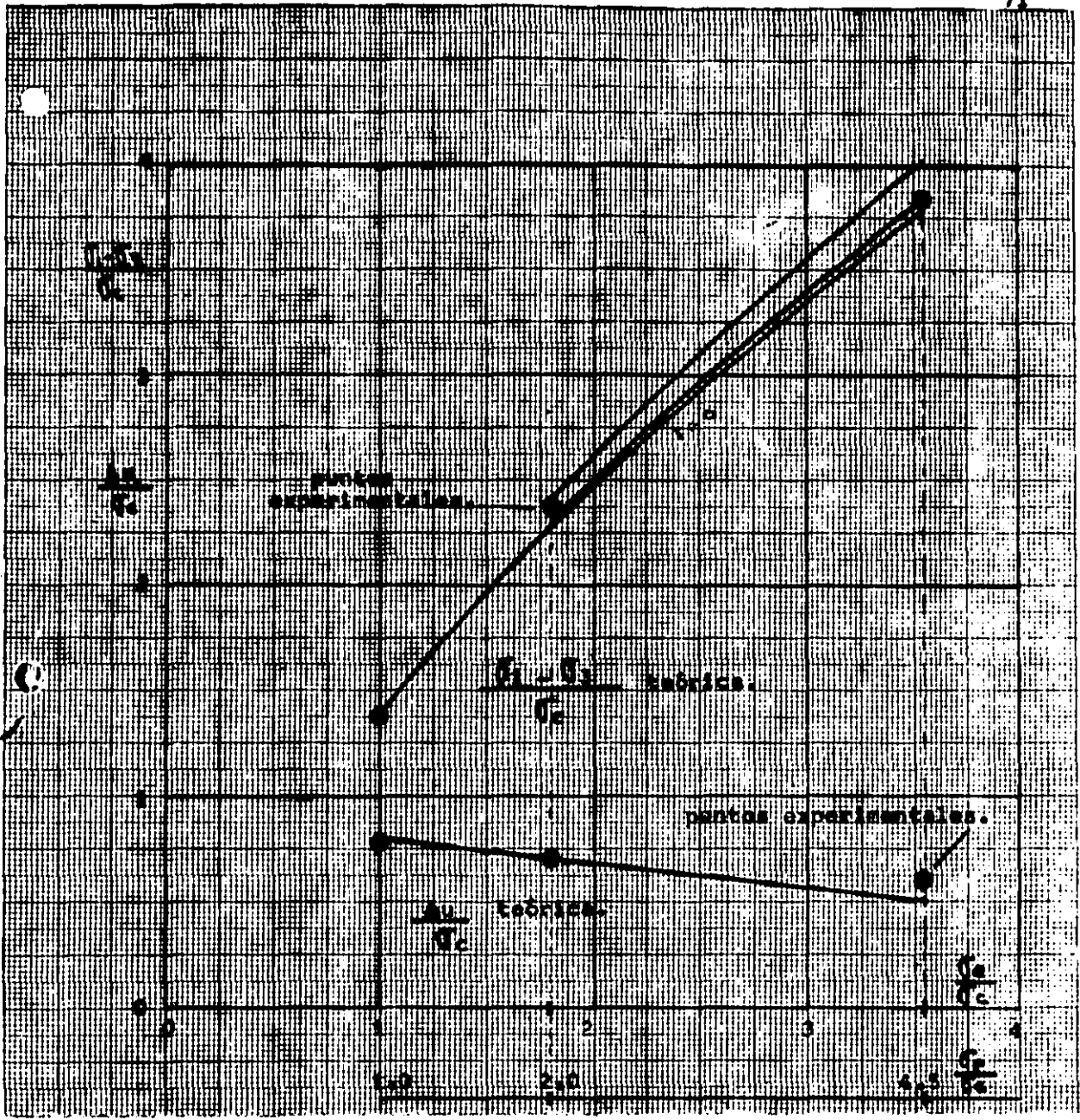


FIGURA IV.11.- Resistencias y presiones de poro en la falla. Pruebas CU.

V.- OBSERVACIONES GENERALES DE PROCEDIMIENTO.-

V.1.- Respecto al suelo.-

Uno de los principales problemas que se presentan para llevar a cabo una investigación experimental que requiera de diferentes condiciones de prueba en un mismo suelo, es la representatividad del mismo, lo que exige condiciones estrictas de homogeneidad, además de una alta calidad respecto a la conservación de sus propiedades originales, mediante un muestreo y procedimiento de conservación adecuados.

Para la realización de este trabajo se trató en lo posible de cumplir con las condiciones antes mencionadas; sin embargo se encontró que en los 5.8 dm³ de suelo disponible para el estudio, las propiedades índice variaron de la manera siguiente:

LL%	=	385	±	25	
LP%	=	100	±	10	
IP	=	275	±	25	
C _r	=	-0.056	±	0.044	
γ _m	=	1.14	±	0.02	(en Ton/m ³)
S _s	=	2.55	±	0.07	
Gw%	=	99.11	±	0.65	
C _o	=	9.99	±	0.37	
Wo%	=	389	±	19	

En un esfuerzo por reducir en lo posible la dispersión en las propiedades del suelo que iba a ser utilizado en las pruebas mecánicas se hizo una selección cuidadosa de las diferentes zonas de las dos muestras escogidas para esta investigación, evitando pequeñas lentes de limo.

De acuerdo al criterio de Eulalio Juárez Badillo se consideraron inalteradas las probetas de suelo, con base a que éstas no fueron sometidas antes de su formación a un remoldeo total por amasado; aunque se sabe que al consolidarse todas ellas a niveles de esfuerzo mayores al -

esfuerzo crítico, sufrieron cambios estructurales, lo -- que se manifiesta al quedar este suelo, sobre la rama -- virgen de la curva de compresibilidad.

Con los procedimientos de conservación del suelo, - adoptados en este trabajo experimental, no se observaron cambios de contenido de agua significativos en los pris- mas de suelo almacenados en el cuarto húmedo, ya que es- tos cambios para un mismo punto, fueron de $\pm 4\%$. Lo que en parte pudo deberse a variaciones generadas por la ma- nipulación.

V.2.- Respecto al equipo.-

Para armar el equipo de prueba, fue necesario pre- viamente establecer las condiciones básicas del tipo de prueba a realizarse. En este caso se trató como se sabe de pruebas de compresión triaxial consolidadas no drena- das, con medición de presión de poro (pruebas C U). Con base en esto, se procedió a realizar un diseño funcional del equipo, mediante el cual se identificaron las dife- rentes componentes del mismo, tanto en su tipo como en su número. Estas componentes fueron: conexiones, niples, coples reductores, mangueras, buretas graduadas, válvu- las de aguja, válvulas sin cambio volumétrico, vasos de interfase, tubos sarán, reguladores de presión, manóme- tros, etc. aparte obviamente de la cámara triaxial, el - transductor para medición de presión de poro y el puente de Wheatstone, empleados.

El sistema de control de las presiones aplicadas -- en el aparato estuvo constituido por manómetros de mercurio principalmente, en los cuales la precisión fue de -- 0.01 Kg/cm^2 .

El sistema de medición de la presión de poro, com- puesto por el transductor y el puente de Wheatstone, re- basó la precisión obtenida en los manómetros de mercurio, ya que 37 unidades leídas en dicho puente, equivalían -- aproximadamente a los 0.01 Kg/cm^2 .

Con el fin de distribuir lo mejor posible los incrementos de esfuerzo, durante las diferentes etapas de la prueba, el sistema de aplicación de cargas requirió de una distribución de pesos que iban desde los tres kilos aproximadamente hasta los 10 gramos.

El sistema de medición de cambios de volumen, se armó procurando reducir al máximo los espacios de conducción, además de utilizar materiales rígidos. Sin embargo, se pudieron apreciar algunas variaciones en las lecturas de las buretas, debidas a la deformación del sistema.

Las características de los sistemas de medición, también obedecieron a las necesidades que exigió el tipo de suelo que iba a estudiarse, así fue como se determinaron los grados de precisión y las dimensiones en las buretas y manómetros de mercurio y también la magnitud de las cargas empleadas.

Un problema muy importante en el equipo utilizado fue el evitar totalmente las fugas en las vías de conducción; esto se logró hasta presiones de prueba de 6 Kg/cm², empleando principalmente cinta de teflón en las conexiones, así como pasta de sílex en las zonas en contacto con el aceite de silicón utilizado en las buretas, con el fin de lograr una interfase mediante la cual, se pudieran leer los cambios de volumen.

Por el gran número de conexiones que tuvo el equipo utilizado, fue necesario frecuentemente revisar su funcionamiento para evitar cualquier fuga que hiciera fracasar el desarrollo de las pruebas.

Fue muy interesante descubrir, que sólo después de diseñar y armar el equipo de prueba, la operación del mismo por parte del autor de esta tesis, resultó bastante segura y relativamente sencilla, como consecuencia de su conocimiento detallado.

El sistema que más problemas presentó debido a las fugas, fue el de medición de la presión de poro, ya que existía un contacto deficiente entre la purga del transductor y éste, lo que fue corregido mediante el empleo de una resina y un aro-sello de hule.

V.3.- Respecto a los resultados.-

Todos los cálculos y procesamientos de los datos -- referidos en las tablas que aparecen en el Anexo A, se basaron en los criterios de interpretación establecidos por la teoría de Eulalio Juárez Badillo y sólo en contadas ocasiones se hicieron interpretaciones de otra índole con el fin de esclarecer en lo posible la importancia de algunas comparaciones como fueron los casos correspondientes a la variación de la presión de poro "U" de acuerdo al esfuerzo desviador $(\sigma_1 - \sigma_3)$, y a la naturaleza de los ángulos de fricción de las diferentes envolventes de falla obtenidas.

Se midió en la arcilla estudiada un coeficiente de compresibilidad, $\chi = 0.42$ y una relación "expansibilidad-compresibilidad", $\beta = 0.16$. Siendo $\chi_p = 0.068$.

La presión de poro en la falla, normalizada entre la presión confinante, en las muestras normalmente consolidadas, tuvo un valor consistente que en promedio resultó ser $\left(\frac{\Delta u}{\sigma_{co}}\right)_f = 0.78$; mientras que en las muestras preconsolidadas, varió con el grado de preconsolidación de 0.78 a 0.60.

La resistencia al corte normalizada entre la presión confinante, en las muestras normalmente consolidadas, tuvo un valor prácticamente consistente que en promedio resultó ser $\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{co}}\right)_f = 1.39$; mientras que en las

muestras preconsolidadas, varió con el grado de preconsolidación de 1.39 a 3.84.

Los valores correspondientes a los parámetros α y β , resultaron ser:

Prueba No.	$\frac{\sigma_p}{\sigma_c}$	α	β
1	1.00	-	-
2	1.00	0.35	3.0
3	1.00	0.31	3.7
4	2.00	0.40	3.4
5	4.50	0.32	3.6

Con base en el punto anterior se adoptaron para la arcilla los siguientes valores:

$$\alpha = 0.35 \quad \beta = 3.50$$

De acuerdo a los valores medidos de la resistencia, se adopta para la arcilla un ángulo de fricción interna, $\phi = 38^\circ$, para esfuerzos efectivos y superficies críticas de falla a 45° con la horizontal; mientras que de acuerdo a la línea F de Casagrande, se determinó $\phi_F = 47^\circ$.

De acuerdo a lo anterior los valores teóricos de $\left(\frac{\Delta u}{\sigma_{co}}\right)_f$ y $\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{co}}\right)_f$, se calcularon con:

$$\alpha = 0.35 ; \quad \beta = 3.5 ; \quad \phi = 38^\circ ; \quad \rho = 0.16$$

En las muestras normalmente consolidadas, el valor teórico de $\left(\frac{\Delta u}{\sigma_{co}}\right)_f = 0.81$, respecto a los valores -

experimentales, tuvo una diferencia de -5.5% a 1.5% ; -
mientras que en las muestras preconsolidadas varió de -
-1.5% a 1%.

Ninguno de los resultados aquí presentados ha sido_
corregido por los efectos del papel filtro, la membrana_
de hule y la fricción del sistema de carga. Para esto,-
sería necesario conocer las propiedades mecánicas de los
materiales correspondientes a cada caso.

Respecto a la resistencia del suelo se consideró la
relación $\theta_u = \text{arc sen} (\text{Tan } \theta)$, para determinar el grado
de aproximación entre esta relación y la calculada con -
los datos experimentales.

θ , es el ángulo de fricción interna considerando -
los planos críticos de falla a 45° , mientras que θ_u es
el ángulo de inclinación de la envolvente tangente, es -
decir para planos de falla inclinados con la horizontal_
un ángulo $45^\circ + \theta_u/2$, donde $\theta_u > \theta$.

Para la arcilla estudiada se midió un ángulo de --
fricción interna para planos críticos de falla a 45° de
 $\theta = 38^\circ$, lo que según la relación antes mencionada co-
rresponde a un $\theta_u = 51^\circ, 23'$. El θ_u medido quedó com--
prendido entre 51° y 47° .

Se observó en las 5 pruebas C U realizadas, que el_
plano de falla, se definió con una inclinación aproxima-
da de 45° con la horizontal, esto se midió con un trans-
portador y los datos correspondientes, se presentan en -
la tabla siguiente:

Prueba No.	σ_p / σ_c	ángulo medido
1	1	47°
2	1	45°
3	1	46°
4	2	44°
5	4.5	45°

Finalmente, para los valores calculados del parámetro r , de acuerdo con los aspectos teóricos establecidos; se obtuvo para la prueba CU No. 4, con $\sigma_{co}=1.125 \text{ Kg/cm}^2$, $\frac{\sigma_{po}}{\sigma_{co}} = 2.0$ y $\frac{\sigma_{eo}}{\sigma_{co}} = 1.79$, un r de 0.057; mientras que para la prueba CU No. 5, con $\sigma_{co} = 0.60 \text{ Kg/cm}^2$, $\frac{\sigma_{po}}{\sigma_{co}}=4.5$ y $\frac{\sigma_{eo}}{\sigma_{co}} = 3.54$, un r de 0.016. De acuerdo a estos valores, se procedió al cálculo de la resistencia en la falla, calculándose también con el valor de $r=0$, con el fin de ver cómo era la aproximación de la resistencia así calculada con la experimental, para cada factor de preconsolidación y obviamente también para cada grado de preconsolidación.

VI.- CONCLUSIONES.

Los valores promedio de los parámetros α y β , obtenidos en las cinco pruebas C U realizadas, resultaron ser 0.35 y 3.50, respectivamente.

Lo interesante de esto, es que valores similares de estos parámetros, presentó la arcilla de Weald en pruebas triaxiales de compresión y extensión, a pesar de la gran diferencia que tiene esta arcilla con la arcilla del Valle de México, lo que se pone de manifiesto en la tabla siguiente:

Suelo	LL%	LP%	IP
Arcilla de Weald.	43	18	25
Arcilla del Valle de México.	385	100	275

Esto parece indicar que a pesar de que existan grandes diferencias en la compresibilidad de las arcillas, - como se muestra cuantitativamente en la siguiente tabla, cuando estos suelos son sometidos a las pruebas de compresión triaxial no drenadas, los parámetros α y β , - que determinan el desarrollo de la presión de poro durante estas pruebas, prácticamente no varían.

Suelo	γ	γ_p	ρ
Arcilla de Weald.	0.060	0.020	0.333
Arcilla del Valle de México.	0.420	0.068	0.160

Con base en la gran diferencia que existe entre la arcilla de Weald y la arcilla del Valle de México, se concluye que los valores obtenidos para los parámetros α y β , deben andar muy cerca de los valores reales. El autor de esta teoría considera que α debe ser un valor muy cercano a 0.33.

De todo lo anterior se puede llegar a la muy interesante conclusión de que los parámetros α y β , podrían tender a valores constantes, que obviamente ofrecerían la enorme ventaja de poder predecir la evolución de la presión de poro en las pruebas triaxiales no drenadas, con sólo conocer el desarrollo de los esfuerzos aplicados.

El valor medido del ángulo de fricción interna β , considerado para la inclinación de 45° con la horizontal de los planos críticos de falla, parece cumplir con la expresión propuesta por el autor de la teoría $\beta_u = \text{arc sen}(\text{Tan } \beta)$, ya que el β_u medido quedó comprendido entre 47° y 51° , mientras que el β_u calculado según esta expresión es de $51^\circ, 23'$. Esta aproximación, parece indicar un satisfactorio funcionamiento de la teoría, lo que se refuerza aún más cuando se observa en las muestras normalmente consolidadas, que la resistencia al corte y la presión de poro, ambas en la falla y normalizadas entre el esfuerzo de consolidación, son valores consistentes, tal y como lo establece la teoría. Así resultan ser:

$$\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{co}} \right)_f = 1.39 \quad \text{y} \quad \left(\frac{\Delta u}{\sigma_{co}} \right)_f = 0.80$$

Además, se cumple esta consistencia en todo el desarrollo de $\frac{\Delta u}{\sigma_{co}}$ respecto al esfuerzo $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{co}}$ para

los valores promedio de α y β , los cuales tuvieron - las desviaciones ± 0.05 y ± 0.4 . Este desarrollo se muestra en las figuras Nos. 20, 21, 22 y 23.

De igual manera respecto a la curva de compresibilidad experimental, se puede decir que se ajusta con muy buena aproximación a la expresión general:

$$\frac{v}{v_0} = \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{-\delta}$$

Para $\delta = 0.42$ y $\delta_p = 0.068$. Ver figura IV.1.

Las observaciones realizadas a las cinco probetas falladas, parecen indicar que efectivamente la inclinación del plano de falla con la horizontal es a 45° , tal y como lo establece la teoría. Las mediciones fueron realizadas con un transportador y la dispersión del ángulo no fue mayor a 2 grados.

En relación al parámetro r , parece que un valor cercano a 0.016, cumple aceptablemente con los valores experimentales de la resistencia, lo que implica que pudo existir presión almacenada en las direcciones de los planos críticos de falla, ya que $r > 0$. Esto obviamente no puede asegurarse, ya que fue muy reducido el número de pruebas realizadas.

Aún con todas estas evidencias, enfatizando lo antes dicho, surge la idea de que fueron pocas pruebas efectuadas, para abatir racionalmente el riesgo de coincidencia en los datos obtenidos, y poder concluir categóricamente las tendencias observadas, según las interpretaciones aquí realizadas. Es necesaria entonces la ejecución de un mayor número de pruebas en una variación más amplia del grado de preconsolidación y de preferencia, en diferentes tipos de suelo fino.

LISTA DE SIMBOLOS.

- C U.- Consolidada no drenada.
 q_u .- Compresión no confinada.
 σ .- Esfuerzo normal.
 τ .- Esfuerzo cortante.
 σ_c .- Presión de cámara en cualquier instante de una prueba C U .
 $\Delta\sigma_c$.- Incremento de presión de cámara.
 σ_{co} .- Presión de cámara al inicio de la aplicación del esfuerzo desviador.
 σ_p .- Máximo esfuerzo de consolidación aplicado -- al suelo en la prueba C U .
 $\bar{\sigma}_{co}$.- Esfuerzo de consolidación, antes de iniciarse la aplicación del esfuerzo desviador en una prueba C U .
 σ_{eo} .- Esfuerzo equivalente, medido en la rama virgen de la curva de compresibilidad, correspondiente a un $\bar{\sigma}_{co}$ dado.
 $\bar{\sigma}$.- Esfuerzo efectivo.
 σ_s .- Esfuerzo almacenado ($\sigma_e - \sigma_c$)
 σ_{fund} .- Esfuerzo fundamental.
 r .- Fracción de la presión almacenada en la dirección de los planos de falla.
 $\frac{\sigma_p}{\sigma_c}$.- Grado de preconsolidación.
 $\frac{\sigma_e}{\sigma_c}$.- Factor de preconsolidación.
 B .- Parámetro de presión de poro de Skempton.
 α, β .- Parámetros de presión de poro de Eulalio -- Juárez Badillo.
 u .- Presión de poro.
 Δu .- Incremento de presión de poro.
 $\frac{\Delta u}{\sigma_{co}}$.- Incremento de presión de poro normalizado -- entre la presión de cámara.

Y .- Función de sensibilidad.

$(\sigma_1 - \sigma_3)$.- Esfuerzo desviador.

$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{co}}$.- Esfuerzo desviador normalizado entre la presión de cámara, para cualquier instante de una prueba C U .

$\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{co}}\right)_f$.- Esfuerzo desviador normalizado entre la presión de cámara, en la falla.

ϵ .- Deformación unitaria axial.

ϵ_f .- Deformación unitaria axial, correspondiente a $\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{co}}\right)_f$.

θ .- Angulo de fricción interna para planos de falla inclinados 45 grados respecto a la horizontal.

θ_p .- Angulo de fricción interna, correspondiente a la línea F de K. Terzaghi.

θ_u .- Se tomó como θ_p .

δ .- Coeficiente de compresibilidad.

β_p .- Coeficiente de expansibilidad.

ρ .- Relación "expansibilidad-compresibilidad".

H_m .- Altura de la probeta.

V_m .- Volumen de la probeta.

V_v .- Volumen de vacíos.

ΔV_v .- Incremento del volumen de vacíos, que para el grado de saturación del suelo cercano al 100%, se considera ΔV_m .

- W_m .- Peso de la probeta.
 ΔH_c .- Decremento de la altura de la probeta.
 ΔH_e .- Incremento de la altura de la probeta.
 V_w .- Volumen de agua en la probeta.
 $(\Delta V_w)_c$.- Decremento del volumen de agua en la probeta.
 $(\Delta V_w)_e$.- Incremento del volumen de agua en la probeta.
 LL%.- Límite líquido.
 LP%.- Límite plástico.
 IP.- Índice plástico.
 w%.- Contenido de agua.
 C_r %.- Consistencia relativa.
 G%.- Grado de saturación.
 e.- Oquedad.
 γ_m .- Peso específico de la probeta.
 S_s .- Peso específico relativo de sólidos.
 V_s .- Volumen de sólidos.
 W_s .- Peso de los sólidos.

BIBLIOGRAFIA.

JUAREZ BADILLO EULALIO; Failare Theory for Clays. VII Congreso Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones; México. Agosto de 1969.

ALAN W. BISHOP D.J. HENKEL; The Measurement of soil Properties in the triaxial test. London; 1957.

R.H.G. PARRY; Triaxial compression and extension tests on remoulded saturated clay; Geotechnique 1960; Vol.10.

JUAREZ BADILLO Y RICO RODRIGUEZ; Tomo I. Fundamentos - de la Mecánica de Suelos.- LIMUSA.

JUAREZ BADILLO EULALIO; Pore pressure functions in - saturated soils. Simposio sobre Laboratory shear testing of soils; Ottawa, Canadá, Septiembre de 1963. Publicación Técnica Especial de la ASTM, No. 361.

RAUL J. MARSAL Y MARCOS MAZARI; El subsuelo de la Cd. de México. Publicación de la Facultad de Ingeniería de la - U.N.A.M.

DAVID K. BLACK and KENNETH L. LEE; Saturating Laboratory Samples by back pressure; Journal of the soil mechanics and foundations division.

ANEXO A.

TABLAS DE CALCULO.

Contenido:

A.1.- Resumen de propiedades durante la realización de las pruebas.

PRUEBA "COMPRESIBILIDAD-EXPANSIBILIDAD":

A.2.- Cálculo de los puntos experimentales de la curva de compresibilidad.

A.3.- Cálculo de la curva teórica de compresibilidad para $f=0.42$ y $f_p=0.068$

PRUEBAS CU:

A.4.- Cálculo de las curvas normalizadas -- entre la presión de cámara σ_{co} , "presión de poro-esfuerzo desviador".

A.5.- Cálculo del parámetro α .

A.6.- Cálculo del parámetro β .

A.7.- Curva teórica ($u-\Delta T$); para $\alpha = 0.35$ y $\beta = 3.5$

A.8.- Cálculo de las curvas teóricas normalizadas entre la presión de cámara σ_{co} , para $\alpha = 0.35$ y $\beta = 3.5$

A.9.- Cálculo de r .

A.10.- Cálculo de las curvas "esfuerzo desviador-deformación unitaria axial".

A.11.- Cálculo de la resistencia teórica, para $r=0$, $r=0.016$ y $r=0.057$.

A.1.-Resumen de propiedades durante la realización de las pruebas.

Prueba No. 1

Desarrollo	Longitud (cm)	Area Prom. (cm ²)	V _m (cm ³)	W _m (gr)	γ _m (gr/cm ³)	w%	e
Al inicio.	8.150	9.90	80.680	91.98	1.14	387	9.89
Al final de la consolidación bajo σ _{co} , y al principio de la aplicación de (σ ₁ -σ ₃).	7.888	8.38	66.07	77.403	1.172	309.76	7.92
Al final de la prueba. (G _w %) = 99.75%	7.0511	9.375	66.07	77.403	1.172	309.76	7.92

Prueba No. 2

Al inicio.	7.823	10.01	78.35	88.77	1.133	405.7	10.36
Al final de la consolidación bajo σ _{co} , y al principio de la aplicación de (σ ₁ -σ ₃).	6.736	7.656	51.57	62.09	1.204	253.19	6.48
Al final de la prueba. (G _w %) = 99.62%	5.8913	8.754	51.57	62.09	1.204	253.19	6.48

Prueba No. 3

Desarrollo.	Longitud (cm)	Area Prom. (cm ²)	V _m (cm ³)	W _m (gr)	ρ _m (gr/cm ³)	W%	e
Al inicio.	7.97	10.066	80.23	90.74	1.131	373	9.62
Al final de la consolidación bajo σ _{co} , y al principio de la aplicación de (σ ₁ -σ ₃).	6.8145	6.560	55.74	55.74	1.248	190.62	4.92
Al final de la prueba. (G _w %) = 98.46%	6.0649	7.371	55.74	55.74	1.248	190.62	4.92

Prueba No. 4

Al inicio.	8.200	10.77	87.79	100.08	1.14	380	9.74
Al final de la consolidación bajo σ _{co} , y al principio de la aplicación de (σ ₁ -σ ₃).	7.490	6.220	46.59	59.08	1.268	183.36	4.70
Al final de la expansión, y principio de la aplicación de (σ ₁ -σ ₃).	7.530	6.430	48.45	60.93	1.258	192.23	4.93
Al final de la prueba. (G _w %) = 99.52%	7.0933	6.826	48.45	60.93	1.258	192.23	4.93

Prueba No. 5

Desarrollo	Longitud (cm)	Area Prom. (cm ²)	V _{m3} (cm ³)	W _m (gr)	δ _m (gr/cm ³)	W%	e
Al inicio.	7.975	10.066	80.276	90.91	1.132	394	10.12
Al final de la consolidación bajo σ_p , y principio de la expansión bajo σ_{co} .	6.7549	6.229	42.076	53.00	1.260	188.00	4.83
Al final de la expansión, y principio de la aplicación de $(\sigma_1 - \sigma_3)$.	6.8749	6.686	45.969	56.863	1.237	208.99	5.37
Al final de la prueba. (G _w %) = 99.24%	6.6687	6.893	45.969	56.863	1.237	208.99	5.37

Resumen de propiedades durante la realización de la prueba de "Compresibilidad-Expansibilidad".

Prueba Unica.

Al inicio.	8.200	10.750	88.17	100.54	1.14	375	9.62
Al final de la consolidación bajo $\sigma_p = 2.25$ Kg/cm ² , y principio de la expansión.	7.159	6.789	48.60	61.22	1.26	189.18	4.85
Al final de la expansión bajo el mínimo $\sigma_{co} = 0.50$ Kg/cm ² .	7.378	7.202	53.14	65.76	1.237	210.63	5.40
(G _w %) = 99.37%							

A.2.- Cálculo de los puntos experimentales :

Compresión:

Incremento. No.	$\Delta \sigma_c$ kg/cm ²	σ_{co} kg/cm ²	ΔH_c (mm)	Incremento en la bureta. (cm)	$(\Delta V_w)_c$ (cm ³)
	----	0	----	0	0
1	0.60	0.60	1.53	15.70	8.79
2	0.40	1.00	3.29	33.00	18.48
3	0.40	1.40	6.17	51.30	28.73
4	0.45	1.85	8.89	64.1	35.90
5	0.40	2.25	10.41	70.20	39.32

$(V_m)_0 = 88.17 \text{ cm}^3$; $V_s = 8.30 \text{ cm}^3$; $(V_v)_0 = 79.87 \text{ cm}^3$; $G_w\% = 99.37\%$

σ_{co} kg/cm ²	$-\Delta V_v$ cm ³	V_v cm ³	V_m cm ³	e
0	0	79.87	88.17	9.62
0.60	8.85	71.02	79.32	8.55
1.00	18.60	61.27	69.57	7.38
1.40	28.91	50.96	59.26	6.14
1.85	36.13	43.74	52.04	5.27
2.25	39.57	40.30	48.60	4.85

Expansión:

Incremento. No.	$-(\Delta \sigma)$ (kg/cm ²)	σ_{co} (kg/cm ²)	ΔH_e (mm)	Decremento en la bureta. (cm)	$(\Delta V_w)_e$ (cm ³)
0	0	2.25	0	0	0
1	0.40	1.85	0.090	0.60	0.34
2	0.45	1.40	0.400	1.80	1.01
3	0.80	0.60	2.190	8.10	4.54

σ_{co} kg/cm ²	$+\Delta V_v$ cm ³	V_v cm ³	V_m cm ³	e
2.25	0	40.30	48.60	4.85
1.85	0.34	40.64	48.94	4.89
1.40	1.02	41.32	49.62	4.98
0.60	4.57	44.87	53.17	5.40

$$e = \frac{V_m S_s \gamma_w}{W_s} - 1$$

PRUEBA: "COMPRESIBILIDAD - EXPANSIBILIDAD".

A.3.- Cálculo de la curva teórica de compresibilidad:
para $\gamma = 0.42$ y $\gamma_p = 0.068$

$$\frac{v}{v_0} = \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_{c0}} \right)^{-\gamma} \quad v_0 = \frac{v}{\left(\frac{\sigma_c}{\sigma_{c0}} \right)^{-\gamma}} = v \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_{c0}} \right)^{\gamma}$$

Compresión:

$$\gamma = 0.42$$

v_0	σ_{c0}	σ_c	v
8.22	1.0	1.20	7.62
7.62	1.20	1.40	7.14
7.14	1.40	1.60	6.75
6.75	1.60	1.80	6.42
6.42	1.8	2.00	6.15
6.15	2.0	2.25	5.85

Expansión:

$$\gamma_p = 0.068$$

$$v = \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_{c0}} \right)^{-\gamma_p} \cdot v_0 = \frac{v_0}{\left(\frac{\sigma_c}{\sigma_{c0}} \right)^{\gamma_p}}$$

v_0	σ_{c0}	σ_c	v
5.85	2.25	2.00	5.90
5.90	2.00	1.80	5.94
5.94	1.8	1.60	5.99
5.99	1.60	1.40	6.04
6.04	1.40	1.20	6.11
6.11	1.20	1.00	6.18
6.18	1.0	0.60	6.40

NOTA: Ver figura EV.1 ; $v=1+e$; σ , en kg/cm².

PRUEBAS CU.

A.4.- Cálculo de las curvas normalizadas entre la presión de cámara σ_{co} , "Presión de poro - Esfuerzo desviador". :

Prueba No. 1; $-\frac{\sigma_p}{\sigma_{co}} = 1.00$; $\sigma_{co} = 1.00 \text{ Kg/cm}^2$.

$(\sigma_1 - \sigma_3)$ (Kg/cm ²)	$-\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{co}}$	Lectura - de puente.	Δu (Kg/cm ²)	$-\frac{\Delta u}{\sigma_{co}}$
0.00	0.00	- 820	0.00	0.00
0.12	0.12	- 836	0.0043	0.0043
0.24	0.24	- 856	0.0096	0.0096
0.42	0.42	- 892	0.0192	0.0192
0.60	0.60	- 940	0.0320	0.0320
0.82	0.82	- 1,100	0.0748	0.0748
1.03	1.03	- 1,230	0.1095	0.1095
1.17	1.17	- 1,360	0.1442	0.1442
1.28	1.28	- 1,505	0.1830	0.1830
1.40	1.40	- 1,750	0.2483	0.2483
1.44	1.44	- 1,940	0.2990	0.2990
1.45	1.45	- 2,000	0.3151	0.3151
1.42	1.42	-----	-----	-----

Prueba No. 2; $-\frac{\sigma_p}{\sigma_{co}} = 1.00$; $\sigma_{co} = 1.47 \text{ Kg/cm}^2$.

$(\sigma_1 - \sigma_3)$ (Kg/cm ²)	$-\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{co}}$	Lectura - de puente.	Δu (Kg/cm ²)	$-\frac{\Delta u}{\sigma_{co}}$
0.00	0.00	- 9,139	0.00	0.00
0.34	0.23	- 9,530	0.1044	0.0710
0.59	0.40	- 9,980	0.2245	0.1528
0.75	0.51	-10,180	0.2779	0.1890
1.02	0.69	-10,530	0.3714	0.2527
1.22	0.83	-10,970	0.4889	0.3327
1.38	0.94	-11,410	0.6064	0.4125
1.52	1.03	-11,790	0.7078	0.4815
1.64	1.12	-12,340	0.8547	0.5814
1.72	1.17	-12,500	0.8974	0.6105
1.79	1.22	-12,730	0.9588	0.6522
1.86	1.27	-13,050	1.0442	0.7104
1.90	1.29	-13,170	1.0763	0.7322
1.96	1.33	-13,330	1.1190	0.7612
1.97	1.34	-13,440	1.1484	0.7812
1.98	1.35	-13,520	1.1710	0.7960

Prueba No. 3; $-\frac{\sigma_p}{\sigma_{co}} = 1.00$; $\sigma_{co} = 2.25 \text{ Kg/cm}^2$.

$(\sigma_1 - \sigma_3)$ (Kg/cm ²)	$-\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{co}}$	Lectura - de puente.	Au (Kg/cm ²)	$-\frac{\Delta u}{\sigma_{co}}$
0.00	0.00	- 7,637	0.00	0.00
0.46	0.20	- 8,185	0.1463	0.0650
0.84	0.37	- 8,598	0.2566	0.1140
1.20	0.533	- 9,221	0.4229	0.1880
1.42	0.63	- 9,495	0.4961	0.2205
1.61	0.72	- 9,845	0.5895	0.2620
1.79	0.80	-10,160	0.6736	0.2994
1.94	0.86	-10,330	0.7190	0.3196
2.07	0.92	-10,510	0.7671	0.3409
2.20	0.98	-10,780	0.8392	0.3730
2.35	1.04	-11,110	0.9273	0.4121
2.49	1.11	-11,440	1.0154	0.4513
2.64	1.17	-12,030	1.1729	0.5213
2.73	1.21	-12,360	1.2610	0.5605
2.83	1.26	-12,960	1.4212	0.6327
2.92	1.30	-13,550	1.5788	0.7020
2.95	1.31	-13,700	1.6188	0.7195
3.00	1.33	-13,810	1.6482	0.7325
3.05	1.36	-14,040	1.7100	0.7600

Prueba No. 4; $-\frac{\sigma_p}{\sigma_{co}} = 2.00$; $\sigma_{co} = 1.125 \text{ Kg/cm}^2$.

$(\sigma_1 - \sigma_3)$ (Kg/cm ²)	$-\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{co}}$	Lectura - de puente.	Au (Kg/cm ²)	$-\frac{\Delta u}{\sigma_{co}}$
0.00	0.00	-10,890	0.00	0.00
0.21	0.19	-11,150	0.0694	0.0617
0.40	0.36	-11,370	0.1282	0.1139
0.56	0.50	-11,560	0.1789	0.1590
0.72	0.64	-11,730	0.2243	0.1994
0.91	0.81	-11,900	0.2697	0.2397
1.07	0.95	-12,070	0.3151	0.2801
1.22	1.08	-12,240	0.3605	0.3204
1.38	1.23	-12,530	0.4379	0.3892
1.54	1.37	-12,660	0.4726	0.4201
1.67	1.48	-12,760	0.4993	0.4438
1.80	1.60	-12,830	0.5180	0.4604
1.92	1.71	-13,040	0.5741	0.5103
2.03	1.80	-13,120	0.5954	0.5293
2.13	1.89	-13,290	0.6408	0.5696
2.23	1.98	-13,330	0.6515	0.5791
2.32	2.06	-13,420	0.6755	0.6005
2.41	2.14	-13,500	0.6969	0.6194

Continúa

.....Continuación:

2.48	2.20	-13,590	0.7209	0.6408
2.55	2.27	-13,670	0.7423	0.6598
2.60	2.31	-13,720	0.7556	0.6717
2.64	2.35	-13,780	0.7716	0.6859
2.66	2.36	-13,840	0.7877	0.7001
2.68	2.38	-13,890	0.8010	0.7120

Prueba No. 5; $\frac{P}{C_c} = 4.50$; $C_c = 0.50 \text{ Kg/cm}^2$.

$(P_1 - P_3)$ (Kg/cm ²)	$\frac{P_1 - P_3}{C_c}$	Lectura - de puente.	Δu (Kg/cm ²)	$\frac{\Delta u}{C_c}$
0.00	0.00	-12,560	0.00	0.00
0.19	0.38	-12,790	0.0614	0.1228
0.34	0.68	-12,950	0.1041	0.2083
0.47	0.94	-13,120	0.1495	0.2990
0.60	1.20	-13,290	0.1949	0.3898
0.72	1.44	-13,390	0.2216	0.4432
0.84	1.68	-13,540	0.2617	0.5233
0.96	1.92	-13,690	0.3017	0.6034
1.08	2.16	-13,840	0.3418	0.6835
1.20	2.40	-13,870	0.3498	0.6995
1.30	2.60	-13,950	0.3711	0.7423
1.40	2.80	-13,800	0.3311	0.6622
1.49	2.98	-13,760	0.3204	0.6408
1.58	3.16	-13,750	0.3177	0.6355
1.65	3.30	-13,700	0.3044	0.6200
1.72	3.44	-13,720	0.3097	0.6194
1.78	3.56	-13,710	0.3071	0.6141
1.83	3.66	-13,700	0.3044	0.6088
1.87	3.74	-13,690	0.3017	0.6034
1.90	3.80	-13,690	0.3017	0.6034
1.92	3.84	-13,680	0.2990	0.5981

A.5.-Cálculo del parámetro α :

Para $\frac{\sigma_p}{\sigma_{CO}} = 1.00$

Prueba No.	$\left(\frac{\Delta u}{\sigma_{CO}}\right)_f$	$\frac{1}{3}\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{CO}}\right)_f$	α
1	0.3151	0.483	—
2	0.7960	0.45	0.346
3	0.7600	0.453	0.307

Para $\frac{\sigma_p}{\sigma_{CO}} > 1.00$; $\rho = 0.16$

Valores teóricos:

	$\left(\frac{\Delta u}{\sigma_{CO}}\right)_f$	$\frac{1}{3}\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{CO}}\right)_f$	$\frac{\sigma_p}{\sigma_{CO}}$	$\frac{\sigma_a}{\sigma_c}$	$\left(\frac{\sigma_{eo}}{\sigma_{CO}} - 1 - \frac{\sigma_{CO}}{\sigma_{eo}}\right)$	α
4	0.7120	0.793	2.00	1.790	0.23141	0.350
5	0.5981	1.280	4.50	3.538	2.2548	0.302

Valores experimentales:

4	0.7120	0.793	2.00	1.770	0.205	0.40
5	0.5981	1.280	4.50	3.440	2.1493	0.32

A.6.- Cálculo de β :

Para $-\frac{\sigma_p}{\sigma_{co}} = 1.00$

Prueba No.	$(-\frac{\Delta u}{\sigma_{co}})_i$	$\frac{1}{3} (\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{co}})_i$	α	γ	β
1	-----	-----	-----	-----	-----
2	0.189	0.1701	0.346	0.378	2.99
3	0.188	0.1778	0.307	0.3925	3.64

Para $-\frac{\sigma_p}{\sigma_{co}} > 1.00$

Valores teóricos:

	$(-\frac{\Delta u}{\sigma_{co}})$	$\frac{1}{3} (\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{co}})$	α	$(-\frac{\sigma_{eo}}{\sigma_{co}} - 1 - \frac{\sigma_{co}}{\sigma_{eo}})$	γ	β
4	0.1139	0.1185	0.35	0.23141	0.4035	3.16
5	0.3898	0.4000	0.302	2.2548	0.3125	3.61

Valores experimentales:

4	0.1139	0.1185	0.40	0.205	0.4035	3.17
5	0.3898	0.4000	0.32	2.1493	0.3125	3.62

PRUEBAS CU.

A.7.-Curva teórica ($u = \Delta\sigma$); para $\alpha = 0.35$ y $\beta = 3.5$

Prueba No.	σ_{co} (Kg/cm ²)	$\frac{\sigma_{po}}{\sigma_{co}}$	$(\sigma_1 - \sigma_3)$ (Kg/cm ²)	u (Kg/cm ²)
2	1.47	1.00	0	0
			0.59	0.20
			0.88	0.32
			1.18	0.48
			1.32	0.57
			1.62	0.79
			1.76	0.93
			1.98	1.18
3	2.25	1.00	0	0
			0.90	0.31
			1.35	0.50
			1.80	0.73
			2.03	0.86
			2.48	1.20
			2.70	1.41
			3.05	1.81
4	1.125	2.0	0	0
			0.23	0.08
			0.68	0.23
			1.13	0.37
			1.58	0.51
			2.03	0.64
			2.47	0.76
			2.68	0.80
5	0.50	4.5	0	0
			0.10	0.04
			0.30	0.10
			0.50	0.16
			0.70	0.22
			0.90	0.28
			1.10	0.32
			1.30	0.35
			1.50	0.36
			1.70	0.35
1.92	0.30			

PRUEBAS CU.

A.8.- Cálculo de la curva teórica; para $\alpha=0.35$ y $\beta = 3.5$ prueba No. 2; $\sigma_{co} = 1.47 \text{ Kg/cm}^2$; $-\frac{\sigma_p}{\sigma_{co}} = 1.00$

$-\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{co}}$	$\frac{1}{3} \left(-\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{co}} \right)$	$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}$	Y	$\alpha \cdot Y$	$-\frac{A u}{\sigma_{co}}$
0	0	0	0	0	0
0.4	0.133	0.296	0.014	0.005	0.138
0.6	0.200	0.444	0.058	0.020	0.220
0.8	0.267	0.593	0.161	0.056	0.323
0.9	0.300	0.667	0.242	0.085	0.385
1.10	0.367	0.815	0.489	0.171	0.538
1.20	0.400	0.889	0.662	0.232	0.632
1.35	0.450	1.000	1.000	0.350	0.800

Prueba No. 3; $\sigma_{co} = 2.25 \text{ Kg/cm}^2$; $-\frac{\sigma_p}{\sigma_{co}} = 1.00$

0	0	0	0	0	0
0.4	0.133	0.294	0.0138	0.005	0.138
0.6	0.200	0.441	0.057	0.020	0.220
0.8	0.267	0.588	0.156	0.055	0.322
0.9	0.300	0.662	0.236	0.083	0.383
1.10	0.367	0.809	0.476	0.167	0.534
1.20	0.400	0.882	0.644	0.225	0.625
1.36	0.453	1.000	1.000	0.350	0.803

Donde:

$$Y = \frac{\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{co}} \right)}{\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{co}} \right)_f} \beta$$

Cálculo de la curva teórica, considerando $\rho = 0.16$

Prueba No. 4:

$\alpha = 0.35$

$$\frac{\sigma_{eo}}{\sigma_{co}} = 1.79 ; \quad \alpha' = 0.08099$$

$\beta = 3.5$

$\frac{1}{3} \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{co}} \right)$	Y	$\alpha' \cdot Y$	$\frac{\Delta u}{\sigma_{co}}$
0	0	0	0
0.067	0.0002	- 0.00002	0.06698
0.200	0.0080	- 0.0006	0.1994
0.333	0.0480	- 0.0039	0.3291
0.467	0.1559	- 0.0126	0.4544
0.600	0.3762	- 0.0305	0.5695
0.733	0.7583	- 0.0614	0.6716
0.793	1.0000	- 0.0801	0.7129

Prueba No. 5:

$$\frac{\sigma_{eo}}{\sigma_{co}} = 3.5375 ; \quad \alpha' = 0.78919 \dots \text{para } \alpha = 0.35$$

$$\alpha' = 0.67645 \dots \text{para } \alpha = 0.30$$

$\frac{1}{3} \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{co}} \right)$	Y	$\alpha' \cdot Y$ ($\alpha = 0.35$)	$\frac{\Delta u}{\sigma_{co}}$ ($\alpha = 0.35$)	$\alpha' \cdot Y$ ($\alpha = 0.30$)	$\frac{\Delta u}{\sigma_{co}}$ ($\alpha = 0.30$)
0	0	0	0	0	0
0.067	0.00003	-0.00002	0.06698	-0.00002	0.06698
0.200	0.0015	-0.0012	0.1988	-0.0010	0.199
0.333	0.0090	-0.0071	0.3259	-0.0061	0.3269
0.467	0.0293	-0.0231	0.4439	-0.0198	0.4472
0.600	0.0705	-0.0556	0.5444	-0.0477	0.5523
0.733	0.1423	-0.1123	0.6207	-0.0963	0.6367
0.867	0.2554	-0.2016	0.6654	-0.1728	0.6942
1.000	0.4216	-0.3327	0.6673	-0.2852	0.7148
1.133	0.6531	-0.5154	0.6176	-0.4418	0.6912
1.280	1.0000	-0.78919	0.491	-0.6765	0.60

$$\text{Donde: } \alpha' = \alpha \left(\frac{\sigma_{eo}}{\sigma_{co}} - 1 - \frac{\sigma_{co}}{\sigma_{eo}} \right)$$

PRUEBAS CU.

A. 9.-Cálculo de r:

Prueba No. 4.

para $\beta = 38^\circ$; $\rho = 0.16$ y $\alpha = 0.35$

$$\left(-\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{co}} \right)_f = 2.38 ; \quad -\frac{\sigma_p}{\sigma_{co}} = 2.0$$

$$-\frac{\sigma_{eo}}{\sigma_{co}} = 1.79$$

$$\alpha \cdot \left(-\frac{\sigma_{eo}}{\sigma_{co}} - 1 - \frac{\sigma_{co}}{\sigma_{eo}} \right) = 0.08099$$

$$2.38 = \frac{2 \tan 38^\circ}{1 - \frac{1}{3} \tan 38^\circ} \left[1 + 0.08099 + r(1.79 - 1) \right]$$

$$2.38 = 2.1128 (1.08099 + 0.79r) = 2.2839 + 1.6691r$$

$$r = 0.057$$

Prueba No. 5.

para $\beta = 38^\circ$; $\rho = 0.16$ y $\alpha = 0.35$

$$\left(-\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{co}} \right)_f = 3.84 ; \quad -\frac{\sigma_p}{\sigma_{co}} = 4.5$$

$$-\frac{\sigma_{eo}}{\sigma_{co}} = 3.5375$$

$$\alpha \cdot \left(-\frac{\sigma_{eo}}{\sigma_{co}} - 1 - \frac{\sigma_{co}}{\sigma_{eo}} \right) = 0.78919$$

$$3.84 = 2.1128 (1.78919 + r(2.5375)) = 3.7802 + r(2.5375)$$

$$r = 0.016$$

A.10- Cálculo de las curvas "Esfuerzo desviador - Deformación unitaria axial".

Prueba No. 1; $-\frac{\sigma_p}{\sigma_{co}} = 1.00$; $\sigma_{co} = 1.00 \text{ Kg/cm}^2$.

	Carga (Kg)	Micró- metro. (mm)	Defor- mación axial (mm)	ϵ	$1-\epsilon$	Area corre- gida, (cm^2)	$\sigma_1-\sigma_3$ (Kg/cm^2)
0	0	24.380	0	0.0000	1	8.380	0.00
1	1.009	24.135	0.245	0.0031	0.9969	8.380	0.00
2	2.020	24.049	0.331	0.0042	0.9958	8.415	0.24
3	3.545	23.820	0.560	0.0071	0.9929	8.440	0.42
4	5.090	23.426	0.954	0.0121	0.9879	8.483	0.60
5	6.986	23.078	1.302	0.0165	0.9835	8.520	0.82
6	8.839	22.526	1.854	0.0235	0.9765	8.582	1.03
7	10.139	21.777	2.603	0.0330	0.9670	8.666	1.17
8	11.163	21.296	3.084	0.0391	0.9609	8.721	1.28
9	12.389	20.199	4.181	0.0530	0.9470	8.849	1.40
10	13.003	18.701	5.679	0.0720	0.9280	9.030	1.44
11	13.228	17.951	6.429	0.0815	0.9185	9.123	1.452
12	13.313	16.011	8.369	0.1061	0.8939	9.375	1.420

$$\text{Area corregida} = \frac{8.380}{1-\epsilon}$$

$$(H_m)_1 = 78.88 \text{ mm}$$

Prueba No. 2; $-\frac{\sigma_p}{\sigma_{co}} = 1.00$; $\sigma_{co} = 1.47 \text{ Kg/cm}^2$.

	Carga (Kg)	Micró- metro. (mm)	Defor- mación axial. (mm)	ϵ	$1-\epsilon$	Area corre- gida. (cm^2)	$\sigma_1-\sigma_3$ (Kg/cm^2)
0	0	15.500	0	0.0000	1	7.656	0.00
1	2.613	15.244	0.256	0.0038	0.9962	7.685	0.34
2	4.566	15.028	0.472	0.0070	0.9930	7.739	0.59
3	5.810	14.719	0.781	0.0116	0.9884	7.746	0.75
4	7.940	14.389	1.111	0.0165	0.9835	7.784	1.02
5	9.570	13.883	1.617	0.0240	0.9760	7.844	1.22
6	10.920	13.311	2.189	0.0325	0.9675	7.913	1.38
7	12.134	12.738	2.762	0.0410	0.9590	7.983	1.52
8	13.230	12.065	3.435	0.0510	0.9490	8.067	1.64
9	14.016	11.425	4.075	0.0605	0.9395	8.149	1.72
10	14.735	10.785	4.715	0.0700	0.9300	8.232	1.79
11	15.512	9.976	5.524	0.0820	0.9180	8.340	1.86
12	16.065	9.134	6.366	0.0945	0.9055	8.4550	1.90
13	16.766	8.427	7.073	0.1050	0.8950	8.554	1.96
14	17.072	7.653	7.847	0.1165	0.8835	8.666	1.97
15	17.333	7.053	8.447	0.1254	0.8746	8.754	1.98

$$\text{Area corregida} = \frac{7.656}{1-\epsilon}$$

$$(H_m)_1 = 67.36 \text{ mm}$$

Prueba No. 3; $\frac{\sigma_p}{\sigma_{co}} = 1.00$; $\sigma_{co} = 2.25 \text{ Kg/cm}^2$.

	Carga (Kg)	Micró- metro. (mm)	Defor- mación axial. (mm)	ϵ	$1-\epsilon$	Area corre- gida. (cm ²)	$\sigma_1-\sigma_3$ (Kg/cm ²)
0	0	16.530	0	0.0000	1	6.560	0.00
1	3.026	16.332	0.198	0.0029	0.9971	6.579	0.46
2	5.550	16.046	0.484	0.0071	0.9929	6.607	0.84
3	7.956	15.814	0.716	0.0105	0.9895	6.630	1.20
4	9.449	15.569	0.961	0.0141	0.9859	6.654	1.42
5	10.750	15.337	1.193	0.0175	0.9825	6.677	1.61
6	11.988	15.133	1.397	0.0205	0.9795	6.697	1.79
7	13.043	14.881	1.649	0.0242	0.9758	6.723	1.94
8	13.964	14.656	1.874	0.0275	0.9725	6.746	2.07
9	14.881	14.472	2.058	0.0302	0.9698	6.764	2.20
10	15.978	14.138	2.392	0.0351	0.9649	6.799	2.35
11	17.007	13.831	2.699	0.0396	0.9604	6.830	2.49
12	18.158	13.375	3.155	0.0463	0.9537	6.878	2.64
13	18.954	12.768	3.762	0.0552	0.9448	6.943	2.73
14	19.844	12.135	4.395	0.0645	0.9355	7.012	2.83
15	20.712	11.406	5.124	0.0752	0.9248	7.093	2.92
16	21.128	10.799	5.731	0.0841	0.9159	7.162	2.95
17	21.723	10.124	6.406	0.0940	0.9060	7.241	3.00
18	22.482	9.034	7.496	0.1100	0.8900	7.371	3.05

Area corregida = $\frac{6.560}{1-\epsilon}$

$(H_m)_1 = 68.145 \text{ mm}$

Prueba No. 4; $\frac{\sigma_p}{\sigma_{co}} = 2.00$; $\sigma_{co} = 1.125 \text{ Kg/cm}^2$.

	Carga (Kg)	Micró- metro. (mm)	Defor- mación axial. (mm)	ϵ	$1-\epsilon$	Area corre- gida. (cm ²)	$\sigma_1-\sigma_3$ (Kg/cm ²)
0	0	11.510	0	0.0000	1	6.430	0.00
1	1.352	11.435	0.075	0.0010	0.999	6.436	0.21
2	2.577	11.374	0.135	0.0018	0.9982	6.442	0.40
3	3.610	11.322	0.188	0.0025	0.9975	6.446	0.56
4	4.645	11.254	0.256	0.0034	0.9966	6.452	0.72
5	5.872	11.246	0.264	0.0035	0.9965	6.453	0.91
6	6.919	11.096	0.414	0.0055	0.9945	6.466	1.07
7	7.893	11.043	0.467	0.0062	0.9938	6.470	1.22
8	8.937	10.975	0.535	0.0071	0.9929	6.476	1.38
9	9.978	10.938	0.572	0.0076	0.9924	6.479	1.54
10	10.835	10.832	0.678	0.0090	0.9910	6.488	1.67
11	11.705	10.659	0.851	0.0113	0.9887	6.503	1.80
12	12.514	10.493	1.017	0.0135	0.9865	6.518	1.92

Continúa

.....Continuación:

13	15.031	10.305	1.205	0.0160	0.9840	6.535	2.30
14	13.954	10.117	1.393	0.0185	0.9815	6.551	2.13
15	14.653	9.891	1.619	0.0215	0.9785	6.571	2.23
16	15.303	9.620	1.890	0.0251	0.9749	6.596	2.32
17	15.961	9.311	2.199	0.0292	0.9708	6.623	2.41
18	16.499	8.988	2.522	0.0335	0.9665	6.653	2.48
19	17.044	8.649	2.861	0.0380	0.9620	6.684	2.55
20	17.477	8.234	3.276	0.0435	0.9565	6.722	2.60
21	17.833	7.888	3.622	0.0481	0.9519	6.755	2.64
22	18.061	7.519	3.991	0.0530	0.9470	6.790	2.66
23	18.294	7.143	4.367	0.0580	0.9420	6.826	2.68

$$\text{Area corregida} = \frac{6.430}{1-\xi}$$

$$(H_m)_2 = 75.30 \text{ mm}$$

$$\text{Prueba No. 5; } \frac{P}{A_{co}} = 4.50; \quad \sigma_{co} = 0.50 \text{ Kg/cm}^2.$$

Carga (Kg)	Micró- metro. (mm)	Defor- mación axial. (mm)	ξ	$1-\xi$	Area corre- gida. (cm ²)	$\sqrt{1-\xi^3}$ (Kg/cm ²)	
0	0	19.070	0	0.0000	1	6.686	0.00
1	1.272	18.988	0.082	0.0012	0.9988	6.694	0.19
2	2.277	18.967	0.103	0.0015	0.9985	6.696	0.34
3	3.149	18.919	0.151	0.0022	0.9978	6.701	0.47
4	4.022	18.891	0.179	0.0026	0.9974	6.703	0.60
5	4.828	18.871	0.199	0.0029	0.9971	6.705	0.72
6	5.635	18.843	0.227	0.0033	0.9967	6.708	0.84
7	6.442	18.823	0.247	0.0036	0.9964	6.710	0.96
8	7.253	18.761	0.309	0.0045	0.9955	6.716	1.08
9	8.062	18.740	0.330	0.0048	0.9952	6.718	1.20
10	8.741	18.678	0.392	0.0057	0.9943	6.724	1.30
11	9.422	18.623	0.447	0.0065	0.9935	6.730	1.40
12	10.038	18.554	0.516	0.0075	0.9925	6.737	1.49
13	10.660	18.451	0.619	0.0090	0.9910	6.747	1.58
14	11.154	18.314	0.756	0.0110	0.9890	6.760	1.65
15	11.646	18.211	0.859	0.0125	0.9875	6.771	1.72
16	12.083	18.039	1.031	0.0150	0.9850	6.788	1.78
17	12.471	17.764	1.306	0.0190	0.9810	6.815	1.83
18	12.791	17.523	1.547	0.0225	0.9775	6.840	1.87
19	13.038	17.310	1.760	0.0256	0.9744	6.862	1.90
20	13.234	17.008	2.062	0.0300	0.9700	6.893	1.92

$$\text{Area corregida} = \frac{6.686}{1-\xi}$$

$$(H_m)_2 = 68.749 \text{ mm}$$

A.11.- Cálculo de la resistencia teórica, para
 $r=0$, $r=0.016$ y $r=0.057$:

Para $r=0$:

$$\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{co}} \right)_f = \frac{2(1-0.35) \tan 38^\circ}{1 - \frac{1}{3} \tan 38^\circ} = 1.37$$

$$\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{co}} \right)_f = \frac{2 \tan 38^\circ}{1 - \frac{1}{3} \tan 38^\circ} [1 + 0.35(0.23)] = 2.28$$

$$\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{co}} \right)_f = 2.11281 [1 + 0.35(2.25)] = 3.78$$

Para $r=0.016$:

$$\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{co}} \right)_f = 2.11281 [1 + 0.35(0.23) + 0.016(1.79-1)] = 2.31$$

$$\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{co}} \right)_f = 2.11281 [1 + 0.35(2.25) + 0.016(3.54-1)] = 3.87$$

Para $r=0.057$:

$$\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{co}} \right)_f = 2.11281 [1 + 0.35(0.23) + 0.057(1.79-1)] = 2.38$$

$$\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{co}} \right)_f = 2.11281 [1 + 0.35(2.25) + 0.057(3.54-1)] = 4.09$$

ANEXO B.

**RESTITUCION DE LA RESISTENCIA, EN
COMPRESION SIMPLE.**

Contenido:

- B.1.- Comentarios generales.**
- B.2.- Tablas de cálculo.**
- B.3.- Curvas "esfuerzo-deformación".**
- B.4.- Gráfica "restitución de la resistencia-tiempo".**
- B.5.- Conclusiones y Recomendaciones.**

B.1.- Comentarios generales.-

En este anexo se presentan los cálculos y -- resultados de la experimentación realizada para investigar la restitución de la resistencia en el tiempo, de la arcilla remoldeada. Mediante pruebas de compresión no -- confinada.

El objetivo de este trabajo adicional obedeció a la necesidad que originalmente se tenía de conocer, cómo se_ manifestaba la reestructuración de la arcilla remoldeada para diferentes tiempos de reposo, ya que se pretendía -- como parte de esta tesis, realizar pruebas consolidadas_ no drenadas, con medición de presión de poro en arcilla_ cuya estructura no tuviera los efectos de la anisotropía. Para esto, era necesario escoger un tiempo de reposo para las muestras de suelo, de tal manera que pudieran ser manipuladas durante las pruebas de compresión simple, -- además de mantener un control sobre las condiciones es-- estructurales de las muestras ensayadas en las pruebas con_ solidadas no drenadas.

Se estableció el siguiente programa de pruebas:

Pruebas de compresión no confinada:

Ensaye No.	Estructura	Tiempo de reposo - a partir del remoldeo, (días).
1	Remoldeada	8
2	Remoldeada	8
3	Remoldeada	18
4	Remoldeada	40
5	Remoldeada	90
6	Inalterada	--

Para remoldear las muestras, se labraban las probetas, con una relación de esbeltez del orden de 2.5 y posteriormente se les colocaba una membrana de hule, la cual se sellaba en los extremos. Protegida así la muestra, se procedía al rompimiento de la estructura y al amasado del suelo en forma manual durante unos 15 minutos. Toda esta operación, se efectuaba dentro del cuarto húmedo.

Después del amasado, la muestra era colocada horizontalmente sobre una placa de vidrio, y mediante una acción de rodado, se le daba una forma aproximadamente cilíndrica. Terminada esta operación, la muestra acostada sobre la placa de vidrio, era introducida junto con ésta dentro de una lata que contenía pedazos de algodón húmedo exprimido, la cual era sellada para lograr un mejor control de la humedad en la muestra.

Durante los primeros 8 días, cada muestra era girada respecto a su eje longitudinal, para evitar deformaciones en su sección transversal.

Al concluir el tiempo de reposo programado para cada muestra, éstas eran liberadas de la membrana de hule y recortadas en sus extremos mediante el empleo de un cabeceador y después eran colocadas en un torno, donde se afinaba su forma cilíndrica con un cortador de alambre.

Inicialmente, se pretendía la realización de por lo menos dos pruebas para cada tiempo de reposo a partir del remoldeo; esto no fue posible por escasez del suelo disponible para la investigación, además de que no pudieron aprovecharse las probetas falladas en las pruebas CU, a las cuales se les retiraba la rejilla de papel filtro y se les colocaba una membrana de hule sellada en sus extremos, para amasarlas en forma manual durante unos 20 minutos, ya que las muestras presentaban una franca separación del material en la zona de falla. Probablemente,

debida a que la distorsión sufrida por la estructura -- del suelo en esa zona, durante la realización de la prueba CU, era mayor a la que se podía lograr mediante el -- amasado manual. Por lo tanto, las muestras remoldeadas, quedaban claramente divididas en dos partes no pudiéndose utilizar.

Debido a que las muestras remoldeadas con menor -- tiempo de reposo presentaban una gran deformabilidad, -- que dificultaba el manejo del suelo durante las pruebas, las probetas que tenían 8 días de reposo fueron las únicas que se destinaron para la realización de 2 pruebas de compresión simple, con el fin de considerar dos valores como mínimo. Probar muestras con menor tiempo de reposo, no fue posible, por la gran dificultad que presentaron para su manipulación.

B.2.- TABLAS DE CALCULO.

Propiedades índice:

LL% = 360%
 LP% = 92%
 IP = 268

$\gamma_m = 1.14 \text{ ton/m}^3$
 $e_o = 9.15$
 $w\% = 360\%$
 $G_w\% = 98.66\%$

Muestra No. 1; Remoldeada, con 8 días de reposo.

Tiempo (min)	Carga (Kg)	Micrómetro (mm)	Deformación (mm)	ϵ	Area (cm ²)	Esfuerzo (Kg/cm ²)
0	0.000	22.090	0.000	0.0000	8.590	0.0000
1	0.103	21.795	0.295	0.0039	8.624	0.0120
2	0.191	21.462	0.627	0.0083	8.662	0.0221
3	0.253	21.184	0.906	0.0120	8.694	0.0291
4	0.298	21.040	1.050	0.0139	8.711	0.0342
5	0.343	20.799	1.291	0.0171	8.739	0.0392
6	0.382	20.595	1.495	0.0198	8.764	0.0436
7	0.417	20.315	1.775	0.0235	8.797	0.0474
8	0.450	20.021	2.069	0.0274	8.832	0.0510
9	0.479	19.658	2.432	0.0322	8.876	0.0540
10	0.505	19.296	2.794	0.0370	8.920	0.0566
11	0.533	18.812	3.278	0.0434	8.980	0.0594
12	0.554	18.427	3.663	0.0485	9.028	0.0614
13	0.575	17.884	4.206	0.0557	9.097	0.0632
14	0.586	17.393	4.697	0.0622	9.160	0.0640

$$\text{Area corregida} = \frac{8.590}{1 - \epsilon}$$

$$; H_o = 75.52 \text{ mm}$$

(ver figura B.1)

→ Propiedades Índice:

LL% = 381%
 LP% = 90%
 IP = 291

$\gamma_m = 1.13 \text{ ton/m}^3$
 $e_o = 9.63$
 $w_x = 371\%$
 $G_w\% = 98.24\%$

Muestra No. 2; Remoldeada, con 8 días de reposo.

Tiempo (min)	Carga (Kg)	Micrómetro. (mm)	Deformación (mm)	ϵ	Area (cm ²)	Esfuerzo (Kg/cm ²)
0	0.000	21.870	0.000	0.0000	9.604	0.0000
1	0.096	21.736	0.134	0.0018	9.621	0.0100
2	0.166	21.579	0.291	0.0039	9.642	0.0172
3	0.230	21.363	0.507	0.0068	9.670	0.0238
4	0.299	21.125	0.745	0.0100	9.701	0.0308
5	0.356	20.864	1.006	0.0135	9.735	0.0366
6	0.412	20.551	1.319	0.0177	9.777	0.0421
7	0.455	20.283	1.587	0.0213	9.813	0.0464
8	0.493	20.007	1.863	0.0250	9.850	0.0500
9	0.522	19.798	2.072	0.0278	9.879	0.0528
10	0.537	19.508	2.362	0.0317	9.918	0.0541
11	0.566	19.232	2.638	0.0354	9.956	0.0569
12	0.585	19.068	2.802	0.0376	9.979	0.0586
13	0.600	18.733	3.137	0.0421	10.026	0.0598
14	0.616	18.479	3.391	0.0455	10.062	0.0612
15	0.629	18.174	3.696	0.0496	10.105	0.0622
16	0.638	17.771	4.099	0.0550	10.163	0.0628
17	0.643	17.578	4.292	0.0576	10.191	0.0631
18	0.652	17.138	4.732	0.0635	10.255	0.0636

$$\text{Area corregida} = \frac{9.604}{1 - \epsilon} ; \quad H_o = 74.52 \text{ mm}$$

(ver figura B.2)

Propiedades índice:

LL% = 402%
 LP% = 104%
 IP = 298

$\gamma_m = 1.14 \text{ ton/m}^3$
 $E_o = 10.10$
 $w_x = 396\%$
 $G_w = 100\%$

Muestra No. 3; Remoldeada, con 18 días de reposo.

Tiempo (min)	Carga (Kg)	Micrómetro (mm)	Deformación (mm)	ϵ	Area (cm ²)	Esfuerzo (Kg/cm ²)
0	0.000	19.680	0.000	0.0000	8.530	0.0000
1	0.094	19.490	0.190	0.0023	8.550	0.0110
2	0.151	19.275	0.405	0.0049	8.572	0.0176
3	0.215	19.126	0.554	0.0067	8.583	0.0250
4	0.267	18.886	0.794	0.0096	8.613	0.0310
5	0.325	18.630	1.050	0.0127	8.640	0.0376
6	0.388	18.340	1.340	0.0162	8.670	0.0448
7	0.442	18.051	1.629	0.0197	8.701	0.0508
8	0.496	17.670	2.010	0.0243	8.742	0.0567
9	0.538	17.290	2.390	0.0289	8.784	0.0612
10	0.575	16.893	2.787	0.0337	8.827	0.0651
11	0.605	16.438	3.242	0.0392	8.878	0.0681
12	0.632	16.025	3.655	0.0442	8.924	0.0708
13	0.652	15.611	4.069	0.0492	8.971	0.0727
14	0.673	15.173	4.507	0.0545	9.022	0.0746
15	0.688	14.751	4.929	0.0596	9.071	0.0758

$$\text{Area corregida} = \frac{8.530}{1 - \epsilon} ; H_0 = 82.70 \text{ mm}$$

(ver figura B.3)

Propiedades índice:

LL% = 400%
 LP% = 100%
 IP = 300

$\gamma_m = 1.14 \text{ ton/m}^3$
 $\epsilon_0 = 9.63$
 $w_x = 375\%$
 $w_x = 99.30\%$

Muestra No. 4; Remoldeada, con 40 días de reposo.

Tiempo (min)	Carga (Kg)	Micrómetro. (mm)	Deformación (mm)	ϵ	Area (cm ²)	Esfuerzo (Kg/cm ²)
0	0	14.320	0	0	10.286	0
1	0.107	14.244	0.076	0.0011	10.297	0.0104
2	0.213	14.147	0.173	0.0025	10.312	0.0207
3	0.310	13.934	0.386	0.0056	10.344	0.0300
4	0.413	13.671	0.649	0.0094	10.384	0.0398
5	0.499	13.457	0.863	0.0125	10.416	0.0479
6	0.578	13.119	1.201	0.0174	10.468	0.0552
7	0.655	12.712	1.608	0.0233	10.531	0.0622
8	0.716	12.326	1.994	0.0289	10.592	0.0676
9	0.770	11.891	2.429	0.0352	10.661	0.0722
10	0.819	11.339	2.981	0.0432	10.750	0.0762
11	0.851	10.780	3.540	0.0513	10.842	0.0785
12	0.870	10.242	4.078	0.0591	10.932	0.0796

$$\text{Area corregida} = \frac{10.286}{1 - \epsilon};$$

$$H_0 = 69.00\text{mm}$$

(ver figura B.4)

Propiedades índice:

LL% = 375%
 LP% = 93%
 IP = 282

$\gamma_m = 1.16 \text{ ton/m}^3$
 $e_o = 8.67$
 $w\% = 340\%$
 $G_w\% = 100\%$

Muestra No. 5; Remoldeada, con 90 días de reposo.

Tiempo (min)	Carga (Kg)	Micrómetro (mm)	Deformación (mm)	ϵ	Area (cm ²)	Esfuerzo (Kg/cm ²)
0	0.000	21.740	0.000	0.0000	8.762	0.0000
1	0.159	21.437	0.303	0.0044	8.801	0.0181
2	0.260	21.271	0.469	0.0068	8.822	0.0295
3	0.336	21.051	0.689	0.0100	8.851	0.0380
4	0.422	20.878	0.862	0.0125	8.873	0.0476
5	0.498	20.602	1.138	0.0165	8.909	0.0559
6	0.581	20.334	1.406	0.0204	8.944	0.0650
7	0.641	20.058	1.682	0.0244	8.981	0.0714
8	0.711	19.748	1.992	0.0289	9.023	0.0788
9	0.755	19.431	2.309	0.0335	9.066	0.0833
10	0.806	19.155	2.585	0.0375	9.103	0.0885
11	0.851	18.872	2.868	0.0416	9.142	0.0931
12	0.885	18.521	3.219	0.0467	9.191	0.0963
13	0.934	18.169	3.571	0.0518	9.241	0.1011
14	0.962	17.776	3.964	0.0575	9.297	0.1035

$$\text{Area corregida: } \frac{A_m}{1 - \epsilon} = \frac{8.762}{1 - \epsilon} ; \quad H_o = 68.94 \text{ mm}$$

(ver figura B.5)

Propiedades índices:

LL% = 386%

LP% = 92%

IP = 294

 $\gamma_m = 1.12 \text{ ton/m}^3$ $C_o = 9.91$ $W\% = 379\%$ $G_w\% = 97.57\%$

Muestra No. 6; Inalterada.

Tiempo (min)	Carga (Kg)	Micró- metro. (mm)	Defor- mación (mm)	ϵ	Area (cm ²)	Esfuerzo (Kg/cm ²)
0	0.000	23.690	0.000	0.0000	10.160	0.000
1	0.743	23.606	0.084	0.0012	10.172	0.073
2	1.293	23.536	0.154	0.0022	10.182	0.127
3	1.753	23.452	0.238	0.0034	10.195	0.172
4	2.227	23.312	0.378	0.0054	10.215	0.218
5	2.668	23.270	0.420	0.0060	10.221	0.261
6	3.115	23.088	0.602	0.0086	10.248	0.304
7	3.421	22.927	0.763	0.0109	10.272	0.333
8	3.703	22.836	0.854	0.0122	10.285	0.360
9	3.897	22.668	1.022	0.0146	10.311	0.378
10	4.183	22.556	1.134	0.0162	10.327	0.405
11	4.327	22.395	1.295	0.0185	10.352	0.418
12	4.530	22.290	1.400	0.0200	10.367	0.437
13	4.677	22.115	1.575	0.0225	10.394	0.450
14	4.842	21.996	1.694	0.0242	10.412	0.465
15	4.958	21.828	1.862	0.0266	10.438	0.475
16	5.102	21.716	1.974	0.0282	10.455	0.488
17	5.165	21.576	2.114	0.0302	10.476	0.493
18	5.272	21.415	2.275	0.0325	10.501	0.502
19	5.325	21.268	2.422	0.0346	10.524	0.506
20	5.356	21.149	2.541	0.0363	10.543	0.508
21	5.406	21.044	2.646	0.0378	10.559	0.512

$$\text{Area corregida} = \frac{10.160}{1 - \epsilon} ; H_0 = 70.00 \text{ mm}$$

(ver figura B.6)

B.1.- CURVAS: "ESFUERZO-DEFORMACION".

b.11

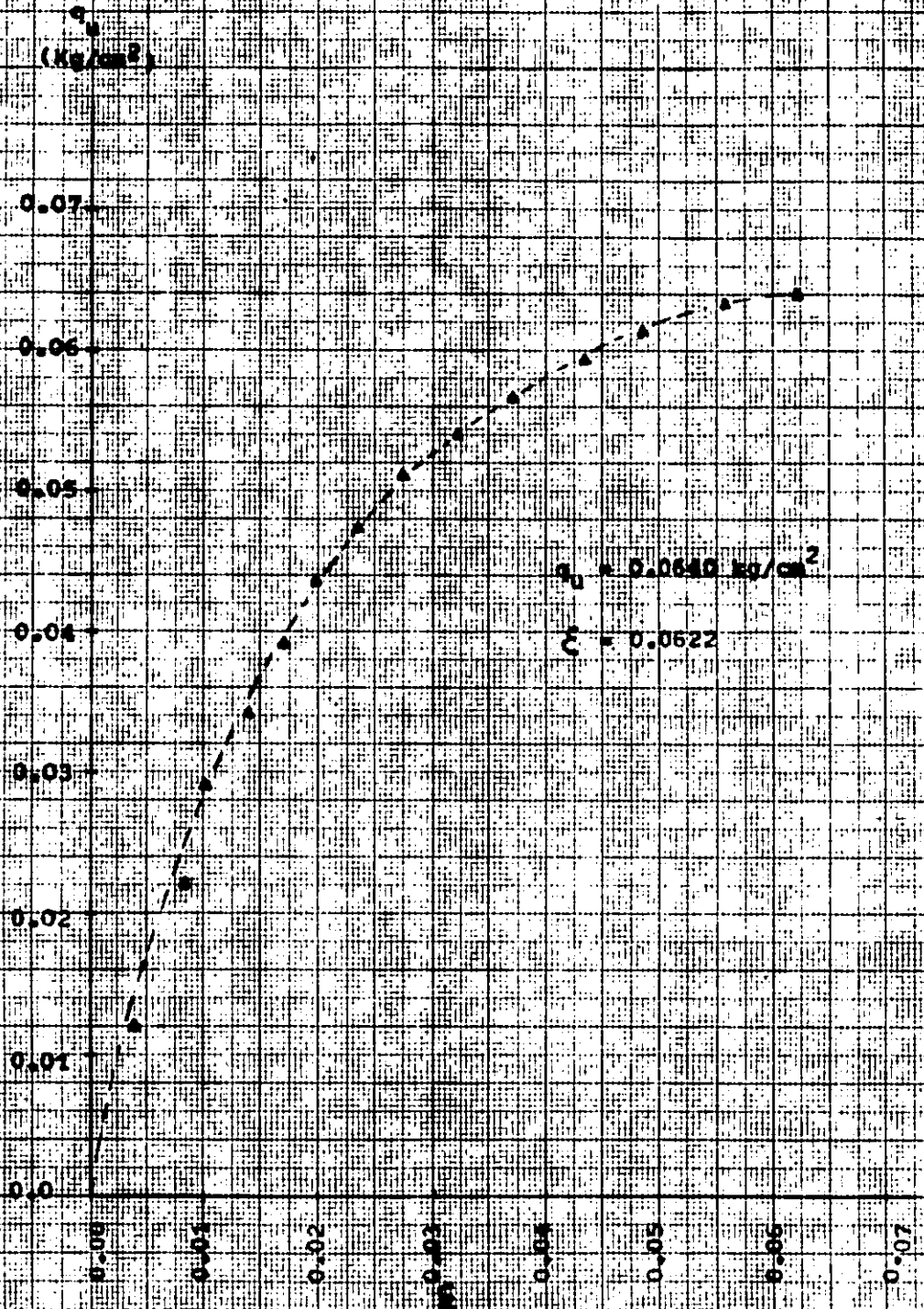


FIGURA B.1.- Curva "Esfuerzo-Deformación" en compresión no confinada de muestra remoldeada con ocho días de reposo.

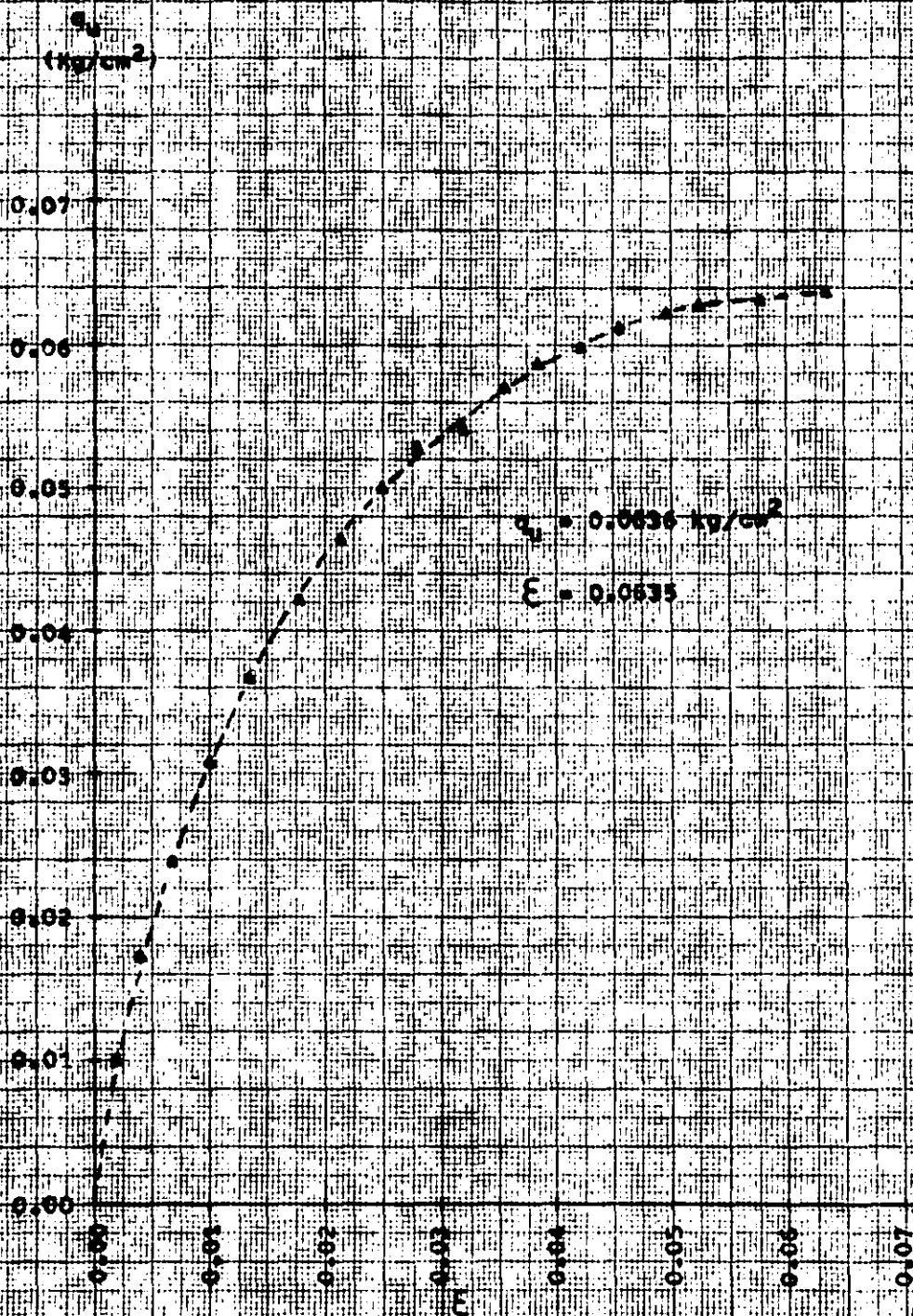


FIGURA B.2.- Curva "Esfuerzo-Deformación" en compresión no confinada de muestra remoldeada con ocho días de reposo.

q_u
(kg/cm²)

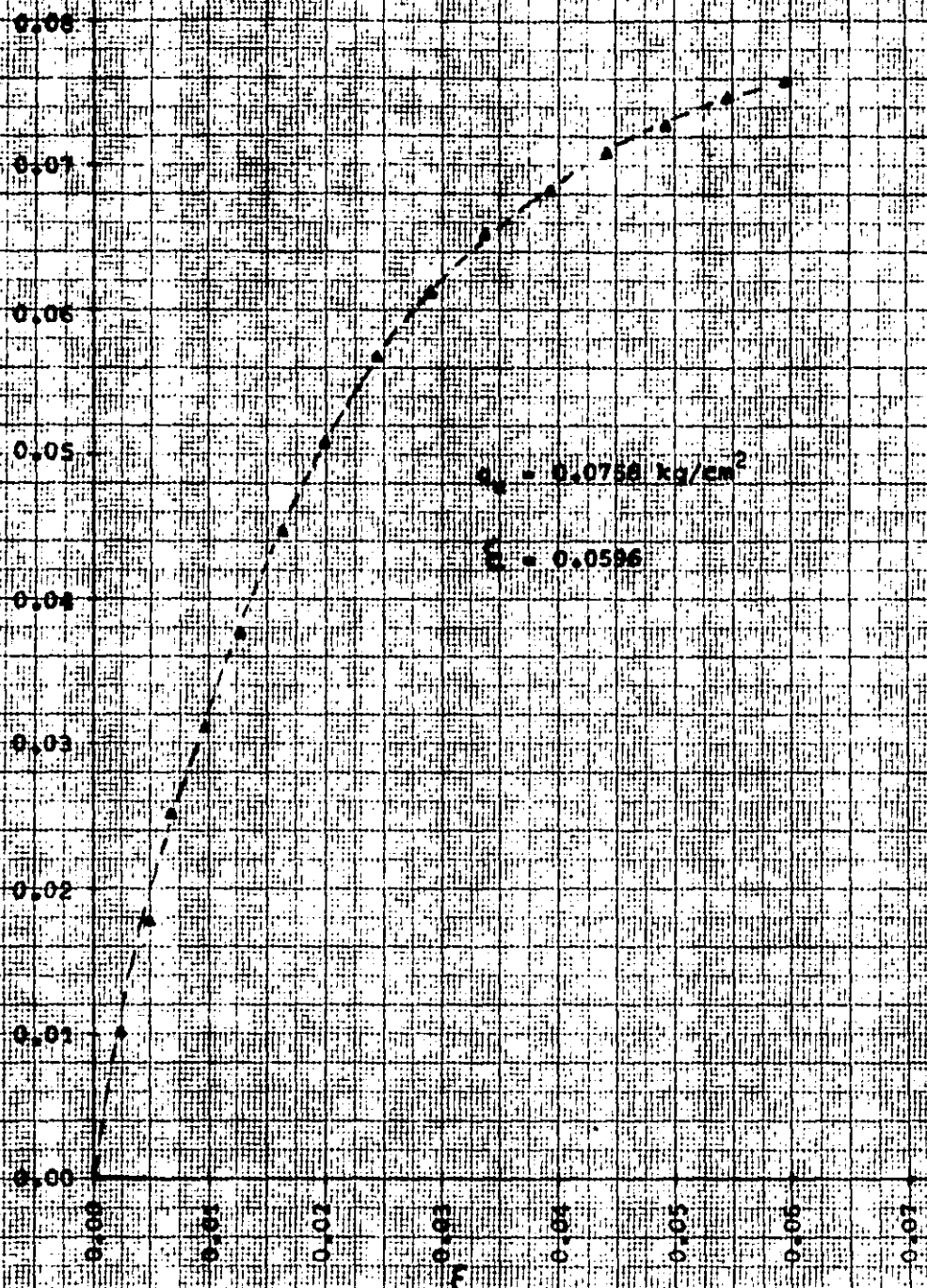


FIGURA B.3.- Curva "Esfuerzo-Deformación" en compresión no confinada de muestra remoldeada con dieciocho días de reposo.

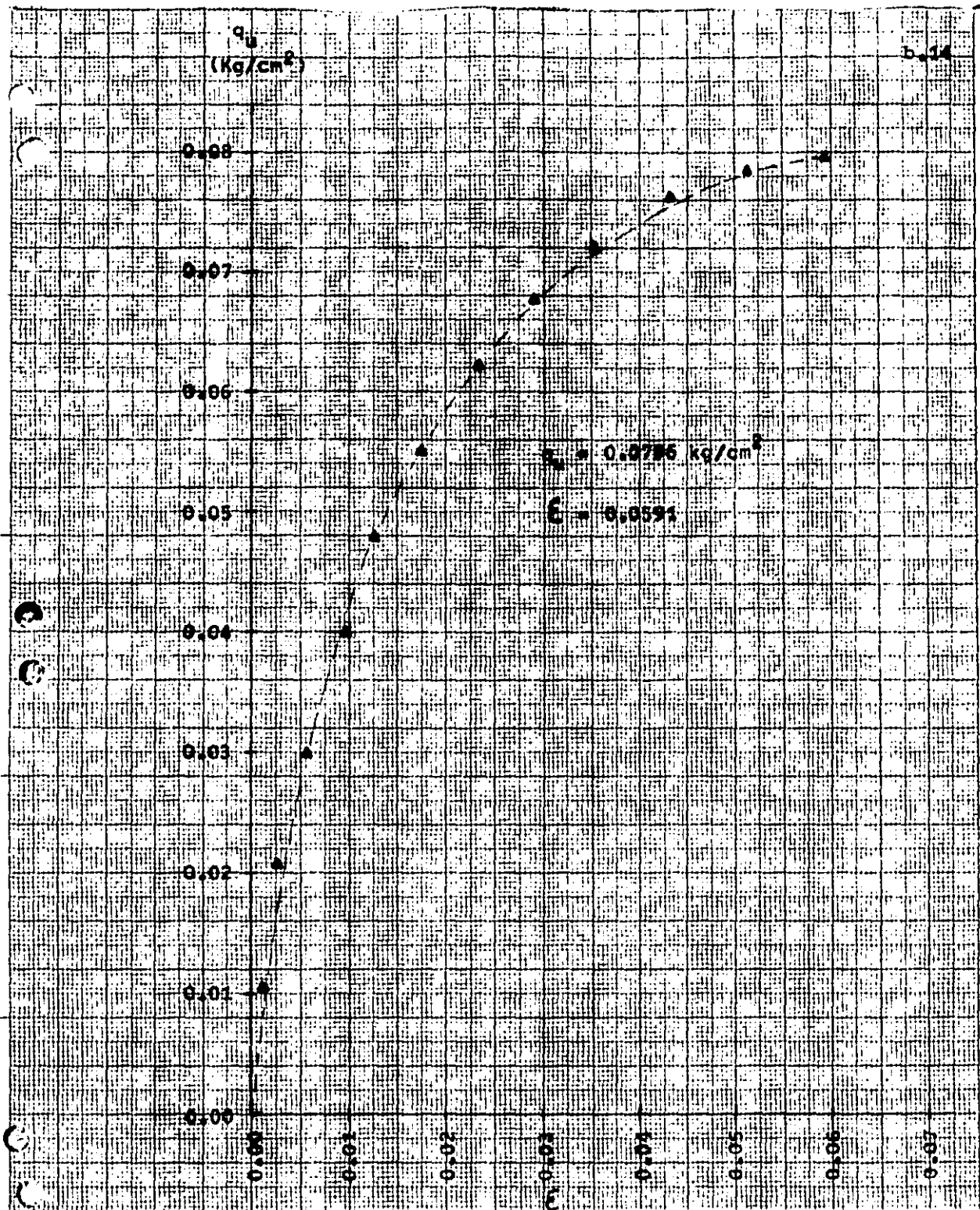


FIGURA B.4.- Curva "Esfuerzo-Deformación" en compresión no confinada de muestra remoldeada con cuarenta días de reposo.

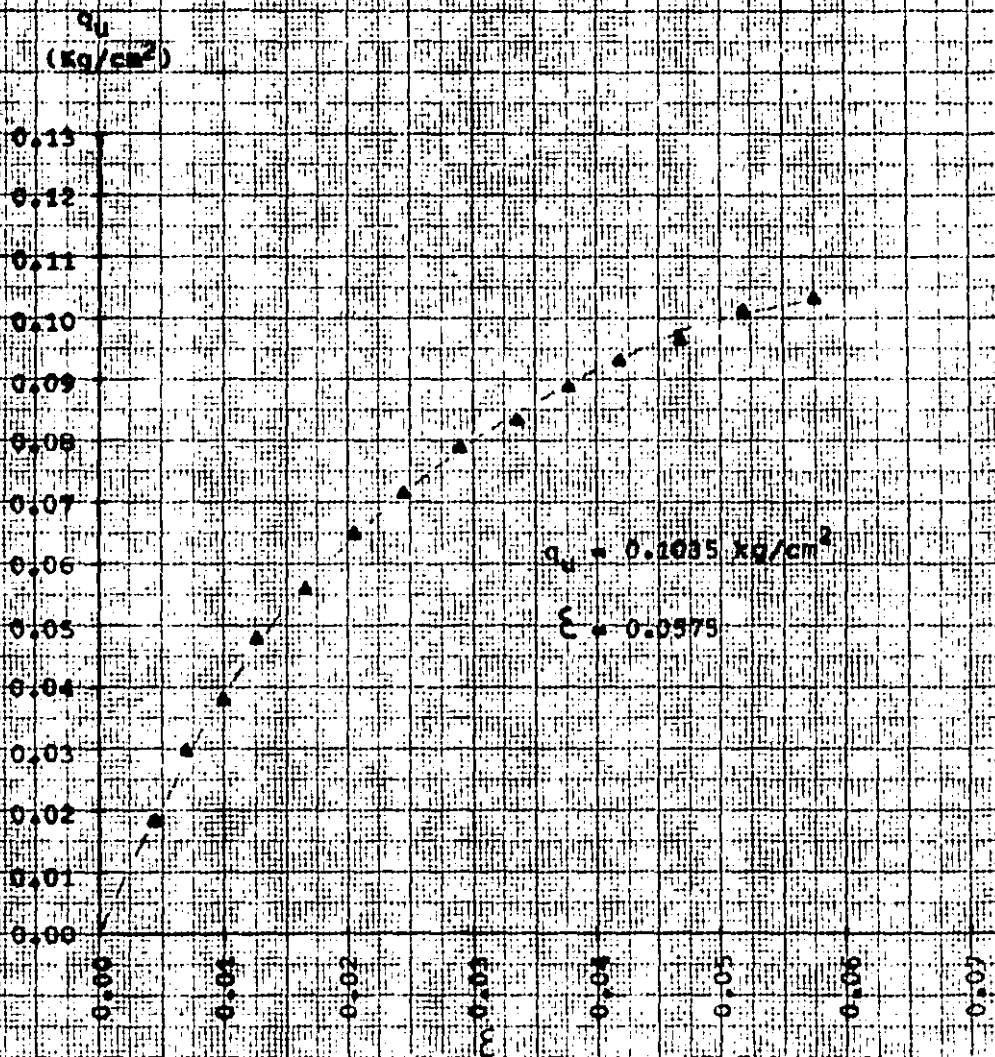


FIGURA B.5.- Curva "Esfuerzo-Deformación" en compresión no confinada de muestra remoldeada con noventa días de reposo.

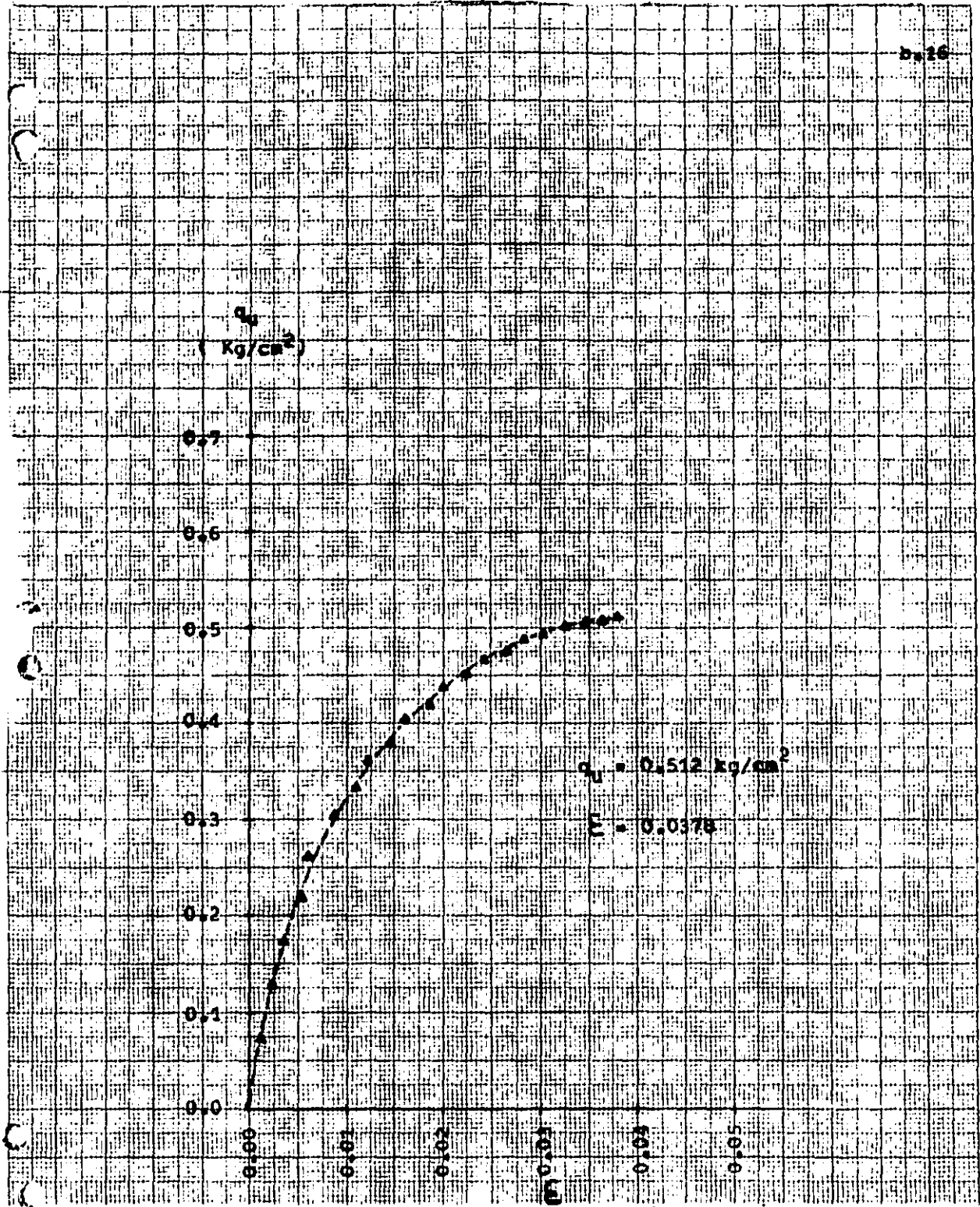


FIGURA B.6.- Curva "Esfuerzo-Deformación" en compresión no confinada de muestra inalterada.

B.4.- Gráfica "restitución de la resistencia-tiempo".

Con base en los valores de la resistencia a la compresión no confinada, de las muestras remoldeadas con diferentes tiempos de reposo, relacionados con el valor de la resistencia a la compresión no confinada de una muestra inalterada, se determinaron los siguientes resultados:

TABLE 2

Prueba No.	Tiempo de reposo en días.	q_u (Kg/cm ²)	$\frac{(q_u)_r}{(q_u)_i}$
1	8	0.0640	0.125
2	8	0.0636	0.124
3	18	0.0758	0.148
4	40	0.0796	0.155
5	90	0.1035	0.202
6	--	0.5120	1.000

La curva formada con los valores de esta tabla, se presenta en la gráfica de la fig. B.7

(C)

(C)

1.0
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0.0

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90

Tiempo en días.

FIGURA B.7.- Gráfica "Restitución de la resistencia - Tiempo" en compresión no confinada.

B.5.- Conclusiones y recomendaciones.-

Las conclusiones correspondientes al trabajo, cuyos resultados se presentan en este anexo, son las siguientes:

1.- La arcilla estudiada tiene una gran sensibilidad, ya que según Terzaghi el valor normal de la sensibilidad de las arcillas, oscila entre 2 y 4, y en este caso, para un tiempo de reposo de 8 días a partir del remoldeo, se encontró que la relación $(q_1/q_r) = 8$.

2.- Se observó que para 90 días de reposo, la arcilla experimentó una restitución de su resistencia a la compresión simple de un 20% respecto a la resistencia correspondiente a su condición de suelo inalterado.

3.- Se pudo notar en los primeros momentos después del remoldeo, que la arcilla presentaba una gran deformabilidad, ya que las probetas se deformaban en pocos minutos, bajo la acción de su peso propio. Esta condición de la estructura del suelo remoldeado, obliga al diseño de un equipo especial de pruebas, que sea sensible a la resistencia tan baja de este suelo. Y que permita además una manipulación rápida y segura en el montado de la probeta.

4.- Por la propiedad antes mencionada en el punto anterior, durante los tiempos de reposo es necesario - - cambiar frecuentemente la posición de la probeta de suelo remoldeado, principalmente durante los primeros momentos a partir del remoldeo. Si se quiere evitar que la muestra pierda su forma deseada.

5.- Para la investigación mediante la ejecución de pruebas CU, de acuerdo a la idea original de esta tesis, el tiempo mínimo de reposo recomendable, se estima de 30 días, si el equipo a emplearse es el actual.