

01163  
lej.  
1

**COMPORTAMIENTO DE LA ARCILLA DE LA  
CIUDAD DE MEXICO ANTE CARGAS CICLICAS**

**GONZALO CORDOBA CAMPEROS**

**TESIS**

**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  
(MECANICA DE SUELOS)**

**CIUDAD UNIVERSITARIA**

**Agosto, 1986**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

UNAM



## **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.

# I N D I C E

Página

LISTA DE FIGURAS  
LISTA DE TABLAS  
LISTA DE SIMBOLOS

I.	INTRODUCCION	1
	1 Objetivo	3
	2 Alcance	4
	3 Condiciones analizadas	5
II.	ANTECEDENTES	9
	1 Conceptos básicos	10
	a. Relación esfuerzo-deformación	10
	b. Resistencia al esfuerzo cortante	12
	c. Efecto de la velocidad de aplicación de la carga	14
	2 Efecto de la carga cíclica en el comportamiento de las arcillas	15
	3 Condiciones de esfuerzo simuladas en una prueba triaxial cíclica	18
III.	INVESTIGACION DE LABORATORIO	32
	1 Programación de las pruebas	32
	a. Características del material ensayado	32
	b. Descripción del programa de pruebas	34
	2. Descripción del equipo de carga cíclica	38
	3. Procedimiento de una prueba tipo	39
	a. Labrado y montaje de la probeta	39
	b. Eliminación del efecto capilar	40
	c. Saturación	40
	d. Consolidación	42
	e. Aplicación de carga cíclica	43
	f. Aplicación de carga estática	43

	Página	
4	Resultados obtenidos	43
	a. Prueba 1. Triaxial estática	43
	b. Pruebas 2 a 6. Triaxiales cíclicas	44
IV.	INTERPRETACION DE RESULTADOS	68
	1 Comportamiento durante la acción cíclica	68
	a. Esfuerzo cortante cíclico aplicado	69
	b. Relación esfuerzo-deformación	69
	c. Variación de la presión de poro	74
	2 Comportamiento post-cíclico	75
	a. Relación esfuerzo-deformación	75
	b. Resistencia al esfuerzo cortante	76
V.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	88
	REFERENCIAS	92

## LISTA DE FIGURAS

	Pag.
NOTA: Las figuras se presentan en la parte final de cada capítulo.	
I.1 Estados de esfuerzo en un elemento de suelo, antes y durante una acción sísmica.	7
I.2 Condición inicial de esfuerzos analizada en este trabajo.	8
II.1 Respuesta esfuerzo-deformación de una muestra de arcilla. Prueba triaxial CU.	21
II.2 Gráfica esfuerzo-deformación correspondiente a un ciclo de carga. Prueba triaxial.	21
II.3 Lazo idealizado de histéresis. Primer ciclo de carga. Prueba triaxial cíclica.	22
II.4 Semicírculo de Mohr de esfuerzos.	23
II.5 Línea de resistencia al esfuerzo cortante.	23
II.6 Efecto del tiempo en la deformación.	24
II.7 Efecto de la velocidad de aplicación de la carga en el comportamiento del suelo.	24
II.8 Lazos idealizados de histéresis. Primer ciclo de carga de dos distintas pruebas triaxiales.	25
II.9 Efecto de la magnitud del esfuerzo desviador cíclico en la relación esfuerzo-deformación. Arcilla limosa de San Francisco.	26

	Pag.	
II.10	Combinaciones de esfuerzo sostenido y desviador cíclico que causan falla a distinto número de ciclos. Arcilla limosa de San Francisco.	27
II.11	Efecto de la amplitud del esfuerzo desviador cíclico en la resistencia. Arcilla limosa de San Francisco.	28
II.12	Efecto de la frecuencia de aplicación de la carga cíclica en la resistencia. Arcilla limosa de San Francisco.	28
II.13	Condiciones de esfuerzo durante aplicación de un ciclo de carga. Prueba triaxial cíclica. Consolidación isotrópica.	29
II.14	Círculos de Mohr de esfuerzos. Prueba triaxial cíclica. Consolidación anisotrópica.	30
II.15	Círculos de Mohr de esfuerzos. Prueba triaxial cíclica. Consolidación anisotrópica.	31
III.1	Gráfica esfuerzo-deformación utilizada para definir el programa de pruebas.	35
III.2	Esquema del equipo triaxial cíclico. DEPMI-UNAM.	54
III.3	Fotografía de una parte del equipo triaxial cíclico. DEPMI-UNAM.	55
III.4	Condiciones esfuerzo-cambio volumétrico de la muestra, en las primeras etapas de la prueba.	56
III.5	Registro obtenido durante la aplicación de la carga cíclica.	57

	o	Pag.
III.6	Gráfica esfuerzo-deformación. Prueba estática.	58
III.7	Lazo de histéresis esfuerzo-def. Prueba 2.	59
III.8	Lazo de histéresis esfuerzo-def. Prueba 3.	60
III.9	Lazo de histéresis esfuerzo-def. Prueba 4.	61
III.10	Lazos de histéresis esfuerzo-def. Prueba 5.	62
III.11	Lazos de histéresis esfuerzo-def. Prueba 6.	63
III.12	Respuesta esfuerzo-deformación, post-cíclica Prueba 2.	64
III.13	Respuesta esfuerzo-deformación, post-cíclica Prueba 3.	65
III.14	Respuesta esfuerzo-deformación, post-cíclica Prueba 4.	66
III.15	Respuesta esfuerzo-deformación, post-cíclica Prueba 5.	67
IV.1	Estados de esfuerzos totales durante aplicación de un ciclo de carga. Pruebas 2, 3 y 4.	81
IV.2	Estados de esfuerzos totales durante aplicación de un ciclo de carga. Pruebas 5 y 6.	82
IV.3	Variación del módulo dinámico secante con la magnitud de la deformación axial.	83
IV.4	Variación de la relación de amortiguamiento histerético con la magnitud de la deformación axial.	83

	Pag.	o
IV.5	Variación del módulo dinámico secante con la magnitud de la carga cíclica.	84
IV.6	Conjunto de gráficas esfuerzo-deformación axial.	85
IV.7.	Efecto de la carga cíclica en el módulo estático representativo.	86
IV.8	Efecto de la carga cíclica en la resistencia al esfuerzo cortante.	87

o

LISTA DE TABLAS

	Pag.
III.1 Propiedades índice promedio del suelo ensayado.	33
III.2 Programa de pruebas. Resumen de datos.	37
III.3 Definición de valores registrados en un ciclo de carga. Prueba triaxial cíclica.	46
III.4 Resumen de resultados. Pruebas triaxiales cíclicas.	47
III.5 Resumen de datos y resultados. Prueba 1.	48
III.6 Resumen de datos y resultados. Prueba 2.	49
III.7 Resumen de datos y resultados. Prueba 3.	50
III.8 Resumen de datos y resultados. Prueba 4.	51
III.9 Resumen de datos y resultados. Prueba 5.	52
III.10 Resumen de datos y resultados. Prueba 6.	53
IV.1 Valores del módulo dinámico secante.	78
IV.2 Valores del módulo secante post-cíclico.	79
IV.3 Valores de la resistencia al esfuerzo cortante, post-cíclico.	80

## LISTA DE SIMBOLOS

$A_c$	:	Area del espécimen consolidado
$B$	:	Parámetro de Skempton, de presión de poro
$\beta$	:	Fracción del amortiguamiento crítico
$E_0$	:	Módulo dinámico inicial
$E_{0d}$	:	Módulo tangente inicial, post-cíclico
$E_{0p}$	:	Módulo tangente inicial, post-cíclico
$E_s$	:	Módulo secante asociado a un determinado nivel de esfuerzo
$E_{sd}$	:	Módulo dinámico secante
$E_{50s}$	:	Módulo al 50% del esfuerzo desviador de falla en la prueba estática
$E_{50p}$	:	Módulo al 50% del esfuerzo desviador de falla de la prueba estática, post-cíclico
$\epsilon$	:	Deformación axial unitaria
$\epsilon_a$	:	Deformación axial unitaria, valor promedio durante un ciclo de carga
$\epsilon_c$	:	Deformación axial unitaria, no recuperable, debida a carga cíclica
$\epsilon_{so}$	:	Deformación axial unitaria de falla en la prueba estática
$\epsilon_s$	:	Deformación axial unitaria de falla, post-cíclica
$\delta_c$	:	Desplazamiento axial máximo, durante la etapa de compresión de un ciclo de carga
$\delta_e$	:	Desplazamiento axial máximo, durante la etapa de extensión de un ciclo de carga
$G$	:	Módulo de rigidez al cortante
$K_0$	:	Coefficiente de esfuerzos en reposo
$K_c$	:	Relación de esfuerzos de consolidación

$\nu$	:	Relación de Poisson
$S$	:	Resistencia al esfuerzo cortante
$\sigma_1$	:	Esfuerzo principal mayor
$\sigma_3$	:	Esfuerzo principal menor
$\bar{\sigma}_{1c}$	:	Esfuerzo axial efectivo de consolidación
$\bar{\sigma}_{3c}$	:	Esfuerzo confinante efectivo de consolidación
$\sigma_{dc}$	:	Esfuerzo desviador cíclico
$\sigma_{ds}$	:	Esfuerzo desviador estático
$\bar{\sigma}_e$	:	Esfuerzo confinante efectivo equivalente de campo
$\bar{\sigma}_h$	:	Esfuerzo efectivo horizontal
$\bar{\sigma}_v$	:	Esfuerzo efectivo vertical
$\sigma_n$	:	Esfuerzo normal a un plano de la muestra inclinado $\alpha^\circ$ con respecto a su base
$\sigma_{s0}$	:	Esfuerzo desviador de falla en la prueba estática
$\sigma_s$	:	Esfuerzo desviador de falla, post-cíclico
$\tau$	:	Esfuerzo cortante
$\tau_c$	:	Esfuerzo cortante cíclico
$\Delta u$	:	Presión de poro, valor promedio en un ciclo de carga.

## **I. INTRODUCCION**

El comportamiento esfuerzo-deformación y la resistencia que los suelos presentan ante carga dinámica es diferente del presentado ante carga estática. Un suelo se carga dinámicamente cuando ésta se le aplica con suficiente rapidez para que las fuerzas de inercia tengan importancia respecto a las estáticas; en algunos casos la carga dinámica es tan sólo un pulso como la producida por una explosión, en otros se repite por varios ciclos como la producida por vibración de maquinaria o sismos.

Durante un sismo, un elemento de suelo en el sitio se somete a un complejo estado de deformación resultante de la secuencia errática de los movimientos del terreno. La mayor parte de las deformaciones se atribuye a las ondas sísmicas de cortante las cuales se propagan en sentido casi vertical en los estratos cercanos a la superficie; estas ondas generan en los planos vertical y horizontal del elemento esfuerzos cortantes, los cuales al invertir su dirección varias veces durante el sismo producen el efecto de una carga cíclica. La magnitud de los esfuerzos cortantes varía erráticamente de un ciclo a otro.

En la Figura I.1.a se indica el estado de esfuerzos en un elemento de suelo perteneciente a un depósito con superficie horizontal, y en la Figura I.1.b el estado idealizado de esfuerzos en el mismo elemento durante una acción sísmica.

Dada la importancia de los efectos que la carga cíclica induce en la relación esfuerzo-deformación y en la resistencia de los suelos granulares, este ha sido tema de estudio para muchos investigadores desde hace cerca de tres décadas. Se han realizado diversos trabajos sobre densificación de arena seca y sobre reducción de resistencia al esfuerzo cortante en arena fina saturada. Actualmente se cuenta con varios métodos semi-empíricos y numéricos para evaluar asentamientos y susceptibilidad a la licuación, pero aún falta mucho por dilucidar en torno al comportamiento de los suelos granulares ante carga dinámica (Díaz Rodríguez, 1980).

Los efectos que la carga cíclica produce en los suelos finos plásticos son menos espectaculares que los producidos en suelos granulares, pero no menos importantes. Se reconoce que la resistencia a la compresión de las arcillas tiende a disminuir al incrementarse el número de ciclos de carga (Seed, Chan, 1966). Los mismos autores señalan que el número de ciclos de carga necesarios para causar una determinada deformación a una muestra depende de varios factores como son la condición inicial de esfuerzos, la magnitud del esfuerzo cíclico aplicado, las características del suelo ensayado, la frecuencia y la forma de la onda de carga.

En los últimos veinte años se han realizado diversos trabajos sobre los efectos de la carga cíclica en el comportamiento de las arcillas, pero aún es un amplio campo de investigación. A la fecha no existe reporte de trabajos realizados sobre el comportamiento de muestras de arcilla de la Ciudad de México ante carga cíclica. El término "Comportamiento" como se utiliza en este trabajo se refiere a la relación esfuerzo-deformación y a la resistencia del suelo.

"inalteradas" de arcilla de la Ciudad de México.

## 1.2 ALCANCE

Una completa investigación de laboratorio sobre los efectos que la carga cíclica produce en el comportamiento de una arcilla en particular requiere de un amplio programa de pruebas que considere como variable a cada uno de los factores que influyen en tal comportamiento. El tema desarrollado en esta tesis forma parte de un programa de investigación sobre el comportamiento cíclico de la arcilla de la Ciudad de México, realizado por el Grupo: Dinámica de Suelos, de la Sección de Mecánica de Suelos en la DEPMI-UNAM.

La variable considerada en este trabajo es la magnitud de la carga cíclica, se analiza su influencia en el comportamiento de muestras "inalteradas" de arcilla al someter a cada una de ellas a la acción de una carga cíclica de diferente magnitud. La condición de esfuerzos iniciales a partir de la cual se aplica la carga cíclica es igual a todas las muestras de prueba. La frecuencia de aplicación, la forma de la onda de carga y el número de ciclos son constantes en todas las pruebas.

La parte experimental del trabajo incluye una prueba triaxial estática convencional y cinco pruebas triaxiales cíclicas, todas del tipo consolidada anisotrópicamente - no drenada, con esfuerzo controlado.

- a) En la primera etapa de todas las pruebas la muestra se lleva a una misma condición de esfuerzos.
- b) En la segunda etapa de la prueba triaxial estática se incrementa monotónicamente el esfuerzo axial, en condición no drenada, hasta producirse la falla de la muestra.

En la segunda etapa de cada prueba triaxial cíclica la muestra se somete a la correspondiente carga cíclica; en el inciso III.1.b se describe el programa de pruebas. En caso de que la muestra no

falle durante la acción de la carga cíclica se continúa inmediatamente con una tercera etapa de prueba.

- c) En la tercera etapa de la prueba se incrementa monotónicamente el es fuerza axial, en condición no drenada, hasta que ocurra la falla de la muestra. Esta etapa permite determinar el comportamiento post-cíclico de la muestra.

El término "falla" como se utiliza en este trabajo se refiere a la condición de colapso total o ruptura de la probeta.

Al comparar los resultados obtenidos en la prueba triaxial estática con los correspondientes en las pruebas triaxiales cíclicas puede evaluarse el efecto de la carga cíclica en el comportamiento de las muestras de arcilla.

### 1.3 CONDICIONES ANALIZADAS

En este inciso se indica la condición de esfuerzos a partir de la cual se aplica la carga cíclica y las características de dicha carga. El suelo ensayado es arcilla proveniente de un sondeo "inalterado" realizado en la zona céntrica de la ciudad, sus características se indican en el inciso III.1.a. Las muestras de prueba corresponden a profundidades entre 10.90 y 12.90 m.

#### • Condición de esfuerzos inicial

Las muestras se consolidaron bajo una relación de esfuerzos  $K_c$ , de 0.71 promedio.

$$K_c = \frac{\bar{\sigma}_{3c}}{\sigma_{1c}} \quad (1.1)$$

Donde,

$\bar{\sigma}_{3c}$  : Esfuerzo confinante efectivo de consolidación.

$\bar{\sigma}_{1c}$  : Esfuerzo axial efectivo de consolidación.

El esfuerzo confinante efectivo de consolidación,  $\bar{\sigma}_{3c}$ , aplicado a las muestras de prueba es igual al esfuerzo confinante efectivo equivalente de campo,  $\bar{\sigma}_e$ , definido como:

$$\bar{\sigma}_e = \frac{(1 + 2K_0)}{3} \bar{\sigma}_v \quad (1.2)$$

Donde,

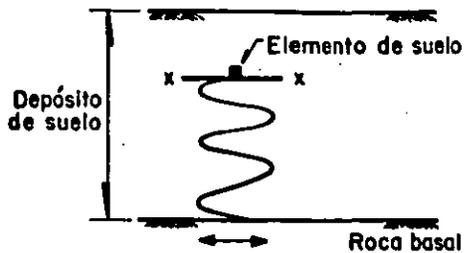
$K_0$  : Coeficiente de esfuerzos en reposo.

$\bar{\sigma}_v$  : Esfuerzo vertical efectivo de campo.

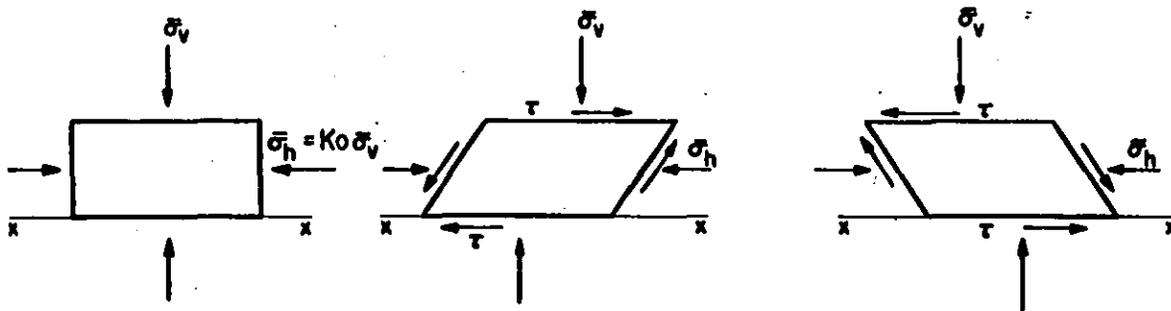
En la figura 1.2 se ilustra la condición de esfuerzos inicial analizada en este trabajo, los esfuerzos efectivos de consolidación se expresan en términos del esfuerzo vertical efectivo de campo para lo cual se utilizó un valor del coeficiente de esfuerzos en reposo  $K_0 = 0.8$ . Zeevaert (1953), en el limo arcilloso suave típico de la Ciudad de México encuentra valores de  $K_0$  entre 0.76 y 0.86.

#### Condición de carga cíclica

Cada muestra se sometió a 100 ciclos de esfuerzo desviador axial aplicados con una frecuencia de 0.5 Hertz. El número de ciclos y la frecuencia corresponde aproximadamente a las características del sismo ocurrido en la Ciudad de México el pasado 19 de septiembre de 1985. La carga cíclica se aplica con onda de forma senoidal la cual simula la forma de los esfuerzos inducidos por un sismo (Seed, Chan; 1966; Annaki 1975). La magnitud del esfuerzo desviador cíclico es la variable analizada en este trabajo, por lo que difiere en cada muestra de prueba, los valores correspondientes se indican en el inciso III.1.b.



$\sigma_v$  : Esfuerzo Efectivo vertical  
 $\bar{\sigma}_h$  : Esfuerzo efectivo horizontal  
 $K_0$  : Coeficiente de esfuerzos en reposo  
 $\tau$  : Esfuerzo cortante



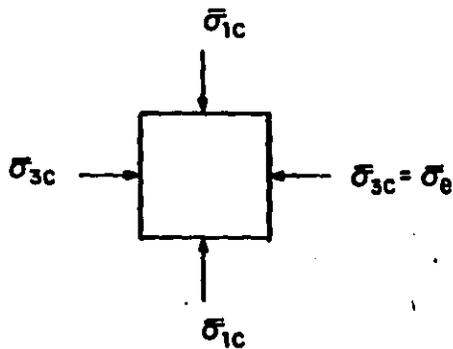
(a)

Antes de una  
acción sísmica

(b)

Idealizados durante una  
acción sísmica

Fig I.1 Estados de esfuerzo en un elemento de suelo perteneciente a un depósito con superficie horizontal, antes y durante una acción sísmica



$$K_c = \frac{\bar{\sigma}_{3c}}{\bar{\sigma}_{1c}} = 0.71$$

$$\bar{\sigma}_{3c} = \bar{\sigma}_e = \frac{(1 + 2K_0)}{3} \bar{\sigma} = 0.87 \bar{\sigma}_v$$

$\bar{\sigma}_{1c} = 1.22 \bar{\sigma}_v$ $\bar{\sigma}_{3c} = 0.87 \bar{\sigma}_v$
---

Donde,

$K_c$  : Relación de esfuerzos de consolidación

$\bar{\sigma}_{3c}$ : Esfuerzo confinante efectivo de consolidación

$\bar{\sigma}_{1c}$  : Esfuerzo axial efectivo de consolidación

$\bar{\sigma}_e$  : Esfuerzo confinante efectivo equivalente de campo

$\bar{\sigma}_v$  : Esfuerzo vertical efectivo de campo

$K_0$  : Coeficiente de esfuerzos en reposo

Fig I.2 Condición inicial de esfuerzos analizada en este trabajo

## **II. ANTECEDENTES**

En la primera parte de este capítulo se presentan conceptos básicos sobre el comportamiento de los suelos sometidos a cargas estáticas, utilizados en el estudio del comportamiento de los mismos ante cargas dinámicas. En la segunda parte se incluyen resultados obtenidos en estudios previos sobre el efecto de la carga cíclica en la respuesta esfuerzo-deformación y en la resistencia de las arcillas. En la parte final del capítulo se compara el estado idealizado de esfuerzos generado en un elemento de suelo durante una acción sísmica, con el simulado en una prueba triaxial cíclica.

Se revisó la literatura técnica referente a los efectos que causa la aplicación de carga cíclica en el comportamiento de las arcillas. No se halló reporte de trabajos previos en muestras de arcilla de la Ciudad de México. Se encontraron varios artículos que proporcionan resultados obtenidos en distintos tipos de arcilla y en programas de pruebas diferentes al realizado como parte experimental de esta tesis. En la Universidad de California en Berkeley se ha investigado el comportamiento de la arcilla limosa de San Francisco desde hace dos décadas,

se cuenta con información obtenida de distintos programas de pruebas realizadas en cámara triaxial (Seed, Chan, 1966) y en equipo de corte simple (Thiers, Seed, 1968), a los cuales se hace referencia para ilustrar algunos conceptos en el desarrollo de este capítulo.

## II.1 CONCEPTOS BASICOS

### II.1.a. RELACION ESFUERZO-DEFORMACION

La respuesta esfuerzo-deformación de una muestra de suelo depende tanto de las condiciones de carga como de las condiciones de frontera a que se somete durante una prueba. En este trabajo, para describir la relación esfuerzo-deformación de una muestra de suelo en una prueba determinada se utiliza el módulo secante  $E_s$ . Para un determinado incremento en el nivel de esfuerzo se obtiene un módulo secante,  $E_s$ , como la pendiente de la recta que une el origen con el punto de la gráfica esfuerzo-deformación al nivel de esfuerzo considerado. Es claro que este módulo no es una constante del suelo sino más bien una magnitud que describe aproximadamente su respuesta esfuerzo-deformación para una condición particular de esfuerzos.

En la Figura II.1 se presenta la gráfica típica esfuerzo-deformación de una muestra de arcilla sometida a una prueba triaxial consolidada-no drenada, con esfuerzo controlado; en la que la carga se aplica axial y monotónicamente manteniendo constante el esfuerzo confinante. El esfuerzo desviador que causa la falla mide la resistencia a la compresión de la muestra, en dicha prueba.

En la Figura II.2 se observa que al descargar axialmente una muestra de suelo después de haberse alcanzado un determinado nivel de esfuerzo desviador, parte de la deformación no se recupera. La deformación no recuperable se debe a cambios en la estructura del suelo por movimientos relativos entre sus partículas. La energía disipada por la fricción entre las partículas para producir los cambios en la estructura

está dada por el área limitada por el lazo OAB; en este caso la respuesta esfuerzo-deformación es histerética o no lineal. Si el anterior ciclo de carga se continúa repitiendo con una misma frecuencia, se considera que la muestra de la prueba en cuestión está sometida a la acción de una carga cíclica.

La relación esfuerzo-deformación de una muestra de suelo sometida a carga cíclica es histerética. En la Figura II.3 se presenta un lazo idealizado de histéresis esfuerzo-deformación obtenido en el primer ciclo de carga de una prueba triaxial realizada con esfuerzo controlado, donde la muestra se somete a un esfuerzo desviador cíclico de amplitud doble,  $\pm \sigma_{dc}$ . Los puntos C y D se asocian a las deformaciones axiales máximas de la muestra durante las etapas de carga y descarga, respectivamente. La curva OA se obtiene al cargar axial y monotónicamente hasta alcanzar el valor del esfuerzo desviador cíclico,  $\sigma_{dc}$ .

El módulo dinámico secante,  $E_{sd}$ , asociado a la máxima deformación axial alcanzada en el ciclo se determina como la pendiente de la recta que une los puntos extremos A y B del lazo histerético.

El módulo de rigidez al cortante,  $G$ , definido como la relación entre un esfuerzo cortante y la deformación angular correspondiente a ese nivel de esfuerzo, puede obtenerse indirectamente mediante la expresión que relaciona los tres parámetros elásticos:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (2.1)$$

Donde,

$G$  : Módulo de rigidez al cortante

$E$  : Módulo tangente inicial o secante correspondiente a un determinado nivel de esfuerzo

$\nu$  : Relación de Poisson

Una muestra de suelo sometida a un ciclo de carga axial presenta amortiguamiento histerético debido a la fricción generada entre sus

partículas la cual causa cambios en su estructura y por tanto deformación no recuperable. En el caso de movimiento dinámico las ondas podrán transmitirse en la masa del suelo únicamente por la respuesta elástica que el material sea capaz de proporcionar ya que si el material es idealmente plástico no podrá transmitir ondas de vibración (Zeevaert 1968).

Las características de amortiguamiento del suelo puede evaluarse determinando la fracción del amortiguamiento crítico  $\zeta$ , definida como:

$$\zeta = \frac{C}{C_c} \quad (2.2)$$

Donde,

$C$  : Coeficiente de amortiguamiento

$C_c$  : Amortiguamiento crítico

Jacobsen (1960) propuso el coeficiente de pérdida de energía como una expresión alternativa basada en términos de relación de energía de deformación y que se conoce actualmente como relación de amortiguamiento histérico equivalente,  $\beta$ , la cual se determina a partir del lazo de histéresis mediante la expresión:

$$\beta = \frac{1}{4\pi} \frac{A_1}{A_t} \quad (2.3)$$

Donde,

$A_1$ : Área limitada por el lazo de histéresis AC'BD'A (Fig. II.3)

$A_t$ : Área del triángulo AOC.

El área limitada por el lazo de histéresis corresponde a la energía disipada por unidad de volumen de la muestra, por ciclo. El área del triángulo AOC es la energía potencial de deformación almacenada por unidad de la muestra, por ciclo.

### II.1.b RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE

El estado de esfuerzos principales en una muestra de suelo sometida a prueba triaxial puede representarse por el círculo de Mohr, como se indica en la Figura II.4. Los esfuerzos normal  $\sigma_n$  y cortante  $\tau$  que actúan en un plano de la muestra inclinado  $\alpha^\circ$  con respecto al plano donde actúa el esfuerzo principal mayor se obtienen a partir de las condiciones de equilibrio; para un estado de esfuerzo plano se tiene que:

$$\sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha \quad (2.3)$$

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha \quad (2.4)$$

Donde,

$\sigma_1$ : Esfuerzo principal mayor

$\sigma_3$ : Esfuerzo principal menor

Según el concepto de Mohr-Coulomb, la resistencia de un suelo puede medirse por el esfuerzo cortante máximo que puede soportar, que a su vez es función del esfuerzo normal actuante en el plano donde ocurre la falla. La relación entre los esfuerzos normal y cortante en el plano de falla no necesariamente es lineal y está dada por una envolvente a los círculos máximos. La ley de resistencia al esfuerzo cortante se expresa:

$$S = c + \sigma_n \tan \phi \quad (2.5)$$

Donde,

S: Resistencia al esfuerzo cortante.

$\sigma_n$ : Esfuerzo normal al plano potencial de falla.

En un plano coordenado S vs.  $\sigma_n$ , y para su intervalo de esfuerzo normal, la ecuación 2.5 puede representarse por una recta llamada línea de resistencia. Los parámetros c y  $\phi$  representan la ordenada en el origen y la pendiente de la línea de resistencia, respectivamente. En la Figura II.5 se observa que a una muestra de suelo consolidada isotrópicamente puede aplicarse un esfuerzo desviador máximo con el cual el respectivo círculo de Mohr es tangente a la línea de resistencia, en esa condición se alcanza la máxima resistencia al esfuerzo cortante de la muestra en un plano a través de la misma inclinado  $\alpha^0$  con el plano sobre el que actúa el esfuerzo principal mayor; y que teóricamente es igual a:

$$\alpha = 45^\circ + \frac{\phi}{2} \quad (2.6)$$

Donde,

$\phi$ : Pendiente de la línea de resistencia, en el intervalo de esfuerzo normal considerado.

### 11.1.c. EFFECTO DE LA VELOCIDAD DE APLICACION DE LA CARGA

La velocidad de aplicación de la carga afecta la relación esfuerzo-deformación y la resistencia de los suelos. El efecto del tiempo en la deformación es muy importante especialmente en suelos finos donde las partículas están ligadas con minerales de arcilla. Debido a las propiedades mineralógicas de las arcillas se presenta un fenómeno viscoso entre las partículas del suelo que implica un retardamiento en la deformación (Zeevaert, 1966).

En la Figura 11.6 se observa que al aplicar un incremento de carga a una muestra de suelo fino se presenta una deformación inmediata que va seguida por un fenómeno viscoso que implica la deformación con el tiempo al vencerse las fuerzas viscosas entre partículas del suelo. Si el incremento de carga se retira a un tiempo  $t$  después de aplicado, se tiene que parte de la deformación elástica total se recupera instantáneamente y la otra se difiere con el tiempo.

En la Figura 11.7 se presenta la respuesta esfuerzo-deformación de dos muestras de un mismo suelo en prueba triaxial, inicialmente se consolidan bajo una misma condición de esfuerzos y luego se llevan a la falla sin permitir drenaje, aplicando en cada prueba el esfuerzo desviador con distinta velocidad. Se observa que la resistencia a la compresión crece con la velocidad de aplicación de la carga.

En la literatura técnica se encuentran informes de programas de Pruebas realizados con el objeto de estudiar la resistencia de los suelos finos

ante cargas muy rápidas donde la muestra se carga axial y monotónicamente hasta la falla en tiempo que varía entre 1 y 0.1 segundos (Whitman, 1957). Los resultados indican que la resistencia de las arcillas ante esas condiciones de carga es de 1.4 a 2.0 veces el valor de la resistencia ante carga estática y que la resistencia crece con la velocidad de aplicación de la carga.

Ishihara y Yasuda (1980) consideran la carga cíclica como una repetición de cargas rápidas; en su concepto, el aumento en la resistencia a la compresión de las arcillas debido a la velocidad de aplicación de la carga se contrarresta con la disminución de la misma debida a la condición de la carga cíclica que implica inversión del esfuerzo cortante en cada ciclo.

## II.2. EFECTO DE LA CARGA CICLICA EN EL COMPORTAMIENTO DE LA ARCILLA

Si se consideran dos muestras de un mismo suelo sometidas a una misma condición de esfuerzos en cámara triaxial y se les aplica con igual frecuencia y forma de la onda de carga un esfuerzo desviador cíclico de amplitud doble,  $\pm \sigma_{dc}$ , pero de distinta magnitud, los lazos idealizados de histéresis esfuerzo-deformación correspondientes al primer ciclo de cada prueba son similares a los presentados en la Figura II.8. Se observa que:

- La amplitud de la deformación crece con la magnitud del esfuerzo desviador cíclico aplicado.
- El valor del módulo dinámico secante  $E_{sd}$  es menor en la muestra donde se produce mayor deformación.
- Se disipa mayor cantidad de energía por unidad de volumen en la muestra donde se produce la mayor deformación.

Estas diferencias en el comportamiento durante el primer ciclo permiten esperar que la relación esfuerzo-deformación de las dos muestras difiera notablemente en los ciclos de carga sucesivos.

Seed y Chan (1966) reportan los resultados de tres pruebas triaxiales

cíclicas con el esfuerzo controlado en muestras de arcilla limosa de San Francisco (Contenido natural de agua = 95%, límite líquido 88%, índice de plasticidad 45%, resistencia a la compresión simple 0.4 Kg/cm<sup>2</sup> sensibilidad 8), en la primera etapa de prueba las muestras se consolidan isotrópicamente al mismo esfuerzo y en la segunda se les aplica carga axial cíclica en condición no drenada hasta producirse la falla. La frecuencia y la forma de la onda de carga es igual en las tres pruebas, el esfuerzo desviador cíclico es de amplitud simple y su magnitud varía en cada prueba como se indica en la Figura 11.9. Con fines comparativos el esfuerzo desviador cíclico se expresa como un porcentaje de la resistencia a la compresión del suelo ensayado, obtenida en una prueba triaxial convencional consolidada-no drenada. En la Figura se observa:

- El número de ciclos necesarios para causar la falla decrece al crecer la magnitud del esfuerzo desviador cíclico.
- El primer ciclo de esfuerzo desviador de magnitud igual al 60% de la resistencia a la compresión obtenida en prueba estática causa una deformación axial de 1%. Se requieren 840 ciclos adicionales para que la deformación varíe entre 1 y 4%. La falla se presenta a los 900 ciclos de carga.
- El primer ciclo de esfuerzo desviador igual al 100% de la resistencia a la compresión obtenida en prueba estática causa una deformación axial de 2%. Durante los nueve ciclos siguientes la deformación varía entre 2 y 4%. La falla ocurre a los 15 ciclos de carga.

Seed y Chan (1966) realizaron cuatro series de pruebas similares a la anterior, en la misma arcilla, pero aplicando la carga cíclica a partir de distintas condiciones de esfuerzo inicial. En cada serie se ensayan tres muestras, las que en la primera etapa de prueba se consolidan isotrópicamente a un mismo esfuerzo, luego a cada muestra se aplica en condición no drenada un mismo esfuerzo desviador axial llamado esfuerzo sostenido y en esa condición, que corresponde a la indicada con el punto ① en la Figura 11.10.a, permanecen por 30 minutos ó hasta estabilizarse las deformaciones. A continuación se aplica carga cíclica en condición no drenada hasta producirse la falla. La frecuencia

y la forma de la onda de carga es igual para todas las series de pruebas, el esfuerzo desviador cíclico es de amplitud simple y su magnitud varía en cada prueba. Con fines comparativos el esfuerzo desviador cíclico y el esfuerzo sostenido se expresan como un porcentaje de la resistencia a la compresión del suelo ensayado, obtenida en prueba estática. Con los resultados obtenidos se conformó la gráfica de la Figura II.10.b. donde se indican combinaciones de esfuerzo sostenido y desviador cíclico que causan falla a distinto número de ciclos de carga. Se observa que el número de ciclos de un determinado esfuerzo desviador necesarios para causar la falla, disminuye al crecer la magnitud del esfuerzo sostenido sobre el cual se aplica.

Seedy y Chan (1966) encontraron a partir de series de pruebas triaxiales cíclicas con esfuerzo controlado, que la aplicación de un esfuerzo desviador cíclico de amplitud doble es una condición de carga más severa ya que reduce notablemente el número de ciclos necesarios para causar la falla. En la Figura II.11. se presentan los resultados obtenidos en la arcilla limosa de San Francisco para el caso en que el esfuerzo sostenido es cero. Como ejemplo, un esfuerzo desviador cíclico de magnitud igual al 60% de la resistencia a la compresión obtenida en prueba estática debe repetirse 900 veces para causar la falla si es de amplitud simple, en tanto que si es de amplitud doble causa la falla a los 100 ciclos.

Thiers (1965) encontró a partir de series de pruebas triaxiales cíclicas y de corte simple cíclico con esfuerzo controlado, que la resistencia de la arcilla limosa de San Francisco crece con la frecuencia de aplicación de la carga cíclica. En la Figura II.12 se presentan resultados de pruebas triaxiales cíclicas para el caso en que el esfuerzo sostenido es cero. El esfuerzo desviador cíclico es de amplitud doble y se aplica con frecuencias de 1 Hz y 2 Hz. Se observa que al variar la frecuencia de aplicación de la carga cíclica de 2 Hz a 1 Hz se reduce entre 20 y 25% la magnitud del esfuerzo desviador cíclico que causa falla en un determinado número de ciclos.

### II.3 CONDICIONES DE ESFUERZO SIMULADAS EN UNA PRUEBA TRIAXIAL CICLICA

En una prueba triaxial cíclica una muestra de suelo se consolida para simular el estado inicial de esfuerzos de campo, luego se somete a una serie de esfuerzos cortantes cíclicos en condición no drenada, generados por la aplicación de una carga axial cíclica. Esta prueba se basa en el concepto de que la mayor parte de las deformaciones producidas en un elemento de suelo en el sitio durante un sismo se atribuye a la propagación de las ondas de cortante.

Como se observó en la Figura I.1.b, el estado idealizado de esfuerzos en un elemento de suelo perteneciente a un depósito con superficie horizontal, durante una acción sísmica, implica que en cada ciclo de carga los esfuerzos cortantes generados en los planos vertical y horizontal inviertan su dirección y que los esfuerzos normales a dichos planos permanezcan constantes. En una prueba triaxial cíclica sólo puede reproducirse el estado idealizado de esfuerzos correspondiente al plano horizontal de dicho elemento de suelo. Este estado de esfuerzos se reproduce durante la aplicación de la carga cíclica, en el plano de la muestra inclinado  $45^\circ$  con respecto a su base, siempre y cuando la muestra esté saturada, consolidada isotrópicamente y la prueba se realice con el procedimiento (Seed y Lee, 1966) que se explica a continuación con ayuda de la Figura II.13.

En la primera columna se indica la condición de esfuerzos deseada en las tres etapas sucesivas de un ciclo de carga, en la segunda los diagramas de Mohr correspondientes, en la tercera columna se presenta una condición de esfuerzos equivalente a la deseada y en la cuarta se indica la condición de esfuerzo aplicada comúnmente en el laboratorio.

La condición (a) representa la aplicación de un esfuerzo confinante  $\sigma_3$ , al cual se consolida. El esfuerzo normal al plano XX (inclinado  $45^\circ$  con respecto a la base de la muestra) es igual al esfuerzo confinante. La condición (b) representa un incremento del esfuerzo axial en  $\sigma_{dc}/2$  y una disminución del esfuerzo radial en la misma cantidad. En el círculo de Mohr correspondiente se observa que el esfuerzo normal al plano

XX no varía y que se generan esfuerzos cortantes iguales a  $\sigma_{dc}/2$ . Finalmente, la condición (c) representa una reducción del esfuerzo axial y un incremento del radial en  $\sigma_{dc}/2$ . Se observa que el esfuerzo normal al plano XX no varía y que los esfuerzos cortantes han cambiado de dirección al invertirse los esfuerzos principales.

La aplicación simultánea de carga axial y radial se dificulta en la práctica de laboratorio. Dado que la muestra está saturada la condición (b) equivale a sumar las dos condiciones de esfuerzo indicadas en la columna 3, esto es incrementar el esfuerzo axial en  $\sigma_{dc}$  manteniendo constante el esfuerzo radial, y luego reducir simultáneamente los esfuerzos axial y radial en  $\sigma_{dc}/2$ . La reducción isotrópica del esfuerzo sólo disminuye la presión de poro en la cantidad  $\sigma_{dc}/2$  sin alterar los esfuerzos efectivos de la muestra.

Similarmente, la condición (c) puede obtenerse reduciendo el esfuerzo axial en  $\sigma_{dc}$  manteniendo constante el esfuerzo radial, y luego incrementando simultáneamente los esfuerzos axial y radial en  $\sigma_{dc}/2$ . El incremento isotrópico del esfuerzo aumenta la presión de poro en  $\sigma_{dc}/2$ , pero no altera los esfuerzos efectivos de la muestra. Se observa que para que el esfuerzo axial sea siempre de compresión, el esfuerzo desviador cíclico  $\sigma_{dc}$  debe ser de menor magnitud que el esfuerzo confinante.

Por lo anterior, las condiciones de esfuerzo (b) y (c) de la columna 1 de la Figura II.14 pueden obtenerse aplicando a una muestra saturada, consolidada isotrópicamente, las condiciones de carga indicadas en la columna 4, corrigiendo en cada caso el valor de la presión de poro. No corregir el valor de la presión de poro equivale a tener en cada ciclo de carga los estados de esfuerzo representados por los círculos de Mohr de la Figura II.15, donde se observa que el esfuerzo normal al plano de la muestra inclinado  $45^\circ$  con respecto a su base, varía de magnitud durante la acción de la carga cíclica, no siendo ésta una condición deseada.

En la Figura II.15.b se observa la variación de la magnitud y dirección

del esfuerzo cortante en el plano de la muestra inclinado  $45^\circ$  con respecto a su base, durante cada ciclo de carga. Los esfuerzos principales actuantes sobre la muestra se invierten en cada ciclo, por lo que en la literatura técnica se acostumbra nombrar las etapas de un ciclo como: de compresión y de extensión (Silver, 1977).

En varias ocasiones a fín de reproducir en el laboratorio el estado de esfuerzos de campo es necesario consolidar la muestra anisotrópicamente. En la Figura II.15 se presentan los círculos de Mohr correspondientes a los distintos estados de esfuerzo durante la aplicación de un ciclo de carga a una muestra consolidada anisotrópicamente. Se observa que:

- En ningún plano de la muestra se obtienen las condiciones de esfuerzo indicadas en la columna 1 de la Figura II.13.
- Antes de aplicar la carga cíclica existe en cada plano de la muestra, inclinado  $\alpha^\circ$  con respecto a su base, un esfuerzo cortante  $\tau_s$  debido al esfuerzo desviador estático. A este esfuerzo se superpone el esfuerzo cortante cíclico,  $\tau_c$ , generado por la aplicación del esfuerzo desviador cíclico  $\sigma_{dc}$ .
- Los esfuerzos principales actuantes sobre la muestra se invierten durante la etapa de extensión de cada ciclo sólo si la magnitud del esfuerzo desviador cíclico,  $\sigma_{dc}$ , es mayor que la del esfuerzo desviador estático  $\sigma_{ds}$ .

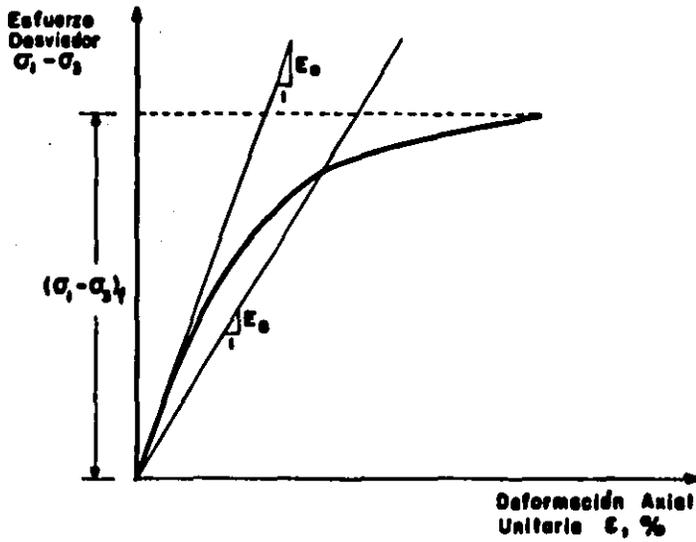


FIG. II. 1. Respuesta esfuerzo-deformación de una muestra de arcilla, obtenida en prueba triaxial CU, esfuerzo controlado.

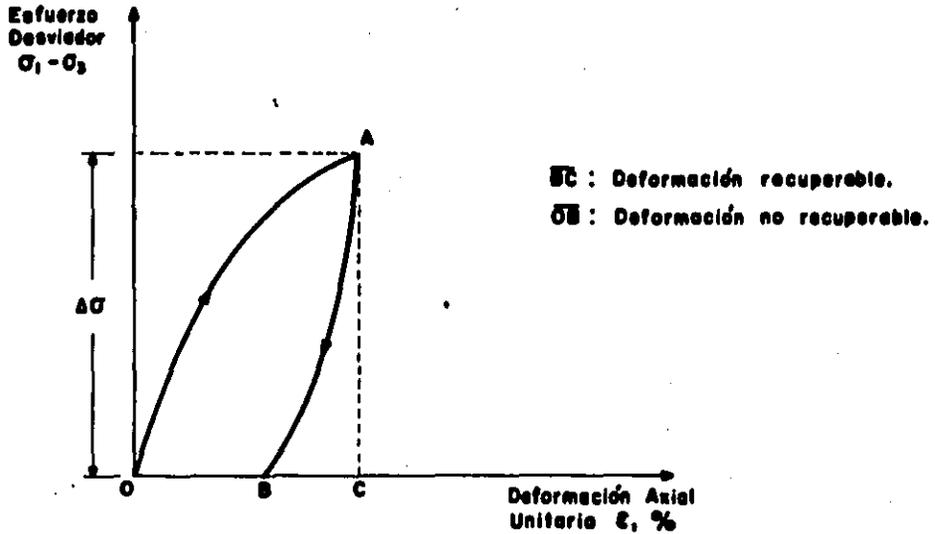


FIG. II. 2. Gráfica esfuerzo-deformación correspondiente a un ciclo de carga.- prueba triaxial.



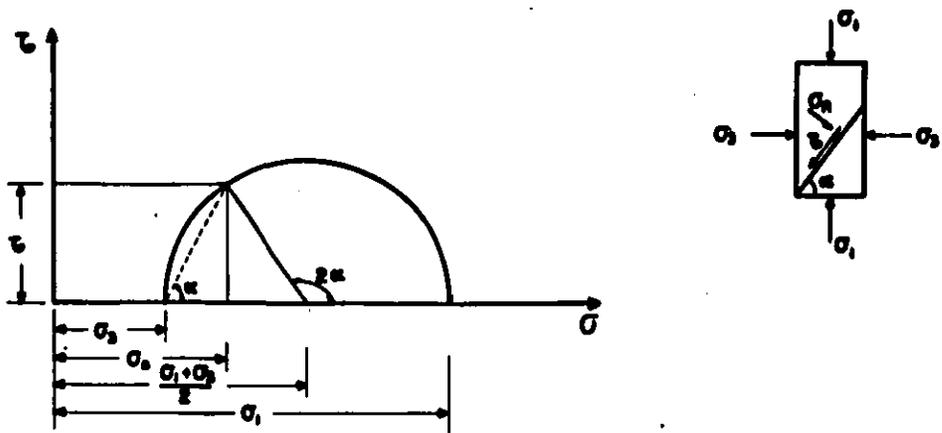


FIG. II. 4. Semicírculo de Mohr de esfuerzos.

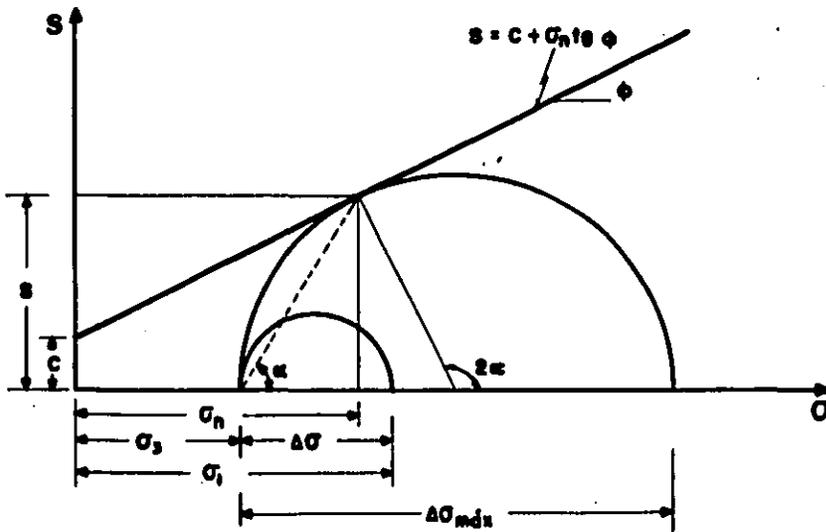
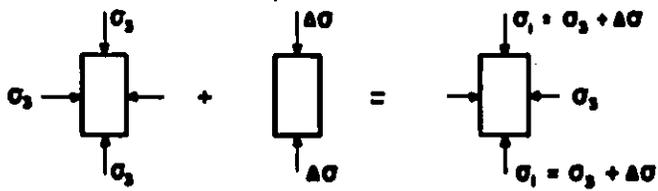


FIG. II. 5. Línea de resistencia al esfuerzo cortante.

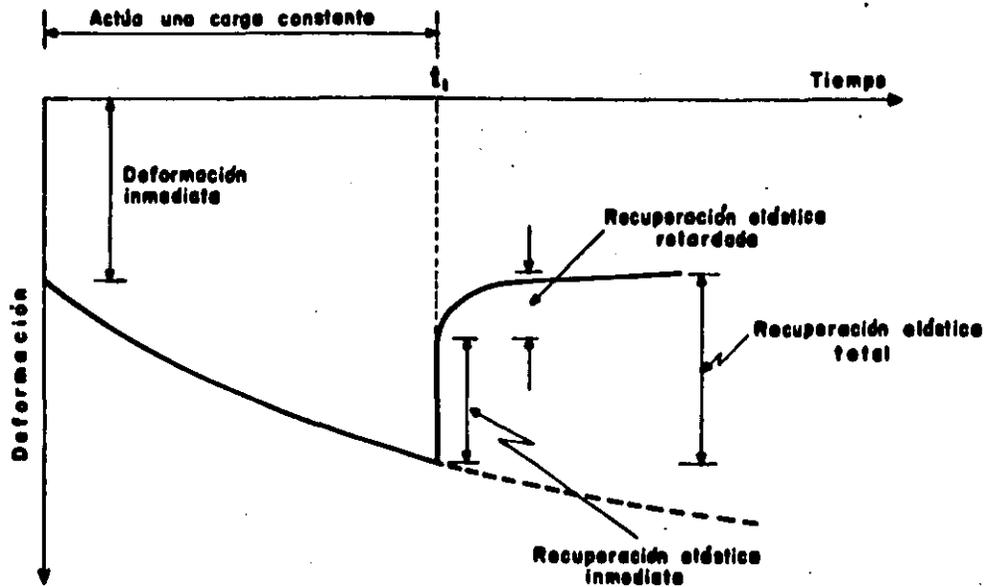


FIG. II. 6. Efecto del tiempo en la deformación ( Zeevaert, 1966)

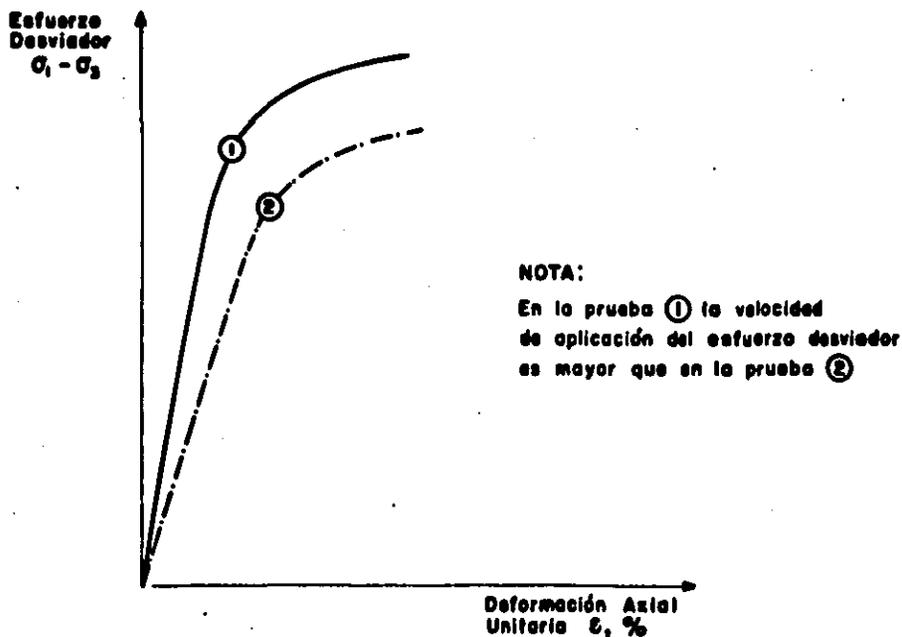
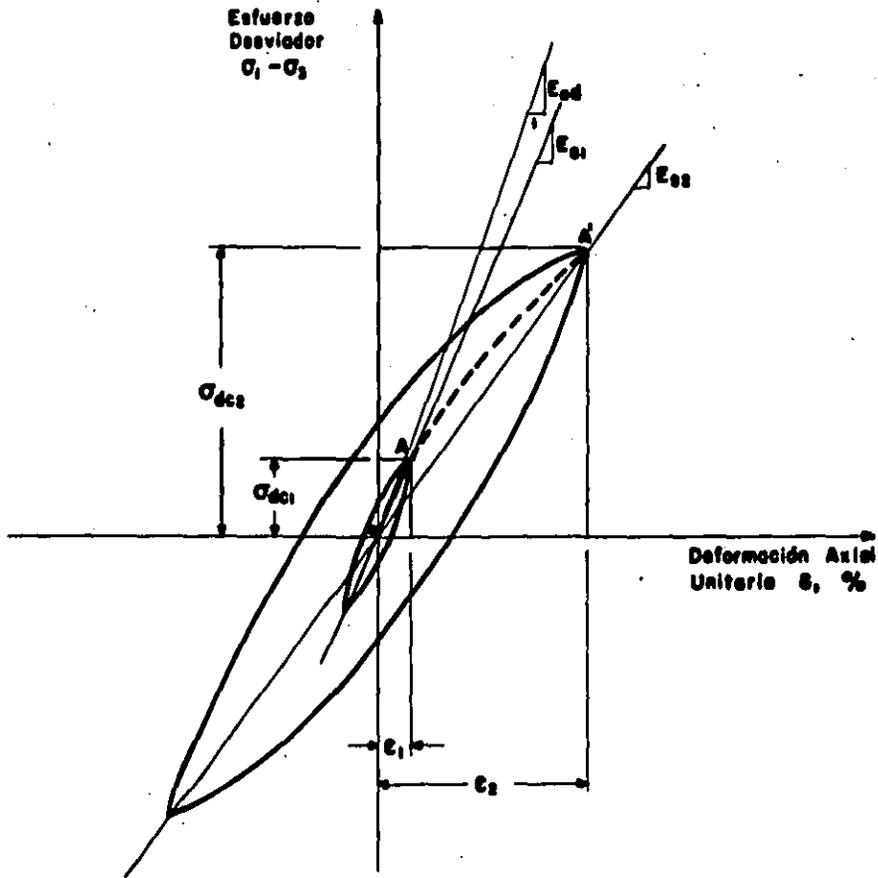
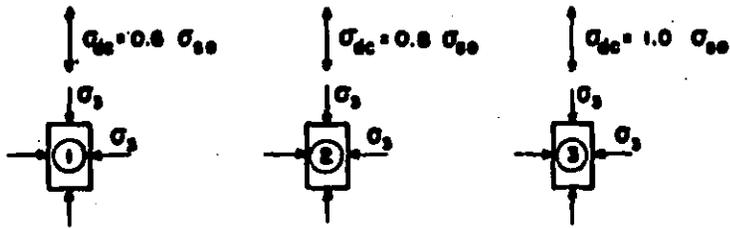


FIG. II. 7. Efecto de la velocidad de aplicación de la carga en el comportamiento del suelo - Pruebas triaxiales convencionales con esfuerzo controlado



	PRUEBA 1	PRUEBA 2	
Esfuerzo desviador cíclico.	$\sigma_{dcs1}$	$\sigma_{dcs2}$	$\sigma_{dcs1} < \sigma_{dcs2}$
Deformación axial unitaria.	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_1 < \epsilon_2$
Módulo dinámico inicial.	$E_{od1}$	$E_{od2}$	
Módulo dinámico secante.	$E_{ods1}$	$E_{ods2}$	$E_{ods1} > E_{ods2}$
Amortiguamiento.	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_1 < \beta_2$

FIG. II. 8. Lazos idealizados de histéresis esfuerzo-deformación, obtenidos en el primer ciclo de carga de dos distintas pruebas triaxiales cíclicas.



DONDE:

$\sigma_3$  : Esfuerzo de confinamiento

$\sigma_{dc}$  : Esfuerzo desviador cíclico

$\sigma_{90}$  : Resistencia obtenida en prueba triaxial estática - CU.

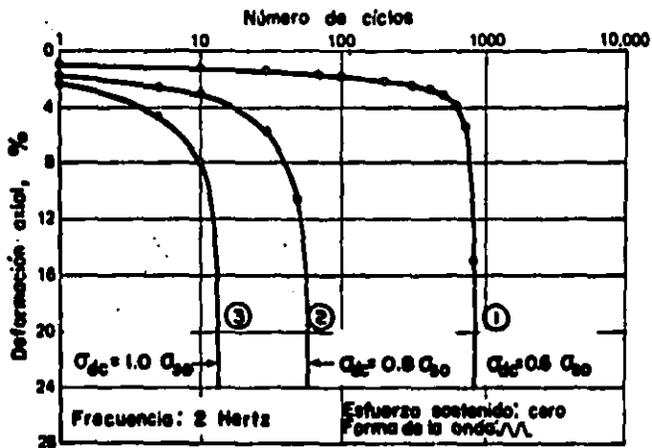
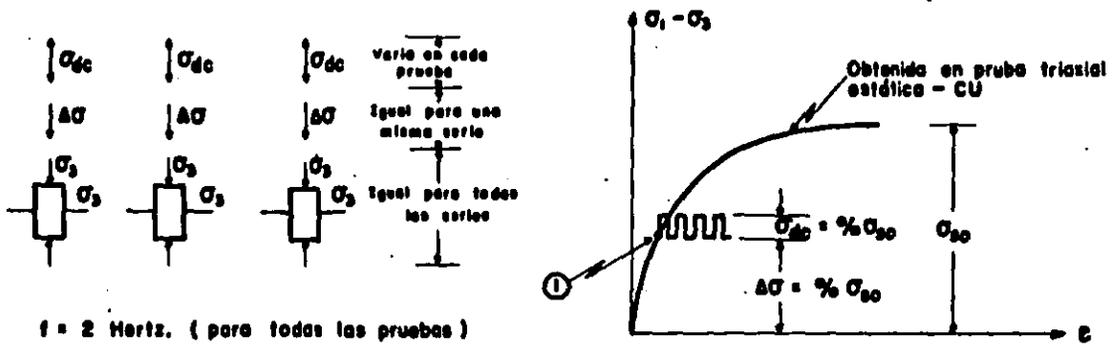
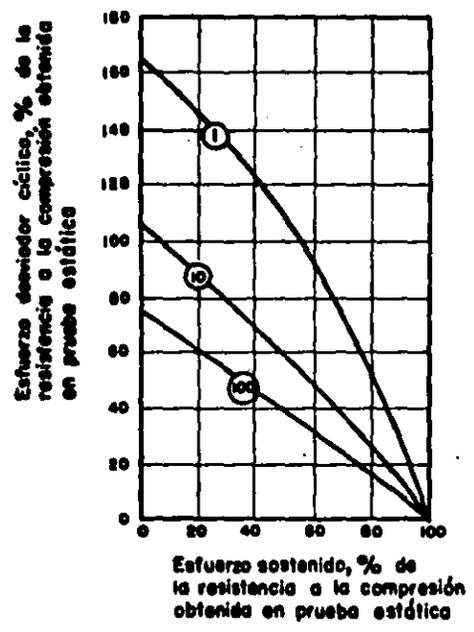


FIG. II. 9. - Efecto de la magnitud del esfuerzo desviador cíclico en la relación esfuerzo-deformación de muestras de arcilla limo- de San Francisco. (Seed, Chan, 1966)



DONDE:  
 $\sigma_{30}$ : Resistencia a la compresión obtenida en prueba estática - CU  
 $\Delta\sigma$ : Esfuerzo sostenido  
 $\sigma_{dc}$ : Esfuerzo desviador cíclico. (amplitud simple)

(a) Programa de pruebas.



(n) número de ciclos.

(b) Resumen de resultados

FIG. II. 10. Combinaciones de esfuerzo sostenido y desviador cíclico que causan falla a distinto número de ciclos - arcilla limosa de San Francisco. (Seed, Chan, 1966)

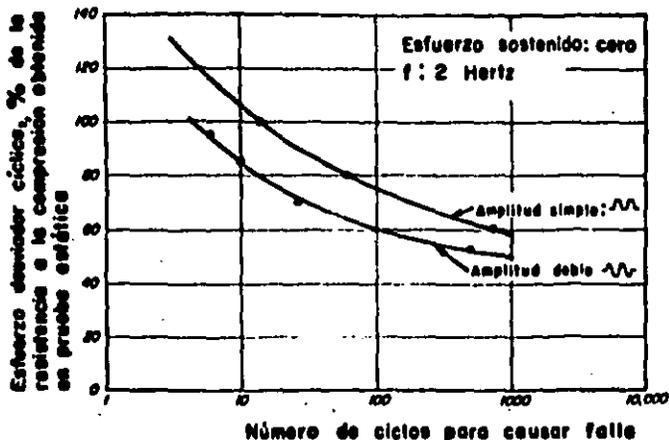


FIG. II. 11. Efecto de la amplitud del esfuerzo desviador cíclico en la resistencia de muestras de arcilla limosa de San Francisco. (Seed, Chan, 1966)

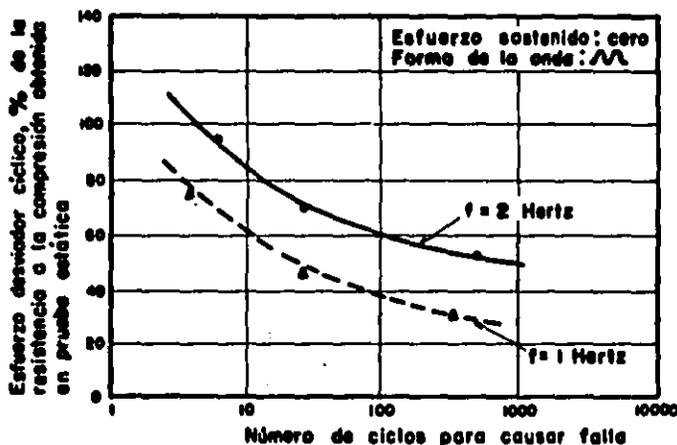
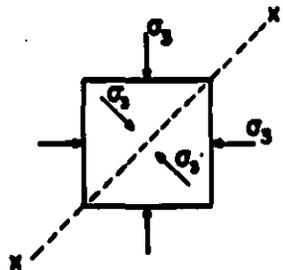
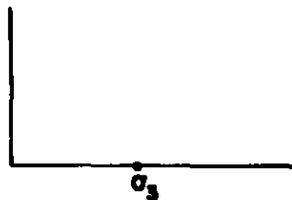


FIG. II. 12. Efecto de la frecuencia de aplicación de la carga cíclica en la resistencia de muestras de arcilla limosa de San Francisco (Thiers, 1965)

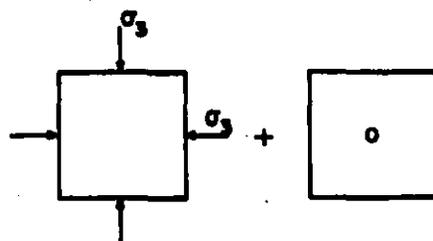
① Condición de esfuerzos deseada



② Diagrama de Mohr.



③ Condición equivalente de esfuerzos



④ Condición de esfuerzos aplicados

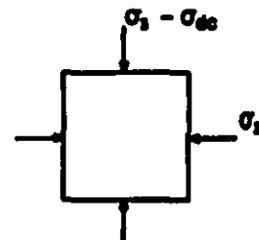
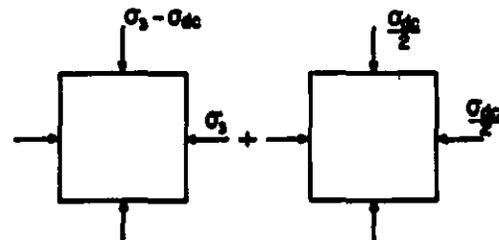
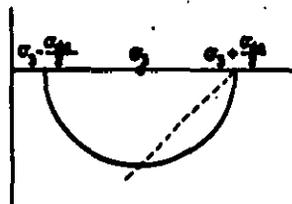
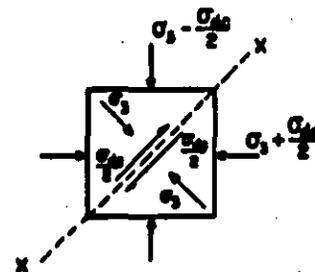
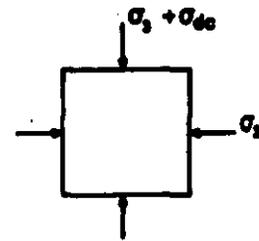
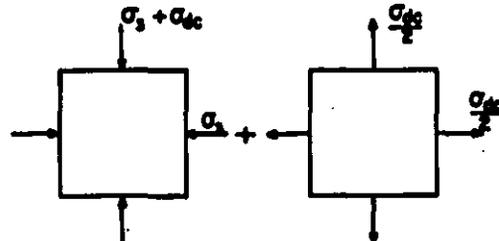
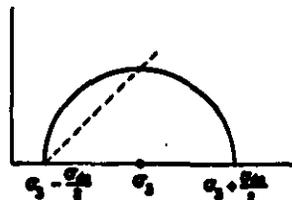
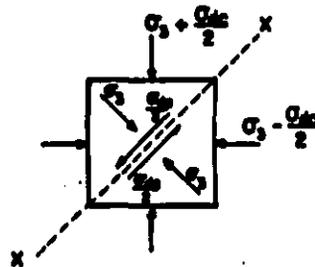
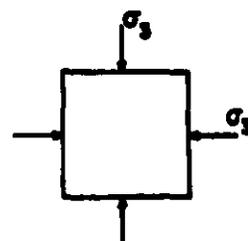
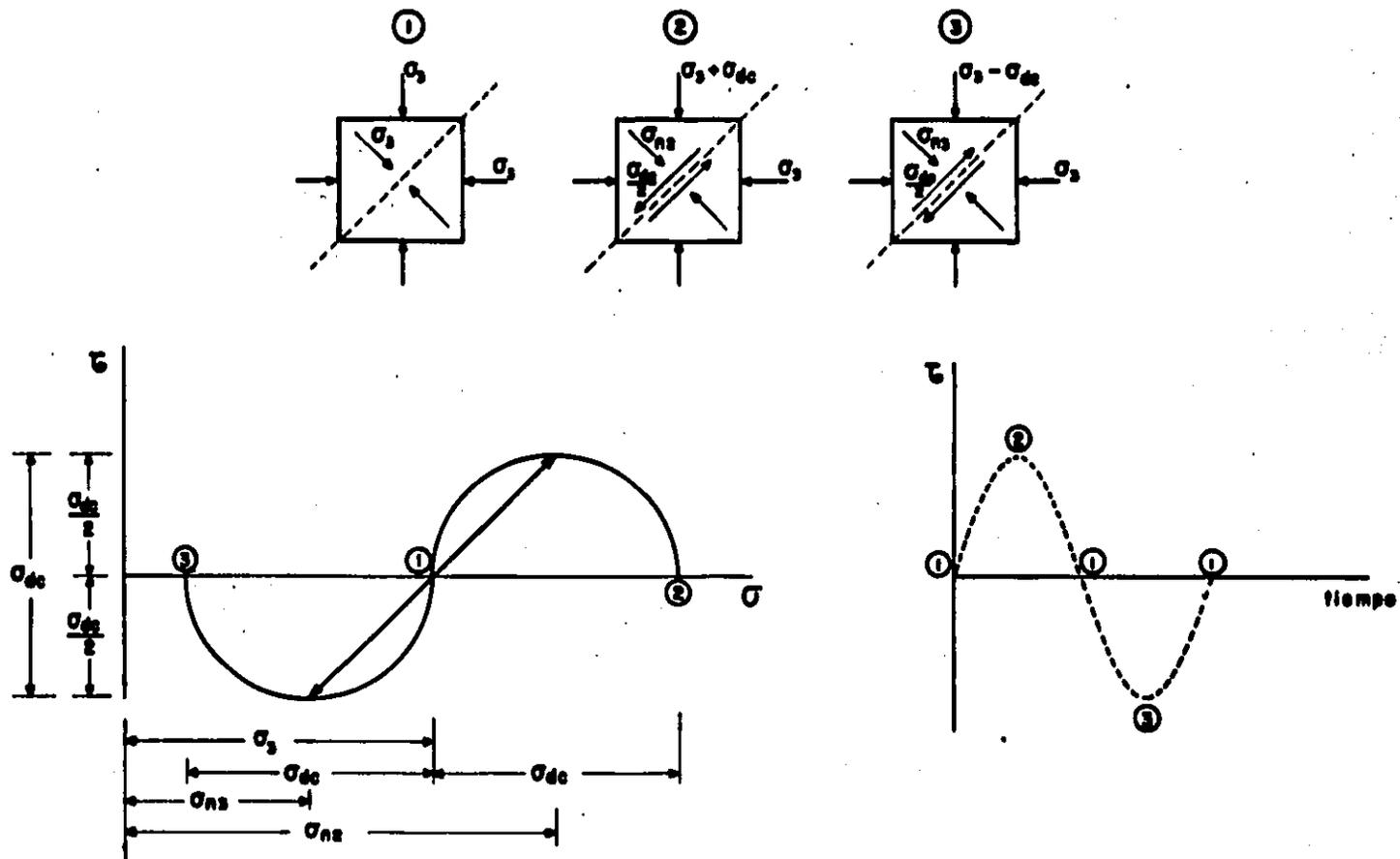
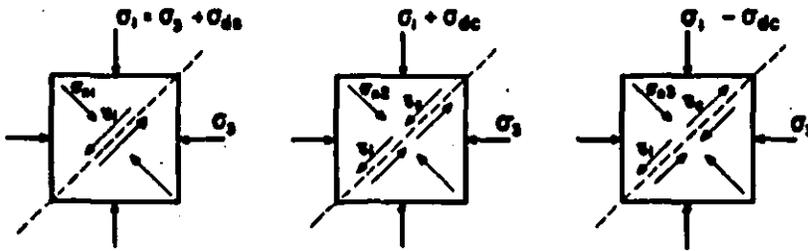


FIG. II. 14.

Condiciones de esfuerzo en una prueba triaxial cíclica. Muestra saturada - consolidación isotrópica. (Seed, Lee, 1966)



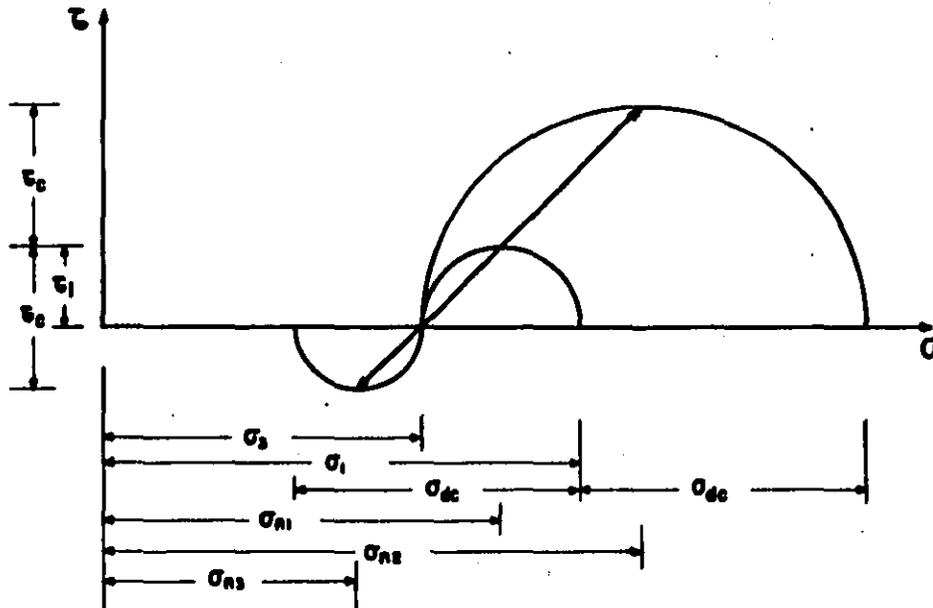
4  
 FIG. II. 15. Círculos de Mohr de esfuerzos.—prueba triaxial cíclica.  
 muestra saturada.—consolidación isotrópica



DONDE:

- $\tau_1$  : Esfuerzo cortante inicial
- $\tau_c$  : Esfuerzo cortante cíclico
- $\sigma_{dc}$  : Esfuerzo desviador estático
- $\sigma_{dc}$  : Esfuerzo desviador cíclico

si  $\sigma_{dc} > \sigma_{dc}$   
 $\Rightarrow$  Inversión de esfuerzos principales



5  
 FIG. II. 16 Círculos de Mohr de esfuerzos.- prueba triaxial cíclica muestra saturada.- consolidación anisotrópica

### **III. INVESTIGACION DE LABORATORIO**

En este capítulo se describe el suelo ensayado, el programa de pruebas y el equipo de carga cíclica utilizado; se explica el procedimiento seguido en una prueba tipo y finalmente se presentan los resultados obtenidos. Todas las pruebas se realizaron en el laboratorio de Dinámica de Suelos de la DEPMI-UNAM.

#### **III.1 PROGRAMACION DE LAS PRUEBAS**

##### **III.1.a CARACTERISTICAS DEL MATERIAL ENSAYADO**

El suelo ensayado es una arcilla volcánica de la Ciudad de México, de origen lacustre, caracterizada por su alto contenido natural de agua, alta compresibilidad y alta sensibilidad. En términos generales esta arcilla contiene minerales de Montmorillonita, cenizas, polvos volcánicos y coloides orgánicos.

Profundidad de las muestras	m.	10.90 a 12.90
Esfuerzo efectivo vertical	Kg/cm <sup>2</sup>	0.69 a 0.73
Contenido natural de agua	%	393
Peso volumétrico	ton/m <sup>3</sup>	1.11
Relación de vacíos		8.95
Gravedad específica		2.24
Grado de saturación inicial	%	98
Resistencia a la compresión simple (con penetrómetro de bolsillo)	Kg/cm <sup>2</sup>	<del>0.35</del> 0.70
Límite líquido	%	482
Límite plástico	%	77
Índice de plasticidad	%	405

Tabla III.1. Propiedades índice promedio del suelo ensayado

Las muestras proceden de la zona céntrica de la ciudad. El muestreo se realizó con tubo Shelby de 4" de Diámetro. Se ensayaron muestras provenientes de profundidades entre 10.90 y 12.90 m, y esfuerzo vertical efectivo entre 0.69 y 0.73 Kg/cm<sup>2</sup>. A cada muestra de prueba se determinó sus propiedades índice: contenido natural de agua, peso volumétrico, gravedad específica y límites de consistencia. No se observaron diferencias significativas entre los distintos valores obtenidos para cada propiedad, por lo que en la Tabla III.1 se indican los valores promedio. El valor de la resistencia a la compresión simple se estimó con penetrómetro de bolsillo, no se realizaron pruebas de compresión simple.

El suelo ensayado se identifica como una arcilla limosa, de color verde olivo a café oscuro, con manchas negras, de consistencia suave, con presencia de materia orgánica y vidrio volcánico. Se clasifica como una arcilla de alta plasticidad (CH), de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

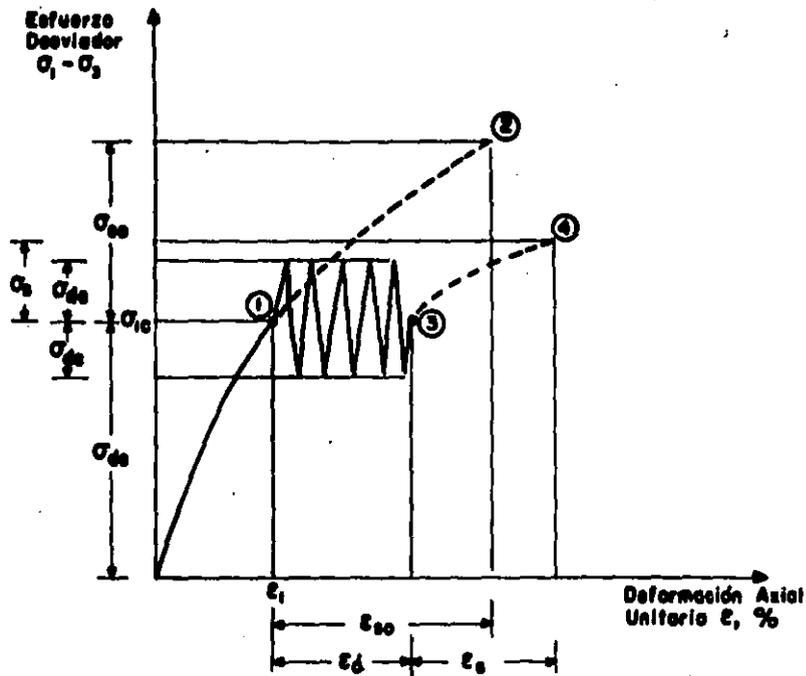
### III.1.b. DESCRIPCION DEL PROGRAMA DE PRUEBAS

El programa consta de una prueba triaxial estática y cinco triaxiales cíclicas, todas del tipo consolidada anisotrópicamente-no drenada, con esfuerzo controlado. La condición de esfuerzos en la muestra al final de la primera etapa es igual en todas las pruebas.

La prueba triaxial estática permite conocer la respuesta esfuerzo-deformación y la resistencia a la compresión del suelo al cargarlo axialmente y monotónicamente a partir de la misma condición de esfuerzos en que en las otras pruebas se aplica la carga cíclica. El programa de pruebas se explica con ayuda de la Figura III.1.

#### Prueba 1. Triaxial estática

- Primera etapa: Consolidación anisotrópica. Los correspondientes



- $\sigma_{4s}$ : Esfuerzo desviador estático
- $\sigma_{4s}$ : Esfuerzo desviador cíclico.
- $\sigma_{4s}$ : Esfuerzo desviador de falla, obtenida a partir de la condición ①.
- $\sigma_3$ : Esfuerzo desviador de falla, obtenida a partir de la condición ③.
- $\epsilon_{4s}$ : Deformación axial debida a  $\sigma_{4s}$
- $\epsilon_3$ : Deformación axial debida a  $\sigma_3$
- $\epsilon_d$ : Deformación axial no recuperable debido a carga cíclica.

FIG. III. 1. Gráfica esfuerzo-deformación, utilizada para definir el programa de pruebas.

esfuerzos efectivos de consolidación,  $\bar{\sigma}_{3c}$  y  $\bar{\sigma}_{1c}$ , se indican en la Tabla III.2 y se calcularon conforma a lo indicado en la Figura I.3.b. Al final de esta etapa la muestra se encuentra en la condición señalada por el punto ① en la gráfica esfuerzo-deformación de la Figura III.1

- Segunda etapa: En condición no drenada se aplican incrementos de carga axial, monotónicamente hasta presentarse la falla de la muestra. En esta etapa se obtiene el tramo de la gráfica esfuerzo-deformación indicado por la línea de trazos entre los puntos ① y ② de la Figura III.1. La resistencia a la compresión  $\sigma_{50}$  obtenida en esta prueba se utilizó para programar la magnitud del esfuerzo desviador cíclico aplicado en las pruebas 2 a 6. El valor obtenido es  $\sigma_{50} = 0.71 \text{ Kg/cm}^2$ , otros resultados de la prueba y la gráfica esfuerzo-deformación correspondiente se presentan en el inciso III.4.

#### Pruebas 2 a 6. Triaxiales cíclicas

El programa de las pruebas triaxiales cíclicas tiene como variable la magnitud del esfuerzo axial cíclico, el cual se aplica a partir de una misma condición de esfuerzos. La magnitud del esfuerzo desviador cíclico corresponde a un porcentaje de la resistencia a la compresión obtenida en la prueba estática, en la Tabla III.2 se observa que el programa de pruebas incluye magnitudes entre 17 y 115% de la resistencia a la compresión. En la última columna de la misma Tabla se indica la relación entre el esfuerzo desviador cíclico y el esfuerzo axial efectivo sobre el cual se aplica, se observa que siempre es menor de 1.0 por lo que en ningún caso la muestra se somete a tensión. La carga cíclica se aplica con onda de forma senoidal y frecuencia de 0.5 Hertz. En cada prueba el número máximo de ciclos de carga es 100.

- Primera etapa: Consolidación anisotrópica. Los esfuerzos de consolidación correspondientes a cada prueba se indican en la Tabla IV.2. Al final de esta etapa de prueba las muestras se encuentran en la condición indicada por el punto ① en la gráfica esfuerzo-deformación de la Figura III.1.

**CARACTERISTICAS DE LA CARGA CICLICA**

Forma de la onda de carga: Senoidal

Frecuencia de aplicación: 0.5 Hertz

Número Máximo de ciclos: 100

Tiempo Máximo de aplicación: 200 segundos

Prueba	$\bar{\sigma}_v$ Kg/cm <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_{3c}$ Kg/cm <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_{1c}$ Kg/cm <sup>2</sup>	$K_c$	$\sigma_{dc}$ Kg/cm <sup>2</sup>	$\sigma_{dc}/\sigma_{so}$	$\sigma_{dc}/\bar{\sigma}_{1c}$
1	0.720	0.620	0.870	0.71			
2	0.710	0.610	0.860	0.71	0.12	0.17	0.14
3	0.715	0.615	0.865	0.71	0.25	0.35	0.28
4	0.700	0.600	0.850	0.70	0.50	0.70	0.59
5	0.725	0.625	0.875	0.71	0.64	0.90	0.73
6	0.730	0.630	0.880	0.71	0.82	1.15	0.93

- Donde:
- $\bar{\sigma}_v$  = Esfuerzo efectivo vertical (de campo)
  - $\bar{\sigma}_{3c}$  = Esfuerzo confinante efectivo de consolidación
  - $\bar{\sigma}_{1c}$  = Esfuerzo axial efectivo de consolidación
  - $\sigma_{dc}$  = Esfuerzo desviador cíclico
  - $\sigma_{so}$  = Resistencia a la compresión obtenida en prueba estática (0.71 Kg/cm<sup>2</sup>)

Tabla III.2. Programa de pruebas-resumen de datos

- Segunda etapa: En condición no drenada se aplica el correspondiente esfuerzo desviador cíclico, que en todas las pruebas es de amplitud doble. Si la muestra no falla durante la aplicación de la carga cíclica se pasa inmediatamente a la siguiente etapa de la prueba. Una vez se aplica el último ciclo de carga, la muestra se encuentra en la condición indicada por el punto ③ de la Figura III.1.
- Tercera etapa: En condición no drenada se aplican incrementos de carga axial, monotónicamente hasta presentarse la falla de la muestra. En esta etapa de la prueba se obtiene el tramo de la gráfica esfuerzo-deformación indicado con la línea de trazos entre los puntos ③ y ④ de la Figura III.1.

### III.2. DESCRIPCION DEL EQUIPO DE CARGA CICLICA.

Las partes principales del equipo son la cámara triaxial, el sistema de carga y el sistema de registro. En la Figura III.2 se indican los distintos componentes del equipo y en la Figura III.3 se presenta una fotografía de una parte del mismo.

La cámara triaxial es de lucita con bases metálicas, capaz de resistir presiones hasta de  $21 \text{ Kg/cm}^2$ . En la Figura III.2 se encuentra instalada en el marco de carga, pero usualmente se retira de éste durante el montaje, saturación y consolidación de la probeta. El diámetro de las probetas es de 71 mm y la relación altura/diámetro es de 2.4 en promedio.

Sistema de carga: La carga axial se transmite desde el exterior por medio del vástago de carga. La carga cíclica se aplica mediante un actuador neumático instalado en la parte superior del marco de carga. Se dispone de una consola que incluye un generador de funciones, un regulador de presión de aire y un contador de ciclos. La variación cíclica de la presión se obtiene con el generador de funciones el cual proporciona la magnitud, la frecuencia y la forma de la onda de carga.

El equipo permite aplicar la carga con frecuencias entre 0.1 y 5 Hertz y con forma de onda senoidal, cuadrada o de diente de sierra. El aire a presión es suministrado con un compresor con capacidad de 12 Kg/cm<sup>2</sup>.

Sistema de registro: Se dispone de una celda de carga con capacidad de 450 Kg, de un transductor de presión con capacidad de 21 Kg/cm<sup>2</sup> para registrar la variación de la presión de poro; y de un transductor de desplazamiento (DCDT) de 5 cm. de carrera, para registrar el desplazamiento axial de la probeta. Cada transductor está conectado a un puente de Wheatstone de lectura digital. Adicionalmente se cuenta con un graficador de cuatro canales, de puntas calientes, con el cual se tiene un registro continuo de la carga axial, de la presión de poro y del desplazamiento axial de la probeta. Un registrador tipo X-Y proporciona el lazo de histéresis carga-desplazamiento axial para cada ciclo de carga.

### III.3. PROCEDIMIENTO DE UNA PRUEBA TIPO

El procedimiento de una prueba tipo consta de los siguientes pasos:

- a. Labrado y montaje de la probeta
- b. Eliminación del efecto capilar
- c. Saturación
- d. Consolidación
- e. Aplicación de carga cíclica
- f. Aplicación de carga estática

En la prueba 1 no se aplica carga cíclica, por lo que se pasa directamente del numeral d. al f. En las pruebas restantes el paso f. sólo se realiza cuando la falla de la muestra no ocurre durante la aplicación de los 100 ciclos de esfuerzo desviador.

#### III.3.a. LABRADO Y MONTAJE DE LA PROBETA

Las pruebas se realizan en muestras inalteradas. Después del muestreo

los tubos Shelby se protegieron en sus extremos con parafina y se almacenaron en cuarto húmedo. La extracción de la muestra de tramos de tubo de 20 cm. de longitud se hizo luego de romper con hilo metálico la adherencia entre suelo y tubo. El montaje de la probeta se realiza en forma convencional, se utilizaron membranas de látex de 0.3 mm de espesor.

Los puntos ① y ② de la gráfica esfuerzo confinante-cambio volumétrico de la Figura III.4 corresponden a la condición de una muestra en el sitio y en el laboratorio, respectivamente. Se observa que la muestra en el sitio se considera sometida a un esfuerzo confinante efectivo equivalente,  $\bar{\sigma}_e$ , conforme a lo indicado en la Figura I.2.

### III.3.b. ELIMINACION DEL EFECTO CAPILAR

A partir de la condición inicial de esfuerzos efectivos de laboratorio indicada con el punto ② en la Figura III.4 se aplica en condición no drenada un incremento de esfuerzo confinante,  $\Delta\sigma_1$ , de magnitud menor que la del esfuerzo confinante efectivo equivalente de campo. Un incremento  $\Delta\sigma_1$  mayor que la presión capilar,  $u_{cap}$ , hace positivo el valor de la presión de poro y al permitir drenaje a la muestra se obtiene el cambio volumétrico  $\Delta V_1$ , convirtiéndose en efectivo el esfuerzo aplicado; esta condición corresponde a la indicada por el punto ③ en la Figura III.4.

### III.3.c. SATURACION

Se utilizó el método de Contrapresión que consiste en aplicar una presión en exceso a la hidrostática en el interior de la muestra. Para no alterar el estado de esfuerzos efectivos de la muestra se aplican casi simultáneamente incrementos iguales de presión confinante y de contrapresión. La función principal de la contrapresión es reducir el volumen

de las burbujas de aire y por tanto acelerar la transferencia del aire al agua (Silver, 1977). El proceso de saturación es el siguiente:

1. Sin permitir drenaje a la muestra se aplica un incremento de presión confinante  $\Delta\sigma_c$  del orden de 0.1 - 0.2 Kg/cm<sup>2</sup>.
2. Se espera el tiempo necesario (aprox. 5 min.) para que el valor de la presión de poro se estabilice.
3. Se calcula el parámetro B de Skempton, definido como

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta\sigma_c} \quad (3.1)$$

Donde  $\Delta u$  es el incremento de presión de poro correspondiente al incremento de presión confinante  $\Delta\sigma_c$ . El parámetro B indica el progreso de la saturación, si  $B > 0.95$  la muestra se considera saturada.

4. Si  $B < 0.95$  se introduce el incremento de contrapresión por la base de la probeta, en ese momento el incremento de presión de poro  $\Delta u$  iguala el valor del incremento de presión confinante  $\Delta\sigma_c$ , manteniéndose constante el esfuerzo efectivo. Se permite que el incremento de contrapresión se uniformice en toda la muestra, lo cual se obtiene cuando los registros de presión de poro correspondientes a la base y a la cabeza de la probeta son iguales al valor total de la contrapresión.
5. Se repiten los pasos 1 a 4 hasta que el parámetro B sea 0.95, mínimo.

Al final del proceso de saturación la muestra se encuentra en la condición indicada por el punto ④ en la Figura III.4. El esfuerzo confinante total actuante sobre la muestra es igual al inicial más la suma de los incrementos necesarios para lograr la saturación. La presión de poro es igual a la suma de los incrementos de contrapresión ya que al comienzo del proceso es cero. Las condiciones de la muestra indicadas por los puntos ③ y ④ en la Figura III.4 sólo difieren en los esfuerzos totales dado que los esfuerzos efectivos permanecen constantes.

### III.3.d. CONSOLIDACION

A partir de la condición obtenida al final de la saturación, se aplica a la muestra un incremento de esfuerzo confinante  $\Delta\sigma_{II}$  tal que:

$$\bar{\sigma}_e = \Delta\sigma_I + \Delta\sigma_{II} \quad (3.2)$$

Donde,

$\bar{\sigma}_e$ : Esfuerzo confinante efectivo equivalente de campo.

$\Delta\sigma_I$ : Esfuerzo confinante efectivo en la muestra hasta ese instante de la prueba.

Al aplicar el incremento  $\Delta\sigma_{II}$  se genera un incremento de presión de poro  $\Delta u$  en exceso al valor total de contrapresión. Dado que la presión que actúa en la bureta es igual a la contrapresión, al permitir drenaje a la muestra sólo se disipa el exceso  $\Delta u$  produciendo el cambio volumétrico  $\Delta V_{II}$ , con lo que la muestra se encuentra en la condición indicada por el punto ⑤ en la Figura III.4, es decir consolidada isotrópicamente al esfuerzo confinante efectivo equivalente de campo,  $\bar{\sigma}_e$ .

Como se indicó en el inciso III.1.b todas las probetas se consolidan anisotrópicamente bajo una relación de esfuerzos  $K_c = 0.71$  promedio:

$$K_c = \frac{\bar{\sigma}_{3c}}{\bar{\sigma}_{1c}} = \frac{\bar{\sigma}_e}{\bar{\sigma}_e + \bar{\sigma}_{ds}} \quad (3.3)$$

Donde,

$\bar{\sigma}_{1c}$ : Esfuerzo axial efectivo de consolidación

$\bar{\sigma}_{3c}$ : Esfuerzo confinante efectivo de consolidación

$\bar{\sigma}_e$ : Esfuerzo confinante efectivo equivalente de campo

$\bar{\sigma}_{ds}$ : Esfuerzo desviador estático

A cada muestra se aplica el respectivo esfuerzo desviador estático, se permite drenaje por el tiempo necesario para que ocurra el cambio

volumétrico debido al retardamiento hidrodinámico, lo cual se determina con base en las gráficas deformación-tiempo que se elaboran a medida que transcurre el fenómeno. Al considerarse terminada la etapa de consolidación primaria se cierra el drenaje de la muestra, se coloca el seguro al vástago de carga y se traslada la cámara al marco de carga.

### III.3.e APLICACION DE CARGA CICLICA

A cada muestra se aplica, en condición no drenada, la correspondiente carga cíclica, de acuerdo al programa de pruebas descrito en el inciso III.1.b. Durante su aplicación se obtiene un registro continuo de la carga aplicada, la presión de poro y el desplazamiento axial de las probetas como se indica en la Figura III.5.

### III.3.f APLICACION DE CARGA ESTATICA

Terminada la aplicación de carga cíclica se retira inmediatamente la cámara del marco de carga y se procede a aplicar carga axial en forma monotónica y en condición no drenada hasta que ocurra la falla de la muestra. Para cada incremento de carga se registra el valor de la presión de poro y la correspondiente lectura del micrómetro.

## III.4 RESULTADOS OBTENIDOS

Se indican a continuación los resultados obtenidos en el programa de pruebas; una interpretación de los mismos se presenta en el capítulo IV.

### III.4.a PRUEBA 1. TRIAXIAL ESTATICA CU.

Esfuerzo desviador de falla,  $\sigma_{50}$ : 0.71 Kg/cm<sup>2</sup>

Deformación axial unitaria de falla,  $\epsilon_{50}$ : 3.71%

Presión de poro en la falla,  $u_{s0}$ :  $0.35 \text{ Kg/cm}^2$

La gráfica esfuerzo-deformación axial se presenta en la Figura III.6 y corresponde a la línea de trazos entre los puntos 1 y 2 de la Figura III.1. Los datos obtenidos en cada etapa de la prueba y los resultados de la misma se resumen en la Tabla III.5.

#### III.4.b PRUEBAS 2 A 6. TRIAXIALES CICLICAS.

En la Tabla III.3 se definen los valores máximos registrados en las etapas de un ciclo de carga. La magnitud del esfuerzo desviador aplicado en cada ciclo,  $\sigma_{dc}$ , se determinó inmediatamente la expresión:

$$\sigma_{dc} = \frac{\Delta p_c + \Delta p_e}{A_c} \quad (3.4)$$

Donde,

$\Delta p_c$ : Carga máxima aplicada en la etapa de compresión

$\Delta p_e$ : Carga máxima aplicada en la etapa de extensión

$A_c$ : Area del espécimen consolidado

La deformación axial unitaria máxima,  $\epsilon$ , obtenida en cada etapa de un ciclo de carga se calculó mediante las expresiones:

$$\epsilon_c = \frac{\delta_c}{L_c} \quad \epsilon_e = \frac{\delta_e}{L_c} \quad (3.5)$$

Donde,

$\epsilon_c$ : Deformación axial unitaria máxima en la etapa de extensión

$\epsilon_e$ : Deformación axial unitaria máxima en la etapa de extensión

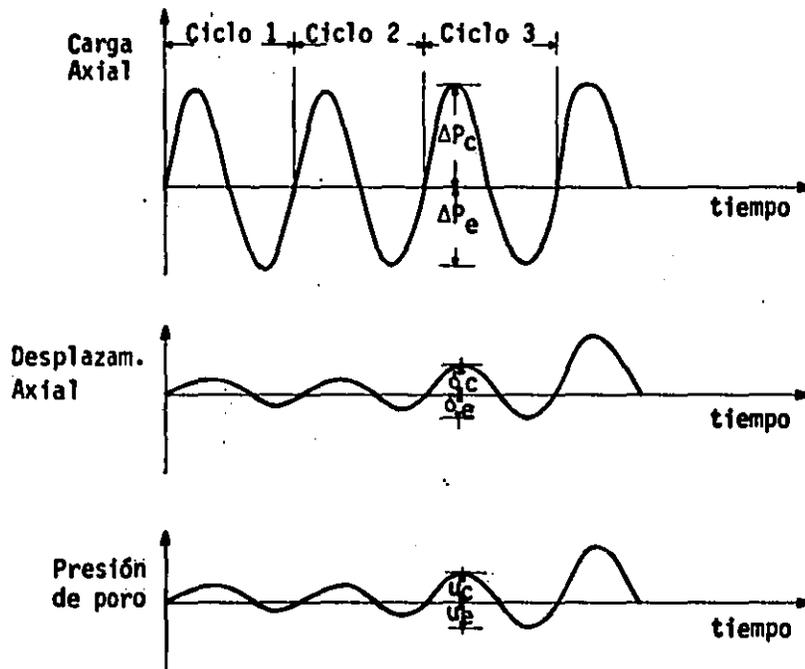
- $\delta_c$ : Desplazamiento axial máximo en la etapa de compresión  
 $\delta_e$ : Desplazamiento axial máximo en la etapa de extensión  
 $L_c$ : Longitud del espécimen consolidado

En la Tabla III.4 se resumen los resultados obtenidos en las cinco pruebas triaxiales.

En las Tablas III.6 a III.10 se resumen los valores obtenidos en las distintas etapas y los resultados finales de cada una de las pruebas.

Los lazos de histéresis esfuerzo-deformación axial correspondientes a cada prueba se presentan en las Figuras III.7 y III.11.

Las gráficas esfuerzo-deformación axial, post-cíclicas, se presentan en las Figuras III.12 a III.15, debe notarse que estas gráficas corresponden a la línea de trazos entre los puntos 3 y 4 de la Figura III.1.



VALORES MAXIMOS REGISTRADOS EN CADA CICLO:

- $\Delta P_c$  = Carga aplicada, etapa de compresión.
- $\Delta P_e$  = Carga aplicada, etapa de extensión.
- $\delta_c$  = Desplazamiento axial, etapa de compresión.
- $\delta_e$  = Desplazamiento axial, etapa de extensión.
- $u_c$  = Presión de poro, etapa de compresión.
- $u_e$  = Presión de poro, etapa de extensión.

· TABLA III.3 Definición de valores registrados en un ciclo de carga. Prueba triaxial cíclica.

Prueba	2	3	4	5	6
<b>I. Carga cíclica</b>					
Esfuerzo desviador cíclico, $\sigma_{dc}$ , Kg/cm <sup>2</sup>	0.125	0.250	0.490	0.630	0.810
Relación $\sigma_{dc}/\sigma_{50}$ *	0.176	0.352	0.690	0.887	0.141
Se produce falla durante la aplicación?	no	no	no	no	si
En el ciclo	—	—	—	—	7
1. Desplazamiento axial, $\delta$					
Primer ciclo, $\delta_e/\delta_c$	0.94	0.94	0.95	0.94	0.94
Ultimo ciclo, $\delta_e/\delta_c$	0.94	0.94	0.95	0.94	
No recuperable, mm	—	—	—	—	
2. Presión de poro, u					
Primer ciclo, $u_e/u_c$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Ultimo ciclo, $u_e/u_c$	1.0	1.0	1.0	1.0	
Remanente al final, Kg/cm <sup>2</sup>	—	—	—	0.09	
<b>II. Carga estática post-cíclica</b>					
1. Esfuerzo desviador de falla, $\sigma_s$ , Kg/cm <sup>2</sup>	0.66	0.66	0.67	0.56	
2. Def. axial unit. en la falla, $\epsilon_s$ , Kg/cm <sup>2</sup>	3.70	4.21	3.82	4.35	
3. Presión de poro en la falla, $u_s$ , Kg/cm <sup>2</sup>	0.39	0.40	0.46	0.33	

\* Resistencia a la compresión obtenida en prueba estática CU.

Tabla III.4. Resumen de resultados obtenidos en las pruebas triaxiales cíclicas

- Dimensiones iniciales de la probeta.

Diámetro: 71.02 mm Longitud: 71.07 mm L/d: 2.41

Clasificación visual: acilla línosa de color verde olivo, homogénea, consistencia suave,  $\rho_s = 0.70 \text{ kg/cm}^3$  (resaca negra).

- Saturación.

Parámetro B inicial : 0.42 Parámetro B final: 0.97

Valor promedio incremento de contrapresión : 0.15 Kg/cm<sup>2</sup>

Valor total de contrapresión : 1.10 Kg/cm<sup>2</sup>

- Consolidación anisotrópica.

Esfuerzo confinante efectivo,  $\bar{\sigma}_{3c}$  : 0.62 Kg/cm<sup>2</sup>

Esfuerzo axial efectivo,  $\bar{\sigma}_{1c}$  : 0.87 Kg/cm<sup>2</sup>

$$K_c = \frac{\bar{\sigma}_{3c}}{\bar{\sigma}_{1c}} = \frac{0.62}{0.87}$$

Deformación axial unitaria,  $\epsilon$  : 4.15 %

Variación volumétrica,  $\Delta V/V_0$  : 4.43 %

Dimensiones probeta consolidada, Area,  $A_0$  : 39.151 cm<sup>2</sup> Long,  $L_c$  : 163.92 mm

- Carga cíclica.

Carga aplicada en etapa de compresión,  $\Delta P_c$  :      Kg.

Carga aplicada en etapa de extensión,  $\Delta P_e$  :      Kg.

Esfuerzo desviador cíclico,  $\bar{\sigma}_{dc}$  :      Kg/cm<sup>2</sup>.

ciclo N°	$\delta_c$ mm	$\delta_e$ mm	$\delta_e$ Lorenz mm	$u_c$ kg/cm <sup>2</sup>	$u_e$ kg/cm <sup>2</sup>

$\delta_c$  : Desplaz. axial en compresión

$\delta_e$  : Desplaz. axial en extensión.

$u_c$  : Presión de poro en compresión

$u_e$  : Presión de poro en extensión

Deformación axial no recuperable al final de carga cíclica,  $\epsilon_d$  :      %

Presión de poro remanente al final de carga cíclica,  $u_d$  :      Kg/cm<sup>2</sup>.

- Carga estática - Post - cíclica.

Esfuerzo desviador de falla,  $\bar{\sigma}_{s0}$  : 0.71 Kg/cm<sup>2</sup>.

Deformación axial unitaria en la falla,  $\epsilon_{s0}$  : 3.71 %

Presión de poro en la falla,  $u_{s0}$  : 0.35 Kg/cm<sup>2</sup>.

- Dimensiones iniciales de la probeta.

Diámetro: 70.61 mm Longitud: 171.30 mm L/d: 2.42

Clasificación visual: Arcilla limosa de color verde olivo, homogéneo. Consistencia suave,  $q_u = 0.70 \text{ Kg/cm}^2$  (con penetrómetro).

- Saturación.

Parámetro B inicial : 0.85 Parámetro B final : 0.95

Valor promedio incremento de contrapresión : 0.15 Kg/cm<sup>2</sup>

Valor total de contrapresión : 1.27 Kg/cm<sup>2</sup>

- Consolidación anisotrópica.

Esfuerzo confinante efectivo,  $\bar{\sigma}_{3c}$  : 0.61 Kg/cm<sup>2</sup>

Esfuerzo axial efectivo,  $\bar{\sigma}_{1c}$  : 0.86 Kg/cm<sup>2</sup>

$$K_c = \frac{\bar{\sigma}_{3c}}{\bar{\sigma}_{1c}} = \frac{0.61}{0.86}$$

Deformación axial unitaria,  $\epsilon_c$  : 2.56 %

Variación volumétrica,  $\Delta V/V_0$  : 3.23 %

Dimensiones probeta consolidada, Area,  $A_c$  : 38.447 cm<sup>2</sup> Long,  $L_c$  : 170.86 mm

- Carga cíclica.

Carga aplicada en etapa de compresión,  $\Delta P_c$  : 4.72 Kg.

Carga aplicada en etapa de extensión,  $\Delta P_e$  : 8.02 Kg.

Esfuerzo desviador cíclico,  $\bar{\sigma}_{dc}$  : 0.125 Kg/cm<sup>2</sup>.

ciclo N°	$\delta_c$ mm	$\delta_e$ mm	$\delta_{e \text{ corr}}^d$ mm	$u_c$ kg/cm <sup>2</sup>	$u_e$ kg/cm <sup>2</sup>
1	0.38	0.38	0.36	0.02	0.02
50	0.38	0.38	0.36	0.02	0.02
100	0.38	0.38	0.36	0.02	0.02

$\delta_c$  : Desplaz. axial en compresión.

$\delta_e$  : Desplaz. axial en extensión.

$u_c$  : Presión de poro en compresión.

$u_e$  : Presión de poro en extensión.

Deformación axial no recuperable al final de carga cíclica,  $\epsilon_d$  : — %

Presión de poro remanente al final de carga cíclica,  $u_d$  : — Kg/cm<sup>2</sup>.

- Carga estática - Post - cíclica.

Esfuerzo desviador de falla,  $\bar{\sigma}_B$  : 0.66 Kg/cm<sup>2</sup>.

Deformación axial unitaria en la falla,  $\epsilon_B$  : 3.75 %

Presión de poro en la falla,  $u_B$  : 0.39 Kg/cm<sup>2</sup>.

- Dimensiones iniciales de la probeta.

Diámetro: 70.99 mm Longitud: 166.54 mm L/d: 2.35

Clasificación visual: Arcilla limosa suave, color verde olivo homogéneo.  
 $\gamma_s = 0.70 \text{ kg/cm}^3$  (con pedometro).

- Saturación.

Parámetro B inicial: 0.36 Parámetro B final: 0.95

Valor promedio incremento de contrapresión: 0.15 Kg/cm<sup>2</sup>

Valor total de contrapresión: 0.97 Kg/cm<sup>2</sup>

- Consolidación anisotrópica.

Esfuerzo confinante efectivo,  $\bar{\sigma}_{3c}$ : 0.615 Kg/cm<sup>2</sup>

Esfuerzo axial efectivo,  $\bar{\sigma}_{1c}$ : 0.865 Kg/cm<sup>2</sup>

$$K_c = \frac{\bar{\sigma}_{3c}}{\bar{\sigma}_{1c}}; \frac{0.71}{0.71}$$

Deformación axial unitaria,  $\epsilon$ : 2.37 %

Variación volumétrica,  $\Delta V/V_0$ : 5.14 %

Dimensiones probeta consolidada, Área,  $A_c$ : 28.610 cm<sup>2</sup> Long.,  $L_c$ : 160.93 mm

- Carga cíclica.

Carga aplicada en etapa de compresión,  $\Delta P_0$ : 9.36 Kg.

Carga aplicada en etapa de extensión,  $\Delta P_0$ : 9.14 Kg.

Esfuerzo desviador cíclico,  $\sigma_{dc}$ : 0.250 Kg/cm<sup>2</sup>.

ciclo N°	$\delta_c$ mm	$\delta_e$ mm	$\delta_{e \text{ Lorrnyd}}$ mm	$u_c$ kg/cm <sup>2</sup>	$u_e$ kg/cm <sup>2</sup>
1	0.79	0.79	0.74	0.06	0.06
50	0.79	0.79	0.74	0.06	0.06
100	0.79	0.79	0.74	0.06	0.06

$\delta_c$ : Desplaz. axial en compresión

$\delta_e$ : Desplaz. axial en extensión.

$u_c$ : Presión de poro en compresión

$u_e$ : Presión de poro en extensión

Deformación axial no recuperable al final de carga cíclica,  $\epsilon_d$ : — %

Presión de poro remanente al final de carga cíclica,  $u_d$ : — Kg/cm<sup>2</sup>.

- Carga estática - Post - cíclica.

Esfuerzo desviador de falla,  $\sigma_f$ : 0.66 Kg/cm<sup>2</sup>.

Deformación axial unitaria en la falla,  $\epsilon_f$ : 4.16 %

Presión de poro en la falla,  $u_f$ : 0.40 Kg/cm<sup>2</sup>.

- Dimensiones iniciales de la probeta.

Diámetro: 71.15 mm      Longitud: 170.40 mm      L/d: 2.39

Clasificación visual: Arcilla limosa, de color verde olivo con manchas negras, consistencia suelta  $q_u = 0.70$  Kg/cm<sup>2</sup> (con penetrometro).

- Saturación.

Parámetro B inicial : 0.63      Parámetro B final: 0.95

Valor promedio incremento de contrapresión : 0.15 Kg/cm<sup>2</sup>

Valor total de contrapresión : 0.70 Kg/cm<sup>2</sup>

- Consolidación anisotrópica.

Esfuerzo confinante efectivo,  $\bar{\sigma}_{3c}$  : 0.60 Kg/cm<sup>2</sup>

Esfuerzo axial efectivo,  $\bar{\sigma}_{1c}$  : 0.65 Kg/cm<sup>2</sup>

$$K_c = \frac{\bar{\sigma}_{3c}}{\bar{\sigma}_{1c}}; \frac{0.60}{0.70}$$

Deformación axial unitaria,  $\epsilon$ ; 4.82 %

Variación volumétrica,  $\Delta V/V_0$ ; 5.15 %

Dimensiones probeta consolidada, Area,  $A_c$ ; 29.393 cm<sup>2</sup>      Long,  $L_c$  : 162.19 mm

- Carga cíclica.

Carga aplicada en etapa de compresión,  $\Delta P_0$  : 18.8 Kg.

Carga aplicada en etapa de extensión,  $\Delta P_0$  : 19.5 Kg.

Esfuerzo desviador cíclico,  $\bar{\sigma}_{dc}$  : 0.49 Kg/cm<sup>2</sup>.

ciclo N°	$\delta_c$ mm	$\delta_e$ mm	$\delta_e$ Lorrnyid mm	$u_c$ Kg/cm <sup>2</sup>	$u_e$ Kg/cm <sup>2</sup>
1	2.40	2.40	2.25	0.08	0.08
50	2.40	2.40	2.25	0.08	0.08
100	2.40	2.40	2.25	0.08	0.08

$\delta_c$  : Desplaz. axial en compresión

$\delta_e$  : Desplaz. axial en extensión.

$u_c$  : Presión de poro en compresión

$u_e$  : Presión de poro en extensión

Deformación axial no recuperable al final de carga cíclica,  $\epsilon_d$  : — %

Presión de poro remanente al final de carga cíclica,  $u_d$  : — Kg/cm<sup>2</sup>.

- Carga estática - Post - cíclica.

Esfuerzo desviador de falla,  $\bar{\sigma}_g$  : 0.67 Kg/cm<sup>2</sup>.

Deformación axial unitaria en la falla,  $\epsilon_g$  ; 3.82 %

Presión de poro en la falla,  $u_g$  : 0.46 Kg/cm<sup>2</sup>.

- Dimensiones iniciales de la probeta.

Diámetro: 7.38 mm Longitud: 171.05 mm L/D: 2.41

Clasificación visual: Arcilla limosa, de color verde olivo con manchas negras y presencia de vidrio volcánico, (consistencia surte  $q_u = 0.70 \text{ kg/cm}^2$  (un penetámetro)).

- Saturación.

Parámetro B inicial : 0.63 Parámetro B final: 0.96

Valor promedio incremento de contrapresión : 0.15 Kg/cm<sup>2</sup>

Valor total de contrapresión : 1.02 Kg/cm<sup>2</sup>

- Consolidación anisotrópica.

Esfuerzo confinante efectivo,  $\bar{\sigma}_{3c}$  : 0.625 Kg/cm<sup>2</sup>

Esfuerzo axial efectivo,  $\bar{\sigma}_{1c}$  : 0.875 Kg/cm<sup>2</sup>

$$K_c = \frac{\bar{\sigma}_{3c}}{\bar{\sigma}_{1c}} = \frac{0.70}{0.70}$$

Deformación axial unitaria,  $\epsilon$  : 4.10 %

Variación volumétrica,  $\Delta V/V_0$  : 4.83 %

Dimensiones probeta consolidada, Area,  $A_c$  : 29.09 cm<sup>2</sup> Long,  $L_c$  : 164.04 mm

- Carga cíclica.

Carga aplicada en etapa de compresión,  $\Delta P_c$  : 23.64 Kg.

Carga aplicada en etapa de extensión,  $\Delta P_e$  : 26.62 Kg.

Esfuerzo desviador cíclico,  $\bar{\sigma}_{dc}$  : 0.63 Kg/cm<sup>2</sup>.

ciclo N°	$\delta_c$ mm	$\delta_e$ mm	$\delta_e$ correcto mm	$u_c$ kg/cm <sup>2</sup>	$u_e$ kg/cm <sup>2</sup>
1	3.81	3.60	3.30	0.17	0.17
16	4.69	4.79	4.50	0.18	0.18
30	5.53	5.64	5.35	0.18	0.18
50	6.13	6.13	5.84	0.18	0.18
75	6.43	6.43	6.13	0.19	0.19
100	6.92	6.81	6.51	0.19	0.19

$\delta_c$  : Desplaz. axial en compresión.

$\delta_e$  : Desplaz. axial en extensión.

$u_c$  : Presión de poro en compresión.

$u_e$  : Presión de poro en extensión.

Deformación axial no recuperable al final de carga cíclica,  $\epsilon_d$  : — %

Presión de poro remanente al final de carga cíclica,  $u_d$  : 0.09 Kg/cm<sup>2</sup>.

- Carga estática - Post - cíclica.

Esfuerzo desviador de falla,  $\bar{\sigma}_f$  : 0.56 Kg/cm<sup>2</sup>.

Deformación axial unitaria en la falla,  $\epsilon_f$  : 4.35 %

Presión de poro en la falla,  $u_f$  : 0.33 Kg/cm<sup>2</sup>.

Tabla III.9 . Resumen de datos y resultados. Prueba 5 .

- Dimensiones iniciales de la probeta.

Diámetro: 71.06 mm      Longitud: 170.55 mm      L/d: 2.40

Clasificación visual: Arcilla limosa de color verde olivo, con manchas negras, de consistencia suave  $\gamma_w$ : 0.72 kg/cm<sup>3</sup> (con penetrometro).

- Saturación.

Parámetro B inicial : 0.55      Parámetro B final: 0.97

Valor promedio incremento de contrapresión : 0.15 Kg/cm<sup>2</sup>

Valor total de contrapresión : 1.12 Kg/cm<sup>2</sup>

- Consolidación anisotrópica.

Esfuerzo confinante efectivo,  $\bar{\sigma}_{30}$  : 0.63 Kg/cm<sup>2</sup>

Esfuerzo axial efectivo,  $\bar{\sigma}_{1c}$  : 0.85 Kg/cm<sup>2</sup>

$$K_c = \frac{\bar{\sigma}_{30}}{\bar{\sigma}_{1c}} = \frac{0.63}{0.85}$$

Deformación axial unitaria,  $\epsilon$  : 4.39 %

Variación volumétrica,  $\Delta V/V_0$  : 5.26 %

Dimensiones probeta consolidada, Area,  $A_c$  : 39.05 cm<sup>2</sup>      Long,  $L_c$  : 163.06 mm

- Carga cíclica.

Carga aplicada en etapa de compresión,  $\Delta P_c$  : 29.0 Kg.

Carga aplicada en etapa de extensión,  $\Delta P_e$  : 34.1 Kg.

Esfuerzo desviador cíclico,  $\bar{\sigma}_{dc}$  : 0.81 Kg/cm<sup>2</sup>.

ciclo N°	$\delta_c$ mm	$\delta_e$ mm	$\delta_{e \text{ remanente}}$ mm	$u_c$ kg/cm <sup>2</sup>	$u_e$ kg/cm <sup>2</sup>
1	4.94	5.51	4.69	0.67	0.67
2	5.45	6.01	5.20	0.96	0.96
3	5.90	6.26	5.46	1.01	1.01
4	6.21	6.72	5.90	1.01	1.01
5	6.69	7.11	6.29	1.02	1.02
6	6.79	7.21	6.39	1.04	1.04
7	7.96	—			

$\delta_c$  : Desplaz. axial en compresión.

$\delta_e$  : Desplaz. axial en extensión.

$u_c$  : Presión de poro en compresión

$u_e$  : Presión de poro en extensión.

\* Falla al aplicar el ciclo 7.

Deformación axial no recuperable al final de carga cíclica,  $\epsilon_d$  : — %

Presión de poro remanente al final de carga cíclica,  $u_d$  : — Kg/cm<sup>2</sup>.

- Carga estática - Post - cíclica.

Esfuerzo desviador de falla,  $\bar{\sigma}_g$  : — Kg/cm<sup>2</sup>.

Deformación axial unitaria en la falla,  $\epsilon_g$  : — %

Presión de poro en la falla,  $u_g$  : — Kg/cm<sup>2</sup>.

Tabla III.10. Resumen de datos y resultados. Prueba 6.

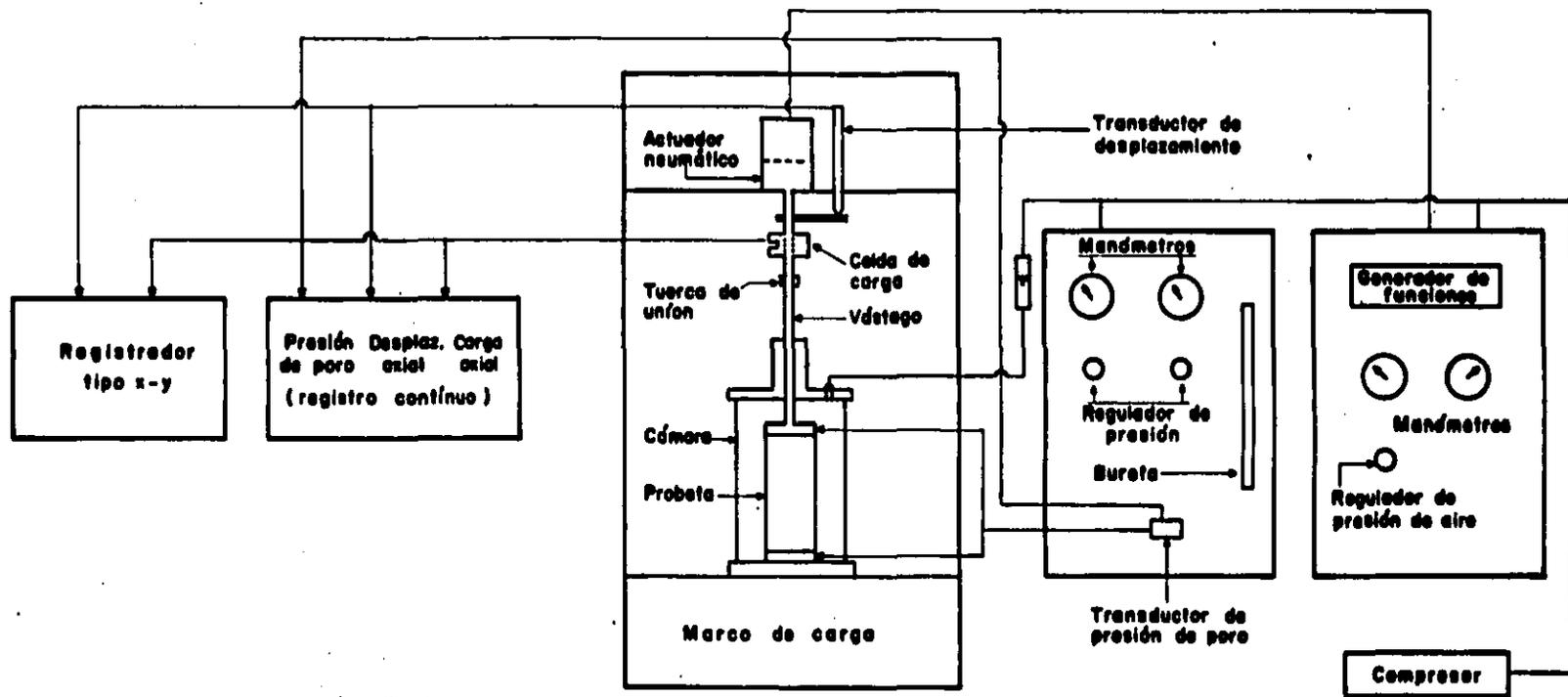
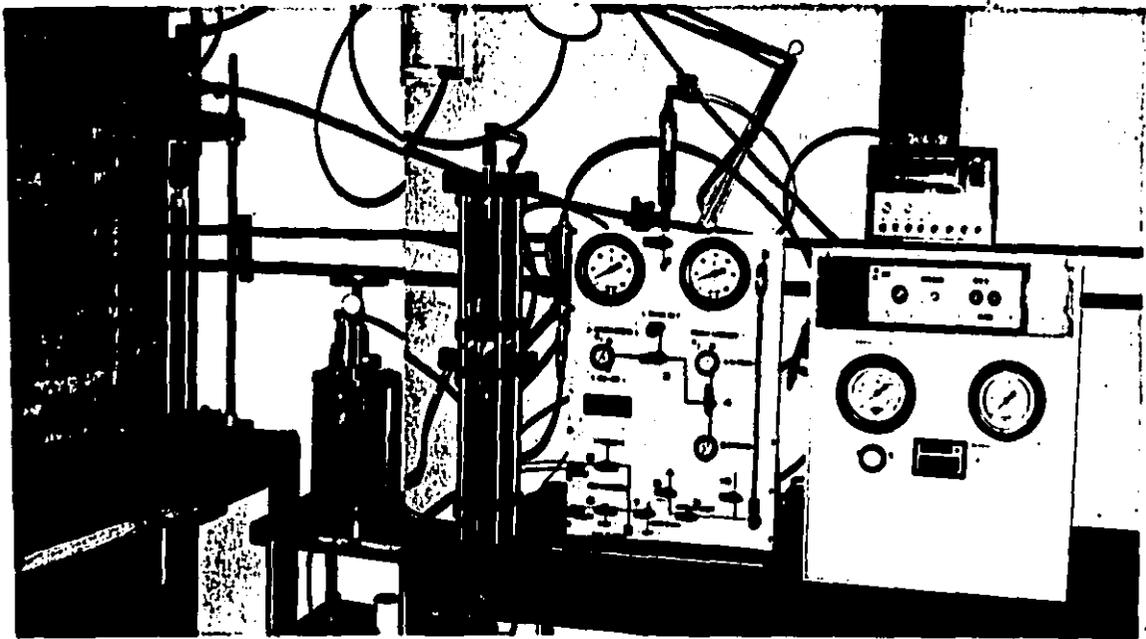


FIG. III. 2. Esquema del equipo triaxial cíclico instalado en el laboratorio de dinámica de suelos - DEFFI - UNAM.



**FIG. III. 3. Fotografía de una parte del equipo de carga cíclica. DEPFI - UNAM**

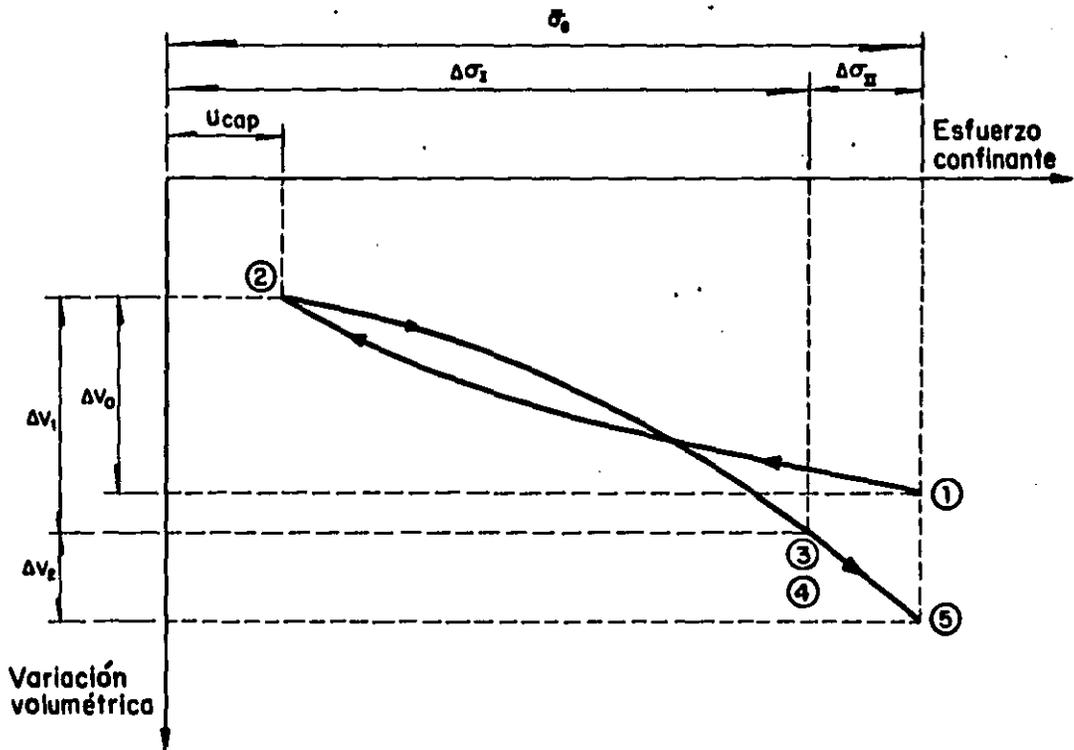
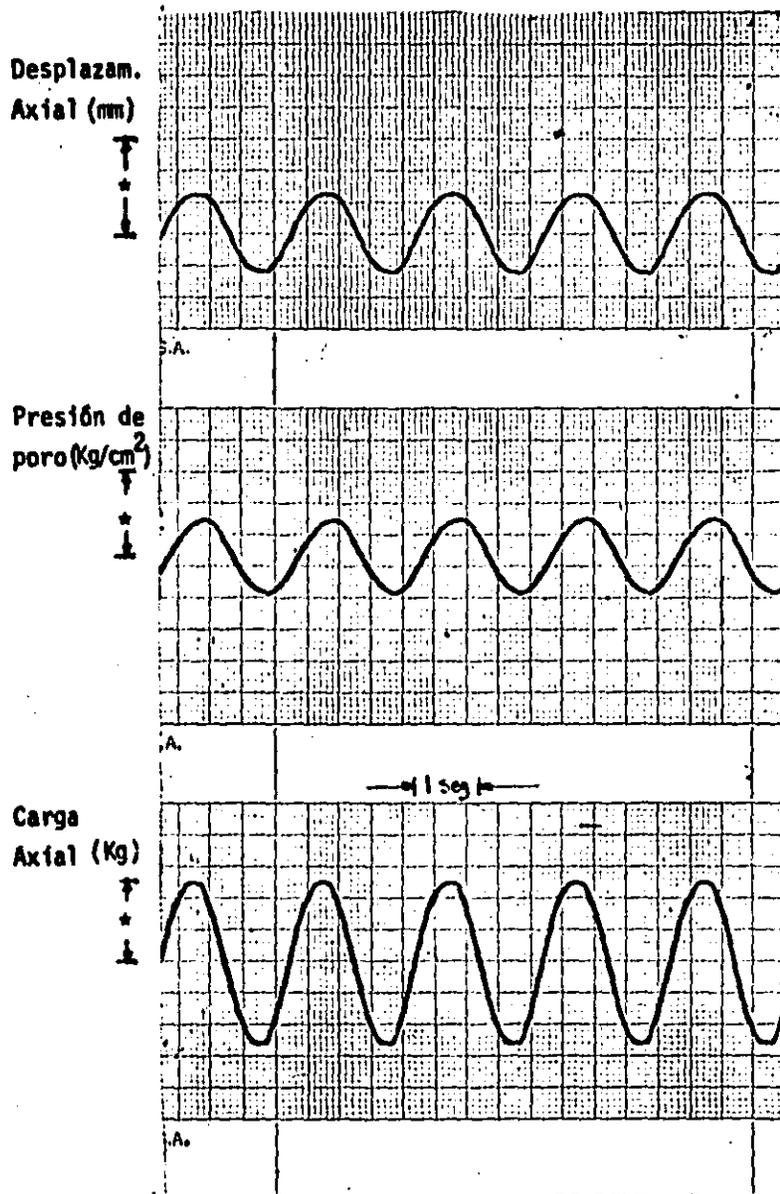


Fig III 4 Condiciones esfuerzo-cambio volumétrico de la muestra, en las primeras etapas de la prueba



\* Calibración realizada antes de aplicar la carga cíclica.

Fig. III.5. Registro obtenido durante la aplicación de carga cíclica

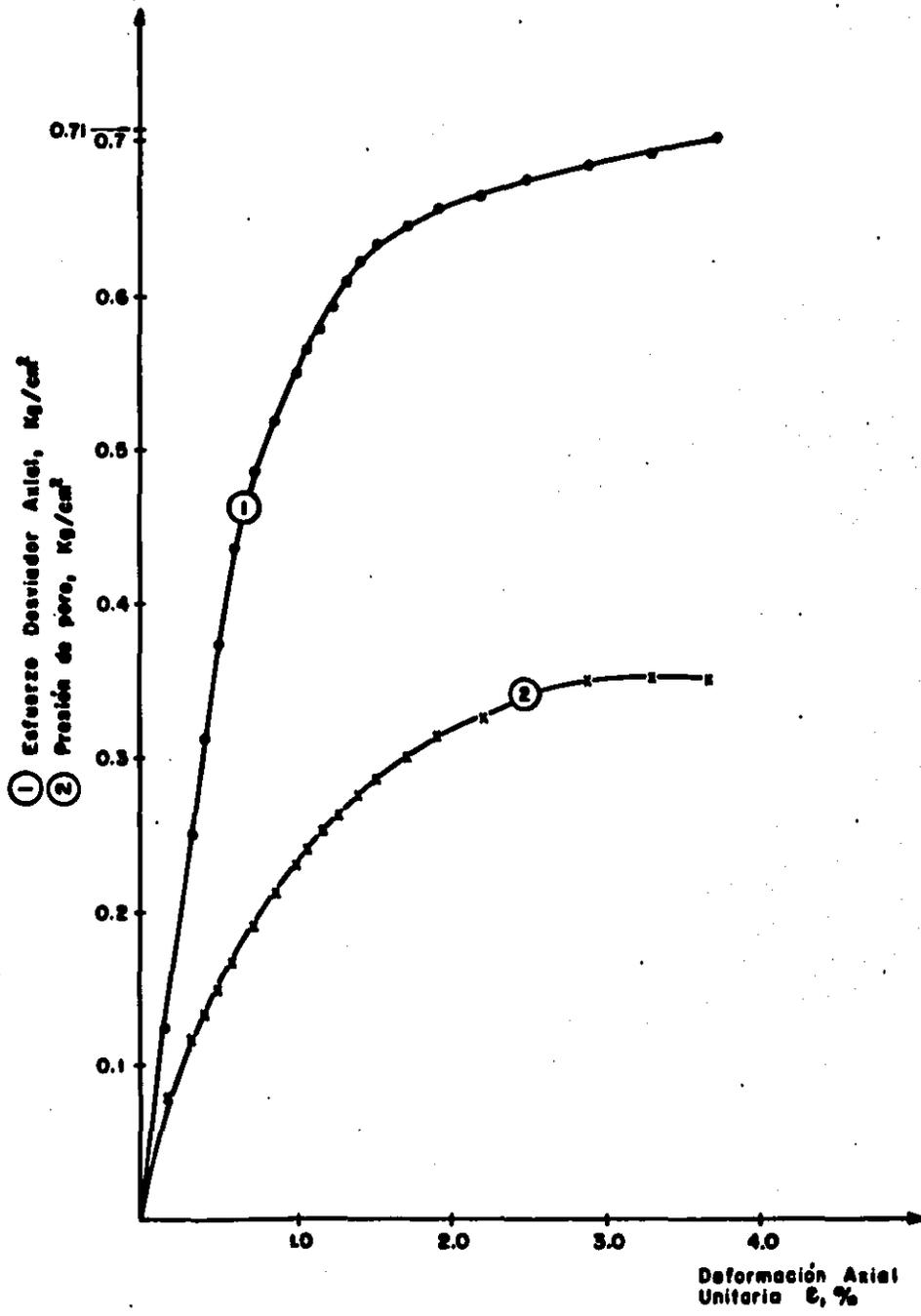


FIG. III. 6. Gráfica esfuerzo - deformación obtenida en prueba estática - PRUEBA 1.

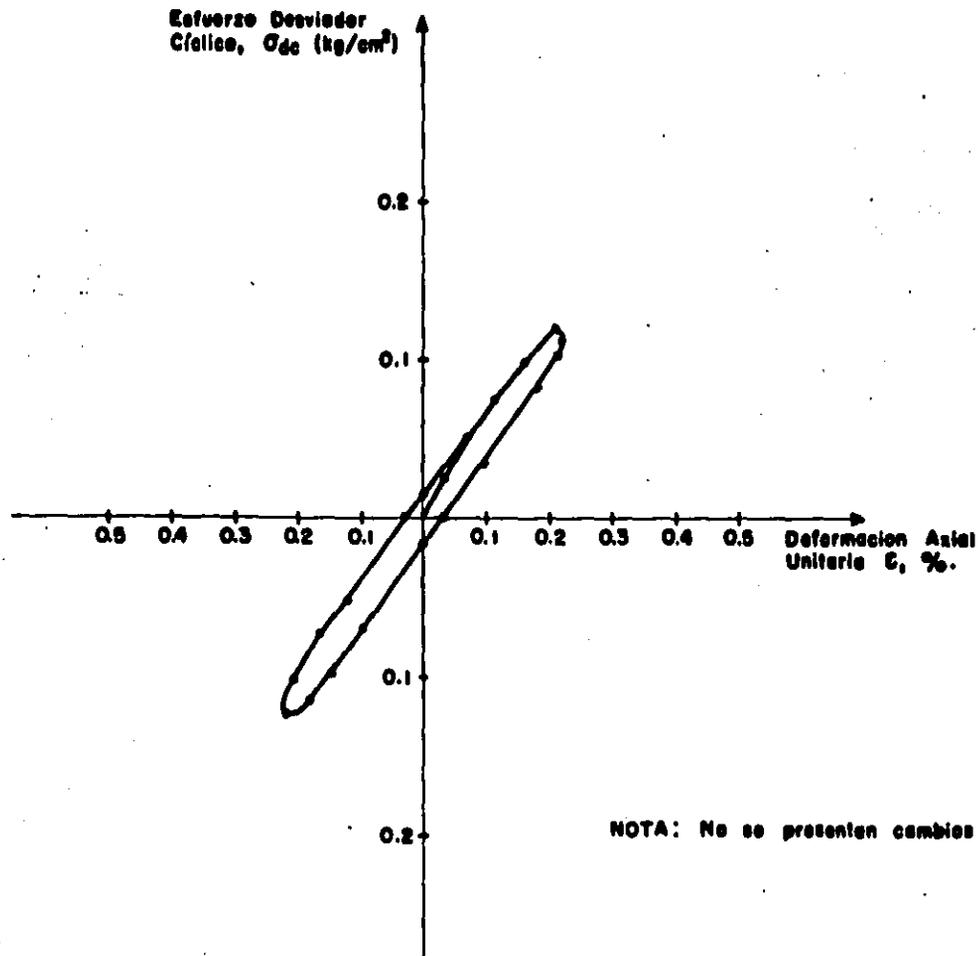


FIG. III. 7. Lazo de histéresis esfuerzo - deformación. - PRUEBA 2.

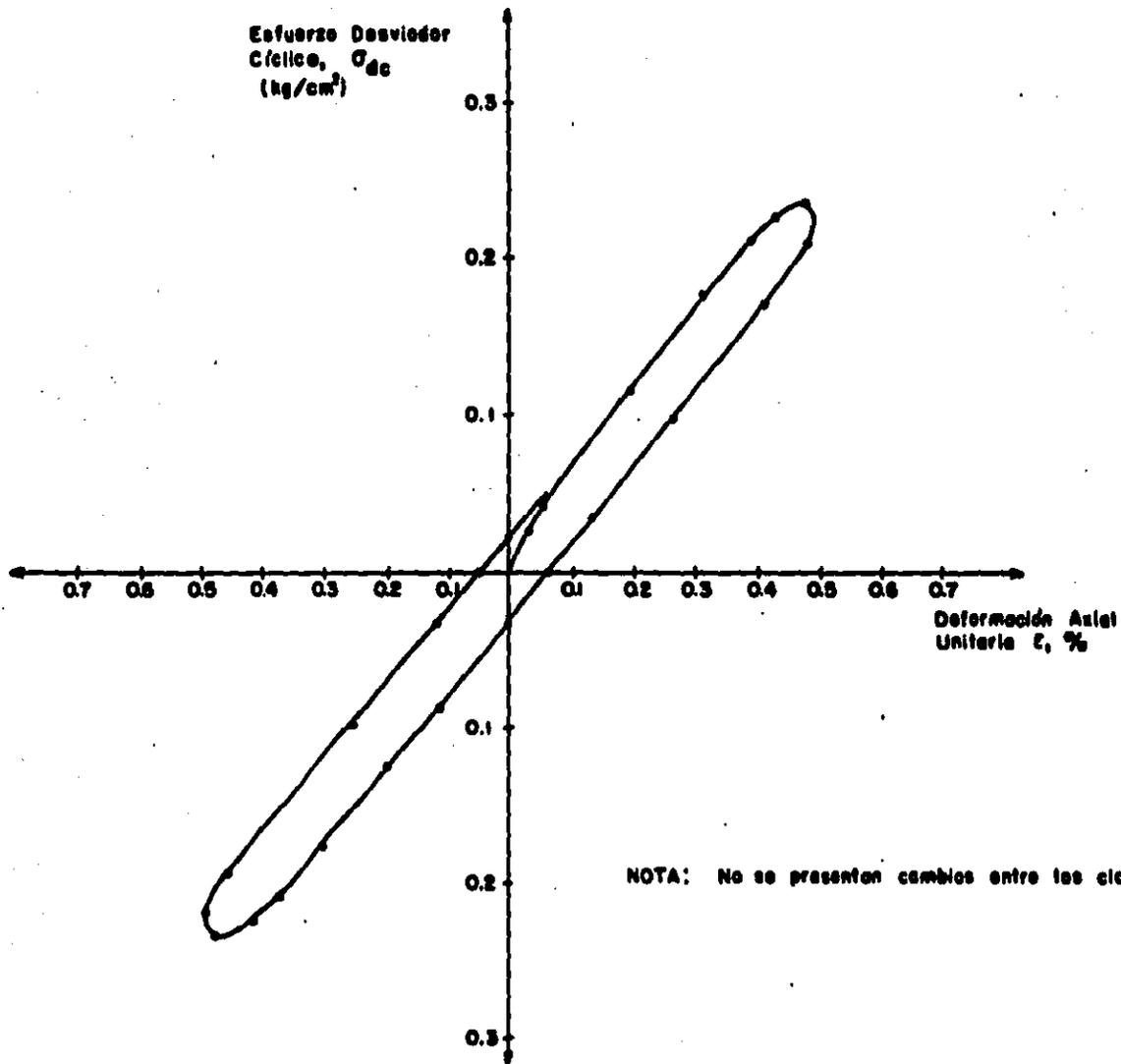


FIG. III. B. Lazos de histéresis esfuerzo - deformación.- Prueba 3

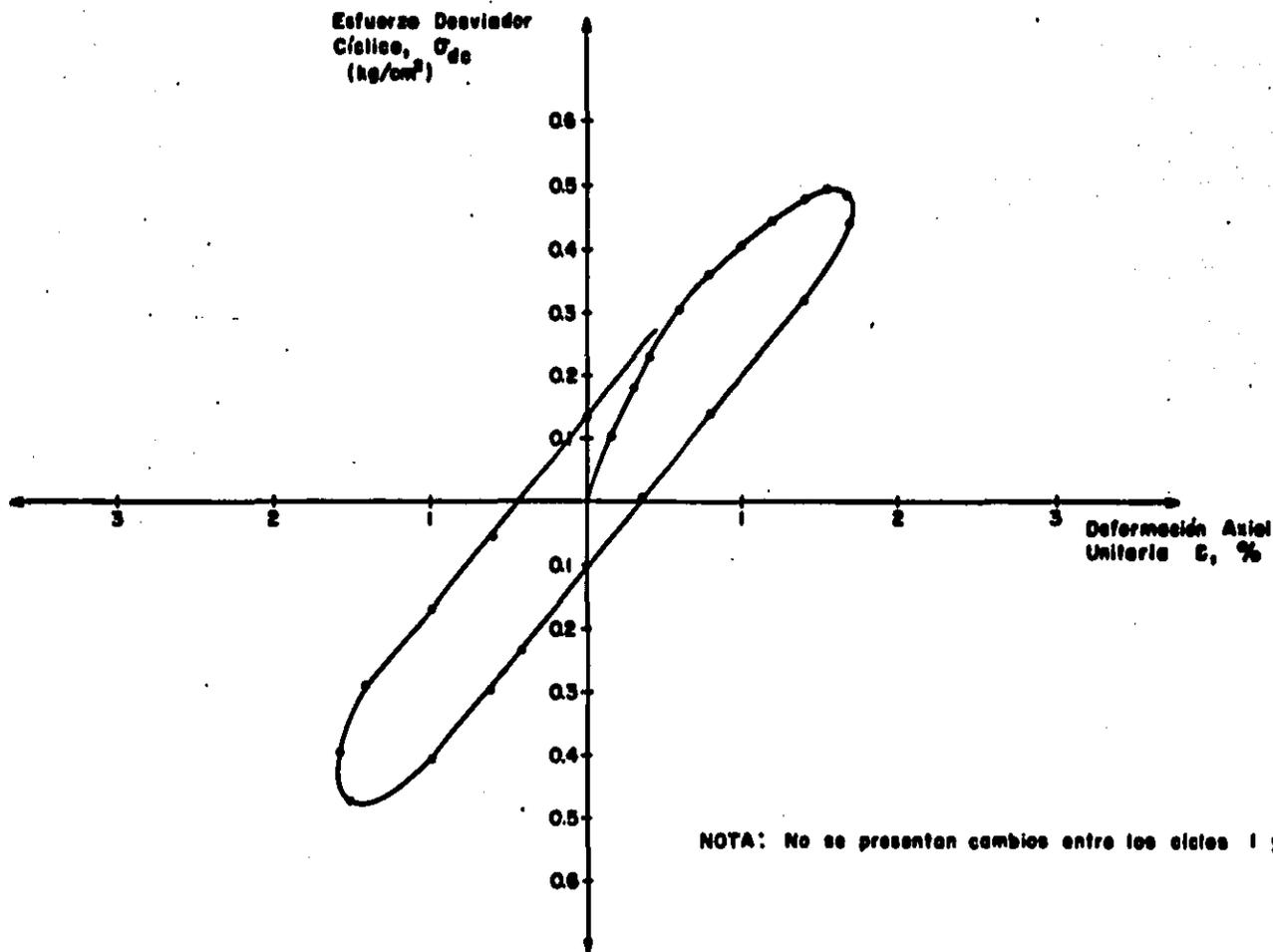


FIG. III. 9. Lazos de histéresis esfuerzo - deformación. - Prueba 4

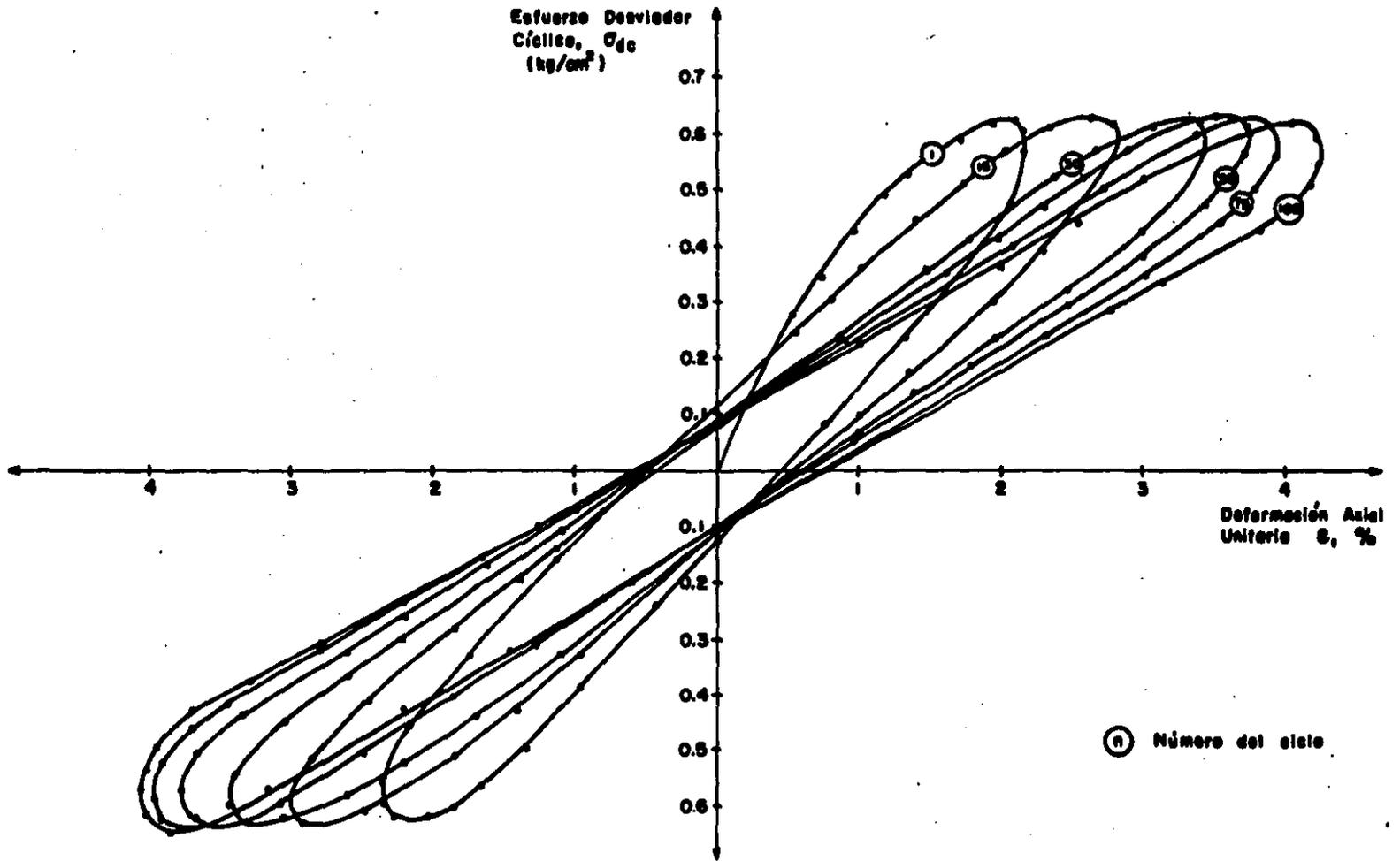


FIG. III. 10. Lazos de histéresis esfuerzo - deformación. - PRUEBA 5.

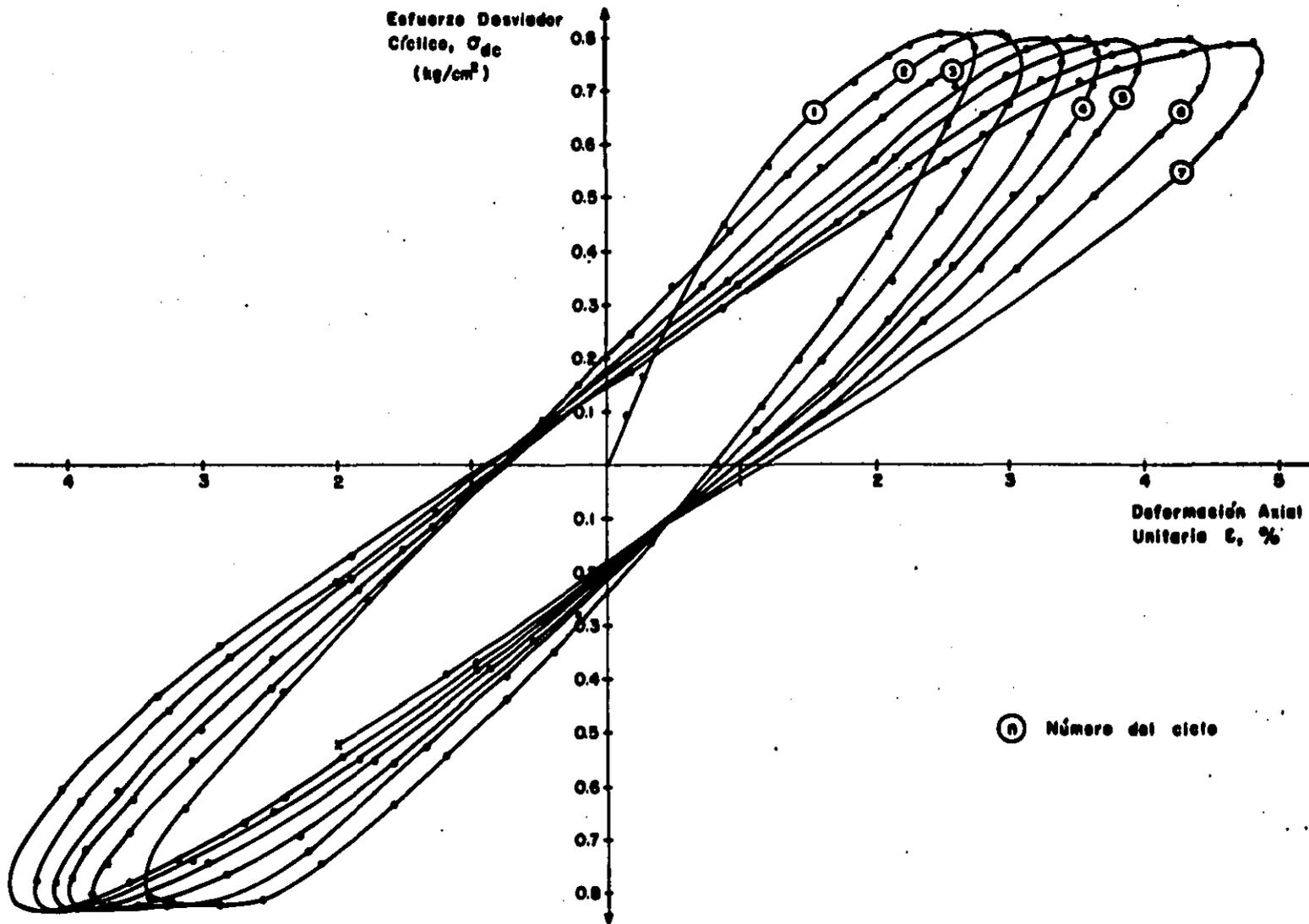


FIG. III. II. Lazos de histéresis esfuerzo - deformación.- PRUEBA 6.

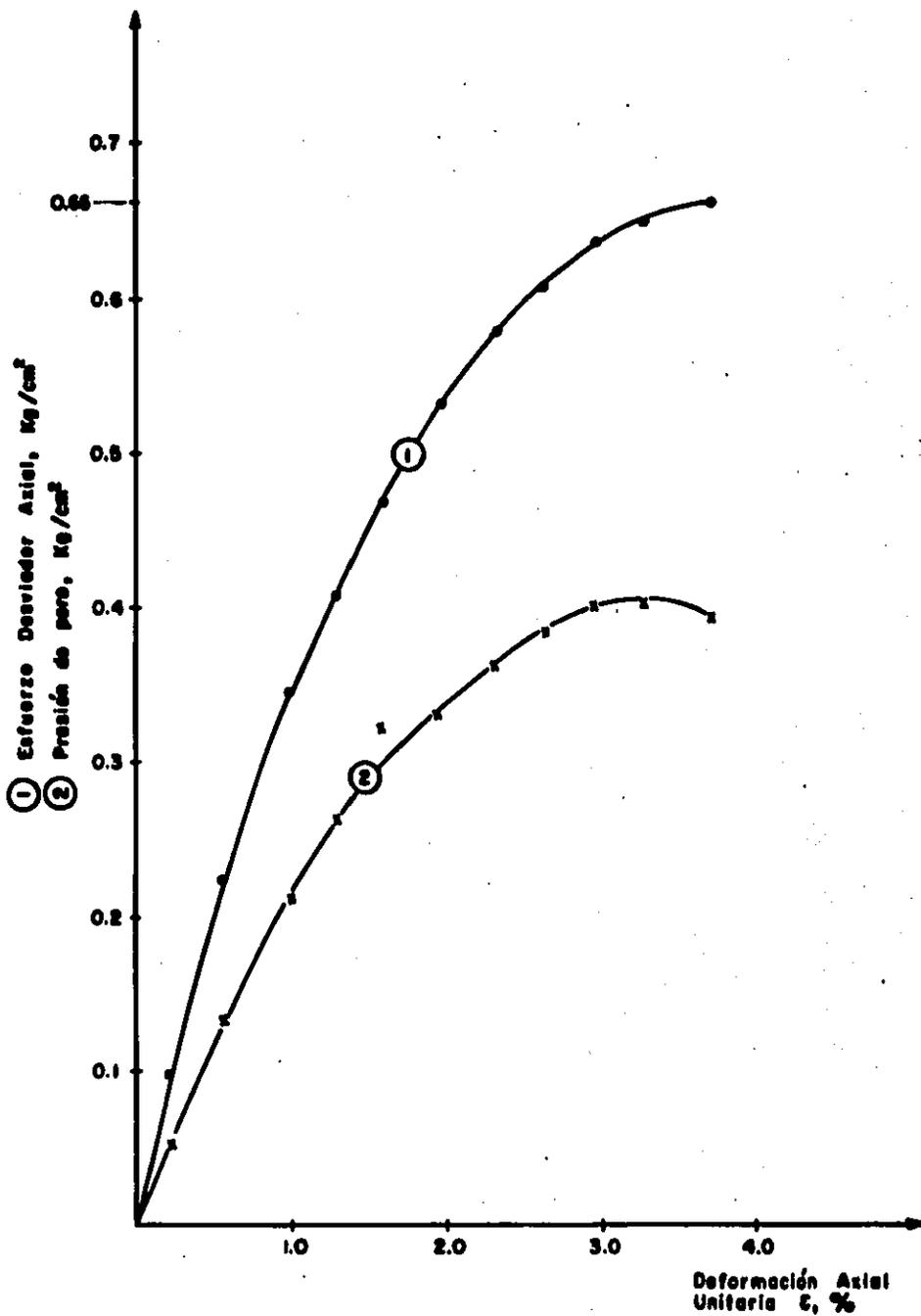


FIG. III.12. Gráfica esfuerzo - deformación obtenida después de aplicar carga cíclica - PRUEBA 2

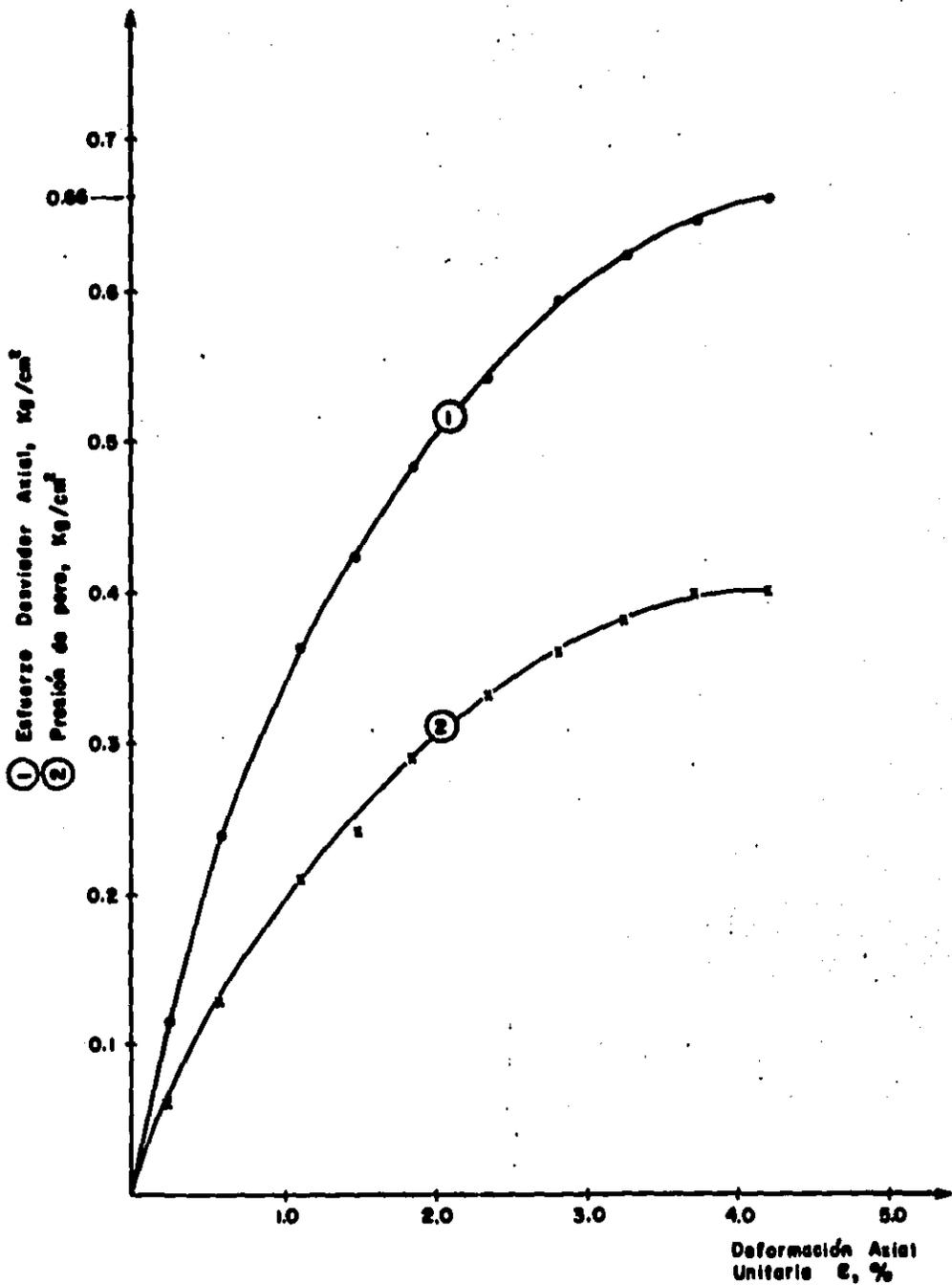
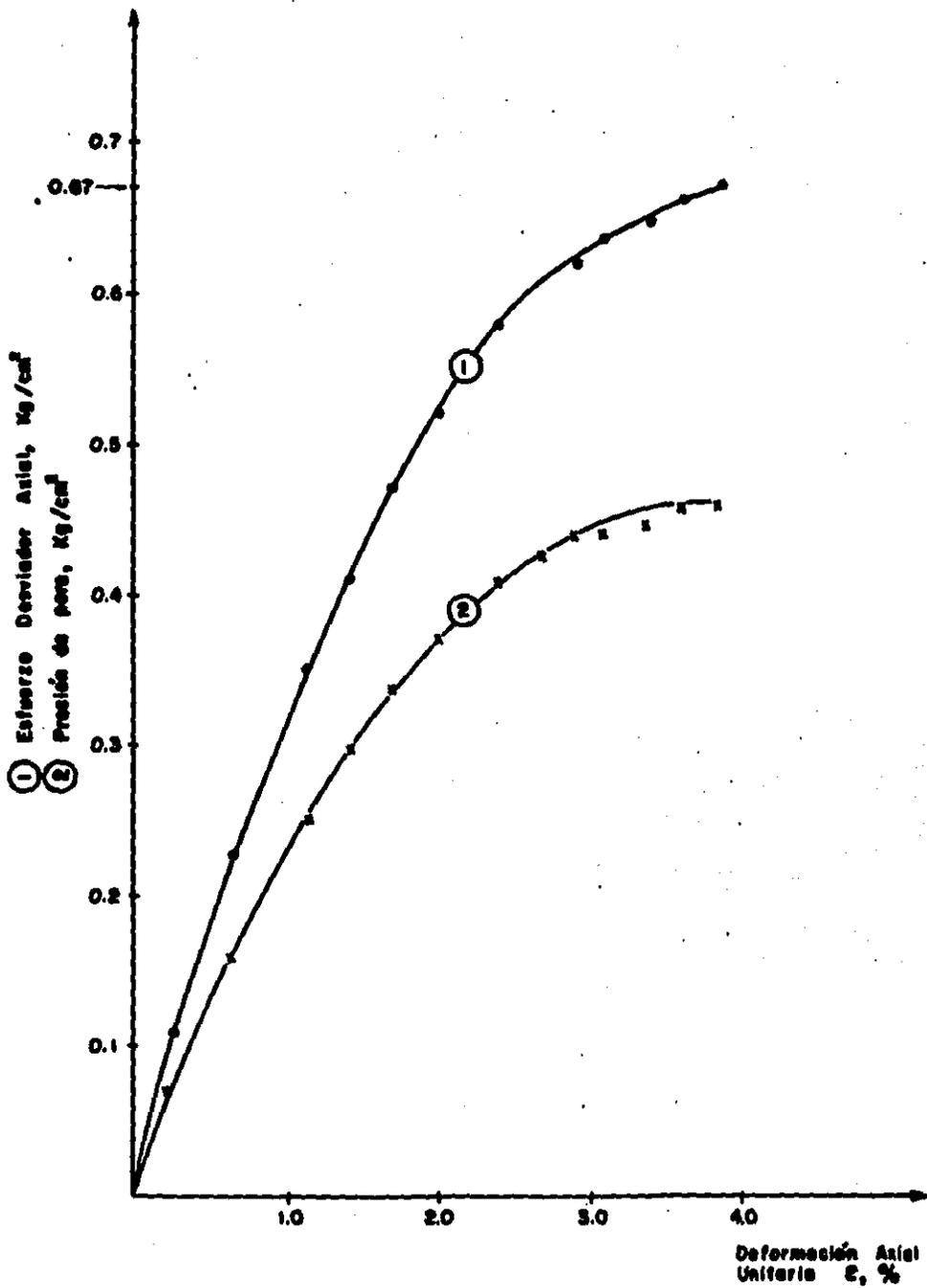


FIG. III. 13. Gráfica esfuerzo - deformación obtenida después de aplicar carga cíclica - PRUEBA 3



**FIG. III. 14. Gráfica esfuerzo - deformación obtenida después de aplicar carga cíclica - PRUEBA 4**

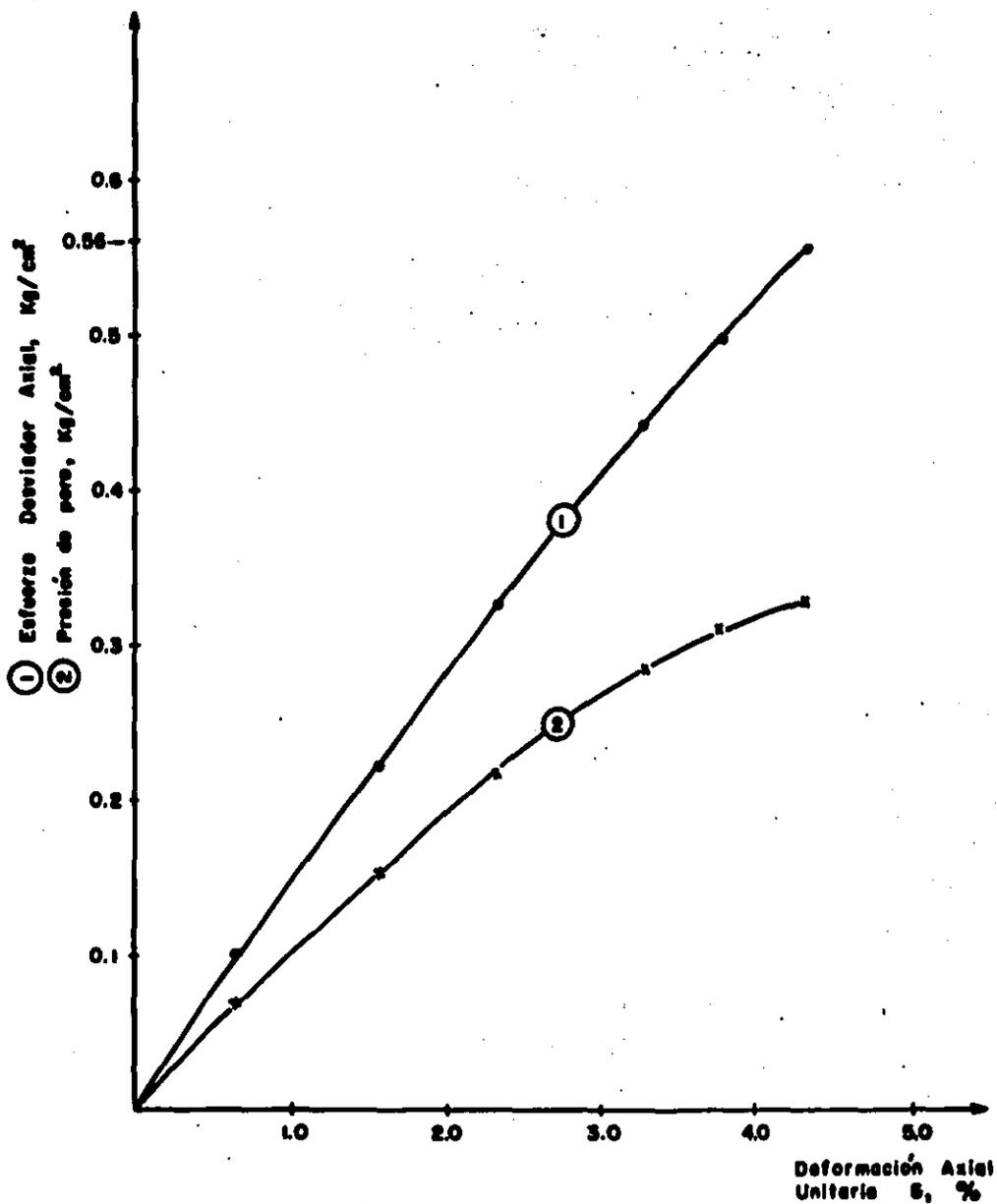


FIG. III. 15. Gráfica esfuerzo - deformación obtenida después de aplicar carga cíclica - PRUEBA 5

#### IV. INTERPRETACION DE RESULTADOS

En la primera parte de este capítulo se analiza el comportamiento de las muestras de arcilla durante la aplicación de la carga cíclica; y en la segunda su comportamiento post-cíclico.

##### IV.1 COMPORTAMIENTO DURANTE LA ACCION CICLICA

En este inciso se estudia la respuesta esfuerzo-deformación y la variación de la presión de poro en las muestras de prueba durante la acción de la carga cíclica; se indica la magnitud del esfuerzo cortante cíclico máximo aplicado a cada muestra y el valor del módulo dinámico secante correspondiente a distintos ciclos de carga. Se presenta la variación de la relación de amortiguamiento histerético,  $\beta$ , y del módulo dinámico secante,  $E_{sd}$ , con la magnitud de la deformación axial de la muestra.

#### IV.1.a ESFUERZO CORTANTE CICLICO APLICADO

Dado que las muestras se consolidaron anisotrópicamente, durante la aplicación de la carga cíclica se presenta una superposición de esfuerzos cortantes en cada plano inclinado  $\alpha^\circ$  con respecto a su base: Al esfuerzo cortante  $\tau_s$  debido a la condición estática inicial se superpone el esfuerzo cortante cíclico  $\tau_c$  generado por la aplicación del esfuerzo desviador cíclico  $\sigma_{dc}$ . El valor máximo del esfuerzo cortante  $\tau_s$  es  $0.125 \text{ Kg/cm}^2$  en todas las pruebas. La magnitud del esfuerzo cortante cíclico  $\tau_c$  generado en el plano de la muestra inclinado  $45^\circ$  con respecto a su base es:

Prueba	2	3	4	5	6
$\tau_c, \text{ Kg/cm}^2$	0.063	0.125	0.245	0.315	0.405

En las Figuras IV.1 y IV.2 se presentan para las cinco pruebas, los círculos de Mohr de esfuerzos totales correspondientes a los distintos estados durante la aplicación de un ciclo de carga. El círculo indicado con línea de trazos corresponde al estado inicial de esfuerzos. En las pruebas 2 y 3 la magnitud del esfuerzo desviador cíclico  $\sigma_{dc}$  es menor que la del esfuerzo desviador estático  $\sigma_{ds}$ , por lo que no hay inversión de los esfuerzos principales en la etapa de extensión de cada ciclo de carga. En las pruebas 4, 5 y 6 la condición de carga es más severa ya que la magnitud del esfuerzo desviador cíclico  $\sigma_{dc}$  es mayor que la del esfuerzo desviador estático  $\sigma_{ds}$ .

#### IV.1.b RELACION ESFUERZO-DEFORMACION

En cada ciclo de carga la muestra presenta un cambio de altura,  $\delta_c$ , durante la etapa de compresión y un,  $\delta_e$ , en la etapa de extensión; como se ilustró en la Tabla III.3. La relación  $\delta_c/\delta_e$  permanece constante durante la aplicación de los 100 ciclos de carga, hasta un nivel de esfuerzo desviador cíclico igual al 90% de la resistencia a la compresión

obtenida en la prueba estática, y en ninguno de los casos se tienen de formaciones no recuperables al final de la acción cíclica.

En la prueba donde el esfuerzo desviador cíclico es igual 114% de la resistencia a la compresión obtenida en la prueba estática, la rela ción  $\delta_e/\delta_c$  es igual a 0.95 en los primeros ciclos de carga, pero la muestra falla durante la aplicación del ciclo 7.

Lo anterior lleva a concluir que la respuesta de las muestras de arcilla ensayada es elástica hasta un nivel de esfuerzo desviador cíclico,  $\sigma_{dc}$ , igual a la resistencia a la compresión en la prueba estática.

A partir del valor de la deformación axial unitaria,  $\epsilon$ , de la muestra puede determinarse la correspondiente deformación angular unitaria,  $\gamma$ , mediante la expresión:

$$\gamma = (1 + \nu)\epsilon \quad (4.1)$$

Donde,

$\gamma$  = Deformación angular unitaria

$\epsilon$  = Deformación axial unitaria

$\nu$  = Relación de Poisson.

Asumiendo que la relación de Poisson,  $\nu$ , es igual a 0.5, se tiene para la etapa de compresión del primer ciclo de carga de cada prueba:

Prueba	2	3	4	5	6
$\epsilon$ %	0.22	0.49	1.42	2.14	3.03
$\gamma$ %	0.33	0.74	2.13	3.21	4.54

Un esfuerzo desviador cíclico de magnitud igual al 90% de la resistencia a la compresión en la prueba estática produce en los ciclos 1 y 100

deformación axial unitaria,  $\epsilon_c$ , de 2.14 y 4.22% respectivamente; que corresponden a deformaciones angulares unitarias,  $\gamma$ , de 3.21 y 6.33%.

La muestra falla en el ciclo de carga 7, cuando la magnitud del esfuerzo desviador cíclico es igual a 114% de la resistencia a la compresión obtenida en la prueba estática. La deformación axial unitaria,  $\epsilon_c$ , en la etapa de compresión de los ciclos 1 y 7 es 3.03 y 4.88%, respectivamente; que corresponden a deformaciones angulares unitarias,  $\gamma$ , de 4.54 y 7.32%.

• Módulo dinámico secante.

El valor del módulo dinámico secante,  $E_{sd}$ , en un ciclo  $n$  se determina como la pendiente de la recta que une los dos puntos extremos de correspondiente lazo de histéresis esfuerzo-deformación (véase Figura II.3). Los valores obtenidos en el primer ciclo de carga de cada prueba son:

Prueba	2	3	4	5	6
$E_{sd}$ , Kg/cm <sup>2</sup>	57	50	36	29	26.5

En la Figura IV.3 se indica la variación del módulo dinámico secante con la deformación axial unitaria. Se observa que decrece al crecer la magnitud de la deformación. La gráfica se construyó con el valor correspondiente al primer ciclo de carga de cada prueba.

Una relación entre el módulo dinámico secante correspondiente al ciclo  $n$  de una prueba donde se aplica una determinada carga cíclica, y un módulo estático representativo obtenido de la prueba triaxial estática, proporciona una idea de la degradación del módulo estático hasta ese ciclo  $n$ , causada por dicha carga cíclica. Para el caso se toma como representativo el módulo secante al 50% del esfuerzo desviador de falla,  $E_{50s}$ ; en la Figura III.6 se observa que la respuesta esfuerzo-deformación de la muestra en la prueba estática es lineal hasta cerca del 60% del esfuerzo desviador de falla.

En la Tabla IV.1 se indican los valores del módulo dinámico secante,  $E_{sd}$ , correspondiente a los ciclos 1 y 100 de las pruebas 2 a 5 y a los ciclos 1 y 6 de la prueba 6, se incluye también la relación entre cada uno de estos valores y el del módulo estático representativo,  $E_{50s}$ .

La gráfica de la Figura IV.5 tiene por ordenadas la relación entre módulos  $E_{sd}/E_{50s}$  y por abscisas la relación entre el esfuerzo desviador cíclico y la resistencia a la compresión obtenida en prueba estática,  $\sigma_{dc}/\sigma_{50}$ . Se observa que:

- En el primer ciclo de carga la relación  $E_{sd}/E_{50s}$  es menor de 1, aún para bajos niveles de carga cíclica. Un esfuerzo desviador cíclico de magnitud igual al 17% de la resistencia a la compresión en prueba estática causa una relación  $E_{sd}/E_{50s} = 0.82$ .
- La relación  $E_{sd}/E_{50s}$  obtenida para el primer ciclo de carga se mantiene constante hasta el ciclo 100, si la magnitud del esfuerzo desviador cíclico no excede el 70% de la resistencia a la compresión en prueba estática. Nótese que para este nivel de carga la relación  $E_{sd}/E_{50s} = 0.5$ .
- En el intervalo de esfuerzo desviador cíclico entre 70 y 90% de la resistencia a la compresión en prueba estática, el módulo estático se reduce hasta un 30% entre los ciclos 1 y 100. En la prueba 5 donde la relación  $\sigma_{dc}/\sigma_{50} = 0.9$  se obtuvo para el ciclo 100 una relación  $E_{sd}/E_{50s} = 0.2$ .
- Al aplicar un esfuerzo desviador cíclico de magnitud igual al 114% de la resistencia a la compresión en prueba estática se obtuvo para el primer ciclo una relación  $E_{sd}/E_{50s} = 0.35$ . La muestra de prueba falló durante la etapa de extensión del ciclo 7.

El valor del módulo de rigidez al cortante,  $G$ , puede obtenerse a partir de la ecuación 2.1:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Asumiendo que la relación de Poisson,  $\nu$ , es igual a 0.5, se tiene para el primer ciclo de cada prueba:

Prueba	2	3	4	5	6
G, Kg/cm <sup>2</sup>	19	16.6	12	9.7	8.8

• Amortiguamiento

La relación de amortiguamiento histerético,  $\beta$ , se determinó a partir de los lazos de esfuerzo-deformación, utilizando la ecuación 2.3:

$$\beta = \frac{1}{4\pi} \frac{A_L}{A_T}$$

Los valores obtenidos para el primer ciclo de cada prueba son:

Prueba	2	3	4	5	6
$\beta$	0.078	0.088	0.112	0.127	0.147

En la Figura IV.4 se indica la variación de la relación de amortiguamiento histerético con la deformación axial unitaria. Se observa que crece con la magnitud de la deformación. Para construir la gráfica se utilizó el valor correspondiente al primer ciclo de carga de cada una de las pruebas. Cuando el lazo de histéresis esfuerzo-deformación es único durante toda la acción cíclica, los ciclos de carga posteriores al primero no causan disipación adicional de energía.

#### IV.1.c VARIACION DE LA PRESION DE PORO

De acuerdo a lo indicado en la Tabla III.3, durante la aplicación de un ciclo de carga se tiene que en la etapa de compresión se presenta un incremento de la presión de poro,  $u_c$ , en tanto que en la etapa de exten-sión se presenta una disminución  $u_e$ , lo que implica una disminución de los esfuerzos efectivos en la etapa de compresión y un incremento de los mismos en la etapa de extensión.

Se hace la hipótesis de que la presión de poro registrada durante la ac-ción cíclica es representativa de toda la muestra de prueba. En la Ta-bla III.4 se indicó que la relación  $u_e/u_c$  es igual a 1.0, tanto para el primero como para el último ciclo de carga, en todas las pruebas. Has-ta un nivel de esfuerzo desviador cíclico igual al 70% de la resistencia a la compresión obtenida en la prueba estática, la relación entre la pre-sión de poro promedio en un ciclo y el esfuerzo desviador cíclico,  $u/\sigma_{dc}$ , es menor de 0.2. Hasta este nivel de carga no se presenta presión de poro remanente al terminar la acción cíclica.

Cuando la magnitud del esfuerzo desviador cíclico es igual al 90% de la resistencia a la compresión obtenida en la prueba estática, la rela-ción entre la presión de poro promedio en un ciclo y el esfuerzo desvia-dor cíclico,  $u/\sigma_{dc}$ , varía entre 0.27 en el ciclo 1 y 0.30 en el ciclo 100. Al final de la carga cíclica se tiene una presión de poro remanen-te igual al 15% de la magnitud del esfuerzo desviador cíclico.

Un esfuerzo desviador cíclico de magnitud igual al 114% de la resistencia a la compresión obtenida en prueba estática genera en el primer ciclo de carga una presión de poro promedio igual al 82% de la magnitud de dicho esfuerzo. La muestra falla al aplicarse el ciclo 7 cuando la relación entre la presión de poro y el esfuerzo desviador cíclico,  $u/\sigma_{dc}$ , es de 1.30.

## IV.2 COMPORTAMIENTO POST-CICLICO

La Figura IV.6 proporciona una idea general del comportamiento post-cíclico de las muestras de prueba, en ella se reúnen las gráficas esfuerzo-deformación presentadas individualmente en las Figuras III.6 y III.12 a III.15. La gráfica ① se obtuvo de la prueba estática y corresponde a la línea de trazos entre los puntos ① y ② de la Figura III.1. Las gráficas ② a ⑤ se obtuvieron de las pruebas 2 a 5 y corresponden a la línea de trazos entre los puntos ③ y ④ de la Figura III.1. Algunas observaciones iniciales con respecto a la Figura IV.6:

- Esfuerzo desviador de falla,  $\sigma_s$ : En la prueba estática es de 0.71 Kg/cm<sup>2</sup>. En las pruebas 2 a 5 varía entre 0.56 y 0.66 Kg/cm<sup>2</sup>.
- Deformación axial unitaria de falla,  $\epsilon_s$ : En la prueba estática es de 3.71%. En las pruebas 2 a 5 varía entre 3.70 y 4.35%.

### IV.2.a RELACION ESFUERZO DEFORMACION

La respuesta esfuerzo-deformación de las muestras sometidas previamente a carga cíclica difiere de la presentada por la muestra llevada a la falla en iguales condiciones (de carga y drenaje) pero sin aplicación previa de carga cíclica. En la Figura IV.6, al comparar cada una de las gráficas ② a ⑤ con la gráfica ① se observan diferencias aún para bajos niveles de carga cíclica.

Una relación entre el módulo secante post-cíclico al 50% del esfuerzo desviador de falla obtenido en la prueba estática,  $E_{50p}$ , y el módulo estático representativo al 50% del esfuerzo desviador de falla obtenido de la prueba estática,  $E_{50s}$ , proporciona una idea de la reducción del módulo estático representativo causada por dicha carga cíclica. En la Tabla IV.2 se incluye el valor del módulo secante post-cíclico,  $E_{50p}$ , y de la relación  $E_{50p}/E_{50s}$  para las muestras de las pruebas 2 a 5.

La gráfica de la Figura IV.7 tiene por ordenadas la relación entre módulos,  $E_{50p}/E_{50s}$ , y por abscisas la relación entre el esfuerzo desviador cíclico y la resistencia a la compresión obtenida en la prueba estática,  $\sigma_{dc}/\sigma_{50}$ . Se aprecia que la degradación del módulo estático representativo,  $E_{50s}$ , crece con la magnitud de la carga cíclica.

- Se observa notable reducción del módulo estático representativo,  $E_{50s}$ , aún por bajos niveles de carga cíclica. 100 ciclos de esfuerzo desviador de magnitud igual al 17% de la resistencia a la compresión en prueba estática causan una reducción de 54% en el módulo estático  $E_{50s}$ . Igual reducción se obtiene con 100 ciclos de esfuerzo desviador de magnitud igual al 35% de la resistencia a la compresión en prueba estática. Hasta este nivel de carga la magnitud del esfuerzo desviador cíclico  $\sigma_{dc}$  es menor que la del esfuerzo desviador estático  $\sigma_{ds}$ .
- 100 ciclos de esfuerzo desviador de magnitud igual al 70% de la resistencia a la compresión en prueba estática causan una relación  $E_{50p}/E_{50s} = 0.42$ .
- Cuando los 100 ciclos son de un esfuerzo desviador de magnitud comprendida entre el 70 y 90% de la resistencia a la compresión en prueba estática, la degradación del módulo estático representativo,  $E_{50s}$ , es más brusca. La relación  $E_{50p}/E_{50s}$  varía entre 0.42 y 0.19.

#### IV.2.b RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE

Una relación entre la resistencia al esfuerzo cortante,  $S_p$ , presentada por una muestra después de aplicarle una determinada carga cíclica y la resistencia al esfuerzo cortante,  $S_o$ , presentada por la muestra llevada a la falla en iguales condiciones (de carga y drenaje) pero sin previa aplicación de carga cíclica, proporciona una idea del efecto de dicha carga cíclica en la resistencia al esfuerzo cortante.

La Tabla IV.3 incluye el valor de la resistencia al esfuerzo cortante post-cíclica,  $S_p$ , y de la relación  $S_p/S_o$  para las muestras de las

pruebas 2 a 5. La gráfica de la Figura IV.8 tiene por ordenadas la relación entre resistencias,  $S_p/S_0$ , y por abscisas la relación entre el esfuerzo desviador cíclico y la resistencia a la compresión obtenida en la prueba estática,  $\sigma_{dc}/\sigma_{50}$ . Se observa que:

- La resistencia al esfuerzo cortante no es muy sensible a la carga cíclica. La aplicación de 100 ciclos de esfuerzo desviador de magnitud igual al 17% de la resistencia a la compresión en prueba estática causa una reducción de 8%. Igual reducción se presenta hasta un nivel de esfuerzo desviador cíclico del 70% de la resistencia a la compresión en prueba estática.
- La aplicación de 100 ciclos de un esfuerzo desviador de magnitud comprendida entre el 70 y 90% de la resistencia a la compresión en prueba estática, causa una reducción de la resistencia al esfuerzo cortante entre 8 y 22%. A este nivel de carga se tiene presión de poro remanente al terminar la acción cíclica. La deformación axial unitaria de las muestras varía entre 40 y 125% de la deformación axial unitaria de falla en la muestra de la prueba estática.
- La aplicación de un esfuerzo desviador cíclico de 114% de la resistencia a la compresión en prueba estática causa falla de la muestra durante el ciclo 7. La presión de poro generada en el primer ciclo de carga es igual al 82% de la magnitud de dicho esfuerzo; la falla se presenta cuando la relación entre la presión de poro y el esfuerzo desviador cíclico,  $u/\sigma_{dc}$ , es igual a 1.3. Durante esta prueba la deformación axial unitaria de la muestra varió entre 83 y 131% de la deformación axial unitaria de falla en la muestra de la prueba estática.

Prueba		2	3	4	5	6
$E_{sd}$ , Kg/cm <sup>2</sup>	ciclo 1	57	50	36	29	26.5
	ciclo 100	57	50	36	15	18.0 (ciclo 6)
$\frac{E_{sd}}{E_{50s}}$	ciclo 1	0.77	0.68	0.49	0.39	0.36
	ciclo 100	0.77	0.68	0.49	0.20	0.24 (ciclo 6)

$\sigma_{dc}$ Kg/cm <sup>2</sup>	0.125	0.250	0.490	0.630	0.810
$\sigma_{dc}/\sigma_{so}$	0.176	0.352	0.690	0.887	1.141

- Donde:
- $E_{sd}$  = Módulo dinámico secante.
  - $E_{50s}$  = Módulo estático al 50% del esfuerzo desviador de falla, obtenido en la prueba estática ( $E_{50s} = 74 \text{ Kg/cm}^2$ )
  - $\sigma_{dc}$  = Esfuerzo desviador cíclico.
  - $\sigma_{so}$  = Resistencia a la compresión obtenida en la prueba estática ( $\sigma_{so} = 0.71 \text{ Kg/cm}^2$ ).

Tabla IV.3. Valores del módulo dinámico secante.

Prueba	2	3	4	5
$E_{5op}$ Kg/cm <sup>2</sup>	34	33	31	13.7
$E_{5op}/E_{5os}$	0.46	0.46	0.42	0.19

$\sigma_{dc}$ Kg/cm <sup>2</sup>	0.125	0.250	0.490	0.630
$\sigma_{dc}/\sigma_{so}$	0.176	0.352	0.690	0.887

Donde,

$E_{5os}$  : Módulo secante al 50% del esfuerzo desviador de falla obtenido en la prueba estática CU, ( $E_{5os} = 74 \text{ Kg/cm}^2$ ).

$E_{5op}$  : Módulo secante post-cíclico, al 50% del esfuerzo desviador de falla de la prueba estática.

$\sigma_{dc}$  : Esfuerzo desviador cíclico.

$\sigma_{so}$  : Resistencia a la compresión obtenida en la prueba estática CU, ( $\sigma_{so} = 0.71 \text{ Kg/cm}^2$ )

Tabla IV.2 . Valores del módulo secante post-cíclico.

Prueba	2	3	4	5
$S_p$ , Kg/cm <sup>2</sup>	0.33	0.33	0.33	0.28
$S_p/S_o$	0.93	0.93	0.93	0.79

$\sigma_{dc}$ Kg/cm <sup>2</sup>	0.125	0.250	0.490	0.630
$\sigma_{dc}/\sigma_{so}$	0.176	0.352	0.690	0.887

Donde,

$S_p$  : Resistencia al esfuerzo cortante, post-cíclica.

$S_o$  : Resistencia al esfuerzo cortante, obtenida en la prueba estática CU ( $S_o = 0.35$  Kg/cm<sup>2</sup>).

$\sigma_{dc}$  : Esfuerzo desviador cíclico.

$\sigma_{so}$  : Resistencia a la compresión obtenida en la prueba estática CU ( $\sigma_{so} = 0.71$  Kg/cm<sup>2</sup>).

Tabla IV.3 .. Valores de la resistencia al esfuerzo cortante, post cíclica.

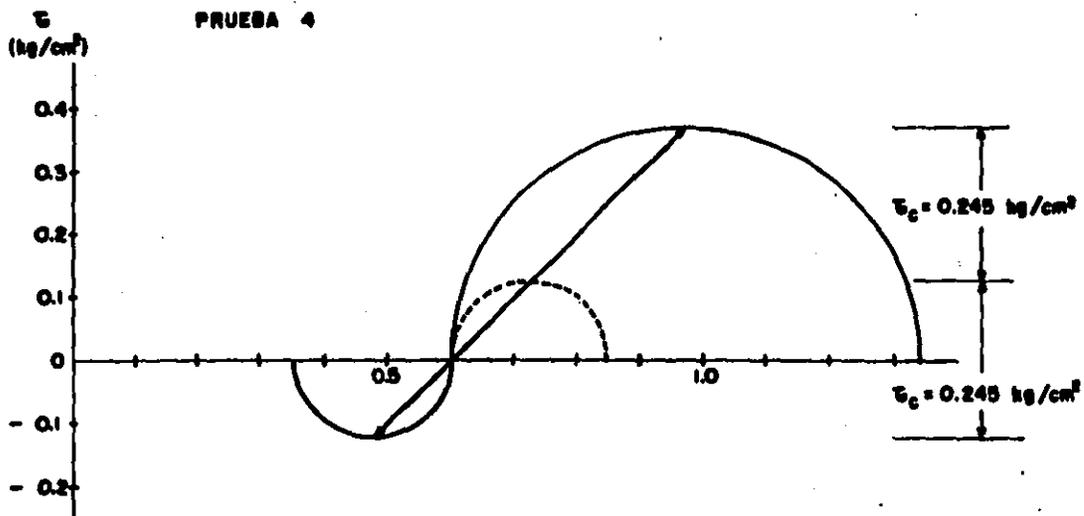
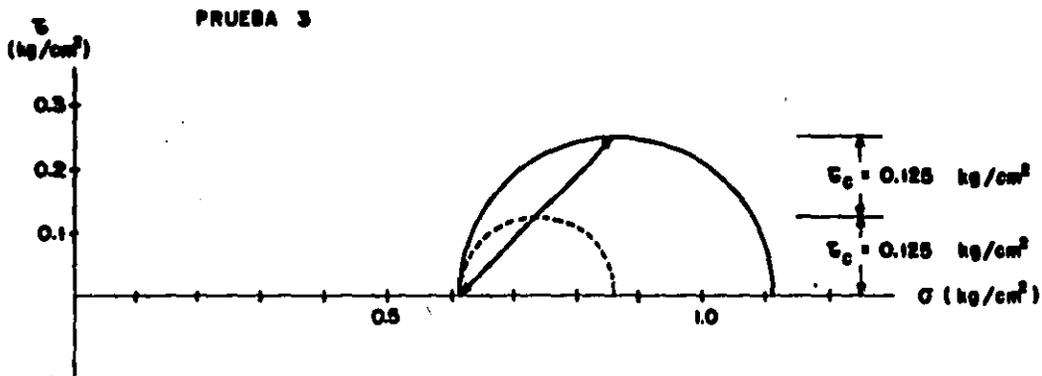
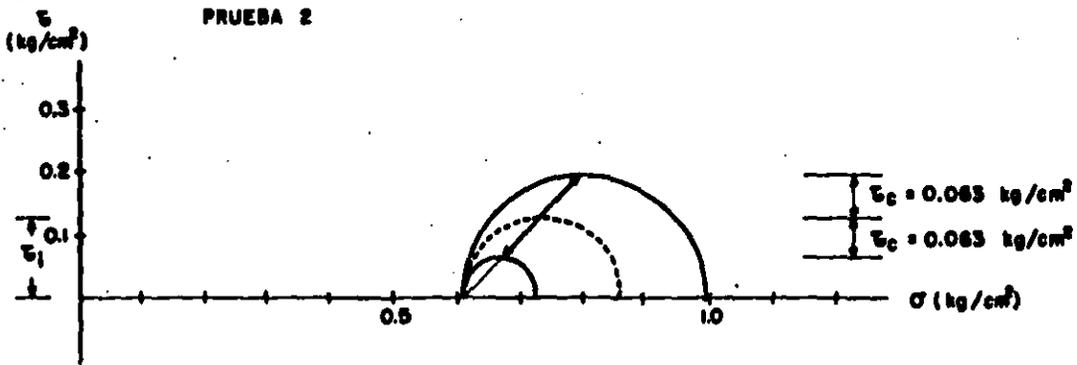
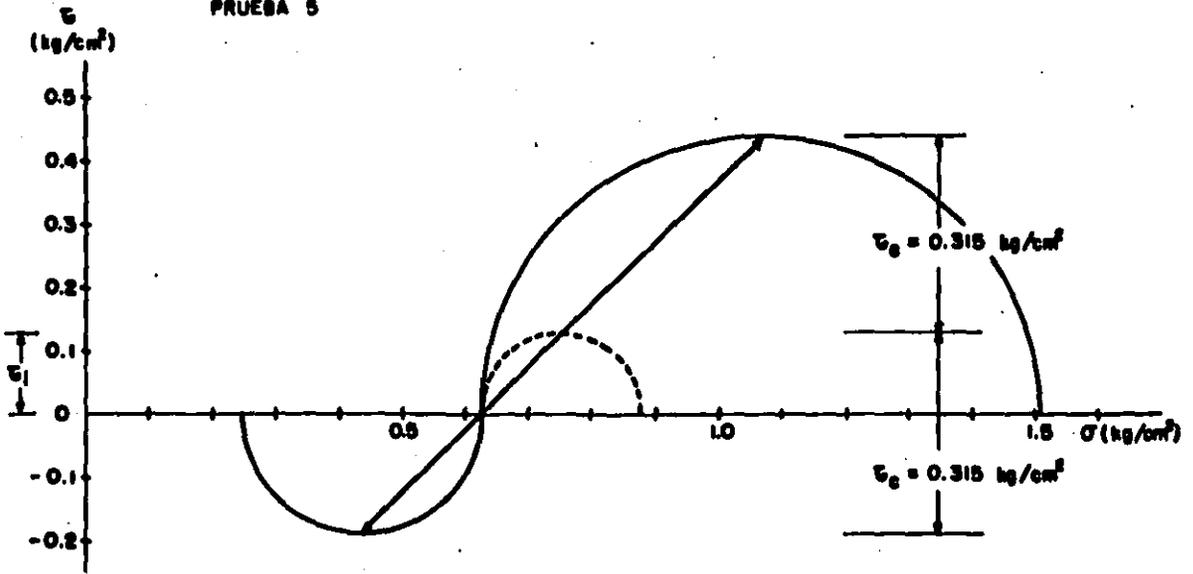


FIG. IX. 1. Círculos de Mohr - Esfuerzos totales - aplicación de carga cíclica - pruebas 2, 3, 4.

PRUEBA 5



PRUEBA 6

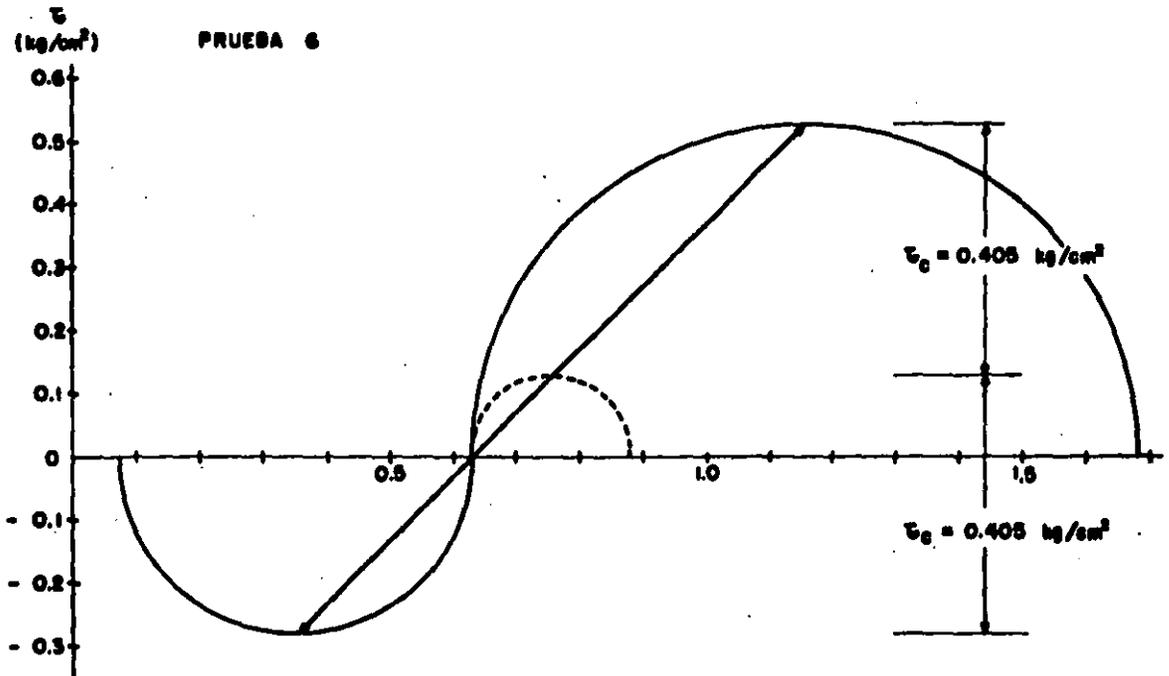


FIG. IV. 2. Círculos de Mohr. Esfuerzos totales - Aplicación de carga cíclica.- pruebas 5 y 6.

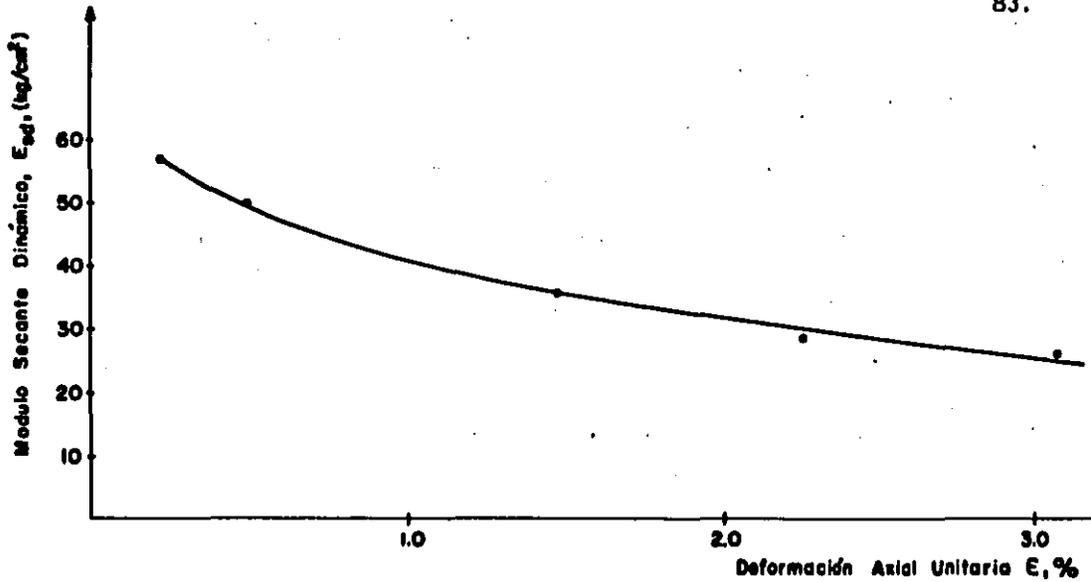


Fig IV.3 Variación del módulo dinámico secante con la magnitud de la deformación axial

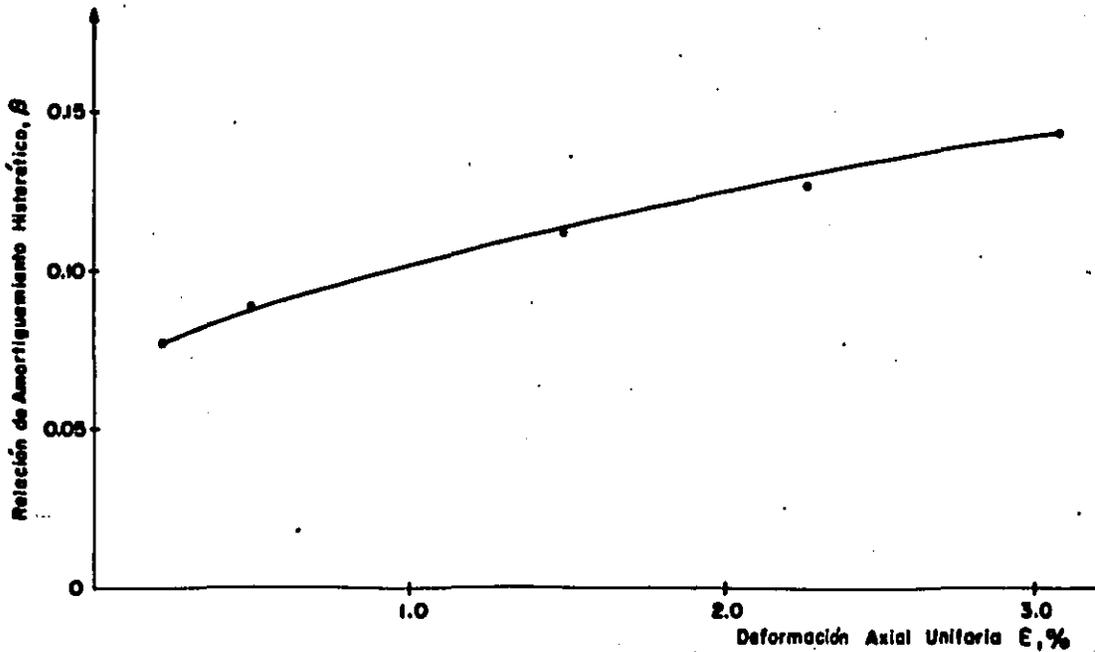


Fig IV.4 Variación de la relación de amortiguamiento histerético con la magnitud de la deformación axial

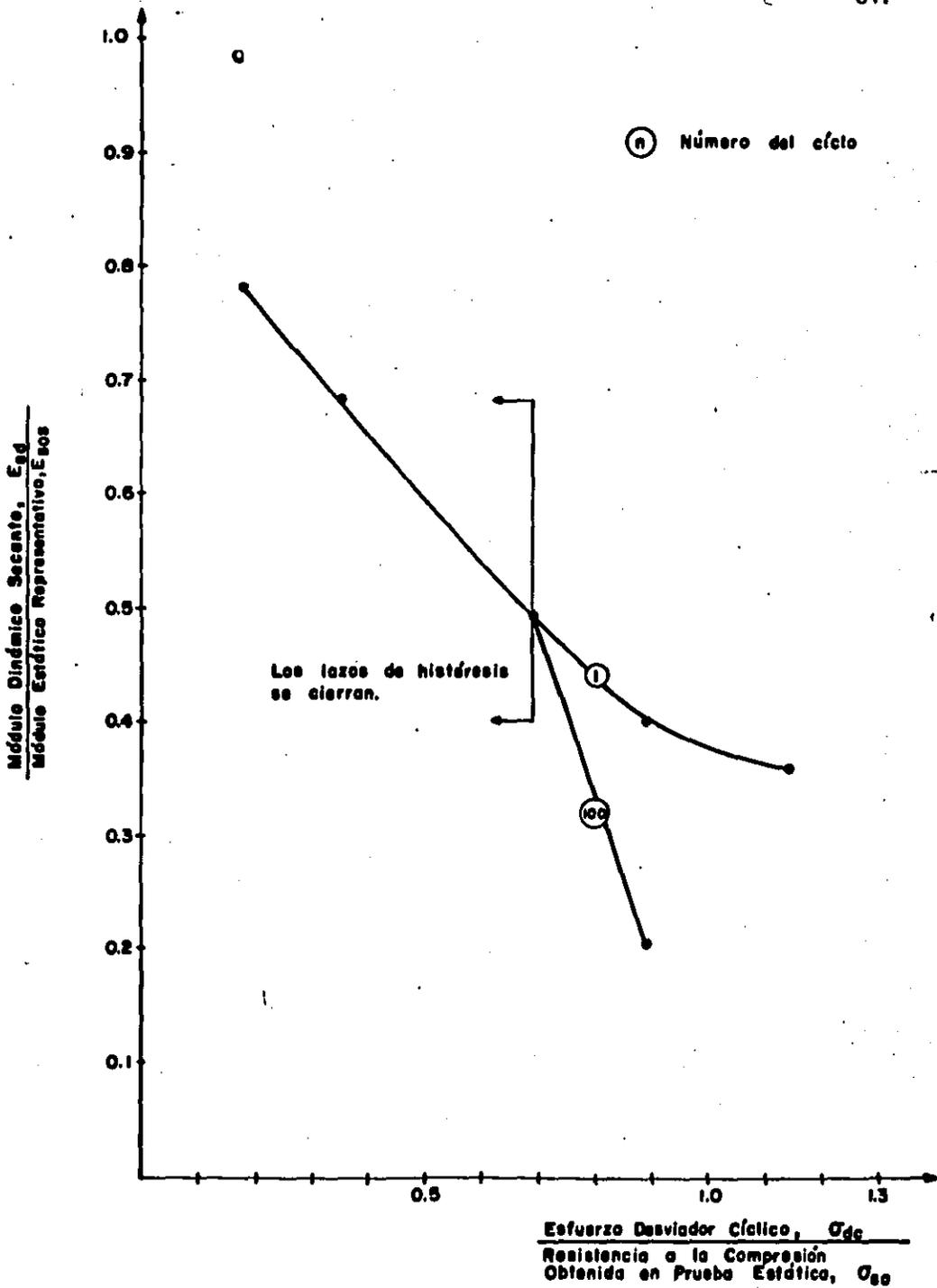


Fig IV.5 Variación del módulo dinámico secante con la magnitud de la carga cíclica

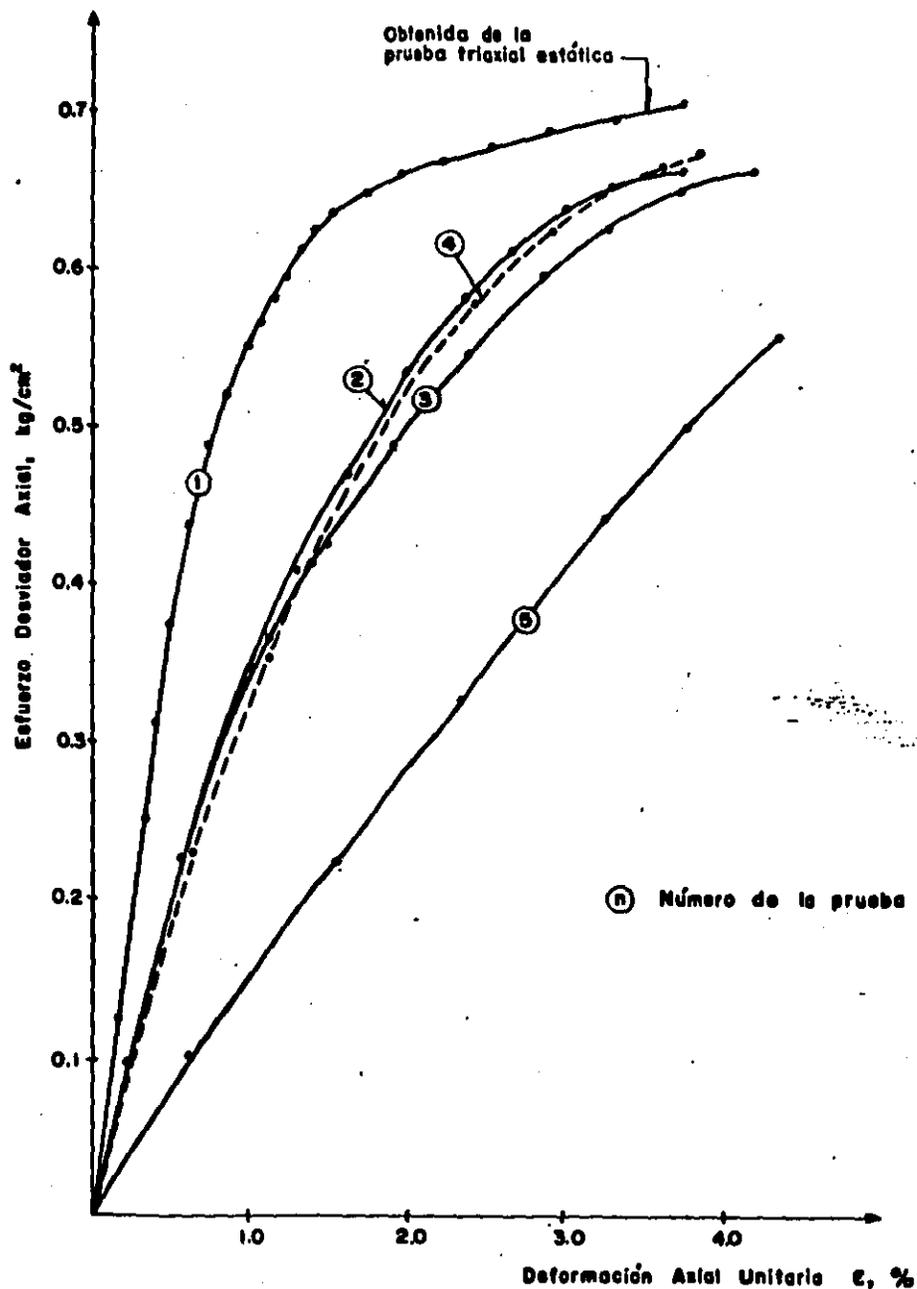


Fig IV.6 Conjunto de gráficas esfuerzo-deformación axial

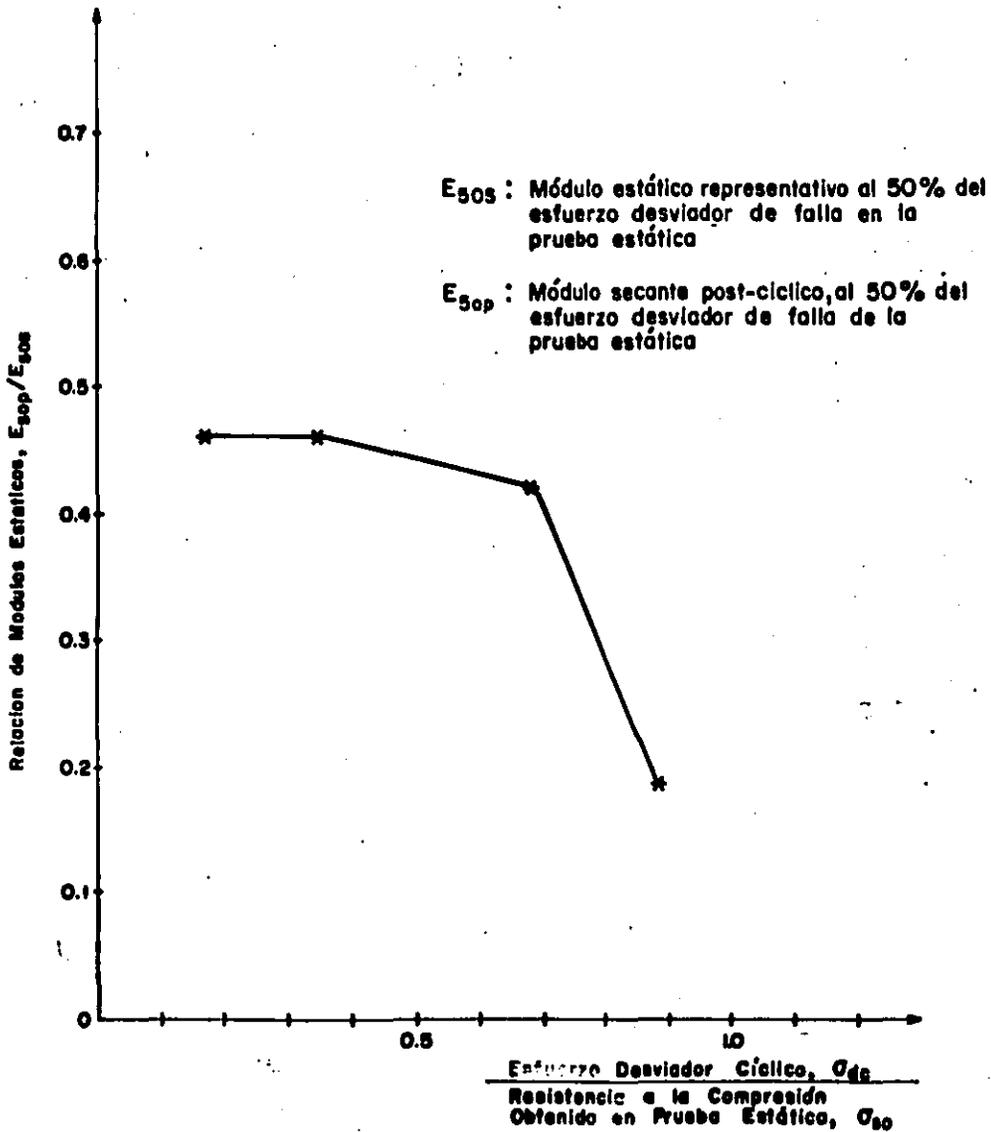


Fig IV.7 Efecto de la carga cíclica en módulo estático representativo

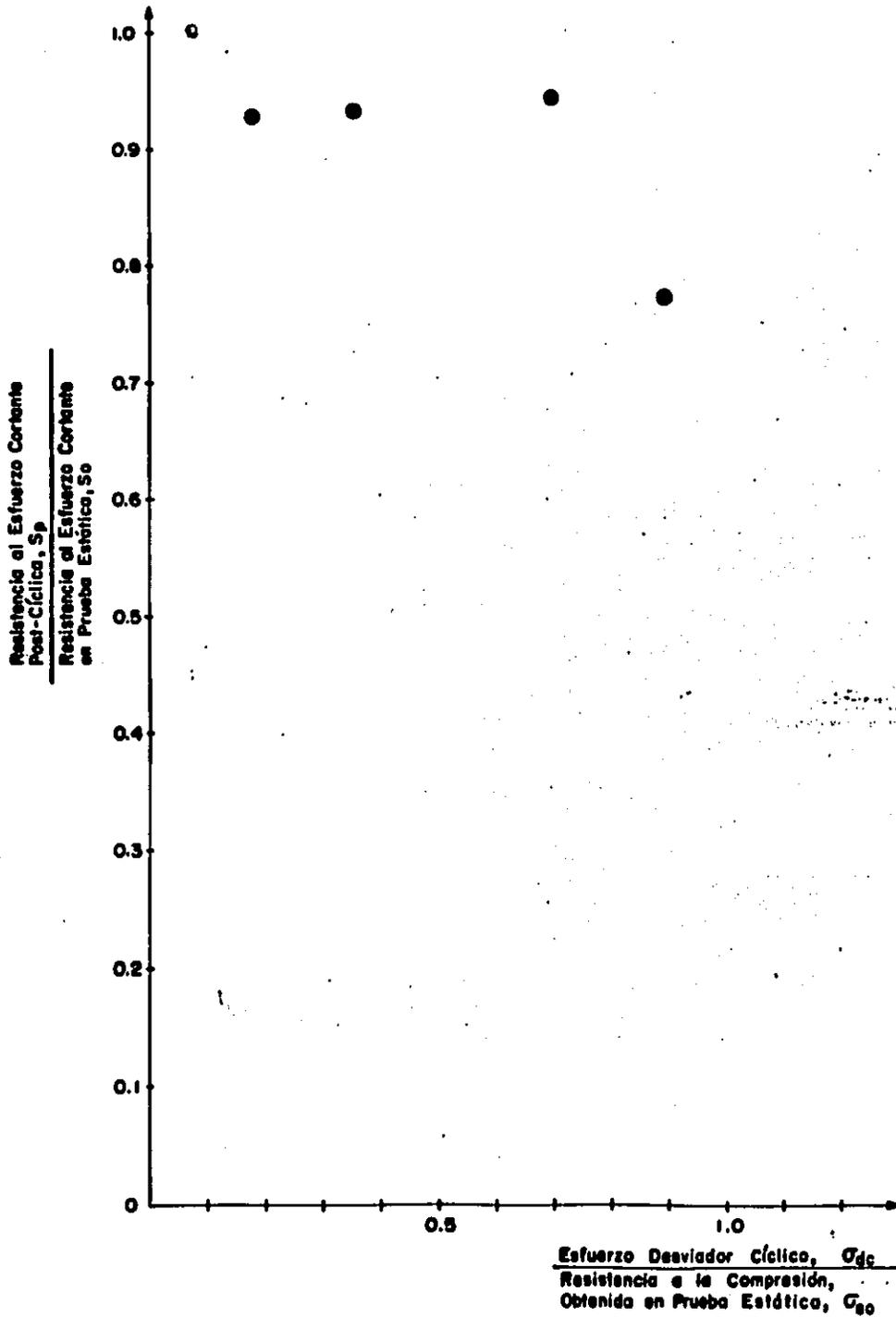


Fig IV.8 Efecto de la carga cíclica en la resistencia al esfuerzo cortante

## V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como se señaló en el capítulo introductorio, con este trabajo se inicia un amplio programa de investigación sobre el comportamiento de la arcilla de la Ciudad de México ante la acción de carga cíclica, llevado a cabo por el Grupo de Dinámica de Suelos de la DEPMI-UNAM. Al revisar la literatura técnica sobre el tema se encontraron varios informes de trabajos realizados en arcillas de otras localidades, pero ninguno en muestras de arcilla de la Ciudad de México. Los resultados obtenidos en otras arcillas coinciden en indicar que los principales factores que determinan el comportamiento de estos suelos ante carga cíclica son: Las características de la arcilla, la condición de esfuerzos sobre la cual se aplica, la magnitud de la carga, el número de ciclos aplicados, la frecuencia y la forma de la onda de carga.

Como parte experimental de esta tesis se desarrolló un programa de pruebas triaxiales cíclicas que tiene como variable de magnitud del esfuerzo desviador cíclico, los otros factores son constantes y corresponden a uno de los muchos casos que pueden analizarse. El mismo programa

proporcionará resultados diferentes al variar cualquiera de los factores considerados como constantes. Por lo anterior, las conclusiones que se indican a continuación responden a un caso particular y no pueden generalizarse.

Para las muestras de suelo ensayado, la condición inicial de esfuerzos, las características de la carga cíclica considerada, y las condiciones de la prueba se tiene que:

- Comportamiento durante la carga cíclica.
  - a. La relación esfuerzo-deformación de las muestras durante la aplicación de carga cíclica, en cámara triaxial, difiere de la obtenida al cargarse estática, axial y monotónicamente. La diferencia se manifiesta aún para bajos niveles de carga y crece con la magnitud de la misma.
  - b. La respuesta de las muestras de suelo ante acción cíclica es elástica hasta niveles de esfuerzo desviador cíclico igual a la resistencia a la compresión obtenida en prueba estática. La relación entre el desplazamiento axial de la probeta en las etapas de extensión y de compresión,  $\delta_e/\delta_c$ , es 0.95 en promedio durante cada uno de los 100 ciclos de carga. No se descarta el posible remoldeo del suelo durante el muestreo, labrado y montaje del espécimen.
  - c. Un esfuerzo desviador cíclico de magnitud igual al 70% de la resistencia a la compresión obtenida en la prueba estática, limita dos formas diferentes de comportamiento del suelo durante la acción cíclica:

Si la magnitud del esfuerzo desviador es menor de este valor, el deterioro de la estructura es pequeño:

- El módulo dinámico secante obtenido en el primer ciclo de carga permanece constante durante los 99 ciclos restantes.

- Los ciclos de carga posteriores al primero no causan disipación adicional de energía. La relación de amortiguamiento histerético es menor de 11%.
- La relación entre la presión de poro y el esfuerzo desviador cíclico aplicado es menor de 0.2, y al final de la acción cíclica no se tiene presión de poro remanente.

Si la magnitud del esfuerzo desviador es mayor se incrementa notablemente el deterioro de la estructura del suelo:

- El valor del módulo dinámico secante se reduce durante la acción cíclica.
- La relación entre la presión de poro generada y el esfuerzo desviador cíclico aplicado se incrementa alcanzando valores superiores a 1.0. Al final de la acción cíclica se tiene presión de poro remanente.
- Esfuerzos desviadores cíclicos de magnitud mayor del 90% de la resistencia a la compresión obtenida en la prueba estática causan falla durante la acción cíclica.

• Comportamiento post-cíclico.

Las muestras a las que se aplicó esfuerzos desviadores cíclicos hasta del 90% de la resistencia a la compresión obtenida en la prueba estática no alcanzaron la falla durante la acción cíclica. Inmediatamente después de terminar la aplicación de dicha carga se llevaron a la falla, en condición no drenada, aplicando incrementos de carga axial, estática y monotónicamente.

- a. La respuesta esfuerzo-deformación post-cíclica difiere de la obtenida en la muestra de la prueba estática. Las diferencias se acentúan al crecer la magnitud de la carga cíclica.

b. La reducción en la resistencia al esfuerzo cortante depende de la magnitud del esfuerzo desviador cíclico aplicado:

- Si es menor del 70% de la resistencia a la compresión obtenida en la prueba estática, dicha reducción es de sólo el 8%.
- En el intervalo entre el 70 y 90% de la resistencia a la compresión obtenido en la prueba estática, la reducción varía entre el 8 y el 22%.

### RECOMENDACIONES

Los resultados del programa de pruebas indican que a partir de un esfuerzo desviador cíclico de magnitud igual al 90% de la resistencia a la compresión obtenida en prueba estática, se presenta una brusca degradación del módulo estático representativo y la falla de la muestra se produce durante la aplicación de carga cíclica. Es interesante conocer con mayor detalle el comportamiento del suelo en el intervalo de esfuerzo desviador cíclico comprendido entre el 90 y el 115% de la resistencia a la compresión en prueba estática, para lo cual se recomienda realizar pruebas adicionales.

El comportamiento de la arcilla de la Ciudad de México ante la acción de carga cíclica es un interesante y extenso campo de investigación. Para llegar a alguna generalización es necesario realizar distintos programas de pruebas.

## REFERENCIAS

- Annaki, M. (1975), Liquefaction of Sands in Triaxial Test Using Uniform and Irregular Cyclic Loading, PhD Tesis, Dept. of Civil Engineering, California Univ., Los Angeles. pp. 34-38
- Díaz Rodríguez, J.A. (1980), Efectos Sísmicos en Suelos Granulares, Apuntes para el Curso de Dinámica de Suelos, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado, UNAM, México, D.F.
- Ishihara, K. y Yasuda, S. (1980), Cyclic Strengths of Undisturbed Cohesive Soils of Western Tokio, International Symposium on Soils under Cyclic and Transient Loading, Swansea, pp. 57-66
- Seed, H.B. y Chan, C.K. (1966), Clay Strength under Earthquake Loading Conditions, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, American Society of Civil Engineers, Vol. 92, No. SM2, pp. 53-78
- Seed, H.B. y Lee, K.L. (1966), Liquefaction of saturated Sands during Cyclic Loading, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, American Society of Civil Engineers, Vol. 92. No. SM6, pp. 105-134
- Silver, M.L. (1977), Laboratory Triaxial Testing Procedures to Determine the Cyclic Strength of Soils, Dept. of Materials Engineering, Illinois University, Chicago
- Thiers, G.R. (1965), The behavior of Saturated Clay under Seismic Loading Conditions, PhD Tesis, Dept. of Civil Engineering, California University, Berkeley

- Thiers, G.R. y Seed, H.B. (1968), Cyclic Stress-Strain characteristics of Clay, Journal of Soil Mechanics and Foundations Division. American Society of Civil Engineers, Vol. 94, No. SM2, pp. 555-569
- Whitman, R.V. (1957), The Behavior of Soils under Transient Loading, Proc. 4th. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Londres, Vol. I, pp. 207-210
- Zeevaert, L. (1952), Estratigrafía y Problemas de la Ingeniería de los depósitos de Arcilla Lacustre de la Ciudad de México, Congreso Científico Conmemorativo del IV Centenario de la UNAM y Revista Mexicana de Ingeniería y Arquitectura, Vol. XXX, No. 7, 8 y 9, pp. 155-176.
- Zeevaert, L. (1953), Ratio of Horizontal to Vertical Pressure of Natural Unconsolidated Sedimentary Deposits, Proc. 3th. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. III, Pag. 113, Zurich, Suiza
- Zeevaert, L. (1966), Propiedades cuantitativas de los Materiales del Subsuelo, Apuntes de Mecánica de Suelos, Vol. II, Segundo cuaderno, Tomo I, Facultad de Ingeniería, UNAM, México, D.F.