



01163
1
201

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
Facultad de Ingeniería

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE INTERFACE
ARCILLA - CONCRETO

T E S I S

PRESENTADA A LA DIVISION 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)

OSCAR ANDRES CUANALO CAMPOS

CIUDAD UNIVERSITARIA
JULIO 1993

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



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.

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE INTERFACE ARCILLA - CONCRETO

I N D I C E

RESUMEN

NOTACION

1. INTRODUCCION

1.1 ANTECEDENTES

- . Sismicidad
- . Estratigrafía

1.2 OBJETIVOS

1.3 ALCANCES

- . Figuras

2. APARATO DE CORTE SIMPLE CICLICO

2.1 DESCRIPCION DEL APARATO

- . Equipo neumático
- . Equipo de confinamiento
- . Equipo de carga
- . Equipo hidráulico
- . Equipo electrónico de instrumentación y registro de datos
- . Figuras

3. APARATO DE CORTE DIRECTO

3.1 DESCRIPCION DEL APARATO

- . Anillos de corte
- . Figuras

4. ENSAYES DE LABORATORIO EN EL APARATO DE CORTE SIMPLE CICLICO

4.1 METODO DE PRUEBA

- . Labrado y montaje de especímenes
- . Aplicación de presión confinante
- . Saturado por contrapresión
- . Consolidación
- . Aplicación de esfuerzo cortante

4.2 RESULTADOS DE LABORATORIO

- . Curvas esfuerzo cortante vs deformación angular
- . Curvas incremento de presión de poro vs deformación angular

4.3 INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS DE LABORATORIO

4.4 DETERMINACION DE LAS PROPIEDADES DINAMICAS

- . Módulo de rigidez al corte G y amortiguamiento del material D
- . Número de ciclos crítico
- . Incremento de la presión de poro dinámica
- . Deformación angular
- . Gráficas tridimensionales

4.5 INFLUENCIA DEL NIVEL DE DEFORMACION EN LAS PROPIEDADES DINAMICAS.

4.6 MODELACION Y DISCUSION DEL COMPORTAMIENTO OBSERVADO

- . Degradación del módulo de rigidez G con el número de ciclos
- . Número de ciclos crítico
- . Número de ciclos a la falla
- . Degradación del módulo de rigidez G con la deformación angular

- . Tablas
- . Figuras

5. ENSAYES DE LABORATORIO EN EL APARATO DE CORTE DIRECTO, MUESTRAS INALTERADAS

5.1 METODO DE PRUEBA

- . Labrado y montaje de especímenes
- . Consolidación
- . Aplicación de esfuerzo cortante

5.2 RESULTADOS DE LABORATORIO

- . Curvas esfuerzo cortante vs deformación horizontal

5.3 INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS DE LABORATORIO

5.4 DETERMINACION DE LAS PROPIEDADES DINAMICAS

- . Rigidez y amortiguamiento del material
- . Deformación horizontal
- . Número de ciclos crítico

5.5 DISCUSION DEL COMPORTAMIENTO DE INTERFACE ENTRE ARCILLA Y CONCRETO.

- . Modelos de interface estáticos
- . Modelos de interface dinámicos

- . Tablas
- . Figuras

6. ENSAYES DE LABORATORIO EN EL APARATO DE CORTE DIRECTO, MUESTRAS REMOLDEADAS

6.1 METODO DE PRUEBA

- . Labrado y montaje de los especímenes
- . Consolidación
- . Aplicación de esfuerzo cortante

6.2 RESULTADOS DE LABORATORIO

- . Curvas esfuerzo cortante vs deformación horizontal

6.3 INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS DE LABORATORIO

- . Tablas
- . Figuras

7. ENSAYES DE LABORATORIO EN EL APARATO DE CORTE DIRECTO, MUESTRAS INALTERADAS EN PRUEBAS DE INTERFACE CON CONCRETO TRATADO CON DIVERSOS RECUBRIMIENTOS

7.1 METODO DE PRUEBA

- . Labrado y montaje de los especímenes
- . Consolidación
- . Aplicación de esfuerzo cortante

7.2 RESULTADOS DE LABORATORIO

- . Curvas esfuerzo cortante vs deformación horizontal
- . Curvas esfuerzo cortante máximo vs presión vertical
- . Curvas coeficiente de adherencia vs presión vertical
- . Curvas coeficiente de adherencia vs esfuerzo cortante inalterado

7.3 INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS DE LABORATORIO

- . Tablas
- . Figuras

8. CONCLUSIONES

. REFERENCIAS

. ANEXOS

- ANEXO A. Calibración de los transductores
- ANEXO B. Determinación del módulo de rigidez G y del amortiguamiento del material D .
- ANEXO C. Deducción de la fórmula para corregir el área de la muestra, en pruebas de corte directo.
- ANEXO D. Deformación angular en un espécimen en corte simple y corte directo.

R E S U M E N

A partir de los sismos de septiembre de 1985, se planteó la necesidad de revisar y mejorar los criterios de diseño y construcción de las cimentaciones sujetas a solicitaciones dinámicas. En esta evaluación son partes muy importantes entre otras, el estudio de las propiedades dinámicas de la arcilla del valle de México y el análisis del comportamiento dinámico en la interface suelo-estructura para estimar adecuadamente las solicitaciones debidas a efectos sísmicos.

En este trabajo se estudió el comportamiento dinámico de muestras de arcilla típicas de la zona lacustre del valle de México, utilizando el aparato de corte simple ciclico y aplicando a los especímenes de suelo esfuerzos cortantes grandes y deformaciones angulares altas.

Adicionalmente con el aparato de corte directo se realizaron pruebas dinámicas de interface entre arcilla-concreto para simular el comportamiento de cimentaciones profundas a base de pilotes de fricción en arcilla blanda y comparar los resultados experimentales con los reportados en la literatura al respecto. Se realizaron también pruebas de interface entre arcilla remoldeada y concreto y, finalmente pruebas entre arcilla inalterada y concreto tratado con diversos recubrimientos.

NOTACION.

A/A	Ensayes de corte directo en arcilla inalterada
A/C	Ensayes de corte directo en interfaces arcilla-concreto
C	Cohesión
Cj	Matriz de rigideces en la interface
Cn	Rigidez normal en la interface
Cs	Rigidez cortante en la interface
Cv	Rigidez equivalente vertical
Cp	Contrapresión
CU	Prueba consolidada no drenada
D _o	Amortiguamiento del material en corte simple ciclico
D'	Amortiguamiento del material en corte directo
E	Módulo de Young
e	Relación de vacios, base de los logaritmos naturales
f	Frecuencia de aplicación de carga ciclica
fn	Frecuencia de resonancia
fx	Fuerza horizontal
fz	Fuerza vertical
G _o	Módulo de rigidez en corte simple
G'	Módulo de rigidez en corte directo, en kg/cm ² /cm
Gw	Grado de saturación
Hz	Hertz
Ko	Coefficiente de presión de tierra en reposo
Ncic.	Número de ciclos
Ncrit.	Número de ciclos crítico
Nf	Número de ciclos a la falla
psi	Libras por pulgada cuadrada
Ss	Densidad de solidos
t	Parámetro de degradación
W	Contenido natural de agua

α	Coefficiente de adherencia
γ	Deformación angular, en %
γ_{pp}	Deformación angular pico a pico
γ_r	Deformación angular de referencia (τ_{est}/G_1)
γ_m	Peso volumétrico
δr	Vector de desplazamiento relativo en interface
δn	Deformación o desplazamiento normal en interface
δs	Deformación o desplazamiento cortante en interface
δx	Desplazamiento o deformación horizontal
δz	Deformación vertical
σ_c	Presión confinante
σ_z	Esfuerzo vertical
σ'_c	Presión horizontal efectiva
σ'_v	Presión vertical efectiva
σ_1	Esfuerzo principal mayor
σ_3	Esfuerzo principal menor
σ'_{oct}	Esfuerzo octaédrico de consolidación
τ	Esfuerzo cortante
τ_{cic}	Esfuerzo cortante cíclico
τ_{est}	Esfuerzo cortante estático
$\tau_{m\acute{a}x}$	Esfuerzo cortante máximo
τ_{red}	Esfuerzo cortante residual o último
ϕ	Angulo de fricción interna

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCION

La ingeniería de cimentaciones en la zona lacustre de la ciudad de México plantea una situación única debido a los siguientes factores: la baja resistencia al corte y la alta compresibilidad de los estratos arcillosos, el hundimiento regional originado por el bombeo de agua y la frecuencia e intensidad de los sismos que la afectan.

En los sismos de septiembre de 1985 las fallas atribuibles a la cimentación provocaron el colapso o daño irreparable en el 13% de los edificios afectados por el temblor; de estos últimos una proporción alarmantemente alta se debió a fallas en cimentaciones resueltas con pilotes de fricción (Rosenblueth y Ovando 1990). El mal comportamiento se tradujo en asentamientos totales y diferenciales excesivos en cimentaciones de tipo superficial, incluyendo zapatas, losas y cajones; y en desplomes o colapso total en construcciones pesadas o esbeltas con cimentación profunda a base de pilotes de fricción.

Dentro de las investigaciones prioritarias a partir de dichos sismos, están las que tienen por objeto estudiar el comportamiento dinámico de los suelos. En particular es de suma importancia el estudio de las propiedades dinámicas de la arcilla del valle de México. Sobre este tema se han realizado una gran cantidad de estudios en años recientes; sin embargo, es poco lo que se sabe sobre el comportamiento de la arcilla del valle de México en contacto con otras estructuras como zapatas, cajones de cimentación, pilas y pilotes; es decir, sobre el comportamiento de la interface suelo-estructura. Menos se sabe sobre el comportamiento de estas interfaces bajo condiciones dinámicas. Este problema es especialmente relevante al analizar el comportamiento de pilotes de fricción durante temblores.

1.1 ANTECEDENTES

Sismicidad. Una buena parte de la República Mexicana está ubicada en una zona de alta sismicidad ya que en la costa del Pacífico se generan movimientos bruscos en la corteza terrestre a lo largo de fallas que separan las diferentes placas que la forman. La placa de Cocos, localizada frente a las costas mexicanas del Pacífico, tiende a penetrar debajo de la placa de Norteamérica, fenómeno que se conoce como subducción.

A lo largo de la zona de subducción se acumulan grandes cantidades de energía que al liberarse provocan muchos de los fuertes sismos que afectan a nuestro país. Existen temblores generados por otras fuentes que también afectan a la ciudad de México: los locales, que se originan en el interior del valle de México o sus inmediaciones, los que se producen en el resto de la placa Norteamericana y los de la placa de Cocos subducida, originados a profundidades entre 50 y 100 km aproximadamente (Rosenblueth y Ovando, 1990).

La ciudad de México se encuentra a algunos cientos de kilómetros de la zona de subducción, y por lo tanto de los posibles epicentros de terremotos de gran magnitud. Debido a lo anterior cabría esperar que las intensidades sísmicas en la capital fueran pequeñas por la atenuación que sufren las ondas sísmicas con la distancia; sin embargo, debido a las características topográficas de la cuenca de México y especialmente a las de los mantos de terreno muy blando que existen en una porción de ella, ocurren amplificaciones del movimiento del suelo que producen vibraciones en las construcciones y que provocan daños o colapsos en las mismas.

Estratigrafía. En la figura 1.1 se presenta un resumen actualizado de la zonificación geotécnica de la ciudad de México por Jaime y Romo (1987), basado en la zonificación inicial propuesta por Marsal y Masari (1959):

Zona de lomas. El subsuelo poniente de la ciudad está constituido por tobas pumíticas bien cementadas y suelos limo-arenosos compactos; al sur queda representado por derrames de roca basáltica de El Pedregal, los cuales aparecen en forma errática y con espesores máximos de 20 m.

Zona de transición. Ubicada entre la zona de lomas y la del lago, presenta una estratigrafía muy variable, encontrándose superficialmente depósitos arcillosos o limosos orgánicos cubriendo a una arcilla volcánica muy compresible y de espesor variable, intercalados con capas de arena limosa compacta o arena limpia, que descansan sobre grandes mantos de arena y grava.

Zona de lago. En esta zona, localizada básicamente en el centro y oriente de la ciudad, superficialmente aparecen depósitos duros de material areno-limoso o arcilloso y/o rellenos artificiales que en algunos sitios alcanzan hasta los 10 m de profundidad. Bajo estos materiales y con espesores comprendidos entre 15 y 32 m se encuentra la formación arcillosa superior, constituida por arcillas volcánicas muy compresibles, intercaladas con pequeñas lentes de arena y vidrio volcánico.

Subyaciendo a los estratos anteriores se presenta la primera capa dura con espesor variable y hasta un máximo de 5 m, constituida por suelos arcillo o limo-arenosos compactos. A continuación aparece la formación arcillosa inferior constituida por arcillas volcánicas más comprimidas y resistentes que la primera capa arcillosa del mismo origen, su espesor varía entre 4 y 14 m. Finalmente se encuentran los depósitos profundos constituidos por arena y grava con intercalación de estratos de limo y arcilla-arenosa.

1.2 OBJETIVOS

El presente trabajo tiene dos objetivos principales:

1) Estudiar el comportamiento dinámico de la arcilla del valle de México en el aparato de corte simple cíclico, aplicando diferentes niveles de esfuerzo cortante y llevando las muestras a la falla (esfuerzos cortantes y deformaciones angulares grandes).

El trabajo se concentró fundamentalmente en el estudio de la degradación de la rigidez del material en función del número de ciclos, debido a la importancia de este fenómeno en el comportamiento dinámico de pilotes de fricción.

2) Analizar el comportamiento en la interface arcilla-concreto en el aparato de corte directo, utilizando muestras de arcilla inalterada y remoldeada, y concretos tratados con diversos recubrimientos.

1.3 ALCANCES

Para lograr los objetivos señalados se realizaron las siguientes actividades:

a) Ensayes de laboratorio en muestras de arcilla inalterada típica de la zona del lago, utilizando el aparato de corte simple cíclico, aplicando carga monotónica y cíclica a diferentes niveles de esfuerzo y llevando las muestras a la falla. La descripción del equipo y los resultados de estos ensayos se presentan en los capítulos 2 y 4 respectivamente.

b) Diseño y fabricación de un aparato de corte directo para realizar ensayos de laboratorio en muestras de arcilla inalterada típica de la zona del lago y de interface arcilla-concreto, con carga monotónica y cíclica a diferentes niveles de esfuerzo. Adicionalmente se realizaron con este mismo equipo pruebas de interface con arcilla remoldeada-concreto y finalmente con arcilla inalterada-concreto con diferentes recubrimientos sobre una de las caras de las pastillas del concreto.

La descripción del equipo de corte directo se presenta en el capítulo 3 y los resultados de los ensayos de laboratorio con muestras inalteradas se indican en el capítulo 5; en los capítulos 6 y 7 se resumen los resultados de los ensayos con arcilla remoldeada y arcilla-concreto (con diversos recubrimientos), respectivamente. Finalmente, en el capítulo 8 se presentan las conclusiones obtenidas de este trabajo.

FIGURAS. Capítulo 1

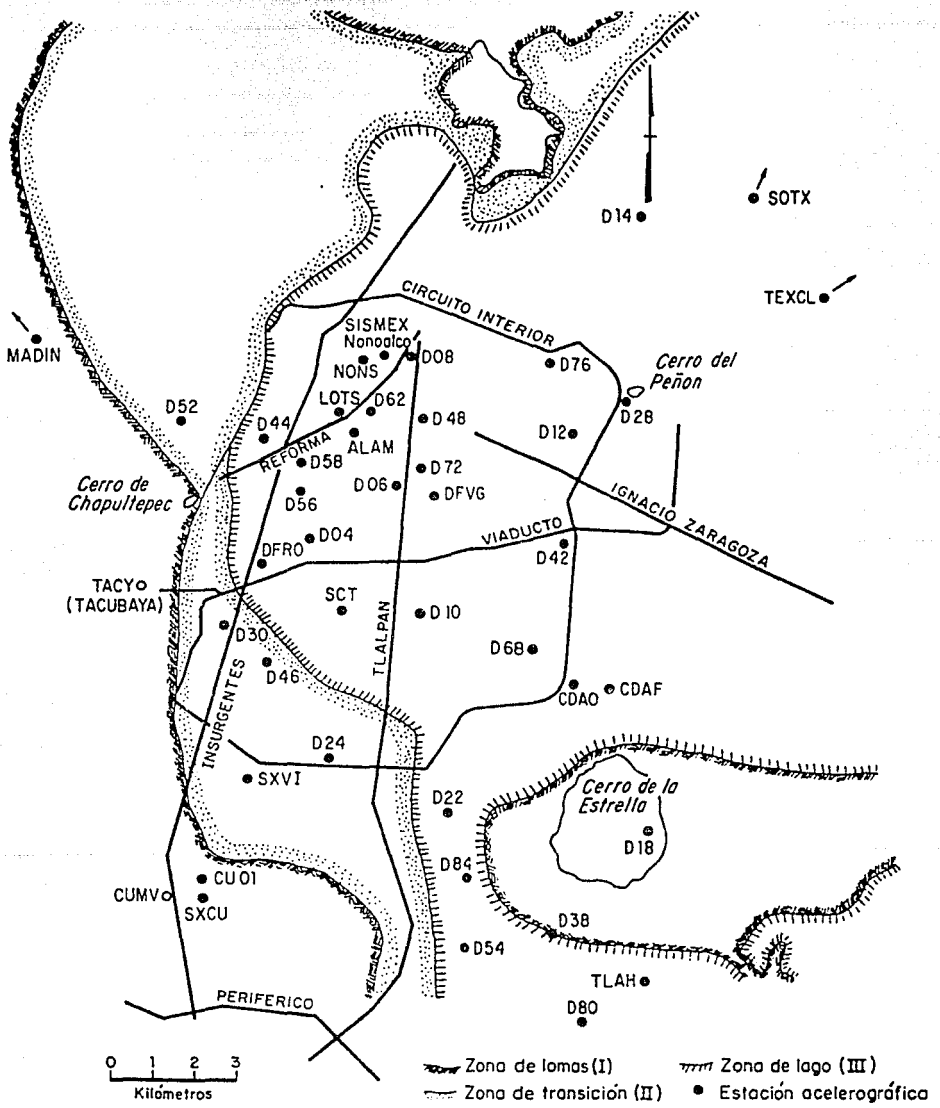


FIG 1.1 ZONIFICACION GEOTECNICA DE LA CIUDAD DE MEXICO

CAPITULO 2

2. APARATO DE CORTE SIMPLE CICLICO

Las pruebas dinámicas con cargas cíclicas en suelos fueron desarrolladas para reproducir en un espécimen de laboratorio las condiciones de campo originadas por la propagación vertical de ondas cortantes y también para evaluar las propiedades dinámicas de los suelos, incluyendo el módulo de Young E , el módulo de rigidez al corte G y el amortiguamiento del material D .

En este capítulo se describe el aparato de corte simple cíclico, cuyo objetivo es reproducir en el laboratorio los esfuerzos cortantes reversibles experimentados por un elemento de suelo sujeto a una carga sísmica ideal, como se indica en la figura 2.1.

En la literatura se describen los aparatos del Instituto Geotécnico de Suecia SGI (Kjelman 1951), y del Instituto Geotécnico de Noruega NGI (Bejerrum y Landva 1966); ambos emplean adaptaciones verticales no rígidas para contener una muestra de suelo de sección transversal circular. El primero utiliza anillos sobrepuestos y el segundo una membrana reforzada con un resorte plano.

Roscoe (1953) presentó el aparato de corte simple de Cambridge que tiene soportes verticales rígidos, y en el se aplican deformaciones cortantes simples uniformes a una muestra de suelo de sección transversal cuadrada.

Jaime (1977) y Jaime, Legorreta y Martín (1987) presentan los aparatos de corte simple cíclico bidireccional y unidireccional respectivamente, estos equipos son desarrollos tecnológicos realizados en el Instituto de Ingeniería de la UNAM y sirvieron para hacer los primeros estudios de corte simple cíclico en nuestro país, en muestras de arena y arcilla.

Silver (1978) desarrolló un aparato de corte simple cíclico que permite aplicar una presión de confinamiento hidrostática a las caras verticales de un espécimen de sección transversal circular. En este trabajo se empleó uno de estos aparatos.

Las limitaciones de los aparatos de corte simple cíclico que se han desarrollado resultan de las condiciones de frontera impuestas a la muestra y son las siguientes :

. La fuerza vertical en las caras superior e inferior del espécimen deberá formar un par para balancear el momento producido por las fuerzas cortantes; por ello, ni los esfuerzos verticales normales ni los esfuerzos cortantes están uniformemente distribuidos. Por lo anterior no se conoce con precisión el estado de esfuerzos dentro de la muestra; además la no uniformidad en la distribución de esfuerzos se incrementa con la deformación, originando que la muestra falle a un esfuerzo menor que el de campo.

. Prevost y Hoeg (1976) investigaron teóricamente los efectos del deslizamiento diferencial parcial que pueda existir en la cabeza y base del equipo en relación con el espécimen durante la prueba, concluyendo que este deslizamiento altera aún más la distribución de esfuerzos normales y cortantes.

Para ilustrar lo antes mencionado se presenta la figura 2.2 .

Aún con las limitantes antes mencionadas este aparato ha demostrado ser una herramienta útil en el estudio de fenómenos de excitación sísmica en suelos.

En las pruebas cíclicas empleando el aparato antes referido, los esfuerzos verticales (σ_v) y horizontales (σ_c), son de valor constante y totales, pero como se puede medir la presión de poro u , se conoce σ'_v y σ'_c ; además se mide el esfuerzo cortante τ , con lo cual es posible conocer el estado de esfuerzos en el plano de Mohr y determinar los esfuerzos principales σ'_1 y σ'_3 como se muestra en la figura 2.3. Con lo anterior podríamos comparar los resultados (expresados en términos de esfuerzos principales) con los obtenidos de pruebas triaxiales cíclicas, suponiendo la hipótesis de uniformidad de esfuerzos.

2.1 DESCRIPCION DEL APARATO

El aparato de corte simple cíclico empleado en este trabajo se presenta en la figura 2.4 y está integrado por los siguientes equipos:

- . Equipo neumático
- . Equipo de confinamiento
- . Equipo de carga
- . Equipo hidráulico
- . Equipo electrónico de instrumentación y registro de datos

Equipo neumático. Se utiliza para suministrar y regular la presión necesaria en la aplicación del esfuerzo de confinamiento (σ_c), contrapresión para saturar la muestra de suelo (c_p) y para dar carga con los pistones neumáticos vertical y horizontal (f_z y f_x).

Los aparatos que integran este equipo son los siguientes:

.Compresor de 10 kg/cm^2 de presión máxima.

.Conjunto de reguladores y manómetros para distribuir la presión a cualquier parte del sistema, incluyendo :

Equipo	Etapa de prueba	Rango de trabajo
regulador R1	presión confinante (σ_c)	$0.0 - 10.5 \text{ kg/cm}^2$
regulador R2	carga vertical (fz)	$0.0 - 10.5 \text{ kg/cm}^2$
regulador R3	contrapresión (cp)	$0.0 - 10.5 \text{ kg/cm}^2$
manómetro M1	presión confinante (σ_c)	$0.0 - 7.0 \text{ kg/cm}^2$
manómetro M2	contrapresión (cp)	$0.0 - 7.0 \text{ kg/cm}^2$

Equipo de confinamiento. En su interior queda el espécimen de suelo que se va a ensayar; el detalle de sus partes constitutivas se indica en la figura 2.5 en la cual los números encerrados en círculo representan sus piezas integrantes referidas a continuación:

. Celda o cámara de lucita 1 , la cual se ajusta sobre una base cuadrada fija 2 y se sella en su parte superior por medio de una tapa metálica 3, utilizando tornillos Allen.

A través de la base cuadrada de esta cámara se aplica la fuerza vertical con el pistón colocado en la parte inferior del sistema y con movimiento ascendente.

. En la tapa 3 de esta cámara se ubica el dispositivo mecánico 4 por medio del cual se aplica la fuerza cíclica a la parte superior de la muestra de suelo. El dispositivo antes mencionado se une al vástago del pistón neumático horizontal (colocado fuera de la cámara) por medio de un cople roscado. A través de la misma tapa 3 , y por medio de una conexión, también se aplica presión confinante dentro de la cámara.

. Una base circular fija 5 y una cabeza móvil 6, estarán en contacto directo con la muestra de suelo, en su parte inferior y superior respectivamente. Tanto la base como cabeza contienen en su parte central sendas piedras porosas a través de las cuales se podrá saturar el espécimen por contrapresión o se hará circular el agua a la bureta durante la consolidación. La cabeza móvil se une al dispositivo 4 para aplicar la carga cíclica por medio de tornillos Allen.

. El anillo circular de lucita 7 se sujeta en su parte inferior por medio de cuatro tornillos opresores y servirá para contener el agua a través de la cual se aplicará la presión confinante a la muestra de suelo.

. En el interior de la tapa 3 se localizan también los transductores de fuerza vertical y horizontal, cuya descripción detallada se hará en párrafos posteriores. En el lado exterior opuesto y colineal al pistón horizontal se ubica el transductor de desplazamiento.

. Adicionalmente se deberá contar con una membrana de hule látex que contendrá a la muestra de suelo y arosellos para sujetar y sellar la membrana a la base y cabeza, 5 y 6 respectivamente.

Este equipo tiene paredes flexibles y puede ser una diferencia significativa al tratar de comparar resultados con otros equipos que emplean paredes rígidas.

Equipo de carga. Consta de dos pistones neumáticos por medio de los cuales se aplicará la carga vertical (f_z) requerida para la consolidación anisotrópica y la carga horizontal cíclica o monotónica (f_x) necesaria para reproducir los esfuerzos cortantes sísmicos.

El pistón neumático vertical de doble acción tiene movimiento ascendente y se ubica en la parte inferior de la cámara de lucita, figura 2.5; sus características son :

Marca.....Bellow fram
Tipo.....D
Tamaño.....6
Serie.....F
Rango de servicio...10.2 kg/cm²

El pistón neumático horizontal de doble acción se ubica a un costado y fuera de la cámara de lucita y se une al dispositivo mecánico cíclico por medio de un cople roscado. Sus características son similares al pistón anterior pero de tamaño número 4.

La consola de control de magnitud y frecuencia de los esfuerzos cíclicos está integrada por un generador de funciones, que produce ondas senoidales (rango de trabajo de 0.1 hasta varios kilohertz de frecuencia), un electrorregulador con capacidad hasta 1.0 kg/cm² y un contador de eventos.

Equipo hidráulico. Consta de dos tanques de saturación superior e inferior, a través de los cuales se podrá aplicar contrapresión con el equipo neumático, o se hará circular agua libre a la muestra de suelo.

También incluye una bureta por medio de la cual se medirán los cambios volumétricos del espécimen durante la etapa de consolidación. Además de lo anterior el equipo tiene un conjunto de tuberías de plástico, válvulas y conexiones que unen a los tanques de saturación con las piedras porosas de la base y cabeza en contacto con la muestra de suelo.

Equipo electrónico de instrumentación y registro de datos. La fuerza cortante aplicada al suelo se mide con un transductor de fuerza, el cual está alojado en el interior de la tapa superior de la cámara de lucita; la capacidad de este transductor es de 115 kg en compresión y 115 kg en tensión; sus especificaciones son :

Marca.....ilegible
Modelo.....500/94159
Compresión.....115 kg
Tensión.....115 kg
Excitación.....5 volts

Para medir la fuerza vertical aplicada al espécimen, se utiliza otro transductor de fuerza alojado en el interior de la tapa superior de la cámara de lucita; su capacidad es de 454 kg y sus especificaciones son :

Marca.....Interface
Modelo.....1210/OB
Capacidad.....454 kg
Excitación.....5 volts

La deformación horizontal del espécimen se mide con un transductor de desplazamiento, alineado en la dirección del pistón horizontal y colocado en el lado opuesto a este (fuera de la cámara), sus especificaciones son :

Marca.....Trans-tec
Modelo.....352-000
Número de serie...II-3
Desplazamiento.... \pm 1.9 cm
Excitación.....10 volts

Para medir la deformación vertical de la muestra de suelo en la etapa de consolidación, se utiliza un micrómetro de carátula que se fija al pistón de la misma dirección.

Para medir los cambios de presión de poro en el suelo se emplea un transductor de presión, colocado en la parte inferior de la consola de reguladores y manómetros descrita anteriormente en el equipo neumático. El transductor se encuentra conectado con las válvulas y tubos del sistema hidráulico y sus especificaciones son :

Marca.....Data-instruments
Modelo.....AB
Capacidad.....17.5 kg/cm²
Excitación.....5 volts

En el anexo A se presenta el detalle de la calibración de los transductores antes referidos.

Dispositivo de plumas calientes. Permite graficar en papel milimétrico las señales de los transductores de carga cíclica horizontal ($\pm f_x$), desplazamiento horizontal ($\pm \delta x$) e incremento en la presión de poro (Δu).

Este dispositivo tiene las siguientes especificaciones:

Marca.....MFE Instruments
Serie.....1400
Número de canales..4
Ancho del canal...50 mm
Peso.....23 kg
Consumo de potencia.325 wats

Consola electrónica digital. Se usa para visualizar numéricamente los valores de fuerza vertical (f_z), fuerza horizontal (f_x), presión confinante (σ_c), incremento de presión de poro (Δu) y contrapresión (cp). Esta consola está formada por módulos acondicionadores de señal que dan el voltaje de excitación para cada uno de los transductores y al mismo tiempo reciben la señal de respuesta de los mismos, ajustándolos a valores de voltaje legibles en unidades de presión, fuerza y deformación. Los valores de voltaje se leen visualmente en módulos de lectura o voltímetros de bajo rango y alta resolución, enviados simultáneamente al graficador de plumas calientes para su impresión.

FIGURAS. Capítulo 2

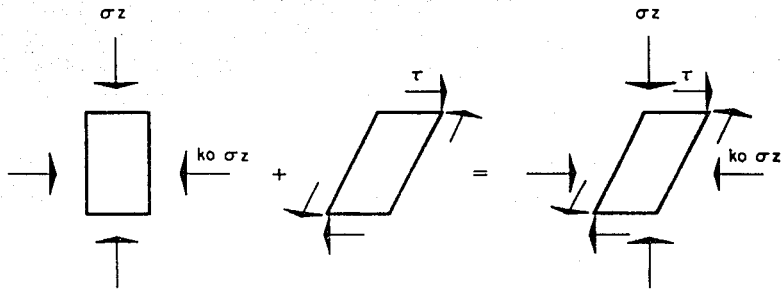
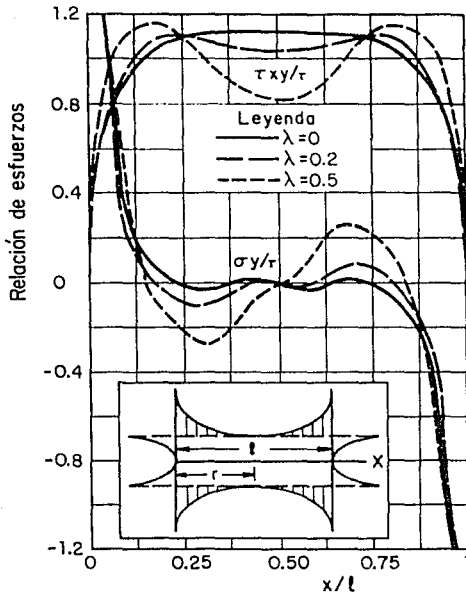


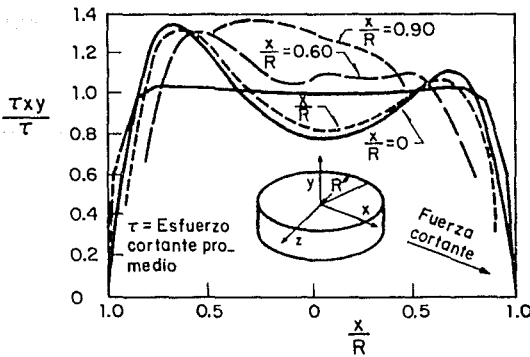
Fig 2.1 Condiciones de carga en la prueba de corte simple



a) Esfuerzos sobre las caras superior e inferior de un espécimen en corte simple (después de Prevost y Hoeg, 1976)

$\lambda=0$ Ningún deslizamiento ocurre ni en la tapa ni base del espécimen

$\lambda=1$ El punto central de la tapa del espécimen no se mueve mientras todos los otros puntos deslizan



b) Distribución de esfuerzos cortantes en un espécimen circular en corte simple (después de Wright et al, 1978)

Fig 2.2 Condición de esfuerzos en corte simple

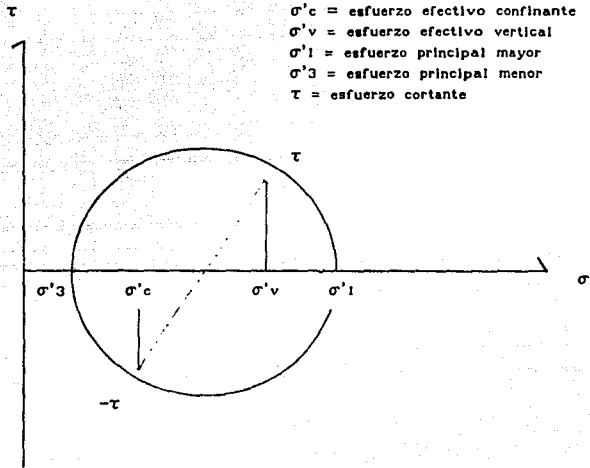


Fig 2.3 Estado de esfuerzos en el aparato de corte simple cíclico.

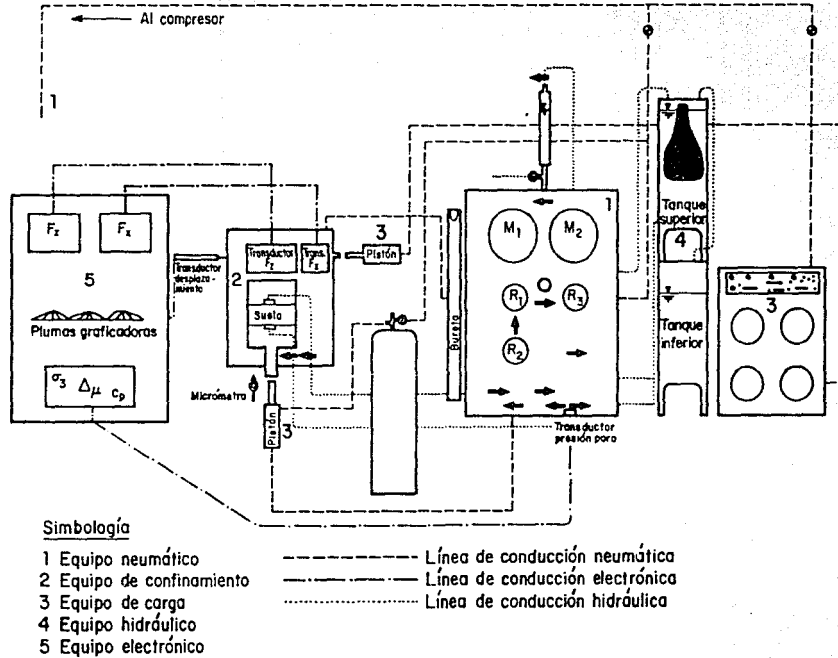
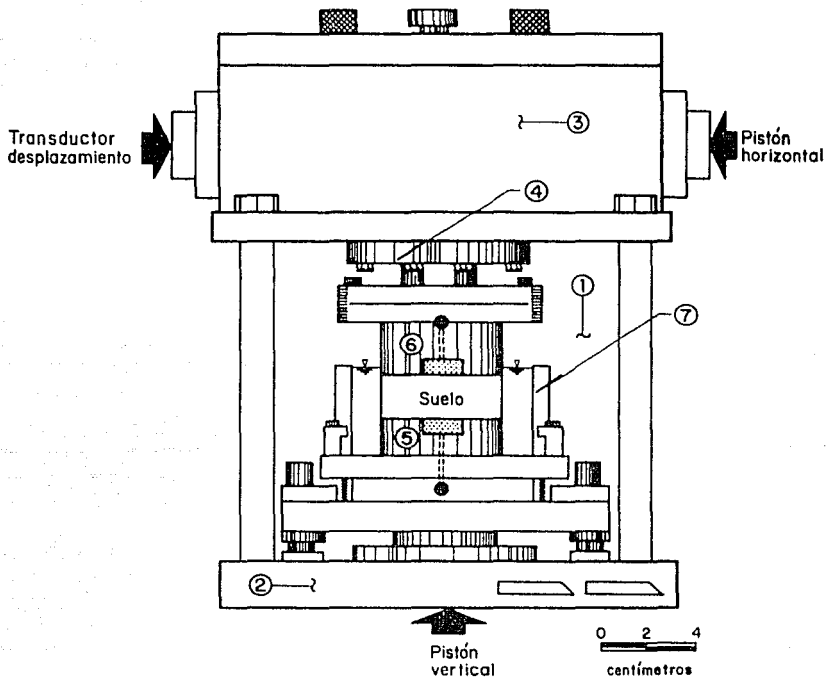


Fig 2.4 Aparato de corte simple cíclico



Simbología

- | | | | |
|---|---|---|---------------------------|
| ① | Cámara de lucita | ⑤ | Base circular |
| ② | Base cuadrada | ⑥ | Cabeza móvil |
| ③ | Tapa superior | ⑦ | Anillo circular de lucita |
| ④ | Dispositivo para aplicación de fuerza cíclica | | |

Fig 2.5 Equipo de confinamiento

CAPITULO 3

3. APARATO DE CORTE DIRECTO

La prueba de corte directo fue una de las primeras técnicas desarrolladas para determinar la resistencia de los suelos; en este trabajo se utilizó para evaluar el comportamiento en la interface arcilla/concreto.

Dentro de las limitantes de esta prueba se pueden enunciar las siguientes:

- . Se tienen los efectos de falla cortante progresiva de los extremos al centro de la muestra, lo cual origina que la distribución de esfuerzos no sea uniforme durante la ejecución de la prueba.
- . No se puede aplicar presión confinante al espécimen.
- . Es imposible deducir el estado completo de esfuerzos dentro de la muestra y dibujar el círculo de Mohr respectivo, a menos que se hagan hipótesis simplificadoras sobre la distribución de esfuerzos en las muestras.
- . No se puede registrar el incremento en la presión de poro.
- . Bajo cargas normales ligeras parte de la muestra estará sujeta a esfuerzos de tensión (Roscoe 1953), y bajo grandes esfuerzos verticales es difícil evitar la fuga de agua a través del equipo de corte durante la etapa de consolidación.
- . Es difícil establecer correlaciones entre resultados de pruebas de corte directo con pruebas triaxiales, ya que en las primeras los ejes de esfuerzo y/o deformación están libres para girar o rotar y en las segundas son fijos (Wroth 1984).
- . El área de la superficie de falla varía durante la aplicación del esfuerzo cortante, siendo necesario hacer correcciones en función de la deformación horizontal (δx).

Las ventajas de esta prueba son su relativa facilidad y rapidez de ejecución.

3.1 DESCRIPCIÓN DEL APARATO

Con la finalidad de aprovechar al máximo las instalaciones, equipos y dispositivos del aparato de corte simple cíclico, se diseñó y fabricó en los talleres del Instituto de Ingeniería UNAM, un equipo de corte directo cuyas piezas se adaptan y ajustan a la base circular fija y cabeza móvil (piezas 5 y 6 de la figura 2.5), del equipo descrito en el capítulo anterior.

El aparato de corte directo se fabricó en bronce, sus dimensiones y partes constitutivas se especifican en la fig 3.1 y son las siguientes:

Anillos de corte. Un anillo superior móvil con 3 barrenos de 3.2 mm (1/8") perforados en dirección paralela a su eje longitudinal y separados transversalmente a 120° cada uno.

Tres tornillos opresores Allen localizados en la porción superior permiten fijar este anillo con la cabeza móvil del dispositivo mecánico de aplicación de fuerza horizontal, apretándolos al concluir la consolidación y antes de aplicar el corte directo.

Anillo inferior fijo, también de bronce y con las mismas dimensiones transversales que el superior, con 3 barrenos de alineamiento por donde pasan los pernos para mantener su posición fija con relación al anillo superior, durante la etapa de consolidación.

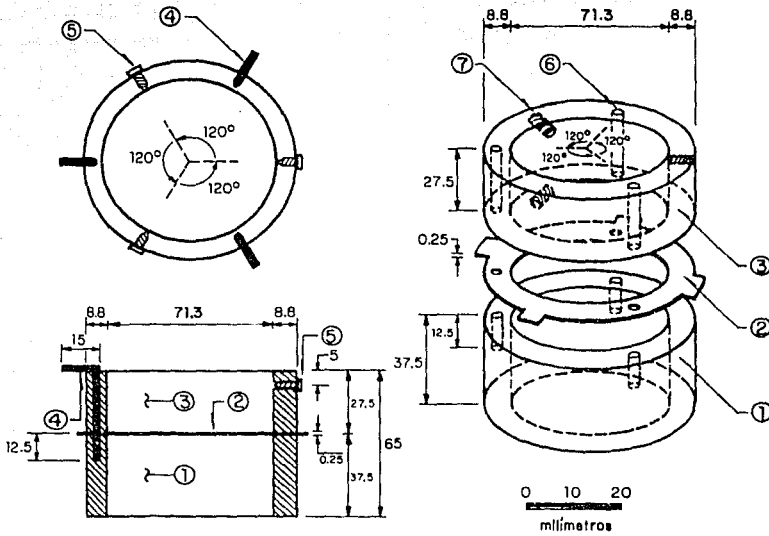
El anillo inferior penetra ajustando perfectamente a la base circular fija (pieza 5 de la figura 2.5), y por lo tanto también permanece inmóvil durante la prueba, siendo el anillo superior el que efectúa el corte directo.

Tres pernos de alineamiento de 3.2 mm (1/8") fabricados en acero rolado en frío permiten mantener a los anillos de bronce sin movimiento relativo durante la consolidación; estos pernos se retiran previamente a la aplicación de los esfuerzos de corte.

Lámina de cobre partida en dos, de la misma sección transversal de los anillos y de 0.25 mm de espesor, la cual se coloca entre los mismos durante la consolidación y se retira antes de iniciar el corte. La función de esta lámina es dejar un pequeño espacio para evitar la fricción entre los anillos durante el movimiento relativo que se produce al aplicar los esfuerzos cortantes.

En la prueba de corte directo se sustituye la membrana de hule latex por los anillos de bronce y se prescinde de las cámaras de lucita del equipo de corte simple cíclico (piezas 1 y 7 de la figura 2.5).

FIGURAS. Capítulo 3



Simbología

- | | |
|-----------------------------------|------------------------------------|
| ① Anillo inferior | ⑤ Tornillo Allen opresor de (1/8") |
| ② Lámina de cobre | ⑥ Barreno de (1/8") |
| ③ Anillo superior | ⑦ Rosca de (1/8") |
| ④ Perno de alineamiento de (1/8") | |

Fig 3.1 Anillos de corte directo

CAPITULO 4

4. ENSAYES DE LABORATORIO EN EL APARATO DE CORTE SIMPLE CICLICO

Con este equipo se realizaron tres series de ensayos integradas por cuatro pruebas cada una. La primera prueba de cada serie se efectuó aplicando carga monotónica horizontal creciente y su objetivo fue determinar la resistencia estática al corte de la arcilla inalterada (τ_{est}). En las tres pruebas restantes se aplicaron cargas cíclicas horizontales cuya magnitud fue un porcentaje de la resistencia estática obtenida inicialmente; los valores estuvieron comprendidos entre el 65 y 120 %.

El objetivo de estas pruebas fue determinar el comportamiento dinámico de la arcilla, es decir su relación esfuerzo-deformación a diferentes niveles de esfuerzo cortante cíclico. Las pruebas fueron de tipo consolidado-no drenado (CU) y en todas ellas, tanto estáticas como dinámicas, los especímenes se llevaron a la falla.

4.1 METODO DE PRUEBA

Los cuatro especímenes de cada serie procedían de una misma muestra de arcilla inalterada, obtenida en un sitio de la zona de lago de la ciudad de México con un muestreador tipo Shelby de 10 cm de diámetro.

Los materiales de las series 1 y 2, resultaron ser arcillas de alta compresibilidad (CH), de consistencia media. Los materiales de la primera serie, de color gris verdoso y los de la segunda, café; estos últimos con algunas fisuras naturales en dirección sensiblemente vertical y rellenas de material limoso. El material de la serie 3 fue un limo de alta compresibilidad (MH), compacto y de color gris.

El origen de estos materiales incluyendo su profundidad y propiedades índice, se presenta en la tabla 4.1.

Labrado y montaje de los especímenes. Los especímenes se labran en forma de pastillas circulares de 71 y 30 mm, de diámetro y espesor, respectivamente. Una vez labradas las muestras se pesan, miden y se obtienen los valores iniciales de grado de saturación (G_w), relación de vacíos (e) y peso volumétrico (γ_m). En la tabla 4.2 se presentan estos datos para cada muestra.

Antes de montar el espécimen en el aparato de corte simple cíclico, se saturan todos los conductos del sistema hidráulico, incluyendo las piedras porosas de la base y cabeza que están en contacto directo con el suelo. Posteriormente se coloca la muestra con su membrana en posición y se sella la base y cabeza con arsellos.

Además se coloca el anillo de lucita que contiene el fluido por medio del cual se transmite la presión confinante (σ_c) y finalmente se ajusta la cámara exterior de lucita, cerrada herméticamente con su tapa metálica superior.

Aplicación de presión confinante. Una vez logrado lo anterior se aplica presión confinante (σ_c) dentro de la cámara de lucita, cuyo valor se determinó como el producto del coeficiente $K_0 = 0.55$ por la presión vertical efectiva que teóricamente tenía la muestra en el sitio; es decir, $\sigma_c = K_0 \sigma'_v$. Los valores de presión confinante fueron de 0.36 , 0.48 y 0.66 kg/cm^2 para las series 1, 2 y 3 respectivamente, aplicados en incrementos de 0.06 kg/cm^2 (0.9 psi) cada minuto.

Saturación por contrapresión. En todas las pruebas se utilizó el método de contrapresión para asegurar que las muestras tuvieran un grado de saturación del 100% ; se aplicó una presión de 3 kg/cm^2 en incrementos de 0.25 kg/cm^2 (3.6 psi) cada minuto.

Se evaluó el factor B de Skempton, como el cociente que resulta de dividir el aumento en la presión de poro (Δu) y el aumento en la presión confinante ($\Delta \sigma_c$) para cada incremento de presión; un valor unitario de este factor corresponde a suelos totalmente saturados.

Consolidación. Todas las pruebas se consolidaron con un esfuerzo vertical que teóricamente fue igual al esfuerzo efectivo que tenía el suelo en el campo, con valores de 0.65, 0.86 y 1.21 kg/cm^2 , para las series 1, 2 y 3 respectivamente y sus correspondientes esfuerzos desviadores de consolidación de 0.29, 0.38 y 0.55 kg/cm^2 .

La consolidación se efectuó permitiendo la salida de agua de la muestra hacia la bureta, aplicando pequeños incrementos de carga vertical a razón de 0.1 kg cada 12 seg (0.5 kg/min).

Las curvas de consolidación de estas 3 series de ensayos, se presentan en las figuras 4.1 a 4.3 , en las cuales el eje de las abscisas corresponde al tiempo en minutos y el de las ordenadas a la deformación vertical δz en mm. En estas gráficas se aprecia que el tiempo requerido para alcanzar el 100% de consolidación primaria es del orden de 25 a 30 minutos para las arcillas de las series 1 y 2, y de 45 minutos para el limo de la serie 3.

Aplicación de esfuerzo cortante. Como se mencionó anteriormente todas las pruebas de estas series fueron de tipo consolidado-no drenado. Durante la etapa de falla, el esfuerzo cortante (monotónico o cíclico) se aplicó después de la consolidación bajo la carga vertical y sin permitir el drenaje de la muestra.

Para llevar las muestras a la falla y evitar que ocurriera un deslizamiento del espécimen, en relación con la base y cabeza del equipo de corte, se colocaron sendas lijas entre estos últimos, lo suficientemente rugosas para garantizar una buena adherencia con el suelo.

En la primera prueba de cada serie se determinó la resistencia estática al corte (τ_{est}) aplicando carga monotónica creciente en incrementos de 0.5 kg/min. En las tres pruebas posteriores se aplicó carga ciclica con una frecuencia de 0.5 hz (1 ciclo cada 2 seg) hasta alcanzar la falla. La magnitud del esfuerzo dinámico (τ_{cic}) fue un porcentaje de la resistencia estática, con los valores siguientes para cada serie:

Serie	τ_{cic} / τ_{est} , en porcentaje
1	72.5, 98.2 y 119.4 %
2	81.0, 101.5 y 119.5 %
3	65.0, 88.0 y 112.6 %

4.2 RESULTADOS DE LABORATORIO

Los datos obtenidos durante los ensayos con la instrumentación electrónica incluyeron los siguientes :

- . Carga horizontal aplicada (monotónica en la prueba estática o ciclica en la dinámica).
- . Deformación horizontal del espécimen.
- . Incremento de la presión de poro.

Curvas esfuerzo cortante vs deformación angular. Con los datos antes descritos, se determinaron las curvas esfuerzo cortante (τ kg/cm²) contra deformación angular (γ %) para las pruebas estáticas y las dinámicas; en estas últimas se obtuvieron las curvas para varios ciclos de carga incluyendo el inicial, medio, final o de falla y valores intermedios.

El esfuerzo cortante (τ) se calculó dividiendo la fuerza horizontal registrada entre el área del espécimen; y la deformación angular (γ) se calculó como el cociente de la deformación horizontal registrada δx y el espesor de la muestra, expresada en porcentaje.

En las figuras 4.4 a 4.6 se presentan estas curvas para las pruebas estáticas de las 3 series, incluyendo también en las mismas gráficas el incremento de la presión de poro registrado durante estos ensayos. Las curvas de tipo histerético para las pruebas dinámicas se presentan en las siguientes figuras: 4.7, 4.9 y 4.11 para la serie 1 ; 4.13, 4.15 y 4.17 para la serie 2 y 4.19, 4.21 y 4.23 para la serie 3.

Curvas incremento de la presión de poro vs deformación angular. En las figuras 4.4 a 4.6 se presenta la variación de la presión de poro (Δu kg/cm²) contra la deformación angular (γ %) para los ensayos estáticos, y para los dinámicos en las figuras 4.8, 4.10 y 4.12 para la serie 1 ; 4.14, 4.16 y 4.18 para la serie 2 y finalmente 4.20, 4.22 y 4.24 para la serie 3.

En la tabla 4.2 se presenta un resumen de los resultados de laboratorio

4.3 INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS DE LABORATORIO

Del análisis de las curvas esfuerzo cortante e incremento de presión de poro vs deformación angular de las pruebas estáticas presentadas en las figuras 4.4 a 4.6, se puede observar lo siguiente:

. Para las serie 1 se aprecia que a medida que el esfuerzo cortante crece a partir de cero, la presión de poro también aumenta hasta cierto valor a partir del cual disminuye, este comportamiento de Δu es inusual sin embargo, se propone la siguiente hipótesis para interpretarla, pensando que antes de que se rompiera completamente el espécimen se pudo haber generado una fisura con una superficie irregular, motivando que el registro de prueba de Δu presentara una ligera vibración a partir del punto de disminución. Al tratar de deslizar una parte con respecto a la otra se originó dilatación con la consiguiente disminución de la presión de poro; al fallar completamente la muestra, la presión de poro nuevamente creció.

Por lo que respecta a las pruebas estáticas de las series 2 y 3, la presión de poro siempre fue creciente.

. En los materiales arcillosos de las series 1 y 2 el incremento máximo de presión de poro en magnitud, está por debajo del valor del esfuerzo cortante máximo registrado; no así el material limoso de la serie 3 cuyo valor final inclusive sobrepasa la magnitud de este esfuerzo. En relación al esfuerzo de consolidación, los valores de incremento de presión de poro máximo fueron menores del 50% de dicho esfuerzo.

De las curvas histeréticas de las pruebas dinámicas presentadas en las figuras 4.7, 4.9, 4.11, 4.13, 4.15, 4.17, 4.19, 4.21 y 4.23, se observó lo siguiente:

. Una degradación de la rigidez del material con el número de ciclos de carga; además el número de ciclos para alcanzar la falla es inversamente proporcional a la magnitud del esfuerzo cortante aplicado.

. En estas series de ensayos se encontró un límite superior para el esfuerzo cortante del orden del 120% con relación a la resistencia estática, valores mayores de esfuerzo originan que la muestra falle en el primer ciclo. Lo anterior compara bien con los resultados reportados en la literatura por Casagrande, Jaime y otros autores.

Cabe señalar que queda la incertidumbre de si los valores de presión de poro medidos, son los verdaderos que experimenta el espécimen durante el ensaye, ya que la presión de poro en su interior requiere un lapso de tiempo para su uniformización debido a la baja permeabilidad de la arcilla; además, esta presión se mide en la base de la muestra.

El incremento en la presión de poro registrado en estas pruebas dinámicas de las tres series, figuras 4.8, 4.10, 4.12, 4.14, 4.16, 4.18 4.20, 4.22 y 4.24, indican lo siguiente:

. En todas las pruebas dinámicas la presión de poro se incrementa con el número de ciclos.

La presión de poro depende de la deformación angular impuesta al espécimen durante el corte. En los materiales arcillosos de las series 1 y 2 presenta una disminución a medida que la muestra se desplaza angularmente hacia uno y otro lado de su posición central (como si se sometiera el espécimen a tensión), incrementándose nuevamente al regresar a su posición original (como si se comprimiera); este incremento es acumulativo con el número de ciclos como se indicó en el inciso anterior.

Por lo que respecta a la serie 3 realizada en material limoso, la presión de poro no presenta mucha variación con la deformación angular y permanece sensiblemente constante con el desplazamiento angular de la muestra.

Las pruebas estáticas alcanzaron deformaciones angulares a la falla del orden de 33% y las dinámicas del 22% como máximo, considerando que la falla ocurre cuando se destruye la estructura de la muestra.

4.4 DETERMINACION DE LAS PROPIEDADES DINAMICAS

En las figuras 4.25 a 4.27 se presenta la relación entre el nivel de esfuerzos cortantes cíclicos, expresado como un porcentaje de la resistencia estática inicial (τ_{cic} / τ_{est}) y el número de ciclos para alcanzar la falla. Como se mencionó anteriormente se observó un nivel de esfuerzo cortante máximo del orden de 120% que marca el límite superior de resistencia alcanzada en estas 3 series de ensayos; también es de notar que con un nivel de esfuerzos cortantes abajo del 70% aproximadamente, el número de ciclos a la falla tiende a incrementarse considerablemente, haciendo asintótica la parte inferior de las curvas indicadas en las figuras antes referidas.

Cabe aclarar que en las pruebas de la serie 2, en general, los especímenes fallaron en las fisuras preexistentes.

Módulo de rigidez al corte G y amortiguamiento del material D .

El módulo G se calculó como la pendiente que une los valores extremos de las curvas histeréticas obtenidas en los diferentes ciclos de las pruebas dinámicas, el amortiguamiento del material D se evaluó como:

$$D = \frac{\text{área de la curva histerética}}{4\pi (\text{área del triángulo OCD})}$$

En el anexo B se presenta la determinación de estos dos parámetros.

En las figuras 4.28 a 4.30 se presenta la variación del módulo G contra el número de ciclos para las series 1, 2 y 3; y en las figuras 4.31 a 4.33 la misma variación de G pero ahora contra la deformación angular.

De los resultados obtenidos se observan dos aspectos importantes:

. El módulo G es función del nivel de esfuerzos cortantes cíclicos aplicados a la muestra. A menor nivel de esfuerzos corresponde un módulo mayor y viceversa.

En general el módulo G decrece con el número de ciclos y por consiguiente con la deformación angular.

El amortiguamiento del material D en función del número de ciclos y de la deformación angular se presenta en las figuras 4.34 a 4.36 y 4.37 a 4.39, respectivamente. El amortiguamiento en general mostró una tendencia a crecer con el número de ciclos. Cabe hacer notar que respecto a esta propiedad se obtuvo una fuerte dispersión de los resultados, debido probablemente a que los valores fueron determinados por interpretación visual de los registros electrónicos.

Los datos de las propiedades dinámicas en arcilla de la ciudad de México empleando el aparato de corte simple cíclico, reportados en investigaciones previas (Jaime, 1986), corroboran los resultados obtenidos en lo que respecta a la evolución del módulo de rigidez G con el número de ciclos aplicado y a la magnitud del esfuerzo cortante cíclico.

Número de ciclos crítico (Ncrit).

De las gráficas en las cuales se involucra el número de ciclos con los diferentes factores que definen el comportamiento dinámico de la arcilla, se determinó el número de ciclos crítico, cuyo valor define una frontera a partir de la cual el módulo de rigidez G decrece considerablemente y que corresponde a un crecimiento acelerado de los otros factores: amortiguamiento del material, D, presión de poro y deformación angular. En la figura 4.40 se presentan estas curvas que relacionan el nivel de esfuerzo cortante con el número de ciclos crítico para las series 1, 2 y 3. Se puede apreciar en dicha gráfica que las envolventes de cada serie definen aproximadamente líneas rectas cuando son representadas en un plano semilogarítmico, correspondiendo al intervalo del 70 al 120% del nivel de esfuerzo cortante. Lo anterior hace suponer que es posible obtener una expresión analítica para estas envolventes, según se discute al final de este capítulo.

Para las arcillas de las series 1 y 2 las envolventes del número de ciclos crítico casi se empalman, y la del limo de la serie 3 se aparta levemente; los resultados muestran una ligera tendencia a que la línea envolvente dependa del índice de plasticidad del suelo, desplazándose a la derecha a menor índice de plasticidad. Hasta el momento no se tienen elementos de juicio suficientes para afirmar lo anterior, siendo necesario hacer más pruebas de laboratorio con arcilla de diferentes plasticidades.

Incremento de la presión de poro dinámica. El incremento de la presión de poro obtenido en las pruebas dinámicas de las tres series en función del número de ciclos se presenta en las figuras 4.41 a 4.43. Se observa que su comportamiento depende también de 2 parámetros: el nivel de esfuerzo cortante y el número de ciclos. Cabe hacer notar que los puntos o valores de Δu de estas gráficas corresponden a los valores máximos registrados en cada ciclo; se mencionó anteriormente en el inciso 4.3 que el valor de la presión de poro observada dependía también de la deformación angular; así mismo, se hicieron notar las incertidumbres sobre los valores medidos de la presión de poro.

El incremento de presión de poro obtenido fue normalizado con el valor del esfuerzo efectivo octaédrico de consolidación σ'_{oct} , calculado con la siguiente expresión:

$$\sigma'_{oct} = 1/3 (\sigma'_v + 2 \sigma'_c)$$

Donde σ'_v = esfuerzo efectivo vertical

σ'_c = esfuerzo efectivo horizontal

Cabe aclarar que cuando se aplican esfuerzos cortantes en el aparato de corte simple, σ'_v y σ'_c no son esfuerzos principales, σ'_{oct} no puede definirse a menos que se hagan hipótesis de uniformidad de esfuerzos.

En las figuras 4.44 a 4.46 se estableció la correlación entre el módulo G y la presión de poro Δu normalizada.

Deformación angular. La variación de la deformación angular en función del número de ciclos se presenta en las figuras 4.47 a 4.49 .

Gráficas tridimensionales. Se elaboraron gráficas tridimensionales para relacionar algunos de los parámetros más importantes en el comportamiento dinámico de los especímenes ensayados. A continuación se indican las figuras en las que se presentan estos datos y los factores involucrados.

En las figuras 4.50 a 4.52 se presentan las curvas que relacionan el módulo de rigidez G con el nivel de esfuerzo cortante cíclico aplicado (τ_{cic}/τ_{test}) y el logaritmo del número de ciclos (N_c), para las tres series de ensayos. En estas figuras se observa que las curvas definen sensiblemente una superficie que se asemeja a la porción de un hiperboloide, con una frontera cerrada que corresponde aproximadamente a un nivel de esfuerzo cortante del 120% y una frontera abierta creciente a medida que el nivel de esfuerzo cortante tiende a cero (observaciones que ya habían sido mencionadas en el inciso 4.3). Esto último significa que si el nivel de esfuerzo cortante se reduce considerablemente, el número de ciclos a la falla tiende a valores muy grandes haciendo asintótica la línea que une los valores correspondientes al número de ciclos a la falla.

Ahora bien, es posible obtener una ecuación general de las curvas antes referidas que nos permita determinar aproximadamente los valores del módulo de rigidez G para cualquier nivel de esfuerzo cortante y número de ciclos deseado, teniendo en mente que existe un límite superior (120%) que debe respetarse. Al final del capítulo se tratará con mayor amplitud este análisis.

En las gráficas anteriores se observa que los módulos de rigidez G resultaron en el siguiente orden decreciente: los valores mayores correspondieron al material limoso de la serie 3, siguiendo los de la arcilla de la serie 2 y finalmente la serie 1. Lo anterior puede deberse a la diferencia de los materiales y a su resistencia inalterada, sus resistencias fueron de 0.335, 0.390 y 0.420 Kg/cm² para las series 1, 2 y 3 respectivamente.

Los valores de los tres factores involucrados en estas figuras se presentan en las tablas 4.3.A y B.

En las figuras 4.53 a 4.55 se presenta el incremento de la presión de poro Δu (normalizada con el esfuerzo octaédrico de consolidación), en función del nivel de esfuerzo cortante cíclico y del logaritmo del número de ciclos, para las tres series de ensayos. En estas figuras se aprecia que las curvas definen una superficie opuesta o complementaria a las obtenidas por el módulo G; es decir, ahora el comportamiento es al contrario.

En este caso se observa también una notable diferencia entre las curvas de los materiales arcillosos, serie 1 y 2, con respecto a la del limo de la serie 3. Para las primeras el incremento de presión de poro tiende a valores máximos cuando el número de ciclos crece, correspondiendo necesariamente con niveles de esfuerzo cortante bajos; mientras que para el limo, el incremento de la presión de poro máximo se obtuvo a un nivel de esfuerzo cortante más alto correspondiente con un menor número de ciclos.

Para la serie 1, a un nivel de esfuerzo cortante de 72.5% se obtuvo un valor final de la presión de poro en el ciclo de falla, que fue de 1.2 veces mayor que el esfuerzo octaédrico de consolidación. Para la serie 3 la presión de poro máxima registrada fue de 0.933 del esfuerzo octaédrico de consolidación, y correspondiente al ciclo de falla en un nivel de esfuerzo casi en el límite de la frontera superior (112.6%).

Los valores de los tres factores involucrados en estas figuras se presentan en las tablas 4.3.A y B.

Finalmente en las figuras 4.56 a 4.58 se relacionan el módulo de rigidez G, el incremento de presión de poro Δu y el nivel de esfuerzo cortante cíclico. En estas figuras los puntos definen también curvas como en las figuras tridimensionales descritas anteriormente.

4.5 INFLUENCIA DEL NIVEL DE DEFORMACION EN LAS PROPIEDADES DINAMICAS

En las figuras 4.59 a 4.61 se presentan las gráficas que relacionan el módulo de rigidez al corte G con el logaritmo de la deformación angular pico a pico γ_{pp} (deformación total hacia uno y otro lado de un ciclo de histéresis), para las tres series de ensayos respectivamente. En estas figuras no se logra apreciar el tramo inicialmente recto reportado en la literatura (Romo 1990) y correspondiente a deformaciones angulares pequeñas ($10^{-4}\% < \gamma < 10^{-1}$). Lo anterior se debe a que el nivel de esfuerzos cortantes aplicados en estos experimentos fue relativamente grande ($65\% < \tau_{cic}/\tau_{test} < 120\%$) e indujo deformaciones angulares a los especímenes de suelo, que en general fueron mayores del 1%. Para obtener la degradación del módulo de rigidez G a deformaciones pequeñas se utiliza la prueba en columna resonante.

En las figuras 4.62 a 4.64 se presenta el amortiguamiento del material D contra el logaritmo de la deformación angular pico a pico γ_{pp} , observándose que en general las curvas muestran una tendencia hacia los valores reportados en la literatura, $3\% < D < 7\%$ (Jaime, 1987), cuando se extrapolan a deformaciones angulares pequeñas, menores del 1%.

Las figuras 4.65 a 4.67 también relacionan el módulo de rigidez G y la deformación angular pico a pico γ_{pp} , pero en este caso los puntos corresponden a las deformaciones angulares para diferentes niveles de esfuerzo cortante e igual número de ciclos, de una misma serie. Los valores obtenidos definen líneas sensiblemente rectas, lo que demuestra que el nivel de esfuerzo cortante (τ_{cic}/τ_{est}) influye poco en el valor de G y que el factor más importante para determinarlo es el nivel de deformación angular inducida. Cabe destacar que los módulos de rigidez G en la falla, para cada serie, fueron aproximadamente iguales, independientemente del nivel de esfuerzo cortante aplicado.

Por último, en las figuras 4.68 a 4.70 se presenta la variación del amortiguamiento del material D contra el logaritmo de la deformación angular pico a pico. Se observa que dichas curvas presentan una fuerte dispersión pero las tendencias son similares a las concluidas anteriormente para las figuras 4.62 a 4.64.

4.6 MODELACION Y DISCUSION DEL COMPORTAMIENTO OBSERVADO.

Degradación del módulo de rigidez G con el número de ciclos. De los resultados de laboratorio, se observó que la rigidez del material se degrada en función del número de ciclos de carga (figuras 4.28 a 4.30).

Idriss et al (1978) propusieron la ecuación empírica siguiente para evaluar la degradación de la rigidez del material cuando se somete a cargas cíclicas de amplitud constante.

$$G_n / G_1 = N^{-t} \dots\dots\dots 4.1)$$

Donde las literales representan:

- G_n = módulo de rigidez cortante en el ciclo N
- G₁ = módulo de rigidez cortante en el ciclo 1
- N = número de ciclos de carga
- t = parámetro de degradación

Jaime (1987) reporta que en pruebas triaxiales cíclicas en muestras consolidadas anisotrópicamente, se aprecia una tendencia de degradación similar a la expresada con la ecuación anterior (4.1), obteniendo para el parámetro de degradación t los valores de 0.0583 y 0.0205 para las arcillas del Lago de Texcoco preconsolidado y virgen, respectivamente. En las tablas 4.4 (A y B) se presenta la comparación de los datos experimentales obtenidos en este trabajo y los respectivos aplicando la ecuación 4.1, utilizando los valores antes indicados del parámetro de degradación t obtenido por Jaime; en las figuras 4.71 a 4.76 aparecen las gráficas respectivas. Se observa en general que los valores teóricos están por arriba de los experimentales, con las mayores diferencias entre ambos al aumentar el número de ciclos y para el valor del factor t = 0.0205. Esta discrepancia se debe, entre otras razones, a que los valores del parámetro t reportados por el investigador antes referido, fueron obtenidos en pruebas triaxiales cíclicas y en nuestro caso el equipo utilizado fue el de corte simple cíclico.

Con los datos experimentales se encontró el factor de degradación t para cada uno de los ciclos graficados; es decir, se procedió en sentido inverso, se conoce G_1 y G_n y se obtuvo t despejándolo directamente de la ecuación 4.1. Así para cada una de las series de prueba se graficó el valor de dicho parámetro en función del número de ciclos y correspondiente al nivel de esfuerzo respectivo.

En la tabla 4.4 se presentan los valores experimentales de este factor de degradación y en las figuras 4.77 a 4.79 las gráficas respectivas, en las cuales se aprecia que el factor de degradación t permanece sensiblemente constante para un número de ciclos inferior al crítico, a partir del cual crece aceleradamente. Cabe recordar que este número de ciclos crítico fue definido en el inciso 4.4, como el número de ciclos a partir del cual el módulo de rigidez al corte decrece considerablemente y que corresponde a un crecimiento acelerado del amortiguamiento, la presión de poro y la deformación angular. También se observa en las gráficas antes indicadas que el factor de degradación depende del nivel de esfuerzo cortante cíclico, presentando los valores más altos a niveles de esfuerzo cortante elevado y viceversa.

Como se mencionó anteriormente, el parámetro de degradación t es casi constante abajo del número de ciclos crítico, así que se obtuvo un promedio aritmético de los valores de t correspondientes al número de ciclos inferior al crítico. Estos valores se presentan también en la tabla 4.4 y con los cuales se construyó la gráfica de la figura 4.80.

De las curvas presentadas en la figura 4.80 se pudo obtener una ecuación de tipo parabólico para determinar el factor de degradación t en función del nivel de esfuerzo cortante cíclico, para cada una de las tres series de ensayos; la ecuación es de la forma:

$$t = A (\tau_{cic}/\tau_{est})^2 - B (\tau_{cic}/\tau_{est}) + C$$

Para cada una de las series se obtuvo la siguiente ecuación:

Serie 1 $t = 2.25 (\tau_{cic}/\tau_{est})^2 - 3.63 (\tau_{cic}/\tau_{est}) + 1.53 \dots\dots 4.2a)$

Serie 2 $t = 1.95 (\tau_{cic}/\tau_{est})^2 - 3.30 (\tau_{cic}/\tau_{est}) + 1.41 \dots\dots 4.2b)$

Serie 3 $t = 0.61 (\tau_{cic}/\tau_{est})^2 - 0.75 (\tau_{cic}/\tau_{est}) + 0.26 \dots\dots 4.2c)$

Es importante aclarar que las ecuaciones anteriores tienen un campo de aplicación limitado al nivel de esfuerzo cortante cíclico de estos ensayos, del 65 al 120 %.

Los valores del módulo de rigidez G obtenidos experimentalmente y los obtenidos aplicando la ecuación 4.1, con el parámetro de degradación t valuado con las ecuaciones 4.2, se comparan en la tabla 4.4 y a la vez en las figuras 4.81 a 4.83. Se observa que los valores teóricos se aproximan razonablemente bien a los experimentales, antes del número de ciclos crítico.

Con la idea de obtener una ecuación única para el factor de degradación t, se analizaron los valores de los coeficientes A, B y C indicados en las ecuaciones 4.2 y cuyos valores fueron los siguientes:

Serie No.	C o e f i c i e n t e s		
	A	B	C
1	2.25	3.63	1.53
2	1.95	3.30	1.41
3	0.61	0.75	0.26

Los valores mayores de los coeficientes anteriores son los de la serie 1 y los menores los de la 3. Del resumen de resultados de laboratorio presentados en las tablas 4.1 y 4.2, referentes a los materiales con los que se realizaron estas series de ensayos, se puede ver que las propiedades de estos materiales difieren en cuanto a plasticidad, contenido de agua, relación de vacíos y resistencia estática. Ahora bien, tomando un solo parámetro, la resistencia estática y graficándola contra los coeficientes A, B y C, se obtuvo la gráfica de la figura 4.84 en la cual se observa que a medida que la resistencia estática crece, los coeficientes disminuyen.

Los coeficientes A, B y C de las series 1 y 2 presentan cierta similitud y si vemos el índice de plasticidad de cada uno de ellos, se aprecia que son muy parecidos también (305 y 293, respectivamente). De lo anterior se puede decir que es deseable ampliar el estudio con pruebas adicionales, para determinar adecuadamente los coeficientes A, B y C que al parecer son función de: la resistencia estática, plasticidad, contenido de agua y relación de vacíos.

Número de ciclos crítico (N crit). Como se definió en el inciso 4.4, el número de ciclos crítico marca una frontera a partir de la cual el módulo de rigidez al corte decrece considerablemente. En la gráfica 4.40, se presentó la variación del número de ciclos crítico en función del nivel de esfuerzo cortante, donde se aprecia que las envolventes de cada serie definen aproximadamente líneas rectas cuando se presentan en un plano semilogarítmico.

De la figura 4.40 se dedujeron expresiones analíticas para cada una de las líneas envolventes, cuyas ecuaciones son de la forma $y = b + m x$, donde b es la ordenada al origen y m la pendiente.

Las ecuaciones obtenidas para las series de ensayos fueron las siguientes:

Serie 1 $(\tau_{cic}/\tau_{est}) = 1.25 - 0.19 \log N_{crit}$.

Serie 2 $(\tau_{cic}/\tau_{est}) = 1.25 - 0.165 \log N_{crit}$.

Serie 3 $(\tau_{cic}/\tau_{est}) = 1.30 - 0.18 \log N_{crit}$.

Se observa que las ecuaciones anteriores son muy parecidas, tomando el promedio aritmético de los factores b y m (ordenada al origen y pendiente, respectivamente) y reordenando los términos, se obtuvo la ecuación siguiente:

$$N_{crit.} = e^{12.936 + 1.266 \cdot (\tau_{cic}/\tau_{est})} \dots\dots\dots 4.3)$$

En la tabla 4.5 se presentan los valores del número de ciclos crítico, experimentales y analíticos, estos últimos calculados mediante la ecuación 4.3 y en las figura 4.85 la representación gráfica de los mismos.

Número de ciclos a la falla (Nr). En las gráficas de nivel de esfuerzo cortante cíclico (τ_{cic}/τ_{est}) contra número de ciclos a la falla (Nr) presentadas en las figuras 4.25 a 4.27, se observa que las curvas se pueden representar aproximadamente por medio de una ecuación de tipo parabólico, correspondientes a los límites de esfuerzo cortante de estos ensayos, del 65 al 120 %. Arriba del límite superior las muestras fallan en el primer ciclo y abajo del inferior aproximadamente la curva se vuelve asintótica.

Las ecuaciones para estas series fueron las siguientes:

Serie 1 $Nr = 6048.1(\tau_{cic}/\tau_{est})^2 - 13273.5(\tau_{cic}/\tau_{est}) + 7229.4 \dots\dots 4.4a)$

Serie 2 $Nr = 8011.8(\tau_{cic}/\tau_{est})^2 - 17772.8(\tau_{cic}/\tau_{est}) + 9800.4 \dots\dots 4.4b)$

Serie 3 $Nr = 32271.6(\tau_{cic}/\tau_{est})^2 - 67053.8(\tau_{cic}/\tau_{est}) + 34606.2 \dots\dots 4.4c)$

En la tabla 4.6 se presenta la comparación de los valores experimentales del número de ciclos a la falla, con los teóricos obtenidos de las ecuaciones 4.4 y en las figuras 4.86 a 4.88 la representación gráfica de los mismos. En estas expresiones también se observa que los coeficientes de las ecuaciones de ajuste para las series 1 y 2 son muy parecidos, lo cual hace suponer que también dependen fuertemente del índice de plasticidad (en las series 1 y 2 el índice plástico es muy parecido y en la serie 3 es considerablemente menor).

Degradación del módulo de rigidez G con la deformación angular. En el inciso 4.5 y figuras 4.59 a 4.61, se presentaron las curvas donde aparece el módulo de rigidez G en función de la deformación angular pico a pico γ_{pp} (deformación total hacia uno y otro lado de un ciclo de histéresis), para estas curvas se pudo modelar aproximadamente su comportamiento empleando una ecuación de tipo hiperbólico de forma parecida a la de Hardin-Drnevich, pero introduciendo una variable adicional correspondiente al nivel de esfuerzo cortante cíclico (τ_{cic}/τ_{est}).

La ecuación propuesta fue la siguiente:

$$G / G_1 = \frac{1}{1 - (\tau_{cic}/\tau_{est})^{1.2} + (\gamma_{pp} / 2\gamma_r)^{1.2}} \dots\dots\dots 4.5)$$

Donde las literales significan:

G = módulo de rigidez en el ciclo N.

G₁ = módulo de rigidez en el ciclo 1.

τ_{cic}/τ_{est} = nivel de esfuerzo cortante cíclico, expresado en función de la resistencia estática obtenida en corte simple (τ_{est}).

γ_{pp} = deformación angular pico a pico para el ciclo N.

$\gamma_r = \tau_{est}/G_1$

La comparación de los valores del módulo de rigidez G experimentales y teóricos, estos últimos aplicando la ecuación 4.5, se presentan en las tablas 4.7 A y B, y su representación gráfica en las figuras 4.89 a 4.91.

Si se acepta que la variación del módulo de rigidez G en función de la deformación angular γ_{pp} , se puede modelar apropiadamente aplicando la ecuación 4.5, puede examinarse la forma de la curva teórica para valores de deformación angular pequeños. En la figuras 4.92 a 4.96 se presentan las curvas obtenidas, las cuales incluyen los valores teóricos para deformaciones angulares mínimas de 10^{-3} , y correspondientes a diferentes niveles de esfuerzo cortante para las tres series de ensayos estudiadas.

Las curvas tienen una forma parecida a la reportada en la literatura (Romo, 1990), notando los siguientes aspectos importantes:

- . Los datos experimentales se ubican en la porción final de dichas curvas.
- . Para niveles de esfuerzo cortante mayores o iguales al 100% de la resistencia estática y deformaciones angulares pequeñas menores del 1%, las curvas dejan de tener aplicación práctica ya que el valor de G/G₁ se hace infinito.
- . En las curvas 4.92 a 4.96, para una deformación angular pico a pico $\gamma_{pp} = 0.01\%$, se obtuvieron relaciones G/G₁ > 1, con los valores más altos de esta relación para niveles de esfuerzo cortante mayor, y viceversa. Lo anterior se debe a que a medida que el valor de τ_{cic}/τ_{est} crece, la deformación angular alcanzada en el ciclo inicial, se incrementa también con la correspondiente disminución en el valor del módulo de rigidez G (tablas 4.7 A y B), por lo tanto presenta una diferencia mucho mayor con relación al módulo G_{máx} obtenido a deformaciones muy pequeñas.

Se recomienda verificar la bondad de los datos teóricos obtenidos de la ecuación 4.5 a deformaciones angulares pequeñas, con los respectivos de una prueba en columna resonante o con ensayos de campo como los de cono sísmico, pozos cruzados, pozo abajo y pozo arriba, donde se obtiene $G_{\text{máx}}$.

Por último, se trató de modelar la variación del módulo de rigidez G contra la deformación angular pico a pico γ_{pp} , empleando las siguientes ecuaciones:

a) Ecuación de Ramberg-Osgood modificada por Hara (1980)

$$G/G_{\text{máx}} = \frac{1}{1 + \alpha \left[\frac{G}{G_{\text{máx}}} - \frac{\gamma}{\gamma_r} \right]} \quad \dots\dots 4.6)$$

Con los siguientes factores de ajuste propuestos por Jaime (1987), para diferentes sitios del valle de México:

$$G/G_{\text{máx}} = \frac{1}{1 + 1.757 \left[\frac{G}{G_{\text{máx}}} - \frac{\gamma}{0.3} \right]} \quad \dots\dots 4.6a)$$

$$G/G_{\text{máx}} = \frac{1}{1 + 1.89 \left[\frac{G}{G_{\text{máx}}} - \frac{\gamma}{0.9} \right]} \quad \dots\dots 4.6b)$$

$$G/G_{\text{máx}} = \frac{1}{1 + 2.783 \left[\frac{G}{G_{\text{máx}}} - \frac{\gamma}{0.6} \right]} \quad \dots\dots 4.6c)$$

$$G/G_{\text{máx}} = \frac{1}{1 + 2.783 \left[\frac{G}{G_{\text{máx}}} - \frac{\gamma}{0.1} \right]} \quad \dots\dots 4.6d)$$

De las ecuaciones anteriores, se determinó el $G_{\text{máx}}$ empleando el valor del módulo G del ciclo inicial, para cada una de las tres series de ensayos. Luego, con ese valor de $G_{\text{máx}}$ se evaluaron los módulos de rigidez correspondientes a las diferentes deformaciones angulares registradas. Los valores teóricos que más se aproximaron a los experimentales, fueron los obtenidos con la ecuación 4.6a, cuya comparación se presenta en las figuras 4.97 a 4.99.

b) Ecuación propuesta por Romo (1987)

$$G/G_{\text{máx}} = [1 - H(\gamma)] \quad \dots\dots\dots 4.7)$$

$$\text{Con } H(\gamma) = \left[\frac{(\gamma/\gamma_r)^{2B}}{1 + (\gamma/\gamma_r)^{2B}} \right]^A$$

Los factores A, B y γ_r dependen del índice de plasticidad del suelo y se obtienen de gráficas presentadas por el investigador antes citado; Los valores obtenidos para cada serie fueron los siguientes:

Serie	Índice plástico	A	B	γ_r
1	305%	1.00	0.26	3.2%
2	293%	0.98	0.26	3.1%
3	159%	0.72	0.52	0.5%

La comparación de los valores experimentales con los teóricos, estos últimos obtenidos con la ecuación 4.7, se presentan en las figuras 4.97 a 4.99.

TABLAS. Capítulo 4

Tabla 4.1 Propiedades índice de la arcilla inalterada utilizada en aparato de corte simple cíclico.

SERIE No.:	SITIO	PROFUNDIDAD EN (m)	W i (%)	LL (%)	LP (%)	IP	Ss	SUCS
1	Hospital Infantil Centro Médico	11.00 a 11.20	372	418	113	305	2.45	C H
2	Volkswagen Iztapalapa	24.00 a 24.20	355	379	86	293	2.40	C H
3	Bordo poniente Mil hectáreas	43.50 a 43.70	292	250	91	159	2.41	M H

W i = Contenido de
agua inicial
promedio

LL = Límite líquido
LP = Límite plástico
IP = Índice plástico

Ss = Densidad de sólidos
SUCS = Sistema unificado de
clasificación de suelos

**Tabla 4.2 Resumen de resultados de laboratorio
en el aparato de corte simple cíclico**

SERIE No.	PRUEBA No.	W i (%)	G w i (%)	e i	γ_m (t/m ³)	τ_{est} (kg/cm ²)	τ_{cic} (kg/cm ²)	τ_{cic}/τ_{est} (%)	CICLOS A LA FALLA
1	1	402	99	10.0	1.12	0.335	-	-	-
	2	405	100	9.9	1.13	-	0.243	72.5	785
	3	359	100	8.8	1.15	-	0.329	98.2	27
	4	344	99	8.5	1.14	-	0.400	119.4	3
2	1	361	100	8.7	1.14	0.390	-	-	-
	2	364	100	8.8	1.14	-	0.316	81.0	661
	3	357	100	8.6	1.17	-	0.396	101.5	8
	4	339	100	8.1	1.17	-	0.466	119.5	3
3	1	270	100	6.5	1.18	0.420	-	-	-
	2	301	100	7.2	1.18	-	0.275	65.0	4656
	3	317	100	7.6	1.16	-	0.370	88.0	590
	4	280	100	6.7	1.18	-	0.473	112.6	20

W i = Contenido de agua inicial
G w i = Grado de saturación inicial
e i = Relación de vacíos inicial

γ_m = Peso volumétrico
 τ_{est} = Esfuerzo cortante estático
 τ_{cic} = Esfuerzo cortante cíclico

Tabla 4.3.A Valores de los parámetros dinámicos que definen las gráficas tridimensionales.

SERIE	$\tau_{cic} \setminus \tau_{est}$ EN (%)	NUMERO DE CICLOS (Nc)	G (kg/cm ²)	$\Delta u / \tau'_{oct}$
1	72.5	1	7.3	0.098
	72.5	10	6.2	0.228
	72.5	100	5.4	0.383
	72.5	200	4.7	0.430
	72.5	400	4.3	0.478
	72.5	600	3.9	0.504
	72.5	785	1.2	1.191
1	98.2	1	5.3	0.235
	98.2	5	4.3	0.450
	98.2	10	4.1	0.520
	98.2	14	3.8	0.593
	98.2	20	3.1	0.633
	98.2	27	1.9	0.798
1	119.4	1	3.6	0.424
	119.4	2	2.8	0.530
	119.4	3	2.2	0.556
2	81.0	1	10.6	0.107
	81.0	150	9.1	0.308
	81.0	350	8.5	0.390
	81.0	500	7.9	0.420
	81.0	661	2.2	0.675
2	101.5	1	7.7	0.107
	101.5	3	7.0	0.210
	101.5	6	6.4	0.288
	101.5	8	4.0	0.443
2	119.5	1	6.5	0.258
	119.5	2	6.0	0.362
	119.5	3	4.0	0.637

τ_{cic} = Esfuerzo cortante cíclico
 τ_{est} = Esfuerzo cortante estático
 Nc = Número de ciclos

G = Módulo de rigidez al corte
 Δu = Incremento de presión de poro
 τ'_{oct} = Esfuerzo efectivo octaédrico de consolidación

Tabla 4.3.B Valores de los parámetros dinámicos que definen las gráficas tridimensionales .

SERIE	τ_{cic} / τ_{est} EN No. (%)	NUMERO DE CICLOS (Nc)	G (kg/cm ²)	$\Delta u / \sigma'_{oct}$
3	65.0	1	16.0	0.022
	65.0	1000	14.1	0.182
	65.0	1500	13.9	0.182
	65.0	2000	13.9	0.183
	65.0	2500	13.0	0.197
	65.0	3000	12.6	0.195
	65.0	3500	11.9	0.188
	65.0	4000	10.0	0.193
	65.0	4500	8.7	0.181
	65.0	4640	4.3	0.191
	65.0	4644	3.7	0.193
	65.0	4648	2.4	0.204
	65.0	4652	1.7	0.210
	65.0	4656	1.5	0.264
3	88.0	1	14.0	0.061
	88.0	100	11.3	0.348
	88.0	200	10.2	0.408
	88.0	300	9.8	0.439
	88.0	400	8.9	0.473
	88.0	500	8.0	0.509
	88.0	550	7.3	0.535
	88.0	570	7.1	0.544
	88.0	580	6.6	0.552
	88.0	590	2.1	0.553
3	112.6	1	12.9	0.287
	112.6	3	10.7	0.433
	112.6	6	9.5	0.551
	112.6	9	8.9	0.608
	112.6	12	7.4	0.662
	112.6	15	5.4	0.756
	112.6	18	4.7	0.849
	112.6	20	2.6	0.933

τ_{cic} = Esfuerzo cortante cíclico
 τ_{est} = Esfuerzo cortante estático
 Nc = Número de ciclos

G = Módulo de rigidez al corte
 Δu = Incremento de presión de poro
 σ'_{oct} = Esfuerzo efectivo octaédrico de consolidación

Tabla 4.4.A Valores del módulo de rigidez G y del factor de degradación "t" experimentales y teóricos, de muestras de arcilla ensayadas en el aparato de corte simple cíclico.

SERJE No.	τ cic \ τ est EN (%)	Nc	G exp. (kg/cm ²)	Módulo de rigidez teórico			Factor de degradación "t"		
				G'	G''	G'''	exp.	prom.	teór. (ec 8.2)
1	72.5	1	7.3	7.30	7.30	7.30	-		
	72.5	10	6.2	6.38	6.96	6.06	0.071		
	72.5	100	5.4	5.58	6.64	5.03	0.065		
	72.5	200	4.7	5.36	6.55	4.75	0.083		
	72.5	400	4.3	5.15	6.46	4.50	0.088		
	72.5	600	3.9	5.03	6.40	4.30	0.098	0.081	0.081
	72.5	785	1.2	4.95	6.37	4.25	0.271		
1	98.2	1	5.3	5.30	5.30	5.30	-		
	98.2	5	4.3	4.83	5.13	4.26	0.130		
	98.2	10	4.1	4.63	5.06	3.87	0.110		
	98.2	14	3.8	4.54	5.02	3.70	0.126		
	98.2	20	3.1	4.45	4.98	3.52	0.179	0.136	0.136
1	98.2	27	1.9	4.37	4.95	3.39	0.311		
	119.4	1	3.6	3.60	3.60	3.60	-		
	119.4	2	2.8	3.46	3.55	2.70	0.363		
	119.4	3	2.2	3.38	3.52	2.30	0.448	0.405	0.405
2	81.0	1	10.6	10.6	10.6	10.6	-		
	81.0	150	9.1	7.91	9.56	8.72	0.0304		
	81.0	350	8.5	7.53	9.40	8.40	0.0377		
	81.0	500	7.9	7.38	9.33	8.30	0.0473	0.0385	0.039
	81.0	661	2.2	7.26	9.28	8.20	0.242		
2	101.5	1	7.7	7.70	7.70	7.70	-		
	101.5	3	7.0	7.22	7.53	6.90	0.0867		
	101.5	6	6.4	6.94	7.42	6.50	0.1032	0.0949	0.095
	101.5	8	4.0	6.82	7.38	6.30	0.3149		
2	119.5	1	6.5	6.50	6.50	6.50	-		
	119.5	2	6.0	6.24	6.40	5.40	0.115		
	119.5	3	4.0	6.09	6.36	4.70	0.442	0.279	0.280

τ cic = Esfuerzo cortante cíclico
 τ est = Esfuerzo cortante estático

Nc = Número de ciclos

exp. = experimental teor. = teórico

G' obtenido con $t = 0.0583$

G'' obtenido con $t = 0.0205$

G''' obtenido con t según ecuación 8.2

prom. = promedio

Tabla 4.4.B Valores del módulo de rigidez G y del factor de degradación "t" experimentales y teóricos, aparato de corte simple cíclico.

SERIE No.	z cic z est EN (%)	Nc	G exp. (kg/cm ²)	Módulo de rigidez teórico			Factor de degradación "t"		
				G'	G''	G'''	exp.	prom.	teór. (ec 8.2)
3	65.0	1	16.0	16.0	16.0	16.0	-		
	65.0	1000	14.1	10.69	13.88	13.37	0.0183		
	65.0	1500	13.9	10.45	13.77	13.20	0.0192		
	65.0	2000	13.9	10.27	13.69	13.13	0.0192		
	65.0	2500	13.0	10.14	13.63	13.05	0.0265		
	65.0	3000	12.6	10.03	13.58	12.99	0.0298		
	65.0	3500	11.9	9.94	13.53	12.90	0.0363	0.026	0.026
	65.0	4000	10.0	9.87	13.50	12.89	0.0566		
	65.0	4500	8.7	9.79	13.46	12.85	0.0724		
	65.0	4640	4.3	9.78	13.45	12.84	0.1556		
	65.0	4644	3.7	9.78	13.45	12.84	0.173		
	65.0	4648	2.4	9.77	13.45	12.84	0.224		
	65.0	4652	1.7	9.77	13.45	12.84	0.265		
	65.0	4656	1.5	9.77	13.45	12.84	0.280		
3	88.0	1	14.0	14.0	14.0	14.0	-		
	88.0	100	11.3	10.70	12.74	10.3	0.0465		
	88.0	200	10.2	10.28	12.56	9.82	0.0598		
	88.0	300	9.8	10.04	12.46	9.55	0.0625		
	88.0	400	8.9	9.87	12.38	9.37	0.0756		
	88.0	500	8.0	9.74	12.32	9.23	0.090	0.067	0.067
	88.0	550	7.3	9.69	12.30	9.17	0.103		
	88.0	570	7.1	9.67	12.29	9.15	0.107		
	88.0	580	6.6	9.66	12.28	9.14	0.118		
3	88.0	590	2.1	9.65	12.28	9.13	0.297		
	112.6	1	12.9	12.9	12.9	12.9	-		
	112.6	3	10.7	12.10	12.61	10.56	0.170		
	112.6	6	9.5	11.62	12.43	9.31	0.170		
	112.6	9	8.9	11.35	12.33	8.65	0.169		
	112.6	12	7.4	11.16	12.26	8.20	0.220	0.182	0.182
	112.6	15	5.4	11.01	12.20	7.88	0.321		
112.6	18	4.7	10.89	12.15	7.62	0.349			
112.6	20	2.6	10.83	12.13	7.48	0.534			

z cic = Esfuerzo cortante cíclico

z est = Esfuerzo cortante estático

Nc = Número de ciclos

exp. = experimental

teór. = teórico

G' obtenido con t = 0.0583

G'' obtenido con t = 0.0205

G''' obtenido con t según ecuación 8.2

prom. = promedio

Tabla 4.5 Número de ciclos crítico, experimental y teórico muestras de arcilla inalterada, equipo de corte simple cíclico.

SERIE No.	τ_{cic} / τ_{est} EN (%)	N crit. exp.	N crit. teór.
1	72.5	600	1094
	98.2	15	39
	119.4	2	2.5
2	81.0	460	365
	101.5	6	26
	119.5	2	2.5
3	65.0	4000	2888
	88.0	520	147
	112.6	11	6

τ_{cic} = Esfuerzo cortante cíclico
 τ_{est} = Esfuerzo cortante estático
 N crit. = Número de ciclos crítico

exp. = experimental
 teor. = teórico

Tabla 4.6 Número de ciclos a la falla, experimental y teórico muestras de arcilla inalterada, equipo de corte simple cíclico.

SERIE No.	τ cic \ τ est EN (%)	N falla exp.	N falla teór.
1	72.5	785	785
	98.2	27	27
	119.4	3	3
2	81.0	661	661
	101.5	8	15
	119.5	3	3
3	65.0	4656	4656
	88.0	590	590
	112.6	20	20

τ cic = Esfuerzo cortante cíclico
 τ est = Esfuerzo cortante estático
 N falla = Número de ciclos a la falla

exp. = experimental
 teór. = teórico

Tabla 4.7.A Valores del módulo de rigidez G, experimentales y teóricos y de la deformación angular pico a pico, en muestras ensayadas en el aparato de corte simple cíclico.

SERIE	τ cic \ τ est		G	G/G1	G	G/G1	Deformación angular
No.	EN (%)	Nc	exp. (kg/cm ²)	exp.	teór. (kg/cm ²)	teór.	pico a pico γ pp (%)
1	72.5	1	7.3	1	7.50	1	6.426
	72.5	10	6.2	0.849	6.39	0.852	7.799
	72.5	100	5.4	0.739	5.67	0.756	8.922
	72.5	200	4.7	0.644	5.33	0.710	9.546
	72.5	400	4.3	0.589	4.89	0.652	10.481
	72.5	600	3.9	0.520	4.60	0.613	11.168
	72.5	785	1.2	0.164	1.22	0.162	38.682
1	98.2	1	5.3	1	5.54	1	11.935
	98.2	5	4.3	0.811	4.50	0.812	14.257
	98.2	10	4.1	0.773	3.95	0.713	15.935
	98.2	14	3.8	0.716	3.52	0.635	17.548
	98.2	20	3.1	0.584	2.96	0.543	20.322
	98.2	27	1.9	0.358	1.63	0.294	33.549
1	119.4	1	3.6	1	3.72	1	21.723
	119.4	2	2.8	0.777	2.52	0.677	28.490
	119.4	3	2.2	0.611	1.86	0.500	35.532
2	81.0	1	10.6	1	11.4	1	5.520
	81.0	150	9.1	0.858	9.80	0.861	6.463
	81.0	350	8.5	0.801	9.27	0.814	6.866
	81.0	500	7.9	0.745	8.61	0.756	7.405
	81.0	661	2.2	0.207	2.32	0.204	25.042
2	101.5	1	7.7	1	7.97	1	9.990
	101.5	3	7.0	0.909	7.04	0.883	11.070
	101.5	6	6.4	0.831	6.32	0.793	12.082
	101.5	8	4.0	0.519	3.76	0.472	18.562
2	119.5	1	6.5	1	7.00	1	13.608
	119.5	2	6.0	0.923	6.50	0.928	14.369
	119.5	3	4.0	0.615	3.76	0.537	21.093

τ cic = Esfuerzo cortante cíclico
 τ est = Esfuerzo cortante estático
 Nc = Número de ciclos
 exp. = experimental teor. = teórico

G = Módulo de rigidez al corte
 G1 = Módulo de rigidez en el ciclo 1
 γ pp = Deformación angular pico a pico

Tabla 4.7.B Valores del módulo de rigidez G, experimentales y teóricos y de la deformación angular pico a pico, en muestras ensayadas en el aparato de corte simple cíclico.

SERIE	τ cic \ τ est	Nc	G	G/G1	G	G/G1	Deformación angular
No.	EN (%)		exp. (kg/cm ²)	exp.	teór. (kg/cm ²)	teór.	pico a pico γ pp (%)
3	65.0	1	16.0	1	16.9	1	3.153
	65.0	1000	14.1	0.881	15.56	0.920	3.547
	65.0	1500	13.9	0.868	15.56	0.920	3.547
	65.0	2000	13.9	0.868	15.56	0.920	3.547
	65.0	2500	13.0	0.812	15.07	0.891	3.704
	65.0	3000	12.6	0.787	14.83	0.877	3.784
	65.0	3500	11.9	0.743	13.75	0.813	4.178
	65.0	4000	10.0	0.625	12.79	0.756	4.572
	65.0	4500	8.7	0.543	11.34	0.671	5.282
	65.0	4640	4.3	0.268	5.59	0.330	11.116
	65.0	4644	3.7	0.231	4.74	0.280	13.007
	65.0	4648	2.4	0.150	3.76	0.222	16.160
	65.0	4652	1.7	0.106	2.54	0.150	23.020
	65.0	4656	1.5	0.093	1.52	0.089	36.106
	3	88.0	1	14.0	1	14.65	1
88.0		100	11.3	0.807	11.27	0.769	6.496
88.0		200	10.2	0.728	10.31	0.703	7.057
88.0		300	9.8	0.700	9.50	0.648	7.618
88.0		400	8.9	0.635	8.89	0.606	8.099
88.0		500	8.0	0.571	7.70	0.525	9.220
88.0		550	7.3	0.521	7.15	0.488	9.863
88.0		570	7.1	0.507	6.72	0.458	10.424
88.0		580	6.6	0.471	6.29	0.429	11.066
88.0		590	2.1	0.150	1.49	0.101	38.171
3	112.6	1	12.9	1	12.84	1	7.356
	112.6	3	10.7	0.829	10.21	0.795	8.701
	112.6	6	9.5	0.736	9.53	0.742	9.808
	112.6	9	8.9	0.689	7.42	0.577	11.074
	112.6	12	7.4	0.573	6.24	0.486	12.656
	112.6	15	5.4	0.418	4.94	0.384	15.186
	112.6	18	4.7	0.364	3.49	0.271	20.01
	112.6	20	2.6	0.210	1.75	0.136	34.96

τ cic = Esfuerzo cortante cíclico
 τ est = Esfuerzo cortante estático
 Nc = Número de ciclos
 exp. = experimental teór. = teórico

G = Módulo de rigidez al corte
 G1 = Módulo de rigidez en el ciclo 1
 γ pp = Deformación angular pico a pico.

FIGURAS. Capítulo 4

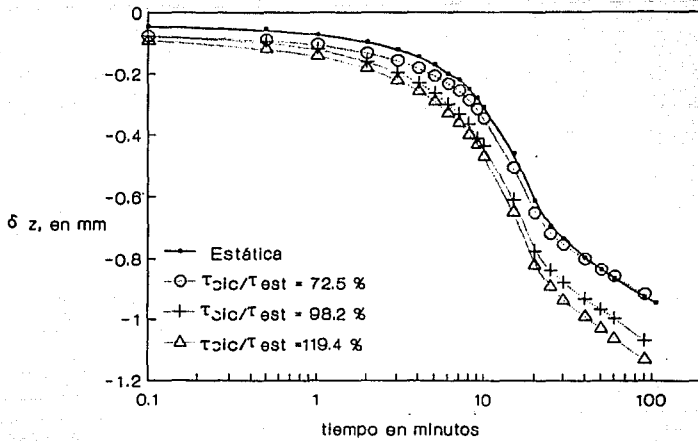


Fig 4.1 Curvas de consolidación serie 1

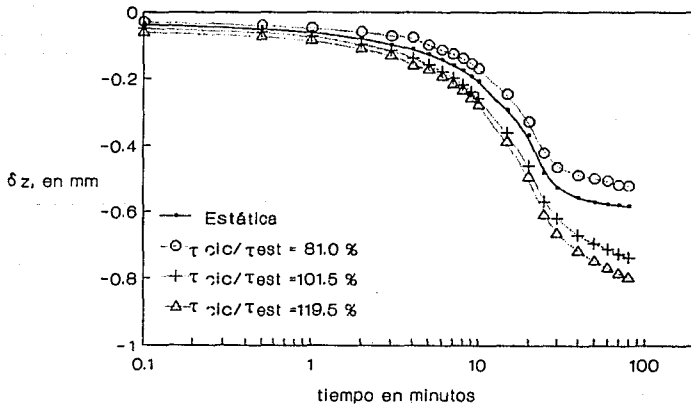


Fig 4.2 Curvas de consolidación serie 2

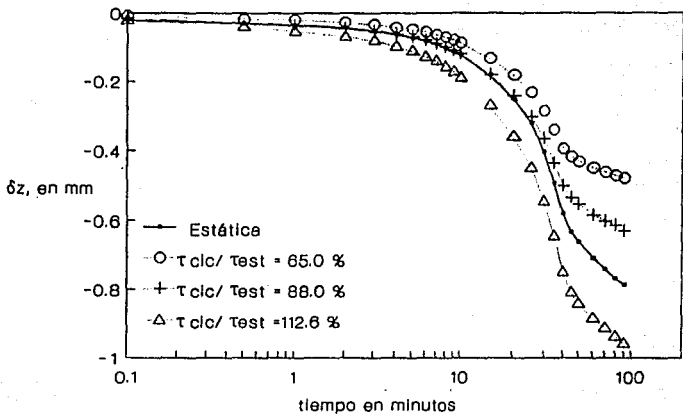


Fig 4.3 Curvas de consolidación serie 3

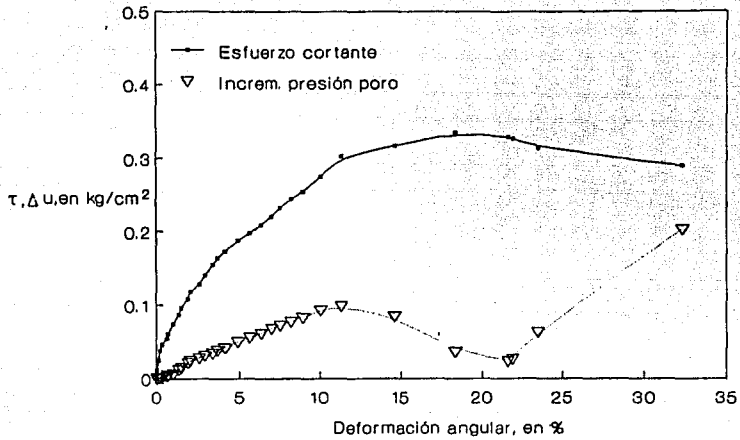


Fig 4.4 Prueba estática serie 1

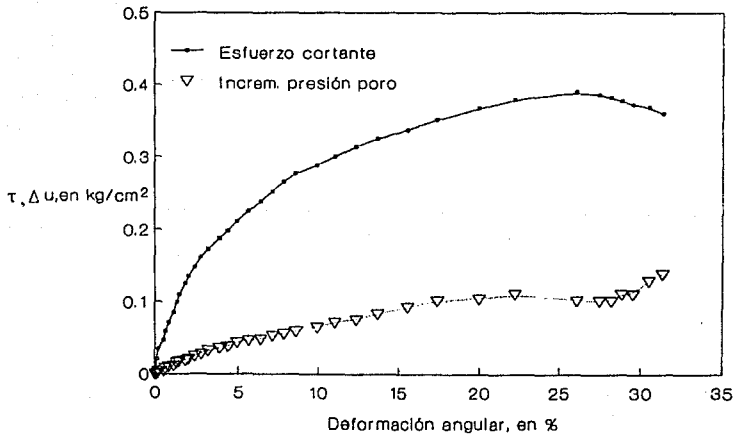


Fig 4.5 Prueba estática serie 2

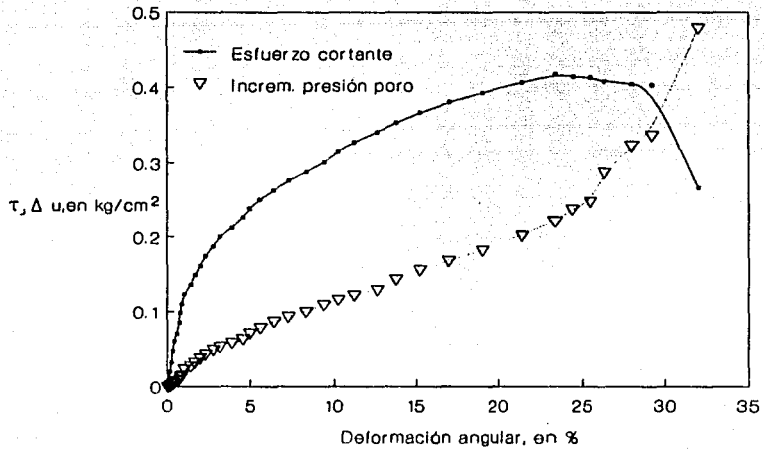


Fig 4.6 Prueba estática serie 3

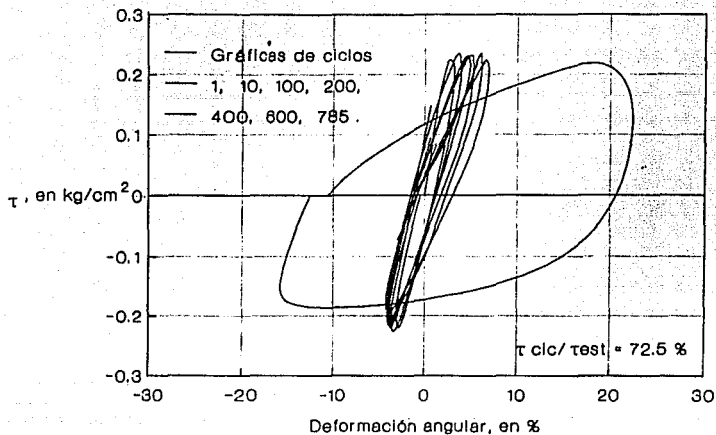


Fig 4.7 Curvas histeréticas serie 1

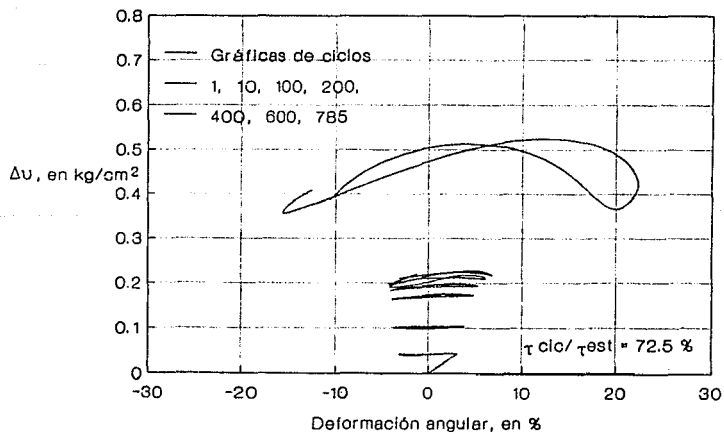


Fig 4.8 Incremento presión de poro vs deformación angular serie 1

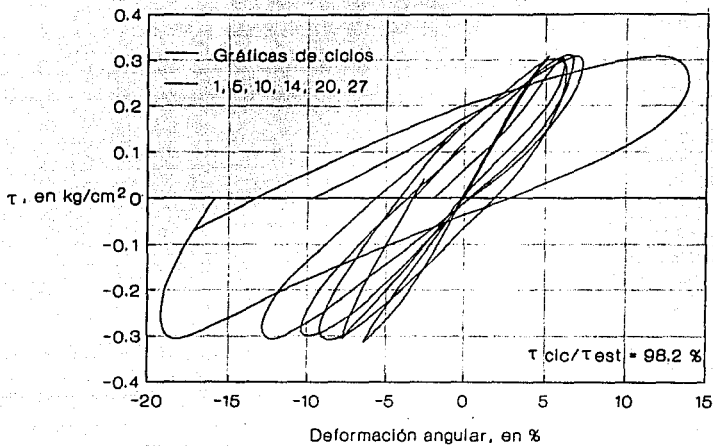


Fig 4.9 Curvas histeréticas serie 1

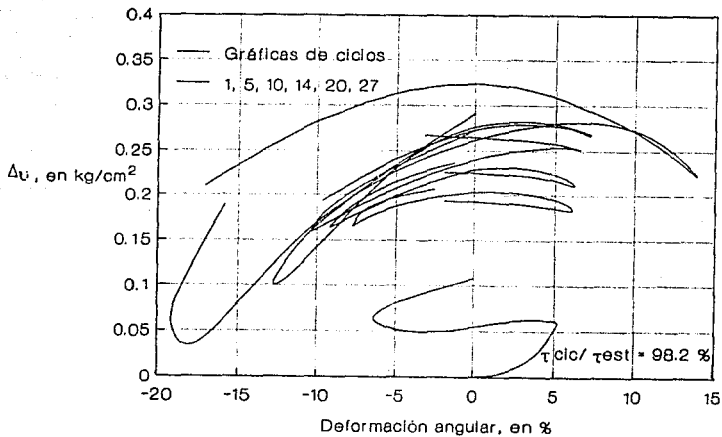


Fig 4.10 Incremento presión de poro vs deformación angular serie 1

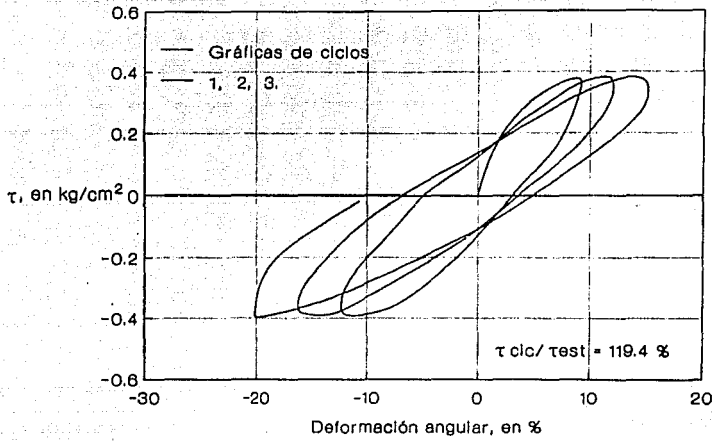


Fig 4.11 Curvas histeréticas serie 1.

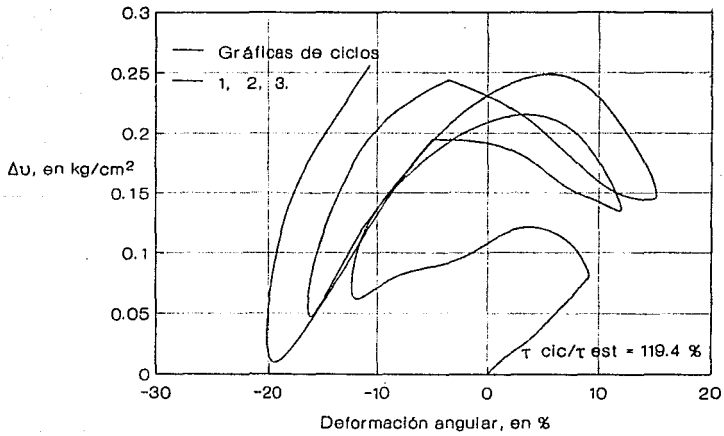


Fig 4.12 Incremento presión de poro vs deformación angular serie 1

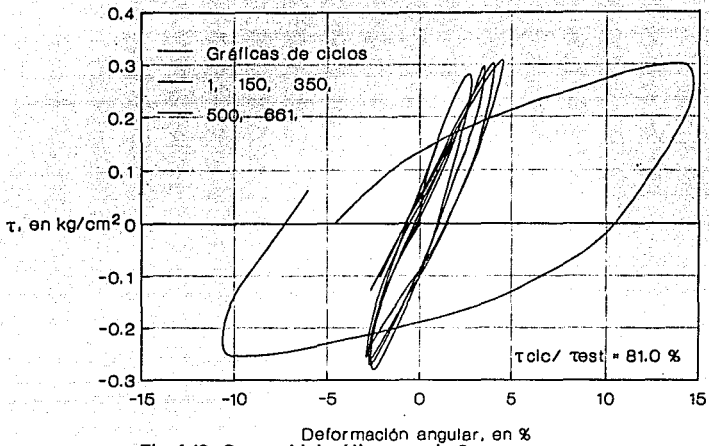


Fig 4.13 Curvas histeréticas serie 2

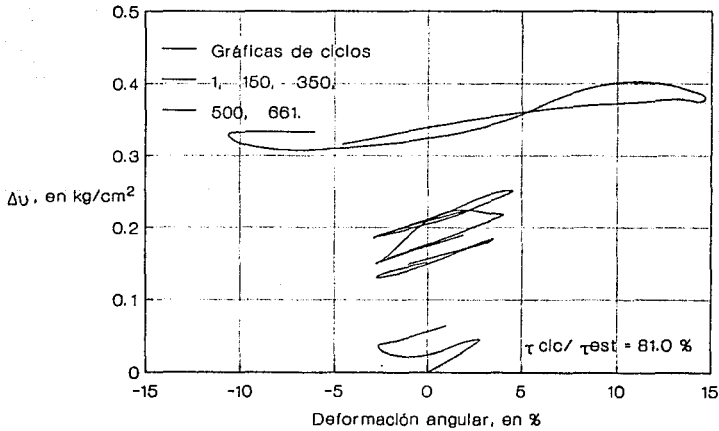


Fig 4.14 Incremento presión de poro vs deformación angular serie 2

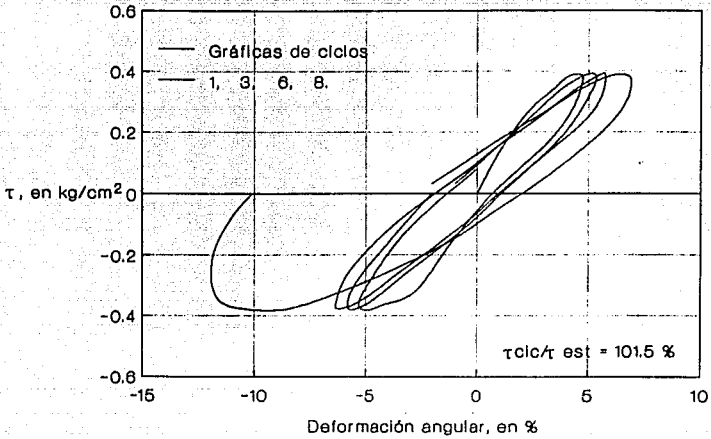


Fig 4.15 Curvas histéricas serie 2

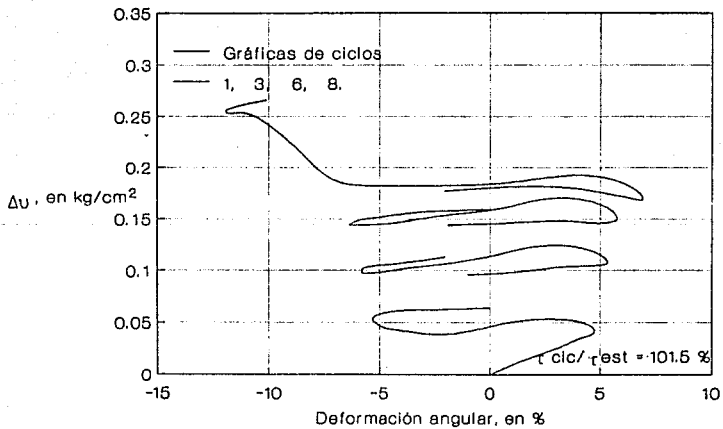


Fig 4.16 Incremento presión de poro vs deformación angular serie 2

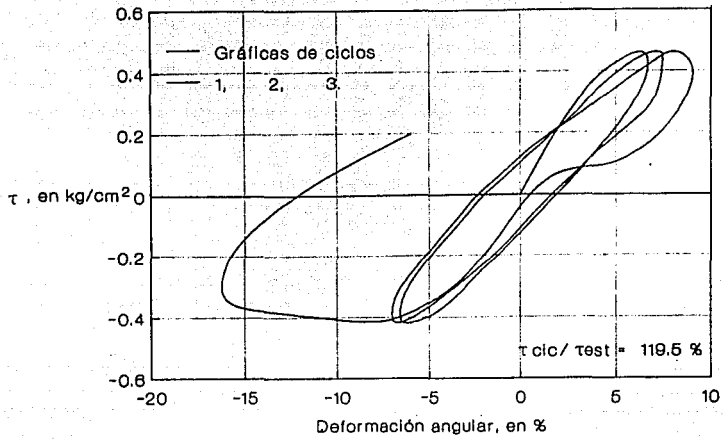


Fig 4.17 Curvas histeréticas serie 2

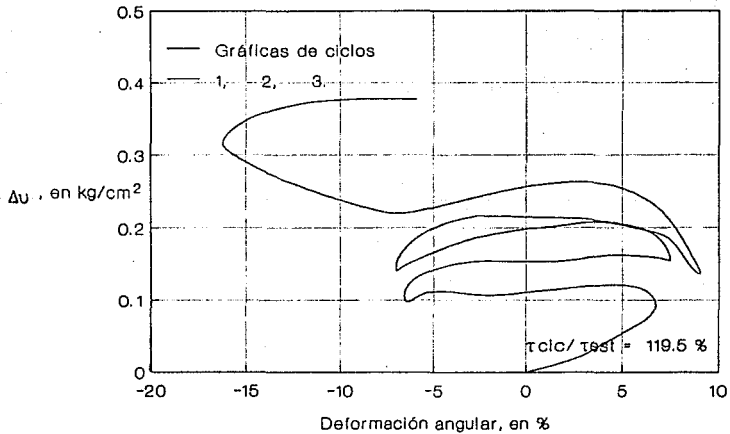


Fig 4.18 Incremento presión de poro vs deformación angular serie 2

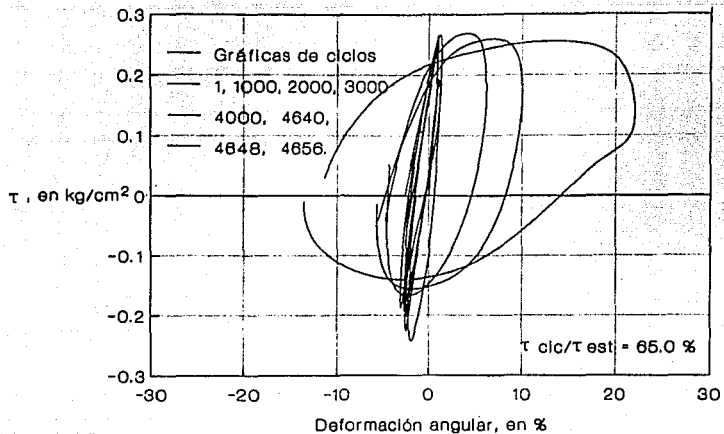


Fig 4.19 Curvas histeréticas serie 3

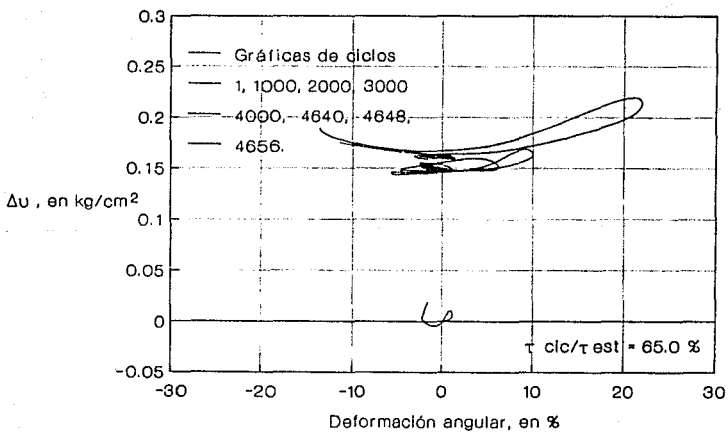


Fig 4.20 Incremento presión de poro vs deformación angular serie 3

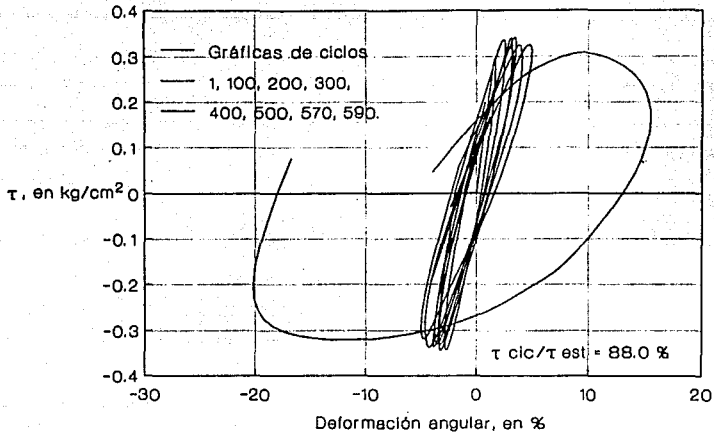


Fig 4.21 Curvas histeréticas serie 3

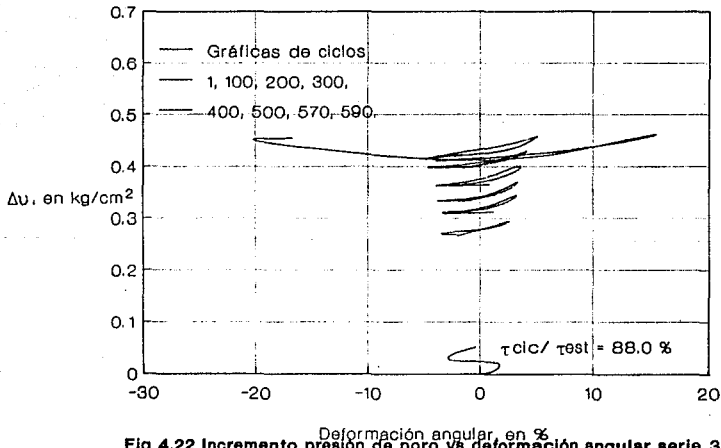


Fig 4.22 Incremento presión de poro vs deformación angular serie 3

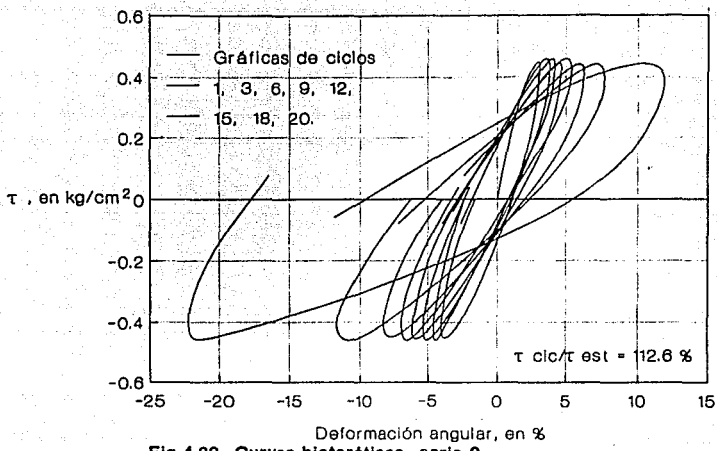


Fig 4.23 Curvas histeréticas serie 3

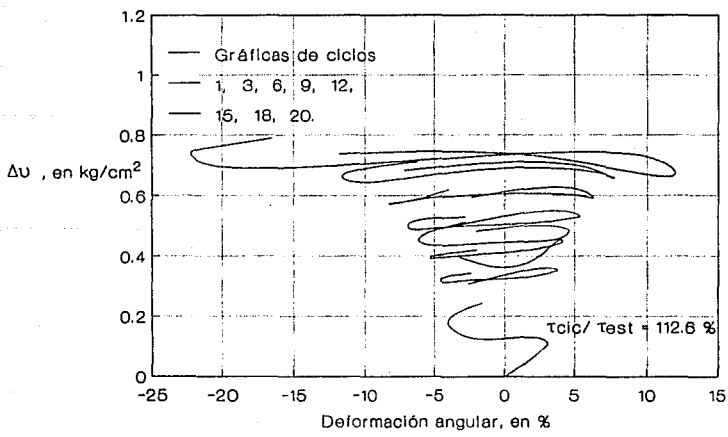


Fig 4.24 Incremento presión de poro vs deformación angular serie 3

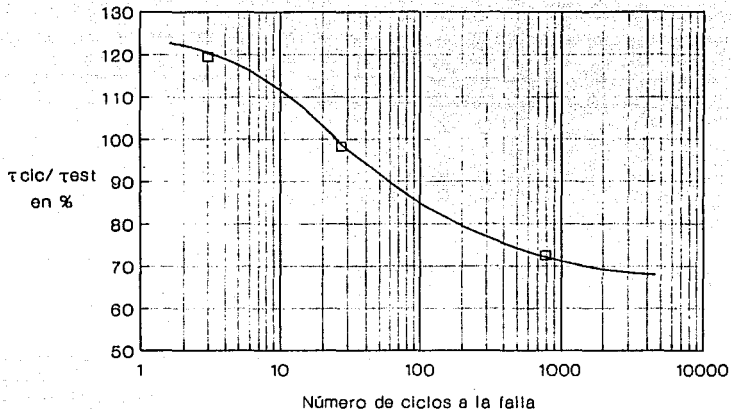


Fig 4.25 Nivel de esfuerzo cortante vs ciclos a la falla, serie 1

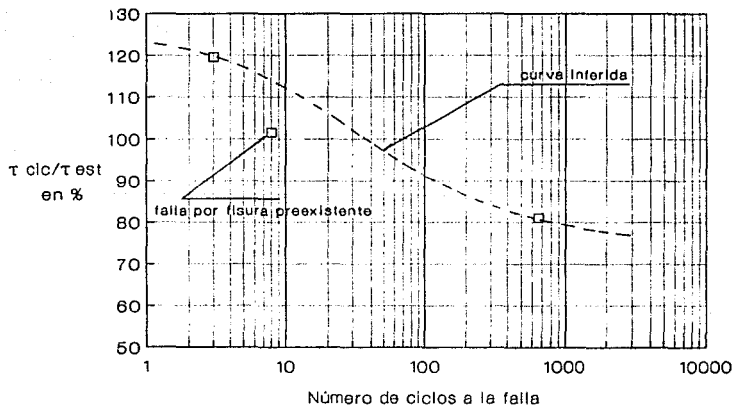


Fig 4.26 Nivel de esfuerzo cortante vs ciclos a la falla, serie 2

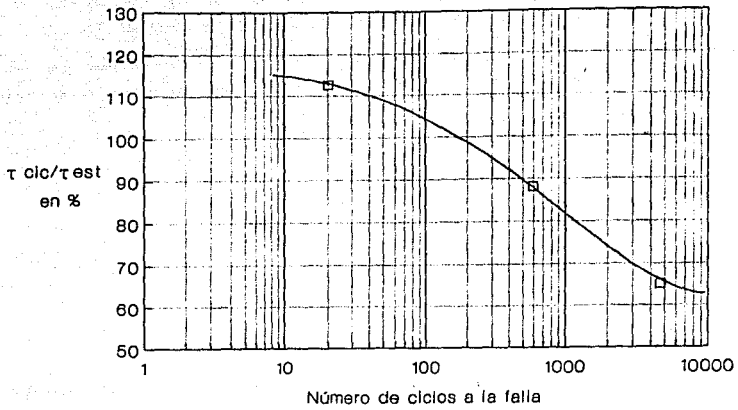


Fig 4.27 Nivel de esfuerzo cortante vs ciclos a la falla, serie 3

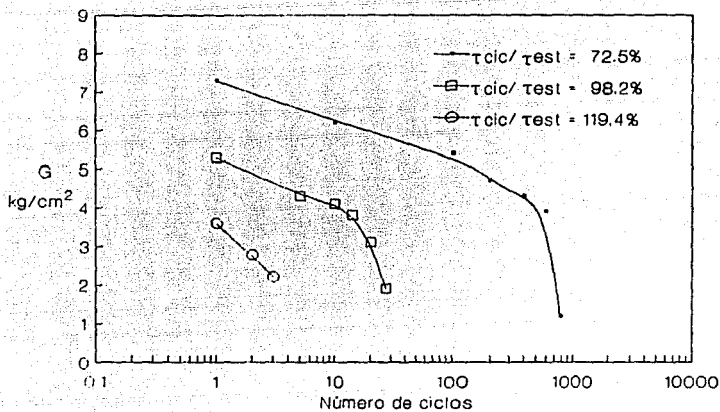


Fig 4.28 Módulo de rigidez G vs número de ciclos, serie 1

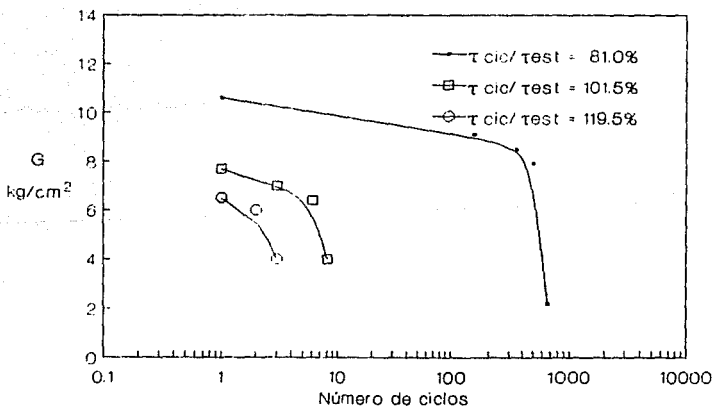


Fig 4.29 Módulo de rigidez G vs número de ciclos, serie 2

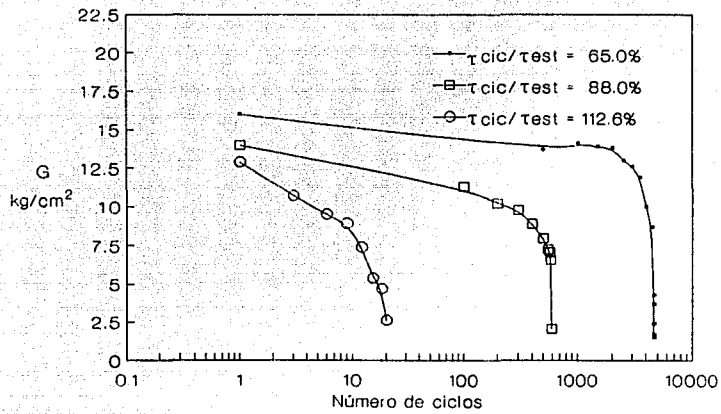


Fig 4.30 Módulo de rigidez G vs número de ciclos, serie 3

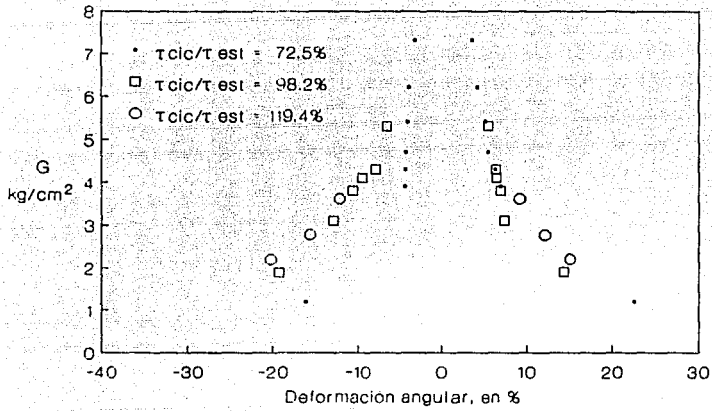


Fig 4.31 Módulo de rigidez G vs deformación angular, serie 1

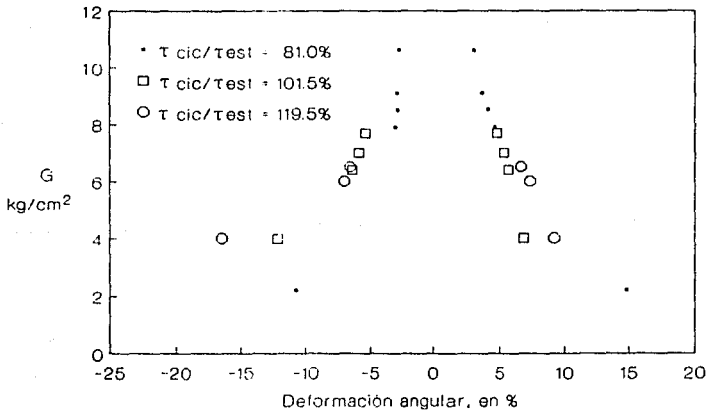


Fig 4.32 Módulo de rigidez G vs deformación angular, serie 2

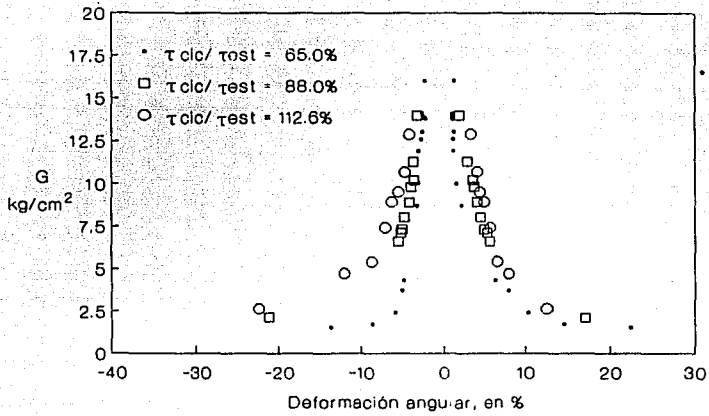


Fig 4.33 Módulo de rigidez G vs deformación angular, serie 3

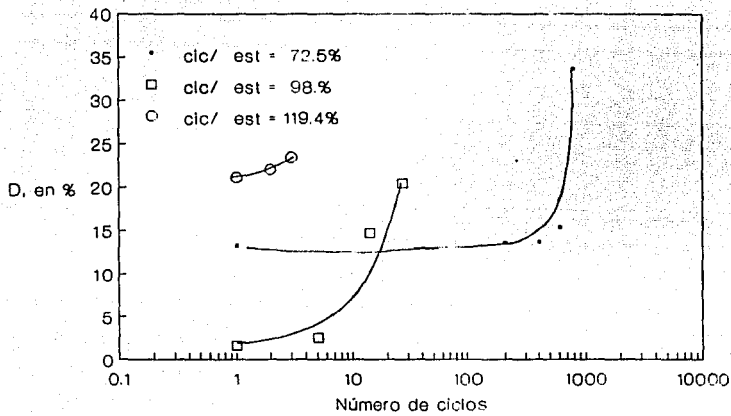


Fig 4.34 Amortiguamiento D vs número de ciclos, serie 1

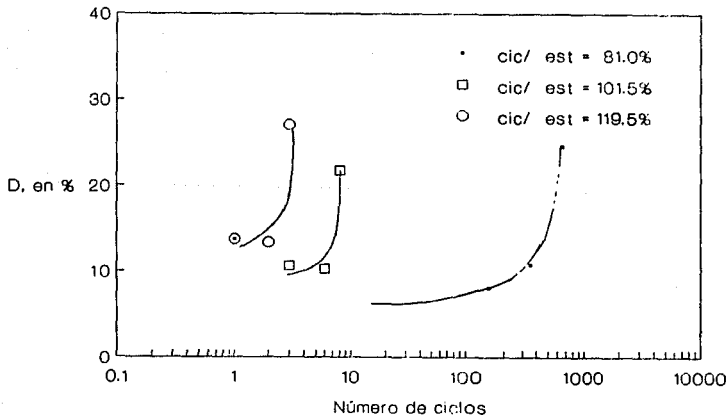


Fig 4.35 Amortiguamiento D vs número de ciclos, serie 2

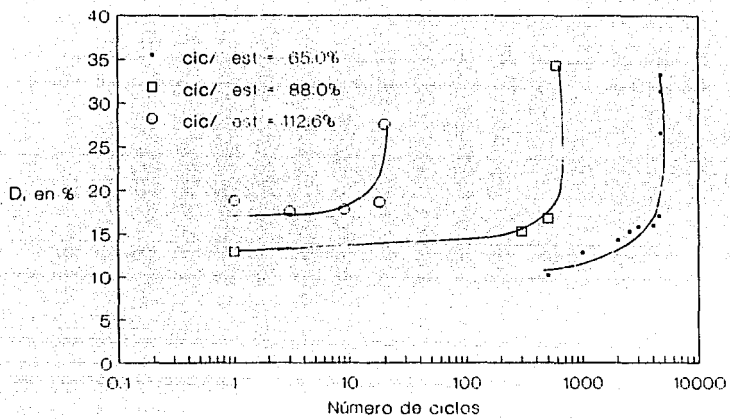


Fig 4.38 Amortiguamiento D vs número de ciclos, serie 3

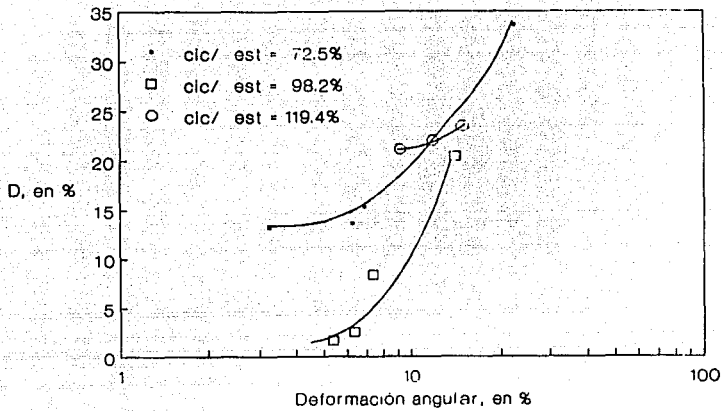


Fig 4.37 Amortiguamiento D vs deformación angular, serie 1

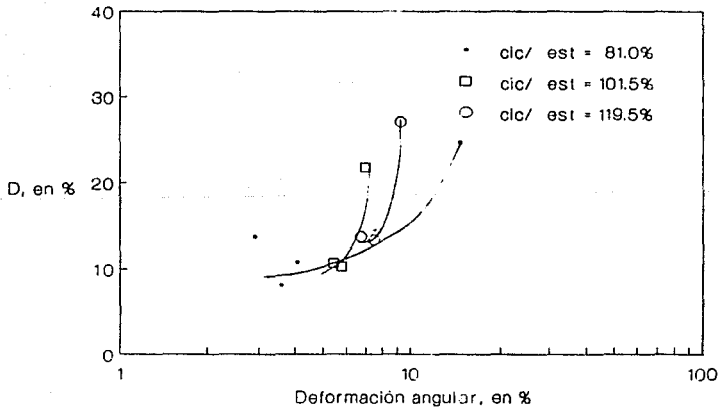


Fig 4.38 Amortiguamiento D vs deformación angular, serie 2

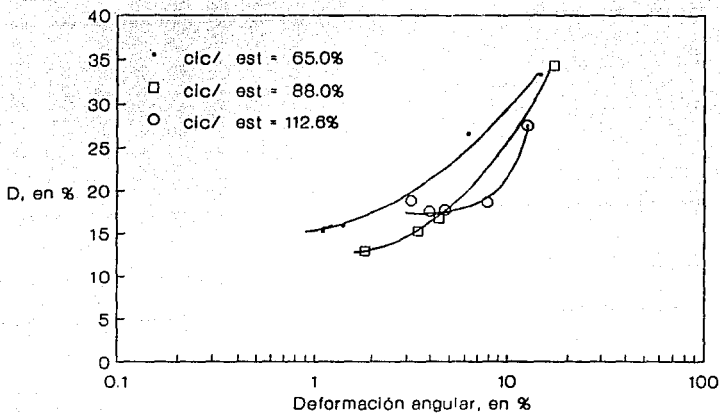


Fig 4.39 Amortiguamiento D vs deformación angular, serie 3

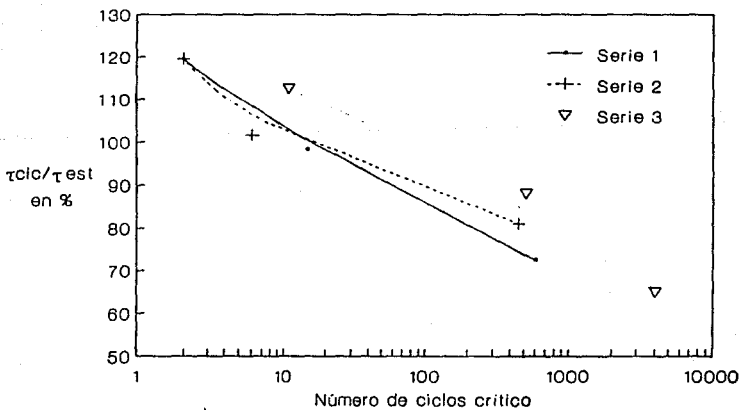


Fig 4.40 Nivel de esfuerzo cíclico vs número de ciclos crítico

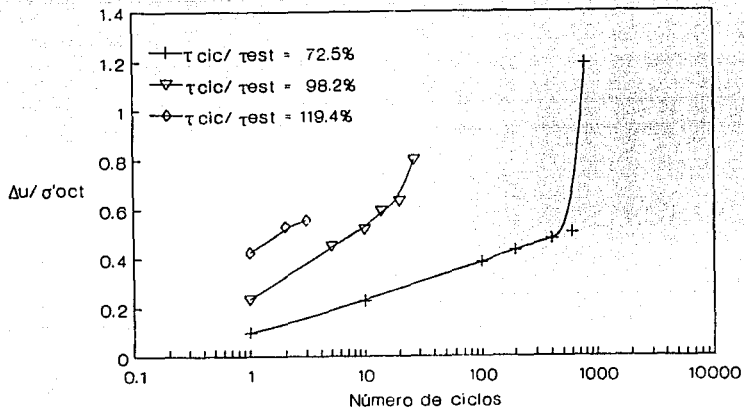


Fig 4.41 Presión de poro vs número de ciclos, serie 1

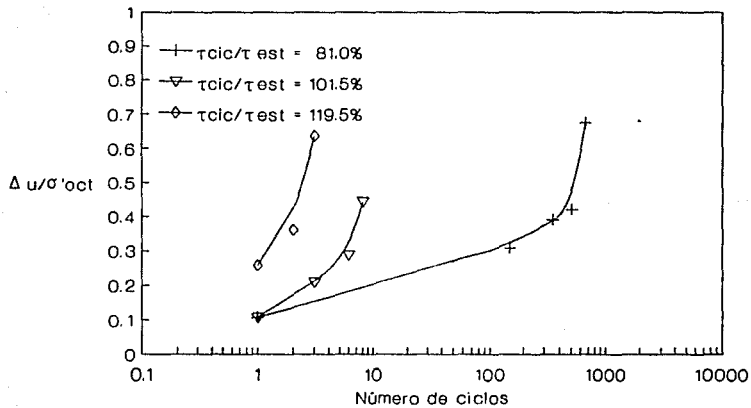


Fig 4.42 Presión de poro vs número de ciclos, serie 2

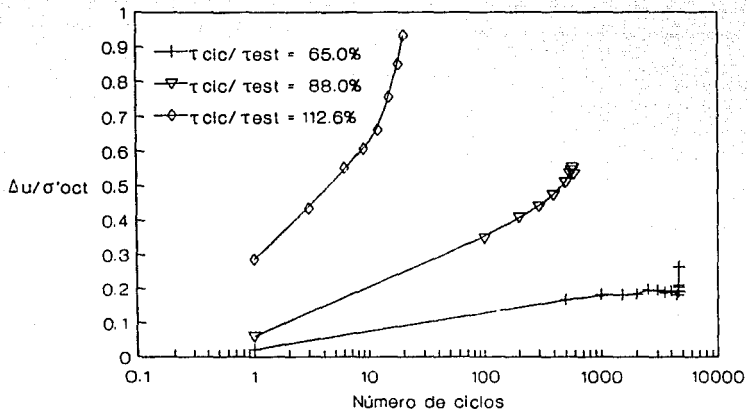


Fig 4.43 Presión de poro vs número de ciclos, serie 3

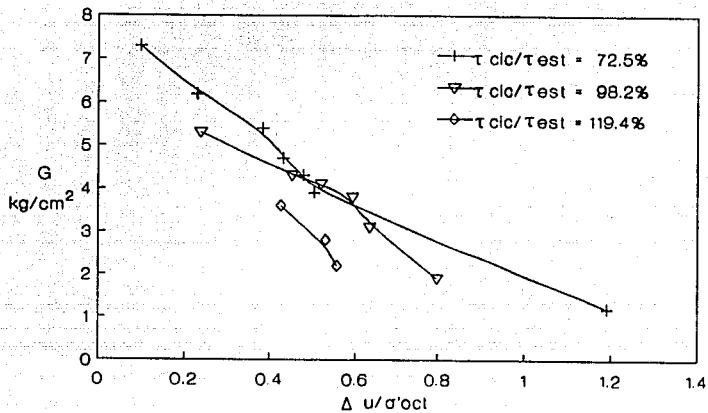


Fig 4.44 Módulo G vs incremento de presión de poro, serie 1

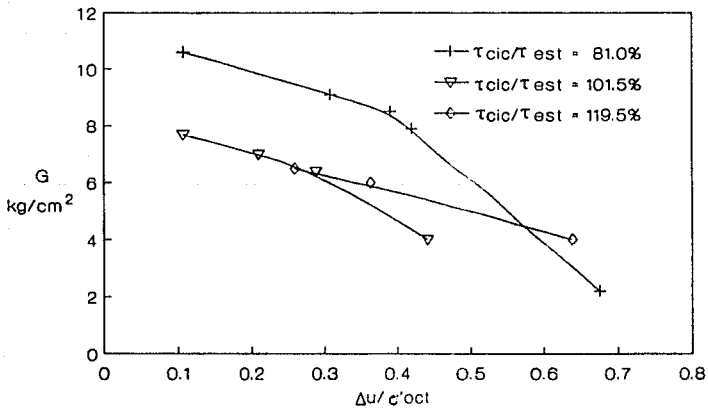


Fig 4.45 Módulo G vs incremento de presión de poro, serie 2

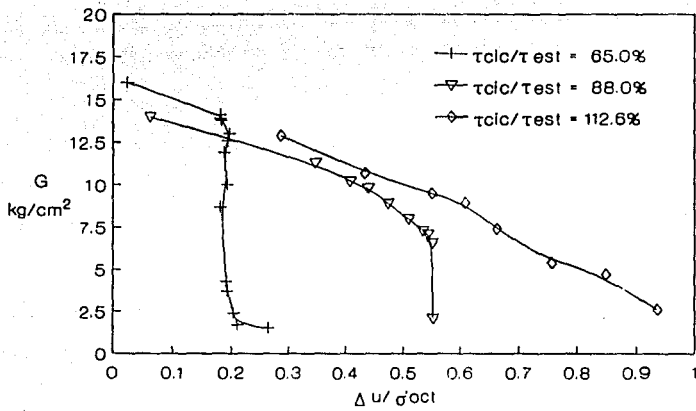


Fig 4.48 Módulo G vs incremento de presión de poro, serie 3

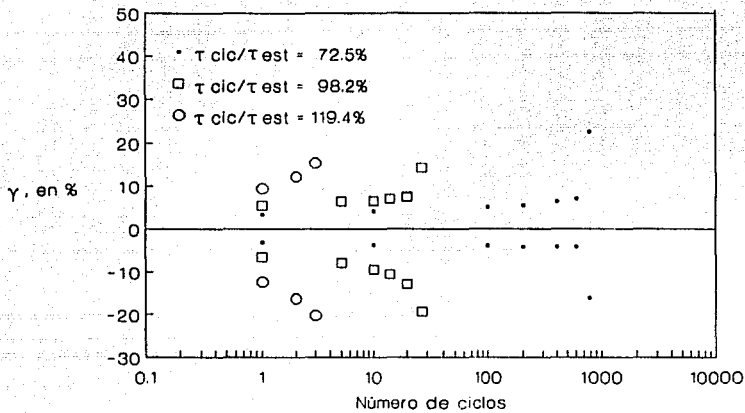


Fig 4.47 Deformación angular vs número de ciclos, serie 1

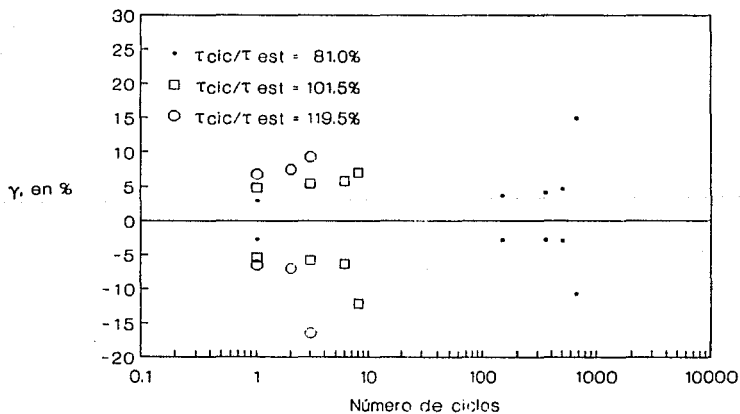


Fig 4.48 Deformación angular vs número de ciclos, serie 2

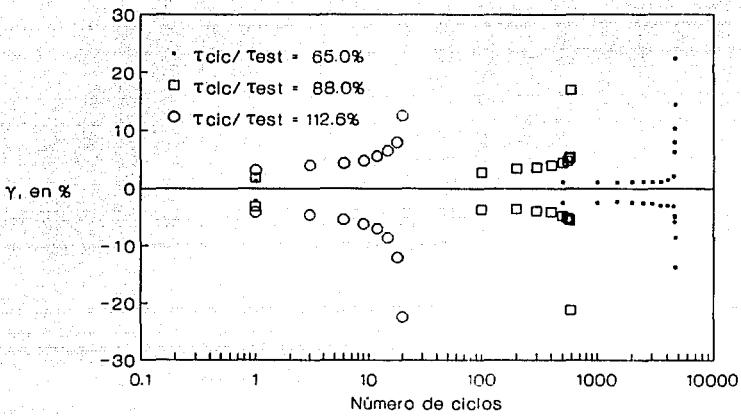


Fig 4.49 Deformación angular vs número de ciclos, serie 3

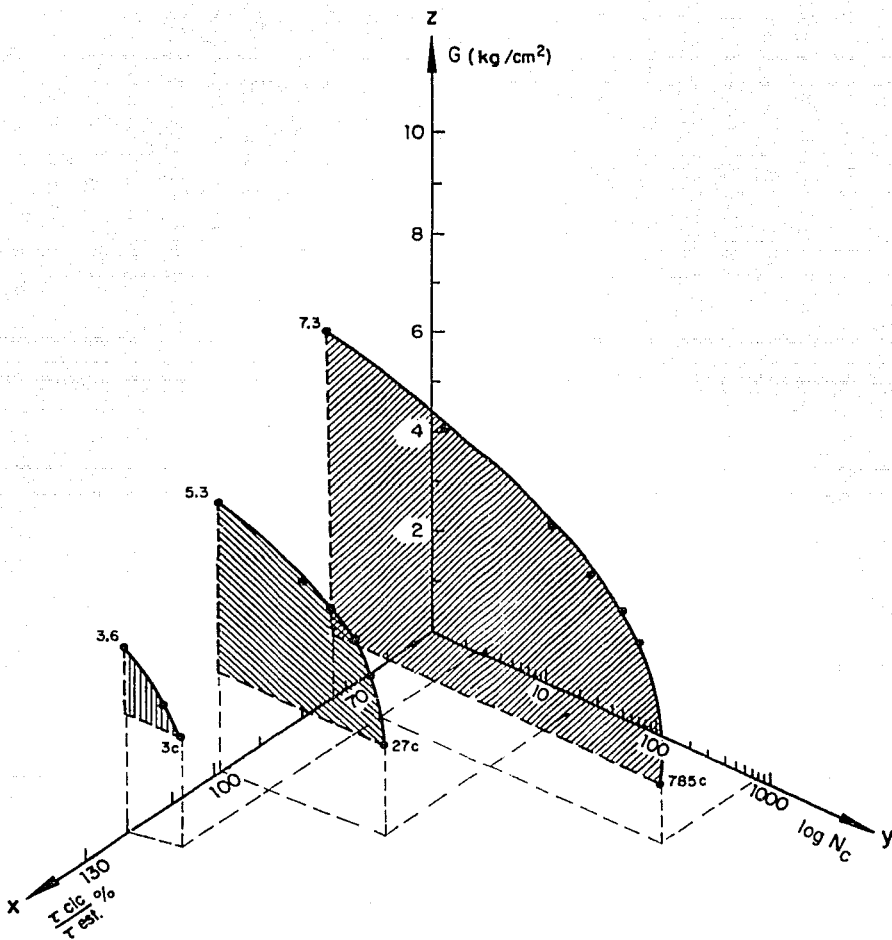


Fig 4.50 Serie 1

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

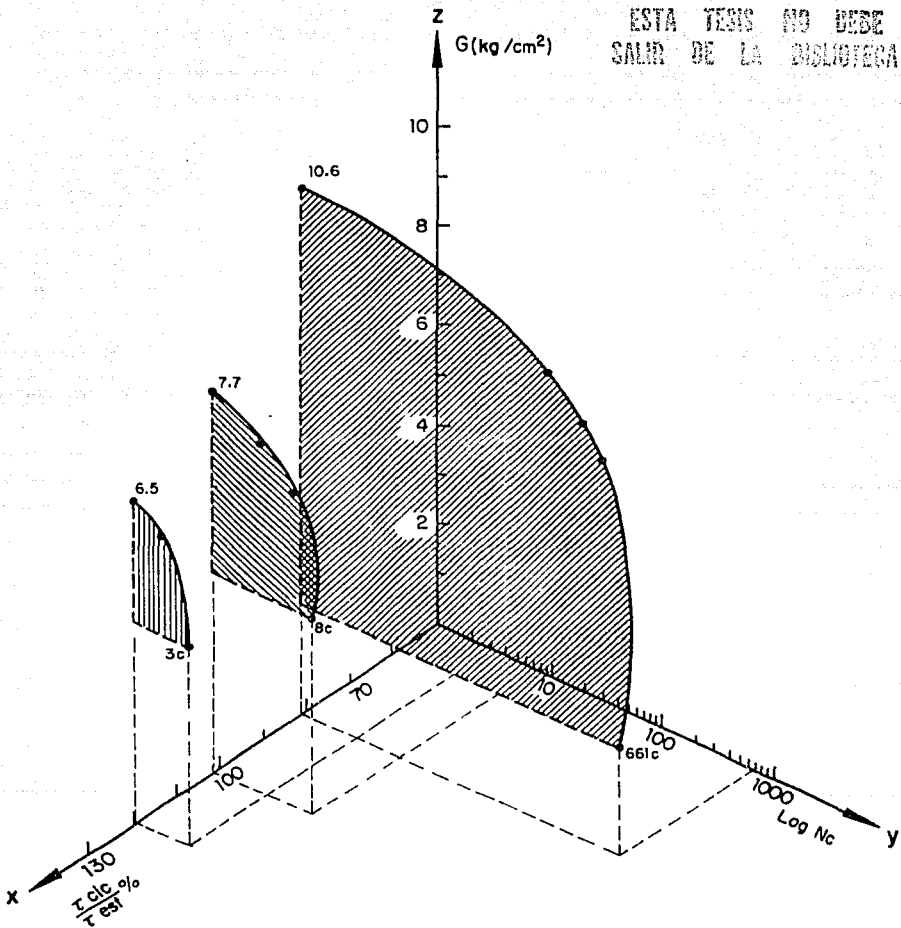


Fig 4.51 Serie 2

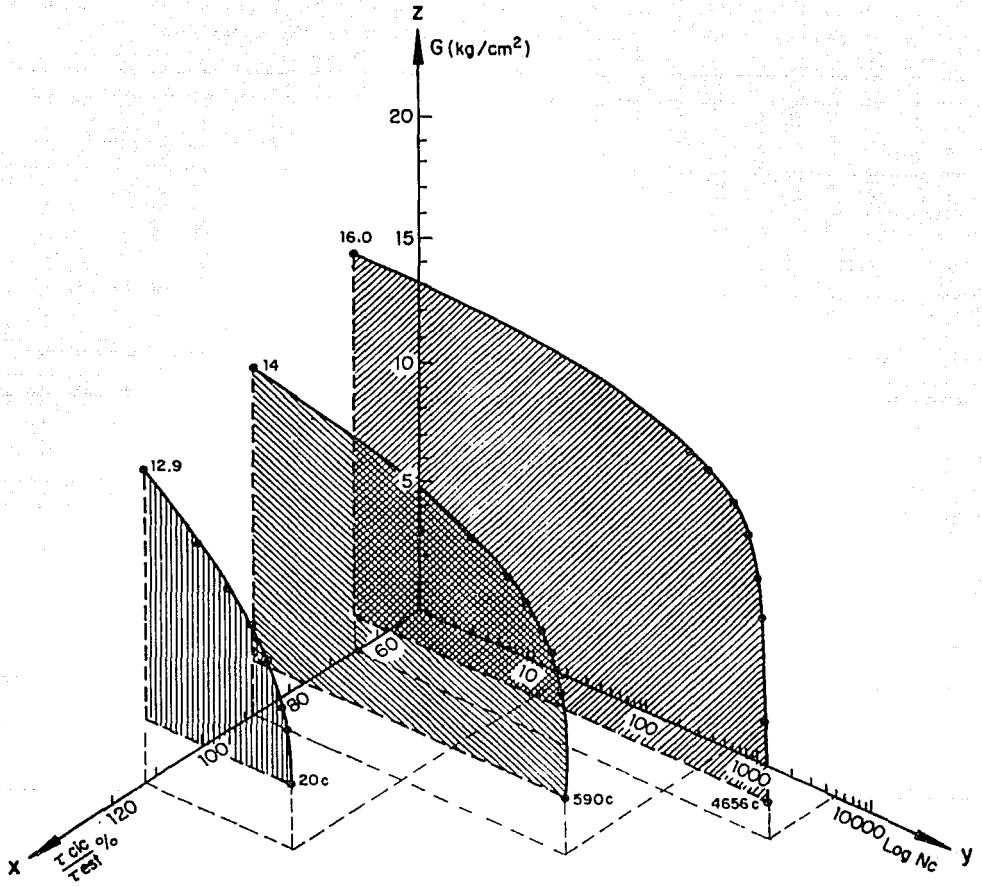


Fig 4.52 Serie 3

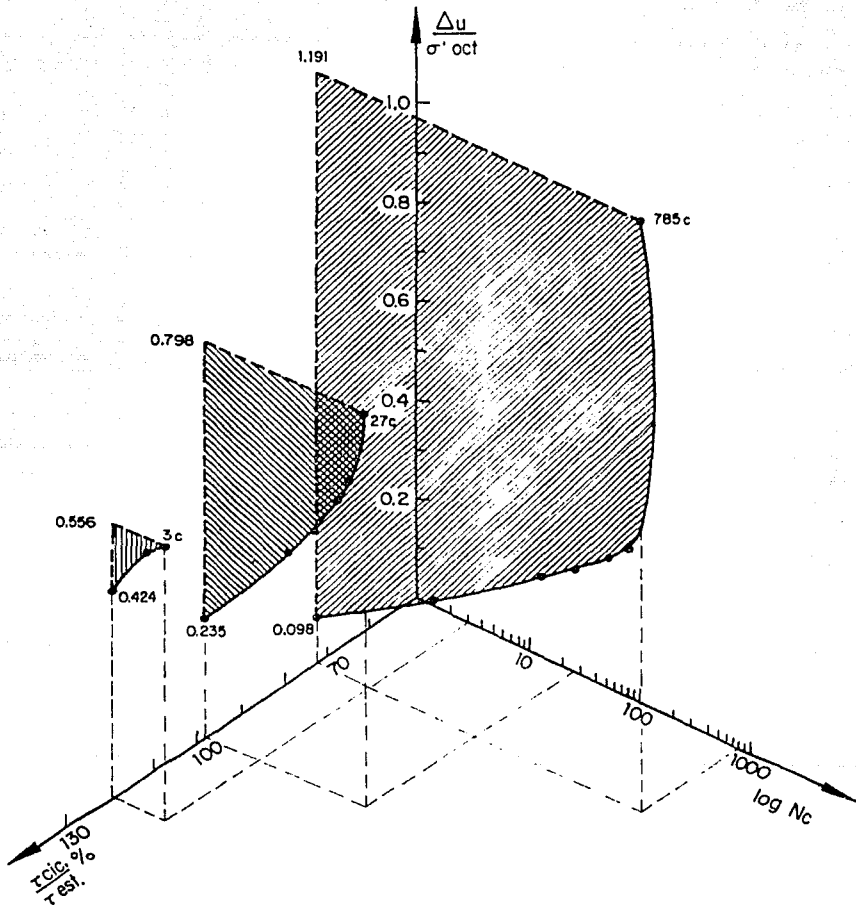


Fig 4.53 Serie 1

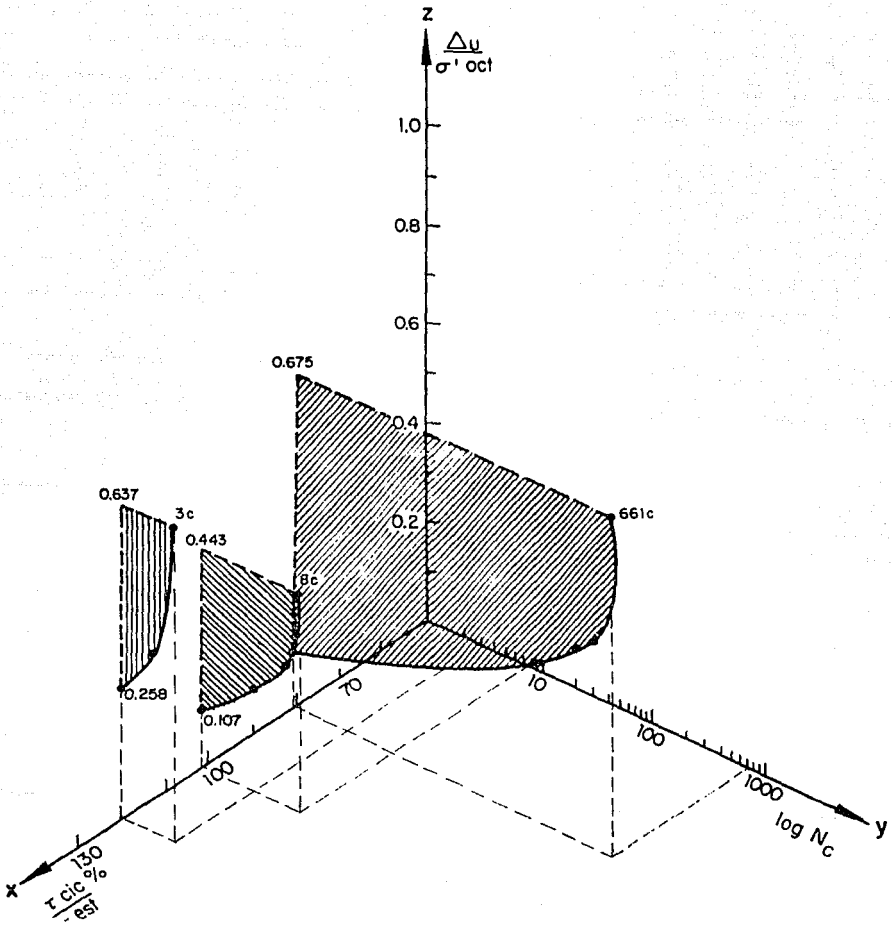


Fig 4.54 Serie 2

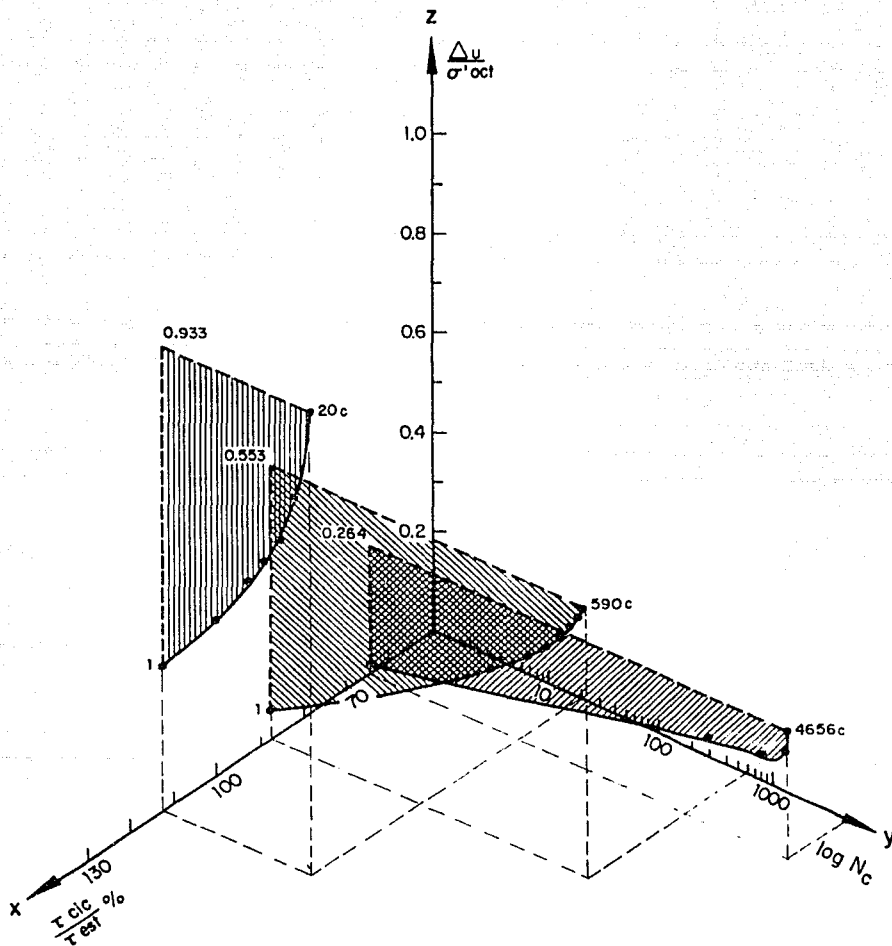


Fig 4.55 Serie 3

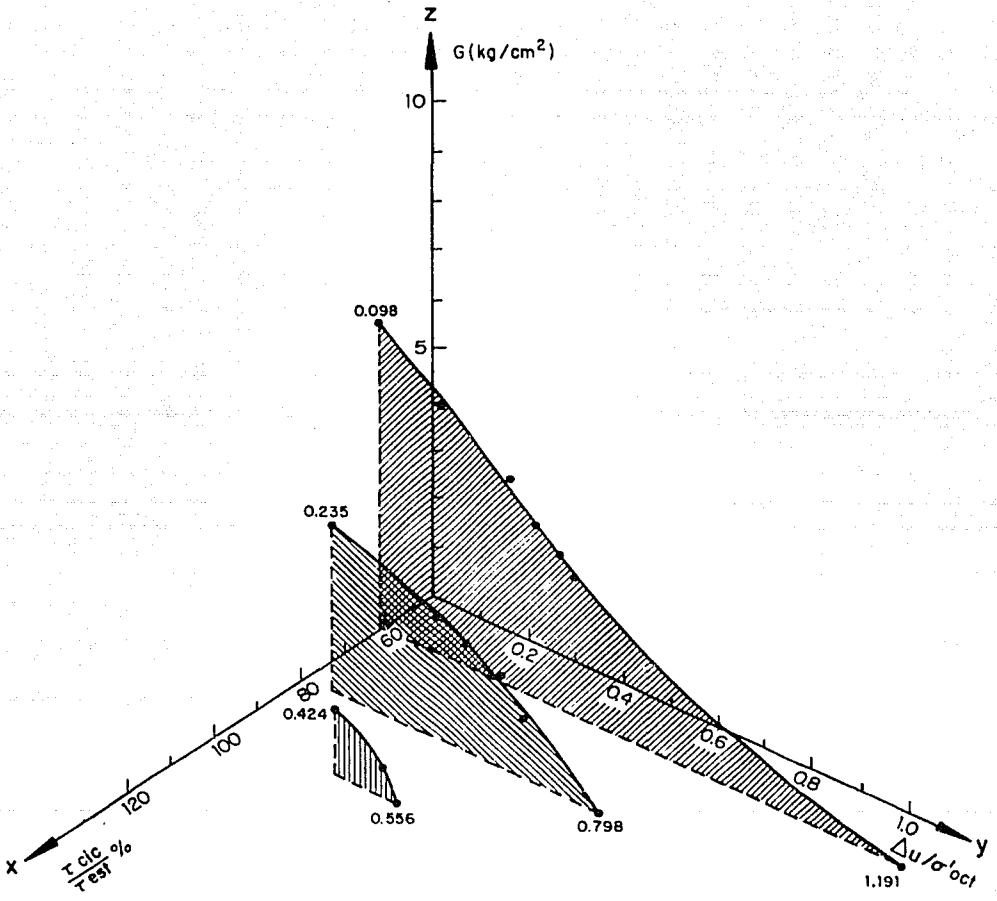


Fig 4.56 Serie 1

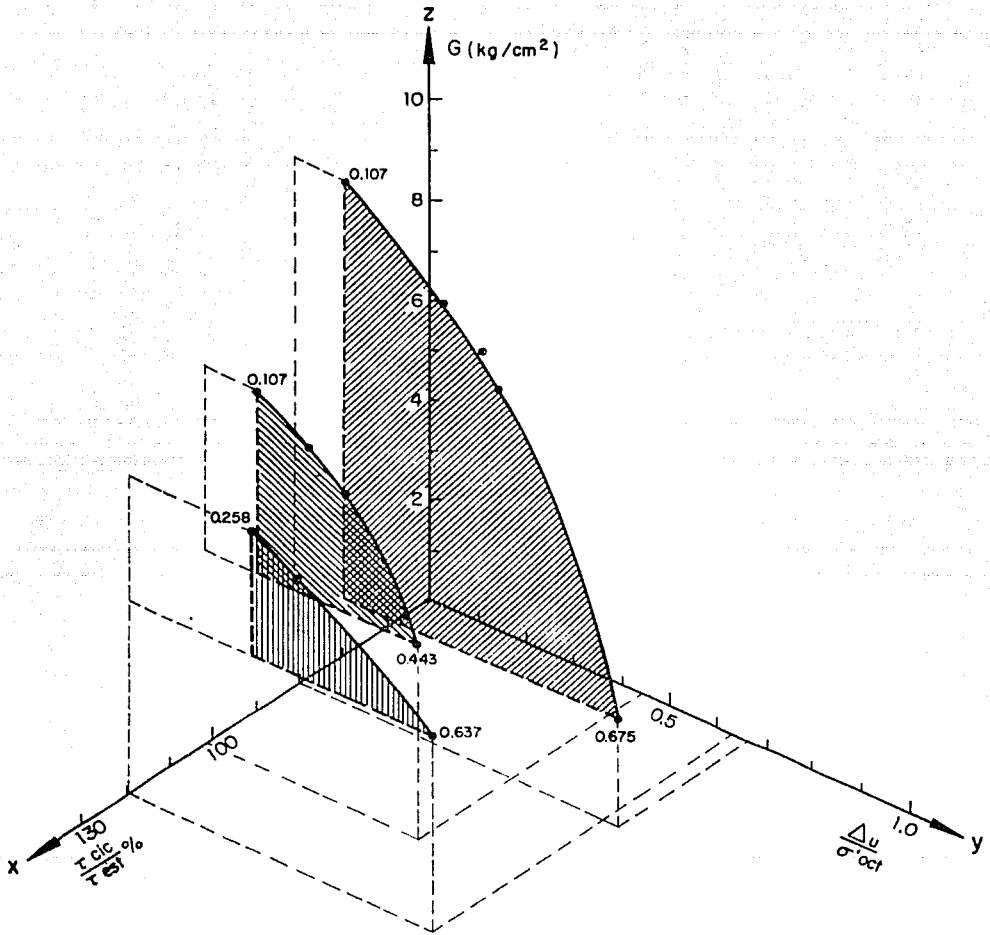


Fig 4.57 Serie 2

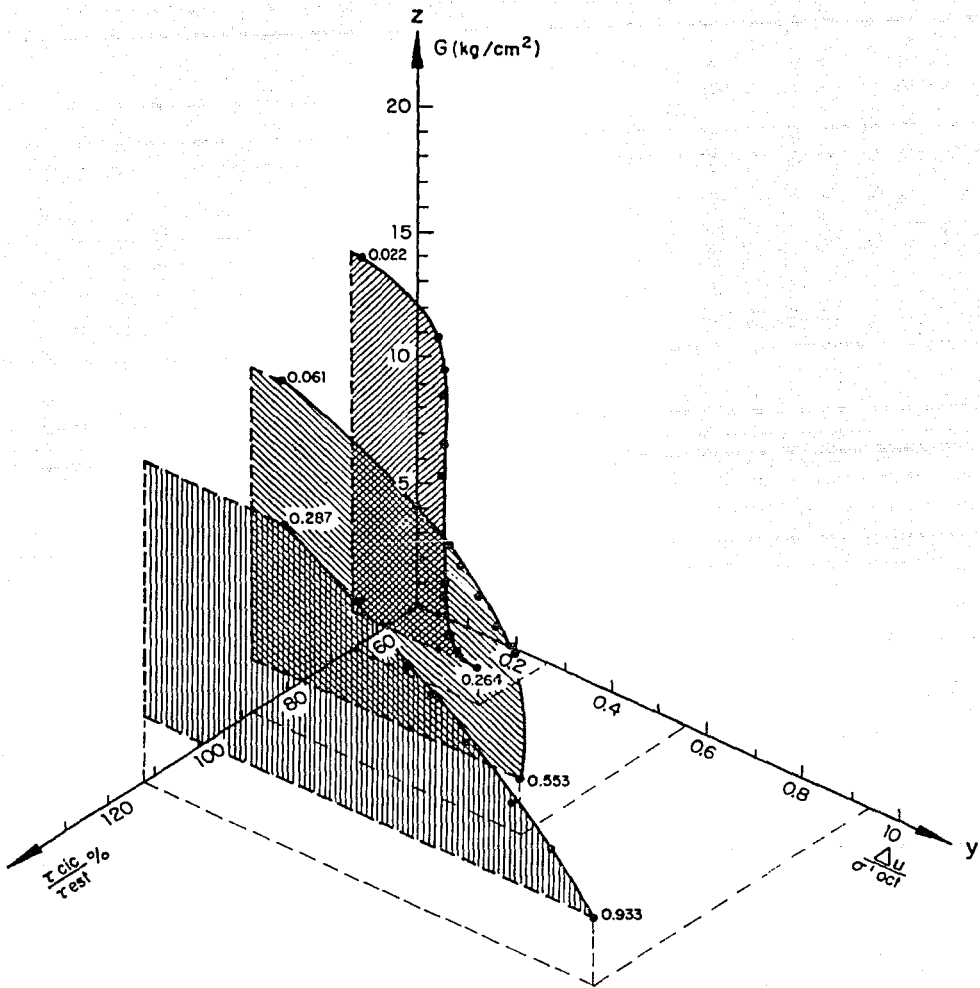


Fig 4.58 Serie 3

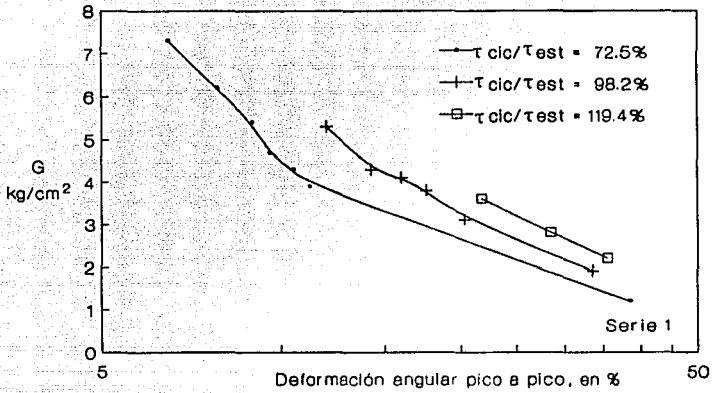


Fig 4.59 Módulo de rigidez G vs deformación angular

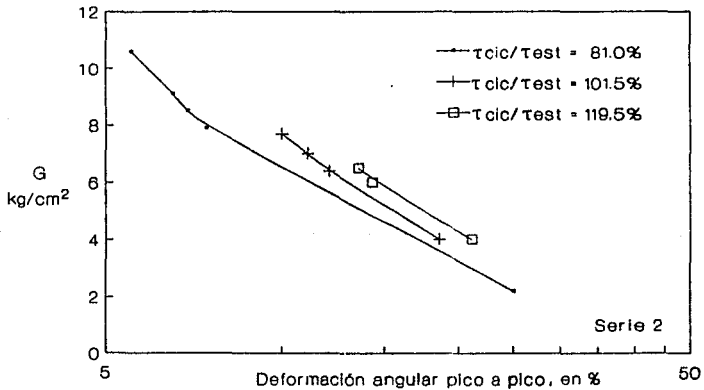


Fig 4.60 Módulo de rigidez G vs deformación angular

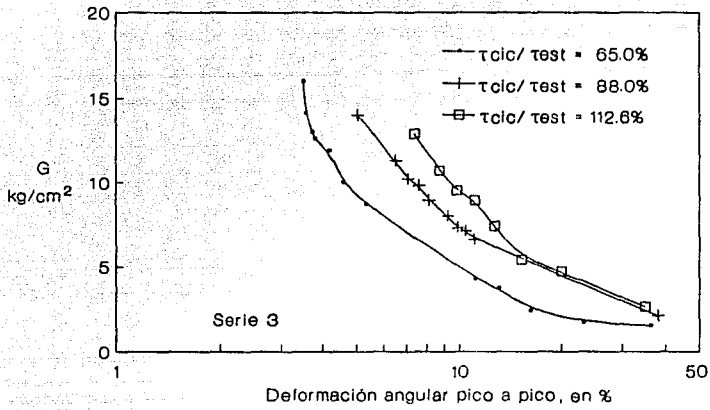


Fig 4.61 Módulo de rigidez G vs deformación angular

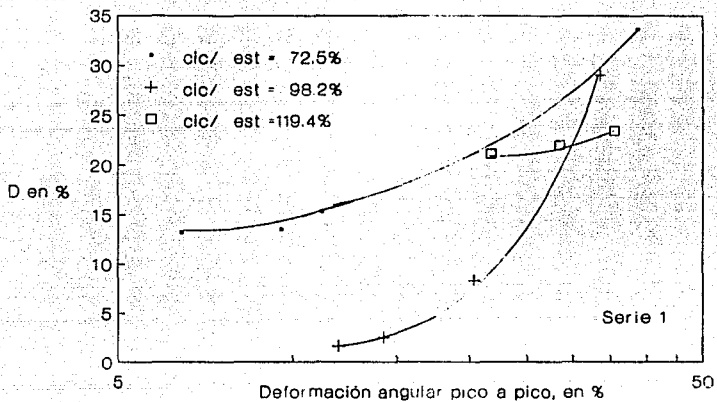


Fig 4.62 Amortiguamiento D vs deformación angular

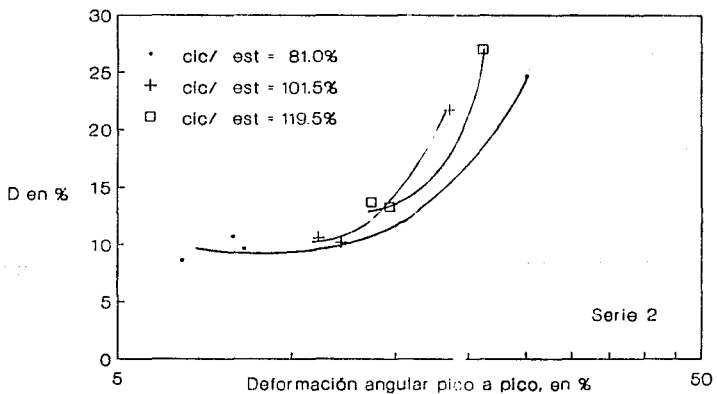


Fig 4.63 Amortiguamiento D vs deformación angular

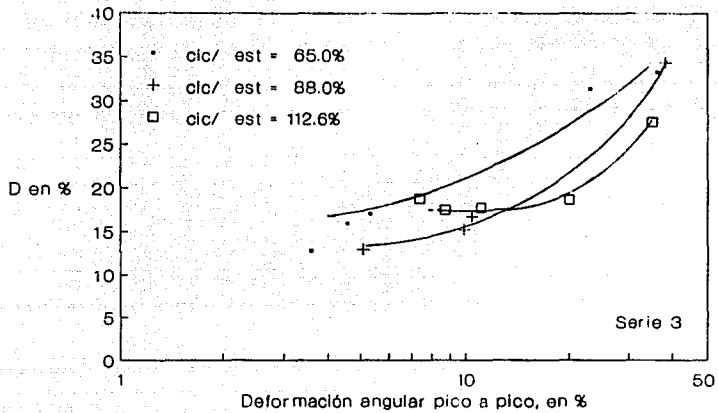


Fig 4.64 Amortiguamiento D vs deformación angular

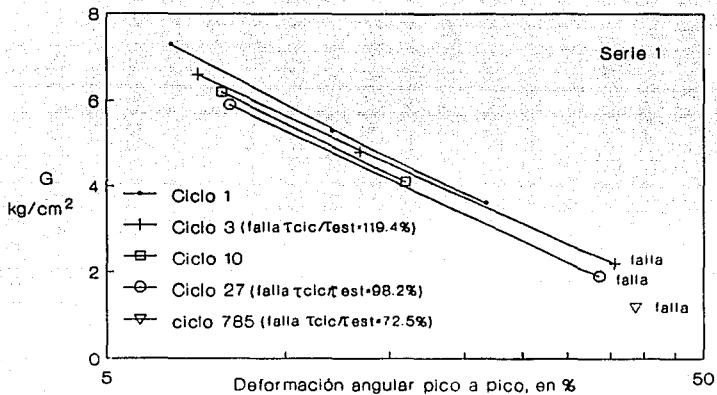


Fig 4.85 Módulo de rigidez G vs deformación angular

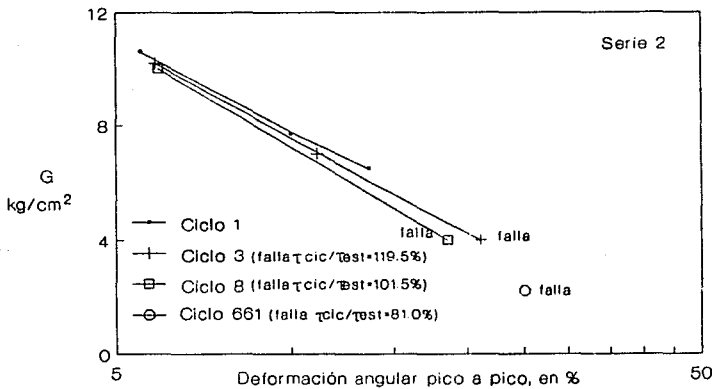


Fig 4.68 Módulo de rigidez G vs deformación angular

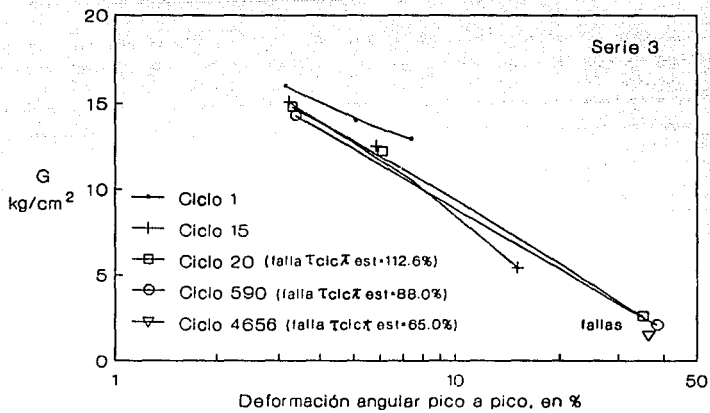


Fig 4.67 Módulo de rigidez G vs deformación angular

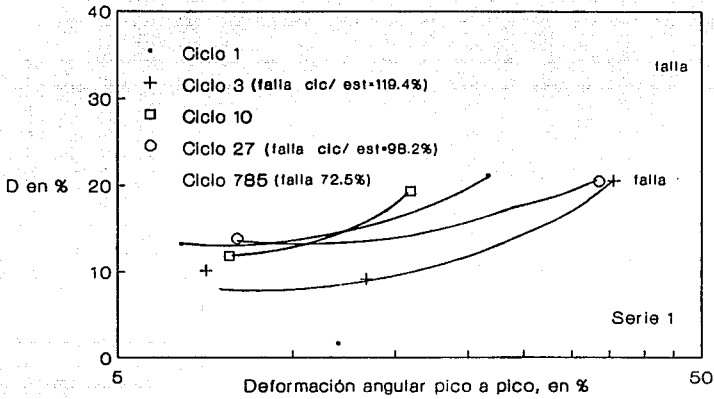


Fig 4.68 Amortiguamiento D vs deformación angular

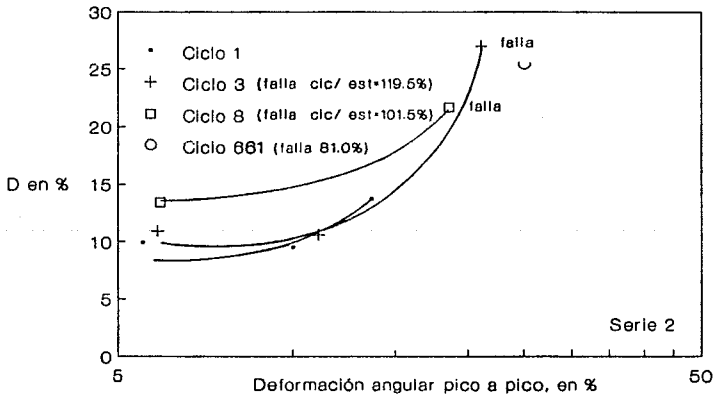


Fig 4.69 Amortiguamiento D vs deformación angular

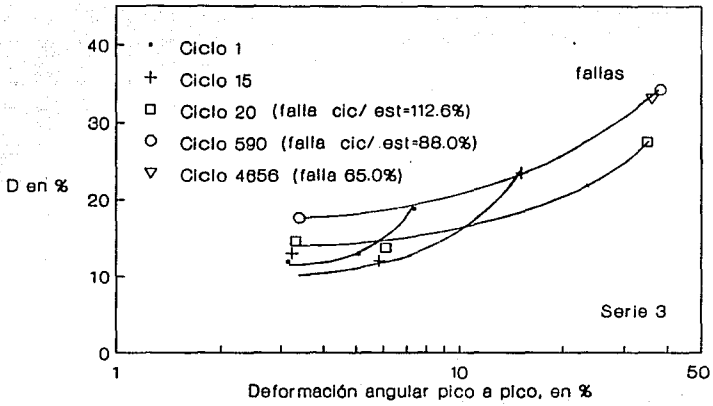


Fig 4.70 Amortiguamiento D vs deformación angular

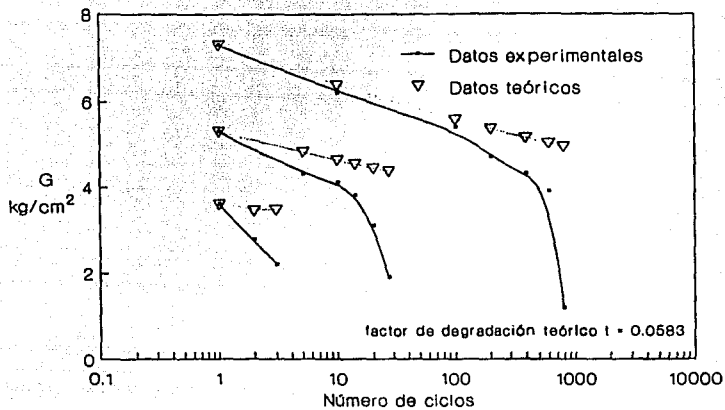


Fig 4.71 Módulo de rigidez G vs número de ciclos, serie 1

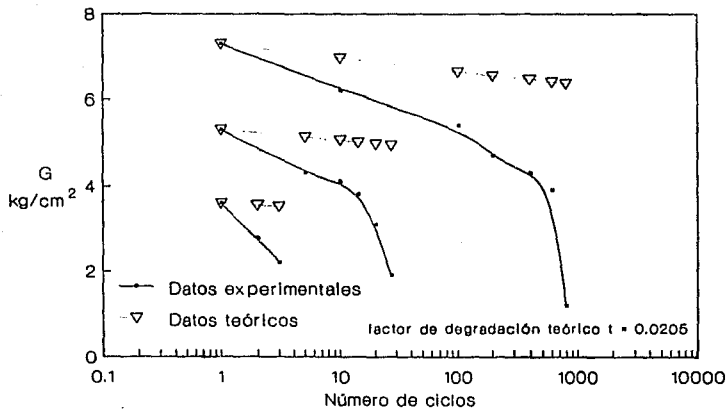


Fig 4.72 Módulo de rigidez G vs número de ciclos, serie 1

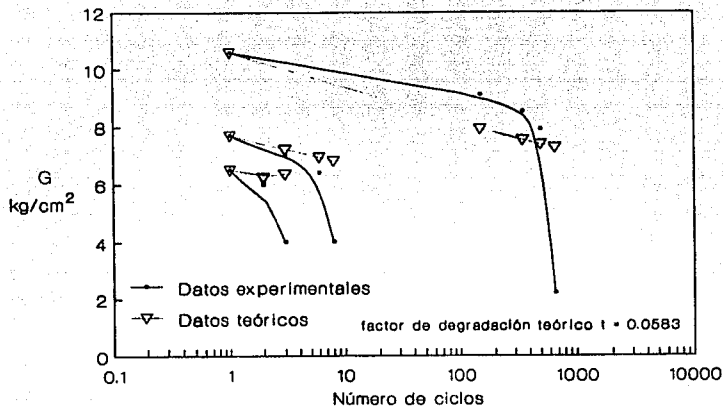


Fig 473 Módulo de rigidez G vs número de ciclos, serie 2

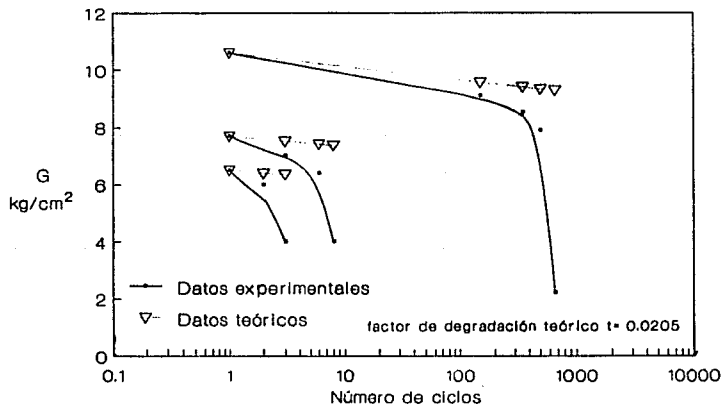


Fig 474 Módulo de rigidez G vs número de ciclos, serie 2

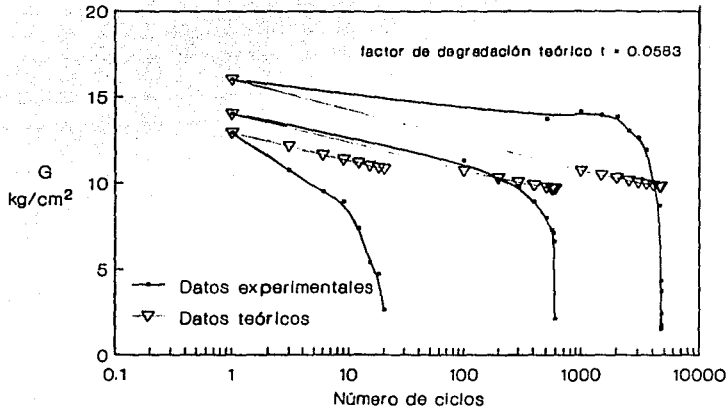


Fig 475 Módulo de rigidez G vs número de ciclos, serie 3

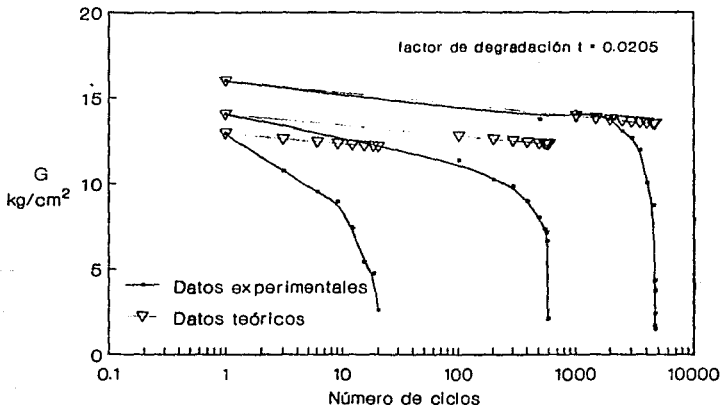


Fig 476 Módulo de rigidez G vs número de ciclos, serie 3

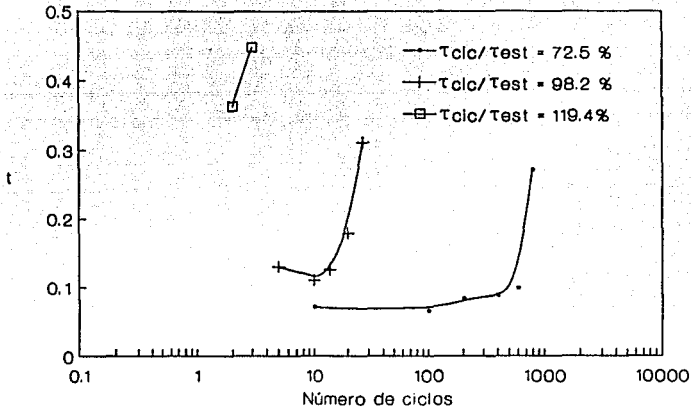


Fig 4.77 Factor de degradación t vs número de ciclos, serie 1

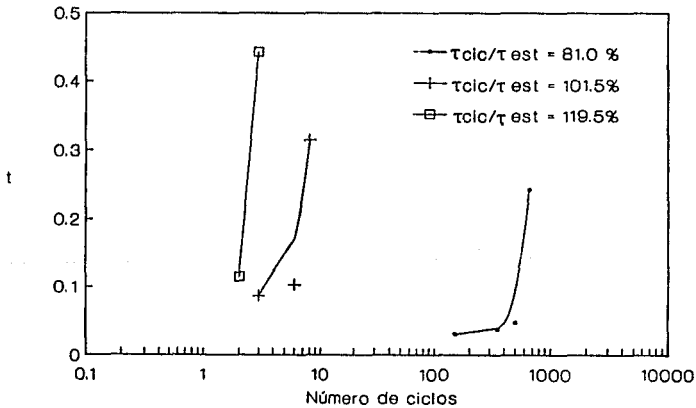


Fig 4.78 Factor de degradación t vs número de ciclos, serie 2

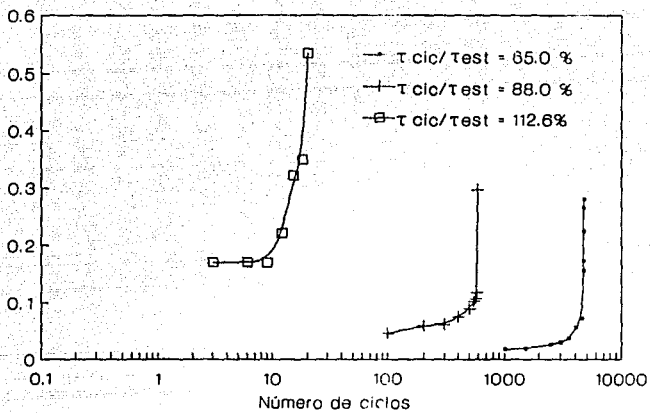


Fig 4.79 Factor de degradación t vs número de ciclos, serie 3

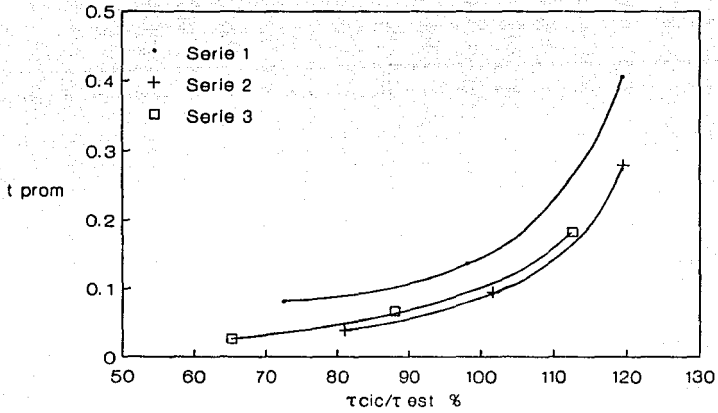


Fig 4B0 Factor de degradación t_{prom} vs nivel esfuerzo cortante cíclico

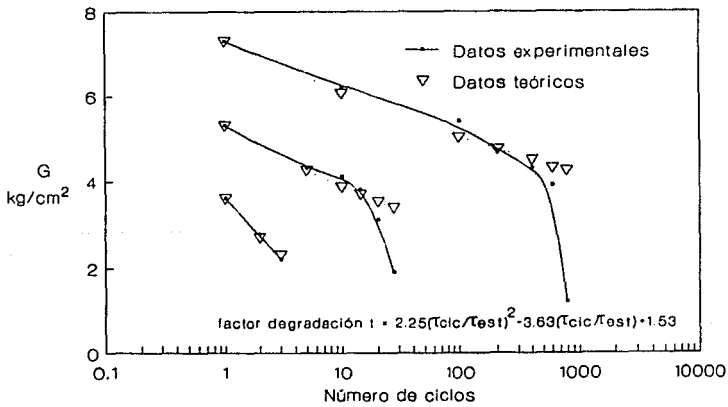


Fig 4.8I Módulo de rigidez G vs número de ciclos, serie 1

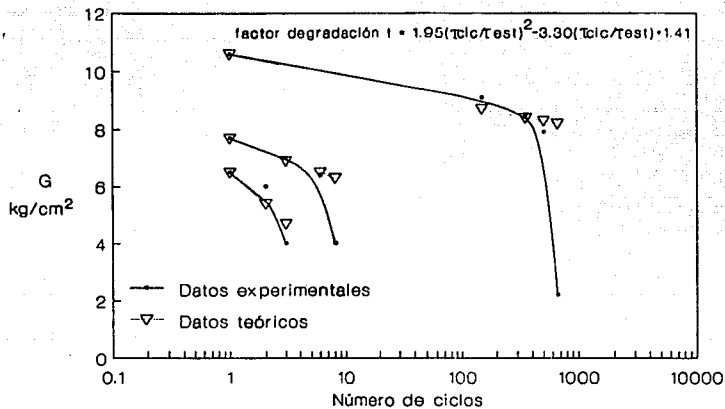


Fig 4.82 Módulo de rigidez G vs número de ciclos, serie 2

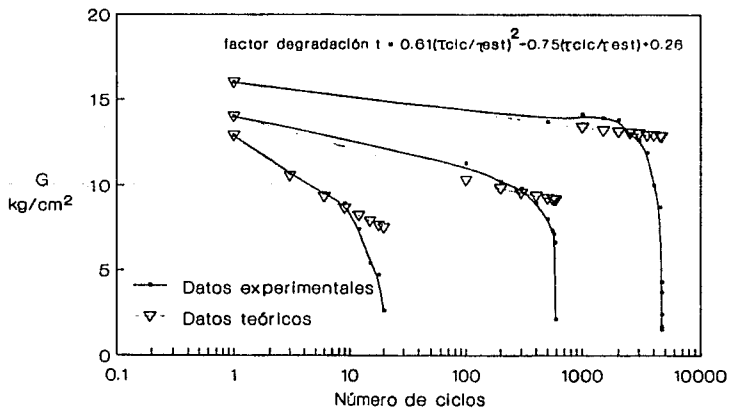


Fig 4.83 Módulo de rigidez G vs número de ciclos, serie 3

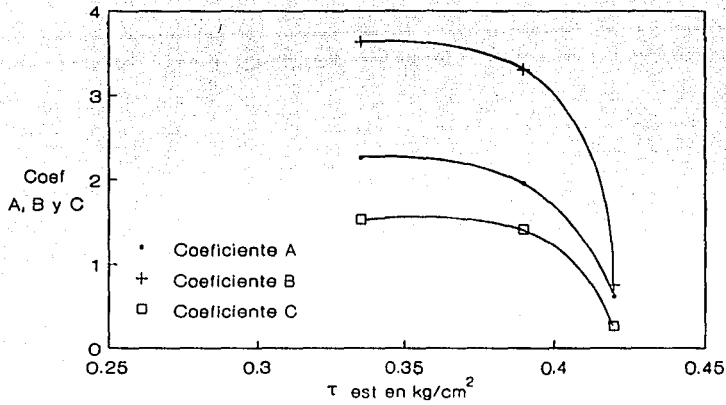


Fig.4.84 Coeficientes A, B y C vs resistencia estática

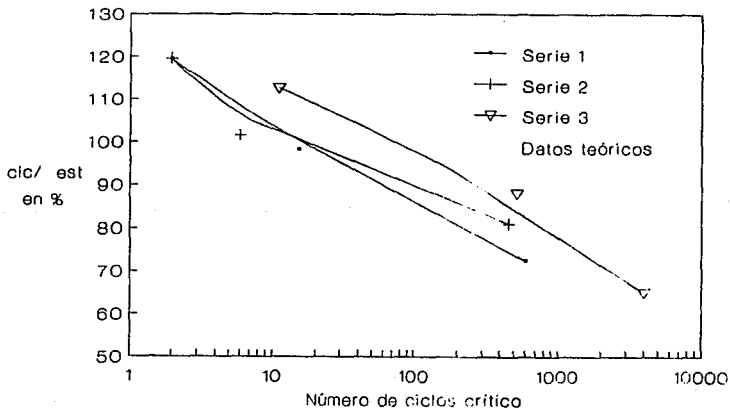


Fig 4.85 Nivel de esfuerzo cíclico vs número de ciclos crítico

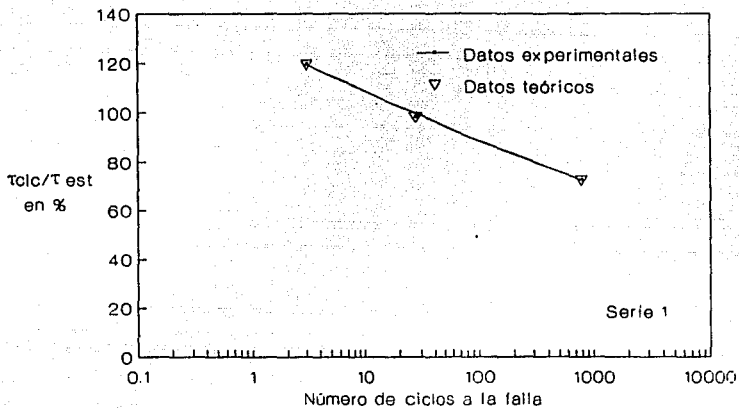


Fig 4.86 Nivel de esfuerzo cortante vs número de ciclos a la falla

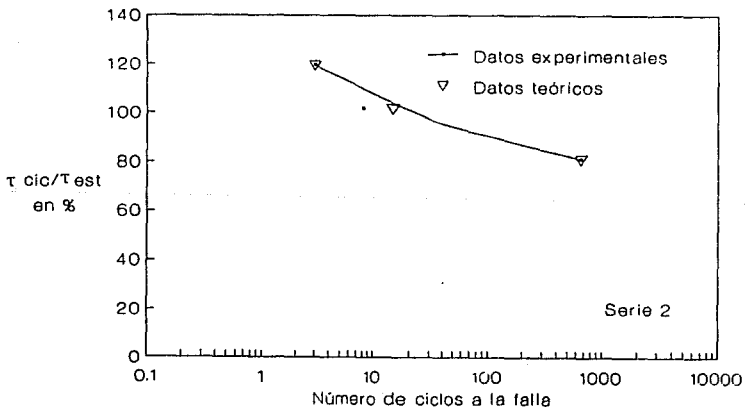


Fig 4.87 Nivel de esfuerzo cortante vs número de ciclos a la falla

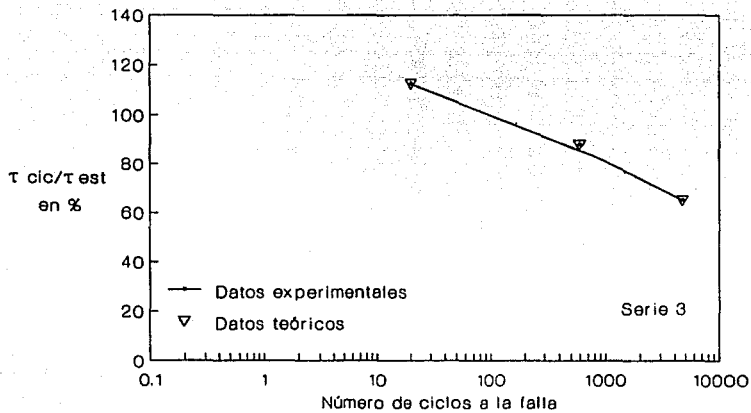


Fig 4.88. Nivel de esfuerzo cortante vs número de ciclos a la falla

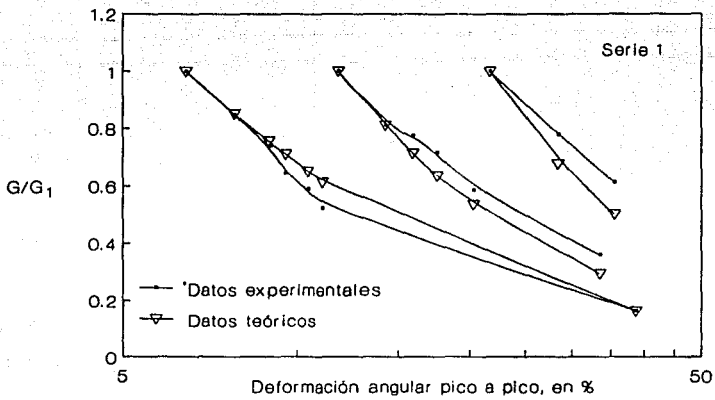


Fig 4.89 Módulo de rigidez G vs deformación angular

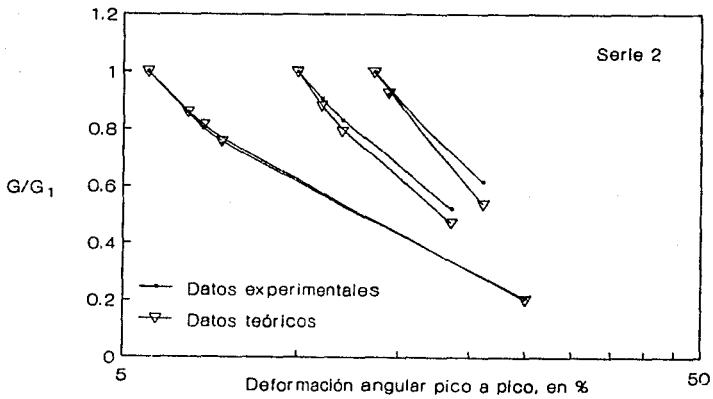


Fig 4.90 Módulo de rigidez G vs deformación angular

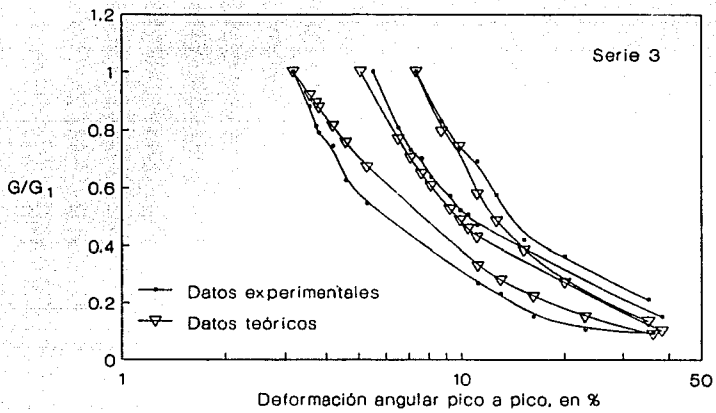


Fig 4.91 Módulo de rigidez G vs deformación angular

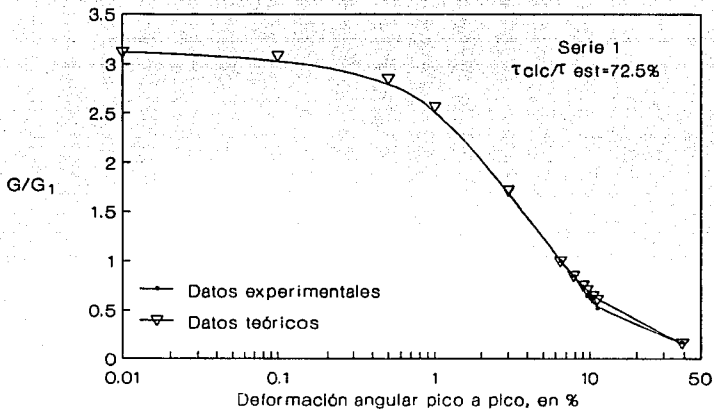


Fig 4.92 Módulo de rigidez G teórico vs deformación angular

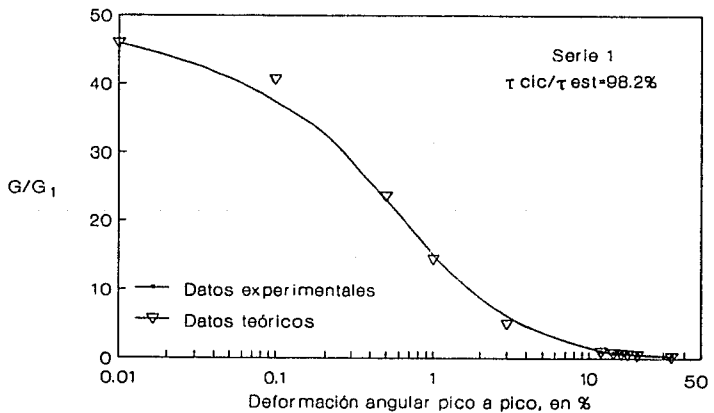


Fig 4.93 Módulo de rigidez G teórico vs deformación angular

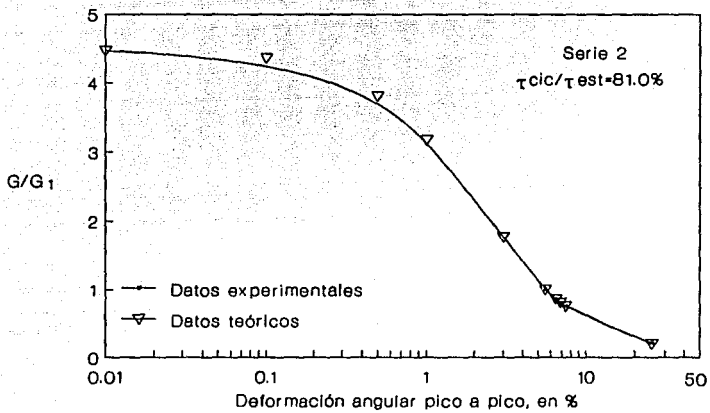


Fig4.94 Módulo de rigidez G teórico vs deformación angular

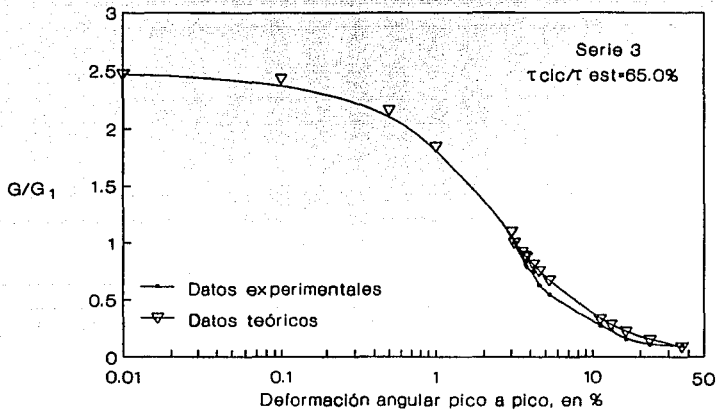


Fig 4.95 Módulo de rigidez G teórico vs deformación angular

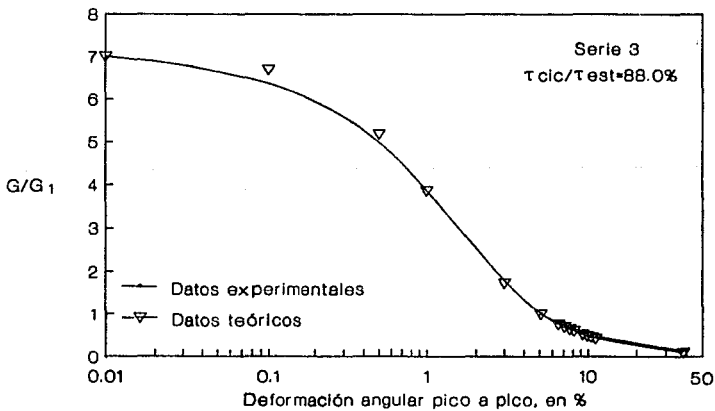


Fig 4.96 Módulo de rigidez G teórico vs deformación angular

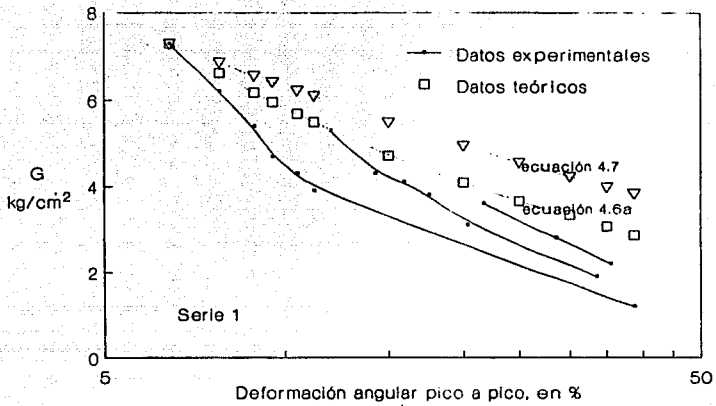


Fig 4.97 Módulo de rigidez G vs deformación angular

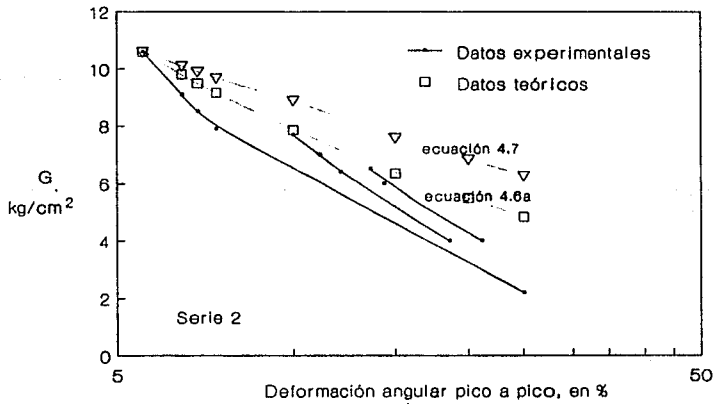


Fig 4.98 Módulo de rigidez G vs deformación angular

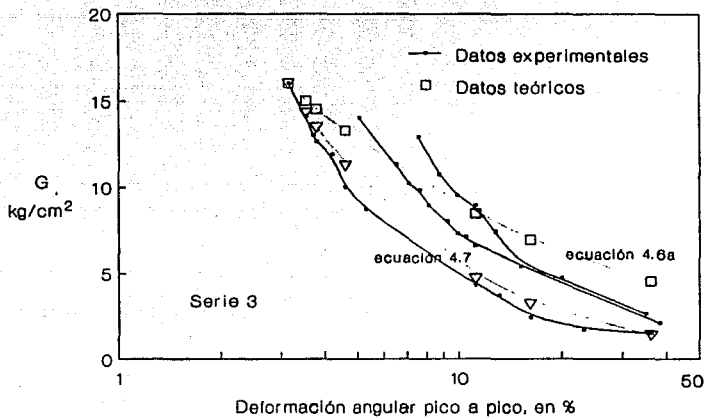


Fig 4.99 Módulo de rigidez G vs deformación angular

C A P I T U L O 5

5. ENSAYES DE LABORATORIO EN EL APARATO DE CORTE DIRECTO, MUESTRAS INALTERADAS .

Con este equipo se realizaron cuatro series de ensayos divididas en dos pares e integradas por cuatro pruebas cada una. Se siguió un programa similar al que se estableció en los ensayos de corte simple cíclico, descrito en el capítulo 4 ; es decir, en la primera prueba de cada serie se determinó la resistencia estática (τ_{est}) y en las tres pruebas restantes se aplicó carga cíclica horizontal cuya magnitud fue un porcentaje de la resistencia estática obtenida inicialmente.

Los ensayos de corte directo tuvieron por objetivo comparar el comportamiento de muestras de arcilla sometida a esfuerzos cortantes dinámicos y bajo dos condiciones de frontera diferentes. En una serie se hicieron ensayos convencionales de corte directo en arcilla inalterada (A/A) y en la otra las pruebas se realizaron en interfaces arcilla-concreto (A/C); en estos últimos se evaluaron las propiedades mecánicas del contacto entre los dos materiales. En ambos casos se llevaron a cabo ensayos estáticos y dinámicos

Todas las pruebas fueron de tipo consolidado-no drenado (CU) y por las características propias del equipo indicadas en el capítulo 3, no se aplicó presión confinante (σ_c); tampoco se midió el incremento de la presión de poro (Δu) durante las pruebas.

Las series de ensayos que se describirán en este capítulo, serán referidas con los números 4 a 7, tomando en cuenta que con el equipo de corte simple cíclico se realizaron tres series inicialmente.

5.1 METODO DE PRUEBA

Los especímenes para cada par de series (8 pruebas) procedían de una misma muestra de arcilla inalterada representativa de la zona lacustre del valle de México; el material de las series 4 y 5 fue una arcilla de alta compresibilidad (CH), de consistencia media y color gris verdoso. Para las series 6 y 7 se utilizó un limo inalterado de alta compresibilidad (MH), bien compacto y de color gris. Las muestras de este material fueron ligeramente heterogéneas, presentando en su interior intercalada una beta de arena fina.

El origen de estos materiales incluyendo su profundidad y propiedades índice se presentan en la tabla 5.1.

Labrado y montaje de los especímenes. Todos los especímenes fueron labrados en material inalterado en forma de pastillas circulares, con dimensiones promedio de 71 mm para el diámetro y espesores de 25 y 14 milímetros, para las pruebas de arcilla inalterada (A/A) y de interface arcilla-concreto (A/C), repectivamente.

Una vez labradas las muestras, se pesan, miden y se obtienen los valores iniciales de peso volumétrico (γ_m), grado de saturación (G_w) y relación de vacíos (e). En la tabla 5.2 se presentan los valores de estos parámetros, determinados en cada espécimen.

Las pastillas de concreto para la interface se fabricaron con grava y arena cribadas y combinadas para producir una granulometría ideal de agregados, el tamaño máximo de la grava fue de 1/2 pulgada y la resistencia del concreto a los 28 días de 180 kg/cm². Las dimensiones de estas pastillas fueron de 71 mm de diámetro y 13 mm de espesor.

Los anillos de bronce con su lámina de cobre intermedia debidamente sellada con grasa de silicón y alineados con sus respectivos pernos, se colocan en posición ajustando en la base fija del aparato de corte simple. Posteriormente se saturan las piedras porosas de esta base y de la cabeza que está en contacto con el suelo; paso siguiente se introducen la pastilla de concreto perfectamente saturada y la muestra de suelo, finalmente sobre estos se ubica la cabeza móvil que efectúa la consolidación y el corte directo.

Consolidación. Como se mencionó en los párrafos anteriores, con este equipo no se aplicó presión confinante, todas las muestras se consolidaron con un esfuerzo vertical cuyo valor teóricamente fue igual al de campo. Las paredes interiores de los anillos permiten confinar perfectamente a la muestra de suelo durante esta etapa.

La consolidación se efectuó permitiendo la salida de agua hacia la bureta, aplicando incrementos de carga vertical a razón de 0.1 kg cada 12 seg (0.5 kg/min₂). Las presiones verticales de consolidación (σ_v) fueron de 0.57 y 0.76 kg/cm² para los pares de series 4 y 5, y 6 y 7, respectivamente. Este equipo debido a que no requiere membrana para confinar el suelo y por ello el agua puede drenar lateralmente durante la consolidación. Las pastillas de concreto para las pruebas de interface se saturaron un tiempo mínimo de 24 hr previo a su utilización.

Las curvas de consolidación de estas cuatro series de ensayos se presentan en las figuras 5.1 a 5.4 , en las cuales el eje de las abscisas corresponde al tiempo en minutos y el de las ordenadas a la deformación vertical δ_z en mm. En estas gráficas se aprecian dos aspectos importantes:

. El tiempo para alcanzar el 100% de consolidación primaria es aproximadamente el mismo para los ensayos de arcilla inalterada (A/A) y de interface (A/C), aunque la relación de espesor en los especímenes es del orden de 2 a 1 para

uno y otro tipo de ensaye. La explicación de lo anterior es que en ambos casos la trayectoria de consolidación es aproximadamente de la misma longitud puesto que en los ensayos A/C, el concreto ya saturado actúa como frontera impermeable. Los resultados arrojaron un tiempo de consolidación del orden de 45 minutos para la arcilla de las series 4 y 5, y de 55 minutos para el limo de las series 6 y 7.

. La pendiente de las curvas en el tramo de consolidación secundaria muestra una diferencia significativa para la arcilla de las series 4 y 5, con respecto al limo de las series 6 y 7. En este último el tramo es casi horizontal, indicando esto que dicho material presentaba una estructura inicial más cerrada ya que proviene de un estrato más profundo (32.6 m) y por consiguiente sujeto a mayor presión.

Aplicación de esfuerzo cortante. Después de la consolidación bajo la carga vertical aplicada, se aprietan los tornillos opresores que fijan el anillo superior con la cabeza móvil que efectúa el corte, retirando previamente en todos los casos los pernos de alineamiento y la lámina de cobre partida.

El esfuerzo cortante ya sea monotónico o cíclico se aplicó sin permitir el drenaje de la muestra, con lo cual todas las pruebas fueron de tipo consolidado-no drenado (CU).

En la primera prueba de cada serie se determinó la resistencia estática al corte (τ_{est}), aplicando carga monotónica creciente e incrementos a razón de 0.5 kg/min. En las tres pruebas posteriores se aplicó carga cíclica con una frecuencia de 0.5 hz (1 ciclo cada 2 seg), la magnitud de este esfuerzo dinámico (τ_{cic}) fue un porcentaje de la resistencia estática, con los valores siguientes para cada serie :

Serie	τ_{cic} / τ_{est} , en porcentaje
4 (A/A)	67.2 , 82.3 y 97.2 %
5 (A/C)	66.8 , 93.4 y 97.0 %
6 (A/A)	49.3 , 69.7 y 98.0 %
7 (A/C)	47.9 , 68.3 y 71.8 %

5.2 RESULTADOS DE LABORATORIO

Los datos obtenidos durante los ensayos con la instrumentación electrónica incluyeron los siguientes:

- . Carga horizontal aplicada (monotónica en la prueba estática o cíclica en la dinámica).
- . Deformación horizontal del espécimen.

Curvas esfuerzo cortante vs deformación horizontal. Con los datos antes descritos, se determinaron las curvas esfuerzo cortante (τ , en kg/cm^2) contra deformación horizontal (δx , en mm) para las pruebas estáticas y las dinámicas; en estas últimas se obtuvieron las curvas para varios ciclos de carga incluyendo el inicial, medio, final y valores intermedios.

El esfuerzo cortante (τ) se calculó dividiendo la fuerza horizontal registrada entre el área corregida del espécimen, determinada esta última mediante la siguiente expresión :

$$A_c = A_i - \delta x \left[(\pi r)^2 - \delta x^2 \right]^{1/2}$$

Donde las literales significan :

A_c = área corregida, en cm^2

A_i = área inicial del espécimen, en cm^2

δx = deformación horizontal, en cm

π = 3.1415926

r = radio inicial del espécimen, en cm

En el anexo C se presenta la deducción de esta fórmula.

En las figuras 5.5 y 5.6 se presentan las curvas esfuerzo cortante contra deformación horizontal para las pruebas estáticas de las cuatro series; las de tipo histerético, obtenidas de los resultados de las pruebas dinámicas aparecen en las figuras 5.7 a 5.18.

En la tabla 5.2 se presenta un resumen de los resultados de laboratorio.

5.3 INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS DE LABORATORIO

Del análisis de las curvas esfuerzo cortante vs deformación horizontal de las pruebas estáticas presentadas en las figuras 5.5 y 5.6, se aprecia que en el material arcilloso de las series 4 y 5, la resistencia en la interface (A/C) fue mayor que en la arcilla sola inalterada (A/A) en 1.08 veces; mientras que en el material limoso de las series 6 y 7, fue al contrario, siendo la resistencia de interface 0.87 de la inalterada. En estas mismas figuras, para las pruebas de interface únicamente, se obtuvo una pérdida de resistencia determinada como el cociente entre el esfuerzo último o residual y el esfuerzo máximo, cuyos valores fueron de 0.95 y 0.96 para el material arcilloso (serie 5) y el limoso (serie 7), respectivamente.

Por lo que respecta a las curvas histeréticas de las pruebas dinámicas presentadas en las figuras 5.7 a 5.18 se observó lo siguiente:

- . Una degradación de la rigidez del material con el número de ciclos.

- . A mayor nivel de esfuerzo cortante se obtiene un menor número de ciclos a la falla.

- . Existe un número de ciclos crítico (N_{crit}) a partir del cual la deformaciones cíclicas y permanentes comienzan a ser significativas; este número de ciclos crítico se aprecia más claramente en las gráficas posteriores al analizar los factores de rigidez y amortiguamiento de las muestras.

- . Algunas de las curvas histeréticas resultaron asimétricas, con un achatamiento en uno de sus lados, como se observa en las figuras 5.7, 5.11 y 5.16. Lo anterior refleja la influencia de una restricción al desplazamiento horizontal originado probablemente por fricción entre el material arcilloso que se iba cortando y los bordes del anillo. Este efecto se acentúa a mayores desplazamientos horizontales correspondientes a un mayor número de ciclos.

En las figuras 5.19 a 5.22 se presenta la relación entre el nivel de esfuerzos cortantes cíclicos (τ_{cic}/τ_{est}) y el número de ciclos para alcanzar la falla. Cabe hacer notar que en la serie 5 (A/C) a un nivel de esfuerzo del 66.8% no se alcanzó la falla y se suspendió la prueba a los 1000 ciclos; caso similar se presentó en la serie 6 a un nivel de esfuerzo de 49.3% donde se paró a los 6000 ciclos.

Por lo que respecta a los ensayos dinámicos de la serie 7 donde únicamente se presentan 2 puntos, se realizó el primer ensayo a un nivel de esfuerzo cortante del 71.8% y falló en el primer ciclo, por lo anterior se repitió el mismo pensando que la muestra había fallado prematuramente, por ejemplo, por fisuramiento preexistente, y también en este caso falló en el primer ciclo (ver tabla 5.2).

Se observa que el comportamiento general de la arcilla se asemeja al obtenido en el equipo de corte simple. Sin embargo, la resistencia dinámica de los suelos ensayados en el aparato de corte directo no resultó mayor que la estática; también se encontró que la degradación de la rigidez de los materiales ensayados sólo se manifiesta cuando la amplitud del esfuerzo cortante cíclico excede al 60% de la resistencia estática. Es decir, en este experimento no se presentó sobrerresistencia como con el equipo de corte simple, y que también se ha observado al hacer ensayos con otros aparatos como la cámara triaxial cíclica (Romo, 1989).

Lo anterior se podría explicar en función de la deformación inducida en las muestras en uno y otro aparato. En el de corte simple cíclico el espécimen está confinado por una membrana de hule látex y con una presión horizontal transmitida a través de un líquido; en estas condiciones las fronteras laterales se consideran flexibles y al aplicar los esfuerzos cortantes la muestra se desliza angularmente experimentando la mayor deformación en su parte superior y nula en la inferior, como se indica en la figura a) del anexo D. Cabe recordar que para evitar el deslizamiento de la base y cabeza del equipo en relación con las caras superior e inferior de la muestra, se colocaron lijas suficientemente rugosas entre estas superficies.

En el aparato de corte directo los anillos que confinan a la muestra presentan condiciones de frontera rígidas, además el desplazamiento horizontal se produce a la mitad de la altura del espécimen correspondiente a la superficie de deslizamiento de los anillos de corte, como se indica en la figura b) del anexo D. Debido a lo anterior, a igual desplazamiento horizontal δx , la muestra en corte directo sufre una deformación angular mucho mayor que la de corte simple, ya que la altura a utilizar en la evaluación de esta deformación angular será de 30 mm y 0.25 mm para los especímenes de corte simple y corte directo respectivamente. Así en pruebas de corte directo se produce un remoldeo muy enérgico en la superficie de deslizamiento de los dos anillos, destruyendo la estructura inicial de la arcilla y obligando a que falle a un esfuerzo menor.

Los resultados de laboratorio presentados en la tabla 5.2, correspondientes a los ensayos de interface A/C (series 5 y 7), indican que hay una degradación de la adherencia suelo-concreto bajo carga cíclica.

La adherencia se obtuvo con la siguiente expresión:

$$\alpha = \tau_{\text{Interface}} / \tau_{\text{inalterado}}$$

En donde las literales significan:

$$\begin{aligned} \alpha &= \text{coeficiente de adherencia} \\ \tau_{\text{Interface}} &= \text{resistencia estática de interface} \\ \tau_{\text{inalterado}} &= \text{resistencia estática inalterada} \end{aligned}$$

Es decir, se adoptó una definición semejante a la que se usa para expresarla en términos de esfuerzos totales en pilotes de fricción.

Para la serie 5 la adherencia estática fue de 0.379 kg/cm² y en la dinámica a un nivel de esfuerzo cortante similar, no se alcanzó ni un ciclo (si el número de ciclos a la falla N_f hubiera sido igual a 1, no habría pérdida de adherencia, si $N_f > 1$ hubiera habido ganancia, pero como $N_f < 1$, hubo pérdida).

Para la serie 7 la adherencia estática fue de 0.871 kg/cm² y la pérdida de adherencia fue mucho mayor ya que a un nivel de esfuerzo cortante menor (71.8%), la falla se presentó en el primer ciclo. Cabe aclarar que en esta última serie en particular, se presentaron fuertes diferencias en los valores de contenido de agua (W) y relación de vacíos (e) por heterogeneidad del material, lo que podría explicar la alta pérdida de adherencia registrada.

Los resultados de Jaime et al (1990) sobre ensayos cíclicos en pilotes de fricción a escala natural, no indican si la resistencia dinámica es mayor que la estática, únicamente mencionan que si la carga cíclica vertical es menor o igual a la resistencia estática, no se presenta una pérdida de resistencia, aunque si hay un ligero asentamiento irrecuperable del pilote. Si la carga cíclica es mayor que la resistencia estática se presentan asentamientos más importantes, y entre el 1.15 y 1.35 de τ_{est} puede ocurrir una pérdida de resistencia y grandes desplazamientos verticales.

Los coeficientes de adherencia obtenidos para los pares de series 4 y 5 y, 6 y 7, se indican a continuación:

MATERIAL (serie)	PROF. MEDIA (m)	$\tau_{inalterado}$ (kg/cm ²)	$\tau_{interface}$ (kg/cm ²)	COEF. (α)
Arcilla (4 y 5)	16.50	0.351	0.379	1.08
Limo (6 y 7)	32.60	1.000	0.871	0.87

Aunque son pocos los resultados experimentales, en esta tabla se observa que el coeficiente α disminuye a medida que la resistencia inalterada crece, comportamiento similar al reportado para el coeficiente de adherencia utilizado en el cálculo de pilotes de fricción (Tomlinson 1957).

Jaime et al (1988) recomiendan utilizar un coeficiente $\alpha=1.2$ para evaluar la adherencia entre los suelos arcillosos del valle de México y pilotes de fricción. El coeficiente de adherencia anterior fue determinado en una prueba de extracción lenta efectuada en un pilote a escala natural, despejándolo de la siguiente fórmula:

$$Q_r = \alpha (\sum c_i d_i) 4B$$

En donde las literales significan:

Q_r = capacidad de carga última por fricción del pilote.

α = coeficiente de adherencia.

c_i = resistencia no drenada del suelo, correspondiente al estrato i .

d_i = espesor del estrato i .

$4B$ = perímetro del pilote.

De los datos presentados en la tabla 5.2 se puede observar que la resistencia dinámica es función del número de ciclos a la falla; es decir, una muestra es más resistente que otra si alcanza mayor número de ciclos a la falla, obviamente a un nivel de esfuerzo cortante equivalente o comparable en las dos muestras. Así, la serie 5 en pruebas de interface A/C presentó mayor resistencia (mayor número de ciclos a la falla) que la serie 4 en pruebas de arcilla sola inalterada A/A; Por lo que respecta a la serie 6 de pruebas A/A, fueron más resistentes que las A/C de la serie 7.

Las comparaciones anteriores se hicieron a niveles de esfuerzo cortante equivalente y recordando que los pares de series 4 y 5, 6 y 7 fueron realizados con el mismo material, uno arcilloso y el otro limoso.

De lo anterior se deduce, para estas series de ensayos, que si el coeficiente de adherencia α es mayor de 1, se obtendrán mayor número de ciclos a la falla en pruebas dinámicas de interface A/C que en pruebas dinámicas de arcilla sola A/A, a niveles de esfuerzo cortante equivalente. Por otro lado si el coeficiente α es menor que 1 se obtendrá un comportamiento contrario al anterior; es decir, mayor número de ciclos a la falla en pruebas dinámicas A/A. En todas las pruebas dinámicas de estas series los resultados fueron consistentes con el comportamiento antes descrito. Sin embargo, estas observaciones deberán verificarse en estudios posteriores.

Lo anterior hace pensar que cuando el coeficiente de adherencia α es mayor de 1, la falla se presentará en el material arcilloso a una distancia de la frontera de interface, pero si α es menor de 1 la falla se presentará necesariamente en la interface. Sobre este particular, algunos investigadores (Zeevaert 1973) han reportado que cuando se han extraído pilotes de fricción en la zona lacustre del valle de México, alrededor del fuste del pilote viene adherida una pequeña capa de arcilla, indicando esto que la falla se desarrolla entre esta capa y el suelo circundante. El espesor de esta pequeña capa varía entre el 5 y el 10% del radio o la dimensión lateral del pilote entre dos.

Es importante notar que en las pastillas de concreto después de las pruebas, se observó una ligera capa de arcilla distribuida de manera no uniforme, siendo más bien un residuo de material arcilloso adherido a la pastilla.

5.4 DETERMINACION DE LAS PROPIEDADES DINAMICAS

Rigidez y amortiguamiento del material. La pendiente de las curvas histeréticas obtenidas en los diferentes ciclos de las pruebas dinámicas, viene en unidades de $\text{kg/cm}^2/\text{cm}$ ya que la abscisa x de esta pendiente corresponde a la deformación horizontal expresada en cm ó mm . Esta es una medida de la rigidez del material en este tipo de ensayos a la que llamaremos G .

En las figuras 5.23 a 5.26 se presenta el módulo G en función del número de ciclos, observándose que si el coeficiente de adherencia α es mayor de 1, los módulos de rigidez G en las pruebas de interface serán también mayores con respecto a los módulos obtenidos en arcilla sola inalterada para niveles de esfuerzo cortante equivalentes y viceversa.

En las figuras 5.27 a 5.30 se graficó el módulo G pero ahora contra la deformación horizontal.

El amortiguamiento del material D en función del número de ciclos y de la deformación horizontal se presenta en las figuras 5.31 a 5.34 y 5.35 a 5.38, respectivamente. En estas gráficas se observa una fuerte dispersión de los resultados, debido probablemente a que los valores fueron determinados por interpretación visual de los registros electrónicos.

Respecto a estas dos propiedades, módulo de rigidez G y amortiguamiento del material D , determinados con este equipo de corte directo, son válidos los comentarios y observaciones hechas para el equipo de corte simple cíclico presentadas en el inciso 4.4 del capítulo anterior. En las muestras cuya falla se presentó en el primer ciclo, y de las cuales no se obtuvo por lo menos un ciclo de histéresis, no se evaluó ni el módulo G ni el amortiguamiento D .

Deformación horizontal. la variación de la deformación horizontal en función del número de ciclos se presenta en las figuras 5.39 a 5.42 para las respectivas series de la 4 a la 7.

Número de ciclos crítico (Ncrit). De los resultados experimentales se determinó el número de ciclos crítico, cuyo valor define una frontera a partir del cual la rigidez del material decrece considerablemente y que corresponde a un crecimiento acelerado del amortiguamiento y la deformación horizontal. En la figura 5.43 se presentan estas curvas que relacionan el nivel de esfuerzo cortante con el número de ciclos crítico para las series 4 a 7. Se puede apreciar en dicha gráfica que las envolventes de cada serie definen aproximadamente líneas rectas, dentro del rango de valores de τ_{cic}/τ_{est} estudiados.

En la figura 5.44 se presentan las envolventes de Ncrit para las pruebas realizadas en muestras inalteradas (ensayos A/A), se aprecia que la envolvente del material limoso (serie 6) se ubica a la derecha del arcilloso (serie 4), cuyos índices de plasticidad son 108 y 271, respectivamente, corroborando la observación presentada en el inciso 4.4 del capítulo anterior referente a que dichas envolventes muestran una ligera tendencia a desplazarse a la derecha a medida que su índice plástico disminuye.

En las figuras 5.45 y 5.46 se presentan las envolventes de Ncrit. de los pares de series 4 y 5 y, 6 y 7, respectivamente. En estas gráficas se aprecia la diferencia en cuanto al coeficiente de adherencia α ; para el material arcilloso en el que $\alpha > 1$ la envolvente de los ensayos A/C (serie 5) se ubica por arriba de la envolvente correspondiente al material inalterado (serie 4), para el material limoso en el que $\alpha < 1$ la envolvente de los ensayos A/C (serie 7) se ubica por abajo de la correspondiente al material inalterado (serie 6).

5.5 DISCUSION DEL COMPORTAMIENTO DE INTERFACE ENTRE ARCILLA Y CONCRETO.

Los modelos para el análisis de interacción suelo-estructura se basan en las propiedades esfuerzo-deformación obtenidas de pruebas de campo ó de laboratorio.

Los modelos suponen un acoplamiento o compatibilidad de deformación entre la estructura y el suelo; así, un punto común de la interface puede incluir una componente debido a esta deformación mutua y otra componente debido a un desplazamiento relativo originado por movimientos de translación o rotación

El movimiento relativo en la interface se debe a que generalmente existe una gran diferencia en las características esfuerzo-deformación de los dos materiales. Así, dos puntos adyacentes en la interface, uno en la estructura y otro en el suelo, pueden mantener la continuidad de desplazamiento hasta cierto nivel de carga, a partir del cual puede ocurrir un desplazamiento relativo y los dos puntos inicialmente adyacentes pueden experimentar desplazamientos diferentes. También bajo ciertos tipos de carga y descarga la interface puede experimentar separación o abertura y cierre. En la figura 5.47 se presentan los diferentes modos de deformación en la interface.

Modelos de interface estáticos. Los modelos de interface para un análisis bidimensional estático están basados generalmente en las siguientes relaciones esfuerzo-deformación (Desai, 1981):

$$\{ \sigma \} = [C_j] \{ \delta_r \}$$

Donde $\{ \sigma \} = [\sigma_v, \tau]$ = vector de esfuerzos normales y cortantes

$\{ \delta_r \} = [\delta_n, \delta_s]$ = vector de desplazamiento relativo o deformación en los modos normal y cortante, respectivamente.

$[C_j] = \begin{matrix} C_n & 0 \\ 0 & C_s \end{matrix}$ = matriz que contiene la rigidez de la interface

En los problemas de interacción suelo estructura, usualmente se supone que la estructura y el suelo no pueden penetrar una dentro del otro y por lo tanto, durante el modo de translación, el valor de la rigidez normal C_n alcanza un valor muy alto, y se determina mediante estudios paramétricos para un problema dado.

El valor de la rigidez cortante C_s se determina de la respuesta esfuerzo-deformación expresada en términos de esfuerzo cortante contra desplazamiento relativo o deformación, por ejemplo de pruebas de corte directo. Así, el desplazamiento en movimiento de translación se supone que ocurre cuando el esfuerzo cortante inducido τ excede la resistencia de Mohr-Coulomb (figura 5.47 b); es decir:

$$\tau \geq c + \sigma_v \tan \phi \dots\dots\dots 5.1)$$

Donde τ = esfuerzo cortante
 c = adherencia en la interface
 σ_v = esfuerzo normal
 ϕ = angulo de fricción.

Después de que el desplazamiento ha ocurrido, la rigidez cortante C_s se reduce a un valor pequeño y la rigidez normal C_n conserva un valor alto.

Modelos de interface dinámicos. Los modelos de interface para análisis dinámicos incluyen además del modo de translación, los modos rotacionales tales como torsión y oscilación; en la figura 5.48 se presentan los modos de deformación en la interface bajo carga cíclica.

En la figura 5.49 se muestra el modelo propuesto por Kausel et al (1979 para simular el contacto entre la cimentación y el suelo. La respuesta dinámica del suelo se representa usando resortes y amortiguamientos; el desplazamiento relativo únicamente se permite en modo de translación. Se supone que este desplazamiento ocurriera cuando la fuerza horizontal de la base exceda la máxima resistencia por fricción expresada por la ecuación 5.1. Una vez que el deslizamiento ocurre, se supone que el sistema continúa moviéndose hasta que la velocidad de deslizamiento relativo se reduce a cero debido a las fuerzas de contacto.

El comportamiento de interface analizado anteriormente se considera aplicable a cimentaciones de tipo superficial tales como zapatas, losas y probablemente cajones, en los cuales si se cumpla la hipótesis de que la estructura y el suelo no pueden penetrar uno dentro del otro y por consiguiente la rigidez normal C_n alcanza un valor muy alto; además, la rigidez por cortante C_s es la correspondiente a la dirección horizontal. En este caso las pruebas de corte directo para determinar los parámetros constitutivos de la relación esfuerzo-deformación en la interface, son adecuadas.

Por lo que respecta a modelos dinámicos para cimentaciones profundas, Jaime et al (1988) utilizaron el modelo propuesto por Barkan (1962) y Maxwell et al (1969) para estudiar el comportamiento cíclico de pilotes de fricción cargados axialmente y aplicable a los suelos arcillosos de la ciudad de México.

En la figura 5.50 se presenta el modelo de referencia, de un grado de libertad (en dirección vertical), y que consiste en una masa descansando sobre un resorte y un amortiguador sujetos a una base fija. La masa representa el peso de la estructura, más la cimentación y el pilote, y el resorte y amortiguamiento simulan la respuesta dinámica del suelo.

El estudio anterior se basó en pruebas de carga estáticas y cíclicas en pilotes de fricción a escala natural e hincados en un sitio de la zona lacustre de la ciudad de México. Los pilotes fueron de concreto de sección cuadrada de 30 cm de lado y con una longitud de 16 m. La frecuencia de oscilación de las cargas cíclicas variaron de 0.1 a 1 Hz y la carga sostenida en cada uno de los pilotes de prueba fue de 0, 25 y 40 toneladas.

Los resultados y conclusiones reportados por dicho investigador incluyen las siguientes:

- . Módulo de rigidez medio $C_v = 0.46 \text{ kg/cm}$ (constante con la profundidad).
- . Frecuencia de resonancia ante carga vertical del grupo de pilotes ensayados f_n entre 2 y 12 hz.
- . La respuesta de un pilote sometido a carga cíclica vertical depende de los siguientes factores:
 - a) Rigidez equivalente C_v (depende de las características del suelo y del pilote).
 - b) Frecuencia de aplicación de la carga cíclica (f).
 - c) Carga sostenida que actúa en el pilote (masa).
 - d) Magnitud de la carga cíclica.
 - e) Amortiguamiento.

Por lo que respecta a los resultados obtenidos en este trabajo y reportados en la tabla 5.2, referentes a ensayos de interface arcilla-concreto realizados en el aparato de corte directo (series 5 y 7), se aprecia que hay una pérdida de adherencia en la interface bajo cargas cíclicas. En la serie 5 la adherencia estática (τ_{est}) fue de 0.379 kg/cm^2 y a un nivel de esfuerzo cortante cíclico similar, la muestra no resistió ni un ciclo de carga; en la serie 7 hubo una pérdida mucho mayor ya que incluso el esfuerzo cíclico no llegó a un valor cercano al correspondiente de la resistencia estática.

Ahora bien, de las pruebas estáticas de interface, cuyas curvas se presentan en la figura 5.51, se obtuvieron rigideces cortantes horizontales C_s de 6.06 y 6.78 kg/cm^3 para las serie 5 y 7, respectivamente. Estas rigideces se obtuvieron de dividir el 60 % del esfuerzo cortante máximo (rango en el que se comporta aproximadamente lineal) entre la deformación respectiva.

Las figuras 5.52 y 5.53 presentan al desplazamiento horizontal relativo promedio en función del número de ciclos de carga, para las series 5 y 7, ambas a diferentes niveles de esfuerzo cortante cíclico.

Finalmente en la tabla 5.3 y figuras 5.54 y 5.55 se indica la variación de la rigidez cortante dinámica C_s en función del número de ciclos, se observa que dicha rigidez de interface sufre una degradación con el número de ciclos y que a mayor nivel de esfuerzo cortante corresponde una menor rigidez y viceversa. Las rigideces estuvieron comprendidas entre 0.669 y 19.461 kg/cm^3 para la serie 5 y, 1.95 y 9.48 kg/cm^3 para para la serie 7.

De las gráficas presentadas en este inciso se aprecia que las curvas obtenidas para estas series de ensayos son de tipo elasto-plástico y que para definir el comportamiento de interface adecuadamente, es deseable realizar pruebas con diferentes esfuerzos normales σ_v y a diferentes frecuencias de oscilación.

Lo anterior permitirá obtener las rigideces en función de los siguientes parámetros: esfuerzo normal σ_v , esfuerzo cortante τ , desplazamiento relativo δ_r , número de ciclos N_c y frecuencia f . También es de esperar que dichas rigideces estén afectadas por otros factores como: contenido de agua, plasticidad, relación de vacíos y por las propiedades físicas de los materiales de interface.

T A B L A S , C a p í t u l o 5

Tabla 5.1 Propiedades índice de las muestras inalteradas utilizadas en aparato de corte directo .

SERIE No.	SITIO	PROFUNDIDAD EN (m)	W i (%)	LL (%)	LP (%)	IP	Ss	SUCS
4 (A / A)	Bordo poniente Mil hectáreas	16.30 a 16.50	316	338	67	271	2.47	C H
5 (A / C)		16.50 a 16.70	315					
6 (A / A)	ASA sala nacional	32.40 a 32.60	275	206	98	108	2.36	M H
7 (A / C)		32.60 a 32.80	325					

W i = Contenido de
agua inicial
promedio

LL = Límite líquido
LP = Límite plástico
IP = Índice plástico

Ss = Densidad de sólidos
SUCS = Sistema unificado de
clasificación de suelos

A / A : ensayos en arcilla inalterada
A / C : ensayos de interface arcilla/concreto

Tabla 5.2 Resumen de resultados de laboratorio en el aparato de corte directo , muestras inalteradas .

SERIE No.:	PRUEBA No.	W i (%)	G w i (%)	e i	γ_m (t/m ³)	τ_{est} (kg/cm ²)	τ_{cic} (kg/cm ²)	τ_{cic}/τ_{est} (%)	CICLOS A LA FALLA
4 (A/A)	1	327	100	8.8	1.17	0.351	-	-	-
	2	329	100	8.8	1.18	-	0.236	67.2	126
	3	306	100	8.2	1.20	-	0.289	82.3	7
	4	303	100	8.1	1.20	-	0.341	97.2	< 1
5 (A/C)	1	312	100	8.3	1.19	0.379	-	-	-
	2	327	99	8.9	1.16	-	0.253	66.8	1000 s/f
	3	313	100	8.4	1.19	-	0.354	93.4	141
	4	306	98	8.3	1.16	-	0.368	97.0	< 1
		$\nabla'v = 0.57$	kg/cm ²						
6 (A/A)	1	278	100	6.5	1.19	1.000	-	-	-
	2	268	100	6.3	1.19	-	0.493	49.3	6000 s/f
	3 *	202	96	4.9	1.20	-	0.697	69.7	115
	4	280	100	6.6	1.18	-	0.980	98.0	3
7 (A/C)	1	339	97	8.4	1.12	0.871	-	-	-
	2	313	99	7.5	1.15	-	0.417	47.9	821
	3 *	257	100	6.1	1.21	-	0.595	68.3	< 1
	4	323	97	7.9	1.13	-	0.625	71.8	< 1
		$\nabla'v = 0.76$	kg/cm ²						

W i = Contenido de agua inicial
 G w i = Grado de saturación inicial
 e i = Relación de vacíos inicial
 A / A = ensayos en arcilla inalterada
 A / C = ensayos de interface arcilla/concreto

γ_m = Peso volumétrico
 τ_{est} = Esfuerzo cortante estático
 τ_{cic} = Esfuerzo cortante cíclico
 * = material ligeramente heterogéneo
 s / f = sin falla
 $\nabla'v$ = Esfuerzo de consolidación

Tabla 5.3 Rigidez cortante Cs , pruebas de interface arcilla-concreto en el equipo de corte directo.

SERIE	τ cic	Nc	δr	Cs
No.	(kg/cm ²)		(mm)	(kg/cm)
5	0.253	1	0.13	19.461
		10	0.15	16.866
		100	0.17	14.882
		400	0.17	14.882
		700	0.17	14.882
		1000 s/f	0.17	14.882
5	0.354	1	0.20	17.700
		10	0.29	12.207
		50	0.51	6.941
		100	0.60	5.900
		120	0.66	5.364
		130	0.76	4.658
		141	1.22	2.902
5	0.368	1	5.50	0.669
7	0.417	1	0.44	9.48
		10	0.47	8.87
		100	0.49	8.51
		500	0.65	6.41
		650	0.75	5.56
		750	0.97	4.29
		810	1.44	2.89
		821	2.05	2.03
7	0.625	1	3.21	1.95
7	0.625	1	3.21	1.95

τ cic = Esfuerzo cortante cíclico

δr = desplazamiento relativo promedio de interface

Nc = Número de ciclos

Cs = Rigidez cortante horizontal

FIGURAS. Capítulo 5

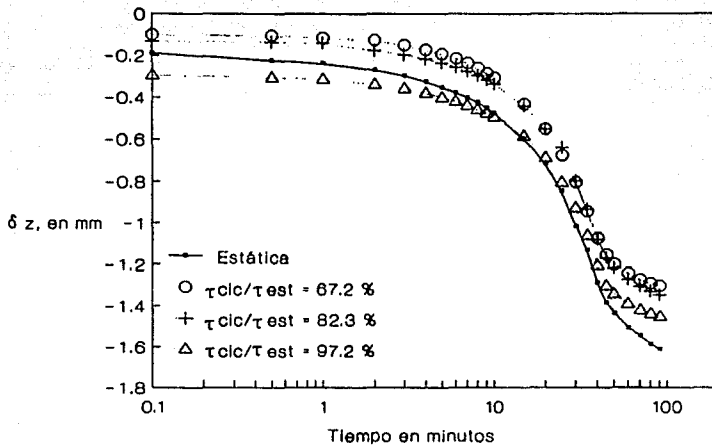


Fig 5.1 Curvas de consolidación serie 4 (A/A)

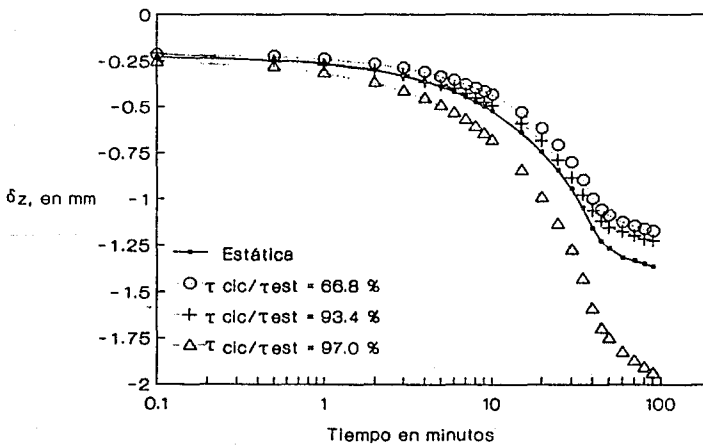


Fig 5.2 Curvas de consolidación serie 5 (A/C)

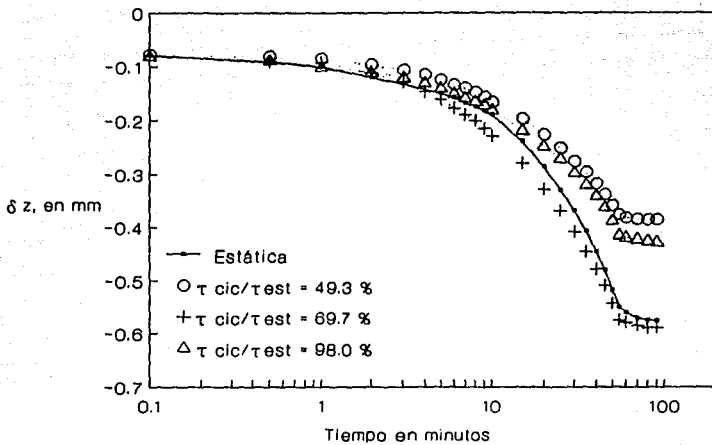


Fig 5.3 Curvas de consolidación serie 6 (A/A)

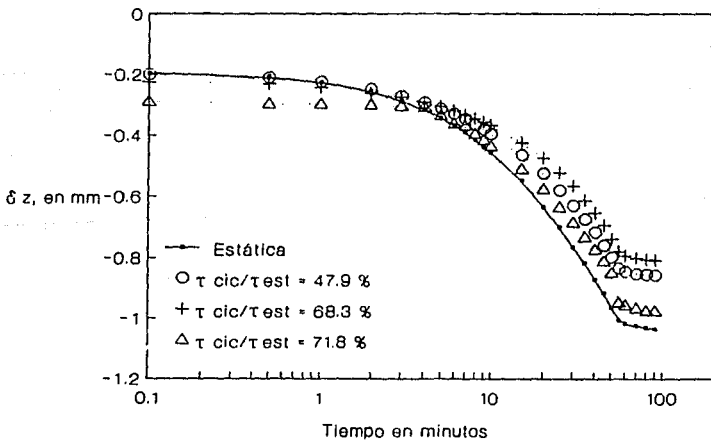


Fig 5.4 Curvas de consolidación serie 7 (A/C)

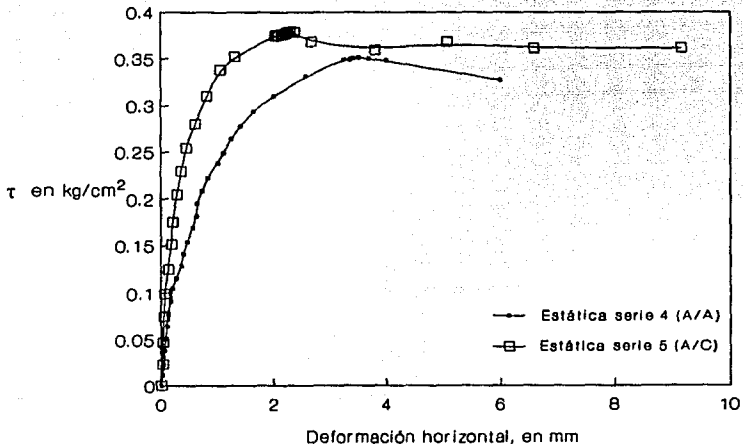


Fig 5.5 Pruebas estáticas series 4 y 5

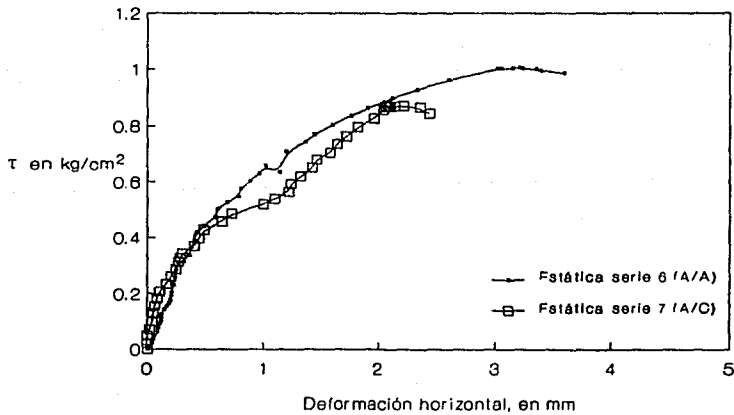


Fig 5.8 Pruebas estáticas serie 6 y 7

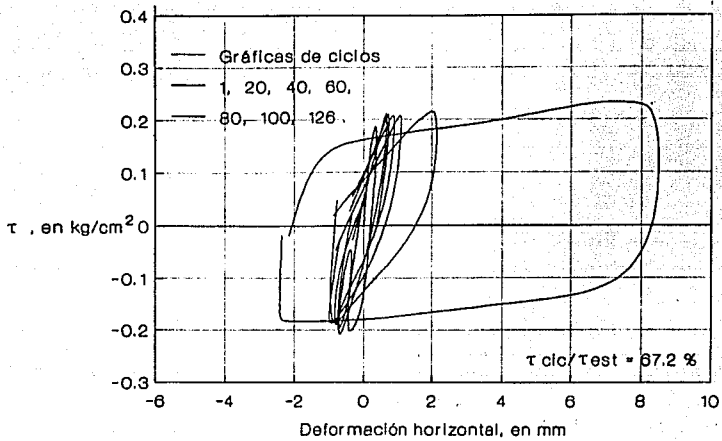


Fig 5.7 Curvas histeréticas serie 4 (A/A)

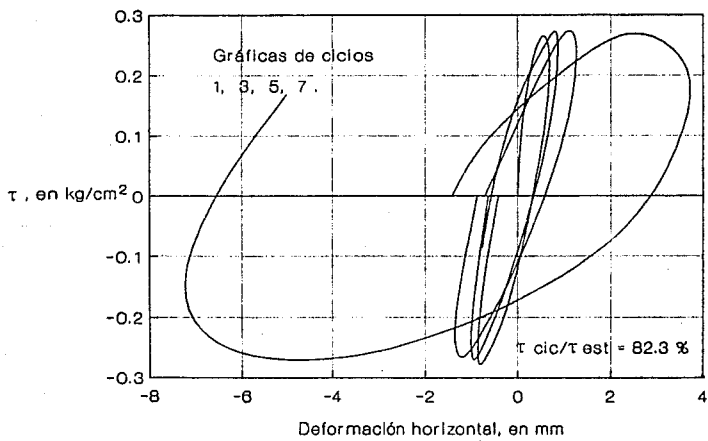


Fig 5.8 Curvas histeréticas serie 4 (A/A)

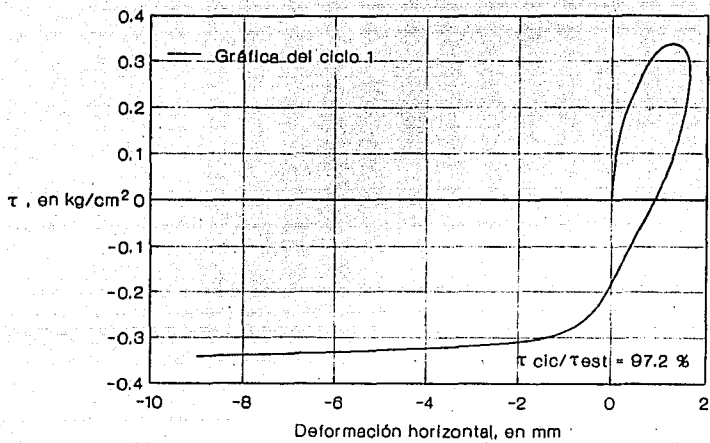


Fig 5.9 Curvas histeréticas serie 4 (A/A)

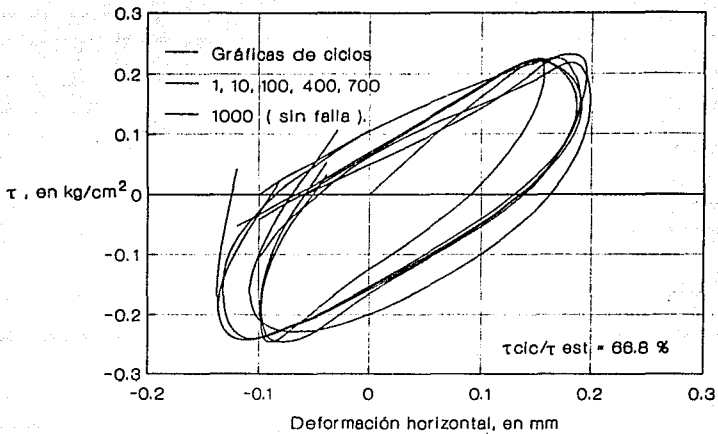


Fig 5.10 Curvas histeróticas serie 5 (A/C)

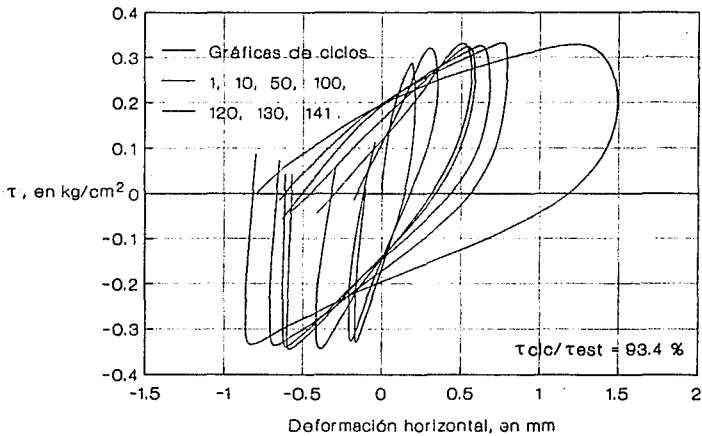


Fig 5.11 Curvas histeróticas serie 5 (A/C)

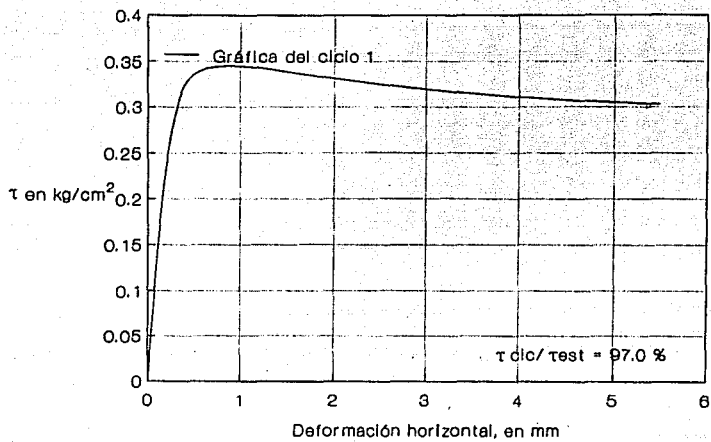


Fig 5.12 Curvas histeréticas serie 5 (A/C)

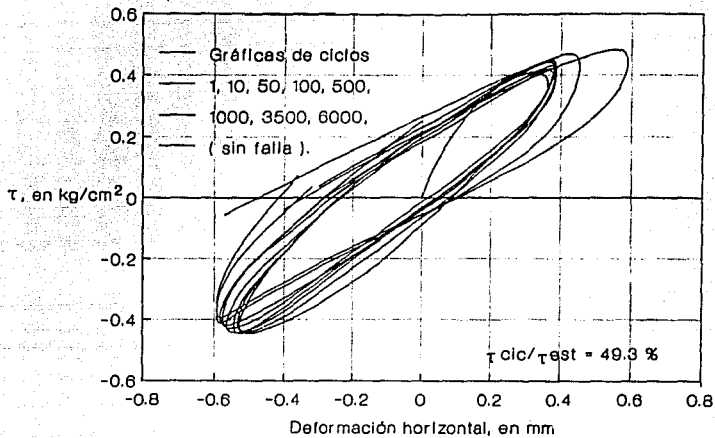


Fig 5.13 Curvas histeréticas serie 6 (A/A)

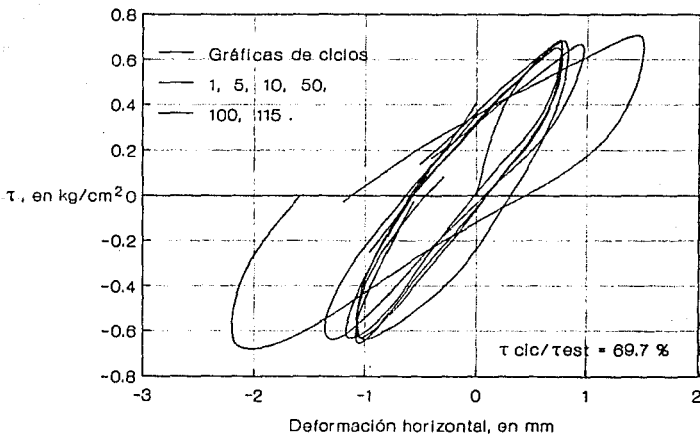


Fig 5.14 Curvas histeréticas serie 6 (A/A)

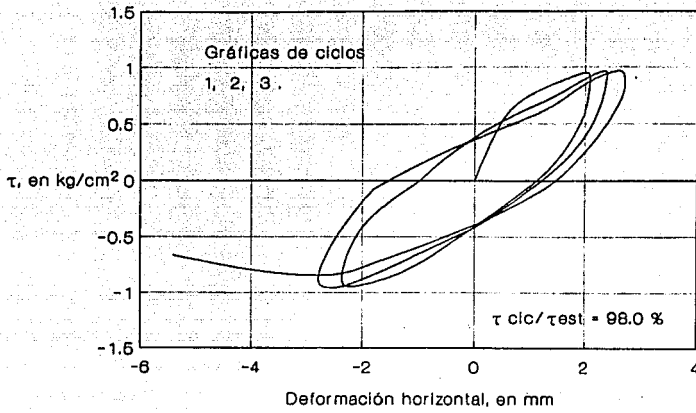


Fig 5.15 Curvas histeréticas serie 8 (A/A)

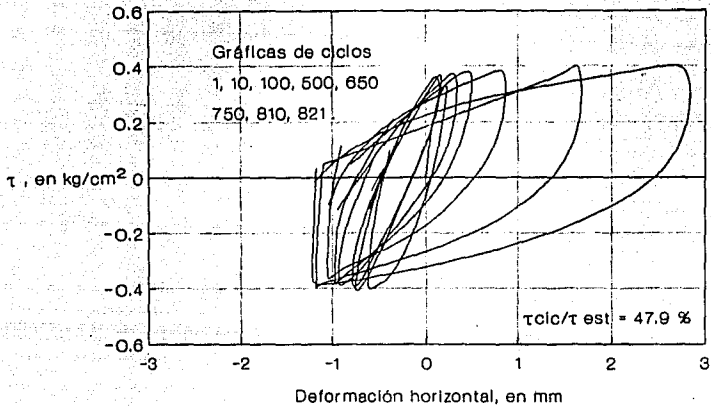


Fig 5.16 Curvas histeréticas serie 7 (A/C)

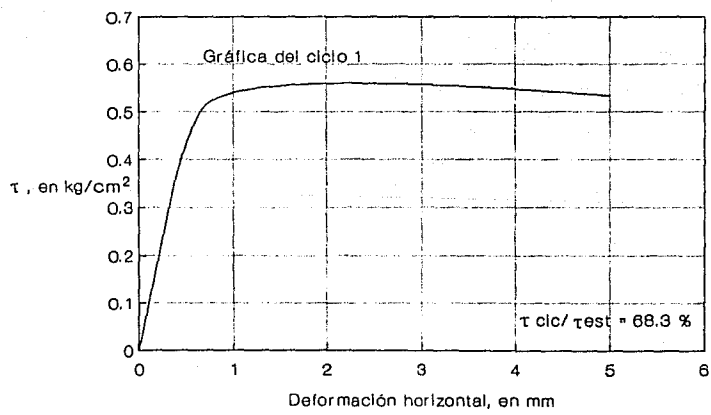


Fig 5.17 Curvas histeréticas serie 7 (A/C)

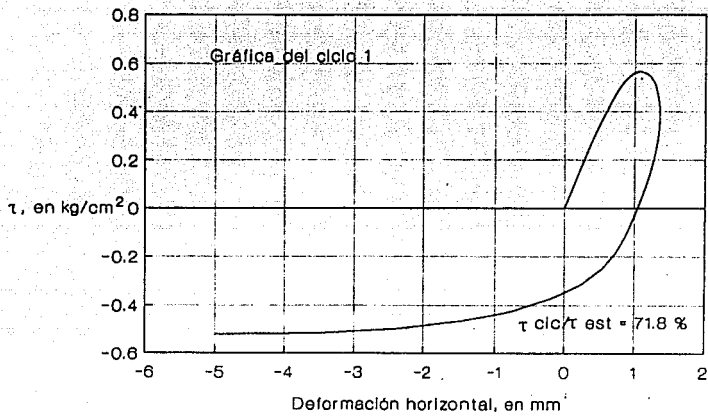


Fig 5. 18 Curvas histeréticas serie 7 (A/C)

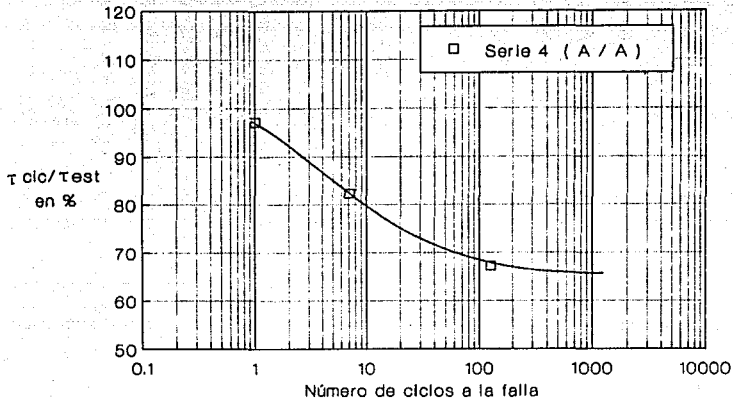


Fig 5.19 Esfuerzo cortante vs número de ciclos a la falla

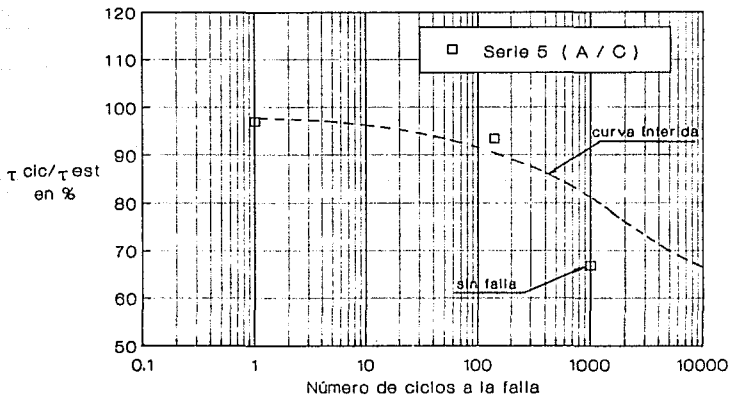


Fig 5.20 Esfuerzo cortante vs número de ciclos a la falla

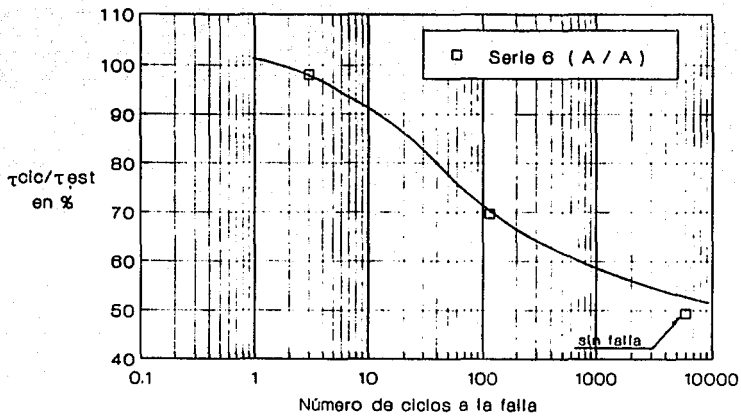


Fig 5.21 Esfuerzo cortante vs número de ciclos a la falla

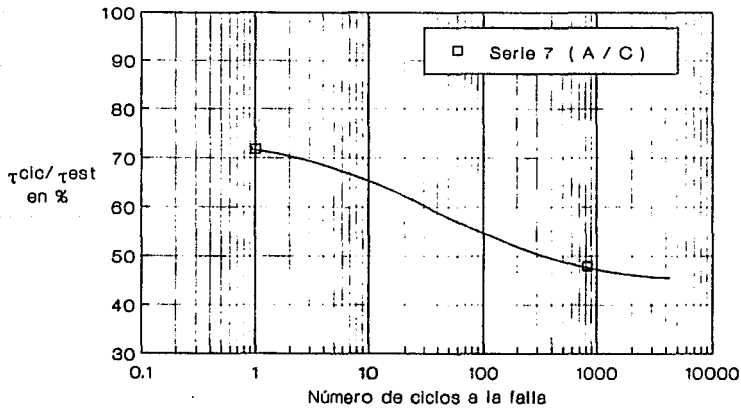


Fig 5.22 Esfuerzo cortante vs número de ciclos a la falla

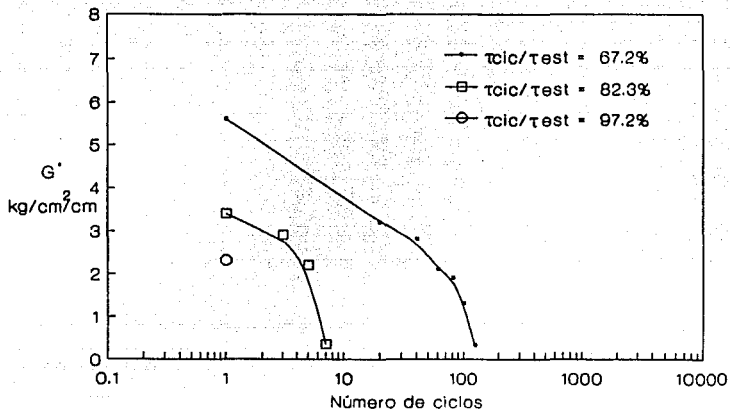


Fig 5.23 Módulo de rigidez G vs número de ciclos, serie 4

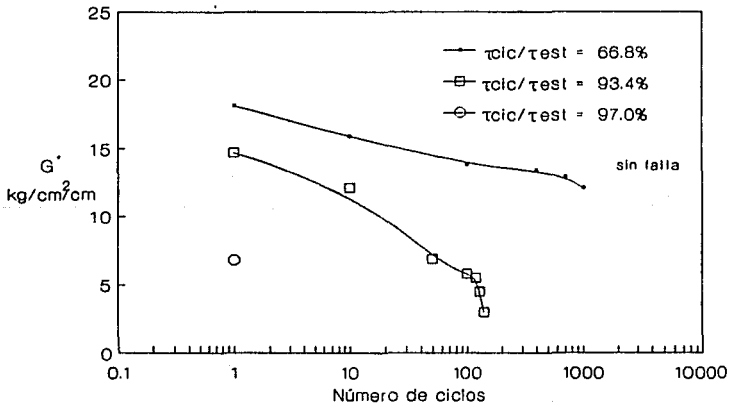


Fig 5.24 Módulo de rigidez G vs número de ciclos, serie 5

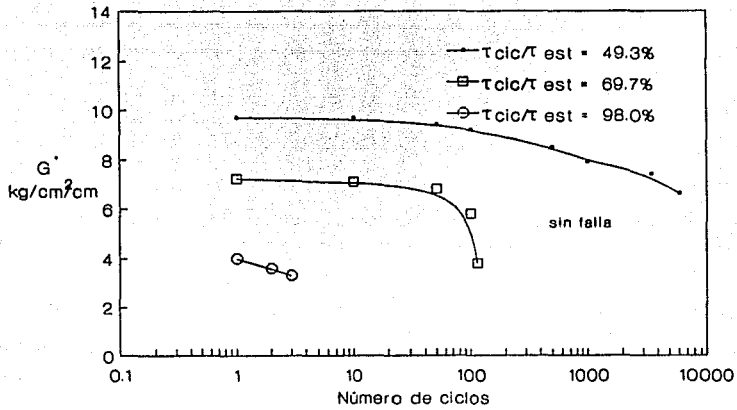


Fig 5.25 Módulo de rigidez G vs número de ciclos, serie 6

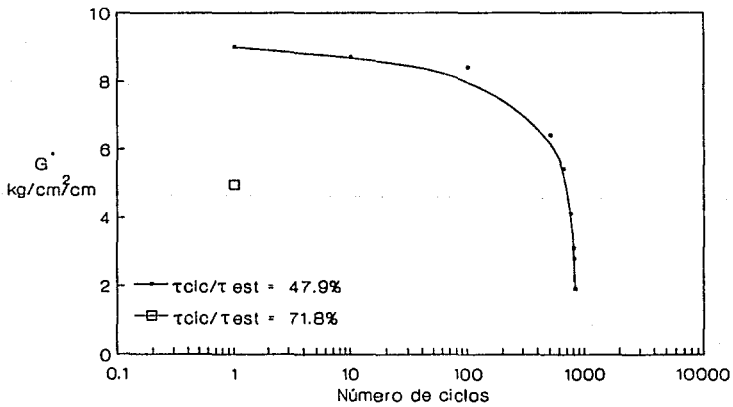


Fig 5.26 Módulo de rigidez G vs número de ciclos, serie 7

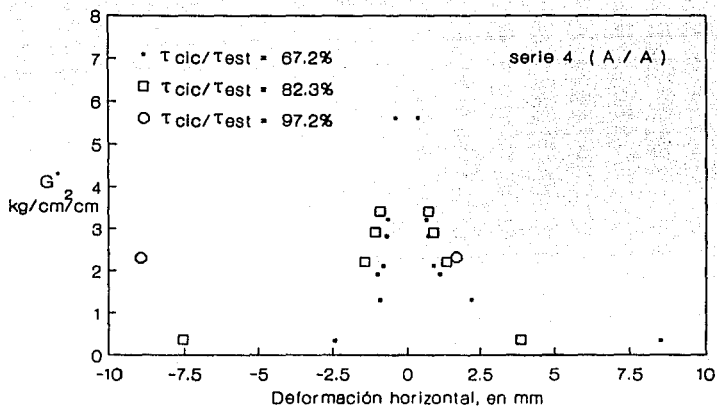


Fig 5.27 Módulo de rigidez G vs deformación horizontal

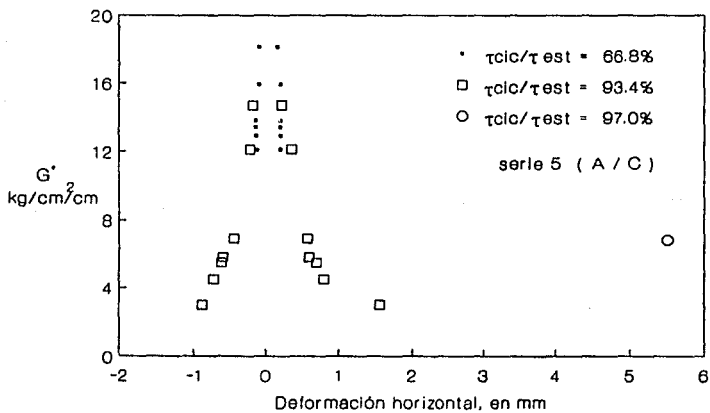


Fig 5.28 Módulo de rigidez G vs deformación horizontal

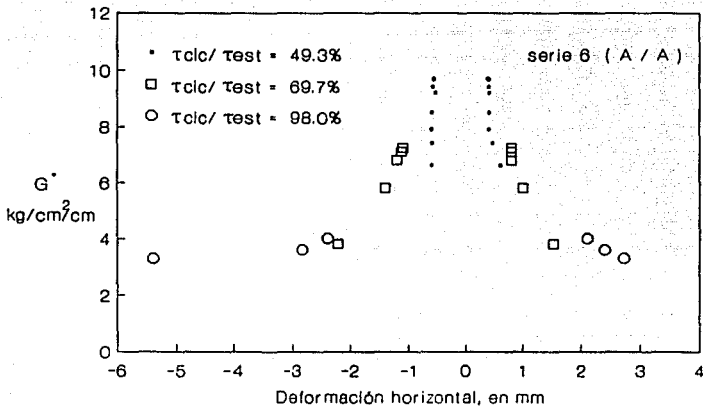


Fig 5.29 Módulo de rigidez G vs deformación horizontal

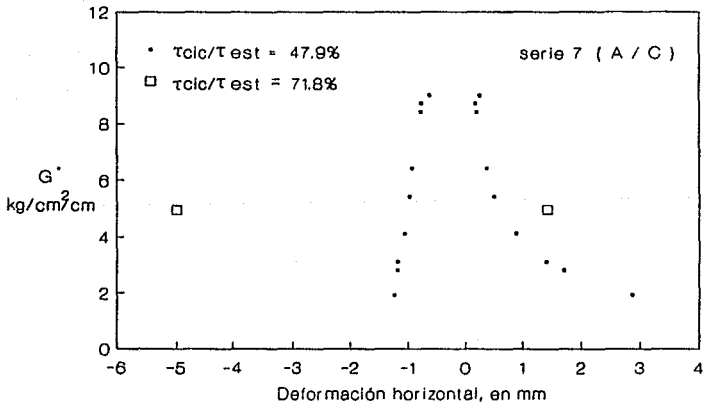


Fig 5.30 Módulo de rigidez G vs deformación horizontal

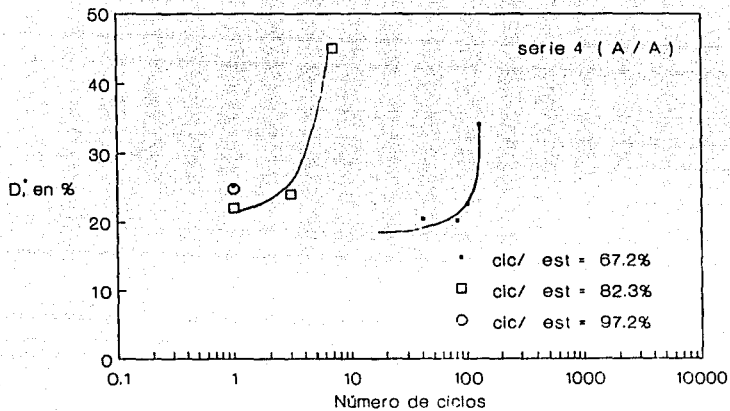


Fig 5.31 Amortiguamiento D vs número de ciclos, serie 4

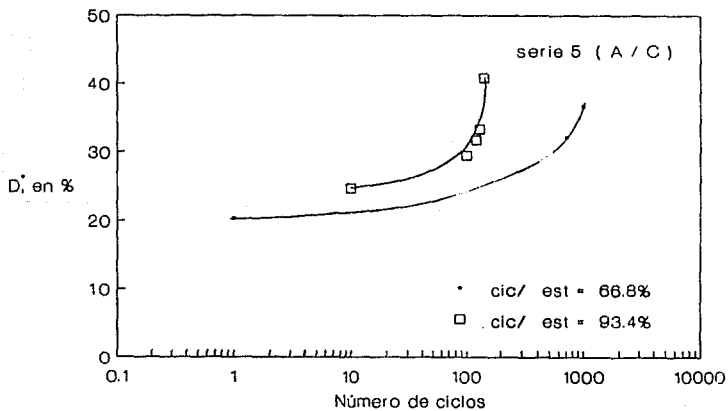


Fig 5.32 Amortiguamiento D vs número de ciclos, serie 5

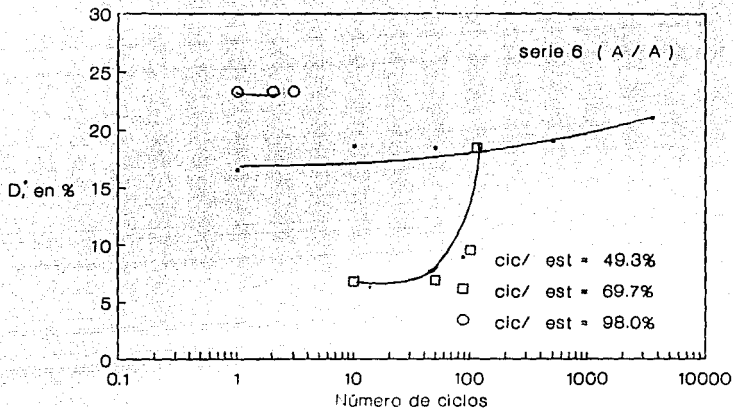


Fig 5.33 Amortiguamiento D vs número de ciclos, serie 6

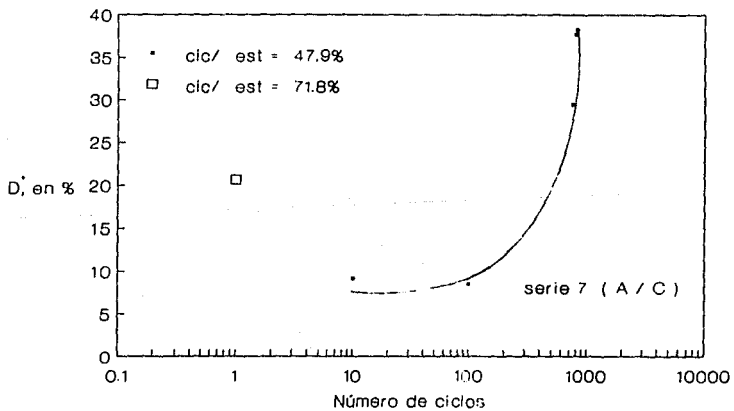


Fig 5.34 Amortiguamiento D vs número de ciclos, serie 7

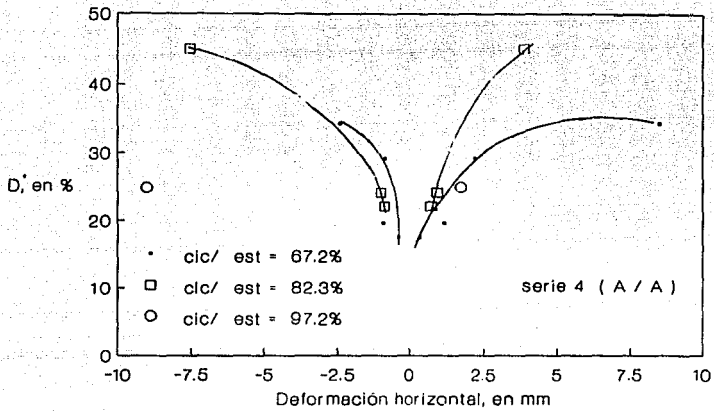


Fig 5.35 Amortiguamiento D vs deformación horizontal

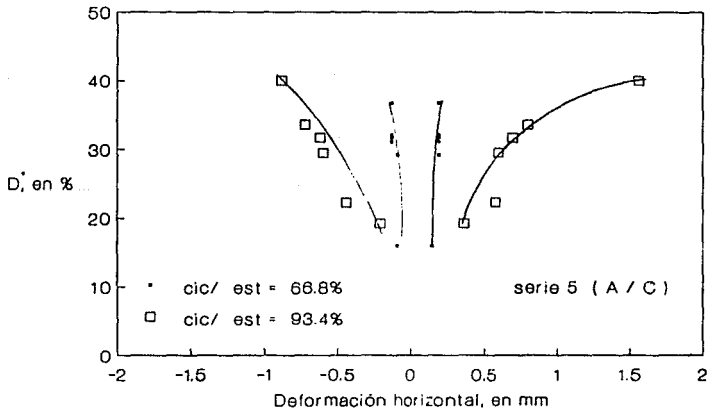


Fig 5.36 Amortiguamiento D vs deformación horizontal

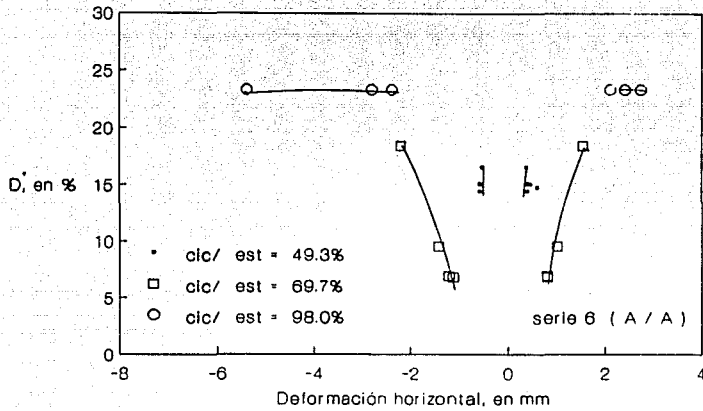


Fig 5.37 Amortiguamiento D vs deformación horizontal

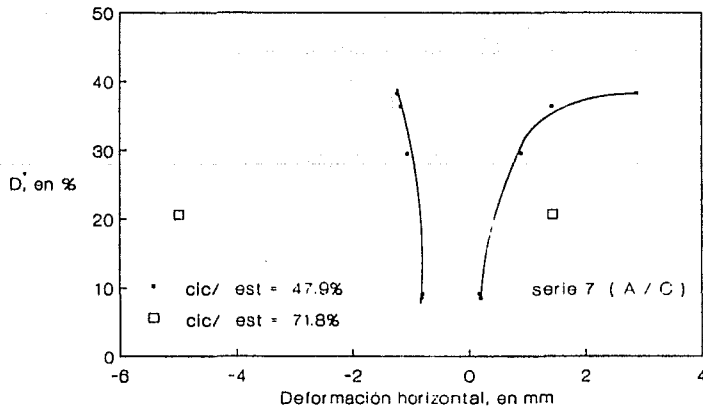


Fig 5.38 Amortiguamiento D vs deformación horizontal

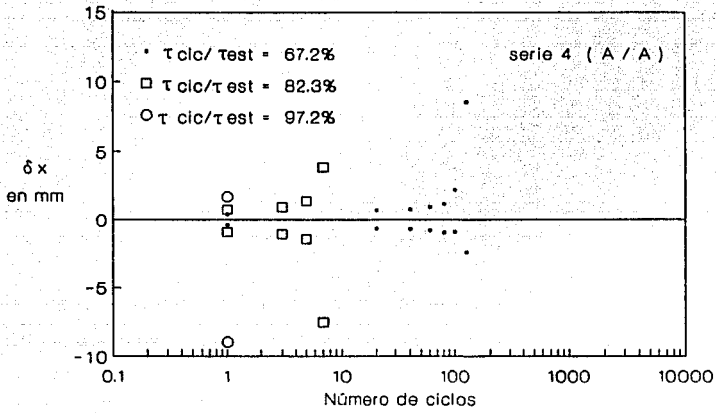


Fig 5.39 Deformación horizontal vs número de ciclos

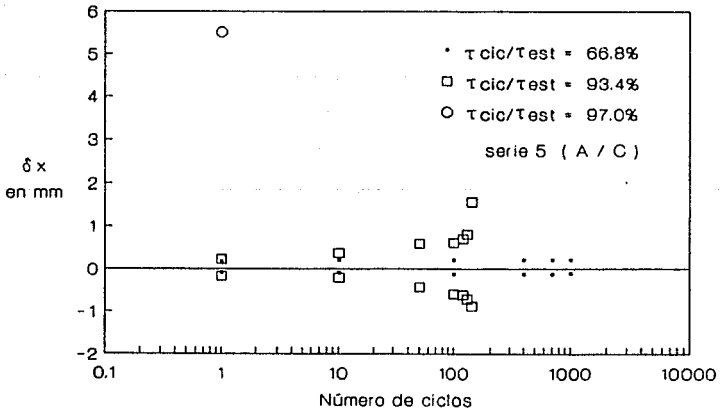


Fig 5.40 Deformación horizontal vs número de ciclos

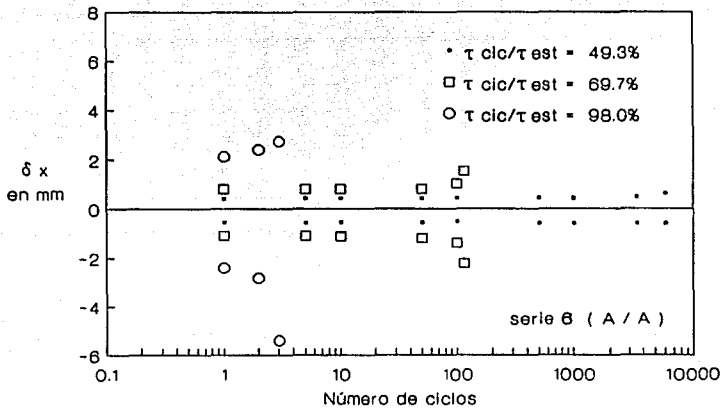


Fig 5.41 Deformación horizontal vs número de ciclos

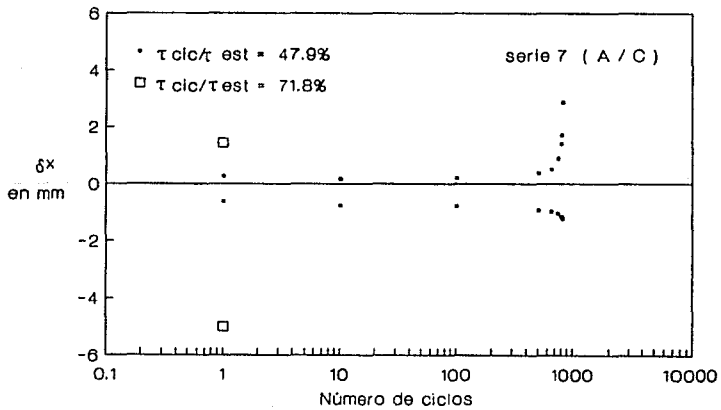


Fig 5.42 Deformación horizontal vs número de ciclos

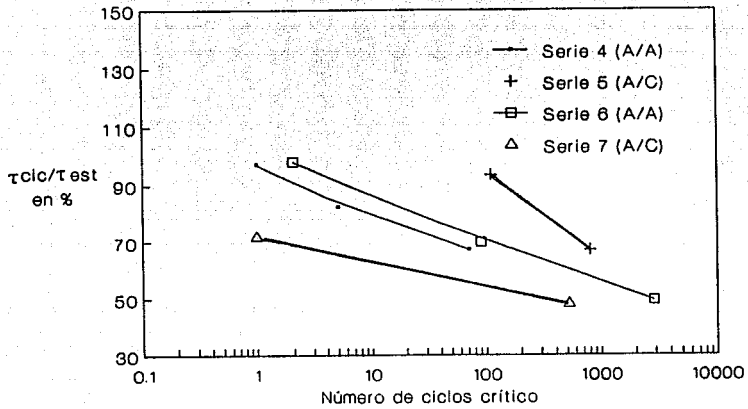


Fig 5.43 Nivel de esfuerzo cíclico vs número de ciclos crítico

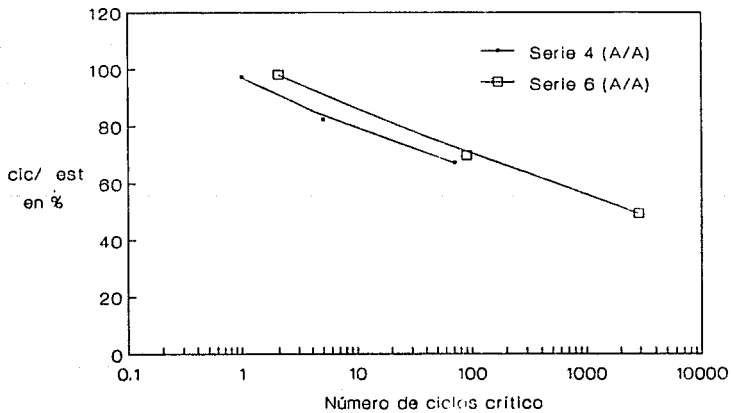


Fig 5.44 Nivel de esfuerzo cíclico vs número de ciclos crítico

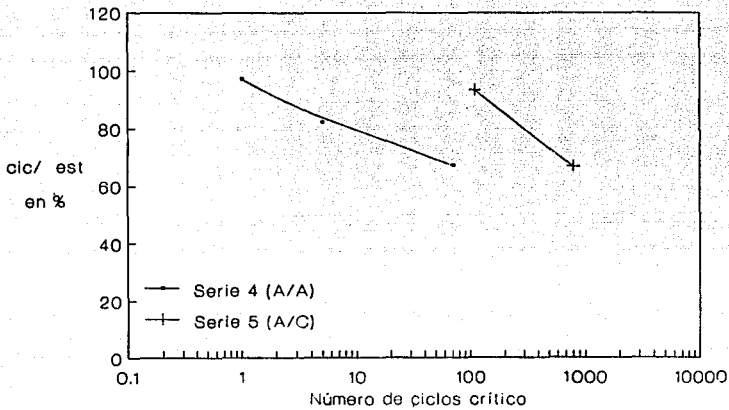


Fig 5.45 Nivel de esfuerzo cíclico vs número de ciclos crítico

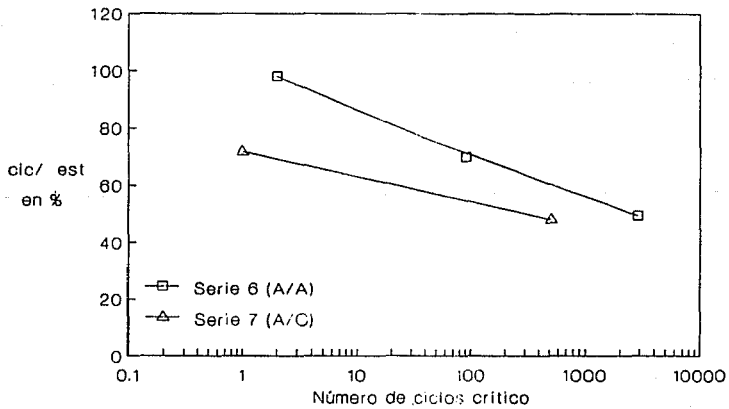
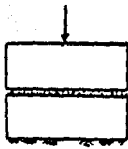
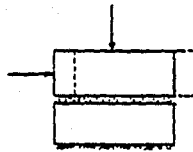


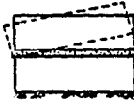
Fig 5.46 Nivel de esfuerzo cíclico vs número de ciclos crítico



a) Vertical



b) Translación y
deslizamiento

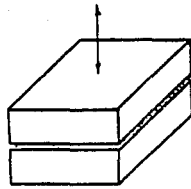


c) Abertura

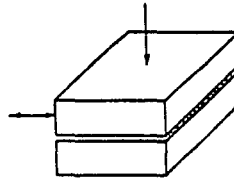


d) Cierre

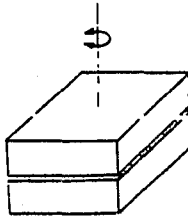
FIG 5.47 VARIOS MODOS DE DEFORMACION EN INTERFACE



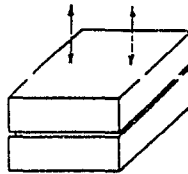
a) Vertical



b) Horizontal

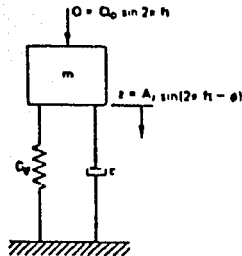


c) Torsional



d) Oscilación

**FIG 5.48 MODOS DE DEFORMACION EN INTERFACE
BAJO CARGA CICLICA**



- C** coeficiente de amortiguamiento
- C** coeficiente de resorte efectivo
- m** masa equivalente del sistema
- Q** fuerza excitadora periódica
- Q₀** fuerza excitadora máxima
- t** tiempo
- z** desplazamiento periódico
- A_s** amplitud de desplazamiento máximo
- φ** ángulo de fase entre Q₀ y z
- f** frecuencia (Hz)

FIG 5.50 MODELO MASA RESORTE AMORTIGUADOR

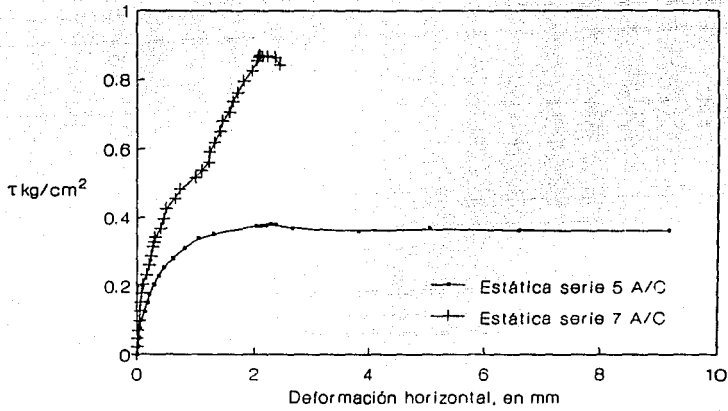


Fig 5.51 Esfuerzo cortante vs deformación horizontal

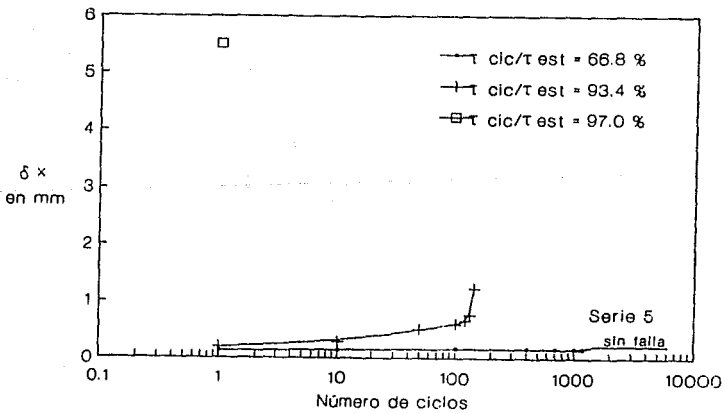


Fig 5.52 Desplazamiento horizontal prom vs número de ciclos

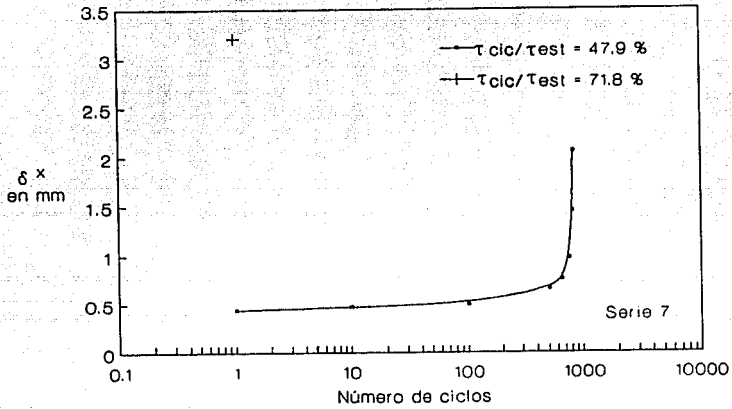


Fig 5.53 Desplazamiento horizontal prom vs número de ciclos

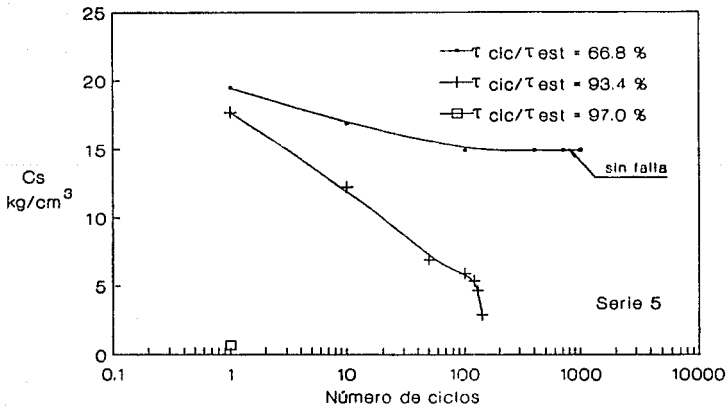


Fig 5.54 Rigidez cortante de interface C_s vs número de ciclos

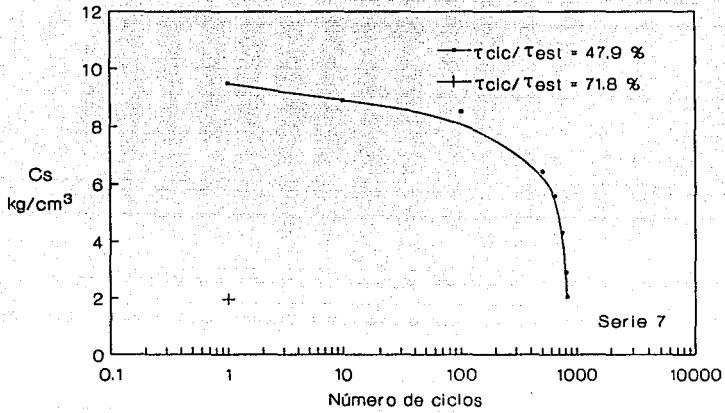


Fig 5.55 Rigidez cortante de interface C_s vs número de ciclos

CAPITULO 6

6. ENSAYES DE LABORATORIO EN EL APARATO DE CORTE DIRECTO, MUESTRAS REMOLDEADAS .

Los pilotes de concreto constituyen uno de los tipos de cimentación profunda más empleados en la ciudad de México; cuando uno de estos elementos estructurales es hincado en un estrato de material arcilloso se produce un remoldeo de dicho material en torno a este elemento. El remoldeo destruye la estructura inicial de la arcilla reduciendo su resistencia al corte.

Marsal y Mazari (1957) realizaron una serie de ensayos a escala natural para determinar la adherencia que existe entre suelo y pilote y evaluar el efecto del hincado en las propiedades de las arcillas y su evolución en el tiempo. Los ensayos consistieron en pruebas de extracción de pilotes de madera y concreto hincados en la formación arcillosa superior de la zona de lago, y de ellos se concluyó que la adherencia depende del tiempo transcurrido desde el hincado y de la velocidad de extracción de los pilotes.

Las curvas de carga contra desplazamiento de los ensayos reportados por estos investigadores presentan una resistencia máxima y una residual, siendo esta última superior al 50% de la máxima. También indican que la alteración provocada en las arcillas por la penetración del pilote es intensa en la vecindad de estos, manifestándose por pérdida de elasticidad y fisuramiento de los materiales; la resistencia mínima registrada a pocas horas del hincado fue del orden de la mitad de la que tenían las arcillas inalteradas.

Finalmente, comentan que las propiedades de los materiales afectados por el hincado varían con el tiempo, sin que se pueda precisar el valor al que llegarán, ni su relación con los valores originales.

Zeevaert (1957) investigó las propiedades de muestras de arcilla obtenidas cerca del fuste de pilotes hincados, observando que existe una capa delgada de material perfectamente remoldeado y reconsolidado cerca del fuste, cuyo espesor no excede una distancia del 5% del radio del pilote; rebasando esta distancia, el contenido de agua permanece prácticamente constante. Por lo que respecta a la resistencia al corte de la arcilla inalterada, esta se ve afectada por el hincado de los pilotes a una distancia de un diámetro alejada del fuste; cerca de este la resistencia del suelo se reduce al 60% de su valor natural inalterado, aproximadamente.

Jaime et al (1988) reportan resultados de ensayos de corte simple estáticos en muestras de arcilla remoldeadas, indicando que el suelo arcilloso gana rápidamente resistencia después de haber sido sometido a un remoldeo enérgico a volumen constante, presentando una resistencia inmediata después del remoldeo de aproximadamente el 55% de la resistencia que alcanza cuando se le deja consolidar al 100%.

Con los resultados de estas investigaciones en mente se realizó una serie de pruebas en material remoldeado, cuyo objetivo fue evaluar la resistencia a diferentes tiempos después del fin de la consolidación primaria en ensayos de interface arcilla/concreto. Las pruebas simularon los desplazamientos suelo-pilote en la interface y permiten comparar los resultados obtenidos en estas pruebas con los publicados sobre pruebas de extracción o penetración en pilotes.

Se efectuaron en total 6 pruebas, dos en material inalterado y cuatro en remoldeado. En las primeras se determinó la resistencia estática de la arcilla sola (A/A) y en interface con concreto (A/C). La primera de las pruebas en material remoldeado fue de tipo A/A y las tres restantes de tipo A/C a diferentes edades.

Todas las pruebas fueron de tipo consolidado-no drenado (CU) y por las características propias del equipo indicadas en el capítulo 3, no se pudo aplicar presión confinante ni tampoco medir el incremento de presión de poro durante las pruebas.

6.1 METODO DE PRUEBA

Todas las pruebas se realizaron con una misma muestra de material representativo de la zona lacustre de la ciudad de México, obtenida con un muestreador tipo Shelby de 10 cm de diámetro en la calle de Dinamarca No.51 y a una profundidad de 16.30 a 16.50 m. El material resultó ser una arcilla-limosa de consistencia firme, color café verdoso de alta compresibilidad (CH-MH), con un límite líquido de 322% y un límite plástico de 104% ; su contenido de agua natural promedio fue $W=350\%$ y su densidad de sólidos, $S_s=2.5$.

Labrado y montaje de los especímenes. Las muestras fueron labradas en forma de pastillas circulares con dimensiones promedio de 71 mm de diámetro y espesores de 28 y 19 mm, para las pruebas de arcilla sola (A/A) y de interface (A/C), respectivamente.

Para remoldear los materiales se siguió el procedimiento que se describe a continuación:

. Remoldeo del material arcilloso por medio de un amasado riguroso con una espátula, hasta que el material alcanzara una consistencia blanda, aproximadamente 30 minutos de amasado para 140 g de material.

. Colocación del material amasado en un molde partido de dimensiones ligeramente mayores que el espécimen; esta operación también se realizó con ayuda de una espátula poniendo el material de abajo hacia arriba y de los bordes al centro del molde, presionando fuertemente para eliminar las burbujas de aire que pudieran quedar atrapadas.

. Enrase, desmontaje y recorte por medio de un arco y torno para lograr el tamaño adecuado del espécimen de prueba, al salir este del molde.

Una vez labradas las muestras, se pesan, miden y se obtienen los valores iniciales de peso volumétrico (γ_m), grado de saturación (G_w) y relación de vacíos (e). En la tabla 6.1 se presentan los valores obtenidos en cada espécimen de prueba.

De los datos presentados en la tabla antes referida se observa que los especímenes remoldeados son semejantes a los inalterados, en cuanto a contenido de agua $W\%$, grado de saturación G_w y relación de vacíos e ; el peso volumétrico γ_m resultó ligeramente inferior al de la muestra en estado natural.

Los anillos de bronce con su lámina de cobre intermedia debidamente sellada con grasa de silicón y alineados con sus respectivos pernos, se colocan en posición ajustando en la base fija del aparato de corte simple. Posteriormente se saturan las piedras porosas de esta base y de la cabeza que están en contacto con el suelo; paso siguiente se introducen la pastilla de concreto perfectamente saturada y la muestra de suelo. Finalmente sobre estos se coloca la cabeza móvil para consolidar las muestras y aplicar los esfuerzos cortantes durante la prueba de corte directo.

Consolidación. Como se mencionó en los párrafos anteriores, con este equipo no se aplicó presión confinante, así que todas las muestras se consolidaron con esfuerzo vertical cuyo valor teóricamente fue igual al esfuerzo efectivo que tenía el suelo en el campo. Las paredes interiores de los anillos permiten confinar perfectamente a la muestra de suelo durante esta etapa.

Todas las muestras se consolidaron inmediatamente después de elaboradas las pastillas, al 100% de consolidación primaria bajo la carga vertical aplicada; las muestras remoldeadas ya consolidadas, se dejaron reposar un lapso de tiempo de 0, 6 y 100 hr para las pruebas respectivas.

La consolidación se efectuó permitiendo la salida de agua hacia la bureta, aplicando incrementos de carga vertical a razón de 0.1 kg cada $\frac{1}{2}$ seg (0.5 kg/min). La presión de consolidación vertical fue de 0.66 kg/cm² para todas las pruebas, tanto inalteradas como remoldeadas.

Las curvas de consolidación se presentan en las figuras 6.1 y 6.2, para las muestras inalteradas y remoldeadas, respectivamente. Del análisis de estas curvas se observa que el tiempo para alcanzar el 100% de consolidación primaria es similar para todas las pruebas, tanto inalteradas como remoldeadas, siendo del orden de los 55 minutos. La diferencia fundamental se presentó en el tramo de consolidación secundaria, que para las muestras remoldeadas registró una pendiente significativa.

Aplicación de esfuerzo cortante. El esfuerzo cortante monotónico creciente se aplicó en incrementos a razón de 0.5 kg/min y sin permitir el drenaje de la muestra, con lo cual todas las pruebas fueron de tipo consolidado-no drenado (CU).

En la tabla 6.1 se presenta un resumen de los resultados de laboratorio

6.2 RESULTADOS DE LABORATORIO

Los datos obtenidos de los ensayos con el equipo electrónico fueron el incremento de la carga cortante aplicada y la deformación horizontal respectiva.

Curvas esfuerzo cortante vs deformación horizontal. Del procesamiento de los registros electrónicos antes descritos, se determinaron las curvas de esfuerzo cortante (τ) contra deformación horizontal (δx).

El esfuerzo cortante se calculó dividiendo la fuerza horizontal registrada entre el área corregida del espécimen, determinada esta última como se indicó en el inciso 5.2.

En las figuras 6.3 a 6.6 se presentan las curvas esfuerzo cortante contra deformación horizontal de las pruebas que integran esta serie de ensayos.

6.3 INTERPRETACION DE RESULTADOS DE LABORATORIO

De las curvas esfuerzo-deformación presentadas en las figuras 6.3 y 6.4 se obtuvieron coeficientes de adherencia α de 0.73 y 0.65 para especímenes inalterados (pbas 1 y 2) y remoldeados a 0 hr (pbas 3 y 4) respectivamente. Este coeficiente se determinó como el cociente entre la resistencia de interface (A/C) y la resistencia en arcilla sola (A/A).

De los datos presentados en la tabla 6.1 y complementados con las figuras 6.5 y 6.6 se observó lo siguiente:

. La resistencia del material remoldeado y ensayado inmediatamente después (0 hr, pbas 3 y 4), fue del 47 y 42% de la resistencia inalterada (pbas 1 y 2) para las pruebas en arcilla sola (A/A) y de interface (A/C), respectivamente.

. Como se puede apreciar en la figura 6.6, la resistencia del material remoldeado en interface A/C (pbas 4, 5 y 6) va creciendo con el tiempo, y muestra una tendencia incluso de llegar al valor de la resistencia inalterada de interface (pba 2). En nuestro caso particular, a un lapso de 100 hr después del fin de la consolidación primaria, la resistencia remoldeada fue de 0.466 kg/cm² (pba 6) y la inalterada de 0.518 kg/cm² (pba 2).

De las gráficas esfuerzo-deformación obtenidas en los ensayos de interface A/C (pruebas 2, 4, 5 y 6), se puede apreciar un patrón de comportamiento similar al reportado en la literatura en ensayos a escala natural efectuado con pilotes de fricción (Jaime 1988); es decir, presentan una resistencia pico ($\tau_{\text{máx}}$) y una residual (τ_{red}).

La deformación horizontal correspondiente a las resistencias máxima y residual se presenta en la tabla 6.1, en la cual se puede observar que para pruebas de interface tiene los siguientes rangos: 0.62 a 1.06 mm y 6.4 a 8.4 mm para los valores máximo y residual, respectivamente.

La pérdida de resistencia se puede expresar a través de un índice, el cociente $\tau_{\text{red}}/\tau_{\text{máx}}$ que también se presenta en la tabla 6.1; dicho cociente tuvo valores comprendidos entre 0.83 y 0.96.

Finalmente, en la figura 6.7 se presentan las curvas del incremento de la resistencia (como función del tiempo) obtenida en estas pruebas. En el eje de las abscisas aparece el tiempo de reposo permitido a las muestras remoldeadas, normalizado con el tiempo requerido para que el espécimen remoldeado de arcilla sola alcance el 100% de consolidación primaria ($t_{100} = 55$ min). El eje de las ordenadas corresponde al cociente de la resistencia remoldeada en pruebas de interface A/C a diferentes tiempos (0, 6 y 100 hr) y las resistencias indicadas en dicha gráfica, para cada una de las tres curvas presentadas.

Los puntos que definen las curvas antes citadas se dan en la tabla 6.2.

En la gráfica de la figura 6.7 se observa que la resistencia remoldeada crece a medida que transcurre el tiempo de reposo. De los datos presentados en la tabla 6.1 se aprecia que la resistencia remoldeada a 0 hr, fue del 47 y 42 % de la resistencia inalterada, para las pruebas en arcilla sola (A/A) y de interface (A/C), respectivamente. Lo anterior significa que inmediatamente después del remoldeo, la arcilla pierde aproximadamente el 50% de su resistencia estática inicial.

T A B L A S . C a p í t u l o 6

Tabla 6.1 Resumen de resultados de laboratorio en el aparato de corte directo, muestras remoldeadas.

PRUEB No.	TIPO	W i (%)	G w i (%)	e i	γ_m (t/m^3)	τ máx (kg/cm^2)	τ red (kg/cm^2)	$\tau_{red}/\tau_{máx}$	δ máx (mm)	δ red (mm)
1	I (A/A)	347	100	8.7	1.15	0.713	0.636	-	1.86	9.0
2	I (A/C)	344	100	8.6	1.16	0.518	0.434	0.84	1.06	8.4
3	R (A/A) 0 hr	351	98	8.8	1.13	0.332	0.311	-	2.40	9.8
4	R (A/C) 0 hr	343	99	8.7	1.14	0.217	0.208	0.96	0.62	6.4
5	R (A/C) 6 hr	358	100	8.9	1.15	0.299	0.259	0.86	0.66	8.0
6	(A/C) 100 h	336	98	8.6	1.14	0.466	0.388	0.83	0.88	7.0

I = inalterada
R = remoldeada

A / A = ensayos en arcilla sola
A / C = ensayos de interfaz arcilla/concreto

W i = Contenido de agua inicial
G w i = Grado de saturación inicial
e i = Relación de vacíos inicial
 γ_m = Peso volumétrico

τ máx. = Esfuerzo cortante máximo
 τ red. = Esfuerzo cortante residual

δ máx = Deformación en resistencia máx.
 δ red. = Deformación en resistencia resid.

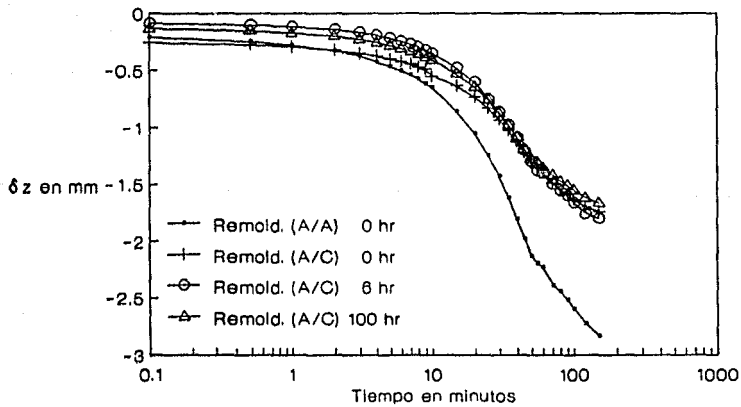
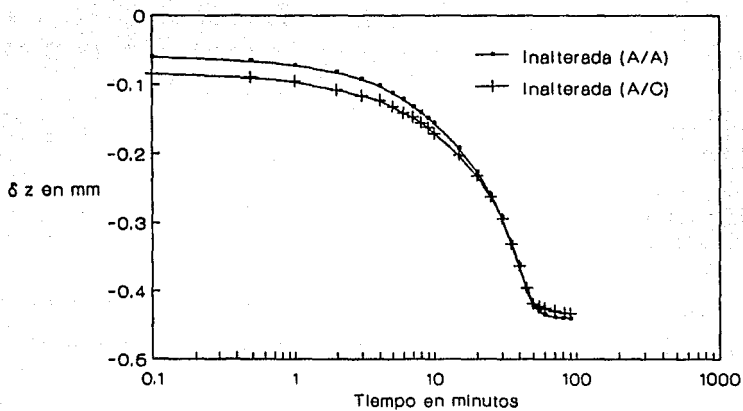
Tabla 6.2 Valores de los parámetros que definen las curvas de incremento de resistencia como función del tiempo, en muestras remoldeadas de arcilla.

TIEMPO t reposo / t 100	COCIENTE DE RESISTENCIAS		
	R(A/C) / I(A/A)	R(A/C) / I(A/C)	R(A/C) / R(A/A)
1.00	0.304	0.419	0.654
6.54	0.419	0.577	0.900
109.10	0.654	0.899	1.404

t = tiempo
t 100 = tiempo 100% consolidación primaria
R = resistencia remoldeada
I = resistencia inalterada

A/C = ensayos de interface arcilla-
concreto
A/A = ensayos en arcilla sola

FIGURAS. Capítulo 6



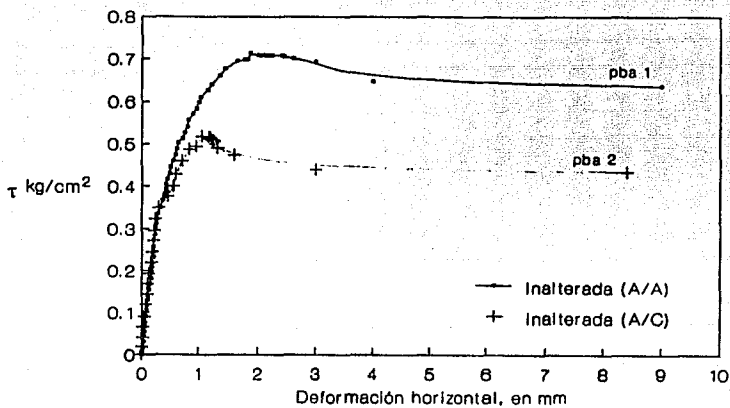


Fig 6.3 Esfuerzo cortante vs deformación horizontal

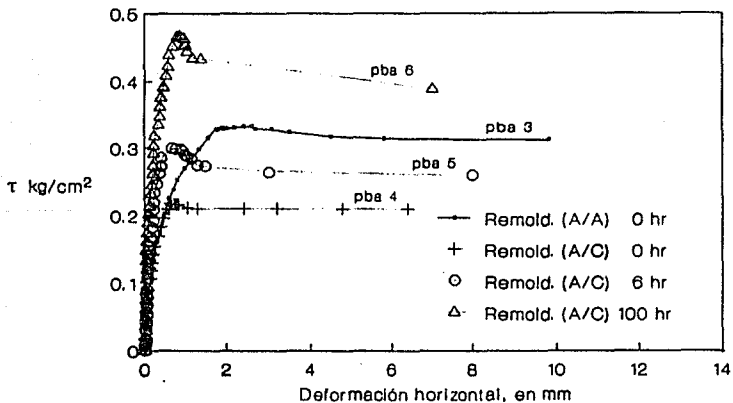


Fig 6.4 Esfuerzo cortante vs deformación horizontal

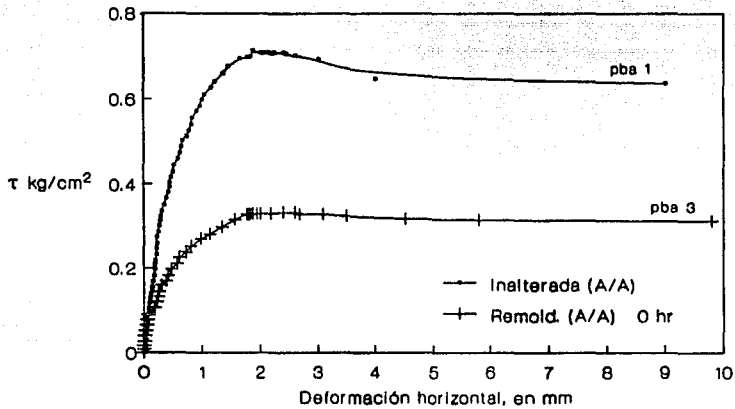


Fig 6.5 Esfuerzo cortante vs deformación horizontal (A/A)

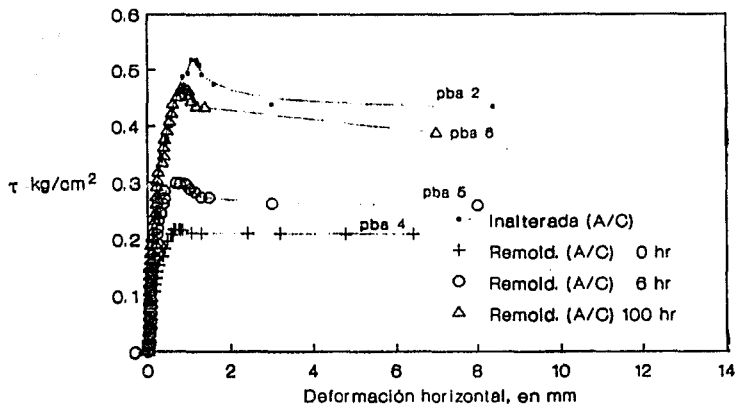


Fig 6.6 Esfuerzo cortante vs deformación horizontal (A/C)

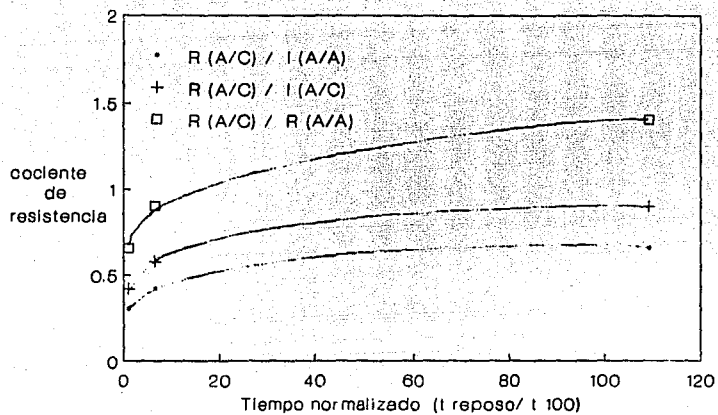


Fig 6.7 Cociente de resistencias vs tiempo de reposo

7. ENSAYES DE LABORATORIO EN EL APARATO DE CORTE DIRECTO, MUESTRAS INALTERADAS EN PRUEBAS DE INTERFACE CON CONCRETO TRATADO CON DIVERSOS RECUBRIMIENTOS.

La fricción negativa afecta muchas de las cimentaciones de la ciudad de México, incluyendo las resueltas a base de pilotes de punta y las cimentaciones compensadas de tipo cajón. El fenómeno consiste en que el material arcilloso que rodea a la cimentación se cuelga prácticamente de la misma y produce una sobrecarga cuyo valor máximo es equivalente al peso del material circundante a dicha estructura. Esta sobrecarga producirá esfuerzos adicionales en el terreno de apoyo bajo la punta de los pilotes, redistribución de esfuerzos dentro de la masa de suelo, asentamientos diferenciales en la estructura y en el peor de los casos la falla o colapso por capacidad de carga del terreno de cimentación o incluso la falla por capacidad estructural de los pilotes.

Para estudiar en qué medida se podría reducir el efecto de la fricción ó adherencia en la interface arcilla/concreto, se realizaron cinco series de ensayos cuyo objetivo fue evaluar la efectividad de algunos recubrimientos de polietileno colocados sobre las pastillas de concreto empleando tres diferentes presiones verticales (σ_z de 0.5, 1.0 y 1.5 kg/cm²).

Cada serie de estos ensayos estuvo integrada por tres pruebas realizadas con los esfuerzos normales antes indicados. La primera se llevó a cabo en arcilla inalterada sola (ensaye A/A); la segunda, tercera y cuarta series fueron pruebas de interface (A/C) con diversos recubrimientos en el concreto. La última serie fue de concreto con concreto (C/C) para evaluar la fricción de este material.

7.1 METODO DE PRUEBA

Las muestras de arcilla inalterada utilizadas en la ejecución de las pruebas se tomaron de dos tubos Shelby de 10 cm de diámetro, procedentes del sitio Reforma No. 273 en la zona de lago de la ciudad de México; sus propiedades índice se presentan en la tabla 7.1 .

Los materiales resultaron ser arcillas-limosas CH-MH de color café verdoso y alta compresibilidad, cuyos límites los ubican muy próximos a la línea "A" en la carta de plasticidad. Cabe hacer notar que las muestras presentaron algunas fisuras naturales rellenas con material limoso y la muestra de 15.60 a 15.80 m de profundidad contenía una veta de arena fina en su parte inferior.

En la muestra de 15.20 a 15.40 m, el contenido de agua presentó variación dentro de la misma, con valores máximos y mínimos de 322 y 256% respectivamente; el mayor contenido en la parte central y el menor en los extremos.

Labrado y montaje de los especímenes. Las muestras de arcilla inalterada se labraron en forma de pastillas circulares con dimensiones promedio de 71 mm para el diámetro y espesores de 26 y 14 mm para las pruebas de arcilla sola, serie 1 (A/A) y de interface (A/C) respectivamente

Una vez labradas las muestras se pesan, miden y se obtienen los valores iniciales de grado de saturación (G_w), relación de vacíos (e) y peso volumétrico (γ_m). En la tabla 7.2 se presentan los datos para cada muestra.

Para llevar a cabo las pruebas de interface se fabricaron pastillas de concreto de 71 mm de diámetro y espesor de 12.25 mm; las características de estas pastillas fueron las siguientes:

. Seis pastillas de concreto limpio para la serie 2 (A/C) y la 5 (C/C).

. Tres pastillas con recubrimiento en una cara (la que estaría en contacto con el suelo), a base de un plástico polietileno negro de 0.25 milímetros de espesor, adherido al concreto por medio de una aplicación de impermeabilizante Fester. Estas pastillas se usaron en la serie 3 (A/C) 1p.

. Tres pastillas con el mismo recubrimiento que las anteriores inmediatas, más otro plástico polietileno blanco de 0.05 mm de espesor adherido al polietileno negro mediante una capa delgada de grasa antifriccionante y anticorrosiva (Roshfrans). Estas pastillas se usaron para la serie 4 (A/C) 2p. En todos los casos las pastillas de concreto se saturaron un tiempo mínimo de 24 hr antes de usarlas.

Consolidación. Como se mencionó en el capítulo 3, con este equipo no se pudo aplicar presión confinante, todas las muestras se consolidaron con esfuerzo vertical únicamente; las paredes interiores de los anillos permiten confinar perfectamente a la muestra de suelo durante esta etapa.

La aplicación del esfuerzo vertical (σ_z) para consolidar los especímenes de suelo, se realizó permitiendo la salida de agua hacia la bureta y con carga controlada a razón de 0.1 kg/6 seg (1 kg/min). Las presiones verticales de consolidación fueron de 0.5, 1.0 y 1.5 kg/cm², para cada una de las 3 pruebas que integran las 5 series de ensayos. Con este equipo, debido a que no se utiliza membrana, el agua también puede salir lateralmente durante la consolidación.

Las curvas de consolidación para las series 1 a 4 se presentan en las figuras 7.1 a 7.4. En estas se aprecia que el tiempo para alcanzar el 100% de consolidación primaria resultó aproximadamente de 20 min para todas las pruebas consolidadas a un esfuerzo vertical de 0.5 kg/cm² de 40 min para un esfuerzo vertical de 1.0 kg/cm² y de 65 min para 1.5 kg/cm².

Aplicación de esfuerzo cortante. El esfuerzo cortante se aplicó una vez que los especímenes se consolidaron al 100% bajo carga vertical y sin permitir el drenaje de la muestra, con lo cual todas las pruebas fueron de tipo consolidado-no drenado (CU). Este esfuerzo se aplicó con carga monótonica creciente a razón de 0.5 kg/30 seg.

7.2 RESULTADOS DE LABORATORIO

En la tabla 7.2 se presenta un resumen de los resultados obtenidos en estas series de ensayos.

Curvas esfuerzo cortante vs deformación horizontal. Del procesamiento de los registros electrónicos (fuerza-deformación), se determinaron las curvas esfuerzo cortante (τ) contra deformación horizontal (δ_x), presentadas en las figuras 7.5 a 7.9 y correspondientes a las series 1 a 5 respectivamente.

El esfuerzo cortante se calculó dividiendo la fuerza horizontal registrada entre el área corregida del espécimen, determinada esta última como se indicó en el inciso 5.2 .

Curvas esfuerzo cortante máximo vs presión vertical. Los valores del esfuerzo cortante máximo obtenido de las curvas esfuerzo-deformación, se graficaron contra los correspondientes valores de la presión vertical aplicada. En la figura 7.10 se presentan las envolventes de dichos valores para cada una de las 5 series de ensayos.

Curvas coeficiente de adherencia α vs presión vertical. El coeficiente de adherencia α se obtuvo de dividir el esfuerzo cortante máximo obtenido en las pruebas de interface arcilla/concreto (series 2, 3 y 4 A/C), entre la resistencia al corte de la arcilla inalterada (serie 1 A/A). En la tabla 7.2 se indican estos coeficientes y en la figura 7.11 se presenta la envolvente de los valores respectivos.

Curvas coeficiente de adherencia α vs esfuerzo cortante inalterado. En la figura 7.12 se presentan las envolventes del coeficiente de adherencia α en función del esfuerzo cortante inalterado, para cada una de las pruebas de interface (A/C).

7.3 INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS DE LABORATORIO

De las curvas esfuerzo cortante contra deformación horizontal presentadas en las figuras 7.5 a 7.9 se puede apreciar lo siguiente

. El valor del esfuerzo cortante máximo alcanzado en todas las pruebas, dependió como era de esperarse, de la magnitud del esfuerzo normal aplicado; a mayor valor en uno corresponde también un valor mayor en otro y viceversa.

. Para la serie 1 presentada en la figura 7.5 (ensayos en arcilla inalterada sola A/A) las curvas presentan una forma elastoplástica, con un comportamiento sensiblemente lineal hasta valores aproximados del 59 % del esfuerzo máximo alcanzado y correspondientes a una deformación horizontal del orden de 0.5 mm.

. Las curvas en los ensayos de interface de las series 2, 3 y 4 (figuras 7.6, 7.7 y 7.8), presentan en general una resistencia pico y una residual, con los valores mínimos de esfuerzo cortante obtenidos en la serie 4 y correspondientes a las pastillas de concreto recubiertas con dos plásticos. Estos últimos esfuerzos fueron en promedio 84% menores que los respectivos determinados en la serie 2, sin ningún recubrimiento en el concreto; para las pastillas de concreto con recubrimiento de un plástico, los valores resultaron apenas del 18% inferior.

Con relación a las líneas envolventes promedio que unen a los esfuerzos cortantes máximos, obtenidos para la tres presiones verticales aplicadas se obtuvieron las pendientes presentadas en la figura 7.10 y cuyos valores son los siguientes:

SERIE	PRUEBA	PENDIENTE DE LA ENVOLVENTE (ϕ)
1	A/A	11.00°
2	A/C	25.50°
3	A/C 1p	21.00°
4	A/C 2p	3.60°
5	C/C	36.90°

Como ya se había mencionado anteriormente, el coeficiente de adherencia α obtenido en las pruebas de interface y presentado en las figuras 7.11 y 7.12, arroja los valores mínimos para las pruebas en concreto con dos capas de plástico.

Finalmente, se puede concluir que para reducir al máximo la adherencia entre arcilla y concreto, se recomienda colocar 2 plásticos entre estos materiales con una capa de grasa intermedia a través de la cual pueda verificarse el deslizamiento. Uno de los plásticos deberá quedar unido firmemente al concreto, por ejemplo con impermeabilizante Fester, y el otro podría ser de tipo rígido anclado al concreto por medio de pernos ó sujetadores del mismo material plástico, los cuales se degollarán cuando el esfuerzo de adherencia rebasará cierto valor. Para este caso el coeficiente de adherencia es prácticamente independiente de la presión confinante.

TABLEAS. Capítulo 7

Tabla 7.1 Propiedades índice de la arcilla inalterada utilizada en aparato de corte directo , pruebas de interface con concreto con diversos recubrimientos

SERIE No.	SITIO	PROFUNDIDAD EN (m)	W i (%)	LL (%)	LP (%)	IP	S _s	SUCS
1 A/A	Reforma No. 273	15.20 a 15.40						
2 A/C		15.20 a 15.40	281	178	55	123	2.30	CH_MH
3 A/C 1p		15.20 a 15.40						
4 A/C 2p		15.60 a 15.80	252	190	62	128	2.20	CH-MH
5 C/C		-----						

W i = Contenido de
agua inicial
promedio

L L = Límite líquido
L P = Límite plástico
I P = Índice plástico

S_s = Densidad de sólidos
S U C S = Sistema unificado de
clasificación de suelos

Tabla 7.2 Resumen de resultados de laboratorio en el aparato de aparato de corte directo, pruebas de interface con concreto con diversos recubrimientos.

SERIE No.	PRUEBA No.	W _i (%)	G w _i (%)	e _i	γ _m (t/m ³)	∇ _v (kg/cm ²)	τ máx (kg/cm ²)	Coefficiente de adherencia (α)
1 A/A	1	264	100	6.0	1.19	0.50	0.75	-
	2	256	100	5.9	1.19	1.00	0.89	-
	3	271	100	6.2	1.20	1.50	0.95	-
2 A/C	1	300	100	6.9	1.18	0.50	0.41	0.54
	2	294	100	6.7	1.18	1.00	0.69	0.77
	3	290	100	6.7	1.19	1.50	0.88	0.93
3 A/C 1p	1	322	100	7.4	1.15	0.50	0.33	0.43
	2	274	100	6.3	1.18	1.00	0.59	0.66
	3	261	99	6.1	1.17	1.50	0.71	0.75
4 A/C 2p	1	289	100	6.3	1.19	0.50	0.09	0.12
	2	221	100	4.9	1.21	1.00	0.11	0.12
	3	249	98	5.5	1.18	1.50	0.15	0.16
5 C/C	1	-	-	-	-	0.50	0.50	-
	2	-	-	-	-	1.00	0.88	-
	3	-	-	-	-	1.50	1.25	-

A/A = arcilla inalterada sola

W_i = Contenido de agua

∇_v = Esfuerzo vertical

A/C = arcilla concreto

G w_i = Grado de saturación

τ máx. = Esfuerzo cortante máximo

A/C 1p = arcilla concreto 1 plástico

e_i = Relación de vacios

α = coeficiente de adherencia

A/C 2p = arcilla concreto 2 plásticos

γ_m = peso volumétrico

C/C = concreto concreto

FIGURAS. Capítulo 7

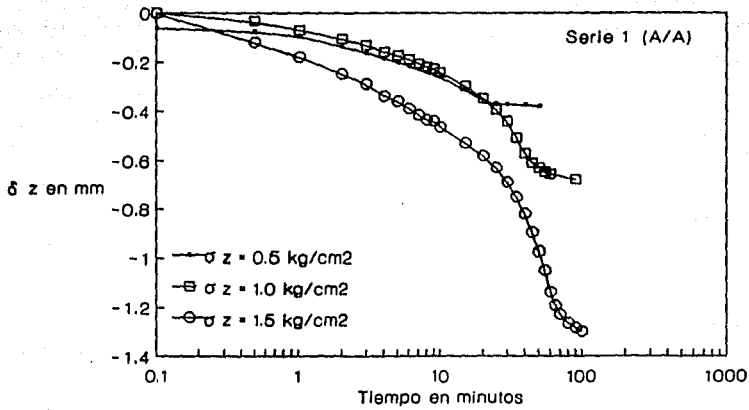


Fig 7.1 Curvas de consolidación, Arcilla/Arcilla

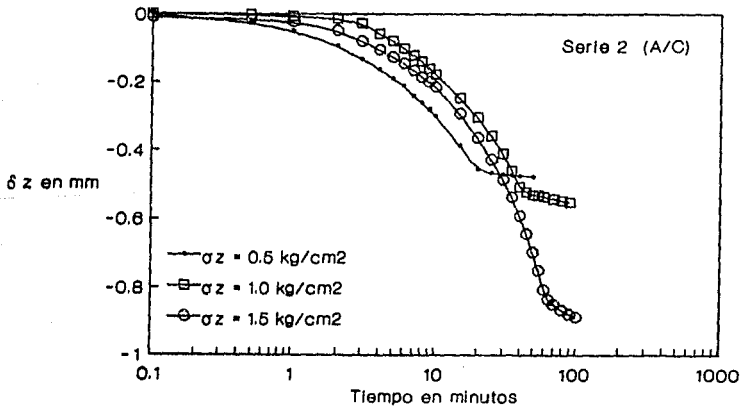


Fig 7.2 Curvas de consolidación, Arcilla/Concreto

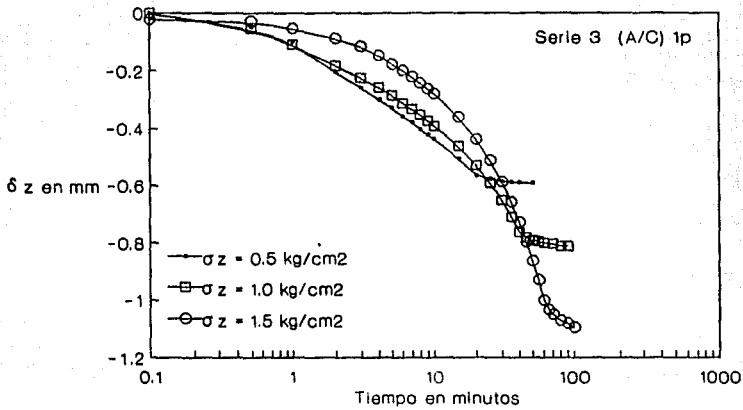


Fig 7.3 Curvas de consolidación, Arcilla/Concreto 1 plástico

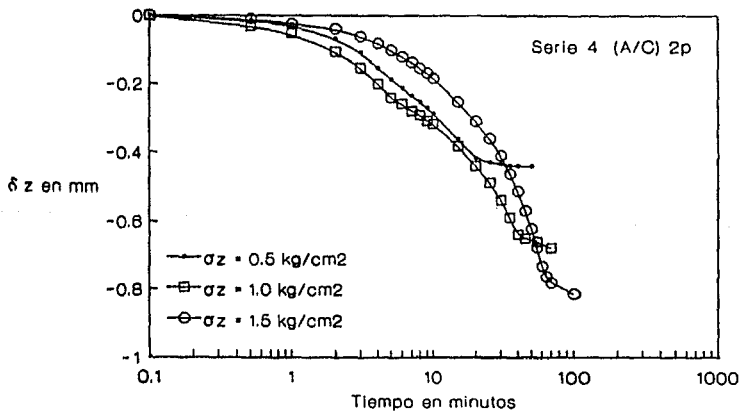


Fig 7.4 Curvas de consolidación, Arcilla/Concreto 2 plásticos

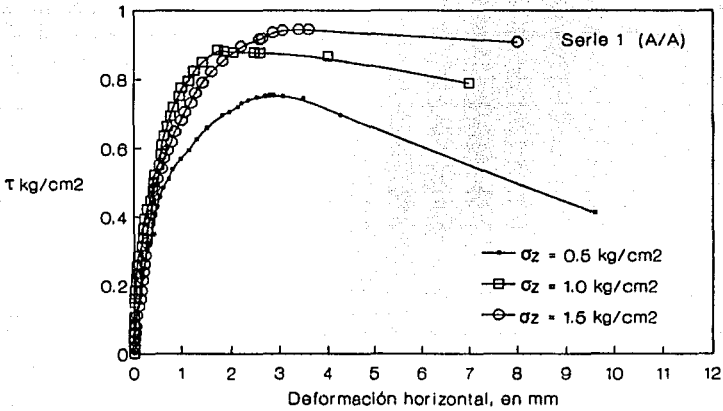


Fig 7.5 Esfuerzo cortante vs deformación horizontal, serie 1

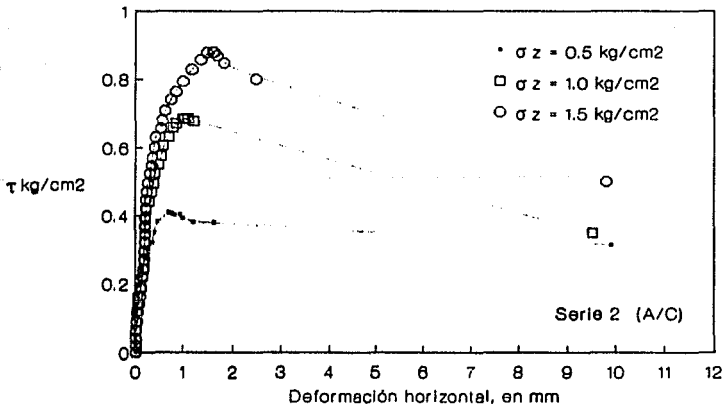


Fig 7.6 Esfuerzo cortante vs deformación horizontal, serie 2

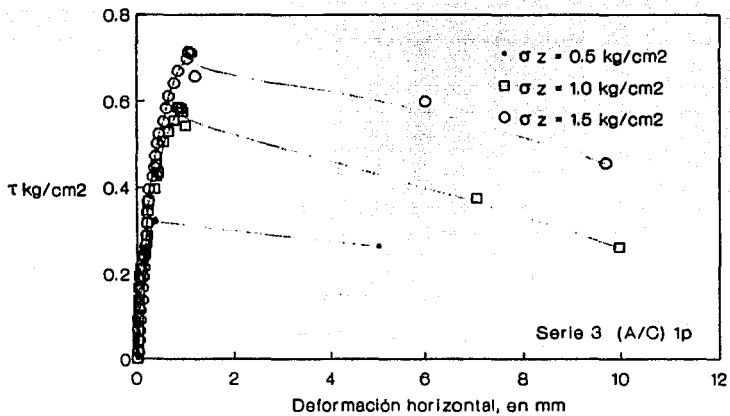


Fig 7.7 Esfuerzo cortante vs deformación horizontal, serie 3

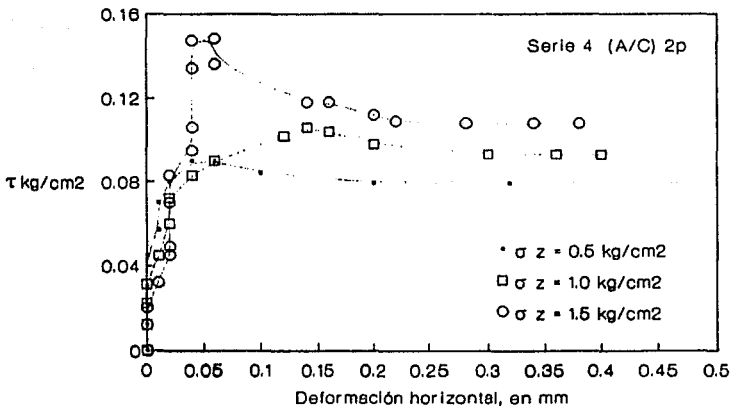


Fig 7.8 Esfuerzo cortante vs deformación horizontal, serie 4

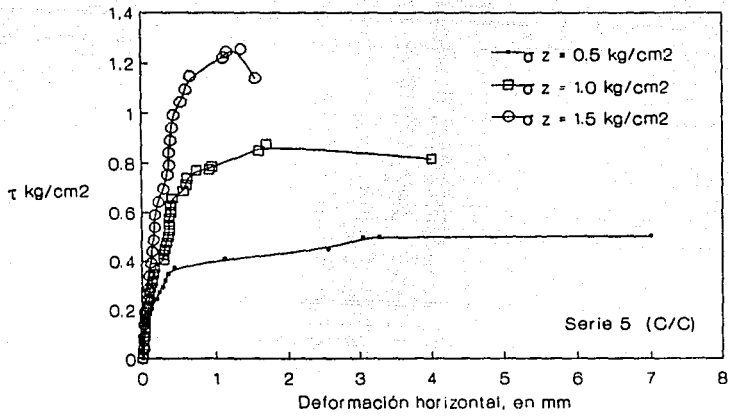


Fig 7.9 Esfuerzo cortante vs deformación horizontal, serie 5

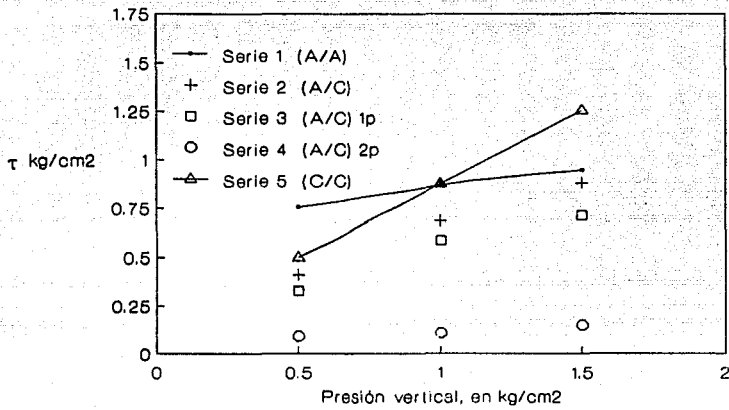


Fig 7.10 Envolventes de esfuerzo cortante máx. vs presión vertical

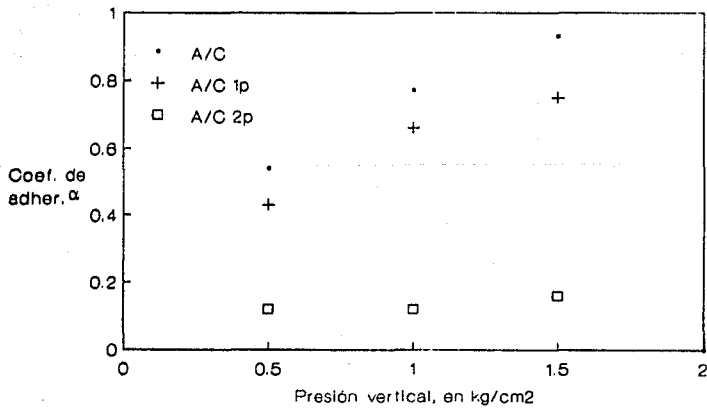


Fig 7.11 Envolventes del coeficiente α vs presión vertical

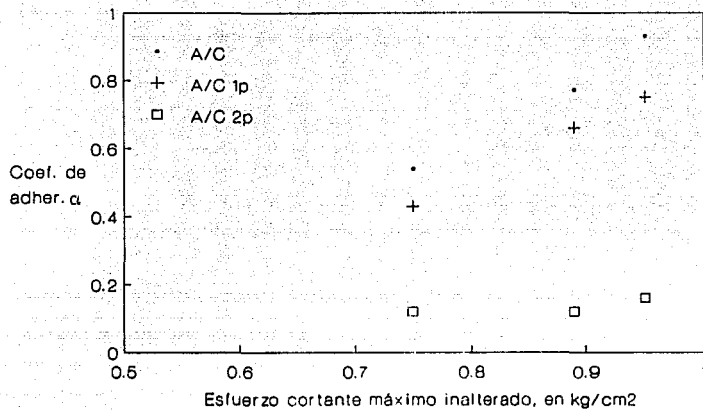


Fig 7.12 Envolventes del coeficiente α vs esfuerzo cortante inalterado

CAPÍTULO 8

8. CONCLUSIONES

En este capítulo se expondrán las principales conclusiones y observaciones que se obtuvieron en la realización de estos ensayos de laboratorio, recordando que los objetivos principales de este trabajo fueron dos:

- a. Estudiar el comportamiento dinámico de la arcilla del valle de México en el aparato de corte simple cíclico, bajo la aplicación de diferentes niveles de esfuerzo cortante y llevando las muestras a la falla; es decir, aplicando esfuerzos cortantes y deformaciones angulares grandes a los especímenes de suelo (capítulo 4).
- b. Analizar el comportamiento en la interface arcilla-concreto en el aparato de corte directo, utilizando muestras de arcilla inalterada y remoldeada, y concretos tratados con diversos recubrimientos (capítulos 5, 6 y 7, respectivamente).

8.1 EQUIPO DE CORTE SIMPLE CICLICO. Con este equipo se efectuaron tres series de ensayos, dos en arcilla y una en limo, integradas por cuatro pruebas cada una. En la primera prueba de cada serie se determinó la resistencia estática de la arcilla inalterada (τ_{est}) y en las tres pruebas restantes se aplicaron cargas cíclicas horizontales cuya magnitud fue un porcentaje de la resistencia estática obtenida inicialmente; los valores estuvieron comprendidos entre el 65 y 120 %.

Todas las pruebas de estas series fueron de tipo consolidado no drenado (CU); el esfuerzo de confinamiento se aplicó en incrementos de 0.06 kg/cm cada minuto y su valor se determinó como el producto del coeficiente $K_0 = 0.55$ por la presión vertical efectiva que teóricamente tenía la muestra en el sitio; es decir, $\sigma_c = K_0 \sigma'_v$.

En estas pruebas se aplicó una contrapresión de 3 kg/cm² en incrementos de 0.25 kg/cm² cada minuto, para asegurar que las muestras tuvieran un grado de saturación del 100 %.

Todas las pruebas se consolidaron con un esfuerzo vertical aproximadamente igual al esfuerzo efectivo que tenía el suelo en el campo, aplicado en incrementos de 0.1 kg cada 12 seg (0.5 kg/min).

Las pruebas estáticas se realizaron aplicando carga monótonica creciente en incrementos de 0.5 kg/min y en las pruebas dinámicas la frecuencia de oscilación fue de 0.5 hz (1 ciclo cada 2 seg).

De la prueba estática realizada en la serie 1 (fig 4.4) se observa que a medida que el esfuerzo cortante crece a partir de cero, la presión de poro también aumenta hasta cierto valor a partir del cual disminuye; este comportamiento de Δu es inusual. Por lo que respecta a las pruebas estáticas de las series 2 y 3 (figuras 4.5 y 4.6), la presión de poro registrada siempre fue creciente.

En las pruebas dinámicas (fig 4.7 a 4.24) se observó lo siguiente:

. Degradación de la rigidez del material con el número de ciclos de carga, siendo el número de ciclos a la falla menor a mayor nivel de esfuerzo cortante aplicado.

. Se encontró un límite superior para el esfuerzo cortante dinámico del orden del 120 % en relación a la resistencia estática, valores mayores de esfuerzo originan que la muestra falle inmediatamente. También se notó que con un nivel de esfuerzo cortante abajo del 70 % aproximadamente, el número de ciclos a la falla tiende a incrementarse considerablemente (fig 4.25 a 4.27).

. En todas las pruebas dinámicas la presión de poro se incrementa con el número de ciclos y también depende de la deformación angular impuesta al espécimen durante el corte. En los materiales arcillosos presenta una disminución a medida que la muestra se desplaza angularmente hacia uno y otro lado de su posición central, incrementándose nuevamente al regresar a su posición original; este incremento aumenta con el número de ciclos. En el material limoso la presión de poro no presenta mucha variación y permanece sensiblemente constante con el desplazamiento angular de la muestra. Se concluye que la presión de poro dinámica depende también de dos parámetros: el nivel de esfuerzo cortante y el número de ciclos (fig 4.41 a 4.43).

. El módulo de rigidez G es función del nivel de esfuerzo cortante cíclico aplicado a la muestra; a menor nivel de esfuerzo corresponde un mayor módulo cortante y viceversa; en general dicho módulo decrece con el número de ciclos y por consiguiente con la deformación angular (fig 4.28 a 4.33).

. El amortiguamiento en general mostró una tendencia a crecer con el número de ciclos y con la deformación angular (fig 4.34 a 4.39), haciendo notar que esta propiedad presentó una fuerte dispersión de resultados, debido probablemente a que los valores fueron determinados por interpretación visual de los registros electrónicos.

. De las gráficas en las cuales se involucra al número de ciclos con los diferentes factores que definen el comportamiento dinámico de las arcillas, se determinó el número de ciclos crítico, cuyo valor define una frontera a partir de la cual el módulo de rigidez decrece considerablemente y que corresponde a un crecimiento acelerado del amortiguamiento, la presión de poro y la deformación angular (fig 4.40)

. Se pudieron elaborar gráficas tridimensionales para relacionar algunos de los parámetros más importantes en el comportamiento dinámico de los especímenes ensayados, incluyendo las siguientes:

a) G vs $\tau_{c/c}/\tau_{test}$ vs log número de ciclos (fig 4.50 a 4.52). Se observa que las curvas definen sensiblemente una superficie que se asemeja a la porción de un hiperboloide, con una frontera cerrada que corresponde aproximadamente a un nivel de esfuerzo cortante del 120 % y una frontera abierta creciente a medida que el nivel de esfuerzo cortante tiende a cero. Con relación a la magnitud del módulo G , en las gráficas anteriores se observa que: los valores mayores correspondieron al material limoso de la serie 3, siguiendo los de la arcilla de la serie 2 y finalmente la serie 1. Lo anterior puede deberse a la diferencia de los materiales y a su resistencia inalterada, las resistencias fueron de 0.335, 0.390 y 0.420 kg/cm² para las series 1, 2 y 3, respectivamente.

b) $\Delta u/\sigma'_{oct}$ vs $\tau_{c/c}/\tau_{test}$ vs log número de ciclos (fig 4.53 a 4.55). Se aprecia que las curvas definen una superficie opuesta o complementaria a las obtenidas por el módulo G ; también se observa una notable diferencia entre las curvas de los materiales arcillosos (series 1 y 2) con respecto a la del limo (serie 3). Para las primeras el incremento de presión de poro tiende a valores máximos cuando el número de ciclos crece, correspondiendo necesariamente con niveles de esfuerzo cortante bajos; mientras que para el limo, el incremento de la presión de poro máximo se obtuvo a un nivel de esfuerzo cortante más alto correspondiente con un menor número de ciclos.

c) G vs $\tau_{c/c}/\tau_{test}$ vs $\Delta u/\sigma'_{oct}$ (fig 4.56 a 4.58). En estas figuras los puntos definen también curvas como en las figuras tridimensionales antes descritas.

Finalmente se puede comentar que aunque se realizaron tres diferentes series de ensayos, no se pudieron hacer conclusiones en relación a diferentes niveles de esfuerzo de confinamiento, ya que cada serie se realizó con un solo nivel. Se considera conveniente realizar pruebas adicionales con diferentes niveles de esfuerzo de confinamiento para lo cual se requiere contar con suficientes muestras de características comparables.

La modelación y discusión del comportamiento dinámico observado en estos ensayos se resume a continuación:

Degradación del módulo de rigidez con el número de ciclos. La relación entre estos dos parámetros se pudo modelar aproximadamente aplicando la siguiente ecuación empírica propuesta por Idriss et al (1978):

$$G_n / G_1 = N^{-t} \dots\dots\dots 4.1)$$

El parámetro de degradación t se obtuvo en función del nivel de esfuerzo cortante cíclico, mediante una ecuación de tipo parabólico de la forma:

$$t = A (\tau_{cic}/\tau_{est})^2 - B (\tau_{cic}/\tau_{est}) + C \dots 4.2)$$

En el capítulo 4 se dieron los valores de estas constantes.

Los valores del módulo de rigidez G obtenidos experimentalmente y los calculados aplicando la ecuación 4.1, con el parámetro de degradación t valuado con las ecuaciones 4.2, se comparan en la tabla 4.4 y a la vez en las figuras 4.81 a 4.83. En estas se aprecia que la ecuación 4.1 reproduce razonablemente los resultados experimentales.

Número de ciclos crítico. Como se definió en el inciso 4.4, el número de ciclos crítico define una frontera a partir de la cual el módulo de rigidez al corte decrece aceleradamente. Este ciclo crítico se pudo obtener teóricamente en función del nivel de esfuerzo cortante cíclico, mediante una ecuación de la forma $y = b + mx$, donde b es la ordenada al origen y m la pendiente.

Para estas series de ensayos se obtuvo la siguiente ecuación:

$$N_{crit} = e^{12.936 (1.266 - \tau_{cic}/\tau_{est})} \dots 4.3)$$

En la figura 4.85 se graficaron los valores del número de ciclos crítico, experimentales y analíticos, estos últimos calculados mediante la ecuación 4.3.

Numero de ciclos a la falla (Nf). Las curvas de nivel de esfuerzo cortante cíclico (τ_{cic}/τ_{est}) contra número de ciclos a la falla (Nf) de estas tres series de ensayos (figuras 4.25 a 4.27), se pudieron representar aproximadamente por medio de una ecuación de tipo parabólico, de la siguiente forma:

$$\text{Serie 1 } N_f = 6048.1 (\tau_{cic}/\tau_{est})^2 - 13273.5 (\tau_{cic}/\tau_{est}) + 7229.4 \quad 4.4)$$

$$\text{Serie 2 } N_f = 8011.8 (\tau_{cic}/\tau_{est})^2 - 17772.8 (\tau_{cic}/\tau_{est}) + 9800.4$$

$$\text{Serie 3 } N_f = 32271.6 (\tau_{cic}/\tau_{est})^2 - 67053.8 (\tau_{cic}/\tau_{est}) + 34606.2$$

En las figuras 4.86 a 4.88 se presenta la comparación de los valores experimentales del número de ciclos a la falla, con los teóricos calculados con las ecuaciones anteriores.

Degradación del módulo de rigidez G con la deformación angular. La relación entre estos dos parámetros se pudo modelar aproximadamente empleando una ecuación de tipo hiperbólico de la siguiente forma:

$$G / G_1 = \frac{1}{1 - (\tau_{cic}/\tau_{est})^{1.2} + (\gamma_{pp}/2\gamma_r)^{1.2}} \quad \dots 4.5)$$

La comparación de los valores del módulo de rigidez G, experimentales y teóricos, se presentan en las tablas 4.7 A y B y su representación gráfica en las figuras 4.89 a 4.91.

Las expresiones anteriores sólo son tentativas, dadas las limitaciones del programa experimental y deberán corroborarse o modificarse en estudios posteriores.

8.2 EQUIPO DE CORTE DIRECTO, MUESTRAS INALTERADAS. Con este equipo se realizaron cuatro series de ensayos divididas en dos pares e integradas por cuatro pruebas cada una; en la primera prueba de cada serie se determinó la resistencia estática y en las tres pruebas restantes se aplicó carga cíclica horizontal cuya magnitud fue un porcentaje de la resistencia estática obtenida inicialmente.

En una serie de cada par se hicieron ensayos convencionales de corte directo en arcilla inalterada (A/A) y en la otra serie pruebas de interface arcilla-concreto (A/C); en ambos casos se llevaron a cabo los ensayos estáticos y dinámicos indicados con anterioridad.

Las pruebas de estas series fueron de tipo consolidado-no drenado (CU), en las cuales el esfuerzo vertical de consolidación (σ_v) teóricamente fue igual al esfuerzo efectivo que tenía el suelo en el campo; este esfuerzo se aplicó en incrementos de 0.1 kg/12 seg (0.5 kg/min).

En los ensayos de consolidación de estas cuatro series de ensayos (fig 5.1 a 5.4) se observó que el tiempo para alcanzar el 100 % de consolidación primaria es aproximadamente el mismo para los ensayos de arcilla inalterada (A/A) y de interface (A/C), aunque la relación de espesor de los especímenes es del orden de 2 a 1 para uno y otro tipo de ensayo. La explicación de lo anterior es que en ambos casos la trayectoria de consolidación es aproximadamente de la misma longitud puesto que en los ensayos A/C, el concreto ya saturado actúa como frontera impermeable.

La pendiente de las curvas en el tramo de consolidación secundaria muestra una diferencia significativa para las pruebas en material arcilloso (series 4 y 5), con respecto al limo (series 6 y 7). En este último el tramo es casi horizontal, indicando esto que dicho material presentaba una estructura inicial más cerrada ya que proviene de un estrato más profundo y por consiguiente sujeto a mayor presión.

Las pruebas estáticas se realizaron aplicando carga monotónica creciente en incrementos de 0.5 kg/min y en las pruebas dinámicas la frecuencia de oscilación fue de 0.5 hz.

Del análisis de las curvas esfuerzo-deformación de las pruebas estáticas (fig 5.5 y 5.6) se aprecia que en el material arcilloso (series 4 y 5) la resistencia en la interface (A/C) fue mayor que en la arcilla sola inalterada (A/A) en 1.08 veces; mientras que en el material limoso (series 6 y 7), fue al contrario, siendo la resistencia de interface 0.87 de la inalterada. En las pruebas de interface se obtuvo una pérdida de resistencia determinada como el cociente entre el esfuerzo último o residual y el esfuerzo máximo, cuyos valores fueron de 0.95 y 0.96 para el material arcilloso y limoso, respectivamente.

De las pruebas dinámicas (fig 5.7 a 5.18) se observó una degradación de la rigidez del material con el número de ciclos; además, a mayor nivel de esfuerzo cortante se obtiene un menor número de ciclos a la falla. También se detectó un número de ciclos crítico a partir del cual las deformaciones cíclicas y permanentes comienzan a ser significativas.

De las gráficas en las cuales se relaciona el nivel de esfuerzo cortante cíclico y el número de ciclos a la falla (fig 5.19 a 5.22), se observa que las curvas se asemejan a las obtenidas con el equipo de corte simple; es decir, presentan una frontera superior cerrada que en este caso es para un nivel de esfuerzo cortante menor del 100 % y una frontera inferior abierta para niveles de esfuerzo abajo del 60 % aproximadamente.

Se observa que el comportamiento general de la arcilla se asemeja al obtenido en el equipo de corte simple. Sin embargo, la resistencia dinámica de los suelos ensayados en el aparato de corte directo no resultó mayor que la estática; también se encontró que la degradación de la rigidez de los materiales ensayados sólo se manifiesta cuando la amplitud del esfuerzo cortante cíclico excede el 60% de la resistencia estática, para el número de ciclos reportados en estas pruebas.

Respecto al comportamiento dinámico de interface entre arcilla y concreto utilizando el aparato de corte directo (tabla 5.2), se hacen los siguientes comentarios:

Se considera que estos ensayos pudieran reflejar el comportamiento suelo-estructura para cimentaciones de tipo superficial tales como zapatas, losas y probablemente cajones, en los cuales si se cumpla la hipótesis de que la estructura no puede penetrar en el suelo y por consiguiente la rigidez normal C_n alcanza un valor muy alto; además, la rigidez por cortante C_s es la correspondiente a la dirección horizontal.

En los resultados obtenidos en este trabajo (series 5 y 7) se aprecia que hay una pérdida de adherencia en la interface bajo cargas cíclicas. En la serie 5 la adherencia estática (rest) fue de 0.379 kg/cm² y a un nivel de esfuerzo cortante cíclico similar, la muestra no resistió ni un ciclo de carga; para la serie 7 hubo una pérdida mucho mayor ya que incluso el esfuerzo cíclico no llegó a un valor cercano al correspondiente a la resistencia estática.

En las pruebas estáticas de interface (fig 5.51) se obtuvieron rigideces cortantes horizontales C_s de 6.06 y 6.78 kg/cm para las series 5 y 7, respectivamente. Estas rigideces se obtuvieron de dividir el 60% del esfuerzo cortante máximo (rango en el que se comporta aproximadamente lineal) entre la deformación respectiva.

Con relación a la rigidez cortante obtenida en las pruebas dinámicas de estos ensayos (tabla 5.3 y fig 5.54 y 5.55), se aprecia que sufre una degradación con el número de ciclos y que a mayor nivel de esfuerzo cortante corresponde una menor rigidez y viceversa. Las rigideces dinámicas estuvieron comprendidas entre 0.669 y 19.461 Kg/cm² para la serie 5 y, 1.95 y 9.48 kg/cm² para la serie 7.

Se espera que estas rigideces estén afectadas por otros factores como: contenido de agua, relación de vacíos, plasticidad y por las propiedades físicas de los materiales de interface.

8.3 EQUIPO DE CORTE DIRECTO. MUESTRAS REMOLDEADAS. Con este equipo se efectuaron en total 6 pruebas, dos en material inalterado y cuatro en remoldeado, todas de tipo CU. En las pruebas inalteradas se determinó la resistencia estática de la arcilla sola (A/A) y en interface con concreto (A/C); la primera de las pruebas remoldeadas fue de tipo A/A y las tres restantes de tipo A/C a diferentes edades.

Los materiales remoldeados resultaron ser semejantes a los inalterados, en cuanto a contenido de agua, grado de saturación y relación de vacíos; el peso volumétrico resultó ligeramente inferior al de la muestra en estado natural.

Todas las muestras se consolidaron inmediatamente después de elaboradas las pastillas, con un esfuerzo vertical que teóricamente fue igual al esfuerzo efectivo que tenía el suelo inalterado en el campo. Las muestras remoldeadas ya consolidadas, se dejaron reposar un lapso de tiempo de 0, 6 y 100 hr antes de efectuar las pruebas respectivas.

De las curvas de consolidación (fig 6.1 y 6.2), se observa que el tiempo para alcanzar el 100 % de consolidación primaria es similar para todas las pruebas, tanto inalteradas como remoldeadas; la diferencia fundamental se presentó en el tramo de consolidación secundaria, que para las muestras remoldeadas registro una pendiente significativa.

De las gráficas esfuerzo deformación obtenidas en los ensayos de interface A/C (fig 6.6, pruebas 2, 4, 5 y 6), se puede apreciar un patrón de comportamiento similar al reportado en la literatura en ensayos a escala natural efectuado con pilotes de fricción (Jaime, 1988); es decir, presentan una resistencia pico y una residual.

La pérdida de resistencia de los ensayos realizados en este trabajo (tabla 6.1) estuvo comprendida entre 0.83 y 0.96.

En el material remoldeado la resistencia crece a medida que transcurre el tiempo de reposo (fig 6.7), además es de notar que la resistencia remoldeada a 0 hr, fue del 47 y 42 % de la resistencia inalterada, para las pruebas en arcilla sola (A/A) y de interface A/C). Lo anterior significa que inmediatamente después del remoldeo, la arcilla pierde aproximadamente el 50% de su resistencia estática inicial.

8.4 EQUIPO DE CORTE DIRECTO, MUESTRAS INALTERADAS EN PRUEBAS DE INTERFACE CON CONCRETO TRATADO CON DIVERSOS RECUBRIMIENTOS.

Para estudiar la medida en la que se podría reducir el efecto de la fricción o adherencia en la interface arcilla-concreto, se realizaron 5 series de ensayos. Cada serie estuvo integrada por tres pruebas realizadas con esfuerzos verticales de 0.5, 1 y 1.5 kg/cm².

La primera serie se llevo a cabo en arcilla inalterada sola (A/A); la segunda, tercera y cuarta series fueron pruebas de interface (A/C) con diversos recubrimientos en el concreto. La última serie fue de concreto con concreto.

Para las pruebas de interface se fabricaron pastillas de concreto de las siguientes características:

. Seis pastillas de concreto limpio para la serie 2 (A/C) y la 5 (C/C).

. Tres pastillas con recubrimiento en una cara (la que estaría en contacto con el suelo), a base de un plástico polietileno negro de 0.25 mm de espesor, adherido al concreto por medio de una aplicación de impermeabilizante Fester. Estas pastillas se usaron en la serie 3 (A/C) 1p.

. Tres pastillas con el mismo recubrimiento que las anteriores, más otro plástico polietileno blanco de 0.05 mm de espesor adherido al polietileno negro mediante una capa delgada de grasa antifriccionante y anticorrosiva (Roshfrans). Estas pastillas se usaron en la serie 4 (A/C) 2p.

El esfuerzo vertical de consolidación fue de 0.5, 1.0 y 1.5 kg/cm para cada una de las tres pruebas que integran las 5 series de ensayos; este esfuerzo normal se aplicó en incrementos de 0.1 kg/ 6 seg (1 kg/min).

De los resultados de laboratorio (fig 7.5 a 7.9), se observó lo siguiente:

. Los valores de esfuerzo cortante máximo alcanzado en todas las pruebas, dependieron como era de esperarse, de la magnitud del esfuerzo normal aplicado, a mayor valor en uno corresponde también un valor mayor en otro y viceversa.

Para la serie 1 (fig 7.5 ensaye A/A), las curvas esfuerzo-deformación se asemejan a los materiales elastoplásticos con un comportamiento sensiblemente lineal hasta valores aproximados del 59% del esfuerzo máximo alcanzado y correspondientes a una deformación horizontal del orden de 0.5 mm.

Las curvas en los ensayos de interface (fig 7.6, 7.7 y 7.8; series 2, 3 y 4), presentan en general una resistencia pico y una residual, con valores mínimos de esfuerzo cortante obtenidos en los ensayos con pastillas de concreto recubiertas con dos plásticos. Estos últimos fueron en promedio 84 % menores que los respectivos sin ningún recubrimiento en el concreto; para las pastillas de concreto con recubrimiento de un plástico, los valores resultaron apenas del 18 % inferior.

Finalmente, se puede concluir que para reducir sustancialmente la adherencia entre arcilla y concreto, se recomienda colocar dos plásticos entre estos materiales con una capa de grasa intermedia a través de la cual se pueda verificar el deslizamiento. Uno de los plásticos deberá quedar unido firmemente al concreto, por ejemplo con impermeabilizante Fester como adhesivo, y el otro podría ser de tipo rígido, anclado al concreto por medio de pernos o sujetadores del mismo material plástico, los cuales se degollarían cuando el esfuerzo de adherencia rebasara cierto valor.

REFERENCIAS.

Aguilar M. y Rojas E. (1986), "Hundimiento súbito de un edificio apoyado sobre pilotes de fricción", Los sismos de 1985: casos de Mecánica de Suelos, Simposio de la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, pp 255-268.

Auvinet G. (1978), "Fricción negativa en pilotes, estado actual del conocimiento", El subsuelo y la Ingeniería de Cimentaciones en el área urbana del valle de México; Simposio Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, pp 203-227.

Auvinet G. y Mendoza M.(1986), "Comportamiento de diversos tipos de cimentación en la zona lacustre de la ciudad de México durante el sismo del 19 de septiembre de 1985", Los sismos de 1985: casos de Mecánica de Suelos, Simposio de la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, pp 227-240.

Auvinet G. (1990), "Análisis y diseño sísmico de cimentaciones en el valle de México", El subsuelo de la cuenca del valle de México y su relación con la Ingeniería de Cimentaciones a cinco años del sismo, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.

Boulon M. (1989), "Basic features of soil structure interface behavior" Computers and Geotechnics 7, pp 115-131.

Cordova G. (1986), "Comportamiento de la arcilla de la ciudad de México ante cargas cíclicas", Tesis de maestría, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM.

Cheng L. y Evett J. (1990), "Direct shear test", Soil properties, testing measurement and evaluation, Editorial Prentice Hall, New Jersey second edition, cap 21, pp 319-334.

Das B. (1983), "Earthquake and ground vibration", Fundamentals of Soil Dynamics, Editorial Elsevier, New York, pp 262-299.

Desai C. (1981), "Behavior of interfaces between structural and geologic media", International conference on recent advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics", vol 2, St. Louis, Missouri.

Dobry R. (1989), "Dynamic properties and seismic response of soft clay deposits", Proceeding of the international symposium on Geotechnical Engineering of soft soils, México.

Dyvik R., Zimmie T. y Schimelfenyg P. (1981), "Cyclic simple shear behavior of fine grained soils", International conference on recent advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, vol 2, St. Louis, Missouri.

Haldar A. (1981), "Uniform cycles in earthquakes: a statistical study", International conference on recent advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, vol 2, St Louis, Missouri.

Hardin y Drenevich (1972), "Shear modulus and damping in soils", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, No SM7, vol 98, ASCE.

Hernández V. (1992), "Presión de poro por carga dinámica en arcilla reconstituida de la ciudad de México", Tesis de maestría División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM.

Jaime A., Romo M. y Reséndiz D. (1988), "Comportamiento de pilotes de fricción en arcilla del valle de México", Series del Instituto de Ingeniería No. 515, UNAM.

Jaime A. (1988), "Geotecnia y sismicidad en el valle de México", Series del Instituto de Ingeniería No. D-29, UNAM.

Jaime A. (1990), "Comportamiento de pilotes de fricción en arcilla blanda", El subsuelo de la cuenca del valle de México y su relación con la ingeniería de cimentaciones a cinco años del sismo, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, pp 197-222.

Jaime A. (1987), "Características dinámicas de la arcilla del valle de México", tesis doctoral División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM.

Jaime A. (1977), "Aparato de corte simple cíclico bidireccional", Series del Instituto de Ingeniería No. 393, UNAM.

Jaime A., Legorreta H. y Martín G. (1987), "Aparato de corte simple cíclico", Series del Instituto de Ingeniería No. 508, UNAM.

Kobori T., Minai R. y Baba K. (1981), "Dynamical behavior of a pile under earthquake type loading", International conference on recent advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, vol 2, pp 795-800, St.Louis, Missouri.

Lambe W. (1976), "Direct shear test on cohesive soils", Soil testing for engineers, cap 14, pp 138-146, Editorial John Wiley & Sons, New York.

Marsal R. y Masari M. (1959), "El subsuelo de la ciudad de México", Contribución del Instituto de Ingeniería al Primer Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos y Cimentaciones, UNAM.

Romo M. (1990), "Comportamiento dinámico de la arcilla de la ciudad de México y su repercusión en la ingeniería de cimentaciones", El subsuelo de la cuenca del valle de México y su relación con la Ingeniería de Cimentaciones a cinco años del sismo, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, pp 83-94.

Rosenblueth E. y Ovando E. (1990), "Riesgo sísmico en el valle de México: una perspectiva Geotécnica", El subsuelo en la cuenca del valle de México y su relación con la Ingeniería de Cimentaciones a cinco años del sismo, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, pp 123-136.

Roscoe K. (1953), "An apparatus for the application of simple shear to soil samples", Proceedings of the third international conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol 1, pp 186-191, Zurich.

Saada A. y Shook L. (1981), "Behavior of clays subjected to slow cyclic loading and large strains", International conference on recent advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics", vol 1, pp 369-376, St. Louis, Missouri.

Taboada V. (1989), "Degradación de la arcilla de la ciudad de México por carga dinámica", Tesis de maestría División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM.

Woods R. (1978), "Measurement of dynamic soil properties", Proceedings, conference on Earthquake Engineering and soil dynamics, vol 2, pp 91-177, Pasadena Cal.

Wroth C. (1984), "The interpretation of in situ soil test", The Rankine lecture, Geotechnique 34, No. 4, pp 449-489.

Zeevaert L. (1972), Foundation Engineering for difficult subsoil conditions, Editorial Van Nostrand Reinhold, New York.

A N E X O S .

A N E X O A. CALIBRACION DE LOS TRANSDUCTORES

Transductor de fuerza vertical. Se calibró desmontándolo del equipo y apoyándolo en una base fija; posteriormente se colocaron sobre él una serie de pesas de magnitud conocida y se obtuvo en un registro xy la variación de la señal de salida. En la figura 2.6 a) se presenta la gráfica de calibración correspondiente.

Transductor de fuerza horizontal. Previamente a su calibración se evaluó la fuerza requerida para iniciar el movimiento del dispositivo mecánico por medio del cual se aplica el esfuerzo cíclico, resultando una fuerza promedio de 185 gr. Este transductor se calibró dejándolo en su posición fija que tendrá en la prueba cíclica; a tensión se usó una polea con portapesas colocando cargas de magnitud conocida y a compresión se utilizó un manómetro independiente del sistema y se aplicó carga con el equipo neumático de fuerza monotónica horizontal. En la figura 2.6 b) se presenta la gráfica de calibración correspondiente.

Transductor de desplazamiento. Se calibró colocándolo en posición horizontal fija sobre su soporte de prueba cíclica, posteriormente se desplazó su núcleo a varias distancias conocidas (a cada milímetro), por medio de barras pequeñas de calibración y se imprimió la señal de salida en un graficador xy. En la figura 2.6 c) se presenta la gráfica obtenida .

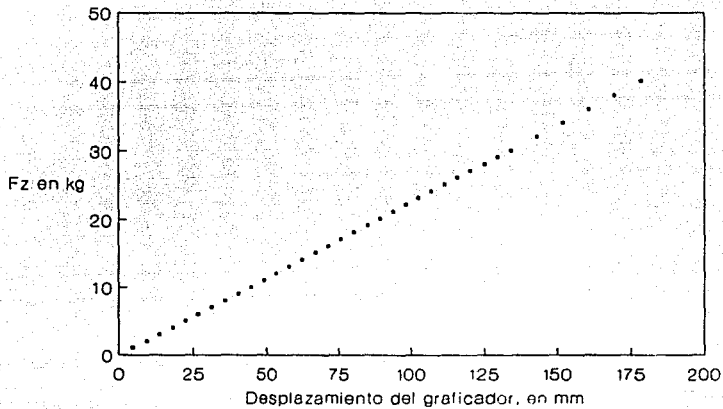


Fig 2.6 a) Calibración del transductor de fuerza vertical

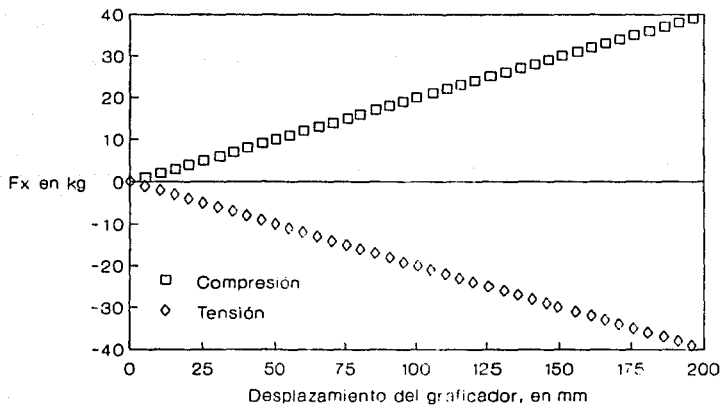


Fig 2.6 b) Calibración del transductor de fuerza horizontal

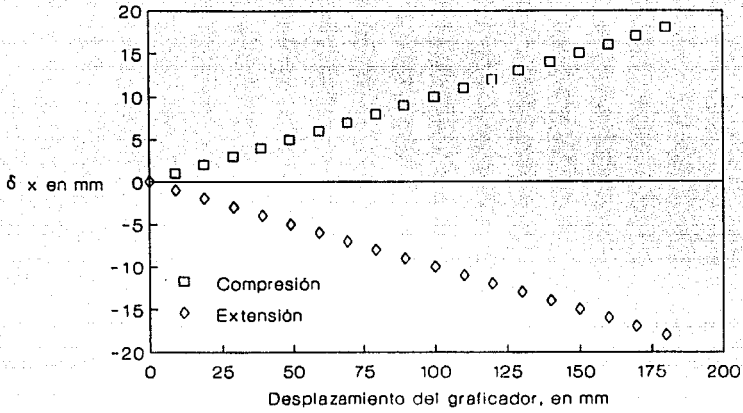
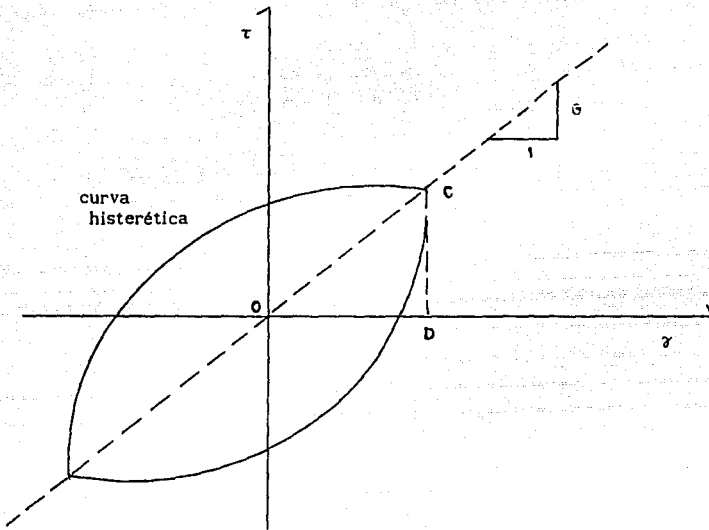


Fig 2.6 c) Calibración del transductor de desplazamiento

A N E X O B. DETERMINACION DEL MODULO DE RIGIDEZ G Y DEL AMORTIGUAMIENTO DEL MATERIAL D.



τ = esfuerzo cortante

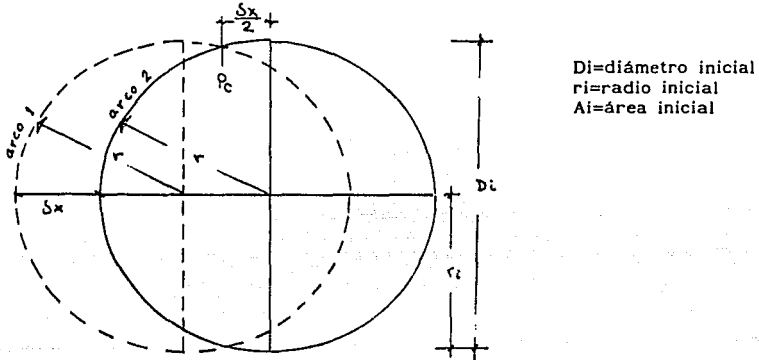
γ = deformación angular

G = pendiente de la curva histerética

D = $\frac{\text{área de la curva histerética}}{4\pi}$ (área del triángulo OCD)

A N E X O C. DEDUCCION DE LA FORMULA PARA CORREGIR EL AREA DE LA MUESTRA, EN PRUEBAS DE CORTE DIRECTO.

Sea la muestra de suelo en la cual el anillo superior del equipo de corte directo, se ha desplazado horizontalmente una distancia δx , cortando transversalmente el área inicial a uno y otro lado del anillo.



La longitud de los arcos con relación a su punto de cruce P_c es:

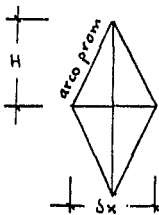
$$\text{arco 1} = \pi r / 2 + \delta x / 2$$

$$\text{arco 2} = \pi r / 2 - \delta x / 2$$

El arco promedio será: $\text{arco prom.} = \pi r / 2$

El área aproximada de la media luna será: $\text{Area } 1/2 \text{ luna} = 2\delta x H / 2 = \delta x H$

La altura H se obtendrá mediante la trigonometría.



$$H = [\text{arco prom}^2 - (\delta x / 2)^2]^{1/2}$$

$$H = [(\pi r / 2)^2 - (\delta x / 2)^2]^{1/2}$$

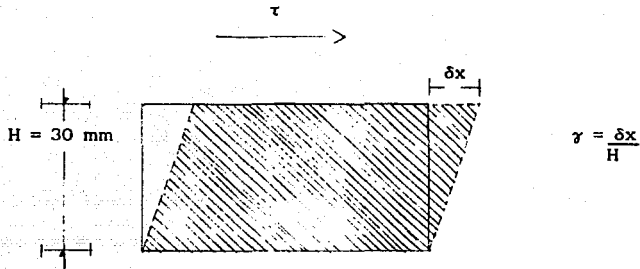
$$H = 1/2 (\pi^2 r^2 - \delta x^2)^{1/2}$$

$$\text{Area } 1/2 \text{ luna} = \delta x H = \delta x / 2 (\pi^2 r^2 - \delta x^2)^{1/2}$$

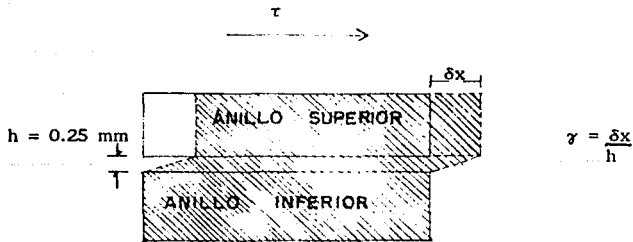
Area corregida = área inicial - 2 área 1/2 luna

$$A_c = A_i - \delta x [(\pi r)^2 - \delta x^2]^{1/2}$$

ANEXO D. DEFORMACION ANGULAR EN UN ESPECIMEN EN CORTE SIMPLE Y CORTE DIRECTO



a) Deformación angular en el equipo de corte simple cíclico



b) Deformación angular en el equipo de corte directo

Simbología

- τ = Esfuerzo cortante
- δx = Desplazamiento horizontal
- γ = Deformación angular
- H = Altura del espécimen
- h = Separación de los anillos de corte