

63 4 e)
REVISADO
2021
R.1723
SIC
R.1723



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

**FACULTAD DE INGENIERIA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

**ESTUDIO DE UNA ARENA CON BAJO CONTENIDO
DE FINOS EN ENSAYES TRIAXIALES
NO DRENADOS**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE

**MAESTRO EN INGENIERIA
(MECANICA DE SUELOS)**

P R E S E N T A :

BEATRIZ ELENA PEREZ GONZALEZ

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.

A mis padres

**Raul Pérez Saldarriaga
y
Helda González Escobar**

**por el amor y la comprensión que siempre me han dado,
y por crear en mí el deseo de superación.**

A mis hermanos

Guillermo León

Luis Fernando

Juan David

**por el entusiasmo y el apoyo moral que
a través de la distancia me brindaron**

A Max!

**por el amor, la comprensión y la motivación
que recibí en todo momento**

!A todas las personas que creyeron en mí!

RESUMEN

En el presente trabajo se estudia el comportamiento no drenado de especímenes de arena formados con diferentes contenidos de caolín variando su densidad inicial, sometidos a trayectorias de consolidación isotrópica y anisotrópica y llevados a la falla con cargas monotónicas de compresión y extensión.

La descripción y el análisis del comportamiento de los especímenes se llevan a cabo empleando curvas de esfuerzo desviador y exceso de presión de poro contra deformación así como trayectorias de esfuerzos efectivos. Se determina la influencia del tipo de consolidación y de la dirección de la aplicación de cargas (compresión y extensión) sobre las características esfuerzo-deformación de los especímenes y su capacidad para generar presión de poro.

A partir de los resultados obtenidos en el trabajo experimental se propone un modelo fenomenológico, definido con base en relaciones causales y diagramas de estado, que permite realizar predicciones cualitativas sobre el comportamiento de mezclas arena-finos.

Las implicaciones prácticas de los resultados de estos ensayos se discuten con relación al problema de la susceptibilidad de licuación de arenas "contaminadas" con caolín, bajo la aplicación de cargas estáticas.

CONTENIDO

	<i>pág.</i>
Resumen	i
Notación	v
1. INTRODUCCION	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Alcances	2
2. DESCRIPCION DEL EQUIPO	4
2.1 Equipo triaxial	4
2.1.1 Cámara triaxial	4
2.1.2 Sistema de adquisición de datos	5
2.1.3 Sistema de control	7
2.1.4 Calibración del equipo	7
2.2 Programas de computadora	8
Tablas	11
Figuras	12
3. MATERIALES Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	23
3.1 Materiales	23
3.1.1 Descripción y características de la arena	23
3.1.2 Descripción y características del caolín	23
3.2 Procedimiento experimental	23
3.2.1 Formación de las probetas de suelo	23
3.2.2 Método de saturación de los especímenes	25
3.2.3 Etapa de consolidación	26
3.2.4 Etapa de falla	27

Tablas	28
Figuras	29
4. RESULTADOS EXPERIMENTALES	34
4.1 Condiciones de los ensayos	34
4.1.1 Características de los especímenes y tipos de ensayos	34
4.1.2 Condiciones impuestas por el equipo experimental	34
4.2 Ensayes de compresión y extensión	35
4.2.1 Especímenes consolidados isotrópicamente	36
4.2.2 Especímenes consolidados anisotrópicamente	37
4.2.2.1 Especímenes consolidados anisotrópicamente con K = 0.44	37
4.2.2.2 Especímenes consolidados anisotrópicamente con K = 0.53 y 0.62	38
4.3 Comportamiento de probetas consolidadas con diferentes cocientes de esfuerzos efectivos K	39
4.3.1 Ensayes de compresión	39
4.3.1.1 Probetas densas	39
4.3.1.2 Probetas sueltas	40
4.3.1.3 Probetas muy sueltas	41
4.3.2 Ensayes en extensión	42
4.3.2.1 Probetas densas	42
4.3.2.2 Probetas sueltas	43
4.3.2.3 Probetas muy sueltas	44
Tablas	46
Figuras	47
5. INTERPRETACION DE RESULTADOS	72
5.1 Antecedentes	72
5.2 Modelo conceptual	74

5.3	Modelo fenomenológico	75
5.4	Discusión de resultados	76
5.4.1	Esfuerzo cortante en el punto de colapso, t'_q	77
5.4.2	Exceso de presión de poro máximo, $\Delta u_{máx}$	78
5.4.3	Angulo de fricción interna movilizado, ϕ'_q	80
5.4.4	Diagrama de estado normalizado dibujado en el plano $e_{gr} - \log(p'_q/p'_o)$	81
5.4.5	Diagrama de estado normalizado dibujado en el plano $e_{gr} - \log(p'_{umáx}/p'_o)$	82
5.4.6	Comparación con otros especímenes ensayados bajo otras condiciones de esfuerzos	83
	Figuras	85
6.	CONCLUSIONES	116
7.	RECONOCIMIENTOS	118
8.	REFERENCIAS	119
	Apéndice A. Listado de programas	121
	Apéndice B. Descripción detallada del comportamiento de cada uno de los especímenes ensayados	140

NOTACION

- B** Coeficiente de presión de poro de Skempton, definido como el cociente entre el incremento de presión de poro generado y el incremento en la presión de confinamiento
- C_c** Coeficiente de curvatura = $D_{30}^2/(D_{10} \cdot D_{60})$
- C_u** Coeficiente de uniformidad = D_{60}/D_{10}
- \overline{CU}** Prueba consolidada no drenada con medición de presión de poro
- D_{r_{gr}}** Compacidad relativa obtenida a partir de e_{gr}
- D_{r_{gi}}** Compacidad relativa obtenida a partir de e_{gi}
- D_{r_i}** Compacidad relativa al inicio de la prueba
- e_c** Relación de vacíos crítica
- e_r** Relación de vacíos al final de la consolidación
- e_g** Relación de vacíos intergranular
- e_{gr}** Relación de vacíos intergranular al final de la consolidación
- e_{gi}** Relación de vacíos intergranular al inicio del ensaye
- e_i** Relación de vacíos al inicio de la prueba
- e_{máx}** Relación de vacíos máxima
- e_{mín}** Relación de vacíos mínima
- G_s** Densidad de sólidos
- IP** Índice de plasticidad
- K** Cociente de esfuerzos efectivos = σ'_h/σ'_v

p'	Esfuerzo efectivo normal octaédrico = $(\sigma'_v + 2\sigma'_h)/3$
p'_c	Presión de consolidación equivalente
p'_o	Esfuerzo efectivo octaédrico al final de la consolidación
p'_q	Esfuerzo normal efectivo octaédrico en el punto de colapso
$p'_{umáx}$	Esfuerzo normal efectivo octaédrico en el exceso de presión de poro máximo
s'_q	Esfuerzo normal efectivo promedio en el punto de colapso
t'_q	Esfuerzo cortante en el punto de colapso
w	Contenido de agua
w_l	Límite líquido
w_p	Límite plástico
$\epsilon_{máx}$	Deformación axial en $\Delta u_{máx}$
ϵ_q	Deformación axial en el punto de colapso
$\Delta u_{máx}$	Exceso de presión de poro máximo
Δu_q	Exceso de presión de poro generado en el punto de colapso
σ'_c	Esfuerzo efectivo final de consolidación en condición isotrópica
σ'_{dq}	Esfuerzo desviador en el punto de colapso
σ'_h	Esfuerzo horizontal efectivo
σ'_v	Esfuerzo vertical efectivo
σ'_1	Esfuerzo principal mayor efectivo
σ'_3	Esfuerzo principal menor efectivo
ϕ'	Angulo de fricción interna definido a partir de la envolvente de falla
ϕ'_q	Angulo de fricción interna movilizado en el punto de colapso

1. INTRODUCCION

1.1 ANTECEDENTES.

En muchas ocasiones el ingeniero geotecnista se enfrenta a problemas en la construcción de importantes obras de ingeniería que involucran la presencia de arenas ligeramente limosas o arcillosas como suelos de cimentación y construcción. La práctica convencional trata a estos materiales como suelos granulares altamente permeables ignorando la presencia de los finos.

Las investigaciones experimentales sobre el comportamiento no drenado de arenas se ha enfocado principalmente al ensaye de arenas limpias a pesar de que los depósitos naturales de materiales granulares licuables suelen contener materia fina en diversas proporciones. Los datos presentados por De Alba (1969) indican que la licuación de arenas durante temblores puede ocurrir en materiales con más de 20% de partículas finas (menores de 74 micras).

La influencia de los finos (limos o arcillas) en el comportamiento no drenado de depósitos naturales de arena ha sido poco estudiada. Tradicionalmente se ha pensado que los finos disminuyen la susceptibilidad de licuación y de hecho los procedimientos empíricos de campo para estimarla así lo consideran (Seed et al, 1982). Se ha observado en laboratorio que la presencia de pequeños porcentajes de arcilla (1% a 3%) da lugar a estructuras muy sueltas, altamente inestables y capaces, incluso, de sufrir deformaciones de flujo ante cargas monotónicas. Los resultados obtenidos en ensayos de torsión cíclica realizados en arenas limosas, muestran que la susceptibilidad de licuación está relacionada con el porcentaje de finos (Ishihara et al, 1978). Algunos estudios llevados a cabo en especímenes de arena con pequeños porcentajes de caolín (10% o menos) indican que, para la misma relación de vacíos, la presión de poro aumenta conforma se incrementa el contenido de caolín (Ford, 1985; Georgiannou et al, 1990). Lo mismo puede concluirse al analizar los datos de Been y Jefferies (1985), quienes examinaron el comportamiento monotónico no drenado de especímenes de arenas ligeramente limosas.

Los resultados obtenidos por Ovando y Mesa (1991) en ensayos triaxiales estáticos de compresión no drenados, demuestran que al incrementar el contenido de finos (caolín o bentonita) aumenta la presión de poro durante la etapa de falla, disminuyendo la rigidez y la resistencia de las probetas de suelo. También definieron un porcentaje de umbral que marca el límite del efecto de los finos para promover o inhibir la generación de presión de poro. Los resultados de las pruebas demostraron que en el caso de las mezclas arena-caolín el umbral es 7%, aunque pueden presentarse en la naturaleza casos de licuación de arenas con porcentajes mayores de finos como lo presenta De Alba (1969), teniendo en cuenta además la compacidad relativa del material; en los especímenes arena-bentonita no se llegó a definir con precisión tal umbral, aunque los resultados experimentales sugieren que no difiere mucho del porcentaje señalado para las mezclas arena-caolín.

FALLA DE ORIGEN

FALLA DE ORIGEN

Usualmente, las propiedades esfuerzo-deformación y las de generación de presión de poro en materiales granulares, se obtienen a partir de ensayos triaxiales en especímenes consolidados isotrópicamente. El empleo de especímenes de arena consolidados anisotrópicamente para determinar estas propiedades ha sido menos frecuente y todavía menos en arenas con materia fina. En estudios encaminados a determinar la susceptibilidad de licuación de arenas se han ensayado especímenes en los que, a pesar de simular el estado de esfuerzos antes de la aplicación de cargas cíclicas, no se considera la trayectoria de esfuerzos de campo que seguiría el suelo para alcanzar dicho estado de esfuerzos. En ensayos triaxiales cíclicos se ha observado que la respuesta de suelos consolidados siguiendo trayectorias de esfuerzos *in situ*, es muy diferente a la que se obtiene para especímenes isotrópicamente consolidados.

Ovando y Mesa (1991) estudiaron el comportamiento de arenas saturadas con bajos contenidos de caolín (3, 5, 7 y 10% en peso) consolidadas isotrópicamente y sometidas a cargas monotónicas en compresión en condiciones no drenadas, variando las densidades iniciales, la presión de consolidación (1.0 a 3.0 kg/cm²) y el contenido de finos. Posteriormente, Ovando y Lagunas (1992) obtuvieron resultados en ese material formando especímenes con la misma relación de vacíos (en promedio: $e_i = 0.920$ correspondiente a una compacidad relativa, Dr_i , de 51%), con diferentes contenidos de caolín (3, 5 y 7% en peso) y consolidados isotrópicamente y anisotrópicamente a una presión efectiva de 1.0 kg/cm². La trayectoria durante la consolidación anisotrópica siguió el valor de $K = 0.44$. El comportamiento de los especímenes se analizó mediante ensayos de compresión y extensión no drenados, observando que el potencial para generar presión de poro depende de la historia de esfuerzos de la consolidación y de la dirección de aplicación de cargas durante la falla.

1.2 OBJETIVOS.

Este estudio pretende avanzar en las investigaciones que se han efectuados para conocer la influencia de los finos (limos o arcillas) en el comportamiento no drenado de depósitos naturales arenosos, así como examinar la respuesta de este material consolidado siguiendo diferentes trayectorias de esfuerzos de campo y la susceptibilidad de licuación de arenas "contaminadas" con este tipo de finos mediante pruebas triaxiales estáticas.

En este trabajo se estudia el comportamiento monotónico no drenado de especímenes de arena con bajos contenidos de caolín sometidos a trayectorias de consolidación isotrópicas y anisotrópicas con diferentes valores del cociente de esfuerzos efectivos $K = \sigma'_h/\sigma'_v$, y ensayados aplicando cargas en compresión y extensión, variando las densidades iniciales y el contenido de finos.

1.3 ALCANCES.

Se estudia el comportamiento monotónico no drenado de una arena fina saturada con diferentes contenidos de caolín (3, 5 y 7% en peso). El comportamiento del material se analiza

mediante ensayos triaxiales estáticos de compresión y extensión. Los especímenes se consolidaron isotrópicamente y anisotrópicamente a presiones efectivas de 2.0 kg/cm^2 ; para examinar los efectos de la magnitud del esfuerzo efectivo de consolidación se tomaron algunos ensayos realizados por Lagunas (1992) que fueron consolidados hasta un esfuerzo efectivo de 1.0 kg/cm^2 . Se considera el comportamiento de especímenes con diferentes relaciones de vacíos formados desde estados muy sueltos ($e_i = 1.130$, $Dr_i = 1.0\%$) hasta estados densos ($e_i = 0.690$, $Dr_i = 100\%$). Las muestras consolidadas anisotrópicamente se sometieron a diferentes trayectorias arbitrarias de consolidación con valores del cociente de esfuerzos efectivos K de 0.44, 0.53 y 0.62.

En la interpretación de los resultados, además de tener en cuenta los parámetros que se emplean para analizar el comportamiento no drenado de suelos granulares -relaciones de vacíos y la magnitud del esfuerzo de consolidación-, se incluye el efecto de la trayectoria de consolidación y de la dirección de aplicación de cargas durante la etapa de falla. Se usan relaciones entre la relación de vacíos intergranular al final de la consolidación y algunos parámetros significativos del comportamiento típico de las mezclas arena-finos estudiadas. También se generalizan los resultados utilizando diagramas de estado en términos del estado cuasi estable, es decir materiales contractivos-dilatantes que pasan transitoriamente por el estado estable, y de la relación de vacíos intergranular, e involucrando dos tipos de normalización mediante la presión de consolidación y el cociente de esfuerzos efectivos K .

2. DESCRIPCION DEL EQUIPO

En este capítulo se describen los componentes principales del equipo triaxial automático empleado en este trabajo de investigación así como los programas de computadora usados para controlarlo.

2.1 EQUIPO TRIAXIAL.

En las figuras 2.1 y 2.2 se muestra el equipo triaxial automático utilizado para la realización de este estudio; el cual fue diseñado y construido en el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Ovando y Lagunas, 1992). El equipo consta de una cámara triaxial instrumentada, un sistema de adquisición de datos y otro de control.

2.1.1 Cámara triaxial.

Se compone de un cilindro de lucita con base fija a un marco de acero y una tapa de aluminio acoplada a un pistón neumático para la aplicación de las fuerzas axiales (fig. 2.3).

La base fija de la cámara presenta un sistema de doble tornillo que permite mover la celda de carga a la altura deseada sin que ésta gire, con el fin de obtener un contacto suave entre el vástago del pistón, el cabezal y la probeta sin alterar la estructura del suelo.

La base que sirve de apoyo a la probeta de suelo, con una piedra porosa al centro de 1.30 cm de diámetro y 0.58 cm de espesor, se asienta firmemente sobre la celda de carga resistiva que permite medir el esfuerzo desviador aplicado a la muestra. El cabezal de lucita se divide en dos partes, inferior y superior. La inferior, colocada sobre la probeta, cuenta con una piedra porosa de las mismas dimensiones que las de la base y en su otro extremo contiene una caja que puede conectarse a un sistema de vacío, a la atmósfera o a la presión confinante en la cámara triaxial.

Esta cámara triaxial se encuentra instrumentada con transductores eléctricos resistivos que permiten medir la presión confinante, la presión de poro o contrapresión, los cambios volumétricos, la fuerza axial y la deformación axial del espécimen de suelo.

A continuación se describen los sistemas adicionales con que cuenta la cámara.

- Sistema de saturación. Está compuesto por un regulador que aplica aire a presión a una bureta y una cámara de saturación, un sistema de válvulas sin cambio de volumen y un

transductor de presión que permite medir la contrapresión aplicada a la probeta. En ensayos con arena se emplea un tanque con bióxido de carbono (CO₂) que se conecta, mediante una manguera, al drenaje inferior del espécimen.

- Sistema de confinamiento. La presión confinante aplicada a la probeta se controla mediante un motor de paso; cada revolución se divide en un número fijo de pasos (200 ó 400 por revolución) controlados mediante una conexión o interfaz con una computadora. Este motor está acoplado con un regulador, el cual aplica aire a presión a un vaso de policarbonato con interfaz aire-agua. El vaso, que contiene agua destilada, se conecta a la cámara triaxial mediante una manguera. A la entrada de la cámara se tiene un sistema de válvulas sin cambio de volumen y un transductor de presión que permite medir y ajustar la presión confinante sin alterar el espécimen de suelo.

- Sistema de carga vertical. Un pistón neumático conectado a un regulador de presión acoplado a otro motor de paso, permite controlar la aplicación de los esfuerzos desviadores a la probeta de suelo. El pistón, con una capacidad de 227 kg, cuenta con dos cámaras conectadas a un regulador de presión. La presión de la cámara superior provoca que el vástago se deslice hacia abajo mientras que la presión de la cámara inferior hace que se deslice hacia arriba. Este mecanismo permite acercar la parte superior del cabezal unida al vástago con la parte inferior del cabezal colocada sobre la probeta. Las fuerzas axiales se miden con una celda de carga sumergible que elimina los efectos de fricción del vástago en la medición de las cargas soportadas por el suelo.

- Sistema de medición de cambios volumétricos. Consiste en una doble bureta de lucita. La bureta interior, con una área de 0.432 cm² y altura de 26.5 cm, se encuentra conectada a los drenes inferior y superior de la probeta. Los cambios volumétricos se registran por medio de un transductor diferencial de presión conectado a la bureta.

- Sistema de medición de deformación axial. Las deformaciones axiales se miden con un transductor resistivo de deformación (LSCT), colocado en la parte superior del vástago del pistón neumático.

2.1.2 Sistema de adquisición de datos.

Se almacenan los datos generados durante el ensayo para realizar operaciones de control o para su posterior análisis. Las corrientes o voltajes "acondicionados" son señales analógicas que se registran en la memoria de una computadora o en discos magnéticos.

El sistema consta de una computadora, una tarjeta de adquisición de datos, un equipo

acondicionador de señal y un conjunto de transductores eléctricos.

- Computadora. Se emplea una microcomputadora Hewlett-Packard Vectra ES modelo 20 con memoria de 640 kb (kilobytes) y sistema operativo MS-Dos 3.3. La unidad de disco duro es de 20 megabytes y dispone de 6 ranuras para la instalación de tarjetas accesorias de 8 y 16 bits. Las de 8 bits se pueden colocar en cualquier ranura, mientras que las de 16 bits sólo funcionan en las ranuras largas.

- Tarjeta de adquisición de datos. Las tarjetas de adquisición, junto con la computadora, constituyen un sistema completo para el registro de datos en el laboratorio. El sistema INING-90 emplea una tarjeta DT 2814 fabricada por LPC Lab (Data Translation, Inc.) la cual adquiere señales analógicas y las convierte en códigos digitales que se procesan en la computadora. La tarjeta, conectada a una ranura de expansión (corta o larga) de entrada-salida (I/O), contiene 16 canales de entrada analógica y se puede configurar para rangos de entrada unipolar o bipolar de $\pm 5v$ y $\pm 2.5v$.

La conversión análogo-digital (A/D) se consigue mediante un convertidor monolítico de 12 bits, capaz de alcanzar un rendimiento de 25,000 conversiones por segundo (25 hz). Todas las operaciones de la tarjeta se ejecutan utilizando los registros de control, el de estado y de datos A/D.

El usuario puede seleccionar en la tarjeta DT 2814 cuatro parámetros de operación: la dirección base de la tarjeta, el rango de voltaje, la frecuencia base del reloj que permite controlar el inicio de las subrutinas de adquisición de datos y el nivel de interrupción. La selección se lleva a cabo "puenteando" eléctricamente la tarjeta.

- Equipo acondicionador de señal. Amplifica y filtra la señal eléctrica proveniente de un transductor con la finalidad de que dicha señal se pueda medir y registrar adecuadamente con los equipos disponibles. El equipo consta de dos bloques, cada uno con un módulo fuente de voltaje y cinco módulos acondicionadores de señal. El módulo fuente de voltaje suministra el voltaje de polarización a los circuitos de los módulos acondicionadores de señal. Cada acondicionador de señal cuenta con seis etapas de amplificación (ganancia), cinco etapas de filtrado paso bajas y cuatro etapas de atenuación, lo que permite acondicionar la señal de acuerdo con las necesidades de operación.

- Transductores eléctricos. Convierten un fenómeno físico en una señal eléctrica, permitiendo medir los esfuerzos, cambios de volumen y deformaciones. La instrumentación en la cámara triaxial consta de tres transductores de presión, uno de desplazamiento y una celda de carga. En la tabla 2.1 se presenta un resumen de las características principales de estos instrumentos de medición.

2.1.3 Sistema de control.

Este sistema consta de dos motores de paso interconectados a la computadora que activan reguladores para controlar la presión de confinamiento y la presión vertical, esta última aplicada al espécimen a través de un pistón neumático.

- La computadora como elemento de control. Al recibir las señales de los transductores a través del sistema de adquisición de datos, la computadora efectúa diversas operaciones con los voltajes digitados. En primer lugar, los convierte en magnitudes físicas de las variables de interés en el ensaye (esfuerzos, cambios de volumen y deformaciones), utilizando para ello las ecuaciones de calibración correspondientes; posteriormente verifica si el estado de la muestra es el deseado y si no, "ordena" a los motores de paso las acciones correctivas necesarias (aumentar o disminuir las presiones en el pistón o en la cámara). La comunicación entre la computadora y los motores de paso se efectúa por medio de una interfaz controlada por una tarjeta, según se describe a continuación.

- Tarjeta para controlar el movimiento de los motores de paso. Se usa una tarjeta PCMotion la cual es un controlador de interfaz Entrada/Salida para computadoras. Puede controlar hasta cuatro motores de paso y 32 dispositivos discretos. Debido a que los componentes que controlan la tarjeta pueden realizar tareas sofisticadas, la computadora tiene la libertad de manejar los datos aun cuando los motores estén funcionando. En trabajos de aplicación que se requieran un control de posición y precisión, la tarjeta controla los cuatro motores de paso mediante comandos de posición, dirección y velocidad para cada uno de ellos. En ocasiones puede ser necesario utilizar una "rampa" para controlar la velocidad de los motores, comenzando con valores bajos y continuando con valores altos. Todo lo que se necesita para hacer funcionar un motor de paso es una declaración de llamado en lenguaje de programación BASIC a las subrutinas que controlan su movimiento especificando la dirección, el modo y el número de pulsos (pasos) deseados por el usuario.

2.1.4 Calibración del equipo.

Los transductores eléctricos para la medición de presión confinante, contrapresión o presión de poro, cambios volumétricos, deformación axial y fuerza axial se calibran empleando programas de computadora que permiten capturar los voltajes digitados por medio de la tarjeta de adquisición de datos.

Para su calibración, los transductores de presión confinante, presión de poro y cambios volumétricos, deben encontrarse completamente saturados, al igual que todas las líneas conectadas a ellos.

Los transductores de presión confinante y presión de poro se calibran contra presiones

conocidas empleando una columna de mercurio y reguladores de presión; con esto se puede determinar la relación entre las presiones aplicadas y las señales eléctricas de salida (voltaje).

En el caso del transductor diferencial de presión, su calibración se realiza variando la columna de agua en la bureta, y determinando la relación entre el cambio de volumen de agua y los voltajes señalados.

Para calibrar el transductor de desplazamiento axial se sujeta su cuerpo a una base fija y su vástago a un tornillo micrométrico apoyado en dicha base. Se desplaza el vástago a diversas distancias conocidas y se relacionan los desplazamientos con los voltajes correspondientes.

La celda de carga se calibra utilizando un marco de carga donde se aplican cargas de magnitud conocida en un portapesas y se registra la variación de las señales de salida. En este caso se comparan las cargas aplicadas con los voltajes digitados. La celda de carga se calibra en compresión y tensión.

En las figuras 2.4 a 2.9 se presentan las gráficas de calibración de estos instrumentos de medición acoplados al equipo triaxial.

2.2 PROGRAMAS DE COMPUTADORA.

Los programas para el monitoreo de voltajes, calibración de transductores y para controlar las etapas de falla de los especímenes de suelo, se encuentran escritos en lenguaje BASIC. Los diagramas de flujo simplificados se muestran en las figuras 2.10 a 2.14; los listados se presentan en el apéndice A.

- Programa para monitorear voltajes y ceros de los transductores. Este programa permite registrar los voltajes de cinco transductores durante el tiempo que se considere necesario. Una de las finalidades es observar la variación del voltaje con el tiempo, además de conocer los voltajes iniciales de los transductores antes de dar comienzo a las diferentes etapas de los ensayos (saturación, consolidación y falla).

El programa toma quince (15) lecturas, realiza la conversión análoga-digital, mediante la subrutina de adquisición de datos y calcula el voltaje promedio (fig 2.10). El tiempo entre cada lectura es de 0.1 segundos (Δt). Cada bloque de 15 lecturas se repite a intervalos de tiempo (Δt_1) indicados por el usuario. Los datos obtenidos se despliegan en pantalla y se almacenan en un archivo compatible con la hoja de cálculo electrónica Lotus.

- Programa para calibrar los transductores de medición. El programa presenta un mensaje en pantalla donde se ordena la aplicación del incremento de presión con el regulador y el manómetro y solicita que se proporcione el dato de nivel de la columna de mercurio para

ese incremento de presión; se inicia la medición de voltaje y se repite esta operación para cada nuevo incremento hasta finalizar la calibración del transductor, como se indica en el diagrama de flujo simplificado de la figura 2.11.

Los programas para calibrar los transductores de desplazamiento axial, cambios volumétricos y la celda de carga se basan en los mismos principios que los descritos para la calibración de los transductores de presión. La única variante es la variable física que se registra, la cual puede ser desplazamiento en mm, columna de agua en cm, carga en kg o presión en kg/cm².

- Programa para la etapa de consolidación anisotrópica. El programa permite controlar el ensaye de una probeta de suelo manteniendo constante el cociente de esfuerzos principales efectivos, $K = \sigma'_1 / \sigma'_3$, mediante la operación de los motores de paso acoplados a los reguladores de presión; un motor controla la aplicación de fuerzas axiales y el otro la presión confinante.

Los datos que el programa requiere son: el nombre del archivo donde se almacenan los resultados, la fecha, las características iniciales de la probeta de suelo, como son el área (A_0), la altura (H_0) y el volumen (V_0), el cociente de esfuerzos efectivos deseado (K) y el estado final de esfuerzos efectivos (σ'_{1f} , σ'_{3f} , p'_o), donde p'_o es el esfuerzo efectivo octaédrico final de consolidación; además de estos datos, se proporcionan los voltajes iniciales de los transductores.

El programa toma las lecturas de voltaje de los transductores y mediante las ecuaciones de calibración obtiene la presión confinante, σ_c , la contrapresión, σ_{cp} , la fuerza axial, P , el cambio de longitud, ΔH , y el cambio de volumen, ΔV . Con estos datos calcula el estado de deformaciones (ϵ_a : deformación axial unitaria, ϵ_v : deformación volumétrica unitaria), el área corregida, A_c , el esfuerzo desviador, σ_d , y el estado de esfuerzos actuantes (σ'_1 , σ'_3 , t' , s' , p' , K). Despliega en pantalla los voltajes de los transductores y el estado de esfuerzos. A continuación compara el esfuerzo efectivo de consolidación actuante con el final para definir si termina o no la aplicación de carga o de presión. En caso de continuar, compara el cociente de esfuerzos efectivos actuante con el programado e incrementa la presión confinante o la fuerza axial cuya magnitud está controlada mediante los números de pulsos (pasos) para cada motor previamente establecidos por el usuario. Posteriormente el programa entra en un tiempo de espera para permitir la consolidación del espécimen; cuando termina este tiempo, se repite el ciclo completo hasta alcanzar los esfuerzos finales programados (fig 2.11).

- Programa para la etapa de consolidación isotrópica. Permite aplicar incrementos de presión confinante a intervalos de tiempo determinados por el usuario.

Los datos que requiere el programa son los siguientes: el nombre del archivo donde se almacenan los resultados, la fecha, el área, la altura y el volumen iniciales de la muestra de suelo, el esfuerzo efectivo final de consolidación y los voltajes iniciales de los transductores que

intervienen en este tipo de consolidación.

Con las lecturas de voltaje de los transductores y las ecuaciones de calibración, el programa calcula la presión confinante, la contrapresión y el cambio de volumen, y posteriormente calcula el área corregida y el esfuerzo efectivo de confinamiento actuante. Despliega en pantalla los voltajes de los transductores y el estado de esfuerzos. A continuación compara el esfuerzo efectivo de consolidación actuante con el programado para determinar si continúa o no con la aplicación de presión confinante. En caso de seguir, incrementa esta última y la mantiene constante un tiempo que permita la consolidación de la probeta de suelo. Pasado este tiempo se repite el proceso hasta alcanzar el esfuerzo efectivo de consolidación deseado, momento en el cual el programa se detiene automáticamente (fig 2.13).

- Programa para la etapa de falla: Para controlar la dirección de la carga, se elaboraron programas que permiten provocar la falla de especímenes de suelo, aplicando cargas monotónicas verticales de compresión o extensión. Estos programas permiten realizar ensayos con esfuerzo controlado mediante la aplicación de cargas operando el motor de paso acoplado al regulador de presión y al pistón neumático a intervalos de tiempo fijados por el usuario.

Los datos que el programa necesita son: el nombre del archivo donde se registran los resultados, la fecha, el área y la altura de la probeta de suelo al terminar la consolidación (A_c , H_c) y los voltajes iniciales de los transductores.

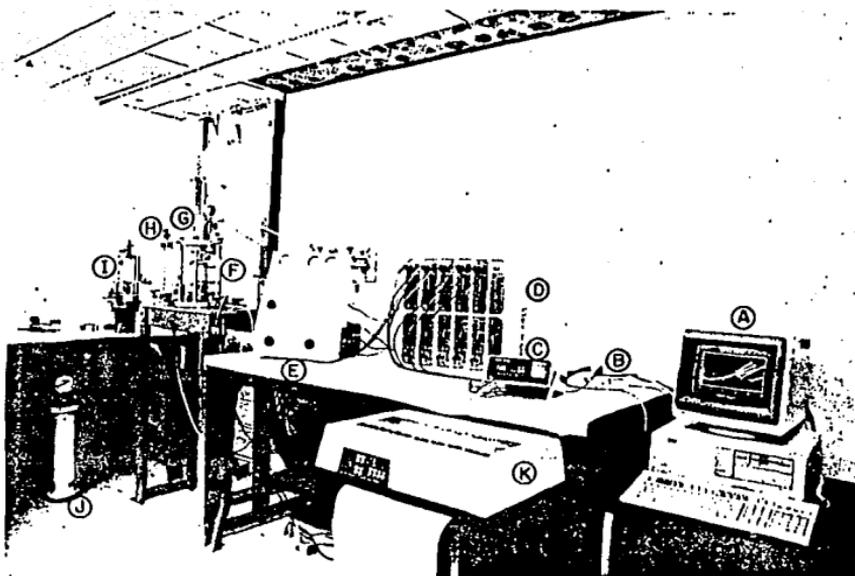
Mediante los voltajes de los transductores y las ecuaciones de calibración el programa obtiene el cambio de longitud (ΔH), la presión de poro (u), la presión confinante (σ_c) y la fuerza axial (P). Con esto calcula la deformación axial ϵ_a (unitaria y en %), el área corregida, A_c , el exceso de presión de poro generada durante la falla, Δu , el esfuerzo desviador, σ_d , y el estado de esfuerzos actuante (σ'_1 , σ'_3). A continuación compara la deformación axial existente con la previamente establecida para decidir si pasa o no a una subrutina donde se realizan lecturas de voltaje a un menor intervalo de tiempo para registrar con mayor detalle la información en el instante en que ocurre la falla de los especímenes de arena. Posteriormente despliega en pantalla el estado de esfuerzos y deformaciones para luego, en caso de no haberse alcanzado la deformación límite fijada por el usuario, aplicar un nuevo incremento de fuerza axial y entrar en un tiempo de espera suficiente para que la presión de poro sea uniforme dentro de la probeta de suelo. El programa se detiene automáticamente al alcanzar la deformación límite establecida por el usuario, como se indica en el diagrama de flujo simplificado de la figura 2.14.

Tabla 2.1 Características principales de los transductores de medición

Tipo de transductor	Uso en el espécimen de suelo	Ecuación de calibración	Características
Transductor de presión confinante	Medición de presión confinante	$\sigma_c = 5.516(\Delta \text{Volts})$ (en kg/cm ²)	Marca Statham Rango 0 a 7 kg/cm ² (máximo 24.5 kg/cm ²) Excitación máxima 16 Volts Voltaje de alimentación 10 Volts
Transductor de presión de poro	Medición de presión de poro y contrapresión	$u = 2.534(\Delta \text{Volts})$ $\sigma_{cp} = 2.534(\Delta \text{Volts})$ (en kg/cm ²)	Marca Statham Rango 0 a 3.5 kg/cm ² (máximo 17.5 kg/cm ²) Excitación máxima 14 Volts Voltaje de alimentación 10 Volts
Transductor de desplazamiento axial	Medición de deformación axial	$\Delta H = 27.192(\Delta \text{Volts})$ (en mm)	Marca MPE Resistivo LSTC Carrera total 5.1 cm Excitación máxima 10 Volts Voltaje de alimentación 10 Volts
Transductor de cambios volumétricos	Medición de cambios volumétricos	$\Delta V = 7.262(\Delta \text{Volts})$ (en cm de H ₂ O)	Marca Validyne Rango de 0 a 35 cm de H ₂ O Excitación máxima 10 Volts Voltaje de alimentación 10 Volts
Celda de carga	Medición de carga vertical	$P = 25.77(\Delta \text{Volts})$ compresión $P = 25.31(\Delta \text{Volts})$ tensión (en kg)	Marca T-Hydronics Capacidad en compresión 113.4 kg Excitación máxima 10 Volts Voltaje de alimentación 10 Volts

Notas:

- σ_c : presión confinante
- u : presión de poro
- σ_{cp} : contrapresión
- ΔH : cambio de longitud
- ΔV : cambio de volumen
- P : carga vertical
- ΔVolts : cambio de voltaje



- A Computadora
- B Selector de canal
- C Voltímetro
- D Acondicionadores de señal
- E Tablero de control
- F Cámara triaxial
- G Pistón neumático
- H Bureta
- I Cámara de saturación
- J Tanque con bióxido de carbono
- K Impresora

Fig 2.1 Vista general del equipo triaxial automático

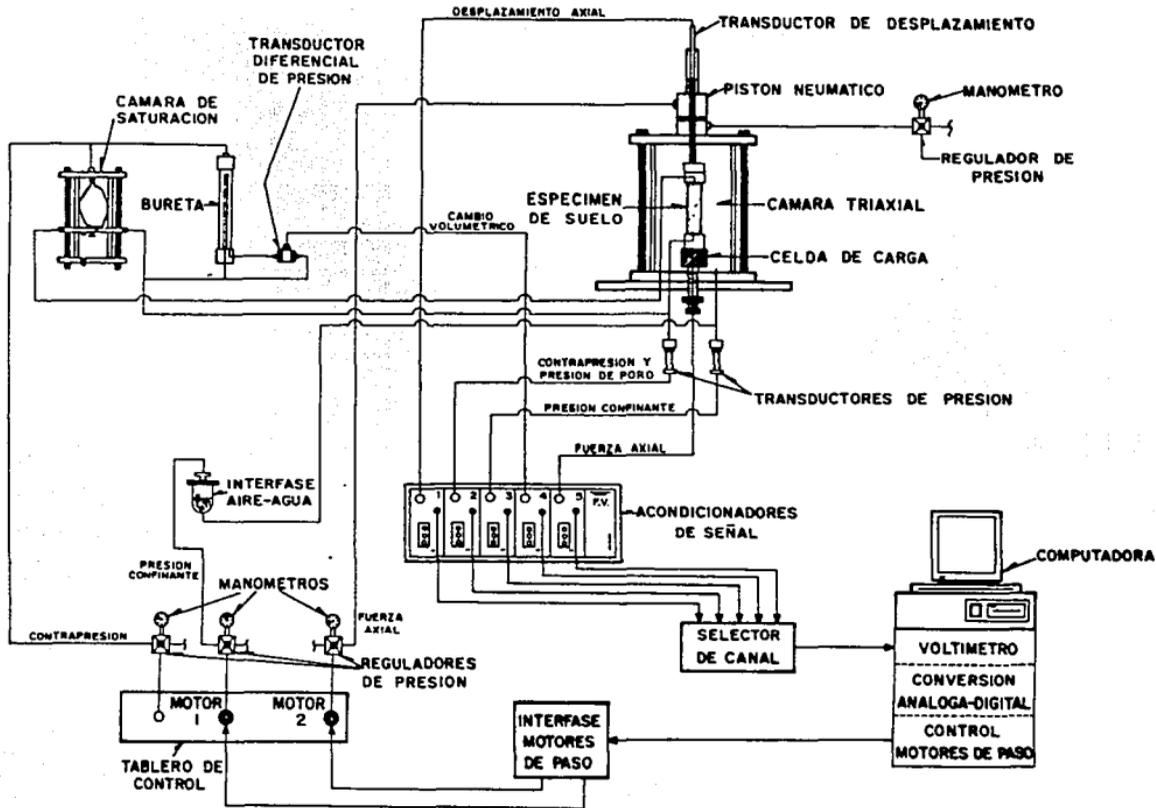
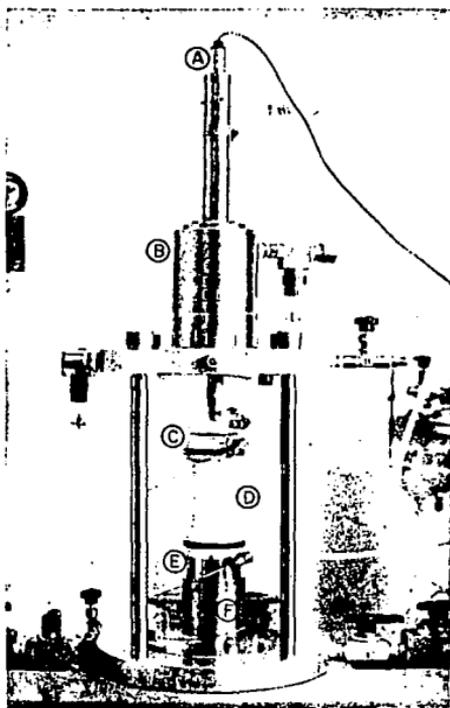


Fig 2.2 Esquema general del equipo triaxial automático



- A** *Transductor de desplazamiento*
- B** *Pistón neumático*
- C** *Cabezal de lucita*
- D** *Espécimen de suelo*
- E** *Base de acero inoxidable*
- F** *Celda de carga*

Fig 2.3 *Cámara triaxial instrumentada*

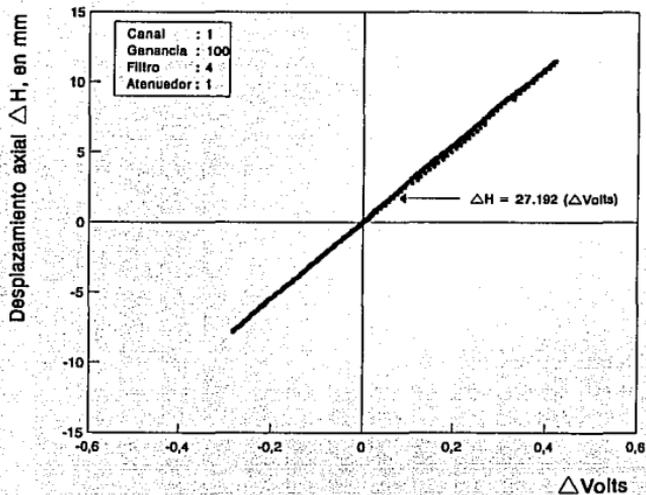


Fig 2.4 Calibración del transductor de desplazamiento axial

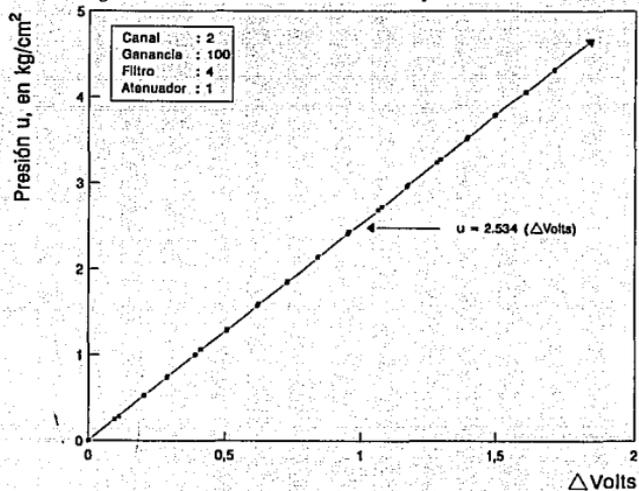


Fig 2.5 Calibración del transductor de presión de poro

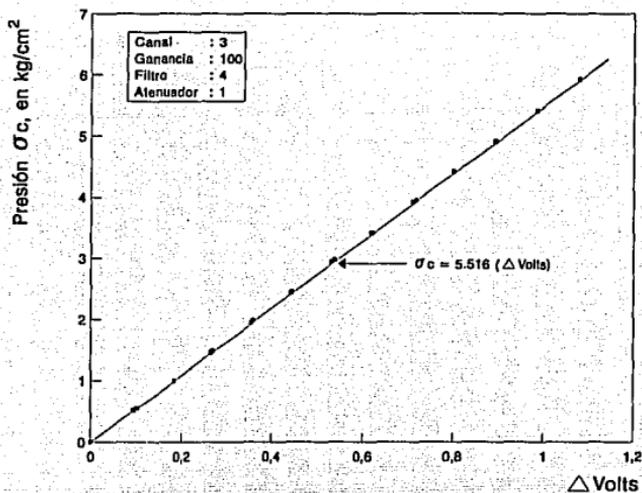


Fig 2.6 Calibración del transductor de presión confinante

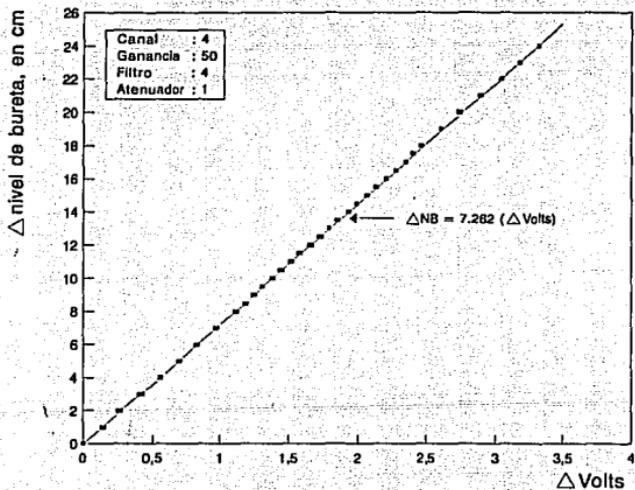


Fig 2.7 Calibración del transductor de cambios volumétricos

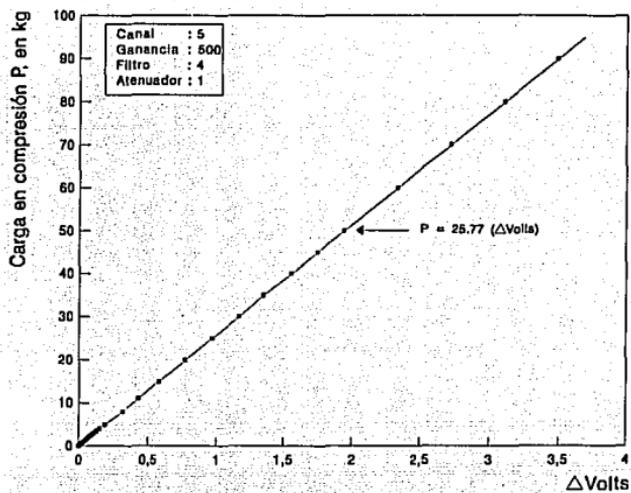


Fig 2.8 Calibración de la celda de carga en compresión

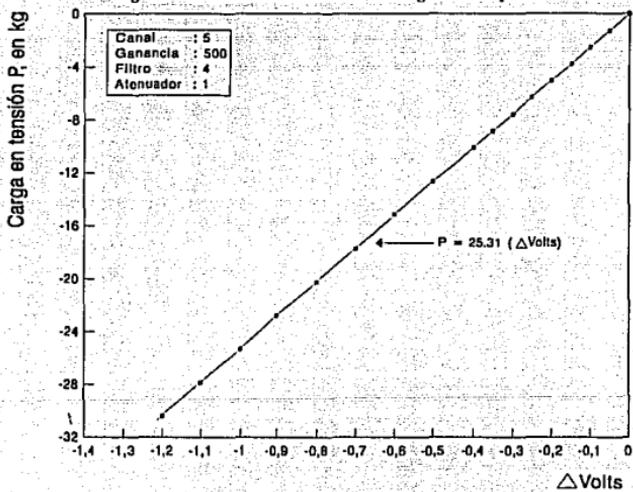


Fig 2.9 Calibración de la celda de carga en tensión

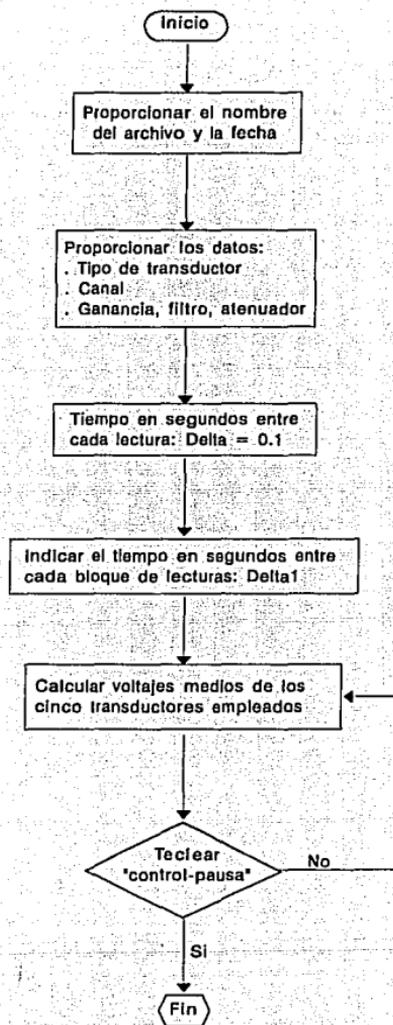


Fig 2.10 Diagrama de flujo simplificado para monitorear voltajes y ceros de los transductores

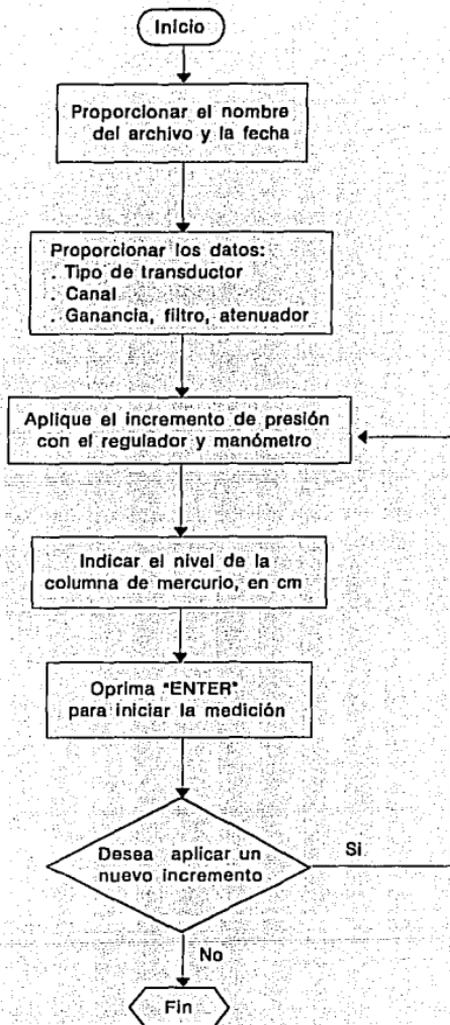


Fig 2.11 Diagrama de Flujo simplificado para calibrar los transductores de presión

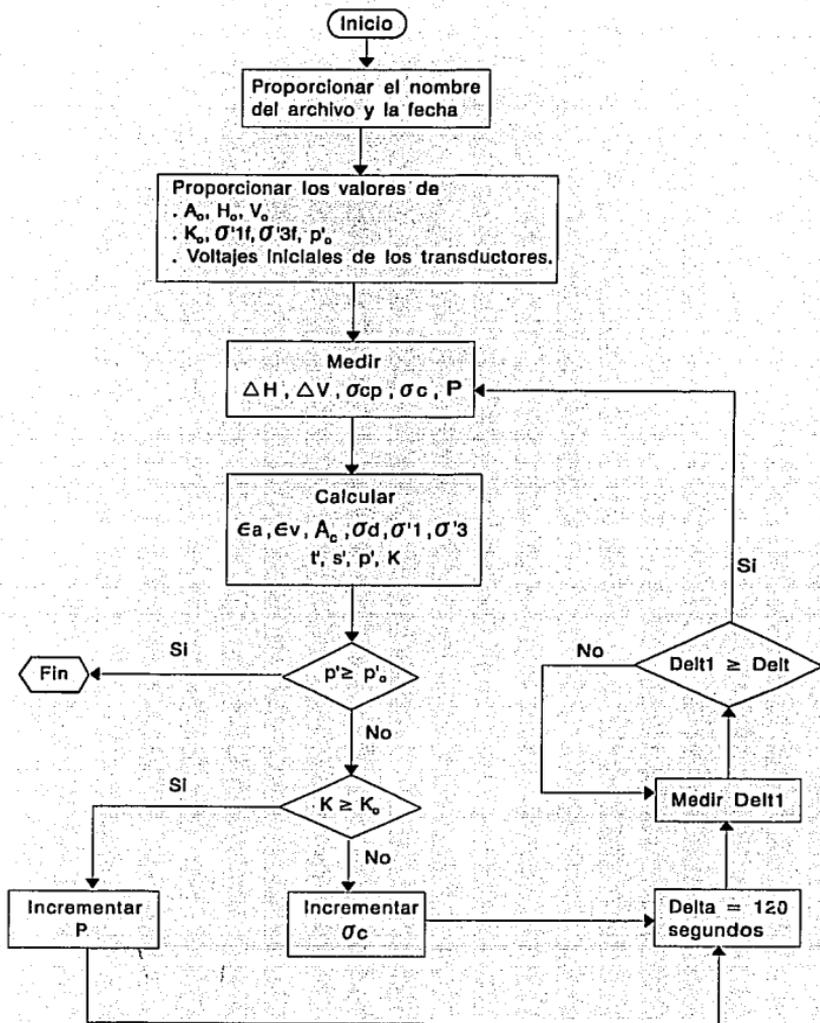


Fig 2.12 Diagrama de flujo para la etapa de consolidación anisotrópica

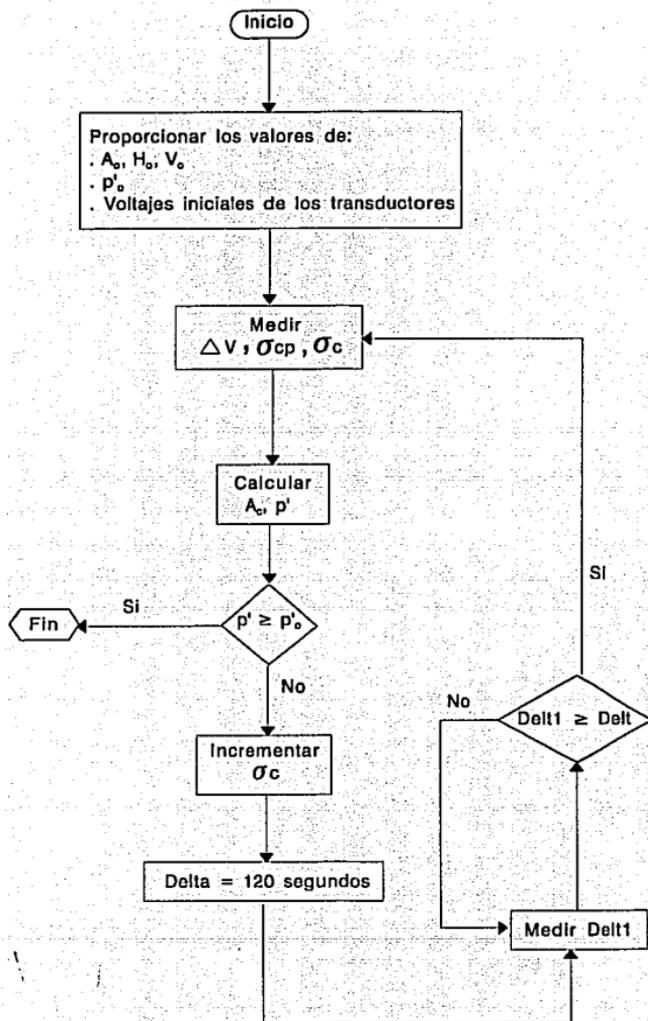


Fig 2.13 Diagrama de flujo simplificado para la consolidación isotrópica

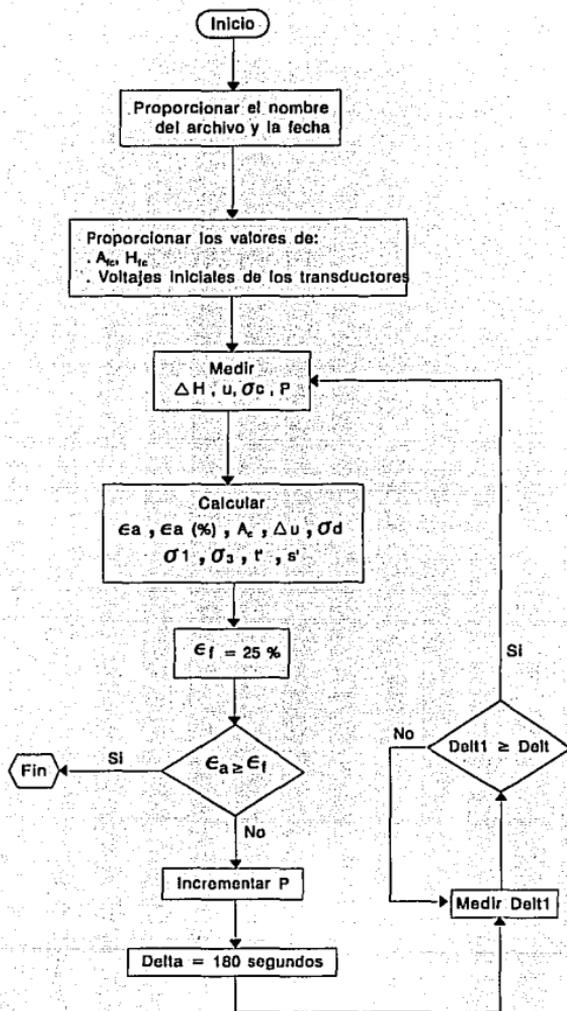


Fig 2.14 Diagrama de Flujo simplificado para la etapa de falla en compresión

3. MATERIALES Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

En este capítulo se describen las características de los materiales utilizados así como las técnicas experimentales empleadas para la realización de los ensayos.

3.1 MATERIALES.

3.1.1 Descripción y características de la arena.

La arena utilizada proviene de Jáltipan, Veracruz. Se identifica como una arena de playa cuarzosa, color blanco, de granos uniformes, aproximadamente equidimensionales y subangulosos, con tamaño máximo de 0.25 mm. La granulometría empleada se obtuvo por cribado en seco y se ilustra en la figura 3.1. Todo el material pasa la malla No 40 (0.420 mm) y sólo el 3.42% pasa la malla No 200 (0.074 mm). Su coeficiente de uniformidad es 1.48, el de curvatura 1.31 y su densidad de sólidos 2.66. Las relaciones de vacíos máxima y mínima resultaron ser de 1.015 y 0.729, respectivamente (Mesa, 1991). En el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) se clasifica como una arena mal graduada (SP). En la tabla 3.1 se presenta el resultado de su análisis granulométrico.

3.1.2 Descripción y características del caolín.

El caolín empleado es de color blanco, y pasa la malla No 200, con 24% de fragmentos angulosos de cuarzo cuyo tamaño máximo es de 0.042 mm. La densidad de sólidos del caolín es de 2.60, el límite líquido 44.50%, el límite plástico 34.20% y el índice de plasticidad 10.30%. Según el SUCS se clasifica como un limo inorgánico de baja compresibilidad (ML). En la tabla 3.2 se resumen las características principales y las propiedades índice de este material.

3.2 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

3.2.1 Formación de las probetas de suelo.

Se ha establecido que la fricción en las bases tiene una importante influencia en el comportamiento de la probeta de suelo, haciendo que la distribución de esfuerzos y deformaciones no sea uniforme (Bishop et al, 1960). Para disminuirla se utilizaron extremos

lubricados en los contactos de la base y cabezal con la probeta por medio de un elemento de pequeño espesor (membrana de látex con cortes radiales), adicionándole una delgada capa de aceite de silicón (fig. 3.2). Con esto se anulan o cuando menos disminuyen considerablemente los esfuerzos tangenciales en los extremos de los especímenes (Roscoe, 1953; Rowe y Barden, 1964; Bishop y Green, 1965).

El molde metálico, con las dimensiones y características presentadas en la figura 3.3, se coloca directamente en la base de la cámara triaxial sobre el extremo lubricado, donde se apoya el espécimen de suelo. La membrana de látex, sellada a la base con dos arosellos, se hace pasar por el interior del molde ajustándose a su pared mediante la aplicación de vacío. A continuación se sostiene el molde con un soporte de aluminio para prevenir vibraciones y movimientos que pudiesen alterar la formación de los especímenes.

Previo a la formación de los especímenes, la mezcla homogénea de arena con caolín se seca en un horno a una temperatura de 105 °C durante 24 horas. Después de este tiempo se pulverizan los grumos que se encuentren en la mezcla hasta obtener un material homogéneo.

Para la formación de los especímenes de arena con caolín se siguieron dos procedimientos: a) formación en estado húmedo para obtener especímenes sueltos, y b) en estado seco para los medianamente sueltos y los densos.

a) Formación en estado húmedo.

El material homogéneo de arena con caolín, previamente secado al horno, fue mezclado con el 4% en peso de agua destilada; este contenido de agua mejora la liga entre las partículas y reduce sustancialmente la sensibilidad a las vibraciones en estado suelto. La compactación fue dada por la aplicación del peso estático de un apisonador de 1.50 cm de diámetro y 0.10 kg de peso, dejándolo caer 12 veces sobre la superficie de cada una de las diez capas con que fue formada la probeta. Durante el proceso de compactación se redujo la evaporación del contenido de agua inicial cubriendo con una franela húmeda el recipiente que contenía el material de cada capa obteniendo una variación menor del 1% a lo largo de la probeta.

b) Formación en estado seco.

Para obtener los especímenes medianamente sueltos se colocó en un cilindro de lucita la cantidad suficiente de material para formar una probeta (arena más caolín) procediendo a depositarlo dentro del molde metálico, minimizando la altura de caída del material mediante un embudo provisto de un deflector en su parte inferior.

El procedimiento utilizado en la fabricación de especímenes densos consistió en verter el material seco en cuatro capas, vibrando manualmente cada una de ellas a través

del molde por dos minutos.

Después de llenado el molde, según el procedimiento empleado dependiendo de la relación de vacíos deseada, se enrasa, se pesa el material sobrante y se instala el cabezal de lucita, con su extremo lubricado, usando otro soporte de aluminio. La membrana se sella ajustándola al cabezal con dos arosellos (fig 3.4).

Se aplica vacío (0.15 a 0.2 kg/cm^2) a través de una línea conectada al drenaje inferior con el propósito de mantenerla firme e inmediatamente después se suspende el vacío conectado al molde. Se retiran los soportes y el molde, se toman las dimensiones del espécimen y se toma nota de la relación de vacíos inicial. Finalmente se llena la cámara triaxial con agua destilada y se aplica presión confinante (0.2 a 0.25 kg/cm^2). Se suspende el vacío aplicado a la probeta y se procede a saturarla.

3.2.2 Método de saturación de los especímenes.

Después de formar los especímenes se hace circular bióxido de carbono (CO_2) y posteriormente agua destilada y desaerada desde la base de la probeta, con el propósito de desplazar y desalojar con mayor facilidad el aire atrapado en los conductos intersticiales del suelo. Se emplea CO_2 por ser un gas más pesado que el aire, además de ser muy soluble en agua permitiendo que ésta pueda desplazarlo fácilmente. El CO_2 se aplica por espacio de 25 minutos con una presión menor que la de confinamiento. El agua desaerada circula bajo la aplicación de un esfuerzo efectivo de 0.2 kg/cm^2 y una pequeña carga hidráulica (2 ó 3 cm de columna de mercurio) a través de un tanque de saturación especialmente diseñado para este fin (Ibarra, 1989); la circulación finaliza cuando se tenga una cantidad de agua igual a cinco veces el volumen del espécimen. Posteriormente, de manera simultánea y en la misma cantidad, se incrementa la presión confinante y la contrapresión, de tal manera que los esfuerzos efectivos del material se mantengan constantes. Estos incrementos se aplican aproximadamente cada 10 minutos, tiempo suficiente para que se redistribuya y uniforme el estado de esfuerzos en el suelo.

La saturación de un espécimen mediante contrapresión permite disolver el aire contenido en la probeta de suelo así como cualquier burbuja de aire que se encuentre en las líneas de drenaje o entre las conexiones del sistema de saturación. La magnitud de la contrapresión necesaria para conseguir un determinado grado de saturación, se calcula aplicando la ley de Henry, para cuantificar el volumen de aire que se puede disolver en un volumen de agua dado, al aplicar un incremento de presión. Para una presión determinada el volumen de aire que se puede disolver es constante y depende de los siguientes factores:

- Presión inicial del aire de la muestra
- Grado de saturación inicial
- Cantidad de aire disuelto en el agua inicialmente

La solubilidad del aire en el agua es un fenómeno de transferencia de masa; intervienen como variables algunos factores adicionales como la temperatura u la magnitud de la superficie de contacto agua-aire. Por tanto, la función principal de la contrapresión es reducir el volumen de la burbuja, lo cual acelera la transferencia de las moléculas de aire al agua.

Para las probetas ensayadas en este estudio se emplearon contrapresiones al final de la etapa de saturación de 2.8 y 3.1 kg/cm².

La saturación de los especímenes se verificó midiendo el coeficiente de presión de poro B de Skempton que en ningún caso fue menor de 0.98. Antes de la consolidación del espécimen y con el drenaje cerrado se aplica un incremento del esfuerzo de confinamiento, $\Delta\sigma_3$, y se mide la respuesta de la presión de poro, Δu , generada por este incremento. El coeficiente B está dado por la relación entre los incrementos de presión de poro y presión confinante:

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3}$$

Si $B < 1$, se aplica un incremento de contrapresión igual al incremento de presión confinante. Cuando el espécimen se encuentra totalmente saturado, $B = 1$, entonces se procede a consolidarlo hasta alcanzar el esfuerzo efectivo de consolidación.

3.2.3 Etapa de consolidación.

Los especímenes se consolidaron isotrópica y anisotrópicamente a una presión efectiva de 2.0 kg/cm² para examinar los efectos de la magnitud del esfuerzo efectivo de consolidación y comparar los resultados con los presentados por Mesa (1991) y Lagunas (1992).

En esta etapa se mantiene abierta la válvula de drenaje para permitir la expulsión de agua y registrar los cambios volumétricos. Los cambios volumétricos de un suelo parcialmente saturado difieren de los de un cien por ciento saturado puesto que las burbujas de aire son altamente compresibles comparadas con la compresibilidad del agua intersticial, además de que su presencia limita el flujo libre del agua a través de los conductos intersticiales del material modificando su permeabilidad, lo cual resulta más marcado mientras más finos contenga el suelo (Mesa, 1991).

En especímenes consolidados anisotrópicamente, en primer lugar se aproxima la parte superior del cabezal unida al vástago del pistón lo más cerca posible a la parte inferior del cabezal colocada sobre la probeta de suelo. A continuación se enciende el sistema de motores de paso y se establece el contacto entre las partes inferior y superior del cabezal subiendo la

probeta mediante el sistema de doble tornillo acoplado a la cámara triaxial. Finalmente se consolidan los especímenes, aplicando automáticamente los esfuerzos con el programa de computadora para el tipo de consolidación deseado. Los incrementos de presión se aplican cada 2 minutos; cuando se alcanza el máximo esfuerzo efectivo de consolidación programado, el espécimen de suelo se deja reposar una hora. Este tiempo resultó el adecuado para la consolidación de las probetas y se utilizó para estandarizar los ensayos (Lagunas, 1992).

3.2.4 Etapa de falla.

La etapa de falla se llevó a cabo con esfuerzos controlados (0.2 kg/cm² cada tres minutos) bajo condiciones no drenadas, aplicando cargas verticales en compresión o extensión.

Al finalizar la consolidación del espécimen se cierra la válvula de drenaje con el propósito de registrar el exceso de presión de poro generada durante esta etapa. El exceso de presión de poro es la diferencia entre la presión total intersticial y la contrapresión aplicada durante la consolidación. Finalmente se ejecuta el programa de computadora para el tipo de falla deseado. Los incrementos de carga vertical se aplican cada 3 minutos, tiempo suficiente para uniformar la presión de poro en la probeta.

Los resultados experimentales se analizan a través de curvas de esfuerzo desviador, σ_d y de exceso de presión de poro, Δu , contra deformación axial, ϵ_a . También se presentan las trayectorias de esfuerzos efectivos en términos de s' como abscisas y t' como ordenas.

$$s' = \frac{\sigma'_v + \sigma'_h}{2} \qquad t' = \frac{\sigma'_v - \sigma'_h}{2}$$

en donde σ'_v y σ'_h son los esfuerzos efectivos vertical y horizontal, respectivamente.

A partir de las trayectorias de esfuerzos efectivos se puede obtener el ángulo de fricción interna, ϕ' , mediante la relación

$$\tan \phi' = \text{sen } \alpha'$$

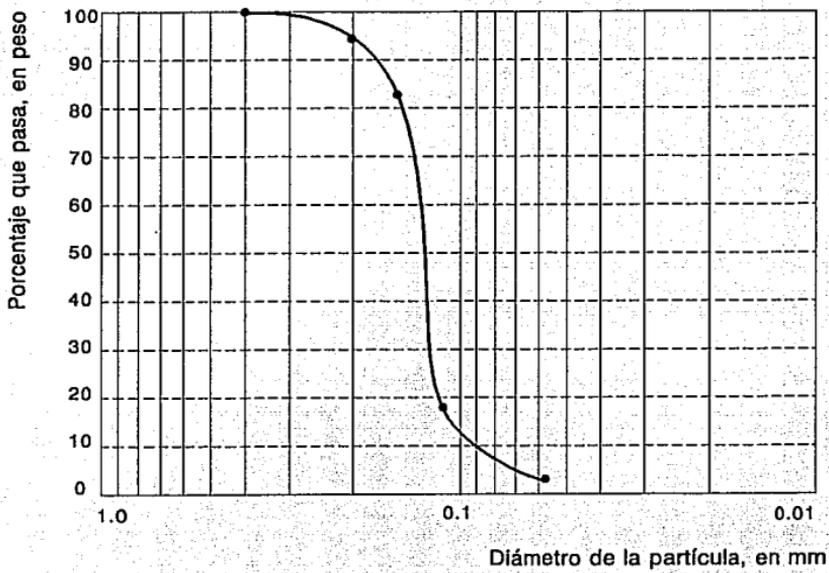
donde α' es el ángulo de la envolvente de falla definida por la trayectoria de esfuerzos efectivos. En la figura 3.5 se demuestra la relación entre los ángulos α' y ϕ' .

Tabla 3.1 Análisis granulométrico de la arena

Malla No.	Abertura	Porcentaje que pasa
40	0.420	100.00
60	0.250	92.50
80	0.177	80.01
100	0.149	18.03
200	0.074	3.42
Color:	Blanco	
Mineralogía:	Cuarzo	
Forma de las partículas:	Subangulosas	
Densidad de sólidos:	2.66	
Relación de vacíos máxima, $e_{máx}$:	1.015	
Relación de vacíos mínima, $e_{mín}$:	0.729	
Coefficiente de uniformidad, C_u :	1.480	
Coefficiente de curvatura, C_c :	1.310	
Clasificación según el SUCS:	SP (arena mal graduada)	

Tabla 3.2 Características y propiedades índice del caolín

Color:	Blanco
Densidad de Sólidos, Gs:	2.60
Límite Líquido:	44.50%
Límite Plástico:	34.20%
Índice de Plasticidad:	10.30%
Clasificación de acuerdo a la mineralogía:	Caolinita
Clasificación según el SUCS:	ML



$D_{10} = 0.115 \text{ mm}$
 $D_{30} = 0.160 \text{ mm}$
 $D_{60} = 0.170 \text{ mm}$

$C_u = 1.48$
 $C_c = 1.31$

Fig 3.1 Granulometría de la arena utilizada

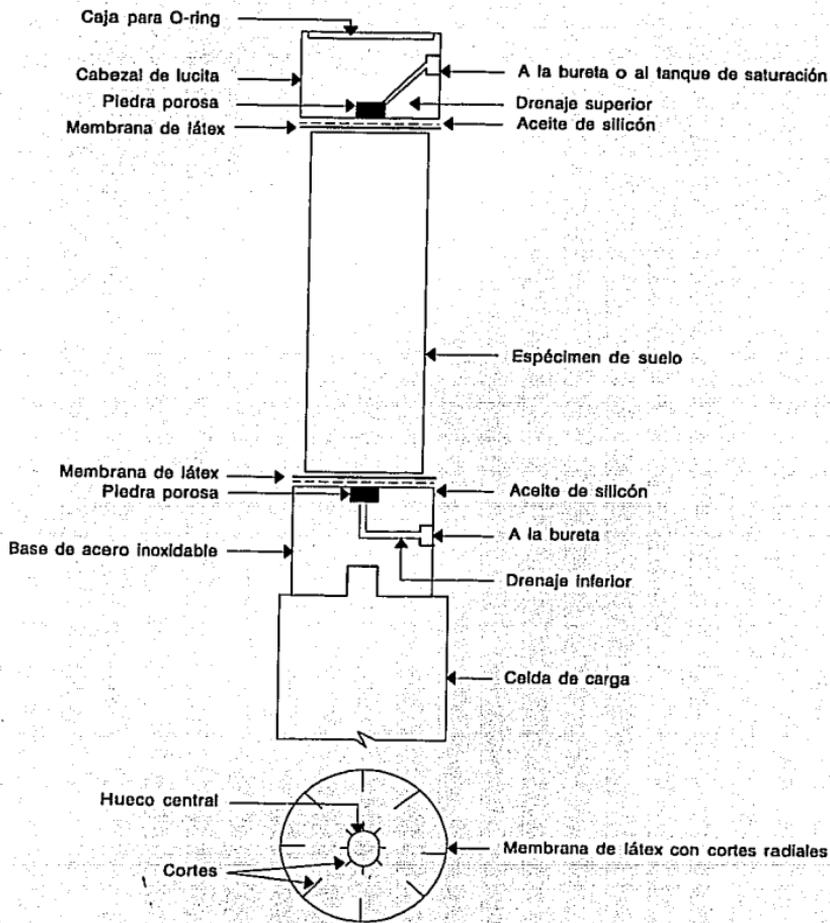
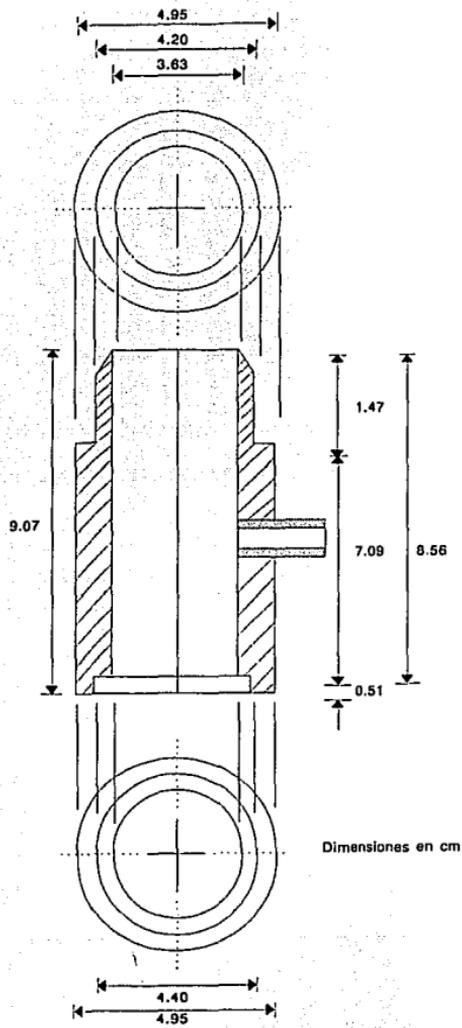


Fig 3.2 Elementos principales en el sistema de extremos lubricados



Dimensiones en cm

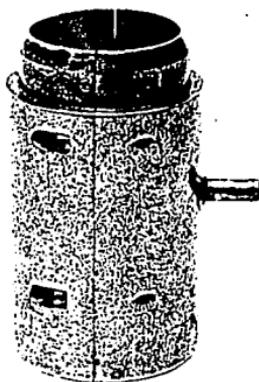
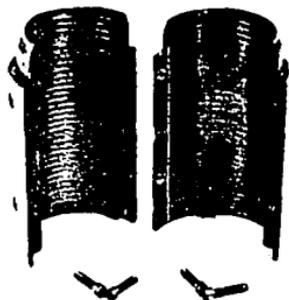
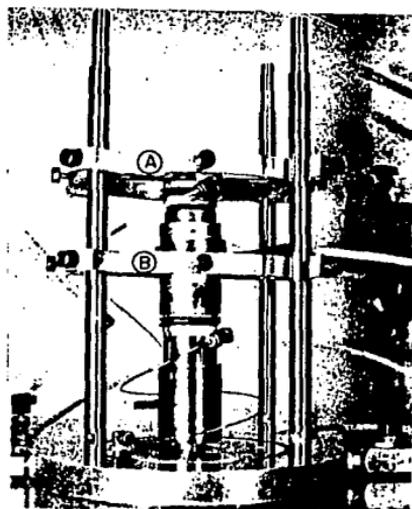
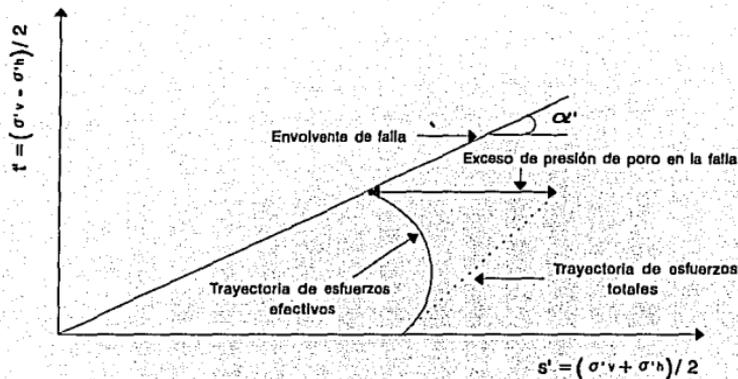


Fig 3.3 Molde empleado en la formación de especímenes

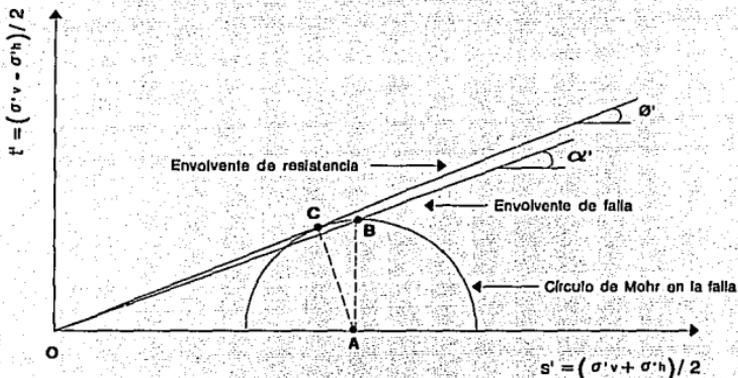


- A** Soporte para el cabezal de lucita
B Soporte para el molde

Fig 3.4 Soportes utilizados en el montaje de los especímenes



a) Trayectoria de esfuerzos efectivos y esfuerzos totales



b) Condición de falla

Del triángulo OAB : $\tan \alpha' = \frac{AB}{OA}$
 Del triángulo OAC : $\sen \phi' = \frac{AC}{OA}$

Las distancias AB y AC son iguales al radio del círculo. Por tanto:

$$\tan \alpha' = \sen \phi'$$

Fig 3.5 Relaciones entre los ángulos α' y ϕ'

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este capítulo se presentan los resultados de los ensayos realizados para observar el comportamiento esfuerzo-deformación y presión de poro-deformación de las mezclas arena-caolín.

4.1 CONDICIONES DE LOS ENSAYES.

4.1.1 Características de los especímenes y tipos de ensayos.

Para las probetas de arena formadas con diferentes contenidos de caolín (3, 5 y 7% en peso), variando la relación de vacíos inicial desde estados muy sueltos ($e_i = 1.130$, $Dr_i = 1.0\%$) hasta estados densos ($e_i = 0.690$, $Dr_i = 100\%$), se observó el comportamiento del material en ensayos triaxiales de compresión y extensión consolidados no drenados con medición de presión de poro (pruebas tipo \overline{CU}). Los especímenes se consolidaron isotrópicamente y anisotrópicamente bajo un esfuerzo efectivo octaédrico, $p'_o (= \sigma'_o)$, de 2.0 kg/cm^2 ; además, se incluyen en el estudio algunos ensayos realizados por Lagunas (1992) que fueron consolidados bajo un esfuerzo efectivo octaédrico $p'_o = 1.0 \text{ kg/cm}^2$.

Las muestras consolidadas anisotrópicamente se sometieron a diferentes trayectorias de consolidación con valores del cociente de esfuerzos efectivos K de 0.44, 0.53 y 0.62 para cada mezcla arena-caolín y densidad estudiada.

En la discusión de los resultados, se hace referencia al punto de colapso estructural que en este trabajo se define como el estado de esfuerzos y deformaciones inmediatamente anterior al inicio del corrimiento entre los contactos intergranulares, es decir al inicio de la destrucción de la estructura original de los especímenes. Cuando se presenta el colapso estructural ocurre una falla súbita a gran velocidad de deformación. En los especímenes sueltos o muy sueltos, el punto de colapso se presenta cuando se llega al esfuerzo desviador máximo.

4.1.2 Condiciones impuestas por el equipo experimental.

El colapso de la estructura en las muestras muy sueltas (en promedio: $e_i = 1.130$, $Dr_i = 1.0\%$), consolidadas isotrópicamente y anisotrópicamente ensayadas en compresión, se presenta de manera súbita a gran velocidad de deformación. Para analizar las condiciones del ensayo

durante el colapso se estudió la respuesta de los transductores de fuerza axial, de deformación y de presión de poro.

En la gráfica de la figura 4.1 se presenta la variación de la fuerza axial como función del tiempo. La fuerza axial aumenta durante el ensaye hasta llegar a un máximo en el punto de colapso y después disminuye bruscamente en un intervalo de tiempo muy corto (del orden de 2 a 3 décimas de segundo). En este intervalo la fuerza se reduce escalonadamente lo que sugiere que la fricción del vástago afecta la magnitud de la fuerza axial registrada durante el colapso.

Los detalles de las figuras 4.2a y 4.2b indican cómo la probeta muy suelta alcanza en un corto tiempo a generar su máxima presión de poro al mismo tiempo que se deforma a una gran velocidad, llegando rápidamente al estado estable. Al conocer este comportamiento podemos establecer que los datos obtenidos de la presión de poro en el momento en que se mantiene constante (estado estable) son certeros, pero no teniendo la misma seguridad en los otros puntos. Además, en estas figuras podemos distinguir cómo influye la compacidad inicial en el comportamiento de la presión de poro y la deformación a través del tiempo transcurrido en la etapa de falla; durante la prueba en la probeta densa aumentan gradualmente con el tiempo la deformación y la presión de poro mientras que, en la suelta y muy suelta van creciendo paulatinamente hasta llegar a la destrucción de la estructura del suelo desarrollando grandes velocidades tanto de deformación como de generación de presión de poro.

En las figuras 4.3 a 4.6 se presentan las curvas obtenidas de los resultados experimentales en probetas muy sueltas ensayadas en compresión, igualmente las curvas y trayectorias que pudieron haber seguido realmente en el caso de que la medición de la presión de poro no hubiera presentado las dificultades mencionadas.

De lo anterior se concluye que al final de estos ensayes, las deformaciones varían linealmente con el tiempo lo que implica que las muestras alcanzan el estado estable. La presión de poro desarrollada durante el colapso estructural logra estabilizarse en el estado estable por tanto los esfuerzos efectivos medidos en ese punto son certeros.

4.2 ENSAYES DE COMPRESION Y EXTENSION.

A continuación se ejemplifica el comportamiento de muestras consolidadas isotrópica y anisotrópicamente ensayadas en compresión y extensión. Para el análisis se utilizan los resultados típicos que ilustran la influencia de la relación de vacíos inicial y el contenido de finos. En el apéndice B se describe el comportamiento de cada uno de los especímenes que se ensayaron en términos de curvas de esfuerzo desviador y exceso de presión de poro contra deformación, así como de trayectorias de esfuerzos efectivos.

4.2.1 Especímenes consolidados isotrópicamente.

En las figuras 4.7 a 4.9 se presentan resultados de ensayos triaxiales de compresión y extensión, efectuados en especímenes consolidados isotrópicamente con diferentes densidades y varios contenidos de caolín. En estas figuras se observa lo siguiente:

1. Los especímenes ensayados en extensión mostraron, a pequeñas deformaciones, una rigidez mucho mayor. La resistencia fue mayor en los especímenes ensayados en compresión.
2. En las curvas esfuerzo-deformación de los ensayos en compresión, para las probetas sueltas la zona de alta velocidad de deformación llega a deformaciones de 6.0 y 13.0%, mientras que en los especímenes ensayados en extensión esta zona alcanza valores de deformación mayores de 20.0%.
3. El esfuerzo desviador máximo para las probetas ensayadas en compresión se alcanza a deformaciones de 0.84 y 1.16% en un tiempo que varía entre doce y dieciocho minutos. En los ensayos de extensión se alcanza a deformaciones de 0.30 a 0.46% en un tiempo aproximado de una hora con cuarenta y cinco minutos.
4. Inmediatamente después del colapso de la estructura ocurre una disminución mayor del esfuerzo desviador en los especímenes ensayados en compresión; esta reducción es aún mayor en las probetas muy sueltas ensayadas tanto en compresión como en extensión.
5. El esfuerzo desviador máximo, σ'_{dq} , para las muestras densas, fue mayor en la ensayada en compresión (2.0 kg/cm²) que en la ensayada en extensión (1.04 kg/cm²).
6. En las probetas sueltas y muy suelta, el esfuerzo cortante máximo, τ'_{dq} , fue prácticamente el mismo si se normalizan los resultados con respecto a la magnitud de la presión de consolidación; en compresión fue de 0.21 a 0.24 de p'_o (con $p'_o = 1.0$ kg/cm²) y de 0.20 de p'_o (con $p'_o = 2.0$ kg/cm²) mientras que para los ensayos en extensión fue de 0.18 a 0.19 de p'_o (con $p'_o = 2.0$ kg/cm²).
7. La presión de poro inducida para el esfuerzo desviador máximo en las muestras más densas y con densidad media, ensayadas tanto en compresión como en extensión, fue del orden de 29.5 a 58% del valor de p'_o .
8. El exceso de presión de poro máximo generado durante la etapa de falla para las probetas sueltas ensayadas en compresión y extensión, fue del 71 a 93% del valor de p'_o a diferencia de la muestra muy suelta que generó 100% de p'_o (licuación total) en compresión y en extensión generó 93% del esfuerzo efectivo de consolidación.
9. En los especímenes ensayados en compresión y extensión, el exceso de presión de poro aumenta a medida que se incrementa el contenido de caolín.

10. Las trayectorias de esfuerzos efectivos en ambos tipos de ensayos muestran formas diferentes. Las trayectorias de los ensayos en extensión llegan, en un determinado momento, casi al origen del espacio indicando que tienen un mayor tiempo de comportamiento contractivo que las muestras ensayadas en compresión.
11. El ángulo de fricción interna movilizado en el esfuerzo desviador máximo, ϕ'_s , en los ensayos en compresión varía de 18.0° a 19.9° , mientras que los de extensión se encuentran entre 13.6° y 13.9° .
12. El ángulo de fricción interna en la envolvente de falla, ϕ' , para los especímenes ensayados en compresión varía de 29.9° a 30.7° . En los ensayos de extensión, el ángulo ϕ' , cuando se inicia el comportamiento dilatante del suelo, varía entre 29.8° y 30.8° .

4.2.2 Especímenes consolidados anisotrópicamente.

A continuación se compara el comportamiento típico de muestras consolidadas anisotrópicamente sometidas a diferentes trayectorias de consolidación en las que el cociente de esfuerzos efectivos tomo valores de 0.44, 0.53 y 0.62. Después de la consolidación anisotrópica los especímenes se llevaron a la falla en compresión y en extensión.

4.2.2.1 Especímenes consolidados anisotrópicamente con $K = 0.44$.

En las figuras 4.10 a 4.12 se muestran los resultados de los ensayos triaxiales de compresión y extensión en especímenes con diferentes contenidos de caolín y densidades. Los resultados obtenidos en las pruebas permiten hacer las siguientes observaciones:

1. Los especímenes ensayados en extensión presentaron, a bajas deformaciones, una mayor rigidez. La resistencia fue mayor en los especímenes ensayados en compresión.
2. En las curvas esfuerzo-deformación de los ensayos de compresión, para las probetas sueltas, la zona de alta velocidad de deformación se extiende hasta deformaciones de 5.2 a 7.6%; en cambio, en los especímenes ensayados en extensión, esta zona alcanza deformaciones de 18.0%.
3. El punto de colapso en los ensayos de compresión se alcanza a deformaciones de 0.08 y 0.16% en un tiempo entre siete y nueve minutos. En los ensayos de extensión se alcanza en deformaciones de 0.65 y 0.82% en un tiempo aproximado de tres horas.
4. Inmediatamente después del punto de colapso hay una disminución mayor del esfuerzo desviador en los especímenes ensayados en compresión, siendo aún más crítica esta reducción en las probetas muy sueltas.

5. El esfuerzo cortante máximo, para las muestras densas, fue mayor en la ensayada en compresión (1.19 kg/cm^2) que la ensayada en extensión (0.28 kg/cm^2). En las probetas sueltas y muy sueltas fue prácticamente la misma, de 0.95 a 1.01 kg/cm^2 en compresión y de 0.06 y 0.09 kg/cm^2 en extensión.
6. El exceso de presión de poro generado en las muestras sueltas ensayadas en compresión fue mayor, a mayor cantidad de finos. La muestra muy suelta presentó un exceso de presión de poro mayor que las probetas sueltas. Para las muestras en extensión se generó prácticamente la misma presión de poro en las probetas sueltas y muy suelta.
7. La magnitud máxima de presión de poro generada en las probetas sueltas ensayadas en extensión, fue del orden de 58 a 62.5% de p'_o , mientras que en los ensayos en compresión fue de 33 a 38% de p'_o . En las muestras densas se generó 29% de p'_o para la muestra en extensión y 12% de p'_o en compresión. Las muestras muy sueltas ensayadas en compresión alcanzaron 85.5% de p'_o , mientras que en extensión sólo llegaron a 64% del valor de p'_o .
8. En los ensayos de compresión, la presión de poro inducida en el punto de colapso fue de 4.5 a 10.5% de p'_o , y en los de extensión de 41.5 a 49.5% de p'_o .
9. Las trayectorias de esfuerzos efectivos en los dos tipos de pruebas son diferentes. En los ensayos de extensión se llega casi al origen del espacio $s'-t'$ antes del inicio de la tendencia dilatante en las muestras sueltas y muy sueltas. Para los ensayos en compresión, la muestra muy suelta alcanza el origen del espacio de esfuerzos, reduciendo en forma rápida sus esfuerzos efectivos.
10. En los ensayos en compresión, los ángulos de fricción interna movilizados en el punto de colapso, ϕ'_q , resultan muy parecidos en las probetas sueltas (22.0° a 22.3°) siendo un poco menor en la probeta muy suelta (21.2°); en los ensayos en extensión se presenta en 13.1° para las muestras sueltas y en 11.1° para la probeta muy suelta.
11. El ángulo de fricción interna, ϕ' , fue mayor en las probetas ensayadas en extensión variando de 29.0° a 31.6° mientras que en los ensayos en compresión varía de 28.5° a 30° .

4.2.2.2 Especímenes consolidados con $K = 0.53$ y 0.62 .

El comportamiento típico mostrado por las probetas consolidadas anisotrópicamente bajo valores de K de 0.53 y 0.62 , ensayadas en compresión y extensión, es comparable en forma cualitativa al que presentan las muestras consolidadas anisotrópicamente bajo un cociente de esfuerzos de 0.44 . Por tanto, teniendo como marco de referencia el análisis presentado en el numeral anterior, a continuación sólo se presentan las figuras que describen el comportamiento esfuerzo desviador y la generación de presión de poro contra deformación así como las

trayectorias de esfuerzos efectivos de esta serie de pruebas teniendo presente el efecto de la densidad inicial, el contenido de finos y la dirección de aplicación de la carga.

Las figuras 4.13 a 4.15 presentan los resultados obtenidos al ensayar probetas consolidadas anisotrópicamente con $K = 0.53$ ensayadas en compresión y extensión en las diferentes condiciones analizadas.

Los resultados de los ensayos en probetas consolidadas anisotrópicamente con $K = 0.62$ ensayadas en compresión y extensión se muestran en las figuras 4.16 a 4.18.

4.3 COMPORTAMIENTO DE PROBETAS CONSOLIDADAS CON DIFERENTES COCIENTES DE ESFUERZOS EFECTIVOS K.

A continuación se discute el comportamiento típico de las probetas consolidadas bajo diferentes cocientes de esfuerzos efectivos ($K = 1.0, 0.62, 0.53$ y 0.44) manteniendo constantes la relación de vacíos al inicio del ensayo y el contenido de finos.

4.3.1 Pruebas en compresión.

4.3.1.1. Probetas densas.

En la tabla 4.1 y figura 4.19 se resumen los resultados obtenidos al hacer ensayos en muestras densas que contienen 3% de finos, consolidadas bajo diferentes cocientes de esfuerzos efectivos.

La probeta consolidada bajo un cociente de esfuerzos $K = 0.44$, resultó ser la más rígida ya que al final de la consolidación anisotrópica se tiene un esfuerzo cortante acumulado que resulta mayor en los especímenes que siguen una trayectoria de consolidación con un valor de K menor (fig 4.19a). En estas pruebas el tiempo necesario para llegar al esfuerzo desviador máximo, punto en el que se registra la máxima presión de poro, es de cuarenta minutos para la probeta consolidada a un menor cociente de esfuerzos ($K = 0.44$) y va en aumento hasta un tiempo de dos horas con treinta minutos para el espécimen consolidado isotrópicamente ($K=1.0$).

Según se aprecia en la figura 4.19b, la historia de consolidación afecta el patrón de generación de presión de poro durante la falla. El espécimen consolidado con un $K = 1.0$ genera mayor presión de poro y ésta disminuye conforme se reduce el valor de K . La magnitud máxima del exceso de presión de poro en la probeta consolidada isotrópicamente fue del orden de 38.5% del esfuerzo efectivo de consolidación p'_o ; en las consolidadas anisotrópicamente fue del orden de 12.0 a 21.0% de p'_o .

La trayectoria de consolidación bajo diferentes valores de K no modifica la envolvente de falla, según se observa en las trayectorias de esfuerzos efectivos de estas muestras (fig 4.19c) donde alcanzan ángulos de fricción interna, ϕ' , prácticamente iguales, de 29.2° a 30.2°; el ángulo de fricción interna antes de comenzar la tendencia dilatante, ϕ'_{q_1} , difiere muy poco (24.8° a 26.0°), aumentando ligeramente conforme disminuye el valor de K.

Tabla 4.1 Resultados obtenidos para las probetas densas consolidadas bajo diferentes cocientes de esfuerzos efectivos K y ensayadas en compresión.

Ensayo #	% cno/ln	K	e_i	e_{pl}	Dr_i %	Dr_{pl} %	p'_o kg/cm ²	σ'_{dq} kg/cm ²	$\Delta u_{máx}$ kg/cm ²	ϕ'_{q_1} grados	ϕ' grados
53	3	1.00	0.690	0.743	110.9	96.5	2.0	2.00	0.77	24.8	30.2
49	3	0.62	0.688	0.741	111.4	97.0	2.0	2.21	0.42	25.1	29.7
35	3	0.53	0.790	0.846	83.7	68.4	2.0	2.14	0.37	25.4	29.2
34	3	0.44	0.763	0.818	91.0	76.0	2.0	2.38	0.24	26.0	30.0

4.3.1.2: Probetas sueltas.

En la tabla 4.2 y figura 4.20 se presentan los resultados de ensayos realizados en probetas sueltas con 5% de finos consolidadas bajo diferentes cocientes de esfuerzos efectivos, K. Estas muestras se consolidaron hasta un esfuerzo efectivo de 1.0 kg/cm² (ensayo *140) y de 2.0 kg/cm² (ensayos 52, 23 y 4) por lo que la normalización de los datos se hace necesario con respecto al esfuerzo efectivo al final de la consolidación, p'_o , para comparar sus resultados.

Las curvas de la figura 4.20a muestran que la rigidez aumenta a medida que disminuye el cociente de esfuerzos efectivos de consolidación siendo más resistente la muestra consolidada bajo un K = 0.44. Sin embargo, el incremento de esfuerzos desviadores con respecto al estado de esfuerzos al final de la consolidación es menor en estos últimos y aumenta con el valor de K. El esfuerzo desviador máximo (punto de colapso), σ'_{dq} , se alcanza en un tiempo mayor en el espécimen consolidado isotrópicamente (21 minutos) reduciéndose este tiempo en las probetas consolidadas anisotrópicamente variando entre 7 a 18 minutos a medida que se emplea un valor menor de K.

La magnitud máxima del exceso de presión de poro disminuye con el valor de K aplicado durante la consolidación; para la muestra consolidada con K = 1.0 fue del orden de 89% de p'_o , mientras que en las anisotrópicamente consolidadas fue de 33.5 a 55% de p'_o , variando a medida que disminuye el valor de K (fig 4.20b).

La trayectoria de consolidación no modifica la envolvente de falla. Los ángulos de fricción interna, ϕ' , varían de 29.6° a 30.7°, como se observa en la figura 4.20c. En el

momento de colapsar la estructura del suelo se movilizan ángulos de fricción interna, ϕ'_q , que difieren un poco siendo mayor a menor valor de K (19.9° a 22.2°).

Tabla 4.2 Resultados obtenidos para las probetas sueltas consolidadas bajo diferentes cocientes de esfuerzos efectivos K y ensayadas en compresión.

Ensaye /	% caolin	K	e_1	e_{2f}	Dr ₁ %	Dr _{2f} %	p'_v kg/cm ²	σ'_{vd}/p'_v kg/cm ²	$\Delta u_1/p'_v$ kg/cm ²	$\Delta u_{máx}/p'_v$ kg/cm ²	ϕ'_{10} grados	ϕ'_q grados
*140	5	1.00	0.923	1.024	49.5	22.9	1.0	0.46	0.57	0.89	19.9	30.7
52	5	0.62	0.881	0.980	60.5	34.5	2.0	0.67	0.22	0.55	20.3	29.6
23	5	0.53	0.904	1.004	54.5	28.2	2.0	0.79	0.14	0.55	21.0	30.2
4	5	0.44	0.908	1.008	53.4	27.1	2.0	1.01	0.06	0.33	22.2	29.0

*1 : prueba realizada por Lagunas (1992).

4.3.1.3. Probetas muy sueltas.

Los resultados de las pruebas que se llevaron a cabo en las probetas muy sueltas con 7% de finos consolidadas bajo diferentes cocientes de esfuerzos efectivos; se resumen en la tabla 4.3 y la figura 4.21.

Nuevamente, la rigidez de estas muestras se modifica por la historia de consolidación, siendo mayor a menor valor de K. El esfuerzo cortante máximo se incrementa a medida que disminuye el cociente de esfuerzos efectivos de consolidación variando de 0.41 a 0.96 kg/cm², según se observa en la figura 4.21a. El tiempo para alcanzar el esfuerzo desviador máximo (punto de colapso) aumenta igualmente con el valor de K siendo de una hora con veinte minutos para la muestra consolidada bajo un K = 1.0 y variando de nueve a quince minutos para las consolidadas anisotrópicamente con diferentes valores de K.

El patrón de generación de presión de poro también se modifica por el valor de K empleado durante la consolidación; genera más presión de poro la muestra consolidada isotrópicamente y disminuye a medida que se hace menor el valor de K (fig 4.21b). En la muestra consolidada isotrópicamente se generó 100% de p'_{v0} mientras que en las demás muestras se desarrolló de 85.5 a 95% de p'_{v0} .

Antes de iniciarse la tendencia dilatante se movilizaron ángulos de fricción interna, ϕ'_q , que varían con la trayectoria; este ángulo es mayor a menor valor de K (fig 4.21c), alcanzando valores que varían entre 18.0° a 21.2°. El ángulo de fricción interna, ϕ'_1 , cambió poco con la trayectoria de consolidación, presentándose ángulos que varían entre 28.5° y 30.5°.

Tabla 4.3 Resultados obtenidos para las probetas sueltas con 7% de finos consolidadas bajo diferentes K y ensayadas en compresión.

Ensayo #	% caolln	K	e_i	e_{gl}	Dr_1 %	Dr_{gl} %	p'_o kg/cm ²	σ'_{dq} kg/cm ²	Δu_q kg/cm ²	Δu_{max} kg/cm ²	ϕ'_q grados	ϕ'_s grados
44	7	1.00	1.066	1.222	17.5	-22.6	2.0	0.82	1.13	2.29	18.0	30.5
43	7	0.62	1.077	1.233	14.7	-25.4	2.0	1.27	0.42	1.90	18.6	29.7
42	7	0.53	1.077	1.234	14.7	-25.7	2.0	1.50	0.33	1.79	20.7	29.8
41	7	0.44	1.134	1.294	0	-41.1	2.0	1.91	0.09	1.71	21.2	28.5

4.3.2 Pruebas en extensión.

4.3.2.1. Probetas densas.

En la tabla 4.4 y la figura 4.22 se muestran los resultados de las pruebas efectuadas en probetas densas con 3% de finos, consolidadas bajo diferentes cocientes de esfuerzos efectivos K y llevadas a la falla en extensión.

Según la figura 4.22a, los especímenes muestran una gran rigidez al inicio de la prueba, siendo mayor a medida que aumenta el cociente de esfuerzos efectivos de la consolidación, caso contrario de lo que mostraron las probetas ensayadas en compresión. El tiempo para alcanzar el esfuerzo desviador máximo varía de acuerdo al valor de K siendo mayor para las muestras que fueron consolidadas con un $K = 0.44$ (tres horas con veinte minutos) y mucho menor en las isotrópicamente consolidadas (una hora con cuarenta y cinco minutos). El esfuerzo desviador al comenzar la tendencia dilatante, comienza a crecer a medida que aumenta la deformación.

La magnitud máxima del exceso de presión de poro varía con el cociente de esfuerzos efectivos usado en la consolidación; en las muestras consolidadas bajo $K = 1.0$ se generó un exceso de presión de poro del orden de 6.0% de p'_o mientras que, en el resto de las probetas consolidadas a diferentes valores de K se generó de 23.0 a 48.5% del valor de p'_o (fig 4.22b).

Las trayectorias de esfuerzos efectivos no se modifican significativamente por la trayectoria de consolidación (fig 4.22c), obteniéndose ángulos de fricción interna en la envolvente de falla entre 29.8° y 30.6°.

Tabla 4.4 Resultados obtenidos para las probetas densas con 3% de finos consolidadas bajo diferentes cocientes de esfuerzos K y ensayadas en extensión.

Ensaye #	% coefin	K	e_1	e_p	Dr_1 %	Dr_p %	p'_o kg/cm ²	σ'_{dq} kg/cm ²	$\Delta u_{m\acute{a}x}$ kg/cm ²	ϕ'_q grados	ϕ'_i grados
51	3	1.00	0.683	0.735	112.8	98.6	2.0	1.04	0.12	20.8	29.8
50	3	0.62	0.726	0.741	101.1	97.0	2.0	0.71	0.46	20.8	29.9
39	3	0.53	0.785	0.840	85.0	70.0	2.0	0.42	0.97	21.3	30.5
38	3	0.44	0.726	0.780	101.1	86.4	2.0	0.55	0.58	21.8	30.6

4.3.2.2. Probetas sueltas.

En la figura 4.23 y tabla 4.5 se presentan los resultados obtenidos al ensayar probetas sueltas con 5% de finos consolidadas bajo diferentes valores de K, falladas en extensión.

Nuevamente muestran mayor rigidez al comienzo del ensayo los especímenes consolidados con un valor de $K = 1.0$. El esfuerzo desviador máximo, alcanzado en el punto de colapso, disminuye a medida que el valor de K empleado es menor, variando de 0.75 a 0.17 kg/cm², como se observa en la figura 4.23a. El tiempo transcurrido para llegar al esfuerzo desviador máximo, punto de colapso, fue mayor para la muestra consolidada bajo un cociente de esfuerzos efectivos menor ($K = 0.44$) siendo de dos horas con cuarenta y cinco minutos mientras que para la muestra consolidada con $K = 1.0$ tardó una hora con cuarenta y cinco minutos.

La magnitud máxima del exceso de presión de poro es mayor para la muestra consolidada isotrópicamente siendo del orden de 80% de p'_o . Este valor disminuye a medida que es menor el cociente de esfuerzos efectivos K, variando entre 64.5 a 67% de p'_o . Cuando se alcanza este valor máximo, la presión de poro comienza a reducirse iniciando la tendencia dilatante (fig 4.23b).

La trayectoria de consolidación no modifica la envolvente de falla como se observa en la figura 4.23c donde se muestran las trayectorias de esfuerzos efectivos. Los ángulos de fricción interna, ϕ' , variaron entre 29.0° a 31.1°. Al modificarse el valor de K también cambió el valor de ϕ'_q siendo mayor en la probeta consolidada isotrópicamente (13.7°) y disminuyendo para las demás probetas (12.3° a 13.1°).

Tabla 4.5 Resultados obtenidos para las probetas sueltas con 5% de finos consolidadas bajo diferentes cocientes de esfuerzos efectivos K y ensayadas en extensión.

Ensaye #	% caolín	K	e_1	e_{pl}	D_{r1} %	D_{rpl} %	p'_{o1} kg/cm ²	σ'_{d1} kg/cm ²	Δu_{d1} kg/cm ²	$\Delta u_{máx}$ kg/cm ²	ϕ'_{e1} grados	ϕ' grados
30	5	1.00	0.912	1.012	52	26	2.0	0.75	0.80	1.60	13.7	30.8
26	5	0.62	0.924	1.025	49	23	2.0	0.42	0.64	1.31	12.3	30.3
18	5	0.53	0.908	1.009	53	27	2.0	0.28	0.74	1.29	12.5	31.1
8	5	0.44	0.913	1.013	52	26	2.0	0.17	0.99	1.34	13.1	29.0

4.3.2.3. Probetas muy sueltas.

En la tabla 4.6 y la figura 4.24 se presentan los resultados obtenidos en los ensayos que se realizaron en especímenes muy sueltos con 7% de finos consolidados bajo diferentes cocientes de esfuerzos K .

Según se observa en la figura 4.24a, los especímenes muestran gran rigidez al comienzo del ensaye siendo mayor en la probeta que fue consolidada bajo un cociente de esfuerzos $K = 1.0$, disminuyendo a medida que se hace menor el valor de K . La muestra isotrópicamente consolidada alcanzó el esfuerzo desviador máximo en una hora con diez minutos mientras que los especímenes consolidados anisotrópicamente tardaron dos horas con cuarenta minutos.

El espécimen consolidado isotrópicamente generó 93% de p'_{o1} de exceso de presión de poro siendo menor en las probetas consolidadas anisotrópicamente: del orden de 64 a 75% de p'_{o1} . La magnitud máxima de esta presión disminuye a medida que se reduce el cociente de esfuerzos efectivos de consolidación, de donde se infiere que la historia de consolidación afecta el patrón de generación de presión de poro inducido durante la falla (ver fig 4.24b).

Las trayectorias de esfuerzos efectivos no se modifican significativamente por la trayectoria de consolidación, presentándose ángulos de fricción interna, ϕ' , de 29.2° a 31.0° (fig 4.18c). Los ángulos de fricción interna movilizados en el punto de colapso, ϕ'_{q1} , varían de acuerdo al valor de K , siendo mayor para la muestra consolidada a $K = 1.0$ (13.6°) y menor en las demás muestras (11.1° a 12.7°).

Tabla 4.6 Resultados obtenidos para las probetas muy sueltas con 7% de finos consolidadas bajo diferentes cocientes de esfuerzos efectivos K y ensayadas en extensión.

Ensaye #	% caolín	K	e_1	e_{pl}	Dr_1 %	Dr_{pl} %	p'_o kg/cm ²	σ'_{dq} kg/cm ²	Δu_q kg/cm ²	$\Delta u_{máx}$ kg/cm ²	ϕ'_q grados	ϕ' grados
47	7	1.00	1.069	1.225	16.7	-23.4	2.0	0.39	0.85	1.86	13.6	30.5
45	7	0.62	1.087	1.244	12.1	-28.3	2.0	0.28	0.91	1.49	12.7	29.2
46	7	0.53	1.073	1.229	15.7	-24.4	2.0	0.22	0.89	1.34	11.5	31.0
48	7	0.44	1.048	1.203	22.1	-17.7	2.0	0.12	0.83	1.28	11.1	30.2

Con base en esta información, en el siguiente capítulo se llevará a cabo el análisis y la interpretación de los resultados experimentales.

Tabla 4.7 Resumen de resultados experimentales

Ens # - falla	% Caolín	k	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	Dr_f %	Dr_{ef} %	p'_c kg/cm ²	σ'_{dq} kg/cm ²	t'_q kg/cm ²	ϵ_q %	Δu_q kg/cm ²	$\epsilon_{máx}$ %	$\Delta u_{máx}$ kg/cm ²	ϕ'_q grados	ϕ' grados
53-c	3%	1.0	0.690	0.682	0.743	0.734	113.1	98.9	2.0	2.0	1.00	-	-	0.65	0.77	24.8	30.2
*139-c	3%	1.0	0.928	0.918	0.988	0.977	48.8	32.7	1.0	0.48	0.24	0.84	0.58	4.37	0.81	19.0	30.3
*140-c	5%	1.0	0.923	0.914	1.024	1.015	51.8	25.3	1.0	0.46	0.23	0.84	0.57	4.82	0.89	19.9	30.7
*141-c	7%	1.0	0.927	0.916	1.072	1.061	56.0	18.8	1.0	0.41	0.21	0.84	0.58	5.00	0.93	19.7	29.9
44-c	7%	1.0	1.066	1.031	1.222	1.184	26.5	-12.9	2.0	0.82	0.41	1.16	1.13	14.9	2.29	18.0	30.5
49-c	3%	0.62	0.688	0.680	0.741	0.732	113.6	99.6	2.0	2.21	1.11	-	-	0.39	0.42	25.1	29.7
22-c	3%	0.62	0.900	0.874	0.955	0.932	60.8	45.0	2.0	1.31	0.65	0.24	0.46	5.19	1.24	19.3	29.2
52-c	5%	0.62	0.881	0.864	0.980	0.962	65.0	39.2	2.0	1.33	0.67	0.24	0.43	3.27	1.10	20.3	29.6
24-c	7%	0.62	0.903	0.873	1.046	1.014	67.1	30.8	2.0	1.27	0.63	0.24	0.35	7.00	1.39	19.0	29.9
43-c	7%	0.62	1.077	1.018	1.233	1.170	29.8	-9.3	2.0	1.27	0.63	0.24	0.42	13.3	1.90	18.6	29.7
35-c	3%	0.53	0.790	0.783	0.846	0.838	85.6	70.6	2.0	2.14	1.07	-	-	0.55	0.37	25.4	29.2
19-c	3%	0.53	0.921	0.896	0.981	0.954	54.8	39.0	2.0	1.58	0.79	0.16	0.29	6.43	1.06	21.1	29.6
23-c	5%	0.53	0.904	0.873	1.004	0.972	62.6	33.7	2.0	1.58	0.79	0.16	0.27	6.49	1.09	21.0	30.2
20-c	7%	0.53	0.919	0.882	1.063	1.023	64.8	28.5	2.0	1.54	0.77	0.08	0.16	7.25	1.19	19.5	30.3
42-c	7%	0.53	1.077	0.989	1.234	1.139	37.3	-1.3	2.0	1.50	0.75	0.16	0.33	14.5	1.79	20.7	29.8
34-c	3%	0.44	0.763	0.748	0.818	0.802	95.1	80.4	2.0	2.38	1.19	-	-	0.78	0.24	26.0	30.0
3-c	3%	0.44	0.913	0.885	0.972	0.944	57.8	41.7	2.0	2.02	1.01	0.16	0.11	5.27	0.76	22.0	29.0
4-c	5%	0.44	0.908	0.861	1.008	0.976	65.8	35.5	2.0	2.02	1.01	0.16	0.12	5.47	0.67	22.2	29.0
5-c	7%	0.44	0.903	0.864	1.046	1.004	69.4	26.0	2.0	1.93	0.97	0.16	0.21	3.58	0.66	22.3	29.0
41-c	7%	0.44	1.134	1.053	1.294	1.207	20.8	-18.8	2.0	1.91	0.95	0.08	0.09	17.3	1.71	21.2	28.5
51-e	3%	1.0	0.683	0.676	0.735	0.727	114.7	100.8	2.0	1.04	0.52	-	-	0.39	0.12	20.8	29.8
31-c	3%	1.0	0.947	0.924	1.007	0.983	47.1	31.1	2.0	0.53	0.28	0.31	0.59	8.19	1.53	13.9	30.7
30-c	5%	1.0	0.912	0.890	1.012	0.990	58.2	31.8	2.0	0.75	0.37	0.46	0.80	8.65	1.60	13.7	30.8
32-e	7%	1.0	0.933	0.896	1.078	1.038	61.2	24.7	2.0	0.73	0.36	0.49	0.66	7.01	1.42	13.6	30.2
47-c	7%	1.0	1.069	1.027	1.225	1.180	27.5	-11.8	2.0	0.39	0.19	0.46	0.85	10.8	1.86	13.6	30.5
50-e	3%	0.62	0.689	0.679	0.741	0.731	113.9	99.7	2.0	0.71	0.36	-	-	0.62	0.46	20.8	29.9
25-c	3%	0.62	0.924	0.900	0.984	0.959	53.7	37.6	2.0	0.34	0.17	0.47	0.69	5.29	1.32	12.1	30.3
26-e	5%	0.62	0.924	0.902	1.025	1.002	55.0	28.7	2.0	0.42	0.21	0.47	0.64	6.76	1.31	12.3	30.3
27-e	7%	0.62	0.918	0.885	1.062	1.027	64.0	27.5	2.0	0.43	0.22	1.03	0.75	6.92	1.31	13.2	30.5
45-c	7%	0.62	1.087	1.039	1.244	1.193	24.4	-15.2	2.0	0.28	0.14	0.80	0.91	9.56	1.49	12.7	29.2
39-c	3%	0.53	0.785	0.773	0.840	0.828	88.3	73.3	2.0	0.42	0.21	0.70	0.54	3.59	0.97	21.3	30.5
17-c	3%	0.53	0.910	0.880	0.969	0.939	59.1	43.1	2.0	0.27	0.14	0.56	0.77	6.46	1.28	12.5	30.7
18-e	5%	0.53	0.908	0.873	1.009	0.973	62.6	36.3	2.0	0.28	0.14	0.48	0.74	6.34	1.29	12.5	31.1
16-c	7%	0.53	0.886	0.858	1.028	0.998	71.0	35.0	2.0	0.26	0.13	0.56	0.83	4.79	1.36	12.3	30.0
46-c	7%	0.53	1.073	1.019	1.229	1.171	29.6	-9.5	2.0	0.22	0.11	0.72	0.89	8.29	1.34	11.5	31.0
38-e	3%	0.44	0.726	0.716	0.780	0.769	103.8	89.4	2.0	0.55	0.28	-	-	1.65	0.58	21.8	30.6
10-c	3%	0.44	0.914	0.891	0.974	0.949	53.1	40.3	2.0	0.18	0.09	0.64	0.90	6.13	1.25	13.1	31.2
8-e	5%	0.44	0.913	0.880	1.013	0.983	60.8	34.7	2.0	0.17	0.09	0.65	0.99	3.80	1.34	13.1	29.0
15-c	7%	0.44	0.914	0.880	1.058	1.021	65.3	29.0	2.0	0.17	0.09	0.65	0.89	6.81	1.16	13.1	31.6
48-e	7%	0.44	1.048	0.985	1.203	1.134	38.3	0	2.0	0.12	0.06	0.82	0.83	5.82	1.28	11.1	30.2

*1: pruebas realizadas por Leguas (1992)
c: falla en compresión; e: falla en extensión

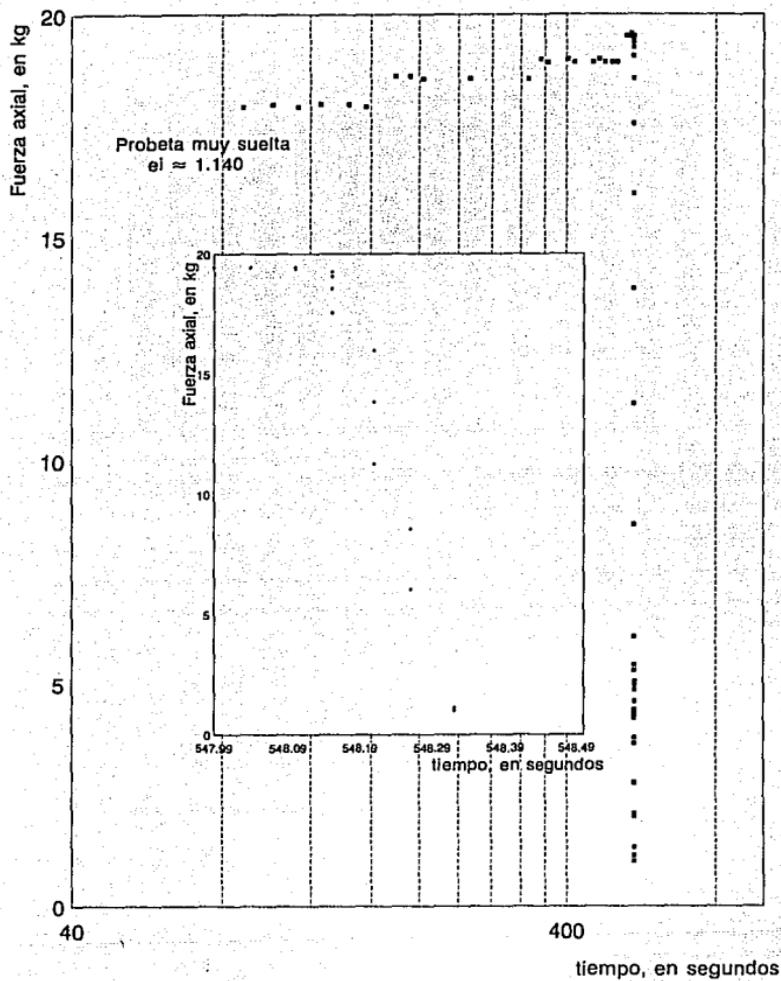


Fig 4.1 Comportamiento fuerza axial contra tiempo transcurrido durante la etapa de falla, de la probeta muy suelta.

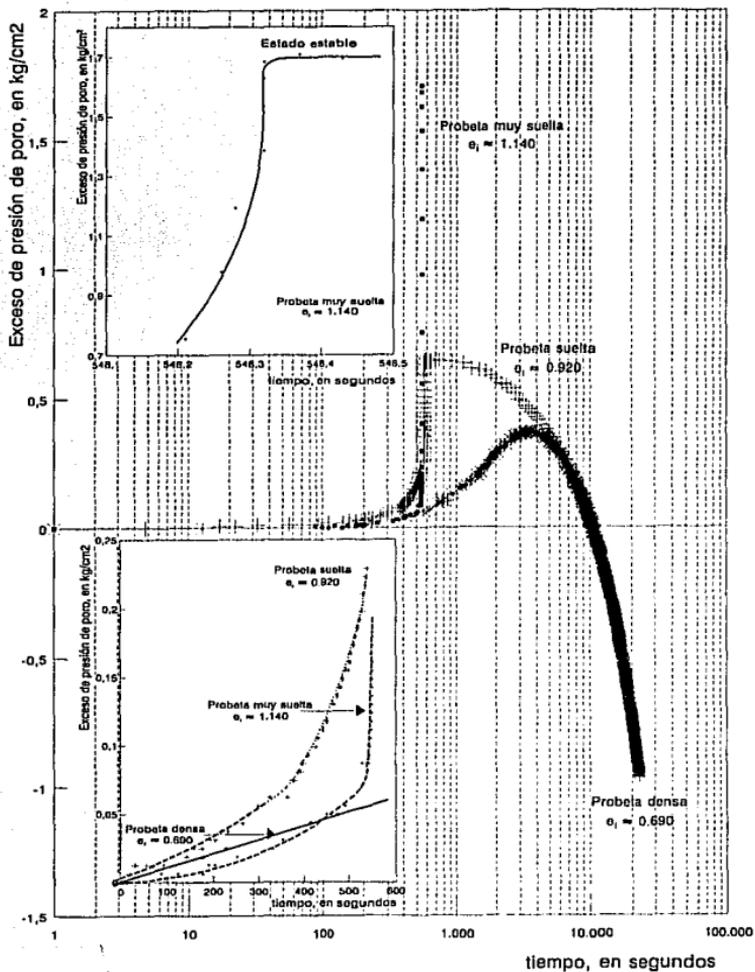


Fig 4.2a

Comportamiento exceso de presión de poro contra tiempo transcurrido durante la etapa de falla, de probetas con diferentes densidades

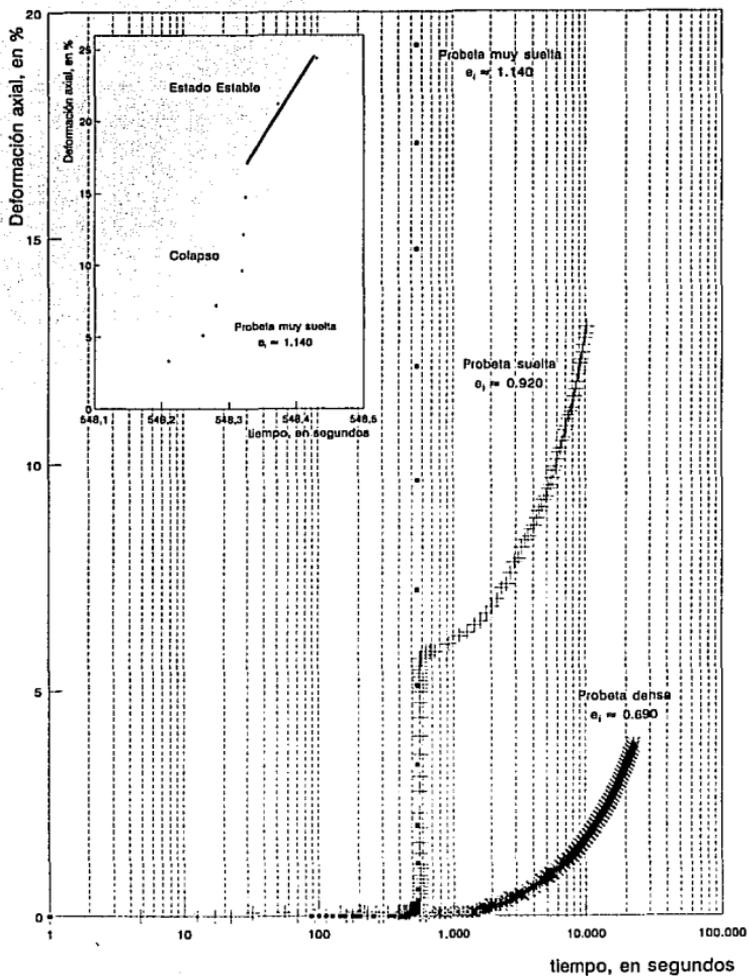


Fig 4.2b

Comportamiento deformación axial contra tiempo transcurrido durante la etapa de falla, de probetas con diferentes densidades

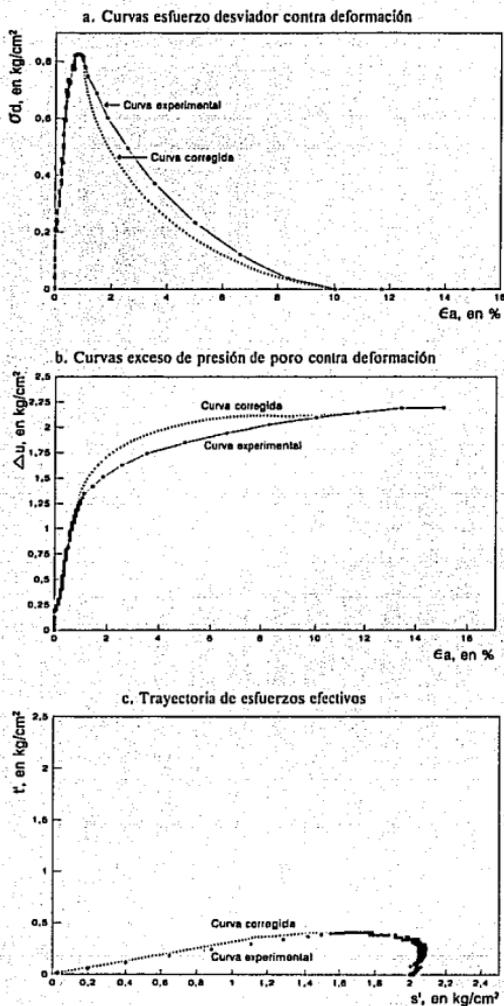


Fig 4.3 Curvas corregida y experimental del esfuerzo desviador, exceso de presión de poro y trayectoria de esfuerzos efectivos de la probeta muy suelta, consolidada isotrópicamente y ensayada en compresión

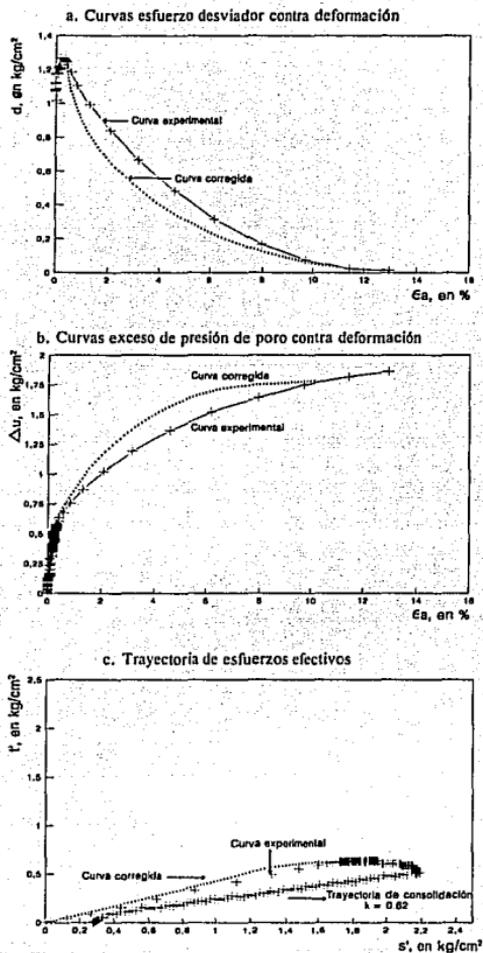


Fig 4.4 Curvas corregida y experimental del esfuerzo desviador, exceso de presión de poro y trayectoria de esfuerzos efectivos de la probeta muy suelta, consolidada anisotrópicamente con $K = 0.62$ y ensayada en compresión

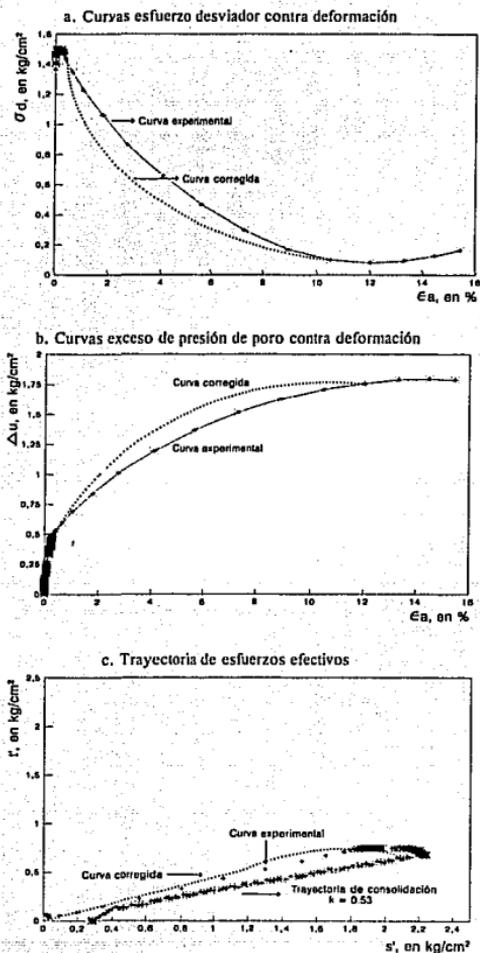


Fig 4.5 Curvas corregida y experimental del esfuerzo desviador, exceso de presión de poro y trayectoria de esfuerzos efectivos de la probeta muy suelta, consolidada anisotrópicamente con $K = 0,53$ y ensayada en compresión

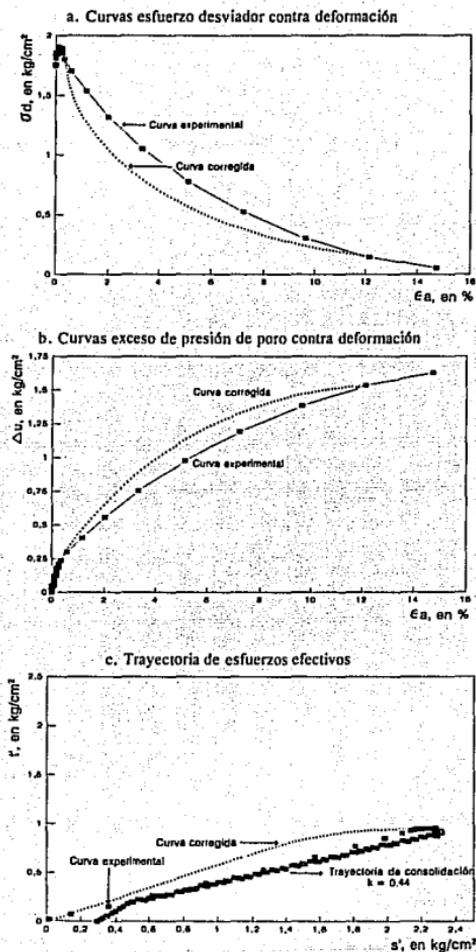
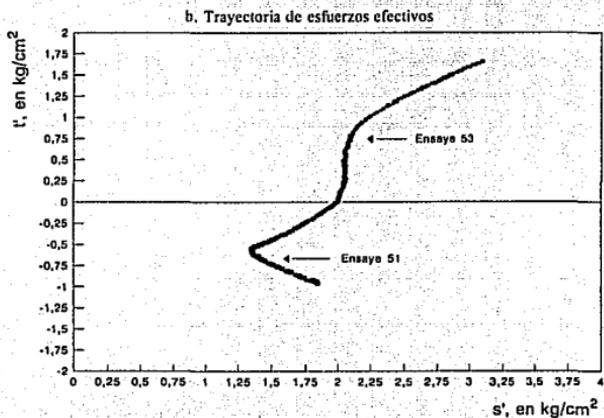
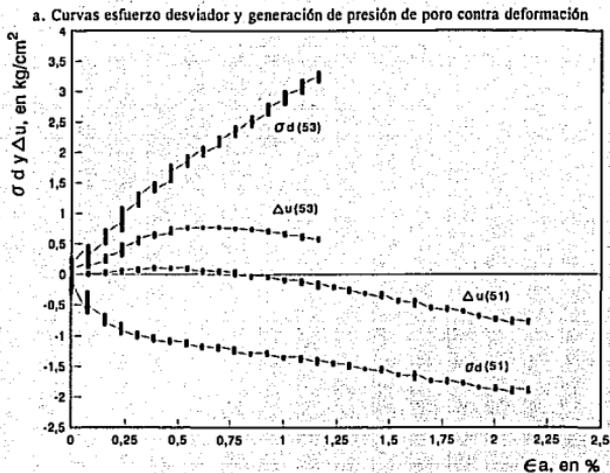
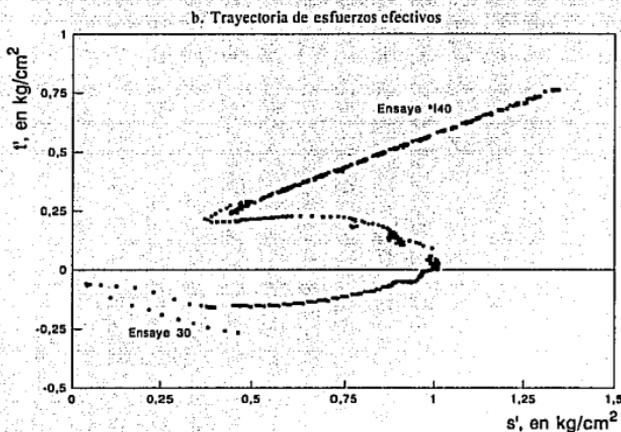
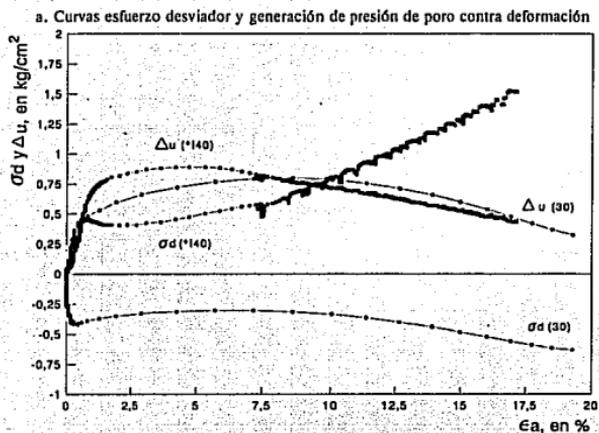


Fig 4.6 Curvas corregida y experimental del esfuerzo desviador, exceso de presión de poro y trayectoria de esfuerzos efectivos de la probeta muy suelta, consolidada anisotrópicamente con $K = 0.44$ y ensayada en compresión



Ensayo #	% de caolín	ϵ_1	ϵ_p	D_{r1} %	D_{rp} %	p'_v kg/cm ²	σ'_v kg/cm ²	Δu_{max} kg/cm ²	ϕ' grados	ϕ'_p grados
51	3	0.791	0.735	112.8	98.6	2.00	1.04	0.12	20.8	29.8
53	3	0.690	0.743	110.9	96.5	2.00	2.00	0.77	24.8	30.2

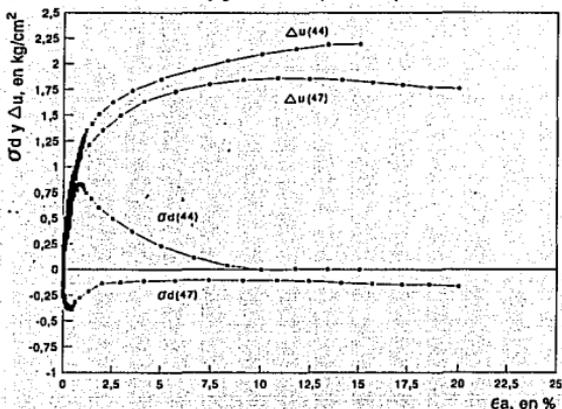
Fig 4.7 Resultados de pruebas en compresión y extensión en especímenes densos con 3% de caolín, consolidadas isotrópicamente



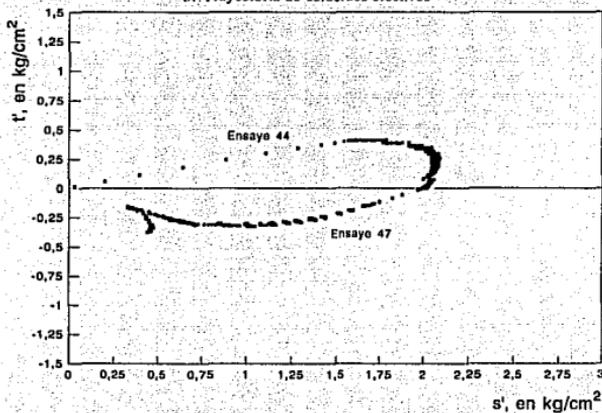
Ensayo #	% de caolín	e_1	e_{fd}	D_{r1} %	D_{r2} %	p'_v kg/cm ²	σ'_{vm} kg/cm ²	σ'_{vd}/p'_v	Δu_e kg/cm ²	$\Delta u_e/p'_v$	Δu_{m1} kg/cm ²	$\Delta u_{m1}/p'_v$	ϕ'_e grados	ϕ' grados
30	5	0.912	1.012	52.4	26.1	2.00	0.747	0.373	0.80	0.40	1.60	0.80	13.7	30.8
*140	5	0.923	1.024	49.5	22.9	1.00	0.460	0.460	0.57	0.57	0.89	0.89	19.9	29.9

Fig. 4.8 Resultados de pruebas en compresión y extensión en especímenes sueltos con 5% de caolín, consolidados isotrópicamente

a. Curvas esfuerzo desviador y generación de presión de poro contra deformación



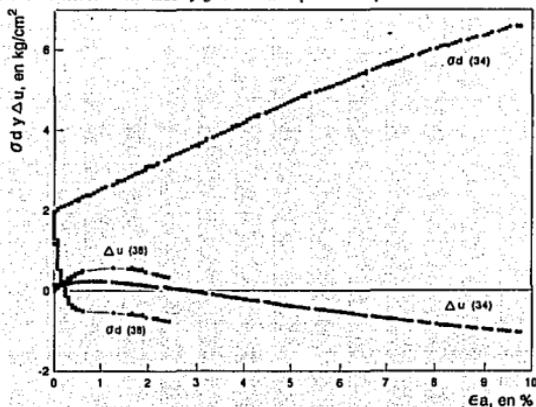
b. Trayectoria de esfuerzos efectivos



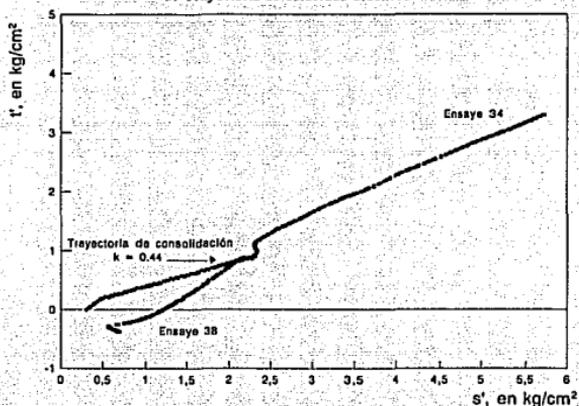
Ensayo #	% de caolín	e_0	e_p	Dr_s %	Dr_d %	p'_v kg/cm ²	v'_m kg/cm ³	Δu_s kg/cm ²	Δu_{ult} kg/cm ²	ϕ'_c grados	ϕ'_d grados
47	7	1.069	1.225	16.7	-23.4	2.00	0.39	0.85	1.86	13.6	30.5
44	7	1.066	1.222	17.5	-22.6	2.00	0.82	1.13	2.29	18.0	30.5

Fig 4.9 Resultados de pruebas en compresión y extensión en especímenes muy sueltos con 7% de caolín, consolidados isotrópicamente

a. Curvas esfuerzo desviador y generación de presión de poro contra deformación

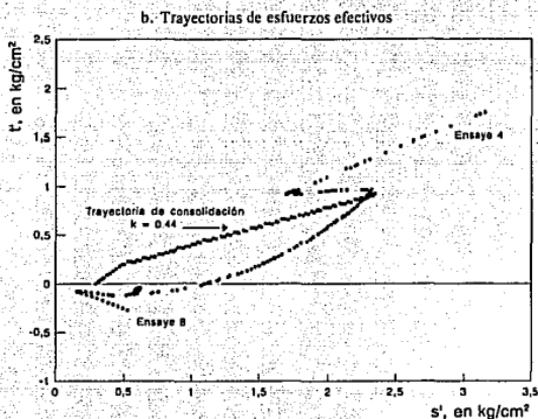
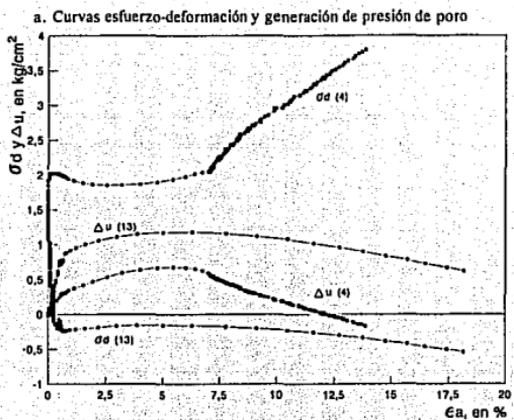


b. Trayectoria de esfuerzos efectivos



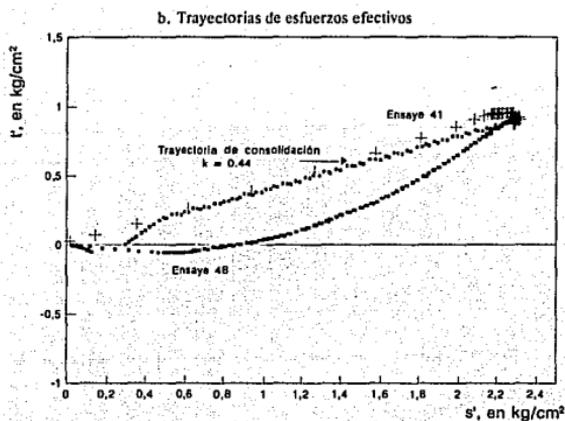
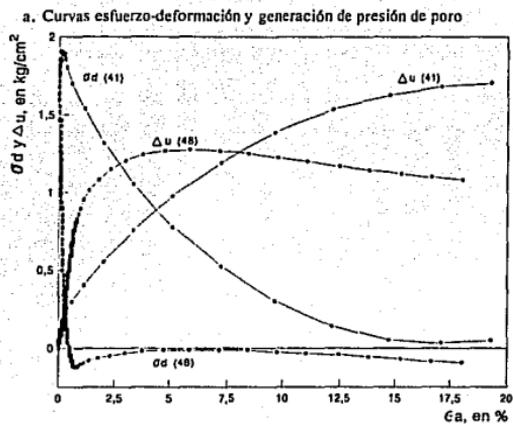
Ensayo #	% de caolín	e_c	e_m	D_{r1} %	D_{r2} %	p'_c kg/cm ²	e'_c kg/cm ³	$\Delta u_{máx}$ kg/cm ²	ϕ'_c grados	ϕ'_d grados
38	3	0.762	0.780	101.1	86.4	2.00	0.55	0.58	21.8	29.8
34	3	0.763	0.818	91.0	76.0	2.00	2.38	0.24	26.0	30.0

Fig 4.10 Resultados de pruebas en compresión y extensión en especímenes densos con 3% de caolín, consolidados anisotrópicamente con $k = 0,44$



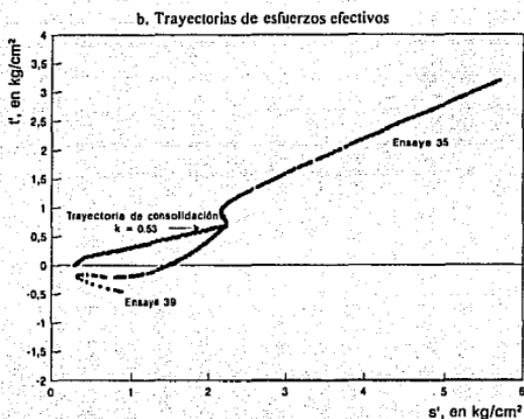
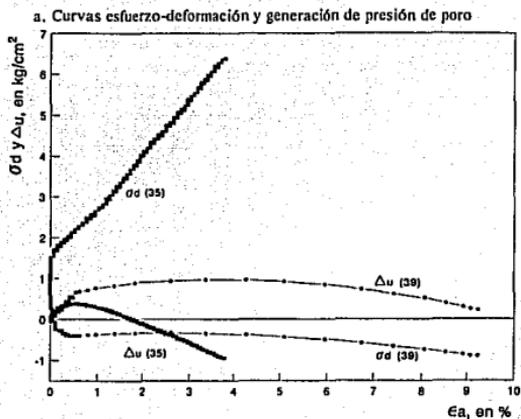
Ensayo #	% caolín	e_c	e_p	Dr_j %	Dr_v %	p'_v kg/cm ²	p'_{vm} kg/cm ²	Δu_v kg/cm ²	Δu_{vm} kg/cm ²	ϕ'_v grados	ϕ'_m grados
8	5	0.913	1.013	52.1	25.8	2.00	0.17	0.99	1.34	13.1	29.0
4	5	0.908	1.008	53.4	27.1	2.00	2.02	0.12	0.67	22.2	29.0

Fig 4.11 Resultados de ensayos en compresión y extensión en especímenes sueltos con 5% de caolín, consolidados anisotrópicamente con $k = 0.44$



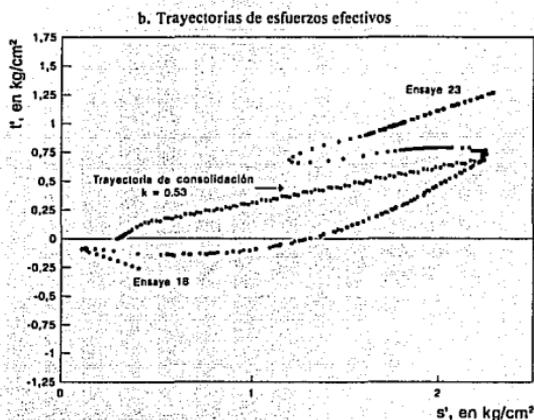
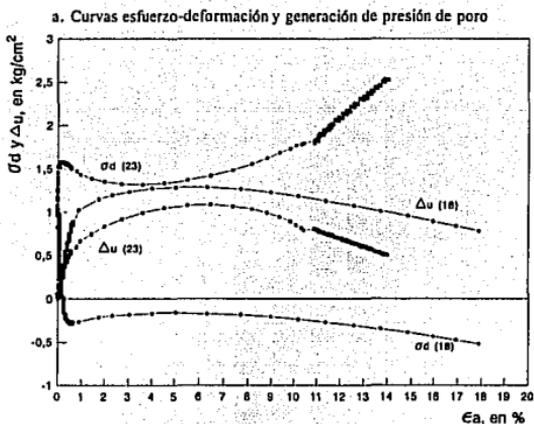
Ensayo #	% caolín	e_i	e_{ef}	D_{R1} %	D_{R2} %	p'_o kg/cm ²	σ'_{de} kg/cm ²	Δu_e Kg/cm ²	$\Delta u_{máx}$ kg/cm ²	ϕ'_o grados	ϕ'_f grados
48	7	1.048	1.203	22.1	-17.7	2.00	0.12	0.83	1.28	11.1	30.2
41	7	1.134	1.294	0	-41.1	2.00	1.91	0.09	1.71	21.2	28.5

Fig 4.12 Resultados de ensayos en compresión y extensión en especímenes muy sueltos con 7% de caolín, consolidados anisotrópicamente con $k = 0.44$



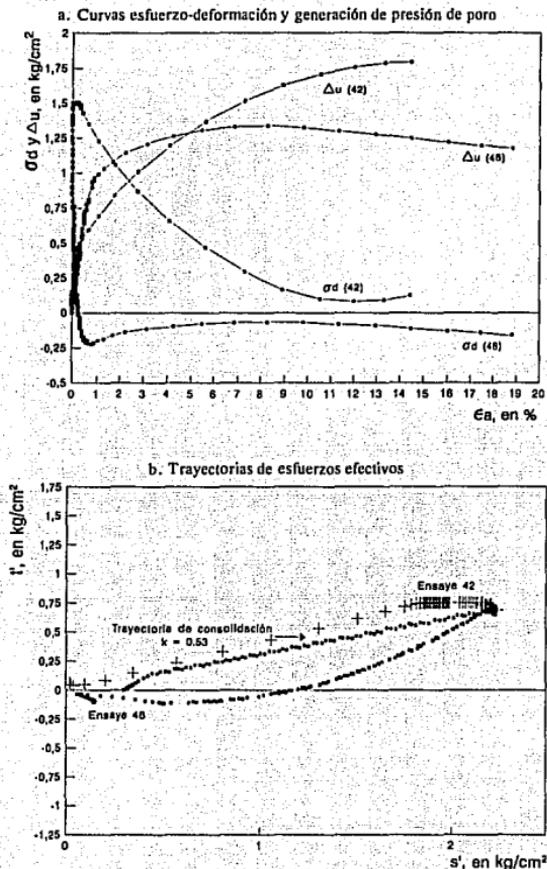
Ensayo #	% caolín	e_s	e_p	Dr_i %	Dr_o %	p'_v kg/cm ²	σ'_d kg/cm ²	Δu_{max} kg/cm ²	ϕ'_s grados	ϕ'_o grados
39	3	0.785	0.840	85.0	70.0	2.00	0.42	0.97	21.3	30.5
35	3	0.790	0.846	83.7	68.4	2.00	2.14	0.37	25.4	29.2

Fig 4.13 Resultados de ensayos en compresión y extensión en especímenes densos con 3% de caolín, consolidados anisotrópicamente con $k = 0.53$



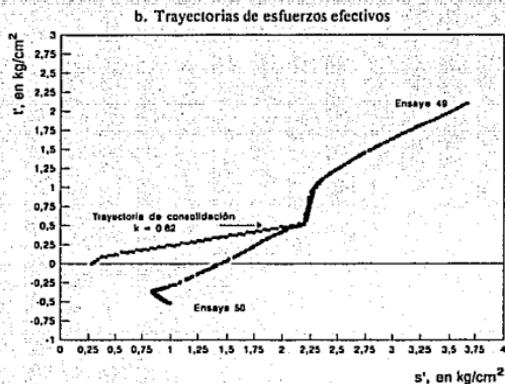
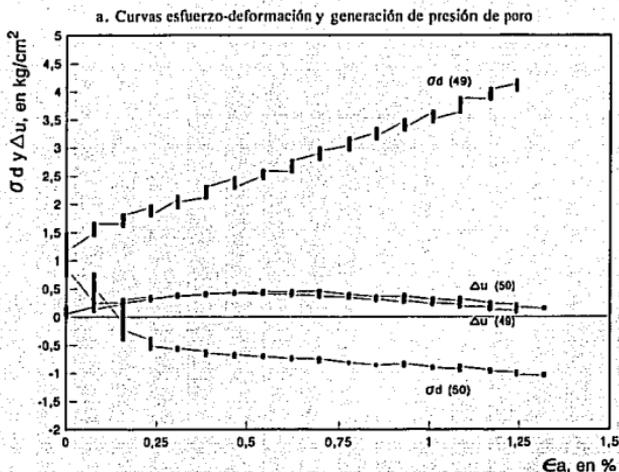
Ensayo #	% caolín	e_1	e_p	Dr_1 %	Dr_p %	p'_v kg/cm ²	σ'_{d0} kg/cm ²	Δu_v kg/cm ²	Δu_{vult} kg/cm ²	ϕ'_c grados	ϕ'_d grados
18	5	0.908	1.009	53,4	26,8	2,00	0,28	-0,74	1,29	12,5	31,1
23	5	0.904	1.004	54,5	28,2	2,00	1,58	0,27	1,09	21,0	30,2

Fig 4.14 Resultados de ensayos en compresión y extensión en especímenes sueltos con 5% de caolín, consolidados anisotrópicamente con $k = 0.53$



Ensayo #	% caolín	e_i	e_p	Dr_i %	Dr_p %	p'_0 kg/cm ²	σ'_{v0} kg/cm ²	Δu_0 Kg/cm ²	Δu_{ult} kg/cm ²	ϕ'_0 grados	ϕ'_f grados
46	7	1.073	1.229	15.7	24.4	2.00	0.22	0.89	1.34	11.5	31.0
42	7	1.077	1.234	14.7	25.7	2.00	1.50	0.33	1.79	20.7	29.8

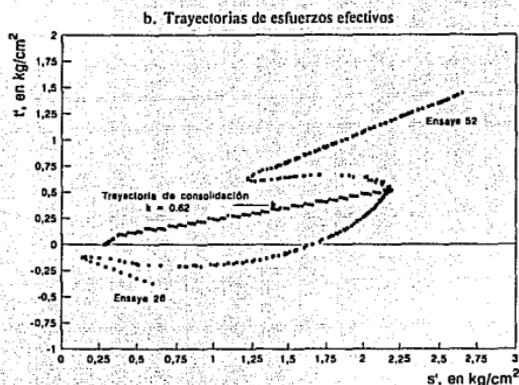
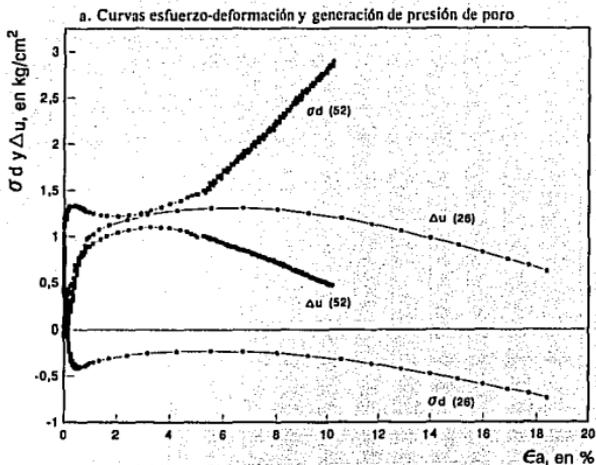
Fig 4.15 Resultados de ensayos en compresión y extensión en especímenes muy sueltos con 7% de caolín, consolidados anisotrópicamente con $k = 0.53$



Ensayo #	% caolín	e_1	e_{50}	Dr_1 %	Dr_{50} %	p'_v kg/cm ²	σ'_d kg/cm ²	Δu_{med} kg/cm ²	ϕ'_s grados	ϕ^* grados
50	3	0,689	0,741	101,1	97,0	2,00	0,71	0,46	20,8	29,9
49	3	0,688	0,741	101,4	97,0	2,00	2,21	0,42	25,1	29,7

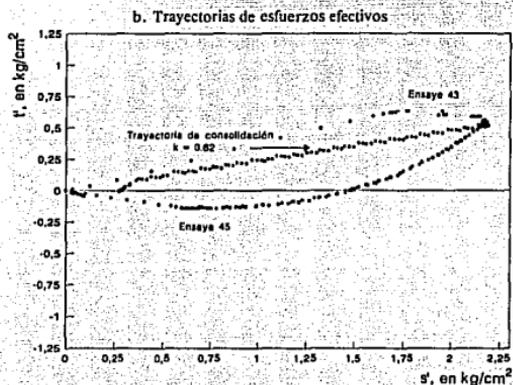
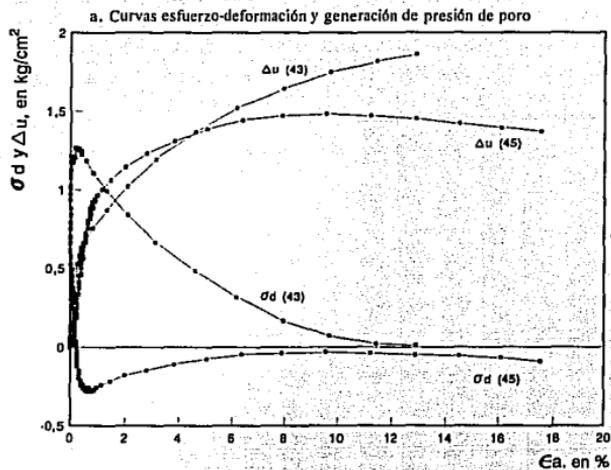
Fig 4.16

Resultados de ensayos en compresión y extensión en especímenes densos con 3% de caolín, consolidados anisotrópicamente con $k = 0.62$



Ensayo #	% caolín	e_i	e_d	Dr_1 %	Dr_d %	P'_v kg/cm ²	σ'_{eq} kg/cm ²	Δu_v kg/cm ²	Δu_{ult} kg/cm ²	ϕ'_s grados	ϕ'_d grados
26	5	0.924	1.025	49.2	22.6	2.00	0.42	0.69	1.32	12.1	30.3
52	5	0.881	0.980	60.5	34.5	2.00	1.33	0.63	1.10	20.3	29.6

Fig 4.17 Resultados de ensayos en compresión y extensión en especímenes sueltos con 5% de caolín, consolidados anisotrópicamente con $k = 0.62$



Ensayo #	% caolín	e_i	e_p	Dr_i %	Dr_p %	p'_c kg/cm ²	σ'_{vc} kg/cm ²	Δu_c Kg/cm ²	$\Delta u_{máx}$ kg/cm ²	ϕ'_c grados	ϕ'_f grados
45	7	1,087	1,244	12,1	28,3	2,00	0,28	0,91	1,49	12,7	29,2
43	7	1,077	1,233	14,7	25,4	2,00	1,27	0,42	1,90	18,6	29,7

Fig 4.18 Resultados de ensayos en compresión y extensión en especímenes muy sueltos con 7% de caolín, consolidados anisotrópicamente con $k = 0.62$

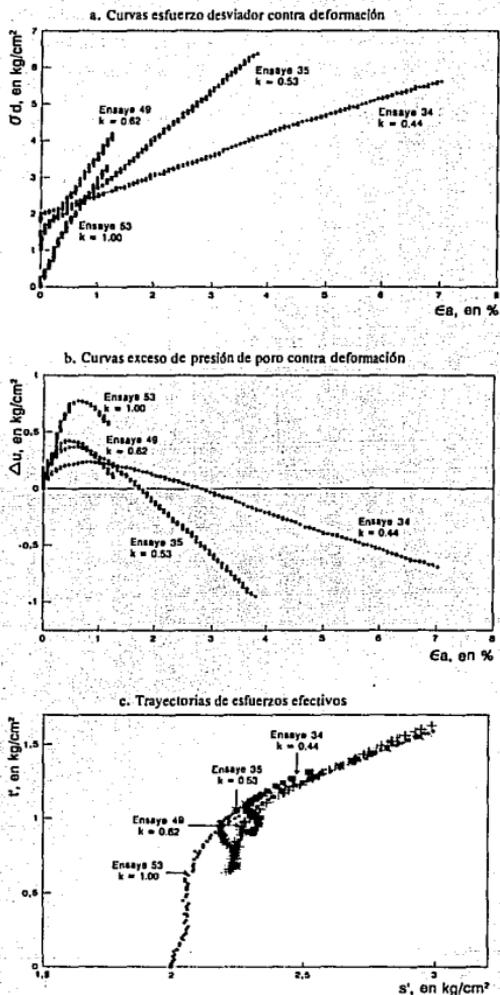


Fig 4.19 Comportamiento esfuerzo desviador y exceso de presión de poro contra deformación así como trayectorias de esfuerzos efectivos de probetas densas con 3% de caolín, consolidados bajo diferentes k y ensayadas en compresión

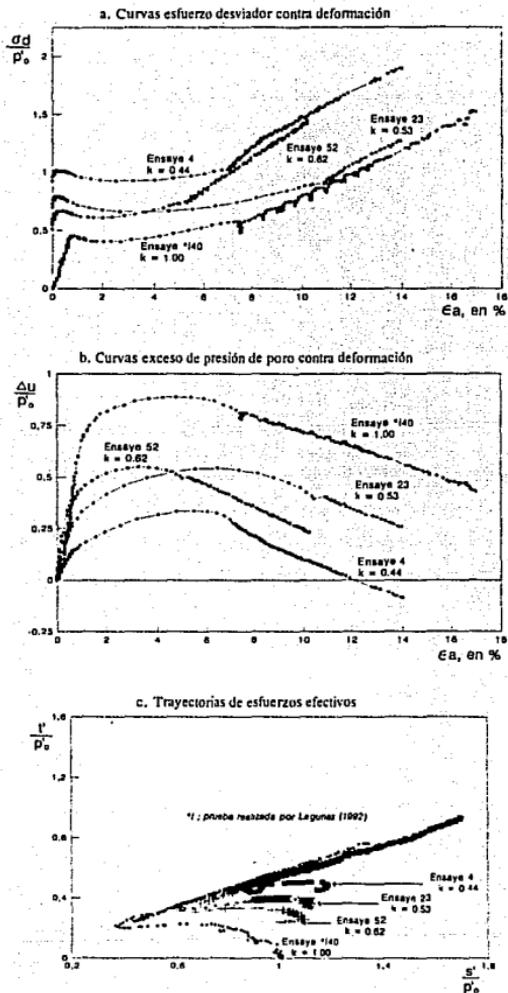


Fig 4.20 Comportamiento esfuerzo desviador y exceso de presión de poro contra deformación así como trayectorias de esfuerzos efectivos, normalizado con respecto a $p'₀$, de probetas sueltas con 5% de caolín, consolidadas bajo diferentes K y ensayadas en compresión

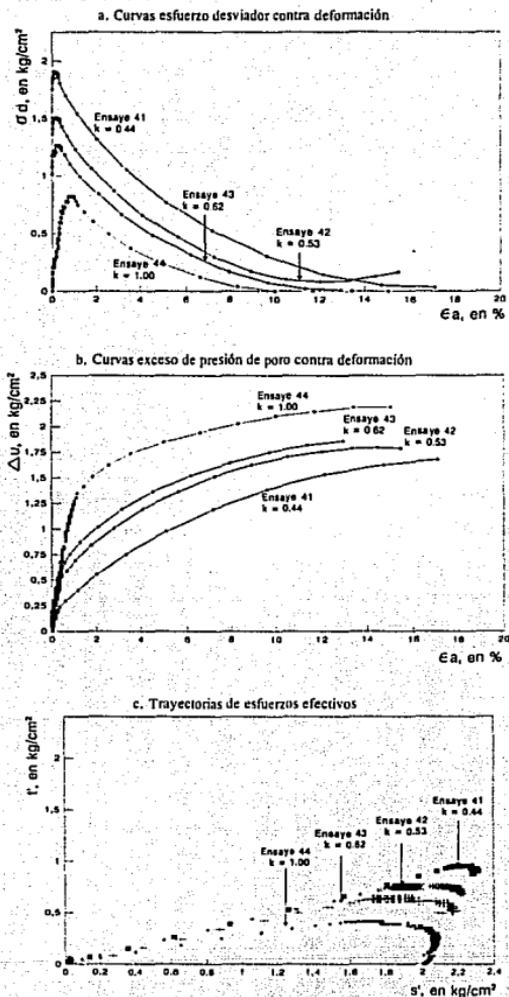


Fig 4.21 Comportamiento esfuerzo desviador y exceso de presión de poro contra deformación así como trayectorias de esfuerzos efectivos de probetas muy sueltas con 7% de caolín, consolidadas bajo diferentes K y ensayadas en compresión

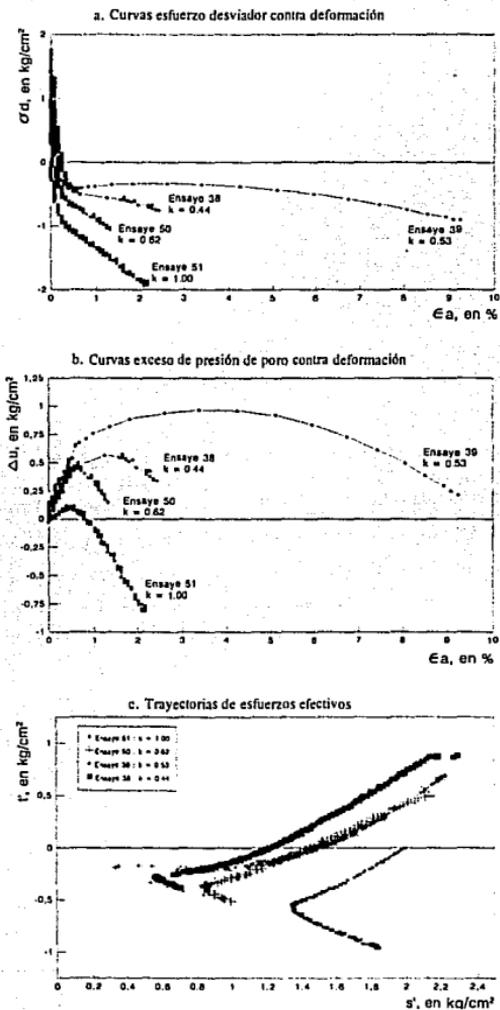


Fig 4.22 Comportamiento esfuerzo desviador y exceso de presión de poro contra deformación así como trayectorias de esfuerzos efectivos de probetas densas con 3% de caolín, consolidadas bajo diferentes K y ensayadas en extensión

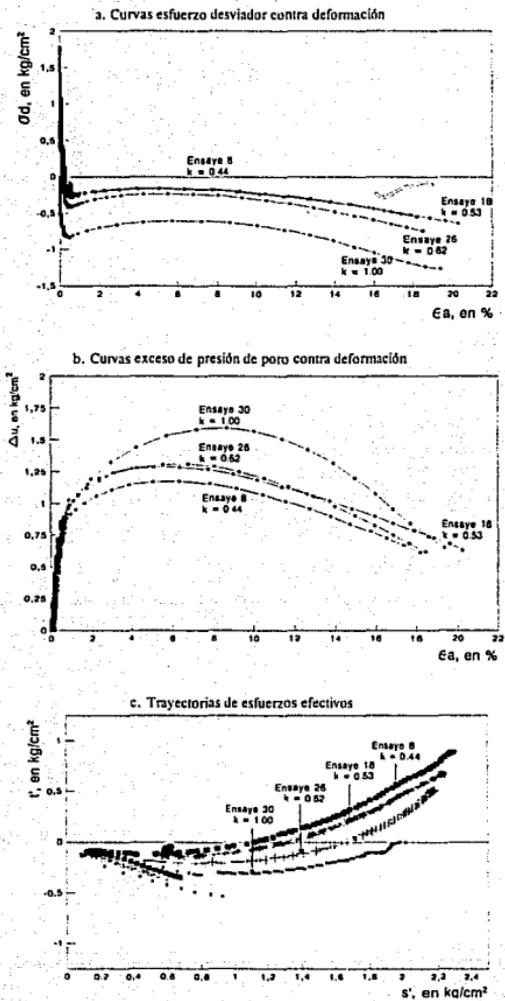
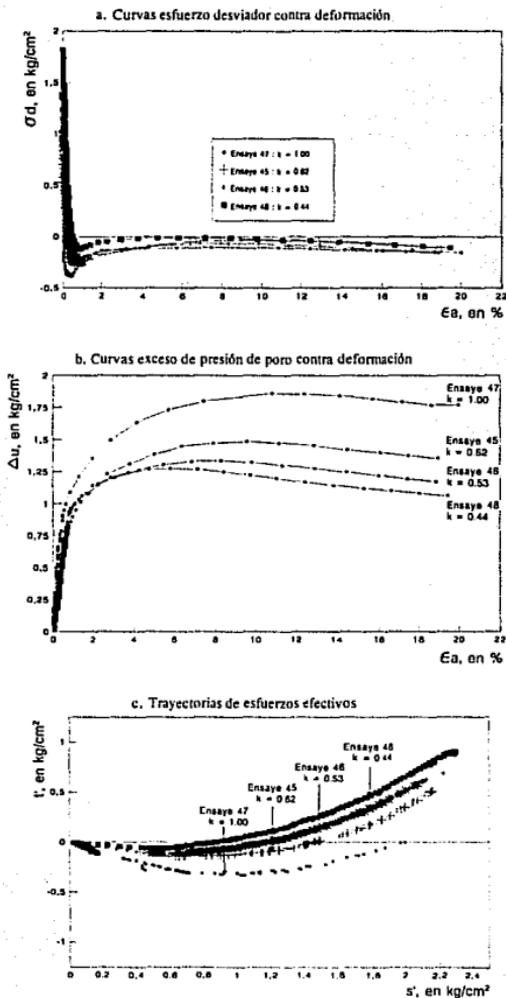


Fig. 4.23 Comportamiento esfuerzo desviador y exceso de presión de poro contra deformación así como trayectorias de esfuerzos efectivos de probetas sueltas con 5% de caolín, consolidadas bajo diferentes K y ensayadas en extensión



5. INTERPRETACION DE RESULTADOS.

La interpretación de los resultados experimentales del capítulo anterior dentro de un marco de referencia común involucra complicaciones pues cada una de las mezclas arena-caolín constituye en sí misma un suelo diferente. Además de los parámetros que usualmente se utilizan para analizar el comportamiento no drenado de suelos granulares -la relación de vacíos y la magnitud del esfuerzo de consolidación-, el análisis de los resultados del programa experimental debe incluir el efecto de otros dos factores, la trayectoria de consolidación y la dirección de aplicación de cargas durante la etapa de falla. En este capítulo se generalizan los resultados utilizando diagramas de estado en el espacio $e-p'$, aplicando el concepto de línea de estado estable, introduciendo como parámetro la relación de vacíos intergranular e involucrando dos tipos de normalización.

5.1 ANTECEDENTES.

Las consecuencias ingenieriles del comportamiento volumétrico de los suelos granulares cuando se someten a esfuerzos cortantes fueron analizadas inicialmente por Casagrande (1936) quien introdujo el concepto de relación de vacíos crítica, e_c , para la cual "un suelo no cohesivo puede sufrir deformación o flujo sin cambio de volumen", definiendo la línea de relación de vacíos crítica en el espacio e versus $\log p'$. Por tanto, para dos especímenes de arena, uno denso y otro suelto, en pruebas consolidadas drenadas (CD), en ambos casos las deformaciones por cortante aumentan y los cambios en la relación de vacíos alcanzan un valor constante (e_c) como se muestra en la figura 5.1. Según Casagrande, la relación de vacíos crítica depende únicamente de la forma y tamaño de los granos y del esfuerzo efectivo, siendo entonces independiente de la compacidad original. También señaló que si se impide la variación de volumen de una masa de suelo saturada con una relación de vacíos superior a la crítica, se presentará la "falla por licuación".

La idea de Casagrande condujo con el tiempo al concepto del "estado crítico" definido por Schofield y Wroth (1968). Cuando un suelo llega al estado crítico, éste continúa deformándose a carga constante, sin cambios de volumen o de presión de poro (pruebas no drenadas). Los estados críticos definen "la línea del estado crítico" en el plano $e - \log p'$, donde $p' = (\sigma'_1 + 2\sigma'_3)/3$ (fig 5.2).

Castro (1969) realizó numerosos ensayos triaxiales no drenados con esfuerzo controlado sobre diferentes arenas encontrando que el comportamiento no drenado de este material consolidado isotrópicamente bajo carga monotónica podía ser caracterizado por tres regiones en

el espacio relación de vacíos (e) - esfuerzo efectivo menor ($\log \sigma'_3$) como se indica esquemáticamente en la figura 5.3, sugiriendo que la resistencia en el "estado estable" en este diagrama define una línea única, la línea F. En la región de transición, definida por las líneas P y L, las muestras pueden presentar licuación parcial mientras que las ubicadas arriba de la línea L pueden sufrir pérdida de rigidez por deformación o licuación total y si se sitúan abajo de ésta se puede presentar endurecimiento por deformación.

Posteriormente, Poulos (1981) definió el concepto de "estado estable de deformación" como el estado en el cual una masa de partículas se deforma continuamente a volumen constante cuando el esfuerzo cortante, el esfuerzo efectivo normal y la velocidad de deformación también permanecen constantes. En el estado estable se presentan "deformaciones de flujo". Este estado se alcanza cuando las partículas se han reordenado totalmente; entonces el esfuerzo cortante necesario y la velocidad de deformación permanecen constantes (fig 5.4).

Been y Jefferies (1985) cuantificaron el potencial de licuación mediante el parámetro de estado ψ que define la relación de vacíos (e) y el nivel de esfuerzos principales (p') de una arena relacionados a un estado de referencia (estado estable) como se muestra en la figura 5.5; por tanto, el parámetro de estado depende de la distancia vertical en el plano $e - \log p'$, entre el estado del espécimen al final de la consolidación y la línea del estado estable.

Konrad (1990a, 1990b, 1993) sugiere que las condiciones del estado estable se encuentran situadas dentro de una banda en el plano $e - \log p'$, limitada por líneas relacionadas con dos diferentes comportamientos de flujo (fig 5.6). Con base en lo anterior estableció que la línea de estado estable no es única y que no se relaciona solamente con la relación de vacíos como lo sugirió primeramente Castro (1969), sino con la magnitud de la presión efectiva de consolidación y la historia de esfuerzos.

Existe otra interpretación del comportamiento de las arenas que supone que algunos materiales contractivo - dilatantes pasan transitoriamente por el estado estable. Tal condición se denomina "estado cuasi estable" como se indica en la figura 5.7 (Alarcón et al, 1988). Para Ishihara (1993), el cambio de comportamiento de contractivo a dilatante que ocurre en la arena, pasando por un estado de mínimo esfuerzo cortante, es el "estado de transformación de fase" porque define un estado de transición, donde el estado cuasi estable se establece como un estado de transformación de fase. Sus resultados experimentales indican que el estado estable depende únicamente de la relación de vacíos y del esfuerzo efectivo de consolidación.

Un método simple para evaluar el potencial de licuación de arenas ensayadas en el laboratorio se desarrolla fácilmente a partir de la normalización de diagramas de estado (Ovando, 1992), y del mismo modo, el método puede ser formulado en términos de los parámetros de estado sugeridos por Been y Jefferies (1985). Los datos experimentales de Konrad (1990a y 1990b) analizados dentro del marco del estado estable, permitieron establecer un nuevo método para analizar el comportamiento de arenas saturadas. El método se basa en la normalización de diagramas de estado mediante la presión de consolidación equivalente, p'_c (fig 5.8), la cual se define en la teoría clásica del estado crítico como el valor de p' sobre la línea de consolidación

virgen correspondiente a cualquier valor de e . Empleando este tipo de diagramas normalizados se retoma la idea de que existe una línea de estado estable única, la "línea del estado estable normalizada" (NSSL).

Se ha demostrado que la normalización del comportamiento de arenas es adecuada dentro de rangos limitados de presiones pero no es factible esperar a que lo sea a muy altas o muy bajas presiones, pues en tales casos el aumento o supresión de las tendencias dilatantes modifica sustancialmente las formas de las curvas esfuerzo - deformación y de las trayectorias de esfuerzos efectivos (Ovando, 1986).

5.2 MODELO CONCEPTUAL.

De acuerdo con un estudio realizado por Alberro (1990), las características principales del comportamiento de arenas limpias se pueden explicar relacionando observaciones macroscópicas con el comportamiento de estructuras ideales de partículas redondas y con las propiedades mecánicas de sus contactos intergranulares. Esto permite establecer las envolventes de colapso en el espacio de esfuerzos de acuerdo con el nivel de esfuerzos aplicados. El concepto de envolvente de colapso se define como el lugar geométrico en el espacio de esfuerzos donde se presenta el colapso estructural del suelo (fig 5.9). Este enfoque da cuenta cuantitativamente de las magnitudes de la resistencia y la presión de poro en el momento del colapso estructural del suelo. El factor fundamental que rige el fenómeno es la distribución de contactos intergranulares; es decir, la microestructura de la masa arenosa. Las estructuras isótropas como las de los materiales bien graduados son mucho menos susceptibles de sufrir colapso que las de los materiales uniformes sueltos. En estos últimos la orientación de los contactos intergranulares presenta anisotropía en direcciones que se acercan a la de los materiales ideales. Los materiales bien graduados, isótropos, generan presiones de poro negativas a grandes deformaciones mientras que los que son sueltos y anisótropos son contractivos durante toda la historia de cargas. Un material inicialmente anisótropo puede convertirse en otro isótropo mediante compactación.

La influencia de los finos en el comportamiento microestructural de las mezclas arena-caolín puede explicarse con la ayuda del modelo idealizado de la figura 5.10, donde se ilustran dos tipos de contacto entre granos de arena suponiendo que el material fino envuelve las partículas más grandes. En el caso de que inicialmente los granos de arena estén separados por materia fina, el comportamiento de la probeta estará dominado por ella. Al avanzar el proceso de aplicación de carga el material fino será desplazado hasta que los granos de arena entren en contacto. Desde luego que en una probeta habrá algunos granos que estén en contacto y otros no. Si predominan los granos separados por materia fina, el material se comportará como una arcilla. La presencia de los finos separa los granos de arena y consecuentemente reduce el número de contactos entre ellos, lo que induce anisotropía en su distribución, ya que al aumentar la cantidad de finos el comportamiento tiende a asemejarse al que presentan las arenas sueltas (anisótropas). Cuando predominan los contactos grano-grano, la influencia de los finos se refleja en la mayor capacidad de las mezclas para generar presión de poro y en una menor resistencia

provocadas por la anisotropía inducida y la disminución de contactos intergranulares (Ovando y Mesa, 1991).

5.3 MODELO FENOMENOLOGICO.

Con base en el modelo conceptual descrito antes se puede hacer la hipótesis de que el comportamiento de las mezclas arena-finos está dominado por el de la estructura granular durante el proceso de carga. Los finos no contribuyen a tomar ni transmitir cargas con excepción del caso de mezclas muy sueltas con porcentajes relativamente grandes de material fino. La presencia los finos también tiene el efecto de disminuir el número de contactos entre las partículas de arena. Por consiguiente Ovando y Mesa (1991) y Ovando y Lagunas (1992) interpretaron sus resultados experimentales empleando la relación de vacíos referida al esqueleto sólido arenoso:

$$e_g = \frac{V_v + V_f}{V_s} \quad (5.1)$$

donde:

- e_g : relación de vacíos intergranular
- V_v : volumen de vacíos
- V_f : volumen de partículas finas
- V_s : volumen de los granos de arena

El concepto de relación de vacíos intergranular, e_g , fue introducido previamente por Zeevaert (1962), Mitchell (1976) y Kenney (1977), entre otros.

Los resultados experimentales de ensayos en probetas de arena con 3, 5, 7 y 10% de caolín obtenidos por Ovando y Mesa (1991), Ovando y Lagunas (1992), permitieron establecer relaciones entre la relación de vacíos intergranular al final de la consolidación, e_{gr} , y algunos parámetros significativos del comportamiento esfuerzo-deformación de las mezclas estudiadas, como son el esfuerzo cortante en el punto de colapso, t'_c , el exceso de presión de poro máximo, $\Delta u_{máx}$, y el ángulo de fricción interna movilizado en el punto de colapso, ϕ'_{qc} . También, se interpretaron los resultados mediante diagramas de estado en términos del estado cuasi estable y la relación de vacíos intergranular, donde se normalizó el esfuerzo efectivo medio, p' , con respecto al de consolidación, $p'_o (= \sigma'_c)$.

La normalización del comportamiento esfuerzo-deformación de las arenas o cualquier otro material es válida dentro de un limitado intervalo de presiones. Esta normalización funcionó bien en el intervalo de las presiones de consolidación empleadas ($\sigma'_c = 1.0$ a 3.0 kg/cm^2), lo cual

cubre muchos de los niveles de esfuerzos encontrados en la práctica. Así, demuestran que $\Delta u_{máx}/p'_{o1}$, t'_q/p'_{o1} y ϕ'_q están relacionados con e_{gf} , independiente del porcentaje y tipo de material fino, llegando a la conclusión de que e_{gf} es un parámetro adecuado para interpretar globalmente los resultados experimentales.

En vista de lo anterior, propusieron un diagrama normalizado de estado (fig 5.11) dibujado en el plano $e_{gf}-\log p'/p'_o$. En este diagrama se observa que los puntos donde se genera la presión de poro máxima se alinean, con bastante aproximación, a la línea recta marcada como $p'_{máx}$. La línea p'_q corresponde a los valores de p' donde se alcanza el punto de colapso en las curvas esfuerzo-deformación y según se aprecia en la misma figura, p'_q/p'_{o1} tiende a ser constante para muestras muy sueltas. La línea p'_q se une a la línea $p'_{máx}$ para valores e_{gf} pequeños. En la zona predominantemente contractiva (valores de e_{gf} altos) las deformaciones ocurren antes de llegar a la línea $p'_{máx}$; en la zona dilatante sólo se tienen deformaciones grandes cuando $p'/p'_{o1} > 1.0$.

El diagrama de la figura 5.11 se simplifi suponiendo que la línea $p'_{máx}$ está constituida por tres segmentos rectos marcados respectivamente por 1, 2 y 3 (fig 5.12). Con base en lo anterior, se obtienen parámetros de estado análogos al de Been y Jefferies (1985), con los cuales se puede predecir cualitativamente el comportamiento de las mezclas arena-finos en función de las relaciones de vacíos intergranulares, e_{gc} y e_{gd} . El primero es la ordenada de la intersección de $p'_{máx}$ con p'_q , el segundo es la ordenada de la intersección de $p'_{máx}$ con la recta vertical $p'/p'_{o1}=1.0$. De esta manera definieron dos parámetros de estado para la contracción (ψ_c) y dilatación (ψ_d) en función del valor de e_{gf} :

$$\psi_c = e_{gf} - e_{gc} \quad (5.2)$$

$$\psi_d = e_{gf} - e_{gd} \quad (5.3)$$

Las condiciones para que se presente el comportamiento puramente contractivo son: $\psi_c > 0$ y $\psi_d > 0$. Cuando $\psi_c < 0$ y $\psi_d > 0$ se tiene contracción seguida de dilatación. Finalmente, si ψ_c y ψ_d son negativos se obtienen comportamientos puramente dilatantes.

5.4 DISCUSION DE RESULTADOS.

Los resultados obtenidos en este trabajo se interpretan a continuación con base en las relaciones y diagramas normalizados de estado descritos anteriormente. Estos resultados servirán para verificar la aplicabilidad de dicho modelo fenomenológico a la descripción del

comportamiento de especímenes ensayados bajo otras condiciones de esfuerzos.

5.4.1 Esfuerzo cortante en el punto de colapso, t'_q .

a. Pruebas de compresión.

En la figura 5.13a se grafica el esfuerzo cortante en el punto de colapso normalizado por el esfuerzo efectivo de confinamiento (t'_q/p'_o) contra la relación de vacíos intergranular al final de la consolidación, e_{gr} , para las probetas ensayadas en compresión. De esta figura se desprenden las siguientes observaciones:

1. El esfuerzo cortante en el punto de colapso, t'_q , para los especímenes consolidados isotrópicamente, con relaciones de vacíos intergranulares al final de la consolidación, e_{gr} , mayores de 0.93, muestra muy poca variación. A partir de este valor, a medida que se reduce la relación de vacíos, aumenta el valor de t'_q .
2. Los valores de t'_q obtenidos al ensayar especímenes consolidados anisotrópicamente bajo diferentes cocientes de esfuerzos, K , tienden a ser constantes para relaciones de vacíos intergranulares, e_{gr} , mayores de 0.93, y se incrementan cuando e_{gr} disminuye.
3. A medida que disminuye el cociente de esfuerzos K , los resultados se encuentran más alejados de la curva obtenida para los especímenes consolidados isotrópicamente; es decir, las muestras consolidadas anisotrópicamente bajo un cociente de esfuerzos $K=0.62$ se encuentran más próximas a esta curva mientras que las consolidadas anisotrópicamente bajo un cociente de esfuerzos $K = 0.44$ están más alejadas.

De acuerdo con estos resultados, se obtienen una serie de curvas que dependen del cociente de esfuerzos K , bajo el cual fueron consolidadas los especímenes ubicándose por encima de la curva descrita por las muestras isotrópicamente consolidadas. Si cada uno de los datos obtenidos en estas curvas se multiplica por su respectivo cociente de esfuerzos K se presenta un acercamiento a la curva definida por los especímenes consolidados isotrópicamente como se ilustra en la figura 5.13b.

b. Pruebas de extensión.

La gráfica del esfuerzo cortante en el punto de colapso normalizado por el esfuerzo efectivo de consolidación, para los especímenes ensayados en extensión, contra la relación de vacíos intergranular al final de la consolidación, se muestra en la figura 5.14a. De esta gráfica se tienen las siguientes observaciones:

1. Los valores de t'_q obtenidos de ensayos en especímenes consolidados isotrópicamente

muestran muy poca variación para valores de relaciones de vacíos intergranulares superiores a 0.93; cuando la relación de vacíos es menor, t'_q depende fuertemente de e_{gr} . Conforme disminuye esta última, t'_q aumenta.

- Al igual que en las probetas isotrópicamente consolidadas, los especímenes que fueron consolidados anisotrópicamente muestran un incremento en la resistencia al esfuerzo cortante para valores en la relación de vacíos intergranular, e_{gr} , menores a 0.93. La resistencia se mantiene prácticamente sin variación al aumentar la relación de vacíos.
- Los especímenes consolidados anisotrópicamente bajo un cociente de esfuerzos $K = 0.44$ se alejan de la curva definida por las muestras consolidadas isotrópicamente mientras que las consolidadas anisotrópicamente bajo un cociente de esfuerzos $K = 0.62$ se aproximan a ella; por lo tanto, a medida que disminuye el valor de K los resultados se alejan de la curva definida por los especímenes isotrópicamente consolidados.

De los datos obtenidos se forma una curva para cada valor del cociente de esfuerzos K bajo el cual fueron consolidadas las muestras. Todas las curvas se localizan abajo de la descrita por los consolidados isotrópicamente. Si los valores de t'_q/p'_o se dividen por su respectivo cociente de esfuerzos K , se obtiene una curva única, como se observa en la figura 5.14b.

La gráfica de la figura 5.15a resume los resultados obtenidos en el análisis para establecer la relación causal establecida entre t'_q/p'_o y e_{gr} . Los especímenes que presentaron una mayor resistencia en el punto de colapso fueron los consolidados anisotrópicamente con $K = 0.44$ ensayados en compresión; los valores más bajos de t'_q se obtuvieron en las probetas consolidadas anisotrópicamente con $K = 0.44$, ensayadas en extensión.

En la figura 5.15b se definen dos curvas que agrupan los resultados obtenidos en los especímenes ensayados en compresión y extensión. En esta gráfica los valores de t'_q/p'_o se multiplicaron por β ($\beta = K$, en compresión; $\beta = 1/K$, en extensión); los especímenes que presentaron una mayor resistencia en el punto de colapso corresponden a los especímenes ensayados en compresión.

5.4.2 Exceso de presión de poro máxima, Δu_{max} .

a. Pruebas de compresión.

En la figura 5.16a se grafica el exceso de presión de poro máxima normalizado por el esfuerzo efectivo de confinamiento ($\Delta u_{max}/p'_o$) contra la relación de vacíos intergranular al final de la consolidación, e_{gr} , para las probetas ensayadas en compresión. De esta gráfica se puede definir lo siguiente:

- Todos los especímenes incrementan su potencial para generar presión de poro a medida

que crece la relación de vacíos intergranular y el contenido de finos en los especímenes.

2. A medida que disminuye el cociente de esfuerzos K , los resultados se encuentran más alejados de la línea obtenida para los especímenes isotrópicamente consolidados; es decir, las muestras anisotrópicamente consolidadas bajo un cociente de esfuerzos $K = 0.62$ se acercan a esta línea mientras que los consolidados bajo un cociente de esfuerzos $K=0.44$ se alejan de ella. Es decir, el potencial para generar presión de poro disminuye al disminuir el valor de K .

Los datos obtenidos se alinean de acuerdo al cociente de esfuerzos K , bajo el cual fueron consolidadas las muestras localizándose debajo de la línea descrita por los especímenes isotrópicamente consolidados. Al dividir cada uno de los resultados por su correspondiente cociente de esfuerzos empleado en la consolidación, K , los datos se alinean con los que se obtuvieron al ensayar probetas consolidadas isotrópicamente, como se ilustra en la figura 5.16b.

b. Pruebas de extensión.

La gráfica del exceso de presión de poro normalizado por el esfuerzo efectivo de confinamiento contra la relación de vacíos intergranular al final de la consolidación en las probetas ensayadas en extensión, se muestra en la figura 5.17a. De esta gráfica se se desprenden las siguientes observaciones:

1. En todos los especímenes, el exceso de presión de poro aumenta conforme crece la relación de vacíos intergranular.
2. Los resultados de las muestras consolidadas isotrópica y anisotrópicamente bajo diferentes cocientes de esfuerzos K , se agrupan mostrando una misma tendencia con muy poca variación en la generación de presión de poro en relaciones de vacíos intergranulares mayores de 0.93.

Si cada uno de los resultados se divide por su respectivo cociente de esfuerzos K , se presenta un alineamiento con los datos obtenidos en los especímenes consolidados isotrópicamente como se ilustra en la figura 5.17b.

En resumen, los resultados obtenidos en ensayos de compresión y extensión permiten establecer relaciones causales entre $\Delta u_{máx}/p'_o$ y e_{gr} . Los especímenes consolidados isotrópicamente ensayados en compresión son los que generan mayor presión de poro, como se observa en la figura 5.18a y los datos de la tabla 5.2.

Sin embargo, cuando el cociente $\Delta u_{máx}/p'_o$ se multiplica por $1/K$, se obtiene una tendencia única, según se aprecia en la fig 5.18b.

5.4.3 Angulo de fricción interna movilizado en el punto de colapso, ϕ'_q .

a. Pruebas de compresión.

En la figura 5.19a se graficó el ángulo de fricción interna movilizado en el punto de colapso, ϕ'_q , contra la relación de vacíos intergranular al final de la consolidación, e_{gr} , para los especímenes ensayados en compresión. De esta gráfica se define lo siguiente:

1. Los especímenes consolidados anisotrópicamente bajo un cociente de esfuerzos $K = 0.44$ son los que movilizan mayores ángulos de fricción interna en el punto de colapso. Los consolidados isotrópicamente movilizan ángulos menores.
2. Los ángulos que se obtienen en probetas densas alcanzan valores superiores a 25.0° , mientras que las muestras muy sueltas movilizan ángulos más bajos, entre 18.0° y 21.2° .
3. Todos los resultados de las probetas ensayadas en compresión, se encuentran localizados dentro de la zona delimitada por las curvas que dan comienzo en relaciones de vacíos intergranulares de 0.7 continuando hasta un valor de 1.2. La curva superior inicia en un ángulo ϕ'_q próximo a 28.0° terminando en ϕ'_q de 22.0° . La curva inferior comienza en ϕ'_q de 25° y finaliza en un valor de ϕ'_q de 18.0° .

b. Pruebas de extensión.

La gráfica obtenida del ángulo de fricción interna movilizado en el punto de colapso, ϕ'_q , contra la relación de vacíos intergranular al final de la consolidación, e_{gr} , se muestra en la figura 5.19b. Se pueden hacer las siguientes observaciones:

1. Las muestras densas movilizaron mayores ángulos de fricción interna en el punto de colapso, ϕ'_q , variando entre 21° a 22° , mientras que las muy sueltas sólo alcanzaron a movilizar ángulos entre 11.1° y 13.6° .
2. Los resultados de los especímenes ensayados en extensión se localizan en la zona delimitada por las líneas que inician en relaciones de vacíos intergranulares de 0.7 continuando hasta valores de $e_{gr} = 1.2$. La línea superior inicia en un valor de ϕ'_q cercano a 25.0° culminando en 15.0° mientras que la inferior da inicio en un ángulo cercano a 21° hasta llegar a un valor de ϕ'_q cercano a 11.0° .

La gráfica de la figura 5.20 resume los resultados obtenidos en el análisis para establecer la relación causal entre ϕ'_q y e_{gr} . En esta gráfica se definen dos zonas que agrupan los resultados de los especímenes ensayados en compresión y extensión; las muestras que movilizan mayores ángulos de fricción en el punto de colapso corresponden a las ensayadas en compresión y que fueron consolidadas anisotrópicamente empleando un cociente de esfuerzos $K = 0.44$.

5.4.4 Diagrama de estado normalizado dibujado en el plano $e_p - \log(p'_q/p'_o)$.

a. Pruebas de compresión.

En la figura 5.21a se ilustra el diagrama normalizado de estado dibujado en el plano $e_p - \log(p'_q/p'_o)$ para los resultados experimentales obtenidos en las muestras ensayadas en compresión. En esta gráfica se puede apreciar lo siguiente:

1. Los resultados de los especímenes consolidados isotrópicamente definen una línea normalizada de estado.
2. Aparecen otras líneas normalizadas de estado definidas por la variación en el cociente de esfuerzos efectivos K empleado durante la consolidación anisotrópica. Estas líneas se localizan a la derecha de la línea normalizada de estado de los isotrópicamente consolidados.
3. La línea normalizada de estado definida por los especímenes consolidados anisotrópicamente bajo un cociente de esfuerzos $K = 0.44$ se encuentra más alejada de la establecida por los isotrópicamente consolidados.

Sin embargo, cuando el cociente p'_q/p'_o se multiplica por K se obtiene una tendencia única, según se observa en la figura 5.21b.

b. Pruebas de extensión.

En la figura 5.22a se muestra el diagrama normalizado de estado dibujado en el plano $e_p - \log(p'_q/p'_o)$ de los resultados obtenidos en los especímenes ensayados en extensión. En esta gráfica se observa lo siguiente:

1. Los resultados de los especímenes consolidados isotrópicamente ensayados en extensión describen una línea normalizada de estado.
2. Se definen otras líneas normalizadas de estado determinadas por el cociente de esfuerzos K utilizado en los especímenes consolidados anisotrópicamente. Estas líneas se encuentran a la izquierda de la línea definida por las muestras consolidadas isotrópicamente.
3. La línea normalizada de estado de los anisotrópicamente consolidados con $K = 0.44$ se aleja de la línea de estado de los especímenes consolidados isotrópicamente mientras que la línea de estado obtenida por las muestras consolidadas bajo un $K = 0.62$ se aproxima a ella.

Con los datos obtenidos se forma una línea de estado para cada valor del cociente de esfuerzos K empleado en la consolidación. Si los valores de p'_q/p'_o se dividen por su respectivo cociente de esfuerzos K , se obtiene una línea de estado única, como se observa en la figura 5.22b.

En resumen, los resultados obtenidos en ensayos de compresión y extensión definen diferentes líneas normalizadas de estado que varían de acuerdo a la historia de esfuerzos de consolidación y a la dirección de aplicación de la carga durante la falla, como se observa en la 5.23a.

En la figura 5.23b se definen dos líneas de estado normalizadas que agrupan los resultados obtenidos en los especímenes ensayados en compresión y extensión; en esta gráfica los valores de p'_q/p'_o se multiplicaron por β ($\beta = K$, en compresión; $\beta = 1/K$ en extensión).

5.4.5 Diagrama de estado normalizado dibujado en el plano $e_p - \log(p'_{umax}/p'_o)$.

a. Pruebas de compresión.

En la figura 5.24a se muestra el diagrama normalizado de estado dibujado en el plano $e_p - \log(p'_{umax}/p'_o)$ con los resultados obtenidos en los especímenes ensayados en compresión. En esta gráfica se puede apreciar lo siguiente:

1. Los especímenes consolidados isotrópicamente ensayados en compresión definen una línea normalizada de estado. Los valores de p'_{umax}/p'_o se reducen gradualmente a partir de relaciones de vacíos intergranulares menores de 0.95. Para relaciones de vacíos comprendidas entre 0.95 y 1.05 se presenta muy poca variación en p'_{umax}/p'_o ; cuando la relación de vacíos es superior a 1.05, se produce una reducción brusca de este esfuerzo que llega a anularse.
2. Existen otras líneas normalizadas de estado definidas por la variación en el cociente de esfuerzos K utilizado en la consolidación que presentan el mismo comportamiento de los especímenes consolidados isotrópicamente.
3. La línea normalizada de estado establecida por los especímenes consolidados anisotrópicamente bajo un cociente de esfuerzos $K = 0.62$, se aproxima a la línea normalizada de estado de los consolidados isotrópicamente; los consolidados anisotrópicamente bajo un cociente de esfuerzos $K = 0.44$ se alejan de esta.

Los resultados obtenidos forman líneas normalizadas de estado definidas por el cociente de esfuerzos K empleado en la consolidación; estas líneas se encuentran localizadas a la derecha de la línea de las isotrópicamente consolidadas. Si cada valor del cociente p'_{umax}/p'_o se multiplica el valor de K , se define una única línea normalizada de estado (fig 5.24b).

b. Pruebas de extensión.

En la figura 5.25a se ilustra el diagrama normalizado de estado dibujado en el plano $e_{gr} - \log(p'_{umáx}/p'_o)$ para los resultados experimentales obtenidos en las muestras ensayadas en extensión. En esta gráfica se observa lo siguiente:

1. Los especímenes consolidados isotrópicamente ensayados en extensión definen una línea normalizada de estado. A partir de una relación de vacíos intergranular al final de la consolidación de 0.93 los valores de $p'_{umáx}/p'_o$ son casi constantes mientras que para valores inferiores a $e_{gr} = 0.93$ esta relación de esfuerzos efectivos se incrementa significativamente.
2. Las muestras consolidadas anisotrópicamente definen otras líneas normalizadas de estado determinadas por el cociente de esfuerzos K utilizado en la consolidación. Estas líneas presentan el mismo comportamiento que las consolidadas isotrópicamente.
3. Las líneas normalizadas de estado, definidas por la variación en el cociente de esfuerzos K , se ubican a la izquierda de la línea normalizada de estado de los especímenes consolidados isotrópicamente. Las muestras consolidadas anisotrópicamente con $K = 0.62$ se aproximan mientras que las consolidadas anisotrópicamente bajo un $K = 0.44$ se alejan de esta.

Si los valores de $p'_{umáx}/p'_o$ se dividen por el correspondiente valor del cociente de esfuerzos K , se encuentra una única línea normalizada de estado que sigue la tendencia antes descrita aunque con una dispersión relativamente grande; esto se observa en la figura 5.25b.

De acuerdo con los resultados obtenidos e indicados en la tabla 5.5, las líneas normalizadas de estado dibujadas en este diagrama varían con la historia de esfuerzos de consolidación y la dirección de aplicación de la carga durante la etapa de falla, como se observa en la figura 5.26a.

En la figura 5.26b se definen las líneas normalizadas de estado que agrupan los resultados obtenidos en los especímenes ensayados en compresión ($\beta = K$) y en extensión ($\beta = 1/K$) dibujados en el plano $e_{gr} - \log(p'_{umáx}/p'_o) \cdot \beta$.

5.4.6 Comparación con otros especímenes ensayados bajo otras condiciones de esfuerzos.

A continuación se comparan los resultados experimentales obtenidos en esta investigación con los datos presentados por Ovando y Mesa (1991) en probetas de arena con 3, 5, 7 y 10% de caolín, consolidados isotrópicamente y ensayadas en compresión con un intervalo de presiones de consolidación de 1.0 a 3.0 Kg/cm². Se tiene en cuenta también, el trabajo realizado por Ovando y Lagunas (1992) en probetas de arena con 3, 5 y 7% de caolín, consolidadas isotrópica

y anisotrópicamente con una presión de consolidación de 1.0 kg/cm^2 ensayadas en compresión y extensión.

En la figura 5.27a se muestra la relación establecida entre $\Delta u_{\text{máx}}/p'_o$ y e_{gr} con los resultados obtenidos en especímenes consolidados isotrópicamente ensayados en compresión, los cuales están sobre la curva A obtenida por Ovando y Mesa (1991); sin embargo, existen otras curvas que dependen de la historia de esfuerzos de consolidación y de la dirección de aplicación de la carga durante la falla (Ovando y Lagunas, 1992) como se observa en la figura 5.27b.

La relación establecida por t'_q/p'_o y e_{gr} en especímenes consolidados isotrópicamente ensayados en compresión se ilustra en la figura 5.28a. Los resultados experimentales siguen la tendencia de la curva B verificando los datos obtenidos por Ovando y Mesa (1991). Las probetas consolidadas anisotrópicamente ensayadas en compresión y extensión se alejan de la curva, como se indica en la figura 5.28b, quedando confirmado lo dicho por Ovando y Lagunas (1992).

Los ángulos de fricción interna movilizados en el punto de colapso, ϕ'_q , obtenidos en las pruebas consolidadas isotrópicamente ensayadas en compresión, se muestran en la figura 5.29a. Estos resultados se localizan dentro de la zona delimitada por las curvas C y D (Ovando y Mesa, 1991) a excepción de la muestra densa. Las probetas consolidadas anisotrópicamente ensayadas en compresión, entran en esta zona a diferencia de las muestras sueltas ($e_{\text{gr}} = 0.90$) que quedan fuera. Igualmente, las muestra que fueron consolidadas isotrópica y anisotrópicamente ensayadas en extensión, se alejan de esta zona como fue establecido por Ovando y Lagunas, 1992 (fig 5.29b).

Sólo los especímenes sueltos y muy sueltos, consolidados isotrópica y anisotrópicamente ensayados en compresión, movilizaron valores de ϕ'_q que se encuentran en el intervalo de los predichos por Alberro (1990), de 18° a 23° ; por lo tanto, no entran en este intervalo las probetas densas (aproximadamente, $\phi'_q = 25.5^\circ$) y las muestras que fueron consolidadas isotrópica y anisotrópicamente ensayadas en extensión, con ángulos que varían entre 7.0° y 26° .

Los datos obtenidos con los especímenes sueltos y densos, consolidados isotrópicamente y ensayados en compresión, tienden con aproximación a las líneas p'_q y $p'_{\text{umáx}}$ mostradas en la figura 5.30a. Esto confirma los resultados obtenidos por Ovando y Mesa, 1991.

Como vimos en las figuras 5.23a y 5.26a, los especímenes consolidados anisotrópicamente, ensayados en compresión y extensión, sugieren que existen otras líneas normalizadas de estado, dibujadas en los planos $e_{\text{gr}} \log(p'_q/p'_o)$ y $e_{\text{gr}} \log(p'_{\text{umáx}}/p'_o)$, que dependen de la historia de esfuerzos de consolidación y de la dirección de aplicación de cargas durante la falla; sin embargo, se podría decir que existe una única línea normalizada de estado para $(p'_q)_{\text{ext. comp.}}$ y para $(p'_{\text{umáx}})_{\text{comp.}} - (p'_{\text{umáx}})_{\text{ext.}}$ al normalizar los resultados teniendo en cuenta el cociente de esfuerzos K, como se muestra en la figura 5.30; es decir la dirección de aplicación de cargas es el factor que determina la existencia de estas líneas de estado. De aquí se infiere que no existe una línea de estado única sino que existe una multiplicidad de líneas de estado, una para cada orientación de los esfuerzos principales durante la aplicación de cargas.

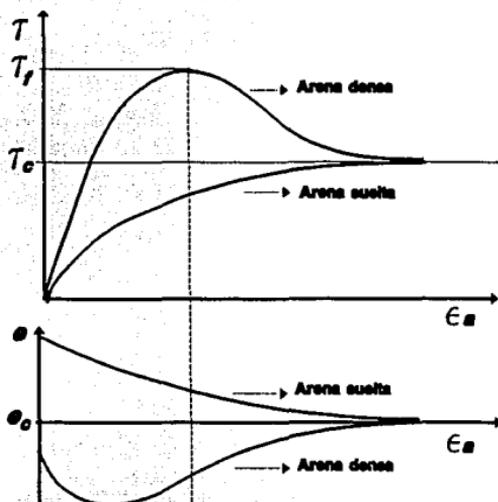


Fig 5.1 Comportamiento esfuerzo - deformación y relación de vacíos crítica en pruebas consolidadas drenadas (Casagrande, 1936)

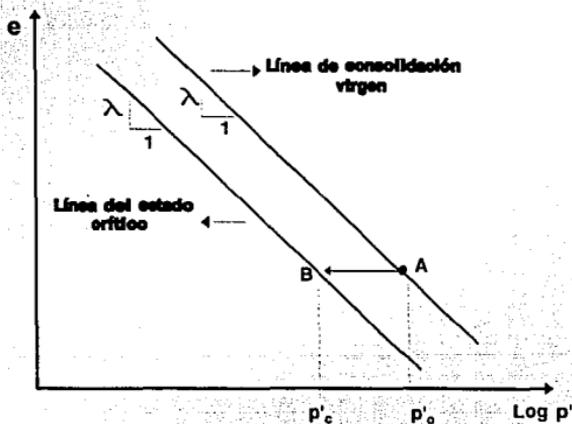


Fig 5.2 Línea del estado crítico en el plano $e - \log p'$ (Schofield y Wroth, 1968)

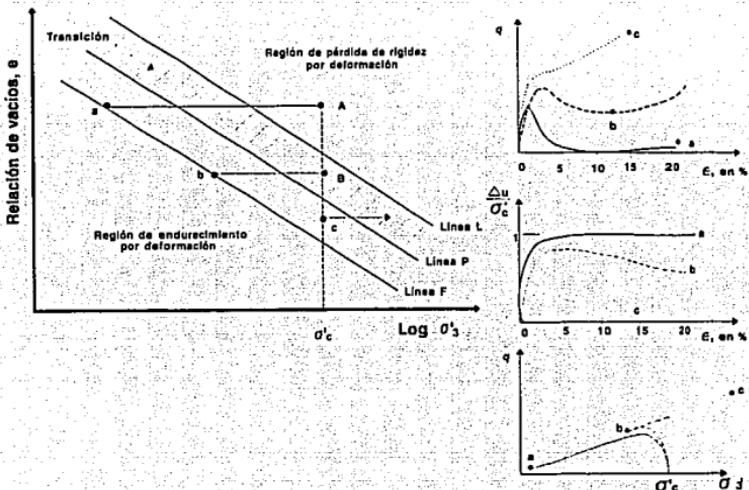


Fig 5.3 Comportamiento de las arenas - Diagrama de estado (Castro, 1969)

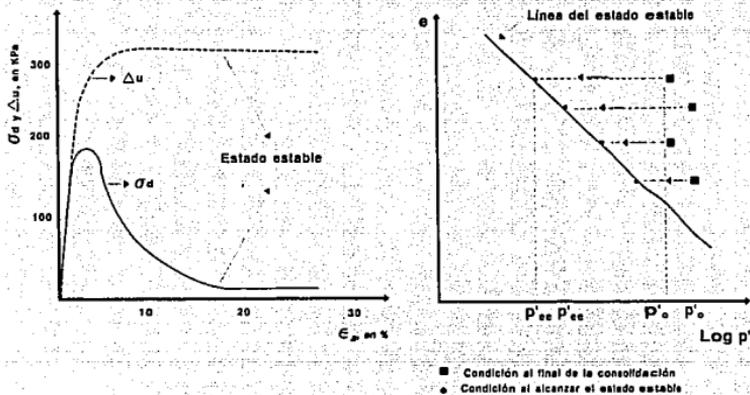


Fig 5.4 Estado estable y línea del estado estable

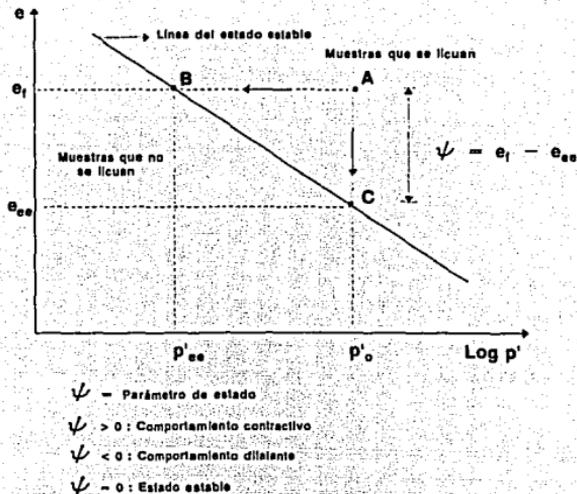


Fig 5.5 Definición del parámetro de estado (Been y Jefferies, 1985)

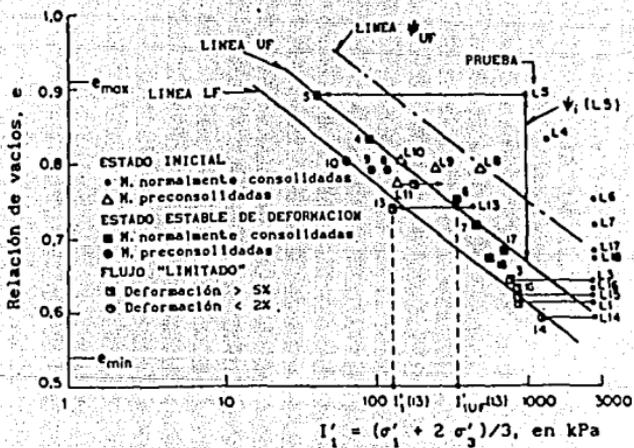


Fig 5.6 Diagrama de estado obtenido para la arena Dune (Konrad, 1990a)

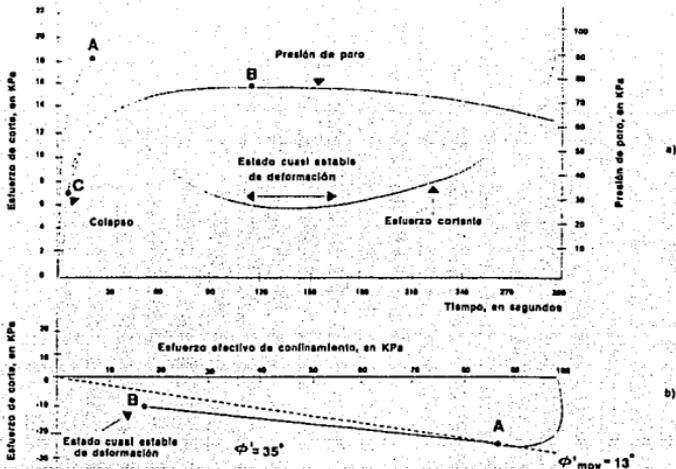


Fig. 5.7 Ensayes monotónicos de torsión no drenados en especímenes consolidados isotrópicamente (Alarcón, 1988)
 a. Esfuerzo cortante y presión de poro contra tiempo
 b. Trayectoria de esfuerzos

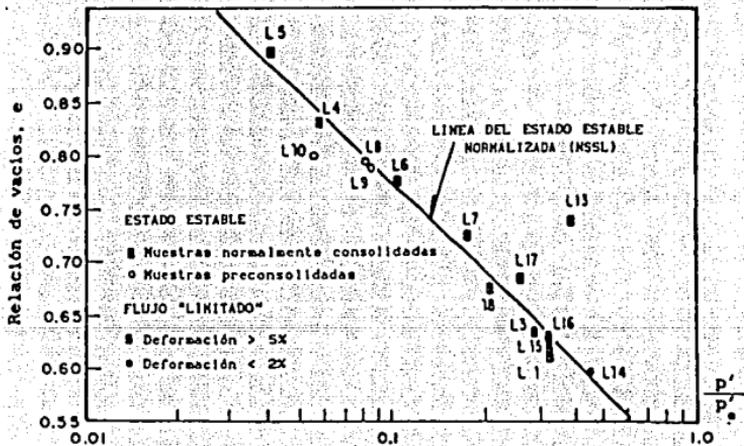
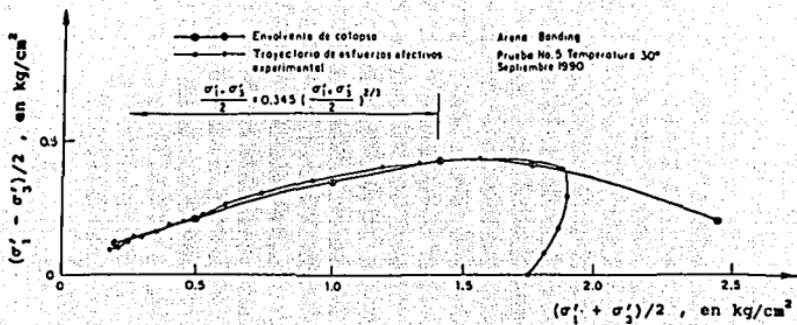
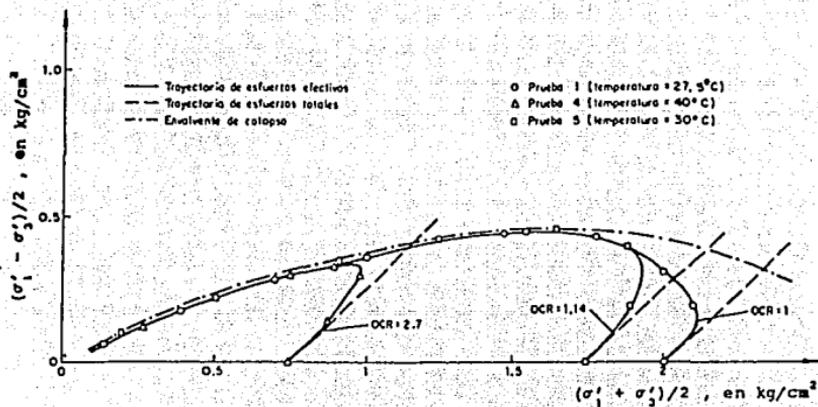


Fig. 5.8 Diagrama de estado normalizado para la arena Dune (Ovando, 1992)



(a)



(b)

Fig 5.9 Envoltorio de colapso y trayectorias de esfuerzos efectivos (Alberro, 1990)

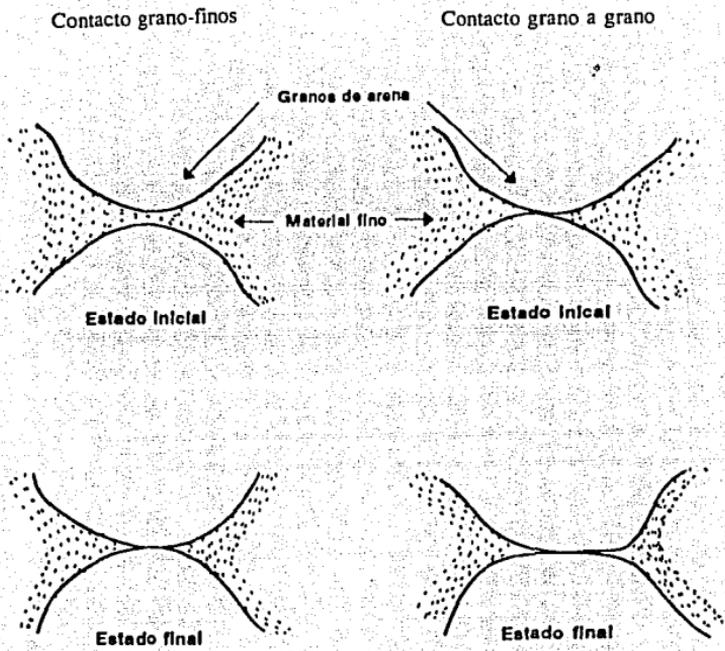


Fig: 5.10 Contacto Interparticular entre granos de arena y material fino

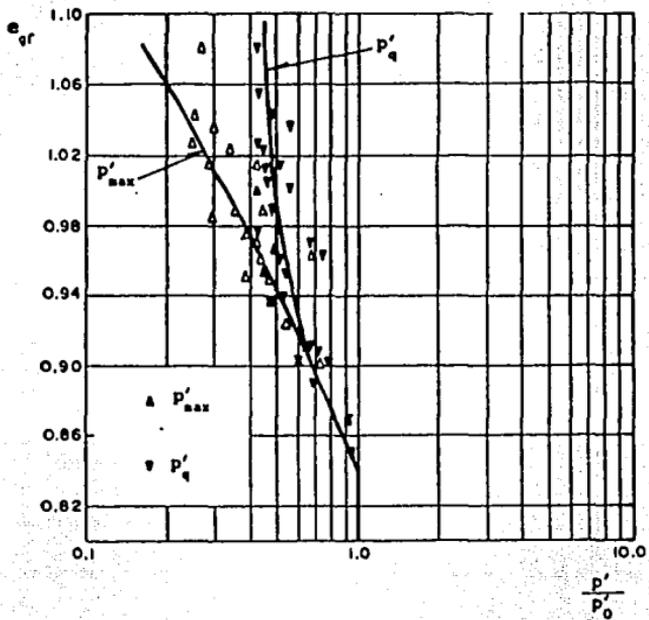


Fig 5.11

Diagrama de estado en términos de la relación de vacíos intergranular al final de la consolidación (Ovando y Mesa, 1991)

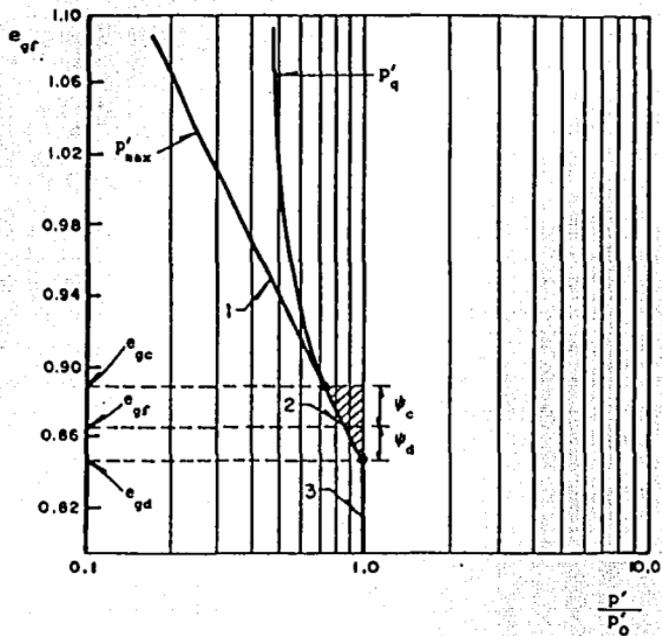


Fig 5.12

Representación esquemática del diagrama normalizado de estado de la figura 5.11 (Ovando y Mesa, 1991)

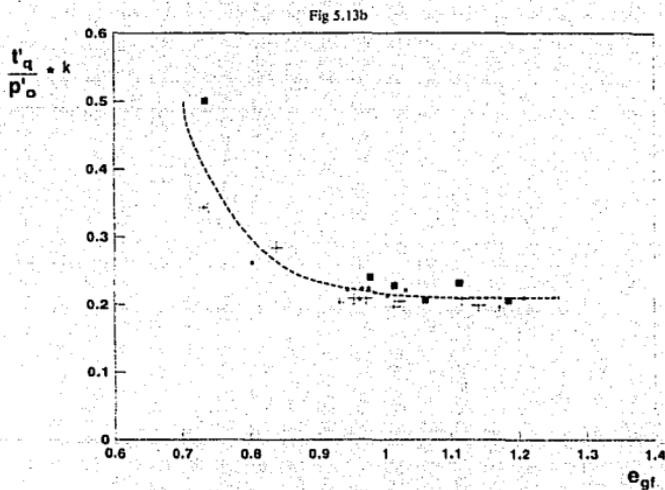
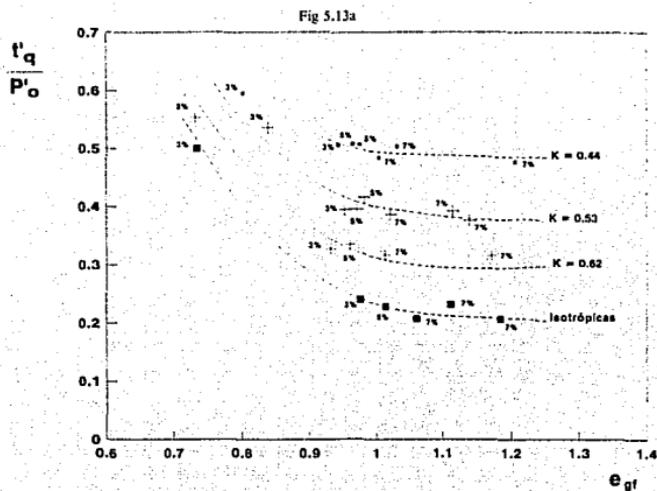


Fig 5.13

Esfuerzo cortante en el punto de colapso normalizado contra la relación de vacíos intergranular al final de la consolidación (pruebas en compresión)

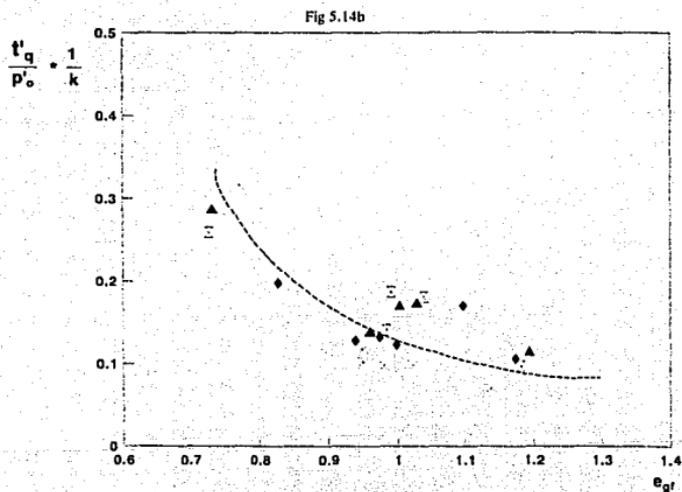
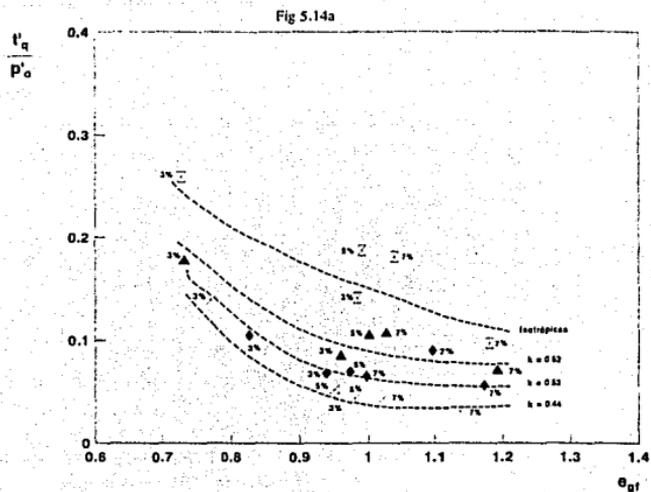


Fig 5.14 Esfuerzo cortante en el punto de colapso normalizado contra la relación de vacíos intergranular al final de la consolidación (pruebas en extensión)

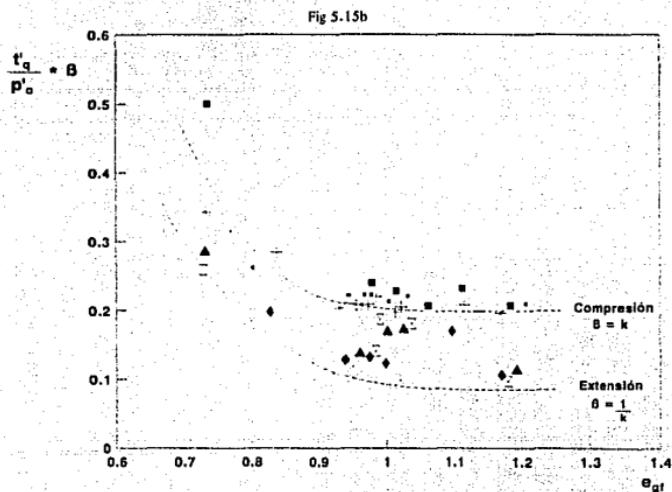
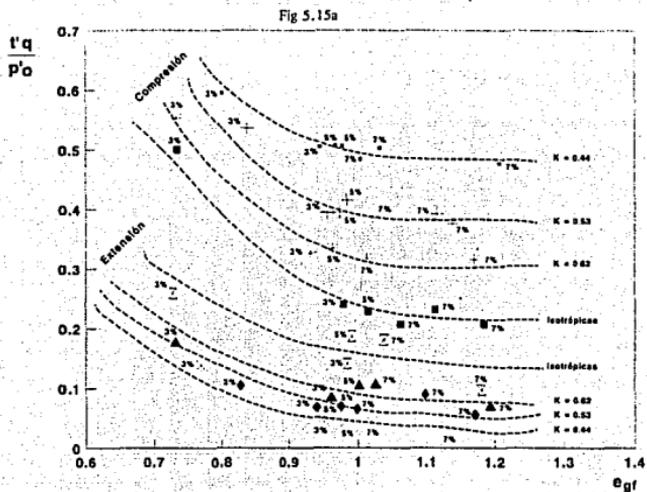


Fig 5.15

Esfuerzo cortante en el punto de colapso normalizado contra la relación de vacíos intergranular al final de la consolidación (pruebas en compresión y extensión)

Tabla 5.1 Esfuerzo cortante en el punto de colapso

Ensaye #	% Coeficiente	ϵ_{cr}	Dr_{cr} %	p'_c (kg/cm ²)	V'_c (kg/cm ²)	V'_c/p'_c	$(V'_c/\sigma'c) \cdot \beta$	Observaciones
34	3%	0.802	80.4	2.0	1.189	0.595	0.262	Consol. anisotrópica K = 0.44
3	3%	0.944	41.7	2.0	1.010	0.505	0.222	
*138	5%	0.966	38.2	1.0	0.507	0.507	0.223	
4	5%	0.976	35.5	2.0	1.012	0.506	0.223	
5	7%	1.004	33.5	2.0	0.967	0.484	0.213	
1	7%	1.033	26.0	1.0	0.503	0.503	0.221	$\beta = K$
41	7%	1.207	-18.8	2.0	0.954	0.477	0.210	
35	3%	0.838	70.6	2.0	1.072	0.536	0.284	Consol. anisotrópica K = 0.53
19	3%	0.954	39.0	2.0	0.788	0.394	0.209	
23	5%	0.972	36.6	2.0	0.789	0.359	0.209	
*152	5%	0.983	33.7	1.0	0.415	0.415	0.220	
20	7%	1.023	28.5	2.0	0.771	0.386	0.205	
55	7%	1.116	4.6	2.0	0.783	0.392	0.208	$\beta = K$
42	7%	1.139	-1.3	2.0	0.752	0.376	0.199	
49	3%	0.732	99.6	2.0	1.106	0.553	0.343	Consol. anisotrópica K = 0.62
22	3%	0.932	45.0	2.0	0.653	0.327	0.203	
52	5%	0.962	39.2	2.0	0.667	0.334	0.207	
24	7%	1.014	30.8	2.0	0.633	0.317	0.197	
43	7%	1.170	-9.3	2.0	0.632	0.316	0.196	
53	3%	0.734	98.9	2.0	0.999	0.500	0.500	Consol. isotrópica K = 1.00
*139	3%	0.977	32.7	1.0	0.240	0.240	0.240	
*140	5%	1.015	25.3	1.0	0.228	0.228	0.228	
*141	7%	1.061	18.8	1.0	0.207	0.207	0.207	
54	7%	1.113	5.4	2.0	0.463	0.232	0.232	
44	7%	1.184	-12.9	2.0	0.414	0.207	0.207	$\beta = K$
38	3%	0.769	89.4	2.0	0.277	0.139	0.316	Consol. anisotrópica K = 0.44
10	3%	0.949	40.3	2.0	0.089	0.045	0.102	
14	5%	0.949	42.6	2.0	0.103	0.052	0.118	
18	5%	0.979	34.7	2.0	0.086	0.043	0.098	
15	7%	1.021	29.0	2.0	0.086	0.043	0.098	
48	7%	1.134	0.0	2.0	0.061	0.031	0.070	$\beta = 1/K$
39	3%	0.828	73.3	2.0	0.209	0.105	0.198	Consol. anisotrópica K = 0.53
17	3%	0.939	43.1	2.0	0.139	0.068	0.128	
18	5%	0.973	36.3	2.0	0.140	0.070	0.132	
16	7%	0.998	35.0	2.0	0.129	0.065	0.123	
56	7%	1.097	9.5	2.0	0.179	0.090	0.170	
46	7%	1.171	-9.5	2.0	0.111	0.056	0.106	$\beta = 1/K$
50	3%	0.731	99.7	2.0	0.356	0.178	0.287	Consol. anisotrópica K = 0.62
25	3%	0.959	37.6	2.0	0.171	0.086	0.139	
26	5%	1.002	28.7	2.0	0.211	0.106	0.171	
27	7%	1.027	27.5	2.0	0.216	0.108	0.174	
45	7%	1.193	-15.2	2.0	0.142	0.071	0.115	
51	3%	0.727	100.8	2.0	0.518	0.259	0.259	Consol. isotrópica K = 1.00
31	3%	0.983	31.1	2.0	0.282	0.141	0.141	
30	5%	0.990	31.8	2.0	0.373	0.187	0.187	
32	7%	1.038	24.7	2.0	0.362	0.181	0.181	
47	7%	1.180	-11.8	2.0	0.194	0.097	0.097	

*1 : Pruebas realizadas por Lagunas, (1991)

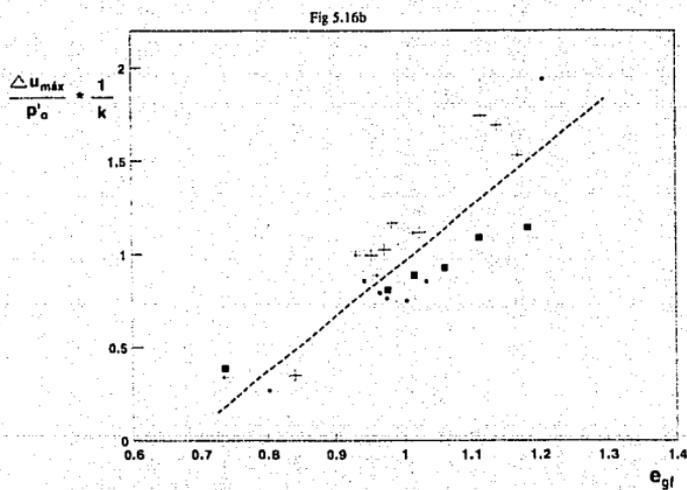
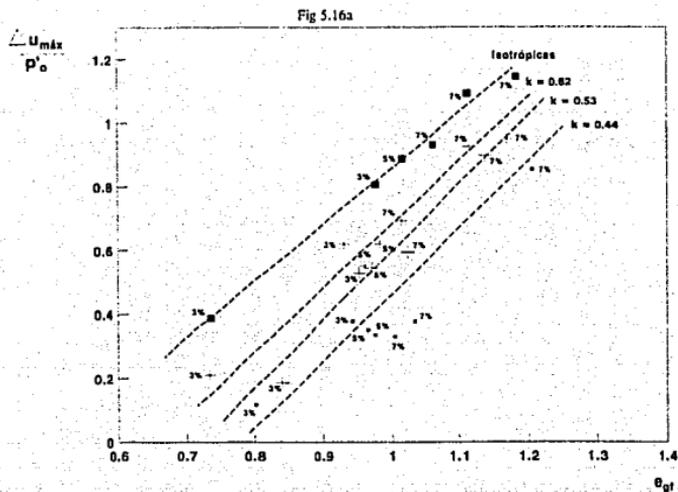


Fig 5.16

Exceso de presión de poro máximo normalizado contra la relación de vacíos intergranular al final de la consolidación (pruebas en compresión)

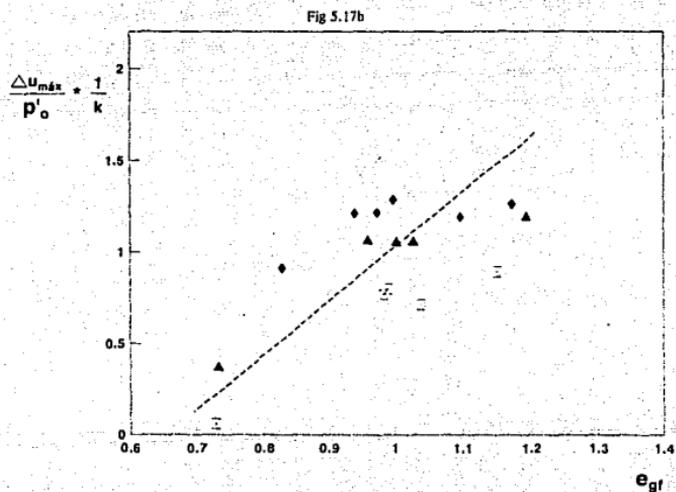
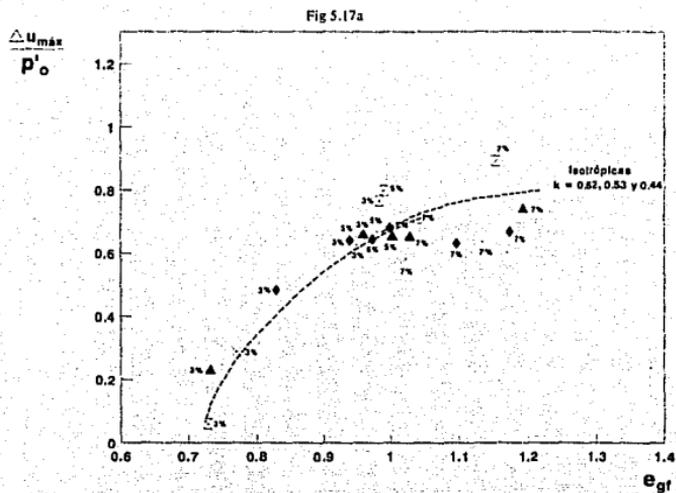


Fig 5.17 Exceso de presión de poro máximo normalizado contra la relación de vacíos intergranular al final de la consolidación (pruebas en extensión)

Fig 5.18a

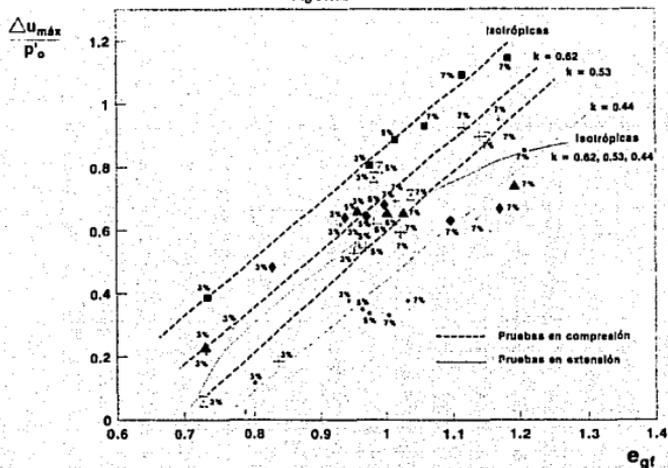


Fig 5.18b

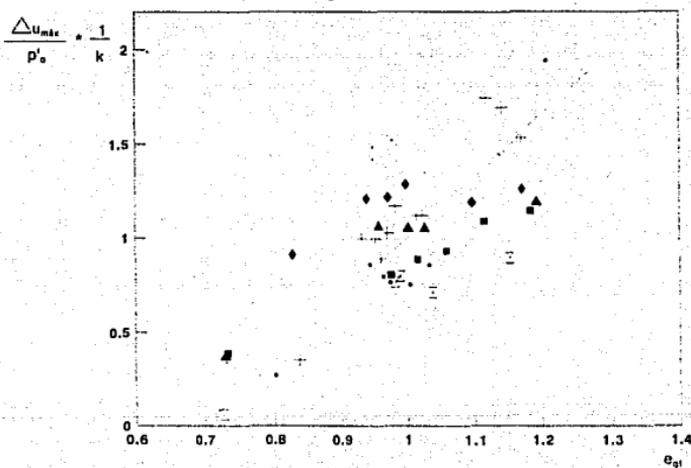


Fig 5.18

Exceso de presión de poro máximo normalizado contra la relación de vacíos intergranular al final de la consolidación (pruebas en extensión)

Tabla 5.2 Exceso de presión de poro.

Ensaye #	% Caolín	e_v	p'_v (kg/cm ²)	Dr_v %	$\Delta u_{máx}$ (kg/cm ²)	$\Delta u_{máx}/p'_v$	$(\Delta u_{máx}/p'_v)^*$ β	Observaciones
34	3%	0.802	2.0	80.4	0.235	0.118	0.268	Consol. anisotrópica K = 0.44
3	3%	0.944	2.0	41.7	0.755	0.378	0.859	
*138	5%	0.966	1.0	38.2	0.350	0.350	0.795	Falla en compresión $\beta = 1/K$
4	5%	0.976	2.0	35.5	0.674	0.337	0.766	
5	7%	1.004	2.0	33.5	0.662	0.331	0.752	
1	7%	1.033	1.0	26.0	0.377	0.377	0.857	
51	7%	1.207	2.0	18.8	1.707	0.854	1.941	
35	3%	0.838	2.0	70.6	0.371	0.186	0.351	Consol. anisotrópica K = 0.53
19	3%	0.954	2.0	39.0	1.058	0.529	0.998	
23	5%	0.972	2.0	36.6	1.089	0.545	1.028	Falla en compresión $\beta = 1/K$
*152	5%	0.983	1.0	33.7	0.620	0.620	1.170	
20	7%	1.023	2.0	28.5	1.188	0.594	1.121	
55	7%	1.116	2.0	4.6	1.850	0.925	1.745	
42	7%	1.139	2.0	-1.3	1.794	0.897	1.692	
49	3%	0.732	2.0	99.6	0.421	0.211	0.340	Consol. anisotrópica K = 0.62
22	3%	0.932	2.0	45.0	1.237	0.619	0.998	
52	5%	0.962	2.0	39.2	1.101	0.551	0.889	Falla en compresión $\beta = 1/K$
24	7%	1.014	2.0	30.8	1.386	0.693	1.118	
43	7%	1.170	2.0	-9.3	1.899	0.950	1.534	
53	3%	0.734	2.0	98.9	0.773	0.387	0.387	Consol. isotrópica K = 1.00
*139	3%	0.977	1.0	32.7	0.806	0.806	0.806	
*140	5%	1.015	1.0	25.3	0.887	0.887	0.887	Falla en compresión $\beta = 1/K$
*141	7%	1.061	1.0	18.8	0.931	0.931	0.931	
54	7%	1.113	2.0	5.4	2.184	1.092	1.092	
44	7%	1.184	2.0	-12.9	2.289	1.145	1.145	
38	3%	0.769	2.0	89.4	0.576	0.288	0.655	Consol. anisotrópica K = 0.44
10	3%	0.949	2.0	40.3	1.250	0.625	1.420	
14	5%	0.949	2.0	42.6	1.305	0.653	1.484	Falla en extensión $\beta = 1/K$
8	7%	0.979	2.0	34.7	1.336	0.668	1.518	
15	7%	1.021	2.0	29.0	1.163	0.582	1.323	
48	7%	1.134	2.0	0.0	1.274	0.637	1.448	
39	3%	0.828	2.0	73.3	0.965	0.483	0.911	Consol. anisotrópica K = 0.53
17	3%	0.939	2.0	43.1	1.281	0.641	1.209	
18	5%	0.973	2.0	36.3	1.287	0.644	1.215	Falla en extensión $\beta = 1/K$
16	7%	0.998	2.0	35.0	1.361	0.681	1.285	
56	7%	1.097	2.0	9.5	1.262	0.631	1.191	
46	7%	1.171	2.0	-9.5	1.336	0.668	1.260	
50	3%	0.731	2.0	99.7	0.464	0.232	0.374	
25	3%	0.959	2.0	37.6	1.324	0.662	1.068	
26	5%	1.002	2.0	28.7	1.312	0.626	1.058	Falla en extensión $\beta = 1/K$
27	7%	1.027	2.0	27.5	1.312	0.656	1.058	
45	7%	1.193	2.0	-15.2	1.485	0.743	1.198	
51	3%	0.727	2.0	100.8	0.118	0.059	0.059	Consol. isotrópica K = 1.00
31	3%	0.983	2.0	31.1	1.534	0.767	0.767	
30	5%	0.990	2.0	31.8	1.596	0.798	0.798	Falla en extensión $\beta = 1/K$
32	7%	1.038	2.0	34.7	1.423	0.712	0.712	
47	7%	1.151	2.0	-11.8	1.788	0.894	0.894	

*1: Pruebas realizadas por Lagunas, 1991.

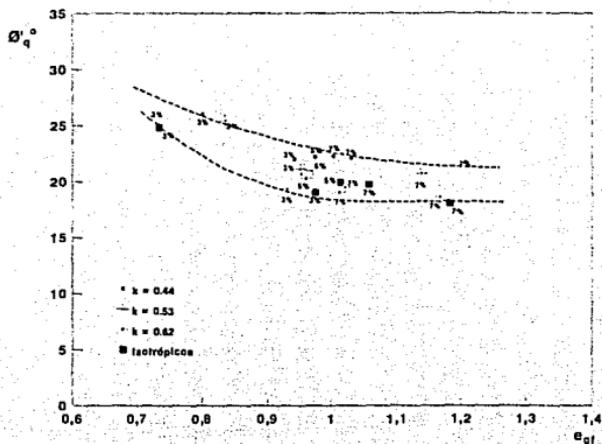


Fig 5.19a Angulo de fricción interna movilizado en el punto de colapso contra la relación de vacíos intergranular al final de la consolidación (pruebas en compresión)

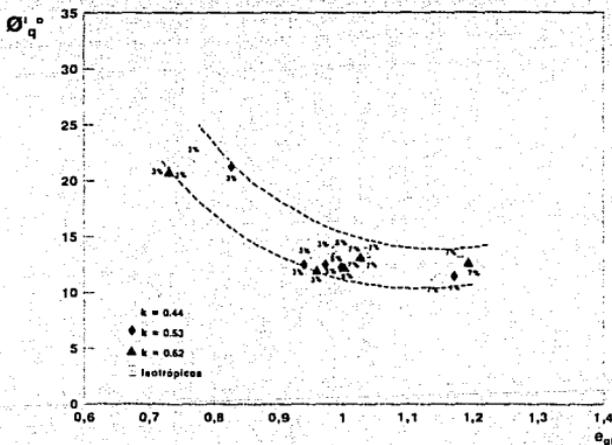


Fig 5.19b Angulo de fricción interna movilizado en el punto de colapso contra la relación de vacíos intergranular al final de la consolidación (pruebas en extensión)

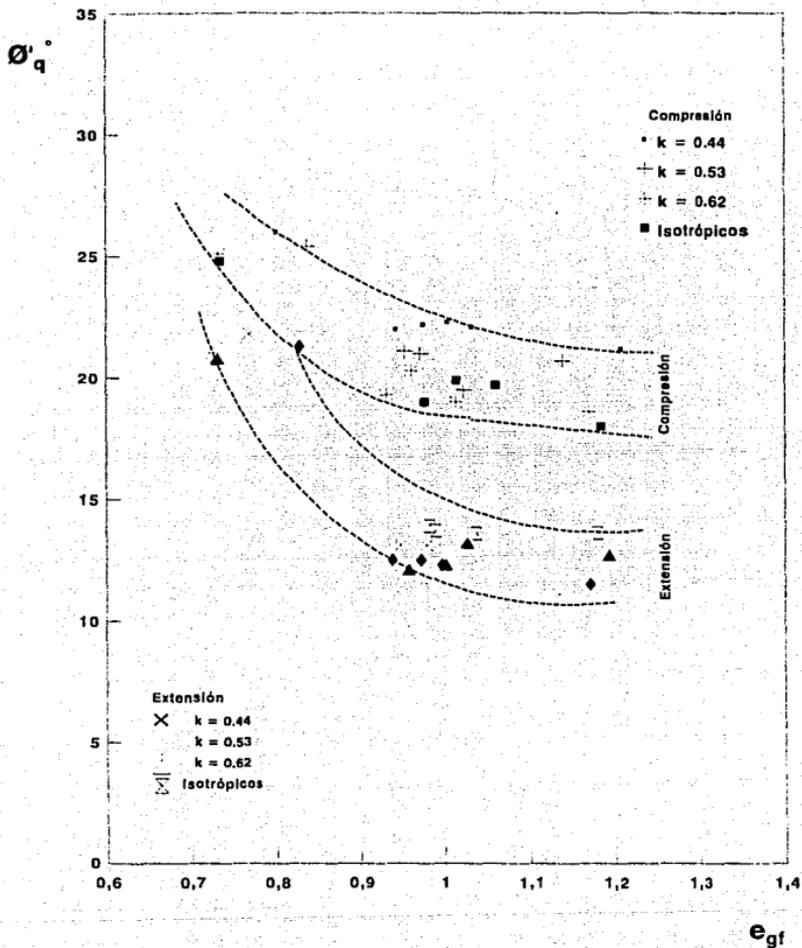


Fig 5.20

Angulo de fricción interna movilizado en el punto de colapso contra la relación de vacíos intergranular al final de la consolidación (pruebas en compresión y extensión)

Tabla 5.3 Angulo de fricción interna movilizado en el punto de colapso.

Ensaye #	% Caolín	e_{ef}	ρ'_s (kg/cm ³)	Dr_{ef} %	ϕ'_s (grados)	Observaciones
34	3%	0.802	2.0	80.4	26.0	Consol. anisotrópica k = 0.44
3	3%	0.944	2.0	41.7	22.0	
4	5%	0.976	2.0	35.5	22.2	
5	7%	1.004	2.0	33.5	22.3	
1	7%	1.033	1.0	26.0	22.1	
41	7%	1.207	2.0	-18.8	21.2	Falla en compresión
35	3%	0.838	2.0	70.6	25.4	Consol. anisotrópica K = 0.53
19	3%	0.954	2.0	39.0	21.1	
23	5%	0.972	2.0	36.6	21.0	
20	7%	1.023	2.0	28.5	19.5	
42	7%	1.139	2.0	-1.3	20.7	
49	3%	0.732	2.0	99.6	25.1	Consol. anisotrópica K = 0.62
22	3%	0.932	2.0	45.0	19.3	
52	5%	0.962	2.0	39.2	20.3	
24	7%	1.014	2.0	30.8	19.0	
43	7%	1.170	2.0	-9.3	18.6	
53	3%	0.734	2.0	98.9	24.8	Consol. isotrópica K = 1.0
*139	3%	0.977	1.0	32.7	19.0	
*140	5%	1.015	1.0	25.3	19.9	
*141	7%	1.061	1.0	18.8	19.7	
44	7%	1.184	2.0	-12.9	18.0	
38	3%	0.769	2.0	89.4	21.8	Consol. anisotrópica K = 0.44
10	3%	0.949	2.0	42.6	13.1	
8	5%	0.979	2.0	34.7	13.1	
15	7%	1.021	2.0	29.0	13.1	
48	7%	1.134	2.0	0.0	11.1	
39	3%	0.828	2.0	73.3	21.3	Consol. anisotrópica K = 0.53
17	3%	0.939	2.0	43.1	12.5	
18	5%	0.973	2.0	35.3	12.5	
16	7%	0.998	2.0	36.0	12.3	
46	7%	1.171	2.0	-9.5	11.5	
50	3%	0.731	2.0	99.7	20.8	Consol. anisotrópica K = 0.62
25	3%	0.959	2.0	37.6	12.1	
26	5%	1.002	2.0	28.7	12.3	
27	7%	1.027	2.0	27.5	13.2	
45	7%	1.193	2.0	15.2	12.7	
51	3%	0.727	2.0	100.8	20.8	Consol. isotrópica K = 1.00
31	3%	0.983	2.0	31.1	13.9	
30	5%	0.990	2.0	31.8	13.7	
32	7%	1.038	2.0	24.7	13.6	
47	7%	1.180	2.0	-11.8	13.6	

*1 : Pruebas realizadas por Lagunas, 1991.

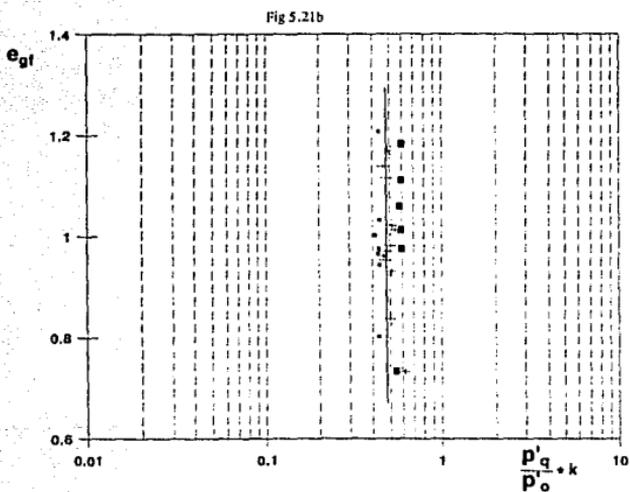
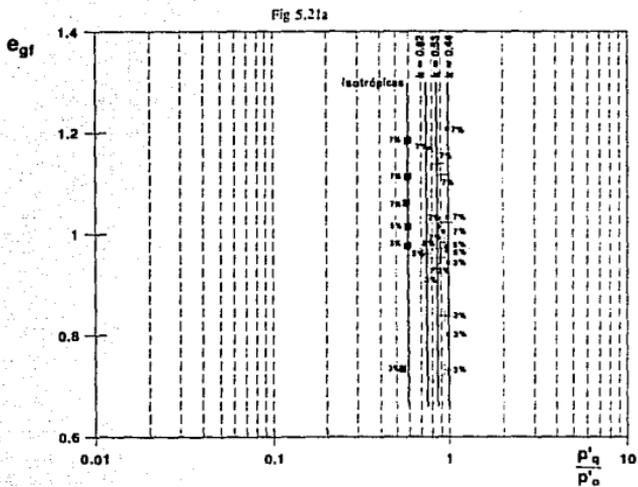


Fig 5.21

Diagrama normalizado de estado p'_q/p'_o en términos de la relación de vacíos intergranular al final de la consolidación (pruebas en compresión)

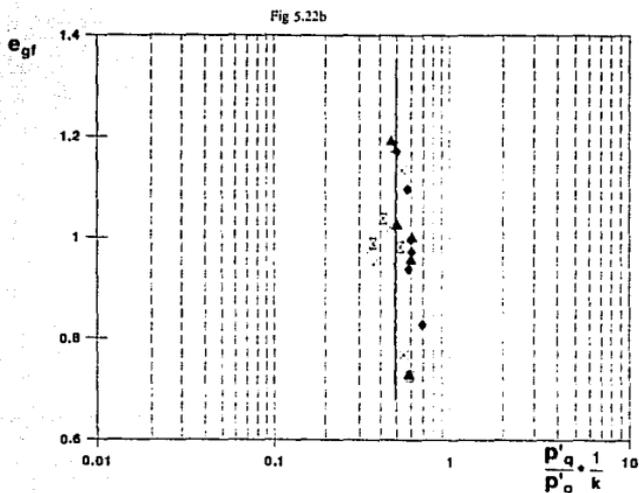
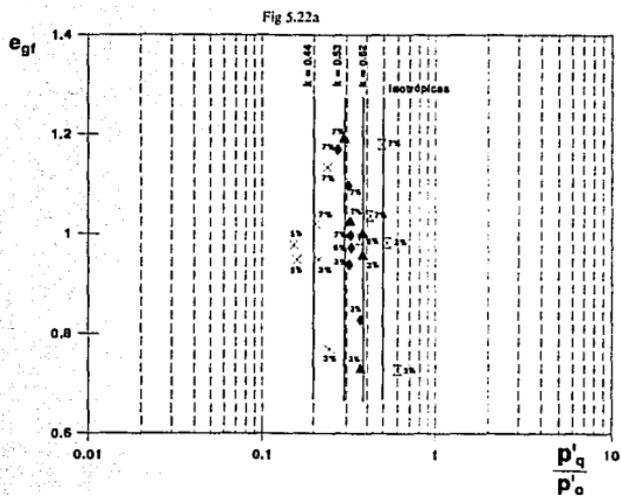


Fig 5.22

Diagrama normalizado de estado p'_q/p'_o en términos de la relación de vacíos intergranular al final de la consolidación (pruebas en extensión)

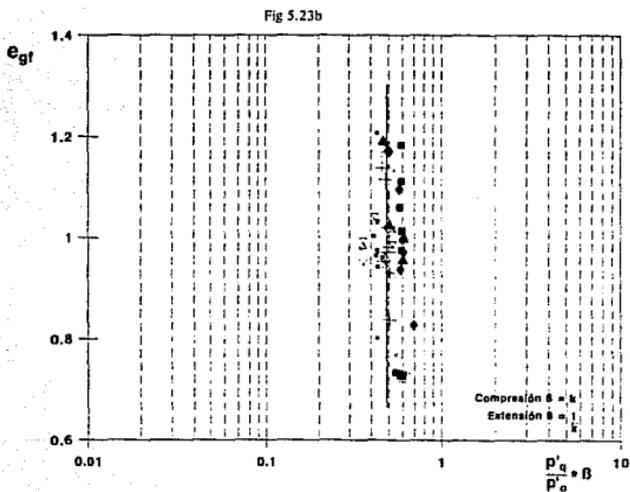
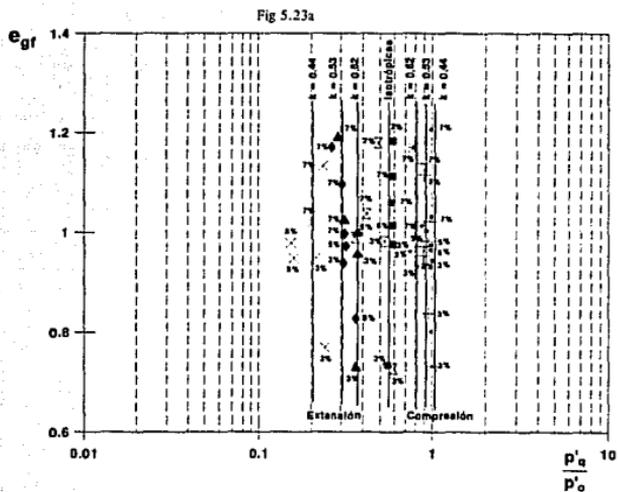


Fig 5.23

Diagrama normalizado de estado p'_a/p'_o en términos de la relación de vacíos intergranular al final de la consolidación (pruebas en compresión y extensión)

Tabla 5.4 Esfuerzo efectivo en el punto de colapso.

Ensaye #	% Caolín	e_{sp}	Dr_{sp} %	p'_c (kg/cm ²)	p'_s (kg/cm ²)	p'_c/p'_s	$(p'_c/p'_s) \cdot \beta$	Observaciones
34	3%	0.802	80.4	2.0	1.970	0.985	0.433	Consol. anisotrópica K = 0.44
3	3%	0.944	41.7	2.0	1.991	0.996	0.435	
*138	5%	0.966	38.2	1.0	0.971	0.971	0.427	Falla en compresión
4	5%	0.976	35.5	2.0	1.964	0.982	0.432	
5	7%	1.004	33.5	2.0	1.868	0.934	0.414	
1	7%	1.033	26.0	1.0	0.989	0.989	0.435	$\beta = K$
41	7%	1.207	-18.8	2.0	1.965	0.983	0.433	
35	3%	0.838	70.6	2.0	1.903	0.952	0.505	Consol. anisotrópica K = 0.53
19	3%	0.954	39.0	2.0	1.781	0.891	0.472	
23	5%	0.972	36.6	2.0	1.788	0.894	0.474	Falla en compresión
*152	5%	0.983	33.7	1.0	0.946	0.946	0.501	
20	7%	1.023	28.5	2.0	1.938	0.969	0.514	
55	7%	1.116	4.6	2.0	1.809	0.905	0.480	$\beta = K$
43	7%	1.139	-1.3	2.0	1.965	0.869	0.461	
49	3%	0.732	99.6	2.0	1.992	0.996	0.618	Consol. anisotrópica K = 0.62
22	3%	0.932	45.0	2.0	1.646	0.833	0.510	
52	5%	0.962	39.2	2.0	1.484	0.742	0.460	Falla en compresión $\beta = K$
34	7%	1.014	30.8	2.0	1.750	0.875	0.543	
43	7%	1.170	-9.3	2.0	1.564	0.782	0.485	
53	3%	0.734	98.9	2.0	1.903	0.547	0.547	Consol. isotrópica K = 1.00
*139	3%	0.977	32.7	1.0	0.589	0.589	0.589	
*140	5%	1.015	25.3	1.0	0.591	0.591	0.591	Falla en compresión
*141	7%	1.061	18.8	1.0	0.577	0.577	0.577	
54	7%	1.113	5.4	2.0	1.181	0.591	0.591	
44	7%	1.184	-12.9	2.0	1.184	0.592	0.592	$\beta = K$
38	3%	0.769	89.4	2.0	0.481	0.241	0.548	Consol. anisotrópica K = 0.44
10	3%	0.949	40.3	2.0	0.423	0.212	0.482	
14	5%	0.949	42.6	2.0	0.319	0.160	0.364	Falla en extensión
8	5%	0.979	34.7	2.0	0.308	0.154	0.350	
15	7%	1.021	29.0	2.0	0.408	0.204	0.464	
48	7%	1.134	0.0	2.0	0.470	0.235	0.534	$\beta = 1/K$
39	3%	0.828	73.3	2.0	0.731	0.366	0.691	Consol. anisotrópica K = 0.53
17	3%	0.939	43.1	2.0	0.620	0.310	0.585	
18	5%	0.973	36.3	2.0	0.640	0.320	0.604	Falla en extensión
16	7%	0.998	35.0	2.0	0.634	0.317	0.598	
56	7%	1.097	9.5	2.0	0.611	0.306	0.577	
46	7%	1.171	-9.5	2.0	0.534	0.266	0.502	$\beta = 1/K$
50	3%	0.731	99.7	2.0	0.728	0.364	0.587	Consol. anisotrópica K = 0.62
25	3%	0.959	37.6	2.0	0.745	0.373	0.602	
26	5%	1.002	28.7	2.0	0.749	0.375	0.605	Falla en extensión $\beta = 1/K$
27	7%	1.027	27.5	2.0	0.628	0.314	0.506	
45	7%	1.193	-15.2	2.0	0.580	0.290	0.468	
51	3%	0.727	100.8	2.0	1.190	0.595	0.595	Consol. isotrópica K = 1.00
31	3%	0.983	31.1	2.0	1.043	0.523	0.523	
30	5%	0.990	31.8	2.0	0.719	0.360	0.360	Falla en extensión $\beta = 1/K$
32	7%	1.038	24.7	2.0	0.833	0.417	0.417	
47	7%	1.180	-11.8	2.0	0.973	0.487	0.487	

*1 : Pruebas realizadas por Lagunas, 1991.

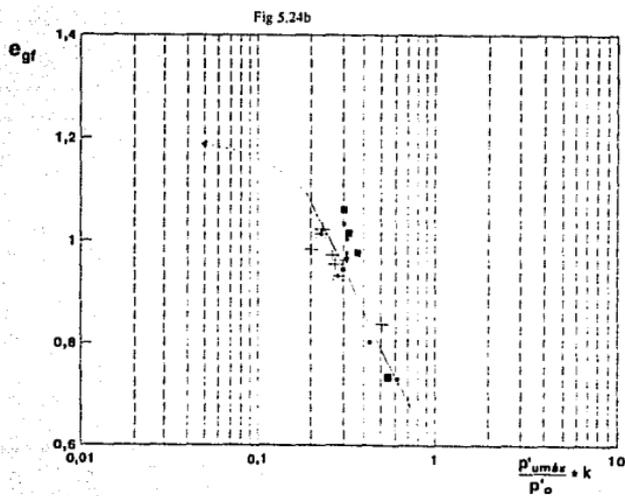
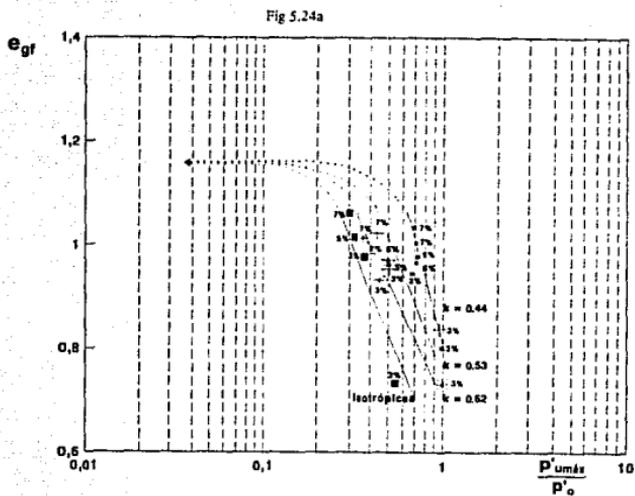


Fig 5.24 Diagrama normalizado de estado $p'_{umáx}/p'_o$ en términos de la relación de vacíos intergranular al final de la consolidación (pruebas en compresión)

Fig 5.25a

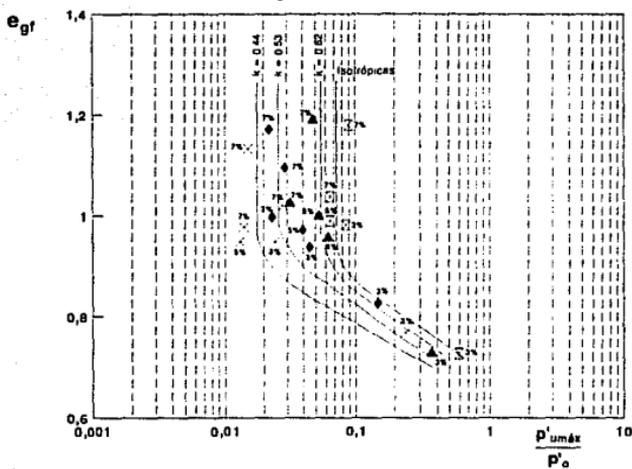


Fig 5.25b

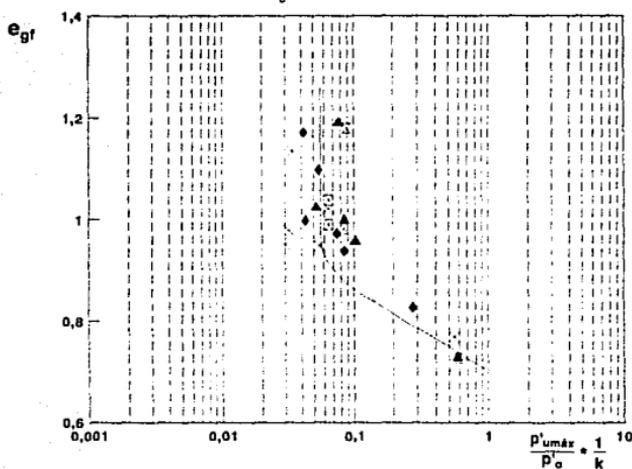


Fig 5.25

Diagrama normalizado de estado p'_{umax}/p'_o en términos de la relación de vacíos intergranular al final de la consolidación (pruebas en extensión)

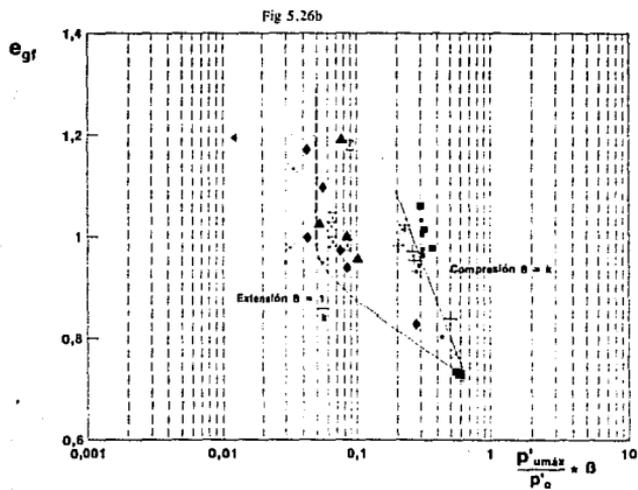
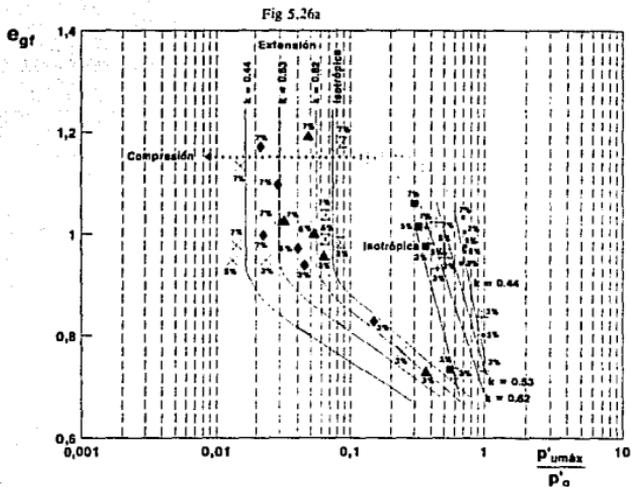


Fig 5.26

Diagrama normalizado de estado p'_{umax}/p'_o en términos de la relación de vacíos intergranular al final de la consolidación (pruebas en compresión y extensión)

Tabla 5.5 Esfuerzo efectivo correspondiente a la presión de poro máxima.

Ensaye #	% Caolín	e_{gr}	$D_{r,gr}$ %	p'_s (kg/cm ²)	p'_{uncl} (kg/cm ²)	p'_{uncl}/p'_s	$(p'_{uncl}/p'_s) = \beta$	Observaciones
34	3%	0.802	80.4	2.0	1.970	0.985	0.433	Consol. anisotrópica K = 0.44
3	3%	0.944	41.7	2.0	1.344	0.672	0.296	
*138	5%	0.966	38.2	1.0	0.712	0.712	0.313	
4	5%	0.976	35.5	2.0	1.425	0.713	0.314	
5	7%	1.004	33.5	2.0	1.423	0.712	0.313	Falla en compresión
1	7%	1.033	26.0	1.0	0.690	0.690	0.304	$\beta = K$
41	7%	1.207	-18.8	2.0	-0	-0	-0	
35	3%	0.838	70.6	2.0	1.903	0.952	0.505	Consol. anisotrópica K = 0.53
19	3%	0.654	39.0	2.0	1.011	0.506	0.268	
23	5%	0.972	36.6	2.0	0.986	0.493	0.262	
*152	5%	0.983	33.7	1.0	0.382	0.382	0.202	
20	7%	1.023	28.5	2.0	0.867	0.434	0.230	Falla en compresión
55	7%	1.116	4.6	2.0	-0	-0	-0	$\beta = K$
42	7%	1.139	-1.3	2.0	-0	-0	-0	
49	3%	0.732	99.6	2.0	1.992	0.996	0.618	Consol. anisotrópica K = 0.62
22	3%	0.932	45.0	2.0	0.895	0.448	0.278	
52	5%	0.962	39.2	2.0	1.009	0.505	0.313	
24	7%	1.014	30.8	2.0	0.730	0.365	0.226	
43	7%	1.170	-9.3	2.0	-0	-0	-0	Falla en compresión $\beta = K$
53	3%	0.734	98.9	2.0	1.093	0.547	0.547	Consol. isotrópica K = 1.00
*139	3%	0.977	32.7	1.0	0.368	0.368	0.368	
*140	5%	1.015	25.3	1.0	0.322	0.322	0.322	
*141	7%	1.061	18.8	1.0	0.302	0.302	0.302	
54	7%	1.116	5.4	2.0	-0	-0	-0	Falla en compresión
44	7%	1.184	-12.9	2.0	-0	-0	-0	
38	3%	0.769	89.4	2.0	0.481	0.241	0.548	Consol. anisotrópica K = 0.44
10	3%	0.949	40.3	2.0	0.048	0.024	0.055	
14	5%	0.949	42.6	2.0	0.026	0.013	0.030	
8	5%	0.979	34.7	2.0	0.027	0.014	0.032	
15	7%	1.021	29.0	2.0	0.034	0.017	0.039	Falla en extensión
48	7%	1.134	0.0	2.0	0.029	0.015	0.034	$\beta = 1/K$
39	3%	0.828	73.3	2.0	0.295	0.148	0.279	Consol. anisotrópica K = 0.53
17	3%	0.939	43.1	2.0	0.089	0.045	0.085	
18	5%	0.973	36.3	2.0	0.079	0.040	0.075	
16	7%	0.998	35.0	2.0	0.046	0.023	0.043	
56	7%	1.097	9.5	2.0	0.057	0.029	0.055	Falla en extensión
46	7%	1.171	-9.5	2.0	0.044	0.022	0.042	$\beta = 1/K$
50	3%	0.731	99.7	2.0	0.728	0.364	0.587	Consol. anisotrópica K = 0.62
25	3%	0.959	37.6	2.0	0.126	0.063	0.102	
26	5%	1.002	28.7	2.0	0.105	0.053	0.085	
27	7%	1.027	27.5	2.0	0.063	0.032	0.052	
25	7%	1.193	-15.2	2.0	0.096	0.048	0.077	Falla en extensión $\beta = 1/K$
51	3%	0.727	100.8	2.0	1.190	0.595	0.595	Consol. isotrópica K = 1.00
31	3%	0.983	31.1	2.0	0.170	0.085	0.085	
30	5%	0.990	31.8	2.0	0.130	0.065	0.065	
32	7%	1.038	24.7	2.0	0.130	0.065	0.065	
47	7%	1.180	-11.8	2.0	0.178	0.089	0.089	Falla en extensión $\beta = 1/K$

*1: Pruebas realizadas por Lagunas, 1991.

Fig 5.27a

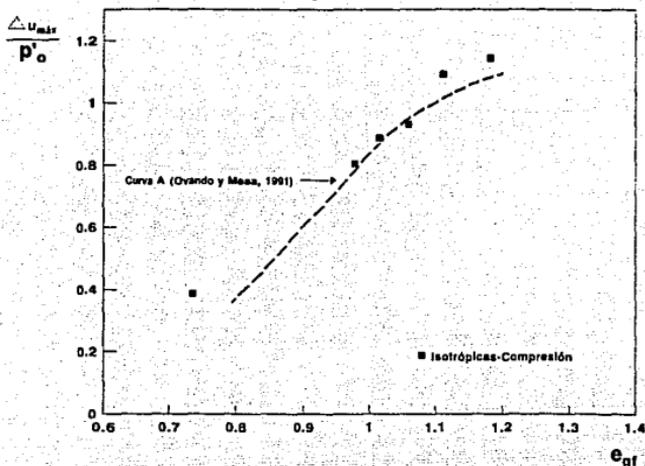


Fig 5.27b

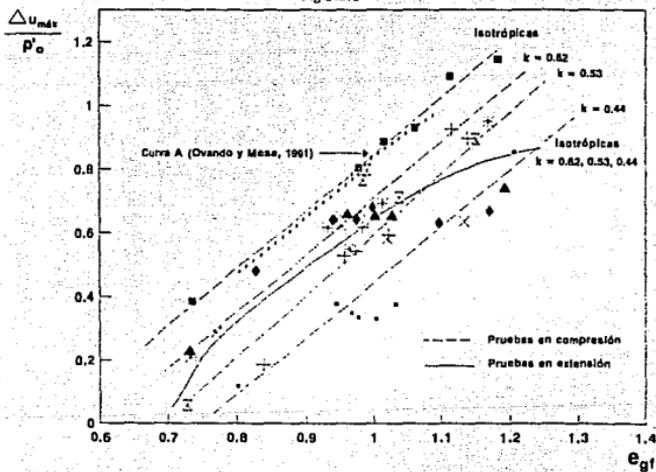


Fig 5.27

Comparación de la gráfica $\Delta u_{máx}/p'_o$ vs e_{gf} con los correspondientes especímenes ensayados bajo otras condiciones de esfuerzos.

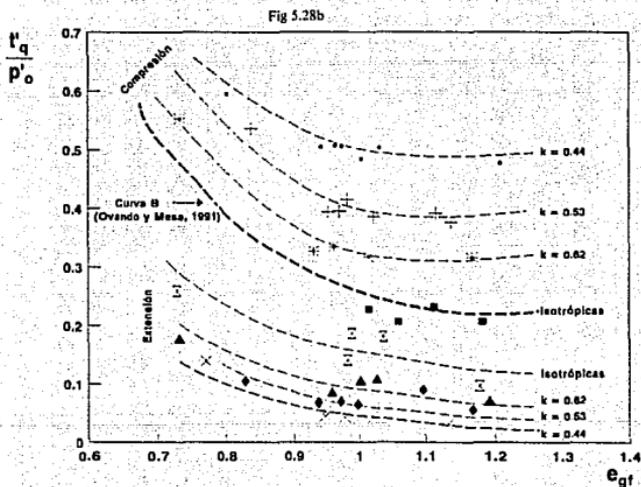
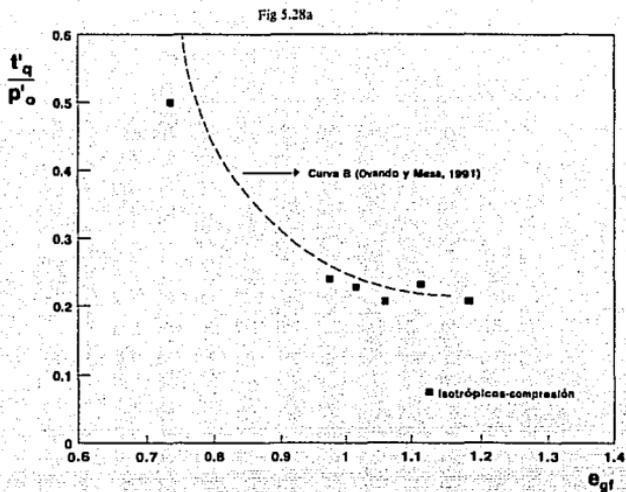


Fig 5.28

Comparación de la gráfica t'_q/p'_o vs e_{gf} con los correspondientes especímenes ensayados bajo otras condiciones de esfuerzos.

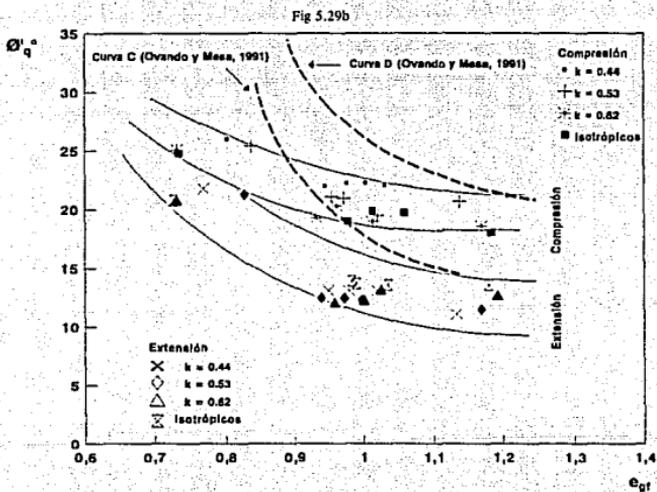
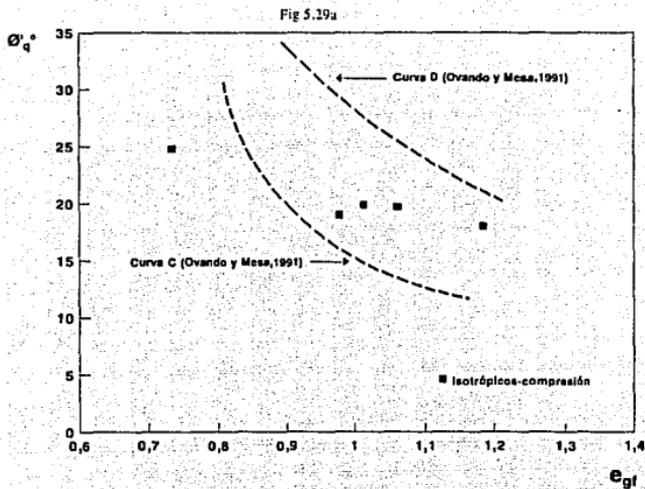


Fig 5.29

Comparación de la gráfica ϕ'_q vs e_{gf} con los correspondientes especímenes ensayados bajo otras condiciones de esfuerzos.

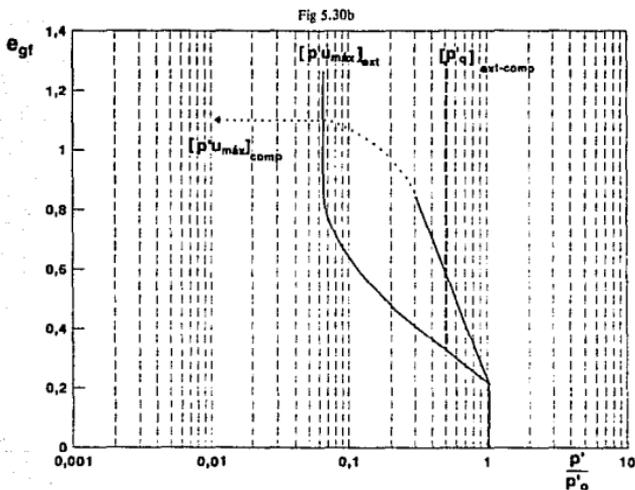
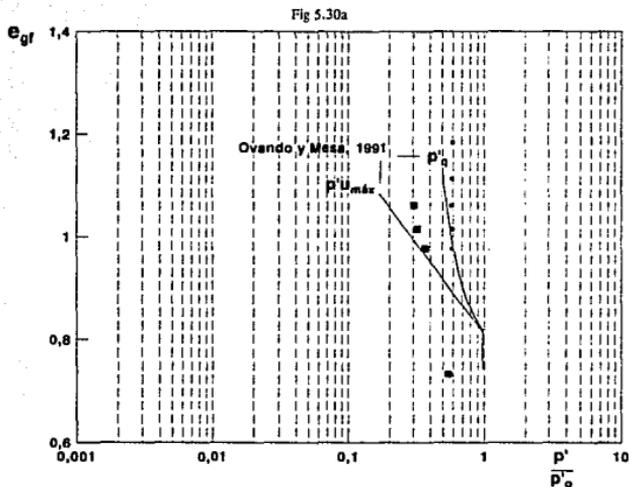


Fig 5.30

Comparación del diagrama normalizado $e_{gr} - \log(p'/p'_o)$ con los correspondientes especímenes ensayados bajo otras condiciones de esfuerzos.

6. CONCLUSIONES

Se describieron los principios de operación de los componentes principales de un sistema triaxial automático y el equipo triaxial empleado en esta investigación.

Se presentaron los programas de computadora realizados para controlar las etapas experimentales de los ensayos. Dichos programas pueden ser modificados de acuerdo con las variables deseadas para las pruebas triaxiales y con las necesidades del usuario.

Para estudiar la influencia de pequeños porcentajes de caolín (3, 5 y 7% en peso) en el comportamiento no drenado de una arena fina saturada, se llevó a cabo un programa experimental que consistió en la ejecución de ensayos triaxiales estáticos de compresión y extensión. Los especímenes se consolidaron isotrópicamente y anisotrópicamente a una presión efectiva de 2.0 kg/cm^2 ; además, para examinar los efectos de la magnitud del esfuerzo efectivo de consolidación, se incluyeron en el estudio algunos ensayos realizados por Lagunas (1992) consolidados bajo un esfuerzo efectivo de 1.0 kg/cm^2 . La relación de vacíos al inicio del ensayo se varió obteniendo especímenes densos ($e_i = 0.690$), sueltos ($e_i = 0.920$) y muy sueltos ($e_i = 1.130$). También se estudió el comportamiento de probetas arena-caolín consolidadas bajo diferentes cocientes de esfuerzos ($K = 1.0, 0.62, 0.53$ y 0.44).

A partir de los resultados experimentales se demostró que la resistencia, la rigidez y la capacidad para generar presión de poro de las probetas, dependen del porcentaje de finos, de la densidad inicial, del tipo de consolidación y de la dirección de aplicación de cargas en la etapa de falla. Se observó que la trayectoria de consolidación al igual que la compacidad inicial no modifican la envolvente de falla alcanzada, pero sí modifican la forma de la trayectoria de esfuerzos efectivos.

En los resultados obtenidos con probetas consolidadas bajo diferentes cocientes de esfuerzos K , se observó que el potencial para generar presión de poro aumenta conforme se incrementa el valor de K , y que tanto la rigidez como la resistencia disminuyen; esta capacidad para generar presión de poro se hace mayor en las probetas muy sueltas consolidadas isotrópicamente ($K = 1.0$) ensayadas en compresión. Las trayectorias de esfuerzos efectivos alcanzaron la misma envolvente de falla aunque los especímenes movilizaron ángulos de fricción interna en el punto de colapso diferentes, dependiendo principalmente de la densidad inicial y de la dirección de aplicación de cargas durante la etapa de falla; la historia de esfuerzos aplicados durante la consolidación hace que se presente poca variación entre los ángulos de fricción interna que se movilizaron cuando se alcanza el esfuerzo desviador máximo.

De acuerdo con la interpretación del comportamiento mostrado por las probetas

ensayadas, se pudo observar que la susceptibilidad de que se presente licuación parcial o total dependió de la compacidad inicial, de la dirección de aplicación de cargas durante la etapa de falla y de la historia de esfuerzos de consolidación.

En el estudio de las arenas presentado por Ishihara (1993), se pudo observar que sus resultados experimentales obtenidos en especímenes consolidados isotrópicamente ensayados en compresión presentan comportamientos muy similares a los presentados en este programa experimental.

Los resultados obtenidos en este estudio se interpretaron con un marco de referencia común a pesar de que cada una de las mezclas arena-caolín constituye en sí misma un suelo diferente. El análisis de los resultados del programa experimental incluyó los parámetros que usualmente se utilizan para describir el comportamiento no drenado de suelos granulares, la relación de vacíos y la magnitud del esfuerzo de consolidación pero además se tomaron en cuenta otros dos factores, la trayectoria de consolidación y la dirección de aplicación de cargas en la falla. Se generalizaron los resultados utilizando relaciones entre la relación de vacíos intergranular y algunos parámetros relevantes del comportamiento esfuerzo-deformación. De igual manera, se emplearon diagramas de estado en el espacio e -log p' , aplicando el concepto del estado estable e involucrando dos tipos de normalización.

Con base en lo anterior, se estableció un modelo fenomenológico con el que se demostró que no existe una única línea normalizada de estado estable; la existencia de otras, depende de la historia de esfuerzos durante la consolidación y de la dirección de aplicación de cargas.

Al involucrar el cociente de esfuerzos efectivos de consolidación, como factor normalizante adicional, se obtienen dos líneas de estado en términos de la compacidad y la dirección de aplicación de cargas.

La dirección de aplicación de cargas en la cámara triaxial es restringida en la orientación vertical para ensayos en compresión o extensión donde el esfuerzo principal mayor es horizontal. Otras direcciones no pueden ser investigadas con este aparato por lo que no se presentan otras líneas normalizadas de estado estable para otras direcciones de carga. Sin embargo, ensayos en los cuales el esfuerzo puede ser controlado tienden a suponer la existencia de una multiplicidad de líneas de estado estable y de colapso, cada una asociada a una dirección de carga.

En investigaciones futuras sería conveniente estudiar el comportamiento de arenas "contaminadas" con finos bajo diferentes grados de preconsolidación. También se sugiere realizar series de ensayos dinámicos en este tipo de suelos empleando las diferentes condiciones que se manejaron en esta investigación con el propósito de evaluar el potencial de licuación bajo la aplicación de un determinado número de esfuerzos cíclicos.

Una de las implicaciones ingenieriles presentadas en este estudio se basa en que los suelos granulares que involucran la presencia de arenas ligeramente limosas o arcillosas no deben considerarse como materiales altamente permeables ignorando la presencia de los finos.

7. RECONOCIMIENTOS

Expreso mis más sinceros agradecimientos:

Al Dr. Efraín Ovando Shelley por la valiosa orientación y dirección durante el desarrollo de este trabajo y por el gran apoyo académico que siempre me brindo.

A los Drs. Miguel P. Romo Organista y Gabriel Auvinet Guichard, a los M en I Jesus Alberro Aramburu y Manuel J Mendoza López, por los acertados comentarios y sugerencias al contenido de la tesis.

Al Instituto de Ingeniería por proporcionarme los medios y herramientas para la elaboración de esta tesis.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, a mis profesores y a todas las personas que de alguna forma hicieron posible la realización de mis estudios de maestría.

A México, por permitirme conocer la grandeza de su gente y brindarme la posibilidad de compartir sus riquezas intelectuales.

A mis amigos, por la satisfacción de contar con su amistad.

8. REFERENCIAS.

- Alarcón - Guzmán A, Leonards G A y Chameau J L (1988), "Undrained monotonic and cyclic strength of sands", *Proc ASCE, Journal of Geotechnical Engineering*, 114, 10, 1089-1109.
- Alberro J (1990), *La licuación de las arenas*, Informe Interno, Instituto de Ingeniería, UNAM, México.
- Been K y Jefferies M G (1985), "A state parameter for sands", *Geotechnique*, 35, 2, 99-112.
- Been K, Jefferies M G y Hachey J (1991), "The critical state of sands", *Geotechnique*, 41, 3, 365-381.
- Casagrande A (1936), "Characteristics of cohesionless soils affecting the stability of slopes and earth fills", *Journal of The Boston Society of Civil Engineers*, Jan, En: *Contributions to Soil Mechanics 1925-1940*, 1940, Boston Society of Civil Engineers, 257-276.
- Castro G (1969), *Liquefaction of sands*, Harvard Soil Mechanics Series, N.º 81.
- Castro G, Seed R, Keller T O y Seed H B (1992), "Steady-state strength analysis of lower San Fernando Dam slide", *Proc ASCE, Journal of Geotechnical Engineering*, 118, 3, 406-427.
- De Alba P (1969), *Determination of soil liquefaction by a large-scale laboratory test*, University of California, Berkeley.
- Ford C J (1985), *The behaviour of clayey sands with low clay contents*, M Sc Report, Imperial College of Science and Technology, Londres.
- Georgiannou V N, Burland J B y Hight D WC (1990), "The undrained behaviour of clayey sands in triaxial compression and extension", *Geotechnique*, 40, 3, 431-449.
- Ibarra J (1989), *Comportamiento de arenas*, Tesis de Maestría, (en preparación), DEPMI, UNAM, México.
- Ishibashi I, Kawamura M y Bhatia S K (1985), "Torsional simple shear apparatus for drained and undrained cyclic testing", *Proc ASCE, Tech Session on Advances in the Art of Testing Soils Under Cyclic Conditions*, Detroit, 51-73.

- Ishihara K, Sodekawa M y Tanaka Y (1978), "Effects of overconsolidation on liquefaction characteristics of sand containing fines", En: *Dynamic Geotechnical Testing*, ASTM, Special Tech Pub, 654.
- Ishihara K (1993), "Liquefaction and flow failure during earthquakes", *Geotechnique*, 43, 3, 351-415.
- Jefferies M G (1993), "Nor-Sand": a simple critical state model for sand", *Geotechnique*, 43, 91-103.
- Konrad J M (1990a), "Minimum undrained strength of two sands", *Proc ASCE, Journal of Geotechnical Engineering*, 116, 6, 932-947.
- Konrad J M (1990b), "Minimum undrained strength versus steady-state strength of sands", *Proc ASCE, Journal of Geotechnical Engineering*, 116, 6, 948-963.
- Konrad J M (1993), "Undrained response of loosely compacted sands during monotonic and cyclic compression test", *Geotechnique*, 43, 1, 69-89.
- Lagunas A I (1992), *Comportamiento de una arena con caolín ensayada en un sistema triaxial automático*, Tesis de Maestría, DEPFI, UNAM, México.
- Mesa C M (1991), *Comportamiento no drenado de arenas con bajo contenido de caolín o bentonita*, Tesis de Maestría, DEPFI, UNAM, México.
- Ovando-Shelley E (1986), *Stress-strain of granular soils tested in the triaxial cell*, PhD thesis, Imperial College of Science and Technology, Londres.
- Ovando-Shelley E (1992), "Bounding surfaces and steady-state for sands", *Volumen Raul J Marsal*, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, D.F., México, 193-204.
- Ovando-Shelley E y Mesa C M (1991), *Comportamiento no drenado de una arena con bajos contenidos de materia fina*, Informe Interno, Instituto de Ingeniería, UNAM, México.
- Poulos S J (1981), "The steady-state of deformation", *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE* 107, GT 5, 553-562.
- Seed H B e Idriss I M (1982), *Ground motions and soil liquefaction during earthquakes*, Earthquakes Engineering Research Institute, University of California, Berkeley.

Apéndice A. Listados de programas.

```

10 CLR
20 REM *****
30 REM *
40 REM *          UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO *
50 REM *          INSTITUTO DE INGENIERIA *
60 REM *          LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS *
70 REM *          PROGRAMA MONITOR.BAS *
80 REM *          ELABORADO POR ALBERTO ISAAC LAGUNAS TORRES *
90 REM *          MODIFICADO POR BEATRIZ ELENA PEREZ GONZALEZ *
100 REM *****
110 REM
120 REM
130 PRINT *
140 PRINT *
150 PRINT *
160 PRINT *
170 PRINT *
180 PRINT *
190 PRINT *****
200 PRINT *
210 PRINT *          PROGRAMA PARA MONITOREAR CEROS DE TRANSDUCTORES **
220 PRINT *
230 PRINT *****
240 REM
250 REM
260 PRINT *
270 PRINT *
280 PRINT *
290 PRINT *
300 PRINT : INPUT "INDIQUE EL NOMBRE DEL ARCHIVO _ _ _ _ _ .PRN ";A$
310 PRINT *
320 REM
340 ARCHIVOS = A$
350 REM
360 OPEN ARCHIVOS FOR OUTPUT AS #1
370 REM
380 WRITE #1, " "
390 WRITE #1, " "
410 WRITE #1, " "
420 WRITE #1, " "
430 REM
440 REM SUBROUTINA LP.ADC.VALUS
450 REM
460 LP.ADC.VALUS = 27
470 DEF SEG = 4H0
480 LPCLSEG = PEEK(&H4FE) + 256*PEEK(&H4FF)
490 DEF SEG = LPCLSEG
500 REM
510 DEFINT C,I,V,G
520 REM
530 REM
540 PASADAS = 15
550 MUESTRAS = 15
560 GAN = 1
570 REM
580 NMAX = 1
590 REM
600 REM DECLARA EL TAMAÑO DE LOS ARREGLOS
610 DIM VALOR(PASADAS)
620 DIM RELOJS(PASADAS)
630 DIM CANAL(NMAX)
640 DIM T$(NMAX)
650 DIM U$(NMAX)
660 DIM G$(NMAX)
670 DIM F$(NMAX)
680 DIM ATE$(NMAX)

```

```

690 REM
700 PRINT " "
710 PRINT " "
720 PRINT " "
730 PRINT "-----"
740 WRITE #1, "-----"
750 FOR J=1 TO NMAX
760 REM
770 PRINT "CANAL";:INPUT CANAL(J)
780 PRINT " "
890 PRINT "-----"
900 WRITE #1, "CANAL: "; CANAL(J)
960 WRITE #1, " "
970 WRITE #1, "-----"
980 NEXT J
990 REM
1000 PRINT "TIEMPO EN SEGUNDOS ENTRE CADA LECTURA";:INPUT DELTA
1010 PRINT " "
1020 PRINT "TIEMPO EN SEGUNDOS ENTRE CADA CICLO DE LECTURAS";:INPUT DELTA1
1030 PRINT " "
1040 PRINT " "
1050 WRITE #1, " " VOLTAJE "
1060 WRITE #1, " "
1070 WRITE #1, "HORA", "TIMER", "CANAL 4"
1080 WRITE #1, "-----"
1090 REM
1100 PRINT "OPRIMA RETURN PARA INICIAR LA MEDICION ";:INPUT RETS
1110 REM
1120 TTIEMPX = TIMER
1130 FOR J=1 TO NMAX
1140 SUMA = 0
1150 FOR I=1 TO PASADAS
1160 TEMPOR = TIMER
1170 IF (TEMPOR+DELTA) > TIMER AND TIMER <> 0 THEN GOTO 1170 : ELSE
1180 IF TIMER = 0 THEN TTIEMPX = TIMER
1190 CALL LP.ADC.VALUE(CANAL(J),GAN,VALOR(I))
1200 RELOJ$(I) = TIME$
1210 PRINT " "
1220 PRINT " "
1230 REM
1240 FVOLTS = (VALOR(I)*10/4096)-5 'Convierte los datos a volts.
1250 SUMA = SUMA+FVOLTS
1260 PROMEDIO(J) = SUMA/PASADAS
1270 NEXT I
1280 NEXT J
1290 WRITE #1, RELOJ$(7), TIMER, PROMEDIO(1)
1300 PRINT "-----"
1310 PRINT "CANAL", "VOLTAJE"
1320 PRINT "-----"
1330 FOR J=1 TO NMAX
1340 PRINT " "
1350 PRINT CANAL(J), PROMEDIO(J)
1360 NEXT J
1370 PRINT " "
1380 PRINT " "
1390 PRINT "HORA", RELOJ$(7)
1400 PRINT "-----"
1410 TEMPORX = TIMER-TTIEMPX
1420 IF TEMPORX > 0 THEN GOTO 1450
1430 TIMX = TIMER+86400
1440 TEMPORX = TIMX-TTIEMPX
1450 IF TEMPORX <= DELTA1 THEN GOTO 1410
1460 GOTO 1120
1470 CLOSE
1480 END

```

```

10 CLS
20 REM
30 REM
40 REM
50 REM
60 REM
70 REM
80 REM
90 REM
100 REM
110 REM
120 REM
130 PRINT
140 PRINT
150 PRINT
160 PRINT
170 PRINT
180 PRINT
190 PRINT
200 PRINT
210 PRINT
220 PRINT
230 PRINT
240 REM
250 REM
260 PRINT
270 PRINT
280 PRINT
290 PRINT
300 PRINT : INPUT "INDIQUE EL NOMBRE DEL ARCHIVO _____,PRN ";AS
310 PRINT
320 PRINT "PECHA"; INPUT FE$
330 REM
340 ARCHIVO$ = AS
350 REM
360 OPEN ARCHIVO$ FOR OUTPUT AS #1
370 REM
380 WRITE #1," "
390 WRITE #1," "
400 WRITE #1,"PECHA: ";FE$
410 WRITE #1," "
420 WRITE #1," "
430 REM
440 REM SUBROUTINA LP.ADC.VALUE
450 REM
460 LP.ADC.VALUE = 27
470 DEP SEQ = &H0
480 LPCLSEG = PEEK(&H4FE) + 256*PEEK(&H4FF)
490 DEP SEQ = LPCLSEG
500 REM
510 DEFINT C,I,V,G
520 REM
530 REM
540 PASADAS = 15
550 MUESTRAS = 15
560 GAN = 1
570 REM
580 NMAX = 2
590 REM

```

```

600 REM DECLARA EL TAMAÑO DE LOS ARREGLOS
610 DIM VALOR(PASADAS)
620 DIM RELOJS(PASADAS)
630 DIM CANAL(NMAX)
640 DIM T$ (NMAX)
650 DIM U$(NMAX)
660 DIM G$(NMAX)
670 DIM F$(NMAX)
680 DIM ATE$(NMAX)
690 REM
700 PRINT " "
710 PRINT " "
720 PRINT " "
730 PRINT "-----"
740 WRITE #1, "-----"
750 FOR J=1 TO NMAX
760 REM
770 PRINT "CANAL";:INPUT CANAL(J)
780 PRINT " "
790 PRINT "TIPO DE TRANSDUCTOR";:INPUT T$(J)
800 PRINT " "
810 PRINT "UNIDADES DE TRABAJO";:INPUT U$(J)
820 PRINT " "
830 PRINT "GANANCIA";:INPUT G$(J)
840 PRINT " "
850 PRINT "FILTRO";:INPUT P$(J)
860 PRINT " "
870 PRINT "ATENUADOR";:INPUT ATE$(J)
880 PRINT " "
890 PRINT "-----"
900 WRITE #1, "CANAL: ", CANAL(J)
910 WRITE #1, "TIPO DE TRANSDUCTOR: ", T$(J)
920 WRITE #1, "UNIDADES DE TRABAJO: ", U$(J)
930 WRITE #1, "GANANCIA: ", G$(J)
940 WRITE #1, "FILTRO: ", P$(J)
950 WRITE #1, "ATENUADOR: ", ATE$(J)
960 WRITE #1, " "
970 WRITE #1, "-----"
980 NEXT J
990 REM
1000 PRINT "TIEMPO EN SEGUNDOS ENTRE CADA LECTURA";:INPUT DELTA
1010 PRINT " "
1020 PRINT " "
1030 PRINT " "
1040 WRITE #1, " " VOLTAGE
1050 WRITE #1, " "
1060 WRITE #1, "HORA", "CANAL 3", "CANAL 5"
1070 WRITE #1, "-----"
1080 REM
1090 REM PRESION QUE SE DESEA APLICAR
1100 REM
1110 PRINT " "
1120 PRINT " "
1130 PRINT "APLIQUE EL INCREMENTO DE PRESION DESEADO CON REGULADOR Y MANOMETRO"
1140 PRINT " "
1150 PRINT " "
1160 PRINT " "

```

```

1170 PRINT 'OPRIMA RETURN PARA INICIAR LA MEDICION '; INPUT RET$
1180 REM
1190 FOR J=1 TO NMAX
1200 SUMA = 0
1210 FOR I=1 TO PASADAS
1220 TEMPOR = TIMER
1230 IF (TEMPOR-DELTA) > TIMER THEN GOTO 1210
1240 CALL LP.ADC.VALUE(CANAL(J),GAN,VALOR(I))
1250 RELOJ$(I) = TIMES
1260 PRINT * *
1270 PRINT * *
1280 REM
1290 FVOLTS = (VALOR(I)*10/4096)-5 'Convierte los datos a volts.
1300 SUMA = SUMA+FVOLTS
1310 PROMEDIO(J) = SUMA/PASADAS
1320 NEXT I
1330 NEXT J
1340 WRITE #1,RELOJ$(7),PROMEDIO(1),PROMEDIO(2)
1350 PRINT '-----'
1360 PRINT "CANAL", "VOLTAJE"
1370 PRINT '-----'
1380 FOR J=1 TO NMAX
1390 PRINT * *
1400 PRINT CANAL(J),PROMEDIO(J)
1410 NEXT J
1420 PRINT * *
1430 PRINT * *
1440 PRINT "HORA", RELOJ$(7)
1450 PRINT '-----'
1460 PRINT * *
1470 PRINT * *
1480 PRINT * *
1490 INPUT "DESEA APLICAR UN NUEVO INCREMENTO (S/N)"; NUES
1500 PRINT * *
1510 IF NUES="S" OR NUES="N" THEN GOTO 1130
1520 CLOSE #1
1530 END

```

```

10 CLS
20 KEY OFF
30 PRINT " "
40 PRINT " "
50 PRINT " "
60 PRINT " "
70 PRINT " "
80 PRINT " "
90 PRINT " "
100 PRINT " "
110 PRINT " "
120 PRINT " "
130 REM
140 PRINT:PRINT:PRINT
150 REM
160 PRINT " "
170 PRINT " "
180 PRINT " "
190 PRINT " "
200 PRINT " "
210 PRINT " "
220 REM
230 JJ = 1
240 PRINT:PRINT:PRINT:PRINT
250 INPUT "INDIQUE EL NOMBRE DEL ARCHIVO _ _ _ _ _ PRM ";A$
260 PRINT " "
270 OPEN "NOMBRE" FOR OUTPUT AS #2
280 PRINT "FECHA";:INPUT FES
290 PRINT:PRINT:PRINT
300 PRINT "DATOS DEL ESPECIMEN AL INICIAR LA ETAPA DE CONSOLIDACION:"
310 PRINT " "
320 PRINT "AREA, EN CM^2";:INPUT A0
330 PRINT "ALTURA, EN CM";:INPUT H0
340 PRINT "VOLUMEN, EN CM^3";:INPUT B0
350 PRINT:PRINT:PRINT
360 PRINT "ESFUERZO EFECTIVO FINAL DE CONSOLIDACION, PF";:INPUT PF
370 PRINT:PRINT:PRINT
380 PRINT "CEROS DE TRANSDUCTORES:"
390 PRINT " "
400 PRINT "CERO TRANSDUCTOR DE PRESION DE PORO";:INPUT ER2
410 PRINT "CERO TRANSDUCTOR DE PRESION CONFINANTE";:INPUT ER3
420 PRINT "CERO TRANSDUCTOR DIFERENCIAL DE PRESION";:INPUT ER4
430 PRINT:PRINT:PRINT
440 INPUT "OPRIMA ENTER PARA INICIAR LA ETAPA DE CONSOLIDACION";RET$
450 REM
460 ARCHIVOS = A$
470 WRITE #2,ARCHIVOS$
480 WRITE #2,A0,H0,B0
490 WRITE #2,PF
500 WRITE #2,ER2,ER3,ER4
510 CLOSE #2
520 REM
530 OPEN ARCHIVOS FOR OUTPUT AS #1
540 REM
550 WRITE #1," "
560 WRITE #1," "
570 WRITE #1,"FECHA: ",FES
580 WRITE #1," "
590 WRITE #1,"-----"
600 WRITE #1," "
610 WRITE #1," "
620 WRITE #1,"HORA","TIEMPO","C2","C3","C4","PC","CP","DV","P"
630 WRITE #1," "
640 WRITE #1,"-----"
650 CLOSE #1
660 GOTO #10

```

```

470 REM
480 REM TIEMPO DE ESPERA ENTRE INCREMENTOS DE PRESION CONFINANTE
490 JJ = 0
700 DELT = 114          'Tiempo en segundos
710 T0 = TIMER
720 T = TIMER
730 IF ABS(T-T0) >= DELT THEN GOTO 750
740 GOTO 720
750 BEEP:BEEP
800 REM
810 OPEN "NOMBRE" FOR INPUT AS #1
820 INPUT #1,ARCHIVOS
830 INPUT #1,A0,H0,B0
840 INPUT #1,PF
850 INPUT #1,ER2,ER3,ER4
860 CLOSE #1
870 REM
880 OPEN ARCHIVOS FOR APPEND AS #3
890 REM
900 REM SUBROUTINA LP.ADC.VALUE
910 LP.ADC.VALUE = 27
920 DEF SBO = 6H0
930 LPCLSE0 = PEEK(6H4FE) + 256*PEEK(6H4FF)
940 DEF SBO = LPCLSE0
950 DEFINT C,I,V,G
960 PASADAS = 10
970 MUESTRAS = 10
980 GAN = 1
990 NMAX = 3
1000 REM
1010 REM DECLARA EL TAMAÑO DE LOS ARREOLOS
1020 DIM VALOR(PASADAS)
1030 DIM RELOJS(PASADAS)
1040 DIM CANAL(NMAX)
1050 DIM PROMEDIO(NMAX)
1060 PRINT:PRINT:PRINT
1070 REM IDENTIFICACION DE CANALES QUE SE UTILIZAN EN LA ETAPA DE CONSOLIDACION
1080 CANAL(1) = 3
1090 CANAL(2) = 3
1095 CANAL(3) = 4
1100 REM
1110 REM CONSTANTES DE CALIBRACION
1120 ACPG = 5.516
1130 BCPP = 2.534
1140 FCCV = .1377
1150 REM
1160 DELTA = .05          'Tiempo en segundos entre cada lectura
1170 PRINT " "
1180 FOR J=1 TO NMAX
1190 SUMA = 0
1200 FOR I=1 TO PASADAS
1210 TEMPOR = TIMER
1220 IF (TEMPOR-DELTA) > TIMER THEN GOTO 1220
1230 CALL LP.ADC.VALUE(CANAL(J),GAN,VALOR(I))
1240 RELOJS(I) = TIMES
1250 PRINT:PRINT
1260 FVOLTS = (VALOR(I)*10/4096)-5          'Convierte los datos a volts
1270 SUMA = SUMA+FVOLTS
1280 PROMEDIO(J) = SUMA/PASADAS
1290 NEXT I
1300 NEXT J
1310 REM

```

```

1320 REM CALCULO DE PRESIONES Y ESPUERZOS
1330 PP = (PROMEDIO(1)-ER2)*BCPP
1340 PC = (PROMEDIO(2)-ER3)*ACPC
1350 IF JJ = 1 THEN ER6=ER61
1360 DV = (PROMEDIO(3)-ER4)*.432/FCCV
1370 P = PC-PP
1380 REM
1390 WRITE #1,RELOJ$(5),TIMER,PROMEDIO(1),PROMEDIO(2),PROMEDIO(3),PC,PP,DV,P
1400 CLOSE #1
1410 IF JJ<>1 THEN GOTO 1480
1420 OPEN "NOMBRE" FOR OUTPUT AS #1
1430 WRITE #1,ARCHIVOS
1440 WRITE #1,A0,H0,B0
1450 WRITE #1,PP
1460 WRITE #1,ER2,ER3,ER4
1470 CLOSE #1
1480 PRINT "-----"
1490 PRINT "CANAL", " VOLTAJE"
1500 PRINT "-----"
1510 FOR J=1 TO NMAX
1520 PRINT CANAL(J),PROMEDIO(J)
1530 NEXT J
1540 PRINT "-----"
1550 PRINT "HORA:", RELOJ$(5)
1560 PRINT "-----"
1570 PRINT:PRINT
1580 PRINT "-----"
1590 PRINT "PRES. CONFIN.", "CONTRAPRES.", " p"
1600 PRINT "-----"
1610 PRINT PC,PP,P
1620 PRINT "-----"
1630 PRINT " "
1640 IF PC >= 6.5 THEN GOTO 1670
1650 IF P >= PP THEN GOTO 1670
1660 CHAIN "PRUEBAN'.BAS",,ALL
1670 CLOSE #1
1680 BEEP:BEEP:BEEP:BEEP:BEEP:BEEP
1690 PRINT " "
1700 PRINT "*****LA STAPA DE CONSOLIDACION HA FINALIZADO*****"
1710 PRINT " "
1720 PRINT "EFECTUE LOS PASOS CORRESPONDIENTES PARA INICIAR LA ETAPA DE FALLA"
1730 END

```

```

10 CLS
20 KEY OFF
30 PRINT *
40 PRINT *
50 PRINT *
60 PRINT *
70 PRINT *
80 PRINT *
90 PRINT *
100 PRINT *
110 PRINT *
120 PRINT *
130 REM
140 PRINT:PRINT:PRINT
150 REM
160 PRINT *
170 PRINT *
180 PRINT *
190 PRINT *
200 PRINT *
210 PRINT *
220 REM
230 JJ = 1
240 PRINT:PRINT:PRINT:PRINT
250 INPUT "INDIQUE EL NOMBRE DEL ARCHIVO _ _ _ _ .PRN ";A$
260 PRINT *
270 OPEN "NOMBRE" FOR OUTPUT AS #2
280 PRINT "FECHA";:INPUT P$
290 PRINT:PRINT:PRINT
300 PRINT "DATOS DEL ESPECIMEN AL INICIAR LA ETAPA DE CONSOLIDACION:"
310 PRINT *
320 PRINT "AREA, EN CM^2";:INPUT A0
330 PRINT "ALTURA, EN CM";:INPUT H0
340 PRINT "VOLUMEN, EN CM^3";:INPUT B0
350 PRINT:PRINT:PRINT
360 PRINT "RELACION Y ESTADO FINAL DE ESFUERZOS EFECTIVOS:"
370 PRINT *
380 PRINT "RELACION DE ESFUERZOS PRINCIPALES, K0";:INPUT K0
390 PRINT "ESFUERZO PRINCIPAL MAYOR, SIG1F";:INPUT SIG1F
400 PRINT "ESFUERZO PRINCIPAL MENOR, SIG3F";:INPUT SIG3F
410 PRINT "ESFUERZO EFECTIVO OCTAEDRICO FINAL DE CONSOLIDACION, PP";:INPUT PP
420 PRINT:PRINT:PRINT
430 PRINT "CEROS DE TRANSDUCTORES: "
440 PRINT *
450 PRINT "CERO TRANSDUCTOR DE DESPLAZAMIENTO AXIAL";:INPUT ER1
460 PRINT "CERO TRANSDUCTOR DE PRESION DE PORO";:INPUT ER2
470 PRINT "CERO TRANSDUCTOR DE PRESION CONFINANTE";:INPUT ER3
475 PRINT "CERO TRANSDUCTOR DIFERENCIAL DE PRESION";:INPUT ER4
480 PRINT "CERO CELDA DE CARGA";:INPUT ERS
500 PRINT:PRINT:PRINT
510 INPUT "OPRIMA ENTER PARA INICIAR LA ETAPA DE CONSOLIDACION";RET$
520 REM
530 ARCHIVOS = AS
540 WRITE #2,ARCHIVOS
550 WRITE #2,A0,H0,B0
560 WRITE #2,K0,SIG1F,SIG3F,PP
570 WRITE #2,ER1,ER2,ER3,ER4,ERS
580 CLOSE #2
590 REM

```

```

600 OPEN ARCHIVOS POR OUTPUT AS #1
610 REM
620 WRITE #1, " "
630 WRITE #1, " "
640 WRITE #1, "FECHA: ";FRS
650 WRITE #1, " "
660 WRITE #1, "-----"
670 WRITE #1, "                                VOLTAJE
680 WRITE #1, " "
690 WRITE #1, "HORA", "TIEMPO", "C1", "C2", "C3", "C4", "C5", "FA", "PC", "CP", "DH", "DV",
EA", "EV", "AC", "FA/AC", "SIG", "SIG1", "C", "S", "P", "K"
700 WRITE #1, " "
710 WRITE #1, "-----"
720 CLOSE #1
730 GOTO #80
740 REM
750 REM TIEMPO DE ESPERA ENTRE INCREMENTOS DE FUERZA AXIAL O PRESION CONFINANTE
760 JJ = 0
770 DELT = 120 "Tiempo en segundos"
780 TO = TIMER
790 T = TIMER
800 IF ABS (T-TO) >= DELT THEN GOTO #20
810 GOTO 790
820 BEEP;BEEP
830 OPEN "NOMBRE" FOR INPUT AS #1
840 INPUT #1, ARCHIVOS
850 INPUT #1, A0, H0, B0
860 INPUT #1, K0, SIG1P, SIG3P, PP
870 INPUT #1, ER1, ER2, ER3, ER4, ER5
880 CLOSE #1
890 REM
900 OPEN ARCHIVOS POR APPEND AS #3
910 REM
920 REM SUBROUTINA LP.ADC.VALUE
930 LP.ADC.VALUE = 27
940 DEF SEG = &H0
1000 LPCLSEG = PEEK(&HAFE) + 256*PEEK(&H4FF)
1010 DEF SEG = LPCLSEG
1020 DEFINT C, I, V, G
1030 PASADAS = 10
1040 MUESTRAS = 10
1050 GAN = 1
1060 NMAX = 5
1070 REM
1080 REM DECLARA EL TAMANO DE LOS ARREGLOS
1090 DIM VALOR(PASADAS)
1100 DIM RELOJS(PASADAS)
1110 DIM CANAL(NMAX)
1120 DIM PROMEDIO(NMAX)
1130 PRINT:PRINT:PRINT
1140 REM IDENTIFICACION DE CANALES QUE SE UTILIZAN AN LA ETAPA DE CONSOLIDACION
1150 CANAL (1) = 1
1160 CANAL (2) = 2
1170 CANAL (3) = 3
1180 CANAL (4) = 4
1185 CANAL (5) = 5
1190 REM
1200 REM CONSTANTES DE CALIBRACION
1210 ACPC = 5.516
1220 BCPP = 2.534
1230 DCDA = 27.192
1240 ECFA = 25.77
1250 FCCV = .1377

```

```

1260 REM
1270 DELTA = .05      'Tiempo en segundos entre cada lectura
1280 PRINT " "
1290 FOR J=1 TO NMAX
1300 SUMA = 0
1310 FOR I=1 TO PASADAS
1320 TEMPOR = TIMER
1330 IF (TEMPOR-DELTA) > TIMER THEN GOTO 1330
1340 CALL LP.ADC.VALUE(CANAL(J), GAN, VALOR(I))
1350 RELOJ$(I) = TIMES
1360 PRINT:PRINT
1370 FVOLTS = (VALOR(I)*10/4096)-5      'Convierte los datos a volts
1380 SUMA = SUMA+FVOLTS
1390 PROMEDIO (J) = SUMA/PASADAS
1400 NEXT I
1410 NEXT J
1420 REM
1430 REM CALCULO DE PRESIONES, ESPUEZOS, DEFORMACIONES, Y CAMBIOS VOLUMETRICOS
1440 DH = ((ER1 - PROMEDIO(1))*DCDA)/10
1450 PP = (PROMEDIO(2)-ER2)*BCPP
1460 PC = (PROMEDIO(3)-ER3)*ACPC
1470 FA = (PROMEDIO(5)-ER5)*ECFA
1490 DV = (PROMEDIO(4)-ER4)*.432/FCCV
1500 EA = DH/HO
1510 EV = DV/BO
1520 AC = Ao*(1-EV)/(1-EA)
1530 DESV = FA/AC
1540 SIG3 = PC-PP
1550 SIG1 = SIG3+DESV
1560 T = (SIG1-SIG3)/2
1570 S = (SIG1+SIG3)/2
1580 P = (SIG1+2*(SIG3))/3
1590 K = SIG3/SIG1
1600 REM
1610 WRITE #3, RELOJ$(5), TIMER, PROMEDIO(1), PROMEDIO(2), PROMEDIO(3), PROMEDIO(4), PR
MEDIO(5), FA, PC, PP, DH, DV, EA, EV, AC, DESV, SIG3, SIG1, T, S, P, K
1620 CLOSE #3
1630 IF JJ<>1 THEN GOTO 1700
1640 OPEN "NOMBRE" FOR OUTPUT AS #1
1650 WRITE #1, ARCHIVOS
1660 WRITE #1, AO, HO, BO
1670 WRITE #1, K0, SIG1P, SIG3P, PP
1680 WRITE #1, ER1, ER2, ER3, ER4, ER5
1690 CLOSE #1
1700 PRINT "-----"
1710 PRINT "CANAL", " VOLTAGE"
1720 PRINT "-----"
1730 FOR J=1 TO NMAX
1740 PRINT CANAL(J), PROMEDIO(J)
1750 NEXT J
1760 PRINT "-----"
1770 PRINT "HORA:", RELOJ$(5)
1780 PRINT "-----"
1790 PRINT " "
1800 PRINT "-----"
1810 PRINT "FUER.AXIAL", "PRES.CONFIN.", "CONTRAPRES.", " p"
1820 PRINT FA, PC, PP, P
1830 PRINT "-----"
1840 PRINT " "
1850 PRINT "-----"
1860 PRINT " SIG1", " SIG3", " t", " s", " p", " K"
1870 PRINT SIG1, SIG3, T, S, K
1880 PRINT "-----"

```

```
1890 PRINT * *
1900 IF PC >= 6.5 THEN GOTO 1960
1910 IF P >= PF THEN GOTO 1960
1920 IF K > K0 THEN GOTO 1940
1930 IF K <= K0 THEN GOTO 1950
1940 CHAIN "PUERZAS.BAS",,ALL
1950 CHAIN "PRESION2.BAS",,ALL
1960 CLOSE #3
1970 BEEP:BEEP:BEEP:BEEP:BEEP:BEEP
1980 PRINT * *
1990 PRINT "***** LA ETAPA DE CONSOLIDACION HA FINALIZADO *****"
2000 PRINT * *
2010 PRINT "**SPECTUE LOS PASOS CORRESPONDIENTES PARA INICIAR LA ETAPA DE FALLA"
2020 END
```

```

10 CLS
20 KEY OFF
30 REM * * * * *
40 REM *
50 REM *
60 REM * UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO *
70 REM * INSTITUTO DE INGENIERIA *
80 REM * LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS *
90 REM * PROGRAMA FALLA40.BAS *
100 REM * ELABORADO POR ALBERTO ISAAC LAGUNAS TORRES *
110 REM * MODIFICADO POR BEATRIZ ELENA PEREZ GONZALEZ *
120 REM * * * * *
130 REM
140 PRINT:PRINT:PRINT:PRINT:PRINT
150 PRINT * *
160 PRINT * * * * *
170 PRINT * *
180 PRINT * * PROGRAMA PARA ETAPA DE FALLA CON CARGA MONOTONICA EN COMPRESION **
190 PRINT * * **
200 PRINT * * * * *
210 REM
220 N=1
240 PRINT:PRINT:PRINT:PRINT
250 INPUT "INDIQUE EL NOMBRE DEL ARCHIVO _ _ _ _ _ PRN ";A$
260 PRINT * *
270 OPEN "NOMBRE" FOR OUTPUT AS #2
280 PRINT "FECHA";INPUT FE$
290 PRINT:PRINT:PRINT
300 PRINT "DATOS DEL ESPECIMEN AL INICIAR LA ETAPA DE FALLA"
310 PRINT * *
320 PRINT "AREA, EN CM^2";INPUT A0
330 PRINT "ALTURA, EN CM";INPUT H0
340 PRINT:PRINT:PRINT
350 PRINT "CEROS DE TRANSDUCTORES"
360 PRINT * *
370 PRINT "CERO TRANSDUCTOR DE DESPLAZAMIENTO AXIAL";INPUT ER1
380 PRINT "CERO TRANSDUCTOR DE PRESION DE PORO";INPUT ER2
390 PRINT "CERO TRANSDUCTOR DE PRESION CONFINANTE";INPUT ER3
400 PRINT "CERO CELDA DE CARGA";INPUT ER5
410 PRINT:PRINT
420 INPUT "OPRIMA RETURN PARA INICIAR LA ETAPA DE FALLA";RETS
430 REM
440 ARCHIVOS = A$
450 WRITE #2,ARCHIVOS
460 WRITE #2,A0,H0
470 WRITE #2,ER1,ER2,ER3,ER5
480 CLOSE #2
490 REM
500 OPEN ARCHIVOS FOR OUTPUT AS #1
510 REM
520 REM WRITE #1," "
530 REM WRITE #1," "
540 REM WRITE #1,"FECHA: ";FE$
550 REM WRITE #1," "
560 REM WRITE #1," "

```

```

570 REM WRITE #1, "-----"
....
580 REM WRITE #1, "          VOLTAJE"
590 WRITE #1, " "
600 WRITE #1, "HORA", "TIEMPO", "C1", "C2", "C3", "C5"
610 WRITE #1, " "
620 REM WRITE #1, "-----"
....
630 CLOSE #1
650 REM
660 REM TIEMPO DE ESPERA ENTRE CADA INCREMENTO DE FUERZA AXIAL
665 DIM OLT(500,4), RELOJ$(500), VALOR(4), CANAL(4)
690 N=0
860 TO-TIMER
990 REM
1000 OPEN "NOMBRE" FOR INPUT AS #1
1010 INPUT #1, ARCHIVOS
1020 INPUT #1, A0, H0
1030 INPUT #1, ER1, ER2, ER3, ER5
1040 CLOSE #1
1050 OPEN ARCHIVOS FOR APPEND AS #3
1060 REM
1070 REM SUBROUTINA LP.ADC.VALUE
1080 LP.ADC.VALUE = 27
1090 DEF SEG = &H0
1100 LPCLSEG = PEEK(&H4FE) + 256*PEEK(&H4FF)
1110 DEF SEG = LPCLSEG
1120 DEFINT C,I,V,G
1130 PASADAS = 1
1140 MUESTRAS = 1
1150 GAN = 1
1170 REM
1190 REM DECLARA EL TAMAÑO DE LOS ARREGLOS
1240 PRINT:PRINT:PRINT
1250 REM IDENTIFICACION DE CANALES QUE SE UTILIZAN EN LA ETAPA DE FALLA
1260 CANAL(1) = 1
1270 CANAL(2) = 2
1280 CANAL(3) = 3
1290 CANAL(4) = 5
1300 REM
1310 REM DATOS DEL ESPECIMEN AL INICIAR LA ETAPA DE FALLA
1320 AREA = A0
1330 ALTU = H0
1340 REM
1350 REM CONSTANTES DE CALIBRACION
1360 ACPC = 5.516
1370 BCPP = 2.534
1380 DCDA = 27.192
1390 ECFA = 25.77
1400 REM
1410 REM CEROS DE TRANSDUCTORES
1420 ERO1 = ER1
1430 ERO2 = ER2
1440 ERO3 = ER3
1450 ERO5 = ER5

```

```

1460 REM
1470 DELTA = .005 *Tiempo en segundos entre cada lectura
1475 FOR I=1 TO 500
1480 FOR J=1 TO 4
1485 CALL LP.ADC.VALUE(CANAL(J),GAN,VALOR(J))
1490 OLT(I,J) = VALOR(J)
1495 NEXT J
1500 RELOJ$(I) = TIMES
1505 NEXT I
1510 IF ABS(OLT(500,1)-OLT(1,1))>20 THEN GOTO 3100
1515 FOR J=1 TO 4
1520 OLT(500,1)=VALOR(J)
1525 FVOLTS=(VALOR(J)*10/4096)-5
1528 PROMEDIO(J)= FVOLTS
1530 NEXT J
1630 REM CALCULO DE PRESIONES, FUERZAS, ESFUERZOS Y DEFORMACIONES
1640 DH = ((ERO1-PROMEDIO(1))*DCDA)/10
1650 PP = (PROMEDIO(2)-ERO2)*BCPP
1660 REM PC = (PROMEDIO(3)-ERO3)*ACPC
1670 FA = (PROMEDIO(4)-ERO5)*ECFA
1680 EA = DH/ALTU
1690 REM AC = AREA/(1-EA)
1700 REM DESV = FA/AC
1710 SCIEN = EA*(100)
1720 REM
1730 WRITE #3,RELOJ$(500),TIMER,PROMEDIO(1),PROMEDIO(2),PROMEDIO(3),PROMEDIO(4)
1735 T=TIMER
1740 IF ABS(T-T0)>=160 THEN GOTO 1748
1745 GOTO 1460
1748 CLOSE #3
1750 REM PRINT "-----"
1760 REM PRINT "CANAL", "VOLTAJE"
1770 REM PRINT "-----"
1780 REM FOR J=1 TO 4
1790 REM PRINT " "
1800 REM PRINT CANAL(J),PROMEDIO(J)
1810 REM NEXT J
1820 REM PRINT "-----"
1830 REM PRINT "HORA", RELOJ$(500)
1840 REM PRINT "-----"
1850 PRINT " "
1860 PRINT "PRES. PORO", "DEF. AXIAL %"
1870 REM PRINT "-----"
1880 PRINT PP,SCIEN
1890 REM PRINT "-----"
1900 REM PRINT " "
1910 IF FA >= 70 THEN GOTO 2040
1920 IF SCIEN >= 18 THEN GOTO 2040
2000 CHAIN "PRUEBAX.BAS",ALL
2040 CLOSE #3
2050 BEEP:BEEP:BEEP:BEEP:BEEP:BEEP
2060 PRINT " "
2070 PRINT "*****EL ENSAYE HA FINALIZADO*****"
2080 PRINT " "
2090 PRINT "*****DESCONECTE EL SISTEMA DE LOS MOTORES Y DESMONTE LA PROBETA*****"
3000 END
3100 OPEN "RAPIDO.PRN" FOR OUTPUT AS #2
3200 FOR I=1 TO 500
3400 WRITE #2,RELOJ$(I),TIMER,OLT(I,1),OLT(I,2),OLT(I,3),OLT(I,4)
3500 NEXT I
3600 CLOSE #2
3700 GOTO 1515

```

```

10 CL#
20 KEY OFF
30 REM
40 REM
50 REM
60 REM
70 REM
80 REM
90 REM
100 REM
110 REM
120 REM
130 REM
140 PRINT:PRINT:PRINT:PRINT:PRINT
150 PRINT " "
160 PRINT " "
170 PRINT " "
180 PRINT " " PROGRAMA PARA ETAPA DE FALLA CON CARGA MONOTONICA EN EXTENSION "
190 PRINT " "
200 PRINT " "
210 REM
230 N=1
240 PRINT:PRINT:PRINT:PRINT
250 INPUT "INDIQUE EL NOMBRE DEL ARCHIVO _ _ _ _ _ PRN ";A$
260 PRINT " "
270 OPEN "NOMBRE" FOR OUTPUT AS #2
280 PRINT "FECHA";INPUT PB$
290 PRINT:PRINT:PRINT
300 PRINT "DATOS DEL ESPECIMEN AL INICIAR LA ETAPA DE FALLA"
310 PRINT " "
320 PRINT "AREA, EN CM^2";INPUT A0
330 PRINT "ALTURA, EN CM";INPUT H0
340 PRINT:PRINT:PRINT
350 PRINT "CEROS DE TRANSDUCTORES"
360 PRINT " "
370 PRINT "CERO TRANSDUCTOR DE DESPLAZAMIENTO AXIAL";INPUT ER1
380 PRINT "CERO TRANSDUCTOR DE PRESION DE PORO";INPUT ER2
390 PRINT "CERO TRANSDUCTOR DE PRESION CONFINANTE";INPUT ER3
400 PRINT "CERO CELDA DE CARGA";INPUT ER5
410 PRINT:PRINT
420 INPUT "OPRIMA RETURN PARA INICIAR LA ETAPA DE FALLA";RET$
430 REM
440 ARCHIVOS = A$
450 WRITE #2,ARCHIVOS
460 WRITE #2,A0,H0
470 WRITE #2,ER1,ER2,ER3,ER5
480 CLOSE #2
490 REM
500 OPEN ARCHIVOS FOR OUTPUT AS #1
510 REM
520 REM WRITE #1," "
530 REM WRITE #1," "
540 REM WRITE #1,"FECHA: ";PB$
550 REM WRITE #1," "
560 REM WRITE #1," "
570 REM WRITE #1,"-----"
580 REM WRITE #1,"          VOLTAJE
590 WRITE #1," "
600 WRITE #1,"HORA","TIEMPO","C1","C2","C3","C5"
610 WRITE #1," "
620 REM WRITE #1,"-----"
630 CLOSE #1

```

```

650 REM
660 REM TIEMPO DE ESPERA ENTRE CADA INCREMENTO DE FUERZA AXIAL
665 DIM OLT(500,4),RELOJS(500),VALOR(4),CANAL(4)
690 N=0
960 TO= TIMER
990 REM
1000 OPEN "NOMBRE" FOR INPUT AS #1
1010 INPUT #1,ARCHIVOS
1020 INPUT #1,A0,H0
1030 INPUT #1,ER1,ER2,ER3,ERS
1040 CLOSE #1
1050 OPEN ARCHIVOS FOR APPEND AS #3
1060 REM
1070 REM SUBROUTINA LP.ADC.VALUE
1080 LP.ADC.VALUE = 27
1090 DEF SEG = 4H0
1100 LPLCSEG = PEEK(4H4FE) + 256*PEEK(4H4FF)
1110 DEF SEG = LPLCSEG
1120 DEFINT C,I,V,G
1130 PASADAS = 1
1140 MUESTRAS = 1
1150 GAN = 1
1170 REM
1190 REM DECLARA EL TAMANO DE LOS ARREGLOS
1240 PRINT:PRINT:PRINT
1250 REM IDENTIFICACION DE CANALES QUE SE UTILIZAN EN LA ETAPA DE FALLA
1260 CANAL(1) = 1
1270 CANAL(2) = 2
1280 CANAL(3) = 3
1290 CANAL(4) = 5
1300 REM
1310 REM DATOS DEL ESPECIMEN AL INICIAR LA ETAPA DE FALLA
1320 AREA = A0
1330 ALTU = H0
1340 REM
1350 REM CONSTANTES DE CALIBRACION
1360 ACPC = 5.516
1370 BCPP = 2.534
1380 DCDA = 27.192
1390 ECFA = 25.77
1400 REM
1410 REM CEROS DE TRANSDUCTORES
1420 ERO1 = ER1
1430 ERO2 = ER2
1440 ERO3 = ER3
1450 EROS = ERS
1460 REM
1470 DELT=.005
1475 FOR I=1 TO 500
1480 FOR J=1 TO 4
1485 CALL LP.ADC.VALUE(CANAL(J),GAN,VALOR(J))
1490 OLT(I,J)=VALOR(J)
1495 NEXT J
1500 RELOJ(I)=TIME$
1505 NEXT I
1510 IF ABS((OLT(500,1)-OLT(1,1)))>=25 THEN GOTO 3100
1515 FOR J=1 TO 4
1520 OLT(500,J)=VALOR(J)
1525 FVOLTS=(VALOR(J)*10/4096)-5
1528 PROMEDIO (J)=FVOLTS
1530 NEXT J
1620 REM

```

```

1630 REM CALCULO DE PRESIONES, FUERZAS, ESFUERZOS Y DEFORMACIONES
1640 DH = ((ER01-PROMEDIO(1))*DCDA)/10
1650 PP = (PROMEDIO(2)-ER02)*BCPP
1660 REM PC = (PROMEDIO(3)-ER03)*ACPC
1670 FA = (PROMEDIO(4)-ER05)*ECFA
1680 EA = DH/ALTU
1690 REM AC = AREA/(1-EA)
1700 REM DESV = PA/AC
1710 ECIEN = EA*(100)*(-1)
1720 REM
1730 WRITE #3,RELOJS(500),TIMER,PROMEDIO(1),PROMEDIO(2),PROMEDIO(3),PROMEDIO(4)
1735 T=TIMER
1740 IF ABS(T-T0)>=160 THEN GOTO 1748
1745 GOTO 1460
1748 CLOSE #3
1750 REM PRINT "-----"
1760 REM PRINT "CANAL", "VOLTAJE"
1770 REM PRINT "-----"
1780 REM FOR J=1 TO 4
1790 REM PRINT " "
1800 REM PRINT CANAL(J),PROMEDIO(J)
1810 REM NEXT J
1820 REM PRINT "-----"
1830 REM PRINT "HORA", RELOJS(500)
1840 REM PRINT "-----"
1850 PRINT " "
1860 PRINT "PRES.PORO","DEF.AXIAL"
1870 REM PRINT "-----"
1880 PRINT PP,ECIEN
1890 REM PRINT "-----"
1900 REM PRINT " "
1910 IF FA <= -70 THEN GOTO 2040
1920 IF EA <= -2 THEN GOTO 2040
2000 CHAIN "PRUEBAZ.BAS",ALL
2040 CLOSE #3
2050 BEEP:BEEP:BEEP:BEEP:BEEP:BEEP
2060 PRINT " "
2070 PRINT "*****EL ENSAYE HA FINALIZADO*****"
2080 PRINT " "
2090 PRINT "*****DESCONECTE EL SISTEMA DE LOS MOTORES Y DESMONTE LA PROBETA*****"
3000 END
3100 OPEN "RAPIDO.PRN" FOR OUTPUT AS #2
3200 FOR I=1 TO 500
3400 WRITE #2,RELOJS(I),TIMER,OLT(I,1),OLT(I,2),OLT(I,3),OLT(I,4)
3500 NEXT I
3600 CLOSE #2
3700 GOTO 1515

```

Apéndice B :

Descripción detallada del comportamiento de cada uno de los especímenes ensayados

B.1 ESPECIMENES CONSOLIDADOS ISOTROPICAMENTE.

B.1.1 Ensayes de compresión.

A continuación se describe el comportamiento típico de las muestras consolidadas isotrópicamente ensayadas en compresión. En el análisis de los resultados experimentales se estudia la influencia de la relación de vacíos inicial e_i , el contenido de finos y el esfuerzo efectivo al final de la consolidación, p'_o , en el comportamiento del material ensayado. En las tablas B.1 y B.2 se resumen las condiciones iniciales de las probetas así como algunos de los resultados obtenidos.

B.1.1.1 Resultados de probetas con diferentes densidades iniciales.

Debido a que no se pueden comparar directamente entre sí los resultados experimentales presentados en esta serie de ensayos, sólo se presentan los resultados típicos de materiales con diferentes densidades.

Probeta densa.

Contiene 3% de finos (caolín) con una relación de vacíos inicial $e_i=0.69$ y fue consolidada hasta un esfuerzo efectivo de 2.0 kg/cm^2 (Ensaye 53, tabla B.1).

Según se aprecia en la figura B.1a, el esfuerzo desviador aumentó con la deformación durante toda la prueba, transcurriendo un tiempo de dos horas con treinta y cinco minutos para alcanzar un esfuerzo cortante de 1.0 kg/cm^2 a una deformación de 0.65%.

La presión de poro máxima inducida en este punto corresponde a 38% del esfuerzo efectivo de consolidación ($p'_o = 2.0 \text{ kg/cm}^2$) punto en el cual da comienzo la tendencia dilatante que se manifiesta por la aparición de incrementos negativos de presión poro (fig B.1a); esta muestra fue la que generó menos exceso de presión de poro en esta serie de pruebas.

Este espécimen, al generar poco exceso de presión de poro, presenta una trayectoria de esfuerzos efectivos que es casi vertical inicialmente y que se desplaza hacia la derecha cuando empieza a disminuir la presión de poro según se observa en la figura B.1b. El ángulo de fricción interna movilizado antes de comenzar el comportamiento dilatante, ϕ'_s , fue de 24.8° . Cuando la trayectoria de esfuerzos efectivos alcanzó la envolvente de falla, ϕ' resultó de 30.2° .

Probeta suelta.

Se eligió para este análisis los resultados del ensayo *140 realizado por Lagunas (1992)

con 5% de contenido de finos, una relación de vacíos inicial de 0.923 y esfuerzo efectivo de consolidación de 1.0 kg/cm².

La curva de esfuerzo desviador contra deformación presenta un máximo a una pequeña deformación; este punto se alcanza en cuarenta y tres minutos a una deformación de 0.84% donde el esfuerzo cortante es de 0.23 kg/cm² según se observa en la figura B.2a. El tiempo en que se deformó el espécimen, a partir de este punto hasta alcanzar el 7.5% de deformación, fue de cuatro segundos para posteriormente llegar a una deformación de 17% en una hora con diez minutos.

La gran velocidad de deformación durante la falla se debe al incremento súbito y substancial de la presión de poro, lo cual influye en un cambio importante en el arreglo de los granos de la arena.

La presión de poro inducida en ese punto de colapso, Δu_v , fue del orden de 58% del esfuerzo efectivo de consolidación ($p'_o = 1.0$ kg/cm²) como se observa en la figura B.2b y la tabla B.1; esta presión continúa incrementándose durante la falla hasta alcanzar un valor máximo, $\Delta u_{máx}$, de 89%.

El comportamiento al iniciar la etapa de falla es contractivo hasta alcanzar la máxima presión de poro momento en el cual comienza la tendencia dilatante.

El aumento en la magnitud de la presión de poro ocasiona que la trayectoria de esfuerzos efectivos se desplace hacia la izquierda, como se observa en la figura B.2a. La pérdida rápida de resistencia y la gran deformación desarrollada en esta muestra son características básicas de fallas por licuación que se presentan en la naturaleza; Castro (1969) designa este comportamiento como "licuación limitada".

Al presentarse el colapso de la estructura se movilizó un ángulo de fricción interna, ϕ'_q , de 19.9°.

El espécimen alcanzó su máximo esfuerzo desviador antes de movilizar el ángulo ϕ'_q . Este último se presenta cuando la presión de poro es máxima y se comienza el comportamiento dilatante del suelo; el ángulo de fricción interna ϕ' para esta probeta fue de 30.7° que se alcanza cuando la trayectoria de esfuerzos llega a la envolvente de falla.

Probeta muy suelta.

Esta muestra, con una relación de vacíos inicial de 1.066 y 7% de contenido de finos, fue consolidada a un esfuerzo efectivo de 2.0 kg/cm², como se indica en la tabla B.1.

Alcanza el esfuerzo desviador máximo (punto de colapso de la curva), σ'_{dq} , a una deformación de 1.16% en un tiempo de quince minutos con un esfuerzo cortante en este punto

(σ'_q) de 0.41 kg/cm^2 , como se ve en la figura B.3a. El colapso estructural de esta muestra se presenta en cinco segundos y después de éste, alcanzó una deformación de 15%.

La presión de poro inducida en el punto de colapso, Δu_{q1} , fue de 56.1% del esfuerzo efectivo de consolidación ($p'_o = 2.0 \text{ kg/cm}^2$). La presión de poro continúa incrementándose durante la etapa de falla hasta alcanzar un valor $\Delta u_{\text{máx}} = 100\%$ de p'_o a una deformación de 14.9% (ver fig B.3a).

Esta probeta tiene una pérdida rápida de resistencia y desarrolla grandes deformaciones; por lo tanto, esta muestra presenta las características básicas de falla por licuación según describió inicialmente Castro (1969).

La reducción de los esfuerzos efectivos debida al aumento de la presión de poro ocasiona que la trayectoria de esfuerzos efectivos se desplace totalmente a la izquierda hasta llegar al origen de coordenadas, en un comportamiento puramente contractivo.

Al presentarse el colapso estructural se movilizó un ángulo de fricción interna, ϕ'_q , de 18.0° mientras que el ángulo de fricción interna ϕ' después de alcanzar la presión de poro máxima llegó a 30.5° (ver fig B.3b).

B.1.1.2 Resultados de probetas con diferente contenido de finos.

El estudio del comportamiento de las muestras consolidadas isotrópicamente ensayadas en compresión variando el contenido de finos (3, 5 y 7%) se realizó con base en los ensayos *139, *40, *141 (Lagunas, 1992) que mantienen aproximadamente constante la relación de vacíos al inicio del ensaye (en promedio, $e_i = 0.926$) y el esfuerzo efectivo de consolidación (1.0 kg/cm^2), como se indica en la tabla B.1.

En términos generales los especímenes mostraron al comienzo del ensaye una gran rigidez, siendo mayor en el de la arena con menor contenido de finos. En las curvas de la fig B.4a se observa que el esfuerzo desviador máximo (punto de colapso), σ'_{dq} , se presenta a una deformación $\epsilon_q = 0.84\%$. El esfuerzo cortante de los especímenes en este punto disminuye conforme se incrementa el contenido de caolín. Tal disminución presenta muy poca variación (0.24 a 0.21 kg/cm^2).

La presión de poro inducida en este punto de colapso fue del orden de 58% del esfuerzo efectivo de consolidación, p'_o . La presión de poro continúa incrementándose durante la falla, resultando mayor conforme aumentó el contenido de caolín. La magnitud máxima de esta presión varió entre 81 y 93% de p'_o a deformaciones de 4.4 a 5.0%. Posteriormente, el exceso de presión de poro disminuyó produciéndose en los especímenes una tendencia a la dilatancia (fig B.4b).

En la fig B.4c se presentan las trayectorias de esfuerzos efectivos de los tres especímenes

ensayados. Se observa que su ángulo de fricción interna en la envolvente de falla, ϕ' , prácticamente es el mismo (29.9° a 30.7°). Por otra parte, el aumento de la presión de poro ocasiona que las trayectorias se desplacen hacia la izquierda hasta llegar a la envolvente de falla donde pasan de un comportamiento contractivo a uno con tendencia dilatante.

Al presentarse el colapso del suelo se movilizaron ángulos de fricción interna, ϕ'_q , de 19.0° a 19.9°.

B.1.1.3 Comportamiento normalizado.

Los resultados de los ensayos efectuados en muestras con diferentes densidades iniciales y diferentes esfuerzos de consolidación, se normalizaron con respecto a este último parámetro para analizar conjuntamente estos datos. En este análisis se utilizan los resultados de ensayos en muestras sueltas (ensayos *I39, *I40 y *I41) consolidadas a un esfuerzo efectivo $p'_o = 1.0 \text{ kg/cm}^2$, de una muestra densa (ensaye 53) y otra muy suelta (ensaye 44) consolidadas a 2.0 kg/cm^2 .

En la fig B.5a y la tabla B.2 se observa que en el caso de la muestras sueltas y muy sueltas se presenta poca variación en las magnitudes del esfuerzo desviador máximo (0.41 a 0.48) y del esfuerzo cortante (0.21 a 0.24); en el caso de la probeta densa se incrementa el esfuerzo desviador normalizado alcanzando un valor de 1.00.

La presión de poro inducida en el punto de colapso se mantiene prácticamente constante en un valor de $0.58 p'_o$ mientras que la presión de poro máxima presenta un aumento a medida que se hace menor la densidad en las probetas, como se observa en la fig B.5b.

Las trayectorias de esfuerzos efectivos también permiten distinguir la influencia de la relación de vacíos inicial y del contenido de finos en el comportamiento de los especímenes ensayados de la figura B.5c. En la muestra muy suelta con 7% de finos, la reducción de los esfuerzos efectivos, debida al aumento en la magnitud de la presión de poro, hace que la trayectoria de esfuerzos efectivos se desplace totalmente hacia la izquierda hasta llegar al origen de coordenadas, en un comportamiento puramente contractivo; las probetas sueltas con 3, 5 y 7% de finos, comienzan con un comportamiento contractivo hasta llegar a la envolvente de falla donde pasan a una tendencia dilatante. La muestra densa, con 3% de finos, al generar poca presión de poro presenta una trayectoria de esfuerzos efectivos que es vertical inicialmente y que se desplaza hacia la derecha cuando empieza a disminuir la presión de poro.

Tabla B.1 Resultados obtenidos al ensayar muestras consolidadas isotrópicamente, ensayadas en compresión.

Ensaye #	% caolín	e_i	e_d	p'_o kg/cm ²	σ'_{dq} kg/cm ²	l'_o kg/cm ²	ϵ_q %	Δu_q kg/cm ²	$\epsilon_{m\dot{s}}$ %	$\Delta u_{m\dot{s}}$ kg/cm ²	ϕ'_q grados	ϕ' grados
53	3	0.690	0.743	2.0	2.00	1.00	-	-	0.65	0.77	24.8	30.2
*139	3	0.928	0.988	1.0	0.48	0.24	0.84	0.58	4.37	0.81	19.0	30.3
*140	5	0.923	0.914	1.0	0.46	0.23	0.84	0.57	4.82	0.89	19.9	30.7
*141	7	0.927	0.916	1.0	0.41	0.21	0.84	0.58	5.00	0.93	19.7	29.9
44	7	1.066	1.222	2.0	0.82	0.41	1.16	1.13	14.9	2.29	18.0	30.5

*1 : Pruebas realizadas por Lagunas (1992).

Tabla B.2 Resultados normalizados con respecto al esfuerzo efectivo final de consolidación.

Ensaye #	% caolín	e_i	e_d	p'_o kg/cm ²	σ'_{dq}/p'_o	l'_o/p'_o	$\Delta u_q/p'_o$	$\Delta u_{m\dot{s}}/p'_o$
53	3	0.690	0.743	2.0	1.00	0.50	-	0.39
*139	3	0.928	0.988	1.0	0.48	0.24	0.58	0.81
*140	5	0.923	0.914	1.0	0.46	0.23	0.57	0.89
*141	7	0.927	0.916	1.0	0.41	0.21	0.58	0.93
44	7	1.066	1.222	2.0	0.41	0.21	0.57	1.15

*1 : Pruebas realizadas por Lagunas (1992).

B.1.2 Ensayes de extensión.

A continuación se describe el comportamiento típico de muestras consolidadas isotrópicamente ensayadas en extensión, teniendo presente en el análisis la relación de vacíos inicial y el contenido de finos. En la tabla B.3 se resumen las condiciones iniciales de las probetas así como algunos de los resultados obtenidos.

B.1.2.1 Resultados de probetas con diferentes densidades iniciales.

Se comparan los resultados obtenidos al ensayar muestras con diferentes densidades

manteniendo constante el contenido de finos y el esfuerzo efectivo al final de la consolidación; se describe el comportamiento típico con base en las curvas esfuerzo desviador y exceso de presión de poro contra deformación así como las trayectorias de esfuerzos efectivos obtenidas al ensayar estos materiales.

Probetas densa y suelta.

Contienen 3% de caolín con una relación de vacíos al inicio del ensaye de 0.791 (ensaye 51) y 0.947 (ensaye 31). Se consolidaron hasta un esfuerzo efectivo de 2.0 kg/cm^2 como se indica en la tabla B.3.

Comportamiento esfuerzo - deformación.

Según se aprecia en la figura B.6a, el esfuerzo desviador crece con la deformación durante todo el ensaye en la probeta densa, llegando a un esfuerzo cortante de 0.52 kg/cm^2 en un tiempo de una hora con cuarenta y cinco minutos a una deformación de 0.39%.

En la probeta suelta, la curva esfuerzo desviador contra deformación presenta un quiebre a una pequeña deformación; este punto es alcanzado en un tiempo de una hora con treinta minutos a una deformación de 0.31% donde el esfuerzo cortante es de 0.28 kg/cm^2 , mucho menor que el alcanzado por la muestra densa (ver fig B.6a). En esta curva se aprecia una disminución del esfuerzo desviador a gran velocidad de deformación, inmediatamente después del colapso estructural del suelo, provocando una rápida reducción del área de la probeta.

Comportamiento exceso de presión de poro - deformación.

La máxima presión de poro generada en la muestra densa fue del orden de 6% de p'_0 antes de comenzar la tendencia dilatante que se manifiesta por la aparición de incrementos negativos de presión de poro (fig B.6b).

La presión de poro inducida en el punto de colapso (muestra suelta), Δu_q , fue del orden de 29.5% del esfuerzo efectivo de consolidación como se observa en la figura B.6b; esta presión continúa incrementándose durante la falla hasta alcanzar un valor máximo, $\Delta u_{\text{máx}}$, de 76.5%.

Trayectoria de esfuerzos efectivos.

En el momento de alcanzar la máxima de presión de poro se movilizó un ángulo de fricción interna, ϕ'_q , de 20.8° en la probeta densa mientras que en la suelta se presentó un ángulo mucho menor ($\phi'_q = 13.9^\circ$). El ángulo de fricción interna, ϕ' , para ambas muestras presenta muy poca variación siendo 29.8° (muestra densa) y 30.7° (muestra suelta), como se observa en la figura B.6c y la tabla B.3.

Al generar poca presión de poro la muestra densa, la trayectoria de esfuerzos efectivos

se desplaza inicialmente un poco a la izquierda en un comportamiento contractivo para pasar a la tendencia dilatante durante casi toda la etapa de falla mientras que en la probeta suelta el aumento en la magnitud de la presión de poro ocasiona que la trayectoria de esfuerzos se desplace hacia la izquierda llegando casi al origen de coordenadas, en un comportamiento contractivo hasta llegar a la presión de poro máxima, momento en el cual se inicia la tendencia dilatante.

Probeta suelta y muy suelta.

Se eligieron para este análisis los resultados de los ensayos 32 y 47 con 7% de finos, una relaciones de vacíos de 0.933 y 1.069 respectivamente, y consolidación bajo un esfuerzo efectivo de 2.0 kg/cm² (ver tabla B.3).

Comportamiento esfuerzo - deformación.

Las curvas esfuerzo desviador contra deformación presentan el punto de colapso a pequeñas deformaciones; este punto es alcanzado para ambas probetas en un tiempo aproximado de una hora con cuarenta y cinco minutos a una deformación de 0.39% para la muestra suelta y de 0.46% para la muy suelta.

Según se observa en la figura B.7a, el esfuerzo desviador máximo, σ'_{dq} , es mayor en la probeta suelta alcanzando un valor de 0.36 kg/cm² mientras que la probeta muy suelta presenta un valor máximo de 0.19 kg/cm². A partir de este punto se presenta el colapso de la estructura del suelo obteniéndose deformaciones mayores de 18% en tan sólo treinta segundos (muestra suelta) y veintinueve milisegundos (muestra muy suelta) apreciándose una disminución del esfuerzo desviador a una gran velocidad de deformación siendo mas notorio este comportamiento en la muestra con menor densidad.

Comportamiento exceso de presión de poro - deformación.

Cuando se alcanzó el esfuerzo desviador máximo, la presión de poro inducida, Δu_q , fue del orden de 33% del esfuerzo efectivo de consolidación en la probeta suelta mientras que la muy suelta alcanzó un valor mayor ($\Delta u_q = 42.5\%$ de p'_c), como se observa en la figura B.7b y la tabla B.3; esta presión continuó incrementándose durante la falla hasta alcanzar valores máximos, Δu_{max} , de 71% (ensaye 31) y 93% (ensaye 47).

Trayectoria de esfuerzos efectivos.

Como se observa en la figura B.7c, el aumento en la magnitud de la presión de poro ocasiona que la trayectoria de esfuerzos se desplace hacia la izquierda llegando casi al origen de coordenadas, con un comportamiento contractivo hasta llegar a la presión de poro máxima momento en el cual se inicia la tendencia dilatante.

Al presentarse el colapso de la estructura se movilizaron ángulos de fricción interna, ϕ'_{dq} , de 13.6° para ambas probetas. Los ángulo de fricción interna en la envolvente de falla, ϕ' , son prácticamente los mismos siendo de 30.2° para la muestra suelta y 30.5° en la muestra muy suelta.

B.1.2.2 Resultados en probetas con diferente contenido de finos .

El comportamiento de las muestras consolidadas isotrópicamente ensayadas en extensión variando el contenido de finos (3, 5 y 7%) se analizó con base en los resultados de los ensayos 30, 31 y 32 en los que se mantiene constante la relación de vacíos inicial, como se indica en la tabla B.3.

En términos generales los especímenes mostraron al comienzo del ensaye una gran rigidez, siendo mayor en el de la arena con menor contenido de finos. En las curvas de la fig B.8a se observa que el esfuerzo desviador máximo, σ'_{dq} , se presenta a pequeñas deformaciones que varían de 0.31 a 0.46%. El esfuerzo cortante de los especímenes en este punto es menor en la probeta con menor contenido de finos (0.28 kg/cm²) mientras en las demás muestras presenta muy poca variación (0.36 y 0.37 kg/cm²).

La presión de poro inducida que se alcanza cuando el esfuerzo desviador alcanza su valor máximo, Δu_q , varió de 29.5% a 40% del esfuerzo efectivo de consolidación, p'_o . La presión de poro continuó incrementándose durante la falla hasta alcanzar valores máximos, $\Delta u_{máx}$, que varían entre 71% y 80% de p'_o siendo menor en la probeta con mayor contenido de finos. Posteriormente, el exceso de presión de poro disminuyó produciéndose en los especímenes una tendencia a la dilatancia (ver fig B.8b).

En la figura B.8c se presentan las trayectorias de esfuerzos efectivos de los tres especímenes ensayados. Se observa que su ángulo de fricción interna en la envolvente de falla, ϕ' , prácticamente es el mismo (30.2° a 30.8°). Por otra parte, el aumento en la magnitud de la presión de poro ocasiona que ese desplacen hacia la izquierda llegando casi al origen de coordenadas, pasando de un comportamiento contractivo a una tendencia dilatante.

Al presentarse el colapso del suelo se movilizaron ángulos de fricción interna, ϕ'_{dq} , de 13.6° a 13.9°.

Tabla B.3. Resultados obtenidos al ensayar muestras consolidadas isotrópicamente, ensayadas en extensión.

Ensayo #	σ caolín	e_i	e_{θ}	p'_{σ} kg/cm ²	σ'_{dq} kg/cm ²	t'_{dq} kg/cm ²	ϵ_q %	Δu_q kg/cm ²	ϵ_{ms} %	Δu_{ms} kg/cm ²	ϕ'_q grados	ϕ' grados
51	3	0.791	0.735	2.0	1.04	0.52	-	-	0.39	0.12	20.8	29.8
31	3	0.947	1.007	2.0	0.53	0.28	0.31	0.59	8.19	1.53	13.9	30.7
30	5	0.912	1.012	2.0	0.75	0.37	0.46	0.80	8.65	1.60	13.7	30.8
32	7	0.933	1.070	2.0	0.73	0.36	0.39	0.66	7.01	1.42	13.6	30.2
47	7	1.069	1.225	2.0	0.39	0.19	0.46	0.85	10.8	1.86	13.6	30.5

B.2 ESPECIMENES CONSOLIDADOS ANISOTROPICAMENTE

B.2.1 Especímenes consolidados anisotrópicamente con $k = 0.44$.

B.2.1.1. Pruebas en compresión.

Se presentan los resultados obtenidos al ensayar en compresión especímenes consolidados anisotrópicamente con $k = 0.44$. En el análisis se discute la influencia de la densidad inicial y del contenido de finos en el comportamiento del material ensayado. En la tabla B.4 se resumen las condiciones iniciales de las probetas así como algunos de los resultados obtenidos.

B.2.1.1.1 Resultados de probetas con diferentes densidades iniciales.

Se comparan los resultados obtenidos con muestras con diferentes densidades pero manteniendo constante el contenido de finos y el esfuerzo efectivo de consolidación; se describe el comportamiento de los materiales ensayados a partir de las curvas esfuerzo desviador y exceso de presión de poro contra deformación y de las trayectorias de esfuerzos efectivos.

Probeta densa y suelta.

Contienen 3% de finos con una relación de vacíos inicial de 0.763 (ensayo 34) y 0.913 (ensayo 3); el esfuerzo efectivo al final de la consolidación, p'_{σ} , fue de 2.0 kg/cm², como se indica en la tabla B.4.

Comportamiento esfuerzo - deformación.

Según se aprecia en la figura B.9a, en la probeta densa el esfuerzo desviador que se alcanza antes de manifestarse la tendencia dilatante fue de 1.19 kg/cm^2 , a una deformación de 0.78%. Esta probeta tardó cuarenta minutos en llegar al esfuerzo desviador en el que se registró la presión de poro máxima y a partir de este punto llega a una deformación de 10% en un tiempo de cinco horas.

La curva esfuerzo desviador contra deformación de la probeta suelta alcanza su máximo (1.0 kg/cm^2) a una pequeña deformación ($\epsilon_s = 0.16\%$). Este punto se alcanza en un tiempo de siete minutos. A partir del colapso de la estructura, alcanzó una deformación de 8% en diez segundos para luego llegar a 13% de deformación en una hora con veintisiete minutos (fig B.9a).

Comportamiento exceso de presión de poro - deformación.

La máxima presión de poro generada en la probeta densa corresponde a un 12% del esfuerzo efectivo de consolidación; a partir de este punto aparecen incrementos negativos de presión de poro dando inicio a la tendencia dilatante (fig B.9b).

La presión de poro inducida en el esfuerzo desviador máximo en la probeta suelta fue del orden de 5.5% de p' , como se observa en la figura B.9b; esta presión continúa incrementándose durante la falla hasta alcanzar un valor 38% del esfuerzo efectivo de consolidación. Posteriormente el exceso de presión de poro comienza a disminuir produciéndose en el espécimen una tendencia a la dilatancia.

Trayectoria de esfuerzos efectivos.

En la figura B.9c se muestran las trayectorias de esfuerzos efectivos.

Como se puede observar, la muestra densa presenta una trayectoria de esfuerzos efectivos que es casi vertical inicialmente ya que genera poca presión de poro y se desplaza a la derecha cuando empieza a disminuir esta presión. Moviliza un ángulo de fricción interna, ϕ'_i , de 26.0° cuando se inicia la tendencia a la dilatancia; el ángulo en la envolvente de falla resultó ser $\phi' = 30.0^\circ$.

La trayectoria de esfuerzos efectivos de la probeta suelta se desplaza inicialmente a la izquierda ya que su comportamiento es predominantemente contractivo hasta alcanzar la máxima presión de poro; a partir de ese punto se manifiesta la tendencia dilatante aunque de menor intensidad que la de la probeta densa.

El ángulo de fricción interna movilizado, ϕ'_i , al ocurrir el colapso estructural fue de 22.0° . En la envolvente de falla, el ángulo de fricción interna, ϕ' , fue de 29.0° .

Probetas suelta y muy suelta.

Se eligieron los resultados de los ensayos 5 y 41 con una relación de vacíos inicial de 0.903 y 1.134 respectivamente; contienen 7% de finos y fueron consolidados hasta un esfuerzo efectivo de 2.0 kg/cm², como se indica en la tabla B.4.

Comportamiento esfuerzo - deformación.

Las curvas esfuerzo desviador contra deformación de ambas muestras (fig B.10a), presentan un máximo a pequeñas deformaciones; este punto se alcanza en un tiempo de ocho minutos a una deformación de 0.16% para la muestra suelta y 0.08% en la muestra muy suelta.

Según la figura B.10a, el esfuerzo desviador máximo, σ'_{dq} , presenta muy poca variación siendo de 1.93 kg/cm² para la muestra suelta y 1.91 kg/cm² en la muy suelta. A partir de este punto se presenta el colapso en la estructura del suelo llegando a una deformación de 7.2% en doce segundos para seguir deformándose hasta el 14% en una hora con treinta minutos; para la muestra suelta; en la probeta muy suelta se presenta el colapso de la estructura en solo siete segundos llegando hasta deformaciones del 18%.

Comportamiento exceso de presión de poro - deformación.

La presión de poro inducida en el esfuerzo desviador máximo, Δu_p , fue del orden de 10.5% del esfuerzo efectivo de consolidación en la probeta suelta mientras que la muy suelta alcanzó un valor de 4.5% de p'_o , como se observa en la figura B.10b y la tabla B.3; esta presión continúa incrementándose durante la falla hasta alcanzar valores máximos, $\Delta u_{máx}$, de 33% (probeta suelta) y 85.5% (probeta muy suelta) del esfuerzo efectivo de consolidación.

Trayectoria de esfuerzos efectivos.

Como se observa en la figura B.10c, para la probeta suelta el aumento en la magnitud de presión de poro ocasiona que la trayectoria de esfuerzos efectivos se desplace hacia a la izquierda en un comportamiento contractivo hasta llegar a la presión de poro máxima, momento en el cual se inicia la tendencia dilatante. En cambio, para la muestra muy suelta la reducción de los esfuerzos efectivos, debida al aumento substancial en la presión de poro, ocasiona que la trayectoria se desplace completamente a la izquierda hasta llegar al origen de coordenadas, con un comportamiento puramente contractivo.

Al presentarse el colapso estructural se movilizó un ángulo de fricción interna, ϕ'_q , de 22.3° para la muestra suelta mientras que en la muy suelta se movilizó uno de 21.2°.

En la envolvente de falla, el ángulo de fricción interna, ϕ' , es de 29.0° para la muestra suelta y de 28.5° en la muestra muy suelta.

B.2.1.1.2 Resultados en probetas con diferente contenido de finos .

El comportamiento de las muestras consolidadas anisotrópicamente con $k = 0.44$, ensayados en compresión, variando el contenido de finos (3, 5 y 7%) se analizó con base en los resultados de los ensayos 3, 4 y 5 en los que se mantuvo constante la relación de vacíos inicial (en promedio, $e_i = 0.908$) y el esfuerzo efectivo al final de la consolidación ($p'_o = 2.0 \text{ kg/cm}^2$), como se indica en tabla B.4.

En términos generales los especímenes mostraron al inicio del ensaye una gran rigidez, siendo un poco mayor en las probetas con 3% y 5% de contenido de finos. En las curvas de la figura B.11a se observa que el esfuerzo desviador máximo (punto de colapso), σ'_{dq} , se presenta a una deformación $\epsilon_q = 0.16\%$. El esfuerzo cortante en este punto es menor en la probeta con mayor contenido de finos pero con muy poca variación con respecto a las demás probetas (1.01 a 0.97 kg/cm^2).

La presión de poro inducida en el esfuerzo desviador máximo, Δu_q , aumenta conforme se incrementa el contenido de finos, variando de 5.5 a 10.5% del esfuerzo efectivo de consolidación. La presión de poro continúa incrementándose durante la falla, resultando mayor conforme disminuye el contenido de finos. La magnitud máxima de esta presión fue de 33.0 a 38.0% de p'_o a deformaciones de 3.6 a 5.8%. Posteriormente, el exceso de presión disminuye produciéndose en los especímenes una tendencia a la dilatancia (ver fig B.11b).

En la figura B.11c se presentan las trayectorias de esfuerzos efectivos de los tres especímenes ensayados. Se observa que su ángulo de fricción interna en la envolvente de falla, ϕ' , es el mismo (29.0°). Por otra parte, el aumento en la magnitud de la presión de poro ocasiona que las trayectorias se desplacen hacia la izquierda aunque posteriormente pasan de un comportamiento contractivo a uno con tendencia dilatante.

Tabla B.4 Resultados obtenidos al ensayar muestras consolidadas anisotrópicamente con $k = 0.44$, ensayadas en compresión.

Ensaye #	σ caolín	e_i	e_d	p'_o kg/cm ²	σ'_{dq} kg/cm ²	t'_q kg/cm ²	ϵ_q %	Δu_q kg/cm ²	$\Delta u_{máx}$ kg/cm ²	$\epsilon_{máx}$ %	ϕ'_q grados	ϕ' grados
34	3	0.763	0.818	2.0	2.38	1.19	-	-	0.24	0.78	26.0	30.0
3	3	0.913	0.972	2.0	2.02	1.01	0.16	0.11	0.76	5.27	22.0	29.0
4	5	0.908	1.008	2.0	2.02	1.01	0.16	0.12	0.67	5.47	22.2	29.0
5	7	0.903	1.046	2.0	1.93	0.97	0.16	0.21	0.66	3.58	22.3	29.0
41	7	1.134	1.294	2.0	1.91	0.95	0.08	0.09	1.71	17.3	21.2	28.5

B.2.1.2 Pruebas en extensión

A continuación se describe el comportamiento típico de las muestras consolidadas anisotrópicamente con $k = 0.44$ ensayadas en extensión. Se comparan los resultados de ensayos en muestras con diferentes densidades iniciales y contenido de finos. Las condiciones iniciales así como algunos de los resultados obtenidos se resumen en la tabla B.5.

B.2.1.2.1 Resultados de probetas con diferentes densidades iniciales.

Probetas densa y suelta.

Contienen 3% de finos con una relación de vacíos al inicio del ensayo de 0.726 (ensayo 38) y 0.914 (ensayo 10), fueron consolidadas hasta un esfuerzo efectivo de 2.0 kg/cm^2 , como se indica en la tabla B.4:

Comportamiento esfuerzo - deformación.

Según se aprecia en la figura B.12a, el esfuerzo desviador crece con la deformación durante todo el ensayo en la probeta densa. La prueba se suspendió cuando el esfuerzo cortante alcanzó un valor de 0.28 kg/cm^2 a una deformación de 1.65% en un tiempo de tres horas con veintiséis minutos.

La probeta suelta muestra un quiebre en la curva esfuerzo desviador contra deformación a una baja deformación; este punto se alcanza en tres horas a una deformación de 0.64% donde el esfuerzo cortante es de 0.09 kg/cm^2 , mucho menor que el alcanzado por la muestra densa (ver fig B.12a). En esta curva se observa una disminución del esfuerzo desviador a una gran velocidad de deformación, inmediatamente después del colapso estructural del suelo, provocando una rápida reducción del área de la probeta. Después del movimiento rápido en esta probeta, se alcanza una deformación de 18% en sólo seis segundos.

Comportamiento exceso de presión de poro - deformación.

La máxima presión de poro generada en la probeta densa fue del orden de 29% de p'_o , antes de aparecer los incrementos negativos de esta presión que indican el comienzo de la tendencia dilatante (fig B.12b).

La presión de poro inducida en el punto de colapso (probeta suelta), Δu_c , fue del orden de 45% del esfuerzo efectivo de consolidación como se observa en la figura B.12b; esta presión continuó incrementándose durante la falla hasta alcanzar un valor máximo, $\Delta u_{máx}$, de 63% de p'_o .

Trayectoria de esfuerzos efectivos.

En el momento de alcanzar la máxima presión de poro, se movilizó un ángulo de fricción interna, ϕ'_q , de 21.8° en la probeta densa mientras que en la suelta se movilizó un ángulo mucho más bajo ($\phi'_q = 13.1^\circ$). El ángulo de fricción interna en la envolvente de falla fue de 30.6° en la densa y 31.2° en la suelta, como se observa en la figura B.12c y la tabla B.5.

Al generar poca presión de poro la muestra densa, la trayectoria de esfuerzos efectivos se desplaza inicialmente un poco a la izquierda en un comportamiento contractivo hasta alcanzar la máxima presión de poro momento en el cual comienza la tendencia dilatante que se mantuvo hasta el final del ensaye. La probeta suelta, al presentar un aumento en la magnitud de la presión de poro, ocasiona que la trayectoria de esfuerzos se desplace hacia la izquierda llegando casi al origen de coordenadas, con un comportamiento contractivo y pasar luego a la tendencia dilatante.

Probetas suelta y muy suelta.

Se eligieron para este análisis los resultados de los ensayos 15 y 48 con relaciones de vacíos al inicio de la prueba de 0.914 y 1.048 respectivamente, contienen el 7% de contenido de finos y el esfuerzo efectivo al final de consolidación fue de 2.0 kg/cm^2 (ver tabla B.5).

Comportamiento esfuerzo - deformación.

Las curvas esfuerzo desviador contra deformación presentan un máximo a bajas deformaciones; este punto se alcanza para ambas probetas en tres horas aproximadamente a una deformación de 0.65% para la muestra suelta y de 0.82% en la muy suelta.

Según la figura B.13a, el esfuerzo desviador máximo, σ'_{dq} , es mayor en la probeta suelta, 0.17 kg/cm^2 , mientras que en la muy suelta es de 0.12 kg/cm^2 . A partir de este punto se presenta el colapso en la estructura del suelo llegando a deformaciones del 18% en treinta segundos (muestra suelta) y veintinueve milisegundos (muestra muy suelta) apreciándose una disminución del esfuerzo desviador a una gran velocidad de deformación; este efecto es más notorio en el comportamiento de la probeta muy suelta.

Comportamiento exceso de presión de poro - deformación.

La presión de poro inducida en el punto de colapso, Δu_q , presenta poca variación en ambas probetas siendo del orden de 41% y 44% del esfuerzo efectivo de consolidación en la probeta muy suelta y suelta, respectivamente (fig B.13b); esta presión continúa incrementándose hasta llegar a valores máximos, $\Delta u_{máx}$, de 58% de p'_o para la probeta suelta y 64% de p'_o en la muy suelta.

Trayectoria de esfuerzos efectivos.

Como se observa en la figura B.13c, el aumento en magnitud de la presión de poro hace que la trayectoria de esfuerzos efectivos se desplace hacia la izquierda llegando casi al origen de coordenadas en un comportamiento contractivo hasta alcanzar la máxima presión de poro para luego iniciar la tendencia dilatante.

Al presentarse el colapso de la estructura, la muestra suelta movilizó un ángulo de fricción interna, ϕ'_{qs} , de 13.1° , mientras que el de la muy suelta fue de 11.1° . El ángulo de fricción interna en la envolvente de falla, ϕ' , fue de 31.6° y 30.2° para la probetas suelta y muy suelta respectivamente.

B.2.1.2 Resultados en probetas con diferente contenido de finos .

El comportamiento de las muestras consolidadas anisotrópicamente con $k = 0.44$ ensayadas en extensión variando el contenido de finos, se analizó con base en los resultados de los ensayos 10, 8 y 15, presentados en la tabla B.5. Estas probetas tienen una relación de vacíos inicial prácticamente constante (en promedio, $e_i = 0.914$) y un esfuerzo efectivo de consolidación de 2.0 kg/cm^2 .

En términos generales estas probetas mostraron al comienzo del ensaye una gran rigidez alcanzando un esfuerzo desviador máximo, σ_{dq} , de 0.17 kg/cm^2 . En las curvas de la figura B.14a se observa que este esfuerzo desviador se presenta a pequeñas deformaciones ($\epsilon_q = 0.65\%$).

La presión de poro inducida en el punto de colapso, Δu_{qs} , varía de 0.42 a 0.49% de p'_0 , siendo menor en la probeta con mayor contenido de finos. La presión de poro continúa incrementándose durante el ensaye hasta alcanzar valores máximos, $\Delta u_{máx}$, entre 58% y 66% del esfuerzo efectivo de consolidación. Posteriormente, el exceso de presión de poro disminuye produciéndose en los especímenes una tendencia a la dilatación (ver fig B.14b).

En la figura B.14c se presentan las trayectorias de esfuerzos efectivos de los especímenes ensayados. Se observa que el ángulo de fricción interna en la envolvente de falla, ϕ' , es prácticamente el mismo (29.0° a 31.6°). Por otra parte, el aumento en la magnitud de la presión de poro ocasiona que se desplacen hacia la izquierda llegando casi al origen de coordenadas, pasando de un comportamiento contractivo a una tendencia dilatante.

Al presentarse el colapso en la estructura del suelo se movilizaron ángulos de fricción interna, ϕ'_{qs} , de 13.1° en las probetas ensayadas.

Tabla B.5 Resultados obtenidos al ensayar muestras consolidadas anisotrópicamente con $k = 0.44$, ensayadas en extensión

Ensayo #	% caolín	e_i	e_d	σ'_{dq} kg/cm ²	t'_q kg/cm ²	ϵ_q %	Δu_q kg/cm ²	$\Delta u_{máx}$ kg/cm ²	$\epsilon_{máx}$ %	ϕ'_q grados	ϕ' grados
38	3	0.726	0.780	0.55	0.28	-	-	0.58	1.65	21.8	30.6
10	3	0.914	0.974	0.18	0.09	0.64	0.90	1.25	6.13	13.1	31.2
8	5	0.913	1.013	0.17	0.09	0.65	0.99	1.34	3.80	13.1	29.0
15	7	0.914	1.058	0.17	0.09	0.65	0.89	1.16	6.81	13.1	31.6
48	7	1.048	1.203	0.12	0.06	0.82	0.83	1.28	5.82	11.1	30.2

B.2.2 Especímenes consolidados con $k = 0.53$ y 0.62 .

El comportamiento típico mostrado por las probetas consolidadas anisotrópicamente bajo un k de 0.53 y 0.62, ensayadas en compresión y extensión, es comparable en forma cualitativa al que presentan las muestras consolidadas anisotrópicamente bajo un cociente de esfuerzos de 0.44. Por tanto, teniendo como marco de referencia el análisis presentado en el numeral anterior, a continuación sólo se presentan las figuras que describen el comportamiento esfuerzo desviador y generación de presión de poro contra deformación así como las trayectorias de esfuerzos efectivos de esta serie de pruebas teniendo presente el efecto de la densidad inicial, el contenido de finos y la dirección de aplicación de la carga.

Las tablas B.6 y B.7 resumen las condiciones iniciales y los resultados obtenidos con las probetas consolidadas anisotrópicamente con $k = 0.53$ ensayadas en compresión y extensión, respectivamente; las curvas de las figuras B.15 a B.20 corresponden a las diferentes condiciones analizadas.

Las condiciones iniciales y los resultados obtenidos en las probetas consolidadas anisotrópicamente con $k = 0.62$ ensayadas en compresión y extensión, se presentan en las tablas B.8 y B.9, respectivamente y las figuras B.21 a B.26.

Tabla B.6 Resultados obtenidos al ensayar muestras consolidadas anisotrópicamente con $k = 0.53$, ensayadas en compresión.

Ensayo #	% caolín	e_i	e_{el}	σ'_{dq} kg/cm ²	t'_q kg/cm ²	ϵ_q %	Δu_q kg/cm ²	$\Delta u_{máx}$ kg/cm ²	$\epsilon_{máx}$ %	ϕ'_q grados	ϕ' grados
35	3	0.790	0.846	2.14	1.07	-	-	0.37	0.55	25.4	29.2
19	3	0.921	0.981	1.58	0.79	0.16	0.29	1.06	6.43	21.1	29.6
23	5	0.904	1.004	1.58	0.79	0.16	0.27	1.09	6.49	21.0	30.2
20	7	0.919	1.063	1.54	0.77	0.08	0.16	1.19	7.35	19.5	30.3
42	7	1.077	1.234	1.50	0.75	0.16	0.33	1.79	14.48	20.7	29.8

Tabla B.7 Resultados obtenidos al ensayar muestras consolidadas anisotrópicamente con $k = 0.53$, ensayadas en extensión.

Ensayo #	% caolín	e_i	e_{el}	σ'_{dq} kg/cm ²	t'_q kg/cm ²	Δu_q kg/cm ²	ϵ_q %	$\Delta u_{máx}$ kg/cm ²	$\epsilon_{máx}$ %	ϕ'_q grados	ϕ' grados
39	3	0.785	0.840	0.42	0.21	0.54	0.70	0.97	3.59	21.3	30.5
17	3	0.910	0.969	0.27	0.14	0.77	0.56	1.28	6.46	12.5	30.7
18	5	0.908	1.009	0.28	0.14	0.74	0.48	1.29	6.34	12.5	31.1
16	7	0.886	1.028	0.26	0.13	0.83	0.56	1.36	4.79	12.3	30.0
46	7	1.073	1.229	0.22	0.11	0.89	0.72	1.34	8.29	11.5	31.0

Tabla B.8 Resultados obtenidos al ensayar muestras consolidadas anisotrópicamente con $k = 0.62$, ensayadas en compresión.

Ensayo #	% caolín	e_i	e_{el}	σ'_{dq} kg/cm ²	t'_q kg/cm ²	ϵ_q %	Δu_q kg/cm ²	$\epsilon_{máx}$ %	$\Delta u_{máx}$ kg/cm ²	ϕ'_q grados	ϕ' grados
49	3	0.688	0.741	2.21	1.11	-	-	0.39	0.42	25.1	29.7
22	3	0.900	0.955	1.31	0.65	0.24	0.46	5.19	1.24	19.3	29.2
52	5	0.881	0.980	1.33	0.67	0.24	0.43	3.27	1.10	20.3	29.6
24	7	0.903	1.046	1.27	0.63	0.24	0.35	7.00	1.39	19.0	29.9
43	7	1.077	1.233	1.27	0.63	0.24	0.42	13.25	1.90	18.6	29.7

Tabla B.9 Resultados obtenidos al ensayar muestras consolidadas anisotrópicamente con $k = 0.62$, ensayadas en extensión.

Ensayo #	% caolín	e_i	e_{pi}	σ'_{dq} kg/cm ²	t'_q kg/cm ²	ϵ_q %	ΔU_q kg/cm ²	ϵ_{mdx} %	ΔU_{mdx} kg/cm ²	ϕ'_q grados	ϕ' grados
50	3	0.689	0.741	0.71	0.36	-	-	0.62	0.46	20.8	29.9
25	3	0.924	0.984	0.34	0.17	0.47	0.69	5.29	1.32	12.1	30.3
26	5	0.924	1.025	0.42	0.21	0.47	0.64	6.76	1.31	12.3	30.3
27	7	0.918	1.062	0.43	0.22	1.03	0.75	6.92	1.31	13.2	30.5
45	7	1.087	1.244	0.28	0.14	0.80	0.91	9.56	1.49	12.7	29.2

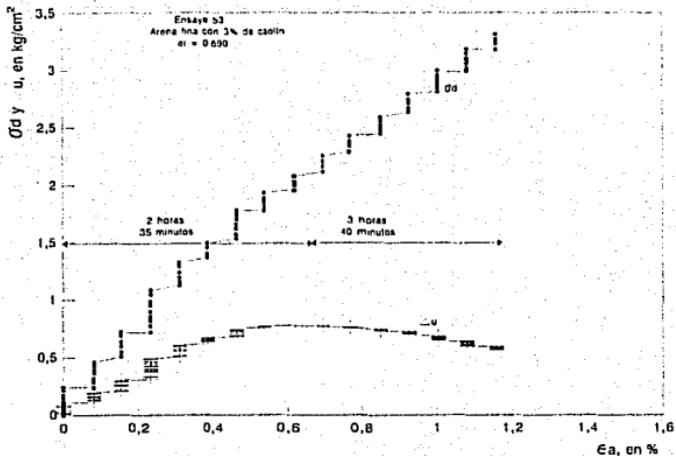


Fig B.1a Comportamiento esfuerzo deviator y exceso de presión de poro contra deformación en el espécimen denso, consolidado isotrópicamente y ensayado en compresión.

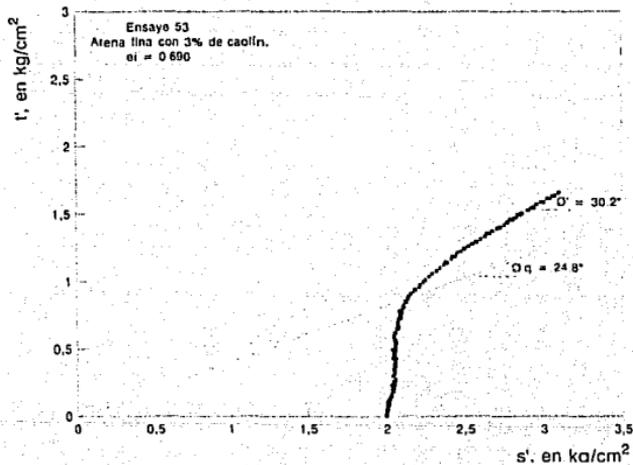


Fig B.1b Trayectoria de esfuerzos efectivos del espécimen denso consolidado isotrópicamente y ensayado en compresión

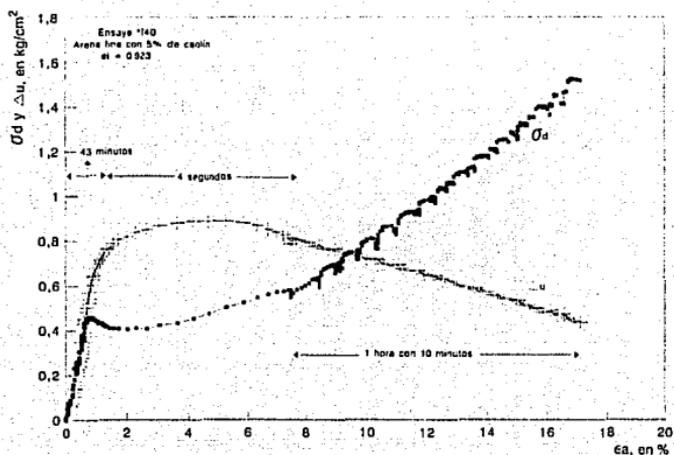


Fig B.2a Comportamiento esfuerzo desviador y exceso de presión de poro contra deformación en el espécimen suelto, consolidado isotrópicamente y ensayado en compresión

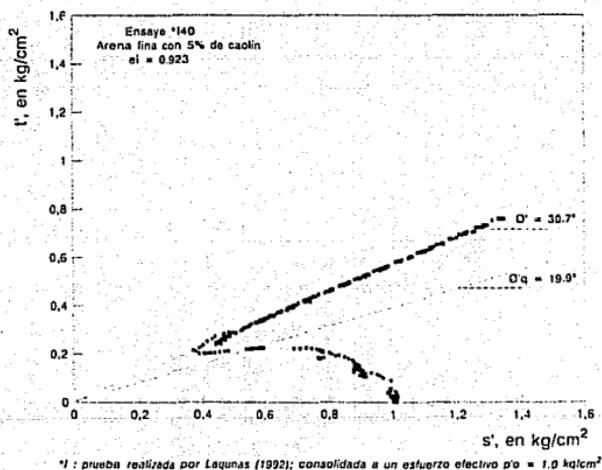


Fig B.2b Trayectoria de esfuerzos efectivos del espécimen suelto consolidado isotrópicamente y ensayado en compresión

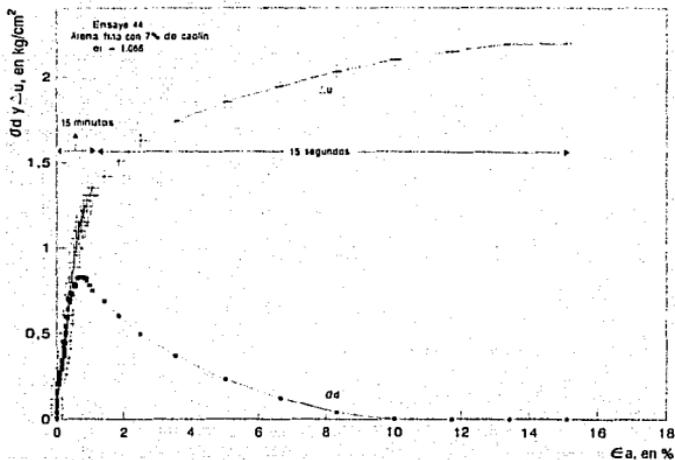


Fig B.3a Comportamiento esfuerzo desviador y exceso de presión de poro contra deformación en el espécimen muy suelto consolidado isotrópicamente y ensayado en compresión

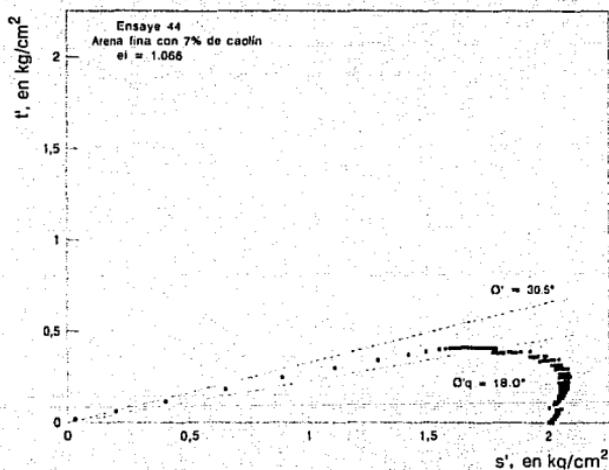


Fig B.3b Trayectoria de esfuerzos efectivos del espécimen muy suelto consolidado isotrópicamente y ensayado en compresión

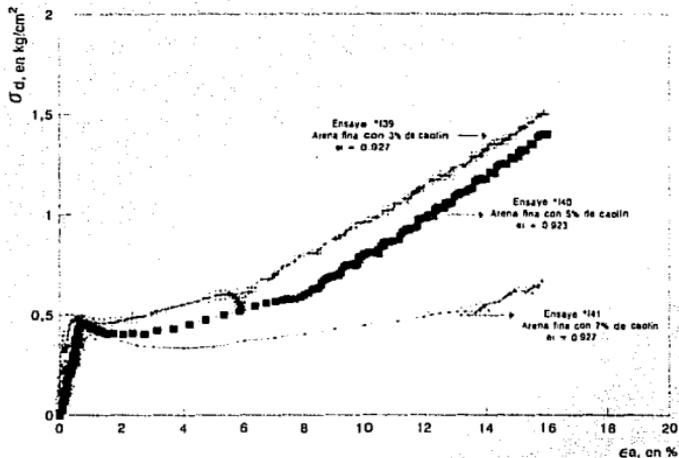


Fig B.4a Comportamiento esfuerzo desviador contra deformación de los especímenes con diferente contenido de finos consolidados isotrópicamente y ensayados en compresión

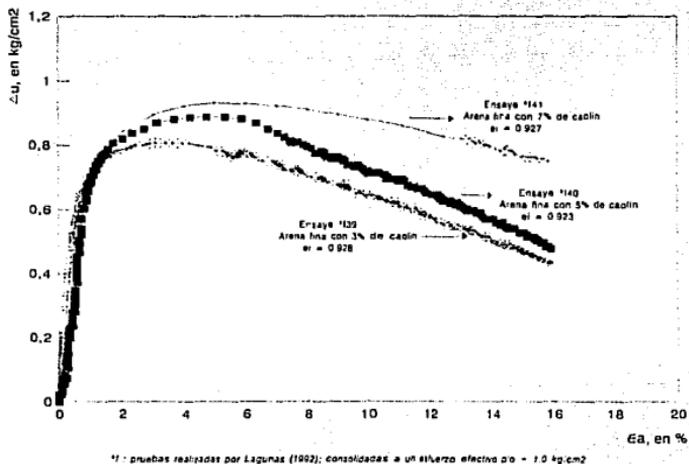
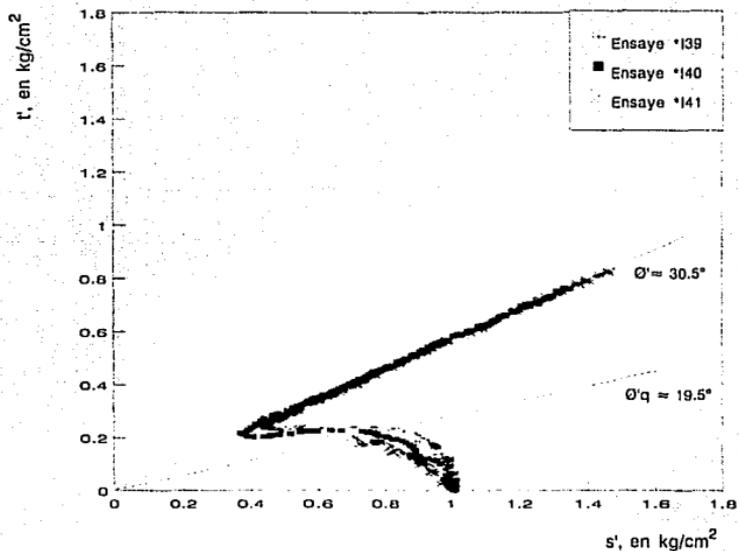


Fig B.4b Comportamiento exceso de presión de poro contra deformación de los especímenes con diferente contenido de finos consolidados isotrópicamente y ensayados en compresión



*I : Pruebas realizadas por Lagunas (1992); consolidadas a un esfuerzo efectivo, $p'_o = 1.0 \text{ kg/cm}^2$

Fig B.4c

Trayectoria de esfuerzos efectivos de especímenes con diferentes contenidos de finos consolidados isotrópicamente y ensayados en compresión

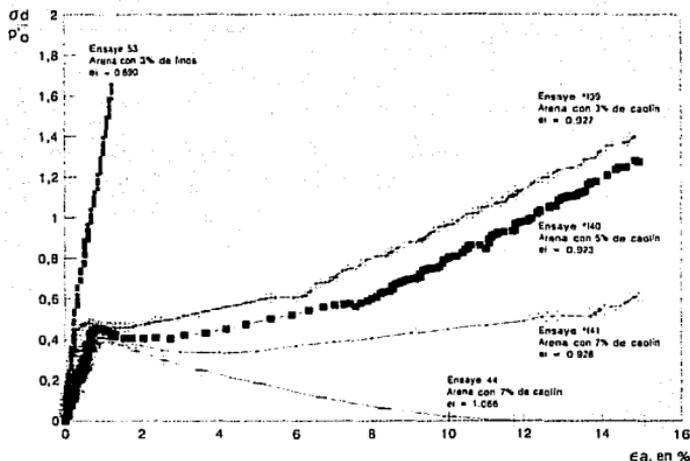


Fig B.5a

Comportamiento esfuerzo desviador normalizado con respecto a p'_o contra deformación de especímenes consolidados isotrópicamente y ensayados en compresión

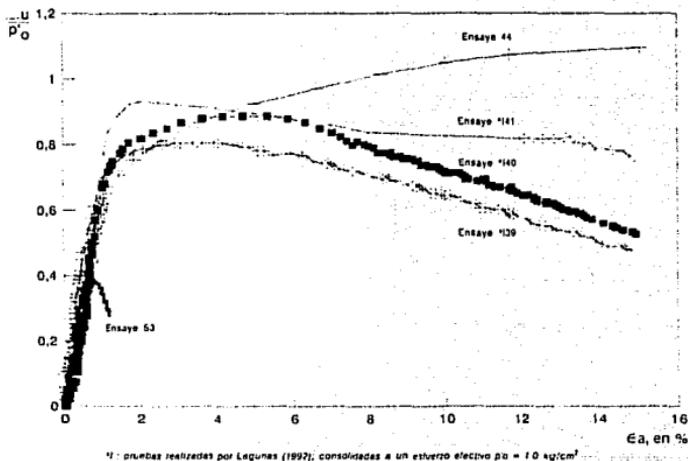


Fig B.5b

Comportamiento exceso de presión de poro normalizado con respecto a p'_o contra deformación de especímenes consolidados isotrópicamente y ensayados en compresión

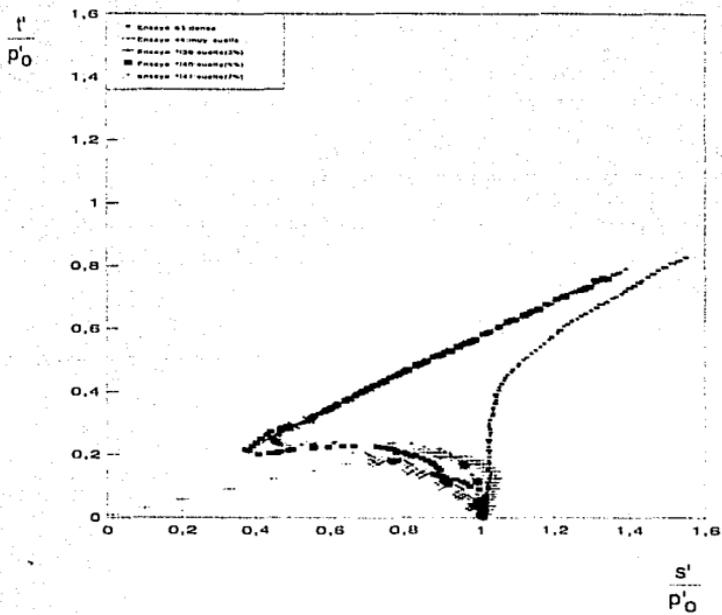


Fig B.5c Trayectoria de esfuerzos efectivos normalizadas con respecto a p'_0 de especímenes consolidados isotrópicamente y ensayados en compresión

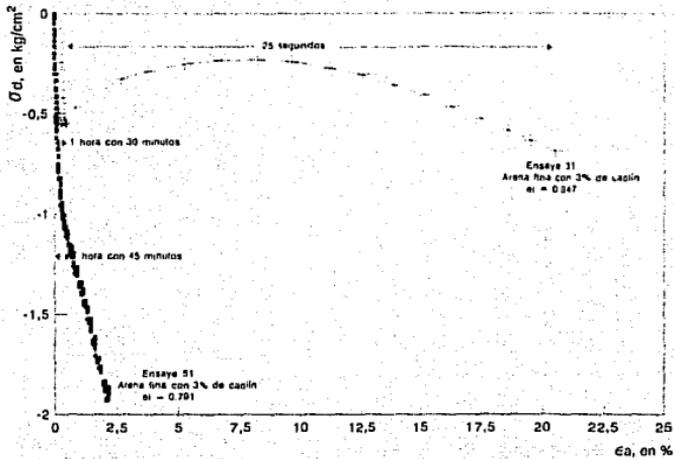


Fig B.6a Comportamiento esfuerzo desviador contra deformación de las probetas densa y suelta, consolidadas isotrópicamente y ensayadas en extensión

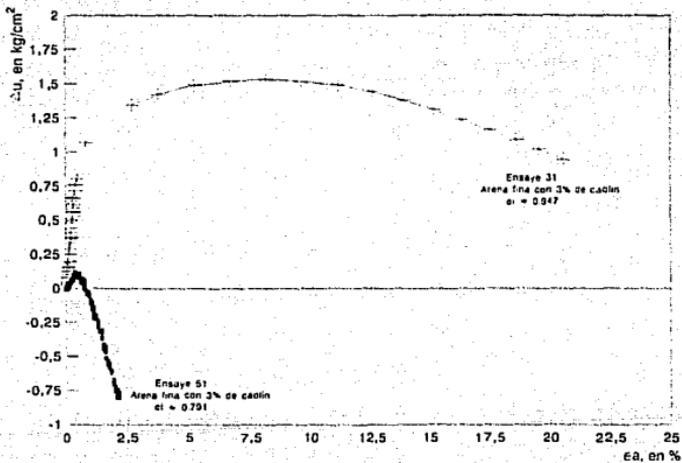


Fig B.6b Comportamiento exceso de presión de poro contra deformación de las probetas densa y suelta, consolidadas isotrópicamente y ensayadas en extensión

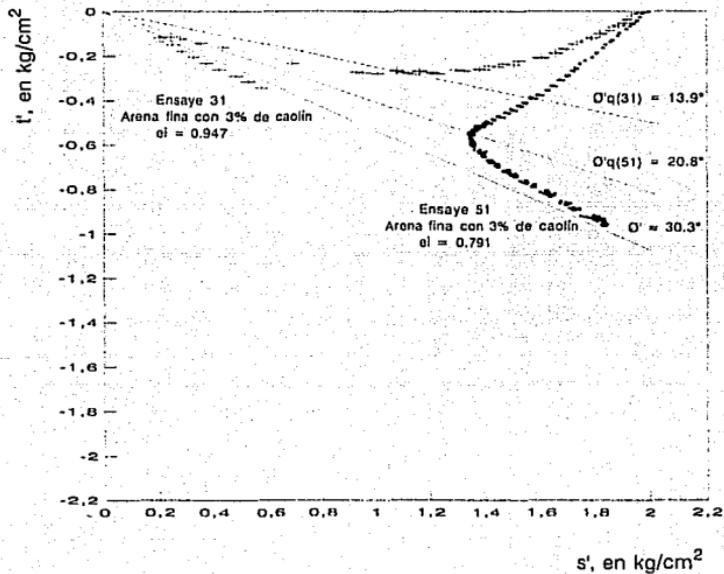


Fig B.6c Trayectoria de esfuerzos efectivos de las probetas densa y suelta, consolidadas isotrópicamente y ensayadas en extensión

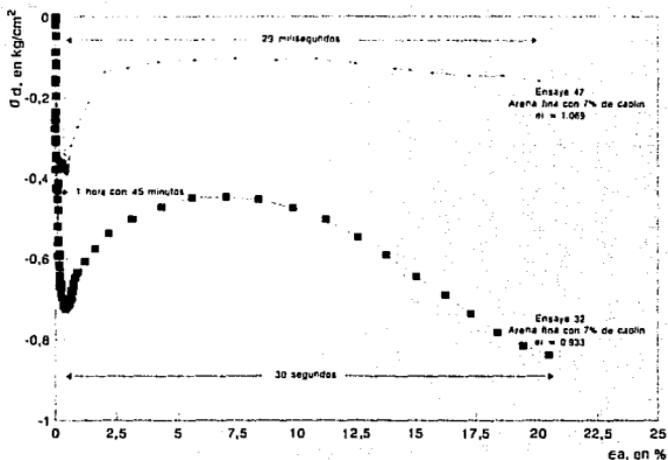


Fig B.7a Comportamiento esfuerzo desviador contra deformación de las probetas suelta y muy suelta, consolidadas isotrópicamente y ensayadas en extensión

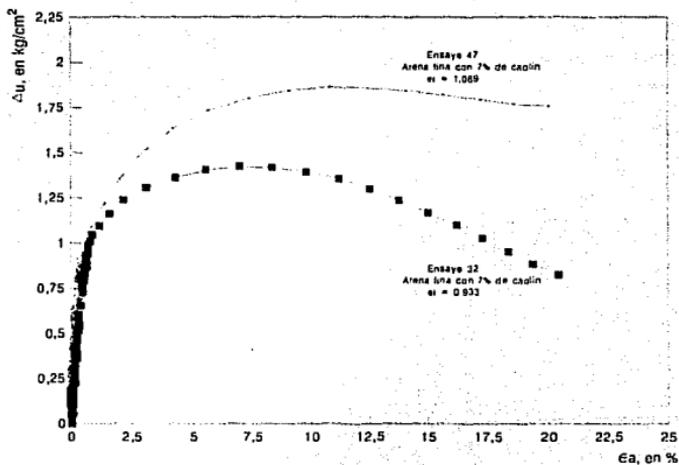


Fig B.7b Comportamiento exceso de presión de poro contra deformación de las probetas suelta y muy suelta, consolidadas isotrópicamente y ensayadas en extensión

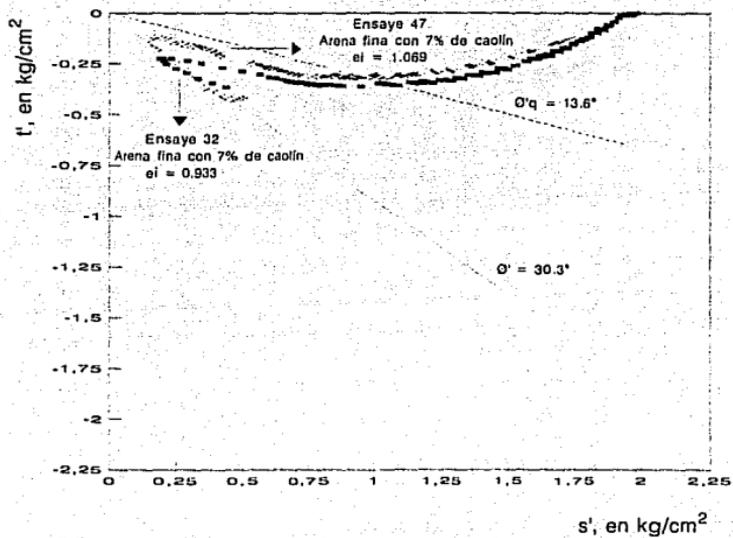


Fig B.7c Trayectoria de esfuerzos efectivos de las probetas suelta y muy suelta, consolidadas isotrópicamente y ensayadas en extensión

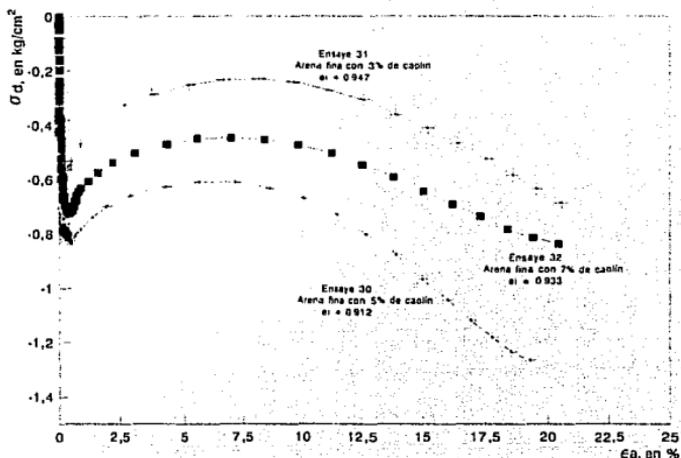


Fig B.8a

Comportamiento esfuerzo desviador contra deformación de las probetas con diferente contenido de finos, consolidadas isotrópicamente y ensayadas en extensión

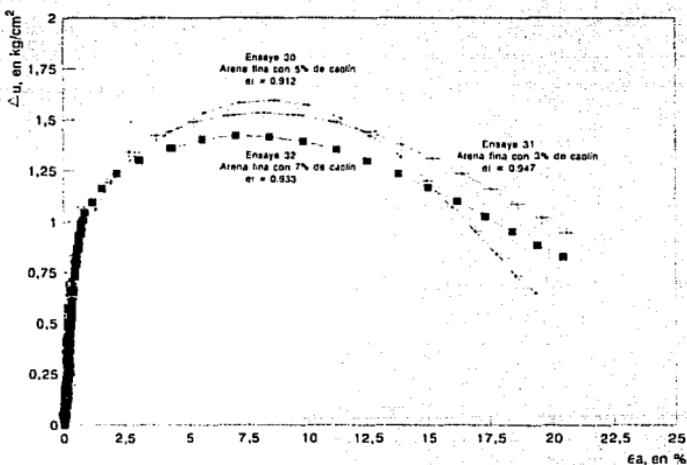


Fig B.8b

Comportamiento exceso de presión de poro contra deformación de las probetas con diferente contenido de finos, consolidadas isotrópicamente y ensayadas en extensión

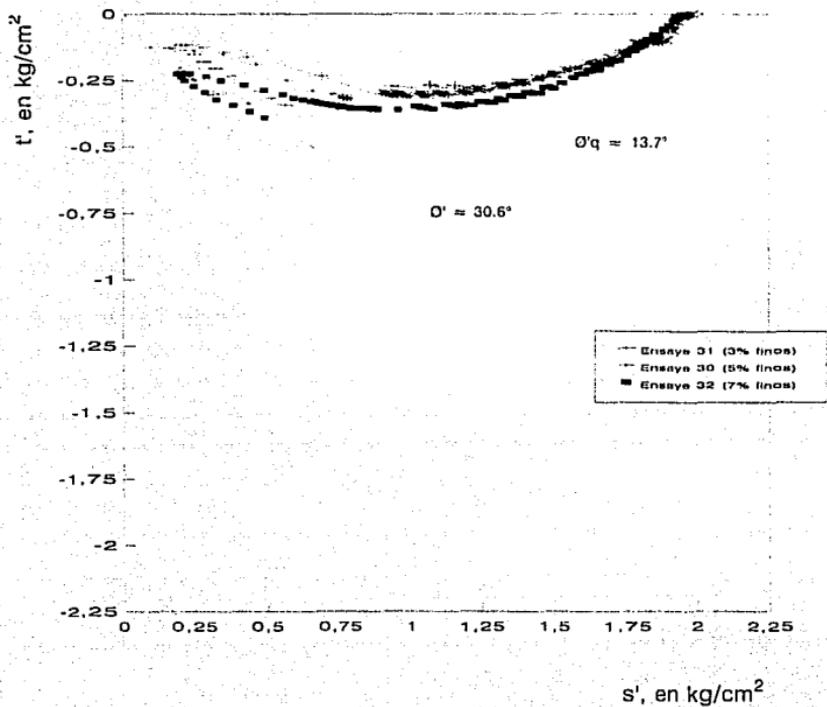


Fig B.8c Trayectoria de esfuerzos efectivos de las probetas con diferente contenido de finos, consolidadas isotrópicamente y ensayadas en extensión

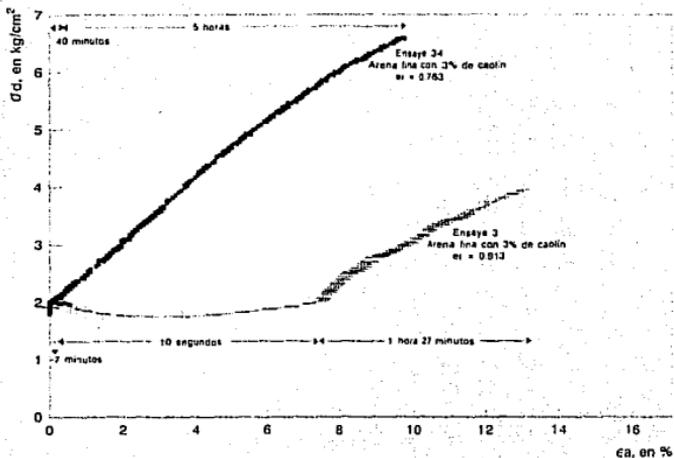


Fig B.9a

Comportamiento esfuerzo desviador contra deformación de las probetas densa y suelta, consolidadas anisotrópicamente con $k = 0.44$ ensayadas en compresión

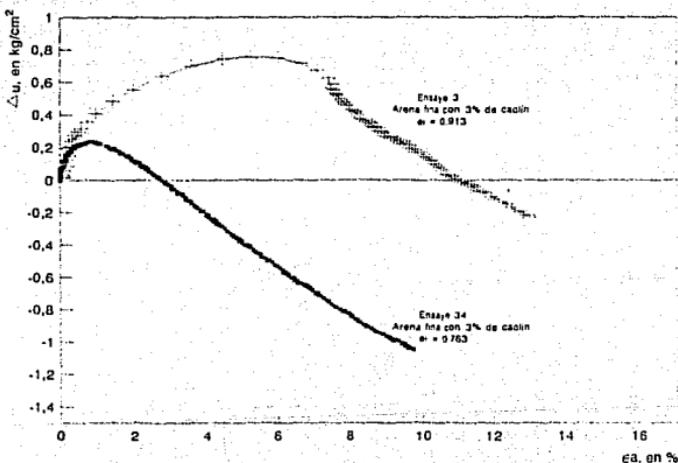


Fig B.9b

Comportamiento exceso de presión de poro contra deformación de las probetas densa y suelta, consolidadas anisotrópicamente con $K = 0.44$ y ensayadas en compresión

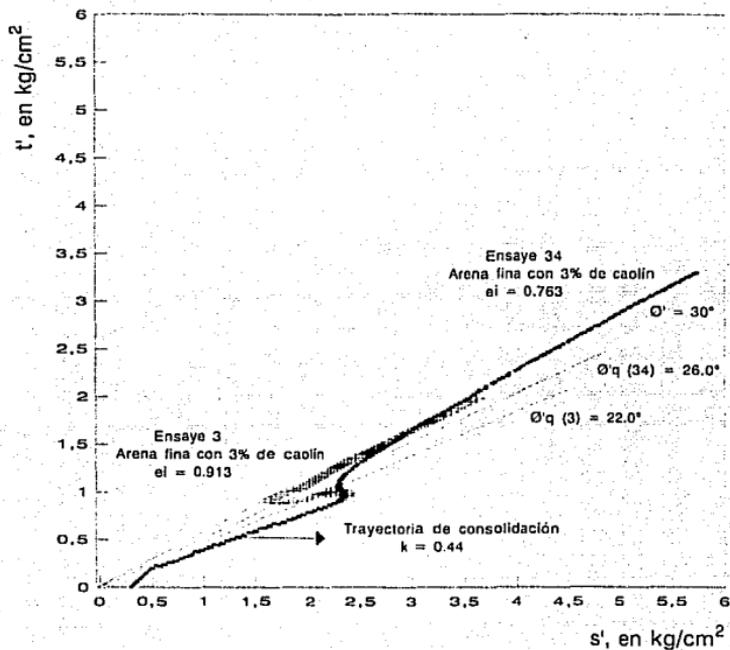


Fig B.9c

Trayectoria de esfuerzos de las probetas densa y suelta consolidadas anisotrópicamente con $K = 0.44$ y ensayadas en compresión

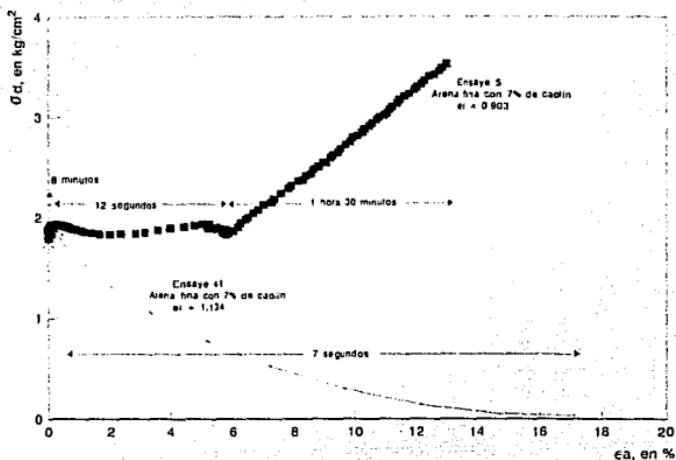


Fig B.10a Comportamiento esfuerzo desviador contra deformación de las probetas suelta y muy suelta, consolidadas anisotrópicamente con $K = 0.44$ y ensayadas en compresión

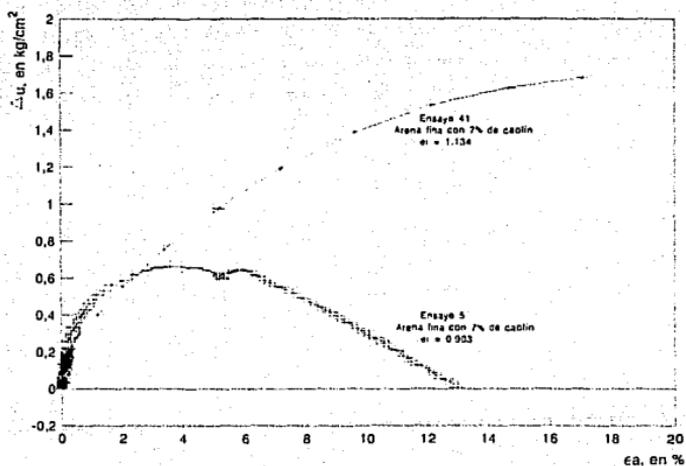


Fig B.10b Comportamiento exceso de presión de poro contra deformación de las probetas suelta y muy suelta, consolidadas anisotrópicamente con $K = 0.44$ y ensayadas en compresión

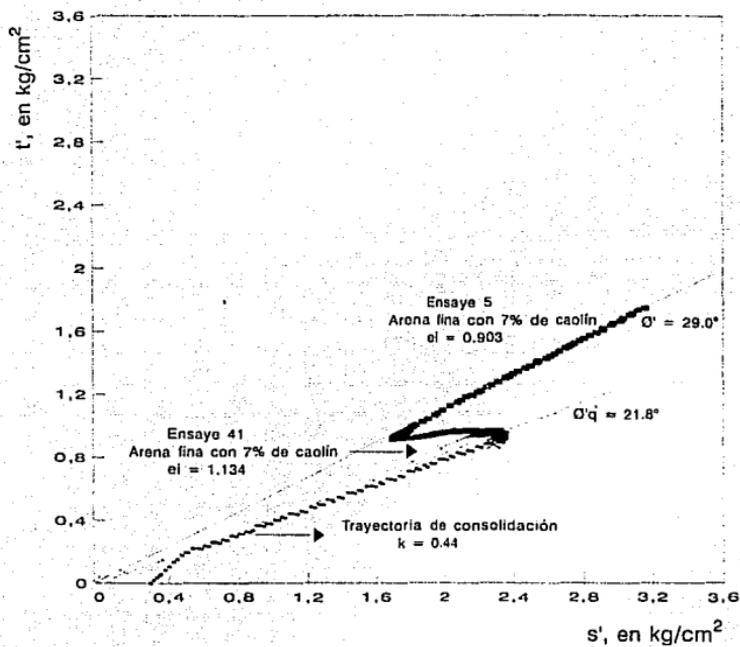


Fig B.10c Trayectoria de esfuerzos efectivos de las probetas suelta y muy suelta, consolidadas anisotrópicamente con $K = 0.44$ y ensayadas en compresión

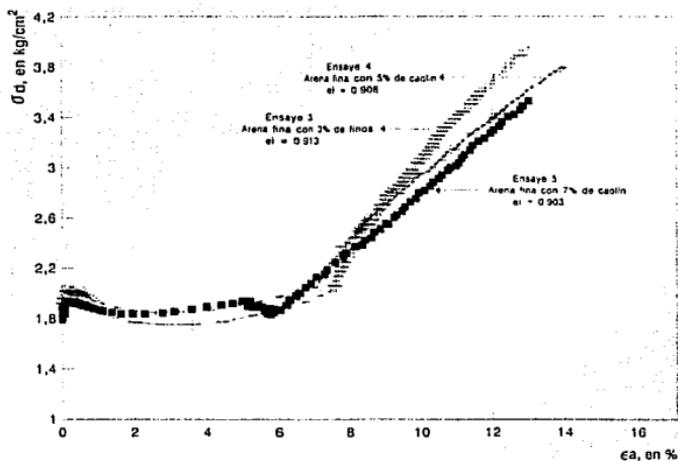


Fig. B.11a

Comportamiento esfuerzo desviador contra deformación de probetas con diferente contenido de finos, consolidadas anisotrópicamente con $k=0.44$ ensayadas en compresión

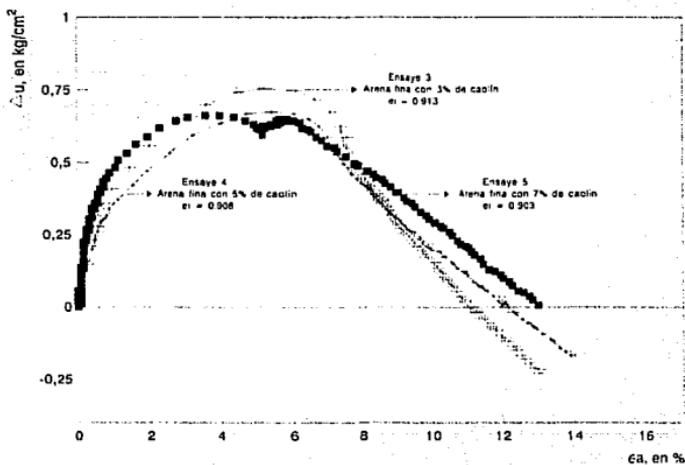


Fig. B.11b

Comportamiento exceso de presión de poro contra deformación de probetas con diferente contenido de finos, consolidadas anisotrópicamente con $k=0.44$ ensayadas en compresión

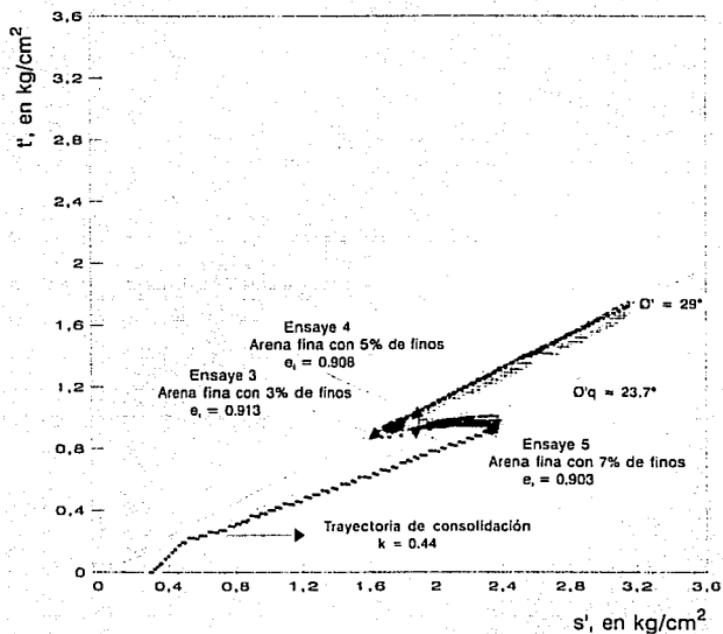


Fig B.11c Trayectoria de esfuerzos efectivos de probetas con diferente contenido de finos, consolidadas anisotrópicamente con $K = 0.44$ y ensayadas en compresión

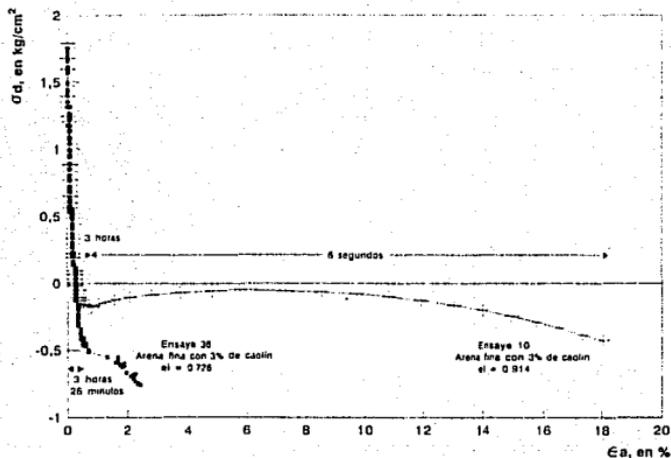


Fig B.12a

Comportamiento esfuerzo desviador contra deformación de las probetas densa y suelta, consolidadas anisotrópicamente con $K = 0.44$ y ensayadas en extensión

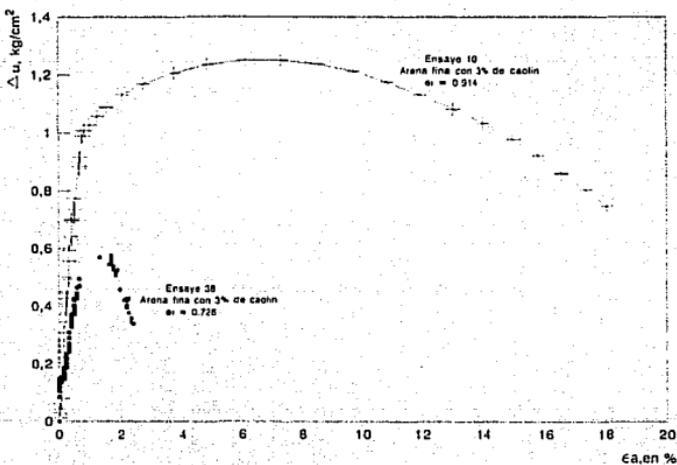


Fig B.12b

Comportamiento exceso de presión de poro contra deformación de las probetas densa y suelta, consolidadas anisotrópicamente con $K = 0.44$ y ensayadas en extensión

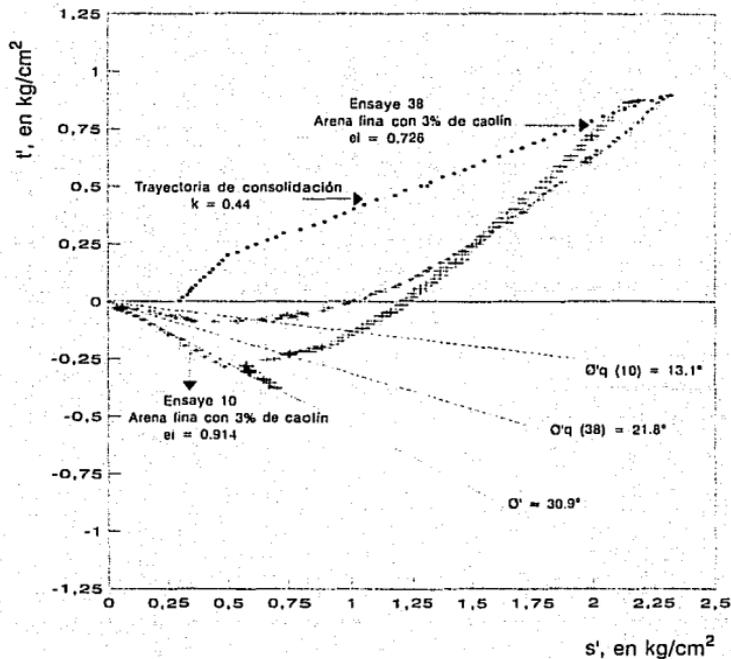


Fig B.12c Trayectoria de esfuerzos efectivos de las probetas densa y suelta, consolidadas anisotrópicamente con $K = 0.44$ y ensayadas en extensión

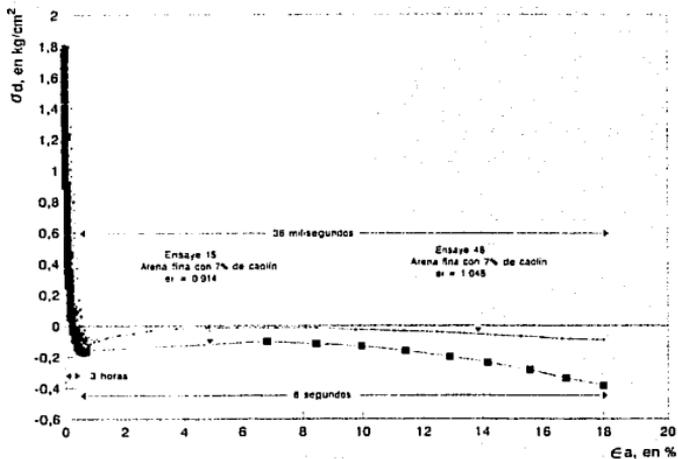


Fig B.13a

Comportamiento esfuerzo desviador contra deformación de las probetas suelta y muy suelta, consolidadas anisotrópicamente con $K = 0.44$ y ensayadas en extensión

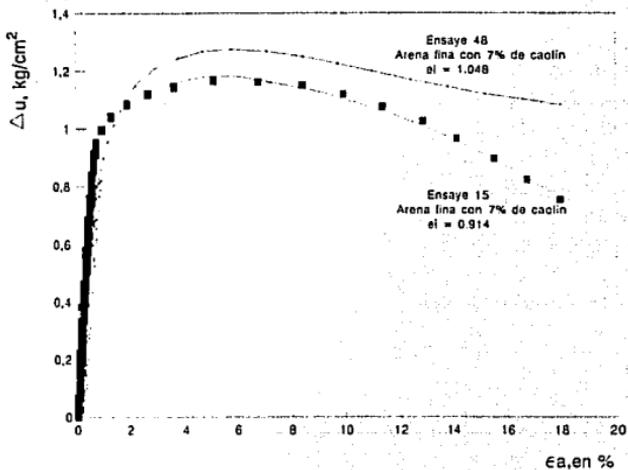


Fig B.13b

Comportamiento exceso de presión de poro contra deformación de las probetas suelta y muy suelta, consolidadas anisotrópicamente con $K = 0.44$ y ensayadas en extensión

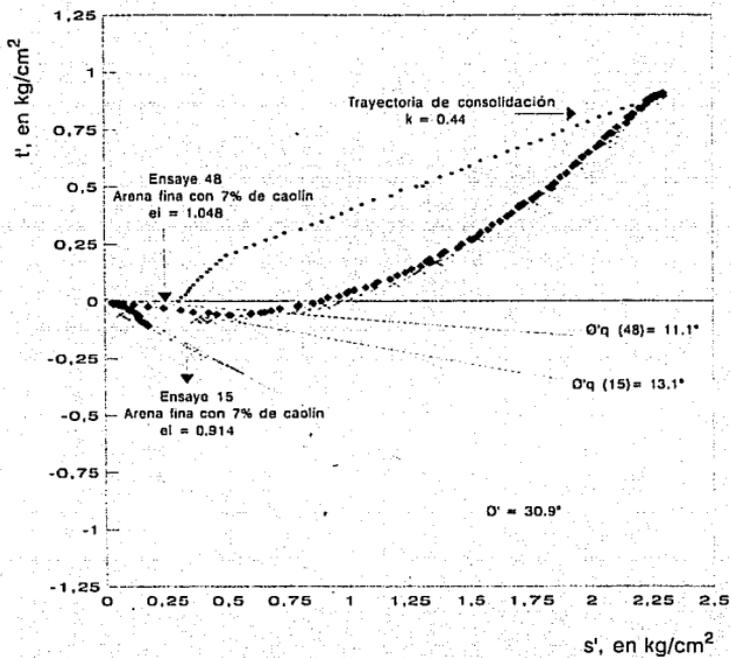


Fig B.13c Trayectoria de esfuerzos efectivos de las probetas suelta y muy suelta, consolidadas anisotrópicamente con $K = 0.44$ y ensayadas en extensión

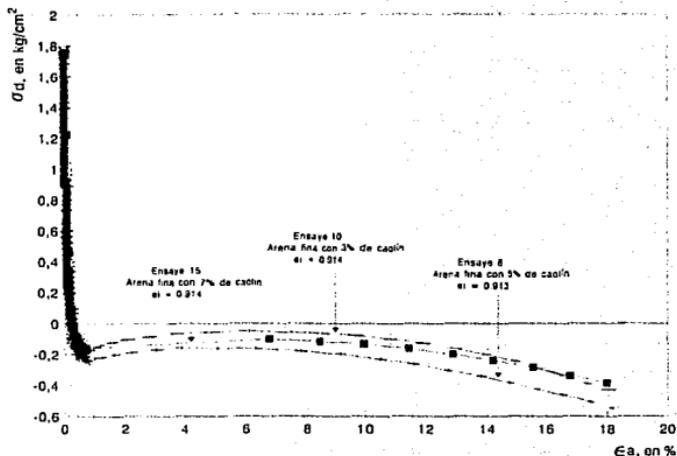


Fig B.14a Comportamiento esfuerzo desviador contra deformación de probetas con diferente contenido de finos, consolidadas anisotrópicamente con $K = 0.44$ y ensayadas extensión

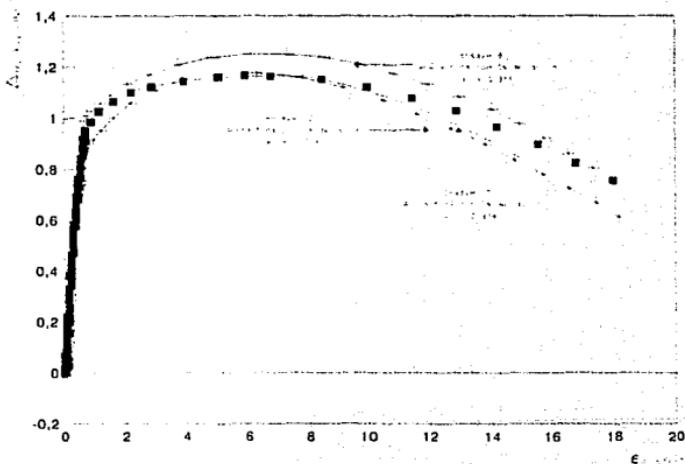


Fig B.14b Comportamiento exceso de presión de poro contra deformación de probetas con diferente contenido de finos, consolidadas anisotrópicamente con $K = 0.44$ y ensayadas en extensión

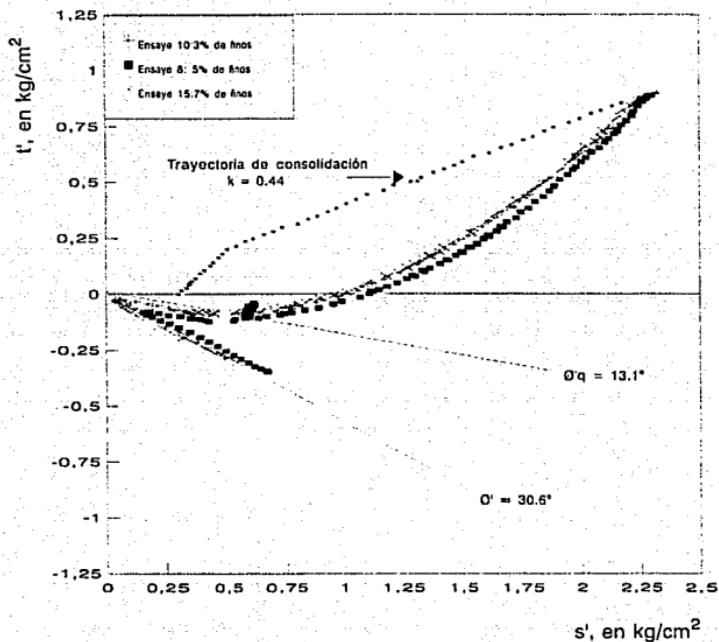


Fig B.14c

Trayectoria de esfuerzos efectivos de probetas con diferente contenido de finos, consolidadas anisotrópicamente con $K = 0.44$ y ensayadas en extensión

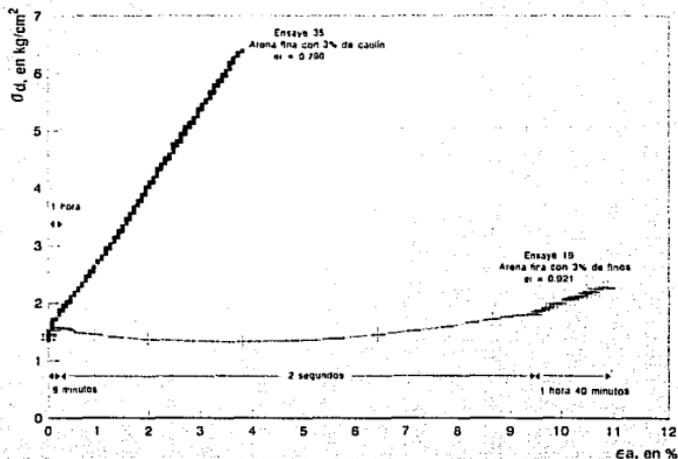


Fig B.15a Comportamiento esfuerzo desviador contra deformación de las probetas densa y suelta, consolidadas anisotrópicamente con $K = 0.53$ y ensayadas en compresión

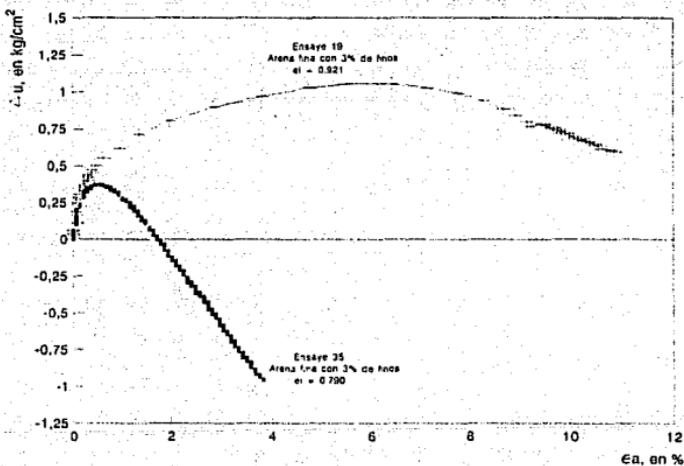


Fig B.15b Comportamiento exceso de presión de poro contra deformación de las probetas densa y suelta, consolidadas anisotrópicamente con $K = 0.53$ y ensayadas en compresión

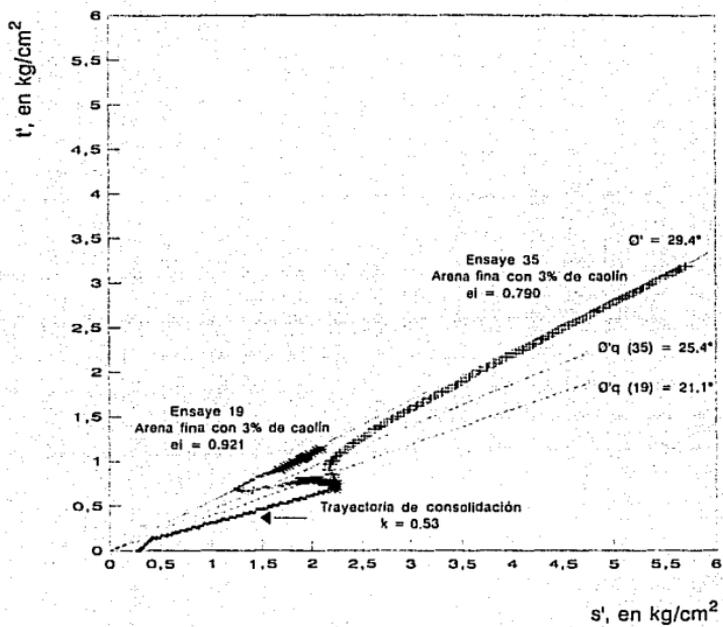


Fig B.15c Trayectoria de esfuerzos efectivos de las probetas densa y suelta, consolidadas anisotrópicamente con $K = 0.53$ y ensayadas en compresión

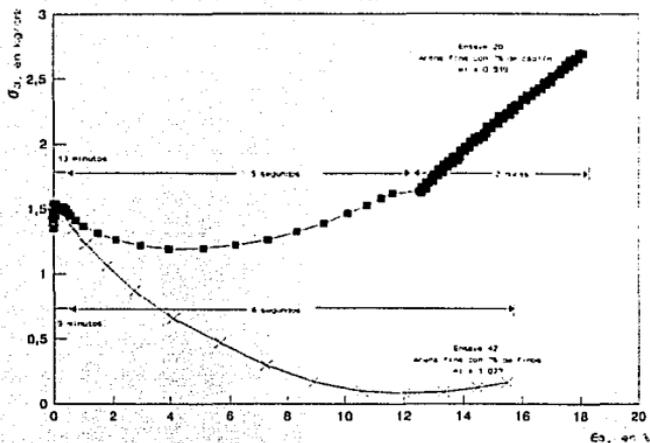


Fig B.16a Comportamiento esfuerzo desviador contra deformación de las probetas suelta y muy suelta, consolidadas anisotrópicamente con $K = 0.53$ y ensayadas en compresión

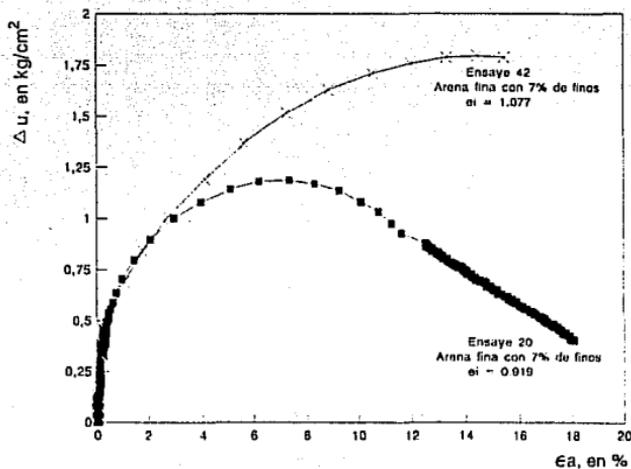


Fig B.16b Comportamiento exceso de presión de poro contra deformación de las probetas suelta y muy suelta, consolidadas anisotrópicamente con $K = 0.53$ y ensayadas en compresión

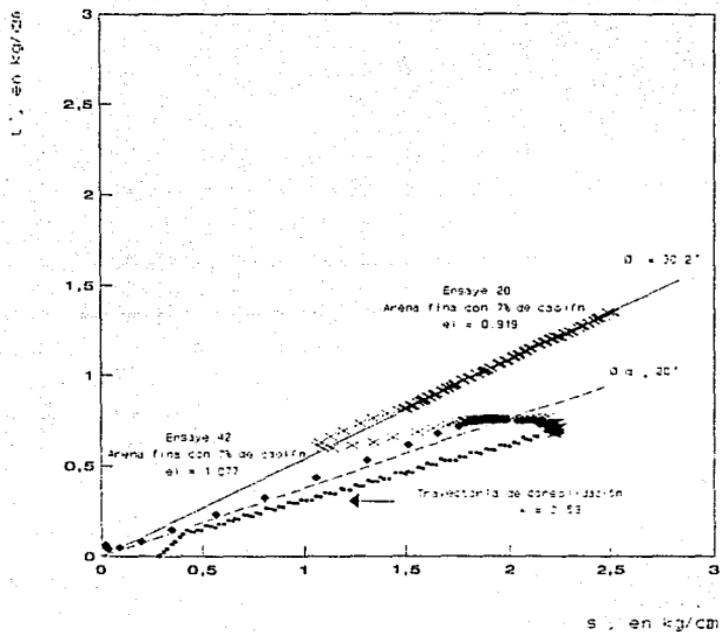


Fig B.16c Trayectoria de esfuerzos efectivos de las probetas suelta y muy suelta, consolidadas anisotrópicamente con $K = 0.53$ y ensayadas en compresión

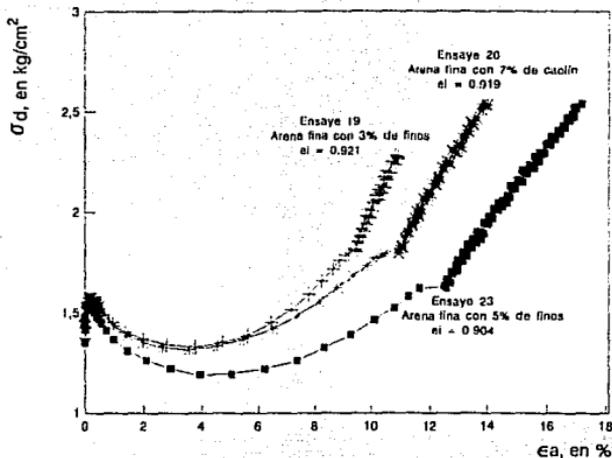


Fig B.17a Comportamiento esfuerzo desviador contra deformación de probetas con diferente contenido de finos, consolidadas anisotrópicamente con $k=0.53$ ensayadas en compresión

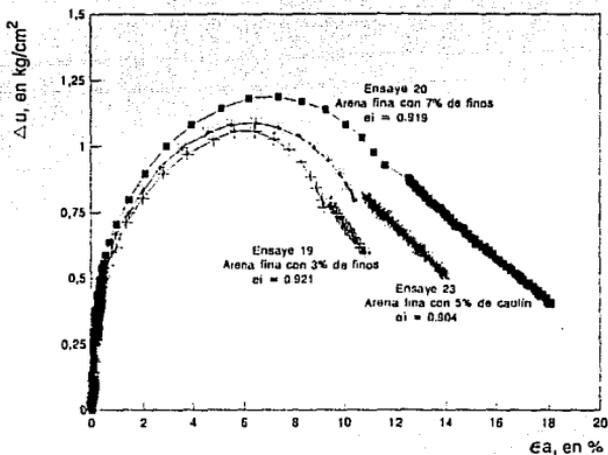


Fig B.17b Comportamiento exceso de presión de poro contra deformación de probetas con diferente contenido de finos, consolidadas anisotrópicamente con $k=0.53$ ensayadas en compresión

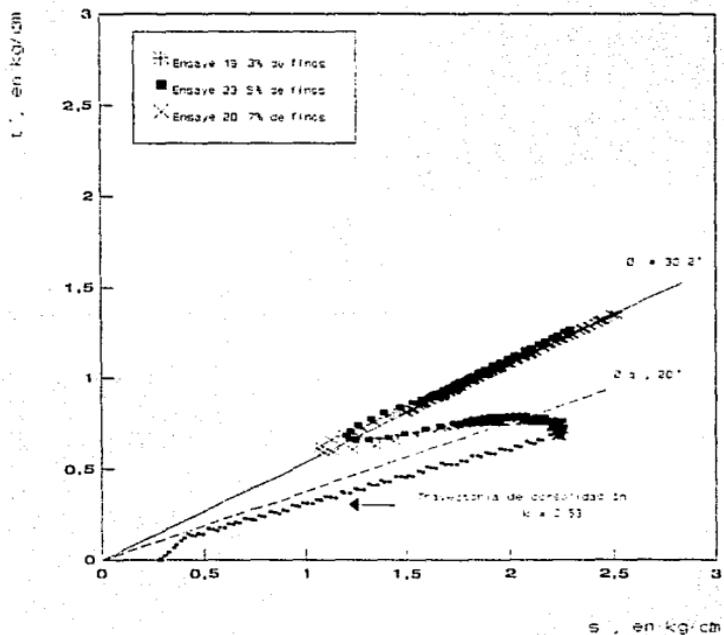


Fig B.17c

Trayectoria de esfuerzos efectivos de probetas con diferente contenido de finos, consolidadas anisotrópicamente con $K = 0.53$ y ensayadas en compresión

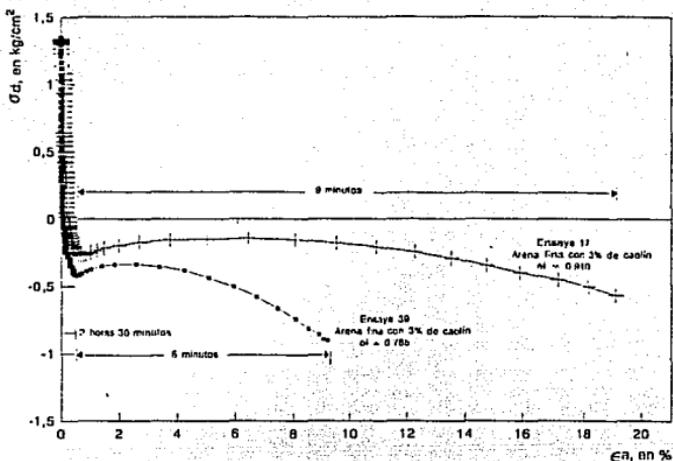


Fig B.18a

Comportamiento esfuerzo desviador contra deformación de las probetas densa y suelta, consolidadas anisotrópicamente con $K = 0.53$ y ensayadas en extensión

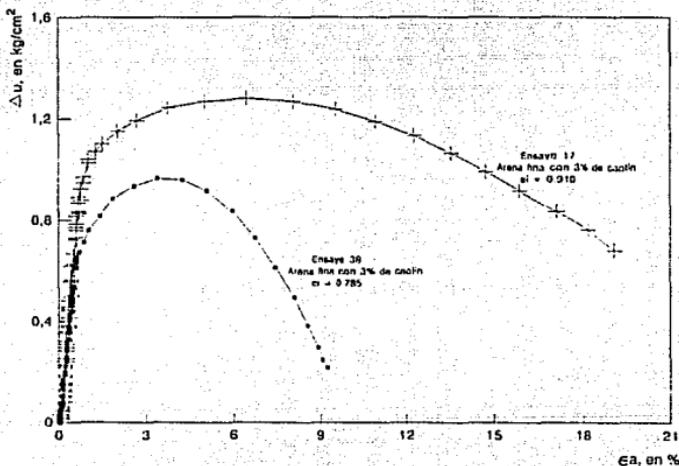


Fig B.18b

Comportamiento exceso de presión de poro contra deformación de las probetas densa y suelta, consolidadas anisotrópicamente con $K = 0.53$ y ensayadas en extensión

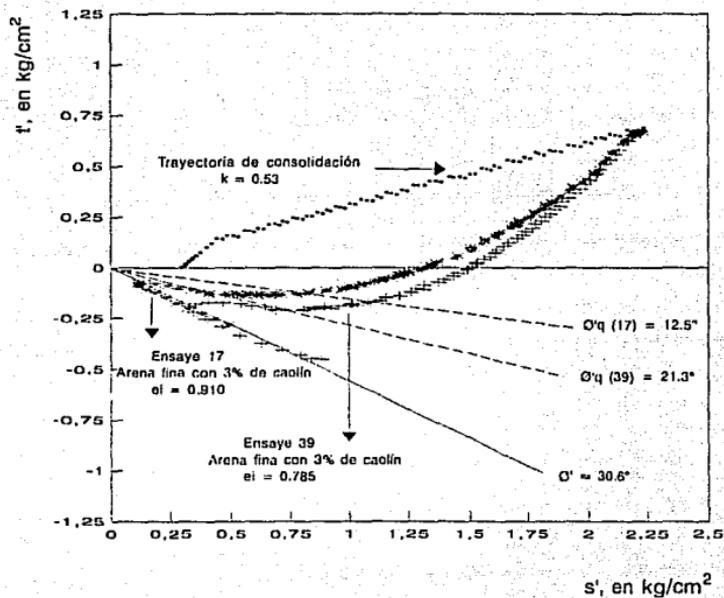


Fig B.18c Trayectoria de esfuerzos efectivos de las probetas densa y suelta, consolidadas anisotrópicamente con $K = 0.53$ y ensayadas en extensión

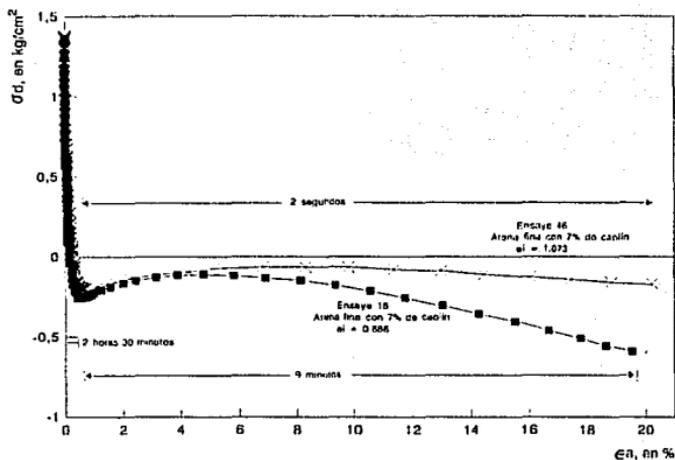


Fig B.19a Comportamiento esfuerzo desviador contra deformación de las probetas suelta y muy suelta, consolidadas anisotrópicamente con $K = 0.53$ y ensayadas en extensión

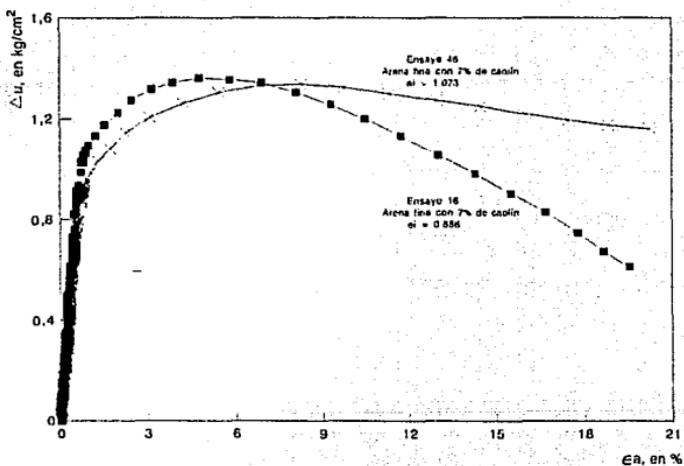


Fig B.19b Comportamiento exceso de presión de poro contra deformación de las probetas suelta y muy suelta, consolidadas anisotrópicamente con $K = 0.53$ y ensayadas en extensión

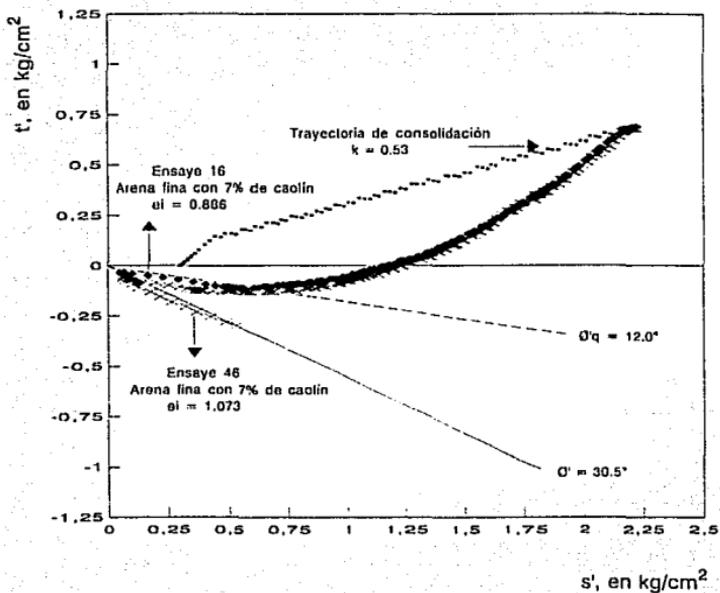


Fig B.19c Trayectoria de esfuerzos efectivos de las probetas suelta y muy suelta, consolidadas anisotrópicamente con $K = 0.53$ y ensayadas en extensión

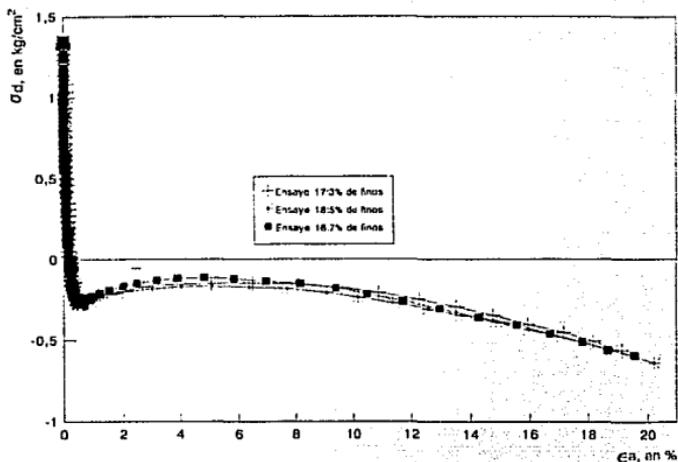


Fig B.20a

Comportamiento esfuerzo desviador contra deformación de probetas con diferente contenido de finos, consolidadas anisotrópicamente con $K = 0.53$ y ensayadas en extensión

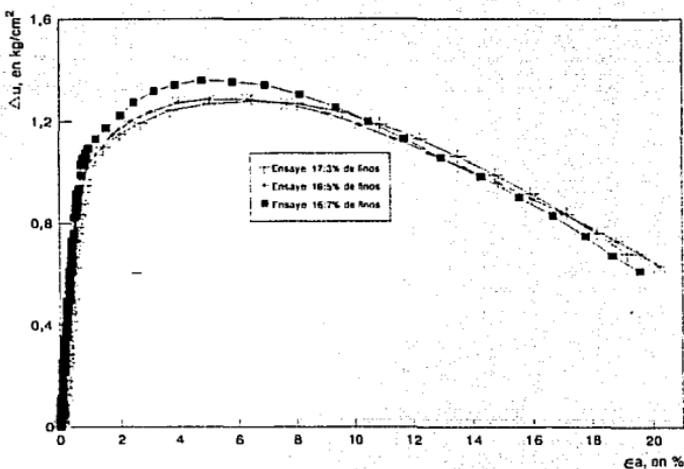


Fig B.20b

Comportamiento exceso de presión de poro contra deformación de probetas con diferente contenido de finos, consolidadas anisotrópicamente con $k=0.53$ ensayadas en extensión

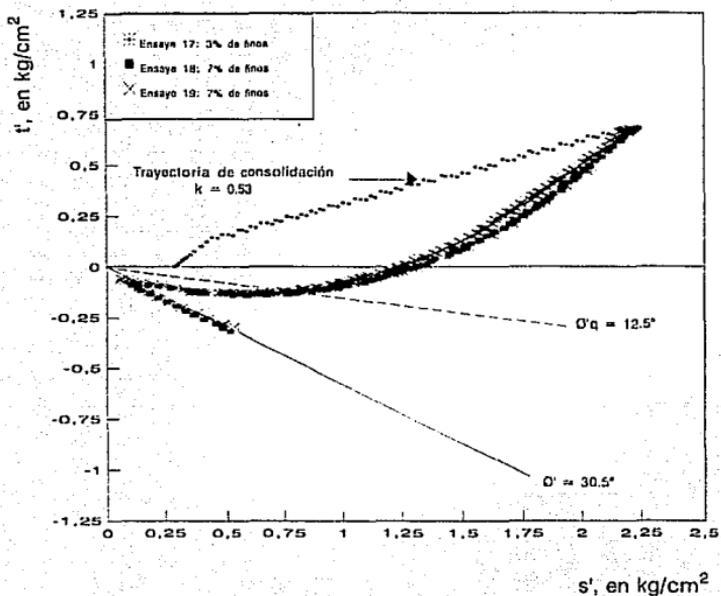


Fig B.20c

Trayectoria de esfuerzos efectivos de probetas con diferente contenido de finos, consolidadas anisotrópicamente con $K = 0.53$ y ensayadas en extensión

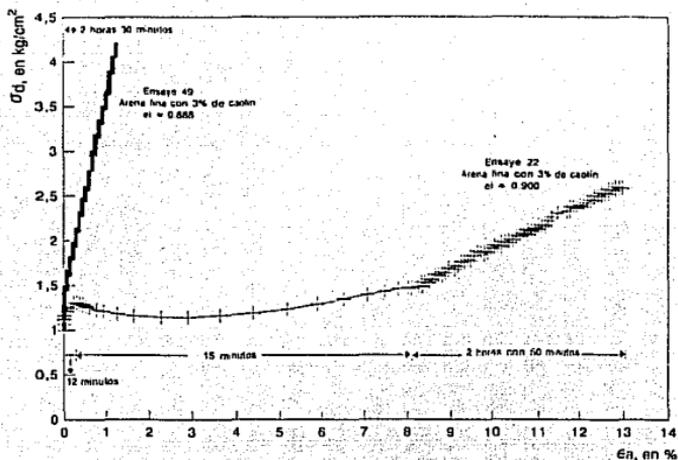


Fig B.21a Comportamiento esfuerzo desviador contra deformación de las probetas densa y suelta, consolidadas anisotrópicamente con $K = 0.62$ y ensayadas en compresión

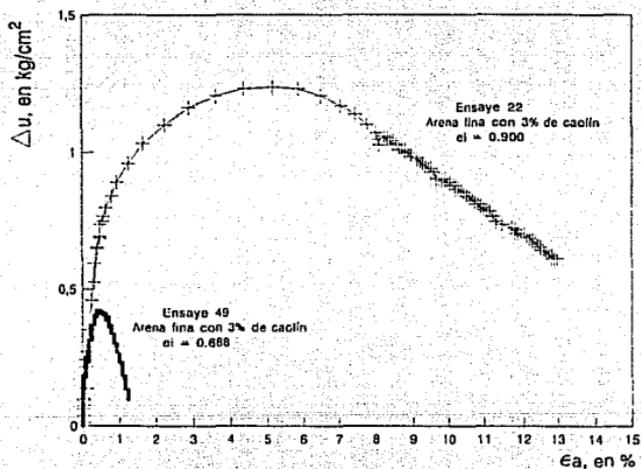


Fig B.21b Comportamiento exceso de presión de poro contra deformación de las probetas densa y suelta, consolidadas anisotrópicamente con $K = 0.62$ y ensayadas en compresión

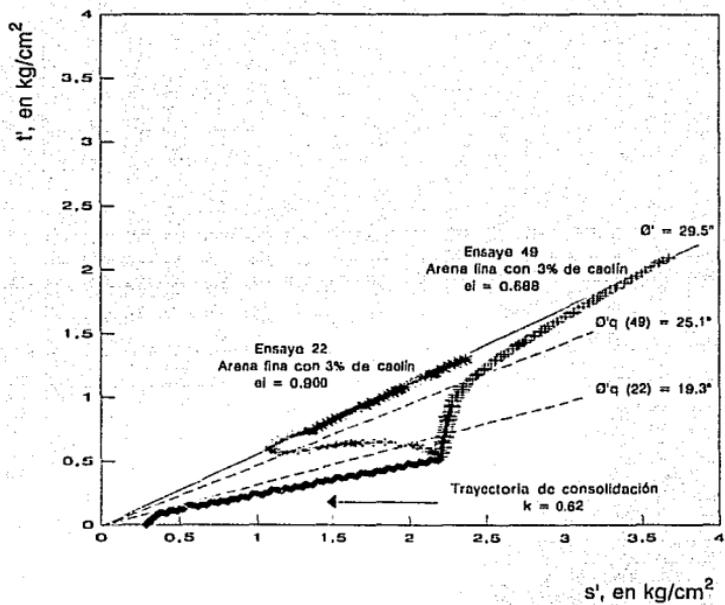


Fig B.21c Trayectoria de esfuerzos efectivos de las probetas densa y suelta, consolidadas anisotrópicamente con $K = 0.62$ y ensayadas en compresión

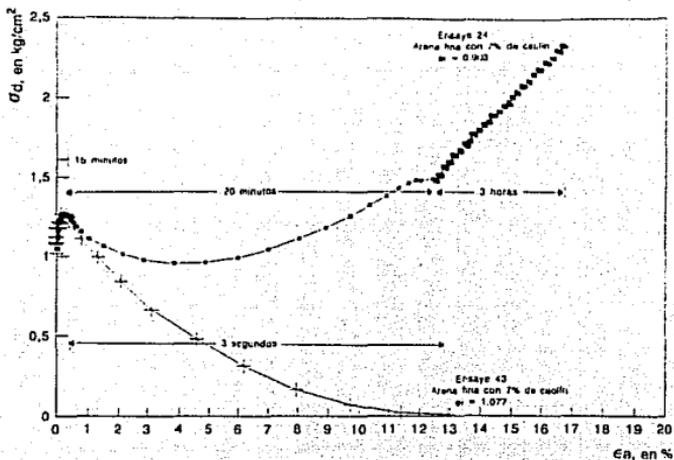


Fig B.22a

Comportamiento esfuerzo desviador contra deformación de las probetas suelta y muy suelta, consolidadas anisotrópicamente con $K = 0.62$ y ensayadas en compresión

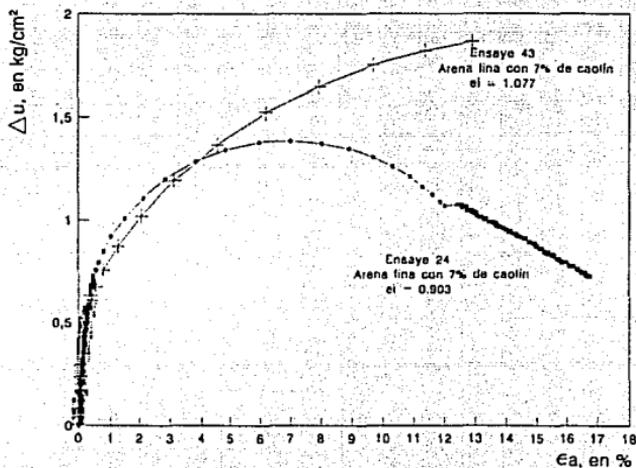


Fig B.22b

Comportamiento exceso de presión de poro contra deformación de las probetas suelta y muy suelta, consolidadas anisotrópicamente con $K = 0.62$ y ensayadas en compresión

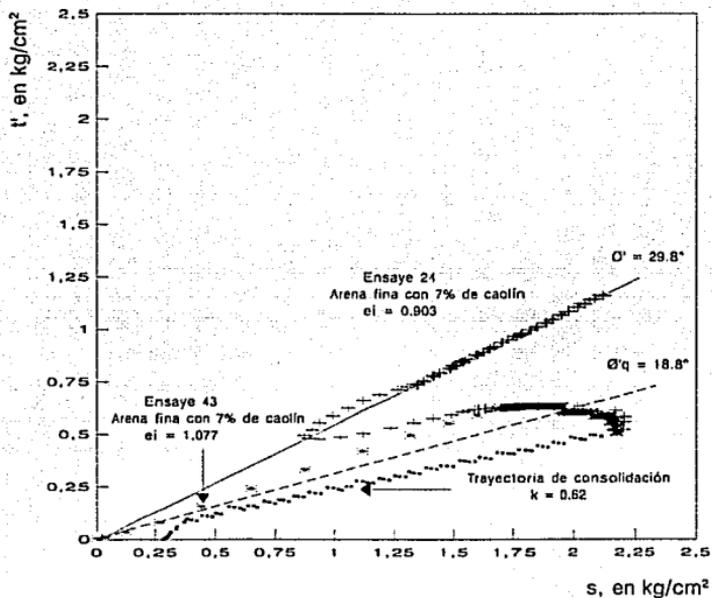


Fig B.22c Trayectoria de esfuerzos efectivos de las probetas suelta y muy suelta, consolidadas anisotrópicamente con $K = 0.62$ y ensayadas en compresión

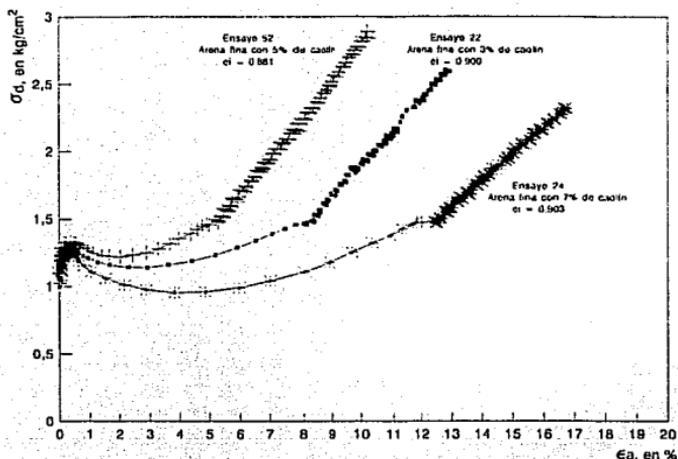


Fig B.23a

Comportamiento esfuerzo desviador contra deformación de probetas con diferente contenido de finos, consolidadas anisotrópicamente con $k=0.62$ ensayadas en compresión

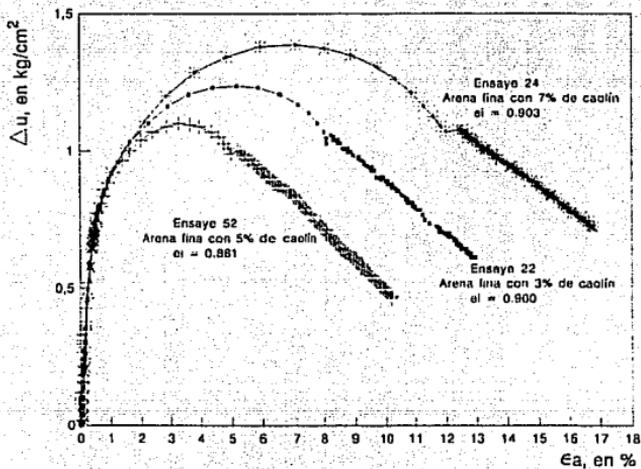


Fig B.23b

Comportamiento exceso de presión de poro contra deformación de probetas con diferente contenido de finos, consolidadas anisotrópicamente con $k=0.62$ ensayadas en compresión

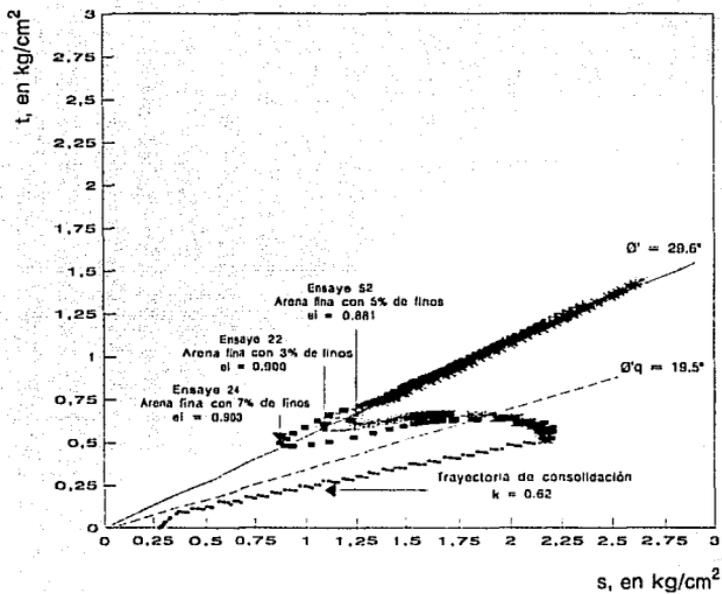


Fig B.23c

Trayectoria de esfuerzos efectivos de probetas con diferente contenido de finos, consolidadas anisotrópicamente con $K = 0.62$ y ensayadas en compresión

FALTA PAGINA

No. 202

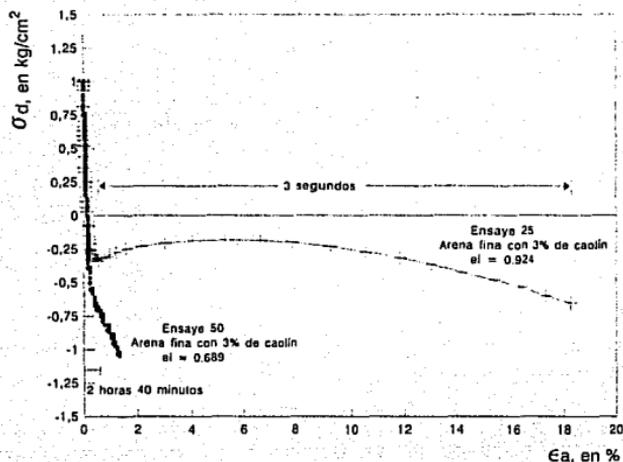


Fig B.24a Comportamiento esfuerzo desviador contra deformación de las probetas densa y suelta, consolidadas anisotrópicamente con $K = 0.62$ y ensayadas en extensión

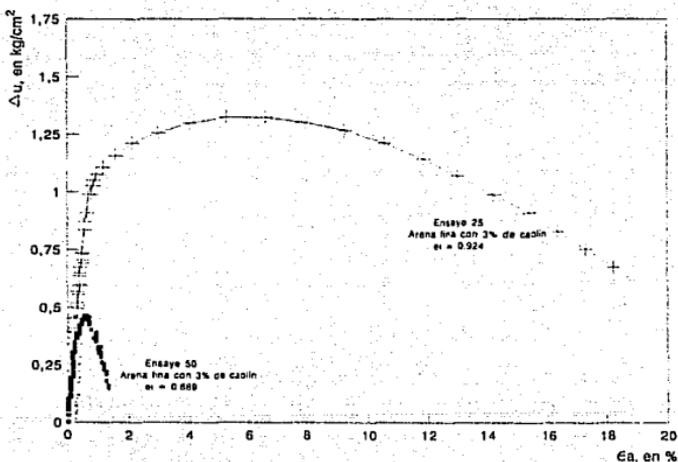


Fig B.24b Comportamiento exceso de presión de poro contra deformación de las probetas densa y suelta, consolidadas anisotrópicamente con $K = 0.62$ y ensayadas en extensión

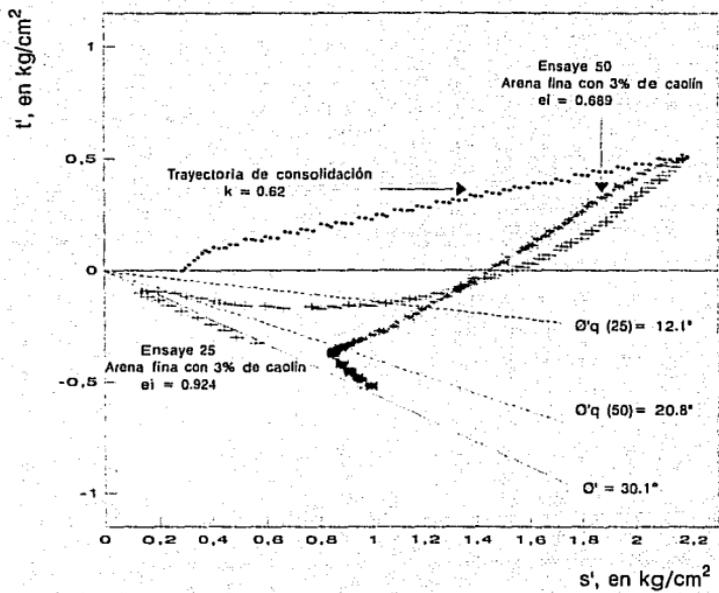


Fig B.24c Trayectoria de esfuerzos efectivos de las probetas densa y suelta, consolidadas anisotrópicamente con $K = 0.62$ y ensayadas en extensión

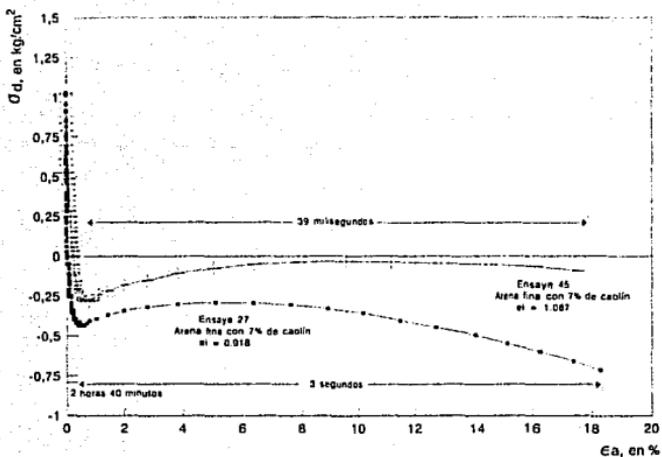


Fig B.25a Comportamiento esfuerzo desviador contra deformación de las probetas suelta y muy suelta, consolidadas anisotrópicamente con $K = 0.62$ y ensayadas en extensión

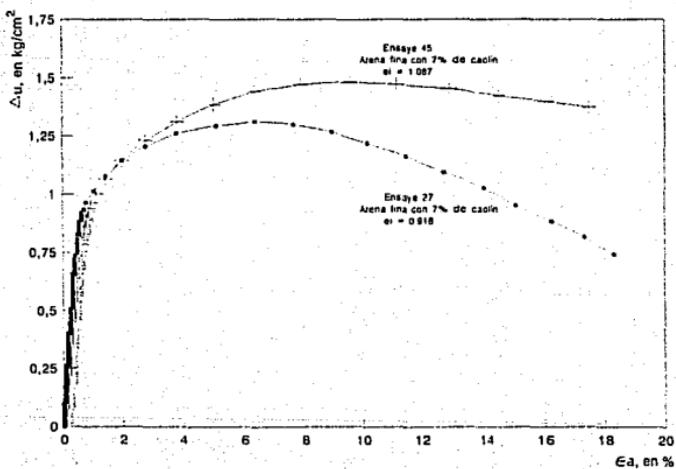


Fig B.25b Comportamiento exceso de presión de poro contra deformación de las probetas suelta y muy suelta, consolidadas anisotrópicamente con $K = 0.62$ y ensayadas en extensión

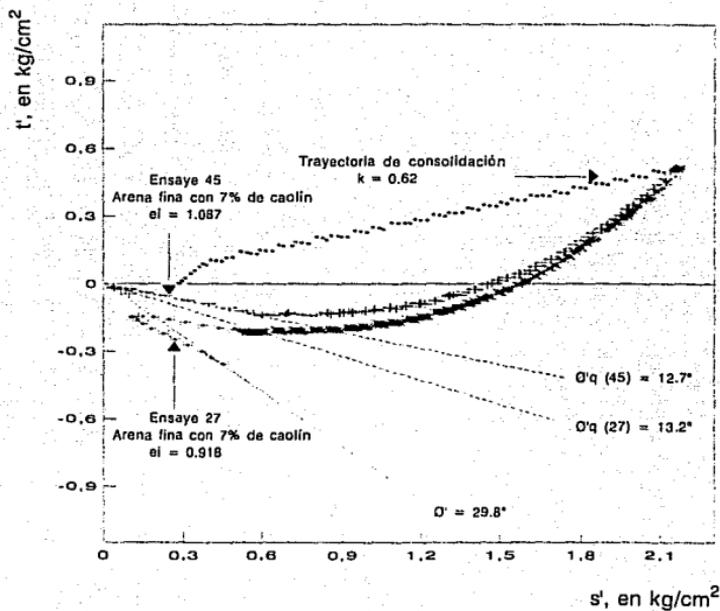


Fig B.25c Trayectoria de esfuerzos efectivos de las probetas suelta y muy suelta, consolidadas anisotrópicamente con $K = 0.62$ y ensayadas en extensión

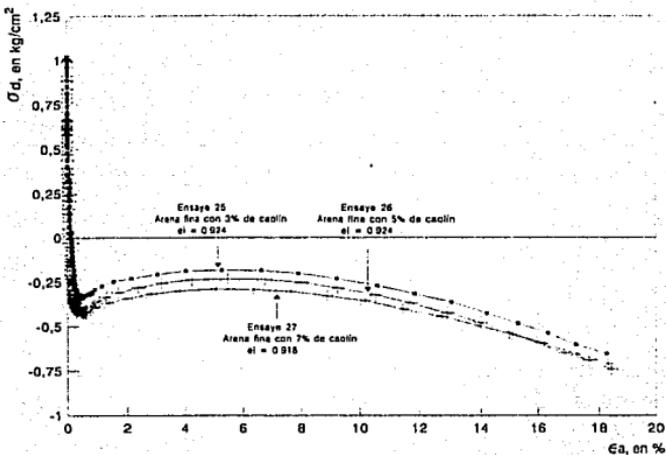


Fig B.26a Comportamiento esfuerzo desviador contra deformación de probetas con diferente contenido de finos, consolidadas anisotrópicamente con $K = 0.62$ y ensayadas en extensión

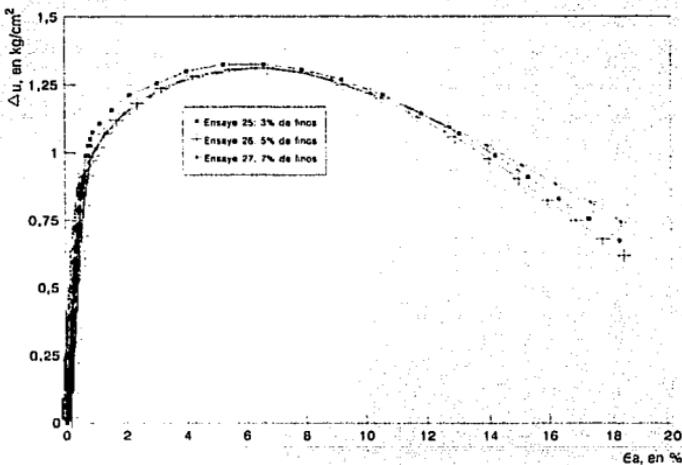


Fig B.26b Comportamiento exceso de presión de poro contra deformación de probetas con diferente contenido de finos, consolidadas anisotrópicamente con $k=0.62$ ensayadas en extensión

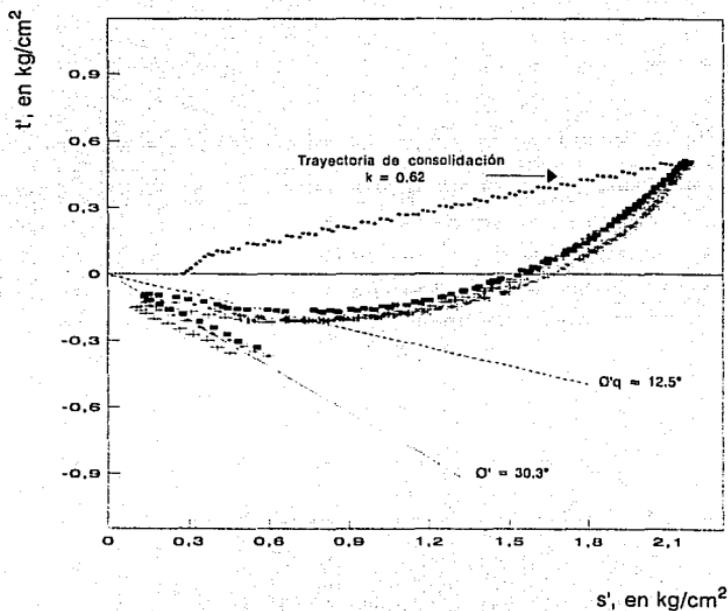
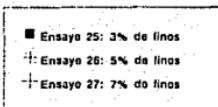


Fig B.26c

Trayectoria de esfuerzos efectivos de probetas con diferente contenido de finos, consolidadas anisotrópicamente con $K = 0.62$ y ensayadas en extensión