

01163

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERIA

lej
1



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA

COMPORTAMIENTO DE ARENAS SATURADAS EN CONDICIONES
DRENADAS Y NO DRENADAS

T E S I S

que presenta

JOSE MARTIN DE JESUS ARGUELLO FAVILLI

para obtener el grado de

MAESTRO EN INGENIERIA

(Mecánica de Suelos)

01163
1982

JURADO

- DR. LEONARDO ZEEVAERT WIECHERS
- ING. JESUS ALBERRO ARAMBURO,
- M en I J. ABRAHAM DIAZ RODRIGUEZ
- DR. EULALIO JUAREZ BADILLO
- M en I VICTOR PORRAS SILVA

[Handwritten signatures and marks over the jury list]

EL COORDINADOR DE LA SECCION

[Handwritten signature]

M. en I. Abraham Díaz Rodríguez

EL SECRETARIO ACADEMICO

[Handwritten signature]

M. en I. Sergio Tirado Ledesma

Cd. Universitaria, D.F., 28 de febrero de 1982

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

C O N T E N I D O

pag.

LISTA DE TABLAS

LISTA DE FIGURAS

NOTACION

1.	INTRODUCCION	
1.1	Objetivos	1
1.2	Estudios Anteriores	2
2.	DESCRIPCION DEL MATERIAL ENSAYADO Y FORMACION DE LOS ESPECIMENES	
2.1	Descripción de la Arena Utilizada	4
2.2	Formación de los Especímenes	5
2.3	Saturación y Consolidación de los Especímenes de Prueba	8
2.4	Aplicación del Esfuerzo Desviador	12
3.	EQUIPO TRIAXIAL	
3.1	Cámara Triaxial	13
3.2	Instrumentación	16
3.3	Calibración de los Aparatos de Medición	17
3.4	Dispositivo de Carga	18
4.	PRUEBAS TRIAXIALES CONSOLIDADAS NO DRENADAS CON MEDICION DE PRESION DE PORO (CU)	
4.1	Condiciones de Prueba	20
4.1.1	Presiones de Consolidación Utilizadas	20
4.1.2	Velocidad de Deformación Utilizada	21
4.2	Cálculos y Correcciones	22
4.3	Comportamiento Esfuerzo-Deformación y Presión de Poro-Deformación	25
4.3.1	Comportamiento de Especímenes Suelos	26

4.3.2	Comportamiento de Especímenes Densos	27
4.3.3	Resumen de las Características Esfuerzo-Deformación	28
4.4	Trayectorias de Esfuerzos Efectivos y Envolvente de Resistencia	28
4.5	Línea $e_{F_{DC}}$	31
4.6	Línea P	32
5.	PRUEBAS TRIAXIALES CONSOLIDADAS DRENADAS (CD)	
5.1	Condiciones de Prueba	33
5.1.1	Presiones de Consolidación Utilizadas	33
5.1.2	Velocidad de Deformación Utilizada	33
5.2	Cálculos y Correcciones	34
5.3	Comportamiento Esfuerzo-Deformación y Relación de Vacíos-Deformación	35
5.3.1	Comportamiento de Especímenes Suelos	35
5.3.2	Comportamiento de Especímenes Densos	36
5.3.3	Resumen de las Características Esfuerzo-Deformación	37
5.4	Trayectorias de Esfuerzos Efectivos y Envolventes de Resistencia	38
5.5	Línea \bar{e}_s	39
5.6	Línea e_s	40
6.	DISCUSION DE LOS RESULTADOS	
6.1	Significado de la Línea $e_{F_{DC}}$	41
6.2	Posición Respectiva de las Líneas e_s y $e_{F_{DC}}$	44
6.3	Influencia de la Velocidad de Aplicación de la Carga en Pruebas CU	44
6.4	Comparación Entre Envolventes de Resistencia	46
6.5	Variación de t_g y t_g	46

7. CONCLUSIONES

8. RECONOCIMIENTOS

9. REFERENCIAS

ANEXO A. TABLAS

ANEXO B. FIGURAS

APENDICE A

LISTA DE TABLAS

Tabla No.

- A1 Características de la Arena de Ottawa para la Granulometría Escogida.
- A2 Presiones Confinantes Utilizadas.
- A3 Resumen de las Pruebas CU.
- A4 Resumen de las Pruebas CD.

LISTA DE FIGURAS

Fig. No.

- B1 Microfotografía de las Partículas de Arena.
- B2 Granulometría de la Arena Utilizada.
- B3 Relación de Vacíos Inicial vs Peso del Pisón de Compactación.
- B4 Sección Transversal de la Cámara Triaxial.
- B5 Sistema de Carga.
- B6 Fotografía de un Espécimen con una Deformación Axial del 10% Durante una Prueba CU.
- B7 Curva de Calibración del Transductor Statham con el Puente Vishay.
- B8 Curva de Calibración del Transductor Precise Sensors con el Puente Vishay.
- B9 Calibración del Anillo de Carga.
- B10 Molde Utilizado en la Fabricación de los Especímenes.
- B11 Corrección del Esfuerzo Desviador por Efecto de la

Membrana

- B12 Esquemas Ilustrativos de la Penetración de la Membrana en la Superficie Lateral de la Muestra.
- B13 Membrana con Látex en el Interior del Espécimen.
- B14 Curvas Esfuerzo-Deformación Axial y Trayectorias de Esfuerzos Típicas de Pruebas CU.
- B15 Línea $e_{F_{DC}}$.
- B16 Línea P.
- B17 Curvas Típicas Esfuerzo-Deformación Axial en Pruebas CD.
- B18 Envoltentes de Resistencia en Pruebas CD.
- B19 Trayectorias de Esfuerzos en Pruebas CD.
- B20 Línea \bar{e}_s .
- B21 Línea e_s .
- B22 Líneas $e_{F_{DC}}$ y P.
- B23 Líneas $e_{F_{CC}}$ y P (Castro).
- B24 Líneas $e_{F_{DC}}$ y e_s .
- B25 Línea $e_{F_{CC}}$ y Puntos Obtenidos con Velocidad de Deformación Controlada.
- B26 Línea $e_{F_{DC}}$ (Casagrande) y $e_{F_{CC}}$ ($S_s=2.65$).
- B27 Línea $e_{F_{DC}}$ (Casagrande) y $e_{F_{CC}}$ ($S_s=2.67$).
- B28 Líneas $e_{F_{DC}}$ y $e_{F_{CC}}$.
- B29 Envoltentes de Resistencia de Pruebas CU y CD.
- B30 Esquema Para la Obtención de un Punto de la Línea e_s .
- B31 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba CU No.12).
- B32 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba CU No.13).

- B33 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba CU No.15).
- B34 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba CU No.17)
- B35 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba CU No.18).
- B36 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba CU No.36).
- B37 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba CU No.1).
- B38 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba CU No.2).
- B39 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba CU No.3).
- B40 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba CU No.6).
- B41 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba CU No.14).
- B42 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba CU No.7).
- B43 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba CU No.8).
- B44 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba CU No.9).
- B45 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba CU No.10).
- B46 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba

- CU No.11).
- B47 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba CU No.23).
- B48 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba CU No.24).
- B49 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba CU No.26).
- B50 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba CU No.27).
- B51 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba CU No.28).
- B52 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba CU No.34).
- B53 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba CU No.29).
- B54 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba CU No.30).
- B55 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba CU No.31).
- B56 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba CU No.32).
- B57 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba CU No.33).
- B58 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba CU No.35).
- B59 Trayectorias de Esfuerzos Efectivos. Pruebas CU, $\bar{\sigma}_c = 0.3 \text{ kg/cm}^2$
- B60 Trayectorias de Esfuerzos Efectivos. Pruebas CU, $\bar{\sigma}_c = 1.0 \text{ kg/cm}^2$

- B61 Trayectorias de Esfuerzos Efectivos. Pruebas CU, $\bar{\sigma}_c = 2.0 \text{ kg/cm}^2$
- B62 Trayectorias de Esfuerzos Efectivos. Pruebas CU, $\bar{\sigma}_c = 4.0 \text{ kg/cm}^2$
- B63 Trayectorias de Esfuerzos Efectivos. Pruebas CU, $\bar{\sigma}_c = 6.0 \text{ kg/cm}^2$
- B64 Curvas Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial y Relación de Vacíos. Pruebas CD, $\bar{\sigma}_c = 0.3 \text{ kg/cm}^2$.
- B65 Curvas Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial y Relación de Vacíos. Pruebas CD, $\bar{\sigma}_c = 1.0 \text{ kg/cm}^2$.
- B66 Curvas Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial y Relación de Vacíos. Pruebas CD, $\bar{\sigma}_c = 2.0 \text{ kg/cm}^2$.
- B67 Curvas Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial y Relación de Vacíos. Pruebas CD, $\bar{\sigma}_c = 4.0 \text{ kg/cm}^2$.
- B68 Curvas Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial y Relación de Vacíos. Pruebas CD, $\bar{\sigma}_c = 6.0 \text{ kg/cm}^2$.
- A1 Dispositivo Experimental para la Obtención de la Relación de Vacíos Máxima.
- A2 Dispositivo Experimental para la Obtención de la Relación de Vacíos Mínima.

NOTACION

- A Coeficiente de presión de poro de Skempton, definido como el cociente de presión de poro generada entre el esfuerzo desviador durante una prueba CU.
- A_c Area de la sección recta de la muestra consolidada.
- A_i Area de la sección recta de la muestra en cualquier instante de la prueba.
- B Coeficiente de presión de poro de Skempton, definido como el cociente de presión de poro generada por un incremento en la presión de cámara entre la presión de cámara.
- C_u Coeficiente de uniformidad = D_{10}/D_{60} .
- CU Prueba consolidada no drenada.
- CD Prueba consolidada drenada.
- D Diámetro del espécimen al comienzo de la aplicación del esfuerzo desviador.
- D_r Densidad relativa = $\frac{e_{m\acute{a}x} - e}{e_{m\acute{a}x} - e_{m\acute{i}n}}$ x 100, %.
- D_{ri} Densidad relativa inicial (después de formado el espécimen).
- D_{rc} Densidad relativa de un espécimen después de ser consolidado.
- D_{10} Tamaño efectivo = tamaño del grano, tal que el 10% en peso sea igual o menor.
- D_{60} Tamaño del grano, tal que el 60% en peso sea igual o menor.
- e Relación de vacíos.

e_i	Relación de vacíos recién formado el espécimen de prueba.
e_c	Relación de vacíos de un espécimen después de ser consolidado.
$e_{m\acute{a}x}$	Relación de vacíos máxima.
$e_{m\acute{i}n}$	Relación de vacíos mínima.
$e_{l\acute{i}m}$	Relación de vacíos obtenida de pruebas CD para la condición de deformación a resistencia y volumen constante.
e_n	Relación de vacíos obtenida de pruebas CD con una $e_c \approx e_{l\acute{i}m}$, en el primer paso por la condición de cero velocidad de variación volumétrica, $\dot{\epsilon}_v = 0$.
Línea e_{FDC}	Línea e_F obtenida en esta tesis con velocidad de deformación controlada.
Línea e_{FCC}	Línea e_F obtenida por Castro con carga controlada (3).
Línea e_{FDC} (Casagrande)	Línea e_F Presentada por Casagrande ref.(4)
Línea P	Línea P obtenida en este trabajo.
Línea P (Castro)	Línea P obtenida por castro (3).
M	Módulo de elasticidad de la membrana de hule por unidad de ancho = 0.27 kg/cm^2 .
S_s	Gravedad específica de los granos.
t_{95}	Tiempo de prueba necesario para alcanzar el 95% de homogenización de la presión de poro.
t_{100}	Tiempo necesario para alcanzar un grado de saturación del 100%.
u	Presión de poro.
u_d	Exceso de presión de poro o presión de poro generada

	durante la etapa de falla, kg/cm^2 .
$u_{dm\acute{a}x}$	Presi3n de poro máxima generada durante la etapa de falla, kg/cm^2 .
V_m	Volumen del molde, cm^3 .
W_s	Peso del suelo contenido en el molde, gr.
ϵ_z	Deformaci3n axial, %.
ϵ_v	Deformaci3n volumétrica, %.
$\dot{\epsilon}_v$	Velocidad de deformaci3n volumétrica, %/hr.
ψ	Angulo de fricci3n interparticular, grados.
ϕ	Angulo de fricci3n interna, grados.
$\phi_{u_{dm\acute{a}x}}$	Angulo de fricci3n interna calculado donde u_d es máxima durante una prueba, grados.
$\phi(\bar{\sigma}_1/\bar{\sigma}_3)_{m\acute{a}x}$	Angulo de fricci3n interna calculado cuando la relaci3n de esfuerzos efectivos principales es máxima durante una prueba, grados.
$\phi(\sigma_1 - \sigma_3)_{m\acute{a}x}$	Angulo de fricci3n interna calculado para la condici3n de esfuerzo desviador máximo, grados.
ν	Relaci3n de Poisson.
$\bar{\sigma}$	Esfuerzo normal efectivo, kg/cm^2 .
$\bar{\sigma}_c$	Presi3n confinante efectiva de consolidaci3n aplicada en la cámara triaxial durante la etapa de consolidaci3n, kg/cm^2 .
$\bar{\sigma}_1$	Esfuerzo principal mayor efectivo, kg/cm^2 .
$\bar{\sigma}_3$	Esfuerzo principal menor efectivo, kg/cm^2 .
$\bar{\sigma}_{3m\acute{i}n}$	Esfuerzo principal menor efectivo mínimo durante una prueba ($\bar{\sigma}_c - u_{dm\acute{a}x}$), kg/cm^2 .

σ_d	Esfuerzo desviador, kg/cm ² .
$(\sigma_1 - \sigma_3)$	Esfuerzo desviador, kg/cm ² .
$(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{máx}}$	Esfuerzo desviador máximo, kg/cm ² .
$(\bar{\sigma}_1 / \bar{\sigma}_3)$	Relación de esfuerzos principales efectivos.
$(\bar{\sigma}_1 / \bar{\sigma}_3)_{\text{máx}}$	Relación máxima de esfuerzos principales efectivos.
τ	Esfuerzo cortante, kg/cm ² .
$\Delta\sigma_d$	Corrección en el esfuerzo desviador por efecto de la membrana.

1. INTRODUCCION

1.1 Objetivos

Las investigaciones aquí reportadas se abocan al estudio del comportamiento de las arenas saturadas en condiciones drenadas y no drenadas, al variar la relación de vacíos (o densidad relativa) y la presión de consolidación.

Se pretende observar el comportamiento de la estructura de la arena durante toda la prueba, sin interferencia del sistema de carga sometiendo la muestra a una velocidad de deformación axial constante (deformación controlada); con la carga así aplicada el espécimen toma solamente la que su estructura pueda soportar en cualquier etapa de la prueba. Asimismo se desea ver la influencia de la velocidad de aplicación de la carga en dicho comportamiento (con velocidades de deformación diferentes).

Dentro del comportamiento de la arena las principales características por estudiar son:

1) Resistencia. Se determinarán las trayectorias de esfuerzos efectivos, las envolventes de resistencia del material y su comportamiento esfuerzo deformación en condiciones drenadas y no drenadas.

2) Compresibilidad.

2.1) Generación de presión de poro. Se analizará su variación con la deformación y su magnitud máxima en función de la relación de vacíos al inicio de la etapa de falla, e_c .

2.2) Cambios de volumen. Se estudia el efecto de dilatación o contracción en el comportamiento esfuerzo-deformación de la arena; se establecen puntos de comparación entre las pruebas drenadas y no drenadas en base a sus condiciones de variación de volumen. En pruebas drenadas se confirma la existencia de un valor de la relación de vacíos en la cual el material se deforma a volumen constante y resistencia constante y su posible variación con la presión de consolidación.

Se pretende con este estudio mejorar el entendimiento del fenómeno conocido como "Licuación de Arenas" .

Finalmente se hacen comparaciones con trabajos realizados por varios autores en lo que al tema se refiere.

1.2 Estudios Anteriores

Pocas son las investigaciones a fondo acerca del comporta-

miento estático de arenas a bajas presiones de consolidación en condiciones drenadas y no drenadas, entre éstas podemos mencionar la realizada por Bjerrum et al (1), Seed y Lee (2), Castro (3), Casagrande (4), entre otras.

Actualmente este tipo de investigaciones, en suelos granulares, se ha visto desplazada por pruebas bajo condiciones de carga cíclica, que han tomado auge desde la década pasada.

Particular atención se dá a la investigación llevada a cabo por Castro (3), ya que los resultados por él obtenidos son comparados con los de este trabajo.

2. DESCRIPCION DEL MATERIAL ENSAYADO Y FORMACION DE LOS ESPECIMENES

2.1 Descripción de la Arena Utilizada

El material utilizado para las pruebas fue arena sílica, conocida con el nombre comercial "Ottawa Sand C-109" y vendida por la Ottawa Sílica Co., Ottawa Illinois; es manufacturada por la St. Peter Sandstone por cribado y lavado. Se trata de una arena de cuarzo, uniforme y limpia, con granos subredondeados a subangulosos. Se muestra en la fig.B1 una microfotografía de las partículas de arena.

La granulometría elegida (por cribado selectivo de la arena C-109) se presenta en la fig.B2, y es la misma que la utilizada por Castro (3). Todo el material pasa por la malla No.40 (0.420 mm) y se retiene en la No.200 (0.074 mm). En la tabla A1 se precisan las principales características del material.

La determinación de la relación de vacíos máxima y mínima se describe en forma detallada en el apéndice A. La relación de vacíos máxima obtenida ($e_{\text{máx}}$) fue de 0.75 y la mínima ($e_{\text{mín}}$) de 0.61 .

La gravedad específica de los granos es de 2.67 . En las referencias (3) y (5), trabajando ambos con la misma arena sílica, "Banding Sand", se reportan gravedades específicas de 2.65 y 2.67 respectivamente; lo anterior conduce a que existirán discrepancias en los valores que estén en función de dicha propiedad, en la referencia (3), con los desarrollados en este trabajo, ($e_{\text{máx}}$, $e_{\text{mín}}$, etc). El suelo utilizado en esta tesis y el probado en las referencias mencionadas anteriormente, presentan la misma granulometría y forma de granos; además provienen ambos del mismo préstamo por lo que los resultados de las pruebas deben ser comparables.

2.2 Formación de los Especímenes

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

Es necesario hacer notar que el procedimiento de formación de los especímenes influye en el comportamiento del material; esto se debe a que la estructura obtenida con los diferentes métodos de formación, para una misma relación de vacíos, no es

la misma; varios autores como Ladd (6) y Mulilis et al (7) han estudiado el efecto de preparación de la muestra en el comportamiento de arenas bajo carga cíclica.

a) formación en estado húmedo

La arena fue compactada dentro de una membrana delgada de látex, soportada por un molde partido de 3.64 cm de diámetro interior y 8.60 cm de altura, fig.B10. La membrana se mantiene adherida al molde aplicando vacío por el tubo dispuesto para este efecto.

La arena, previamente secada al horno (fría), fue mezclada con el 4% en peso de agua destilada; este contenido de agua mejora la liga entre partículas de arena y reduce substancialmente su 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 12 veces sobre la superficie de cada una de las 10 capas con que fue formado el espécimen. El peso en el apisonador fue variable entre 0.10 y 0.55 kg dependiendo de la compacidad buscada; en la fig.B3 se muestra la gráfica de la relación de vacíos inicial contra el peso del apisonador. Durante el proceso de compactación se redujo la evaporación del contenido de agua inicial colocando una franela húmeda sobre las taras que contenían el material de cada capa; la variación fue menor del 1%.

Una vez formado el espécimen se coloca la cabeza superior y se

desdobra la membrana alrededor de ésta, la cual se sella contra la tapa por medio de dos o-ring; para la cabeza inferior se siguió el mismo procedimiento.

Realizada la operación anterior se aplica vacío, por medio de una bomba de vacío, a través del drenaje superior en el interior del espécimen, estando la válvula del drenaje inferior cerrada; luego se retira el molde. El vacío aplicado varió entre 0.1 y 0.3 kg/cm², dependiendo de la presión de consolidación utilizada en la prueba, $\bar{\sigma}_c$; nunca el vacío más la presión de cámara antes de la saturación, fueron superiores a $\bar{\sigma}_c$. Luego se procede a tomar las dimensiones de la muestra; el diámetro se tomó a diferentes alturas del espécimen (superior, medio, e inferior) y la altura fue la del molde. De las medidas anteriores se determinó, haciendo la corrección del volumen de la membrana, el volumen inicial del espécimen. El peso seco unitario, y la relación de vacíos inicial, e_i , fueron calculados a partir del peso seco conocido de arena usada para la formación del espécimen. Estas cantidades fueron utilizadas como referencias básicas para la determinación de cualquier cambio subsecuente en la relación de vacíos.

b) formación en estado seco

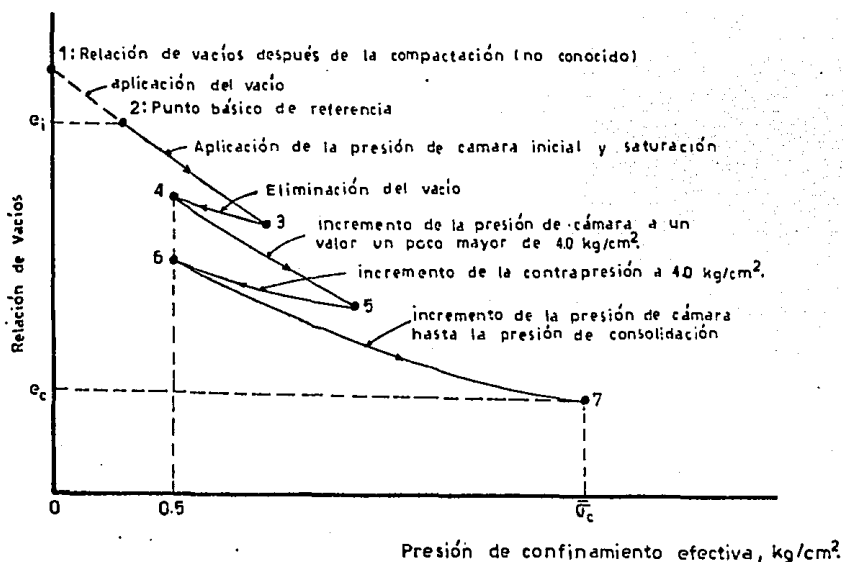
En el recipiente, formado por la membrana y el molde, se vierte arena seca en tres capas; sobre cada capa se coloca un cilindro de 3.44 cm de diámetro y 6.41 cm de altura, con un peso de 440 gr; se vibra cada una de las capas a través del molde

durante dos minutos con un vibrador manual; los pasos restantes son los mismos que los del procedimiento anterior. Este procedimiento fue el utilizado en la fabricación de especímenes densos.

2.3 Saturación y Consolidación de los Especímenes de Prueba

Terminada la formación del espécimen, se arma el aparato triaxial y se llena la cámara de agua. Se dá una presión de cámara que varía dependiendo de la presión de consolidación, $\bar{\sigma}_c$; esta presión de cámara es de 0.5 kg/cm^2 para $\bar{\sigma}_c \geq 1.0 \text{ kg/cm}^2$ y de 0.1 kg/cm^2 para $\bar{\sigma}_c < 1.0 \text{ kg/cm}^2$, mientras se mantiene la válvula del drenaje inferior cerrada; por el drenaje superior se está aplicando vacío en el interior del espécimen. Se abre lentamente la válvula del drenaje inferior, que se encuentra conectada a una bureta que contiene agua desaerada y se deja que el agua fluya dentro del espécimen con un gasto de $0.5 \text{ cm}^3/\text{min}$ en dirección ascendente, hasta que el agua salga por el drenaje superior; se cierran las válvulas del drenaje superior e inferior y se suprime el vacío, para luego conectar el drenaje superior a la bureta. Se incrementa la presión de cámara a un valor un poco mayor que 4.0 kg/cm^2 y se dá una contrapresión a través de la bureta de 4.0 kg/cm^2 para asegurar la saturación; el espécimen se deja en este estado de 16 a 20 horas con todas las válvulas de drenaje abiertas; finalmente la presión de cámara fue incrementada hasta la presión de consolidación efectiva de la prueba, $\bar{\sigma}_c$.

Los pasos descritos en el párrafo anterior causaron cambios en el volumen inicial del espécimen medido después de la aplicación del vacío. Esos cambios de volumen se muestran en el siguiente esquema y son explicados en los siguientes párrafos.



a) El efecto combinado de la presión de cámara inicial y del flujo de agua del espécimen, la eliminación del vacío, el incremento de la presión de cámara inicial a un valor mayor que 4.0 kg/cm^2 y el incremento de la contrapresión a 4.0 kg/cm^2 , fue determinado indirectamente midiendo el cambio de altura del espécimen durante estas etapas, y suponiendo que las deformaciones laterales fueron iguales a las deformaciones axiales. La aplicación de la presión de cámara causó un

cambio de volumen, mientras el contenido de agua del espécimen era aproximadamente del 4%, luego se hizo fluir agua dentro del espécimen originando un leve decremento de volumen, debido a la destrucción de los meniscos entre los granos; el efecto de estas dos acciones hizo que el volumen decreciera de 2 a 3. La eliminación del vacío debería haber causado un incremento en el volumen, este cambio no se registró debido a la fricción del sistema de carga en sentido contrario a la aplicación del esfuerzo desviador, puntos 3 a 4 del esquema. Una vez quitado el vacío la presión de cámara efectiva (hidrostática) pasó a ser la presión de cámara inicial de 0.5 kg/cm^2 , punto 4. A continuación se incrementó la presión de cámara inicial a una presión un poco superior a 4.0 kg/cm^2 causando un decremento de volumen en el espécimen, puntos 4 a 5; finalmente se aumentó la contrapresión a 4.0 kg/cm^2 esto originó que la presión efectiva de cámara fuera reducida y por lo tanto tomó lugar un aumento de volumen, puntos 5 a 6, que por la misma razón mencionada en el paso de 3 a 4 no se pudo cuantificar. La variación de la relación de vacíos de las muestras muy sueltas fue importante durante los pasos mencionados en este párrafo.

b) El decremento de volumen causado por el incremento de la presión de cámara a la presión de consolidación, fue medida directamente en una bureta conectada al interior del espécimen completamente saturado, puntos de 6 a 7 en el esquema ilustrativo. Finalmente, la relación de vacíos consolidada, e_c , del espécimen bajo la presión de consolidación fue calculada. La

relación de vacíos e_c , es la relación de vacíos de la etapa de falla; a partir de ésta se calculán los cambios volumétricos en las pruebas CD.

c) El grado de saturación del espécimen fue valorado determinando el coeficiente de presión de poro B de Skempton. Antes de la consolidación del espécimen y con el drenaje cerrado se incrementa la presión de cámara y se mide el valor de la presión de poro alcanzado (en el registro del puente). El cociente de la presión de poro entre el incremento de presión de cámara define el coeficiente B; de no ser éste mayor que 0.95 la prueba fue rechazada, referencia (8), por considerar incompleta la saturación.

Para evitar confusiones en lo que sigue, la denominada presión de poro se entiende como exceso de presión de poro o sea, la presión total en el agua intersticial menos la contrapresión. En todas la pruebas CU y CD se aplica contrapresión (de 4.0 kg/cm^2 , menos en las de 0.3 kg/cm^2).

Cuando se trabaja con presiones de consolidación, $\bar{\sigma}_c$, bajas (0.3 kg/cm^2), la medición del coeficiente B se hizo aumentando la presión de cámara a un valor superior al de la presión de consolidación, se mide el coeficiente B como se mencionó anteriormente, y luego se incrementa la contrapresión hasta un valor tal que la diferencia entre presión de cámara y la contrapresión sea igual al de la presión de consolidación deseada.

Un valor del coeficiente B de Skempton menor que 1, implica que el sistema cerrado constituido por las conexiones y la propia muestra con sus posibles burbujas de aire etc. no está saturado.

Verificada la saturación del espécimen, se inicia la etapa de consolidación simplemente abriendo las válvulas del drenaje que comunican con la bureta. El cambio de volumen se determina como se indicó en el párrafo b de este inciso.

2.4 Aplicación del Esfuerzo Desviador

Al finalizar la etapa de consolidación se cierran las válvulas del drenaje para registrar la presión de poro generada en pruebas consolidadas no drenadas (CU); en pruebas consolidadas drenadas (CD) se dejaron abiertas para poder registrar los cambios de volumen durante la prueba. El esfuerzo desviador fue dado aplicando una velocidad de deformación vertical constante, del 2% de la altura de la muestra por hora.

3. EQUIPO TRIAXIAL

3.1 Cámara Triaxial

El aparato consiste esencialmente de la cámara triaxial y del sistema de carga; éste último se describirá más detalladamente en el inciso 3.4 de este capítulo. Una de las cámaras triaxiales en existencia en el laboratorio de mecánica de suelos del Instituto de Ingeniería de la UNAM, fue modificada en su sistema de carga para poder trabajar con arenas sueltas a presiones de consolidación hasta de 6.0 kg/cm^2 , y con arenas densas a presiones menores. Este aparato fue diseñado originalmente para trabajar con suelos blandos y arenas sueltas a bajas presiones de consolidación,(11). El tamaño de los especímenes de prueba es de 3.60 cm de diámetro y 8.60 cm de altura. Una sección transversal de la cámara triaxial se muestra en la fig.B4.

Las bases en contacto con los extremos del espécimen son lubri-

cadadas del tipo desarrollado por Rowe y Barden, (12). La base superior e inferior tienen las mismas dimensiones y se encuentran lubricadas con pasta de silicón tipo ligera P-8, fabricada por Siligal, SA, México D.F. Una ampliación de la base inferior se presenta en la fig. B4 detalle A.

El drenaje de la probeta se efectúa por las bases superior e inferior como se mencionó en el inciso anterior y se muestra en la fig. B5, también se presenta esquemáticamente la conexión de la cabeza superior a la bureta, mediante un tubo de acero inoxidable de 0.06 cm y 0.22 cm de diámetro interior y exterior, y una válvula de desplazamiento nulo.

Una bureta recolecta el agua drenada por la base inferior, mediante un tubo de cobre de 1/8 de pulgada de diámetro y 30 cm de longitud. La precisión de la bureta es de 0.05 cm^3 ; está unida en su parte superior a una línea que contiene, en el extremo contiguo a la bureta, aceite de silicón de 0.5 cp de viscosidad y 15.9 dinas/cm de tensión superficial. En el extremo opuesto de la línea está unido a un depósito parcialmente lleno de agua con vacío aplicado permanentemente. Las variaciones de volumen de la muestra se miden observando el desplazamiento en la bureta en la interfase agua-aceite. La introducción del aceite en la línea tiene como objeto evitar la evaporación del agua drenada y la disolución de aire en el líquido intersticial de la muestra.

La presión de poro fue medida con dos transductores , éstos se describirán con más detalle en el siguiente inciso (3.2). La flexibilidad del sistema para medir la presión de poro varía con el intervalo de presión medida; así, para presiones de poro menores de 0.5 kg/cm^2 , resulta de $5 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{kg/cm}^2$ y para otras todavía mayores, es de $2.5 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{kg/cm}^2$. Las válvulas de desplazamiento nulo que se utilizaron son Whitey y las conexiones Swagelok.

Se utilizaron dos camisas confinantes; una de lucita para presiones confinantes menores de 6.0 kg/cm^2 y otra de aluminio para presiones mayores.

Las membranas utilizadas fueron de 0.035 cm de espesor, fabricadas por la Wykeham-Farrance en Inglaterra.

Las pruebas se realizaron en un cuarto con temperatura controlada de 20 ± 1 grados centígrados.

A la hora de aplicar una velocidad de deformación constante, las bases lubricadas permiten que los especímenes desarrollen deformaciones laterales bastante uniforme en toda su altura.

Cuando se utilizan bases del tipo convencional, los especímenes generalmente desarrollan una forma de barril cuando son comprimidos axialmente, excepto cuando se forman planos de corte. Quizás el resultado menos deseable de este efecto de de-

formación durante una prueba CU, es que la presión de poro migra dentro del espécimen cuando deformaciones no uniformes inducen diferentes tendencias de cambio de volumen. El estado de esfuerzo, por compatibilidad con las deformaciones del espécimen, es también no uniforme debido a la restricción al desplazamiento lateral que imponen las bases no lubricadas en sus zonas cercanas al espécimen, originando una especie de confinamiento. Como resultado de lo anterior, ocurren serios cambios en la relación de vacíos en diferentes partes de la muestra aunados a una distribución no uniforme del exceso de presión de poro, la muestra no cambia desde luego de volumen sino que se presentan redistribuciones del contenido de agua dentro de ella (13). Con el uso de bases lubricadas no ocurren estas redistribuciones del contenido de agua cuando el espécimen ha sido sometido a una deformación axial un poco mayor del 10% (3); en la fig. B6 se presenta una fotografía de un espécimen con una deformación superior al 10% y se observa que el efecto de abarrilamiento no es muy notorio.

3.2 Instrumentación

La presión de poro en el espécimen se mide con dos transductores de presión, dependiendo de la presión confinante utilizada; para presiones menores de 6.0 kg/cm^2 se utilizó un transductor fabricado por la Statham Instruments, Inc; modelo PG10a-100-350, de tipo no cementado y compensado para cambios de temperatura; el rango de trabajo va de 0 a 100 psig (0 a 7 kg/cm^2). Para presiones mayores de 6.0 kg/cm^2 se utilizó uno fabricado

por la Precise Sensors, Inc; modelo 111-2; la presión de trabajo de éste varía entre 0 y 200 psig (0 a 14 kg/cm²). Antes de la prueba, el transductor utilizado (Statham o Precise Sensors) era conectado a un puente fabricado por la Vishay Instruments, Inc, dotado con una celda de calibración y ajuste de cero. Este sistema de medición se conecta 30 min antes del inicio de cada prueba.

Se utilizó un anillo de carga para la medición del esfuerzo desviador aplicado a través de la base del drenaje superior; dicho anillo tiene adaptado un micrómetro, fabricado por la B. C AMES Co., Waltham, Mass; con una precisión de 0.001 mm, que registra las deformaciones del anillo durante la prueba. La capacidad del anillo de carga es de 250 kg.

Los desplazamientos del espécimen fueron registrados en un micrómetro, fabricado por la Mitutoyo, con una precisión de 0.01 mm en la lectura.

3.3 Calibración de los Aparatos de Medición

Para la medición de la presión de poro es necesario calibrar cada uno de los transductores con el puente utilizado durante la prueba. La calibración se hace comparando las lecturas del transductor con las de un manómetro de mercurio, en un intervalo de presiones de 0 a 6 kg/cm² y en incrementos de 0.5 kg/cm²; dichas curvas se muestran en las figuras B7 y B8. La calibración se hizo alimentando el puente con corriente alterna

asi como con corriente directa.

El esfuerzo desviador se determina por las deformaciones que sufre el anillo de carga, cuando se le aplica una fuerza. Los desplazamientos del anillo son registrados en un micrómetro adaptado para este fin, y descrito en el inciso anterior. La calibración fue realizada colocando pesos conocidos y leyendo el número de unidades desplazadas en el micrómetro por cada peso colocado; con los datos anteriores se hizo una curva de calibración de carga aplicada vs deformación del anillo, dicha curva se muestra en la fig. B9.

3.4 Dispositivo de Carga

El dispositivo de carga consiste de una placa central a la cual concurren seis alambres periféricos. Tres de los alambres de la placa central se unen a una placa inferior, ésta se encuentra conectada a un colgador que es donde se coloca el peso que se va a aplicar al espécimen; los otros alambres concurren a una placa superior la cual se conecta a una cadena y un colgador que lleva un contrapeso y se apoya en la placa de una máquina de desplazamiento controlado (Wykeham-Farrance) con un desplazamiento mínimo de 0.00062 mm/min. La placa central se encuentra conectada a la base superior y ésta a su vez transmite la carga al espécimen. El sistema de carga se muestra en la fig. B 6.

Al inicio de la prueba, por efecto de la deformación del sis-

tema de carga, se produce un retardo en la deformación de la muestra. Sin embargo, después del 1% de deformación, las velocidades de desplazamiento de la máquina y del espécimen son iguales.

4. PRUEBAS TRIAXIALES CONSOLIDADAS NO DRENADAS CON MEDICION DE PRESION DE PORO (CU)

4.1 Condiciones de Prueba

4.1.1 Presiones de Consolidación Utilizadas

Para observar el comportamiento de las arenas saturadas en condiciones no drenadas y en pruebas de compresión triaxial, se varió la presión de consolidación del espécimen, σ_c .

Las presiones de consolidación utilizadas para las pruebas se anotan en la tabla A2.

No se pudo trabajar con presiones de consolidación mayores de 6.0 kg/cm^2 por la capacidad del equipo, pero actualmente se está elaborando un programa de seis pruebas a presiones mayores, para así poder observar el comportamiento del material en un intervalo de presiones más amplio.

4.1.2 Velocidades de Deformación Utilizadas

La velocidad de deformación axial utilizada para las pruebas fue del 2% por hora, excepto para una prueba que se realizó con 1% con el objeto de comparar el efecto de la velocidad de aplicación de la deformación axial en el comportamiento del material; esta comparación se hace en el capítulo 6.

Al utilizar una velocidad de deformación pequeña se garantiza que al finalizar la prueba, el grado de uniformización de la presión de poro dentro del espécimen es del 95% o mayor, en otras palabras, la máxima diferencia de presión de poro dentro del espécimen es del 5% o menor. En la ref. (14) Bishop y Gibson llegan a que el tiempo necesario para alcanzar el 95% de homogenización de la presión de poro, es función del tiempo de consolidación del espécimen y establecen la relación:

$$t_{95} = 2.12 t_{100}$$

donde: t_{95} tiempo de prueba necesario para alcanzar el 95% de homogenización de la presión de poro.

t_{100} tiempo necesario para alcanzar un grado de consolidación de 100%.

El t_{100} de las pruebas fue de 1 hora, por lo tanto el t_{95} , según la expresión anterior, es de 2.12 horas; a las muestras con t_{100} menor les corresponde un t_{95} menor. En este trabajo la

duración de las pruebas fue de aproximadamente 8 horas, lo que conduce a que el grado de homogenización fue siempre superior al 95%. Es necesario garantizar un alto grado de homogenización, pues la medición de la presión de poro se efectúa en la base.

4.2 Cálculos y Correcciones

El cálculo del esfuerzo desviador, durante la aplicación de la velocidad de deformación constante, estuvo basado en una área corregida de acuerdo con la fórmula:

$$A_i = \frac{A_c}{1 - \epsilon_z}$$

donde: A_c área de la sección recta de la muestra consolidada.

A_i área de la sección recta de la muestra en cualquier instante de la prueba.

ϵ_z deformación axial (la deformación de compresión es positiva).

La fórmula anterior es válida únicamente para pruebas a volumen constante, en las que además las deformaciones laterales y axiales son uniformes.

Una corrección en el esfuerzo desviador, debido al efecto de la membrana fue introducida por Henkel y Gilbert (15). La co-

corrección se basa en la suposición de que la membrana de hule y el espécimen de prueba se deforman en conjunto; la membrana actúa como un cascarón que confina al material, dándole al espécimen una resistencia mayor. Esta corrección supone también que el espécimen mantiene su forma cilíndrica, condición que se cumple aproximadamente durante las pruebas (fig.B6). En tales condiciones se resta del esfuerzo desviador calculado el término:

$$\Delta\sigma_d = \frac{4M\epsilon_z(1-\epsilon_z)}{D}$$

donde: D diámetro del espécimen al comienzo de la aplicación del esfuerzo desviador.

M módulo de elasticidad de la membrana de hule por unidad de ancho.

ϵ_z deformación axial.

Un módulo de elasticidad M de 0.27 kg/cm² fue usado en este trabajo (15).

La expresión anterior se encuentra graficada en la fig.B11; ahí se puede apreciar la magnitud de la corrección en función de la deformación axial.

Se investigó la influencia de la penetración de la membrana dentro de espécimen. En efecto, cuando se forma la muestra la

membrana permanece sin deformarse, fig.B12 (a), luego se aplica una presión de consolidación al espécimen y se permite el drenaje, la membrana se deforma y penetra dentro de los huecos interparticulares en la superficie lateral de la muestra, fig. B12 (b); al aplicar el esfuerzo desviador, con las válvulas del drenaje cerradas para no permitir el drenaje, la presión de poro comienza a incrementarse reduciendo en esta forma la presión efectiva de consolidación y la penetración de la membrana en el espécimen, fig.B12 (c); ésta tiende a recuperar su posición original cuando el exceso de presión de poro tiende a la presión de consolidación aplicada, fig.B12 (a); lo anterior produce pequeñas variaciones en el volumen de la muestra que ocasiona una disminución de la presión de poro generada durante esta etapa. Las investigaciones a este respecto han sido pocas y los factores que intervienen no han sido tratados ampliamente. Actualmente no se cuenta con ninguna corrección para pruebas CU que pueda eliminar este problema; en la ref. (16) proponen como solución el colocar látex en el exterior del espécimen, fig.B13, que hace que el efecto anterior se vea disminuido a valores despreciables durante la prueba.

En esta tesis se hizo una prueba colocando látex en el interior de un espécimen (prueba No. 9) para luego compararla con otra sin látex (prueba No.11), manteniendo la relación de vacíos semejantes y con la misma presión de consolidación; de los resultados se observó que la prueba con látex generó un exceso de presión de poro mayor que la realizada sin látex; este re-

sultado está de acuerdo con las investigaciones hechas a este respecto.

En este trabajo se realizaron las pruebas en forma convencional sin tomar en cuenta este efecto, aunque en la interpretación de los resultados se tuvo presente.

4.3 Comportamiento Esfuerzo-Deformación y Presión de Poro-Deformación

Con el objeto de conocer el comportamiento de la arena, con diferentes relaciones de vacíos y diferentes presiones de consolidación bajo condiciones de velocidad de deformación controlada, se realizaron una serie de pruebas de compresión triaxial consolidadas no drenadas con medición de la presión de poro.

Las presiones utilizadas en este tipo de prueba se describieron en el inciso 4.1 de este capítulo; para cada presión de consolidación la relación de vacíos fue variada y se formaron especímenes desde estados muy sueltos hasta estados densos. Dos tipos de comportamiento fueron observados durante los ensayos y se describen con dos de las pruebas realizadas (26 y 27) y se ilustran en las fig. B14 (a) y (b); la (a) corresponde al de un espécimen suelto y la (b) a uno denso. En las figuras, con líneas punteadas se presentan las curvas de presión de poro inducida contra la deformación axial; en la misma figura aparece una línea punteada horizontal, que indica un exceso de presión de poro igual a la presión de consolidación utilizada,

$\bar{\sigma}_c$; el esfuerzo principal menor efectivo, $\bar{\sigma}_3$, en alguna etapa de la prueba, está dado por la distancia vertical de la curva de exceso de presión de poro a esta línea de referencia.

A continuación se describirá el tipo de comportamiento de un espécimen dependiendo de su densidad relativa al comienzo de la etapa de falla, e_c .

4.3.1 Comportamiento de Especímenes Suelos

En los especímenes en estado suelto, fig.B14 (a), se observaron las siguientes características importantes:

1) En las curvas esfuerzo-deformación, los especímenes mostraron al comienzo de la prueba una gran rigidez y el esfuerzo desviador alcanza su máximo a pequeñas deformaciones, alrededor del 1%; la presión de poro inducida en este punto fue del 50% de $\bar{\sigma}_c$ aproximadamente.

2) Una vez que la arena alcanzó su esfuerzo desviador máximo, la presión de poro continuó incrementándose, lo que originó una pérdida de resistencia del material y una reducción del esfuerzo desviador aplicado a la muestra; cuando la presión de poro inducida durante la prueba alcanzó su máximo y la resistencia del material su mínimo, la muestra empezó a tener un comportamiento dilatante. El esfuerzo principal menor efectivo mínimo de la prueba, $\bar{\sigma}_{3\text{mín}}$, corresponde al punto donde el exceso de presión de poro es máximo, $u_{d\text{máx}}$. Al mínimo valor del esfuerzo desviador, después de su pérdida de resistencia, se denominará $\sigma_{d\text{mín}}$.

Es necesario mencionar que en varias pruebas sobre especímenes sueltos, se presenta una situación en la que el esfuerzo cortante máximo aplicado a la estructura sólida permanece constante aunque la presión de poro aumente. El punto I (fig. B39) del tramo horizontal de la curva σ_d vs ϵ_z , se presenta sistemáticamente cuando el parámetro incremental A de Skempton se hace igual a uno, o sea cuando:

$$1 = \frac{\Delta u_d}{\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)} = \frac{\Delta u_d}{\Delta \sigma_1}$$

A partir de ese momento (tramo I a J, fig. B39), el esfuerzo desviador aplicado al esqueleto sólido no puede aumentar, pues el incremento de presión de poro compensa totalmente el incremento de esfuerzo axial aplicado; sin embargo, al aumentar la presión de poro el esfuerzo confinante efectivo, $\bar{\sigma}_3$, y la resistencia del material disminuyen. Al igualarse la resistencia del suelo con el esfuerzo desviador máximo aplicado se presenta la falla (punto J, fig. B39).

4.3.2 Comportamiento de Especímenes Densos

Las pruebas efectuadas con especímenes denso mostraron las siguientes características:

- 1) En la gráfica de presión de poro vs deformación axial, curva con línea punteada en la fig. B14 (b), se observa que la presión de poro alcanza un valor máximo y después comienza a disminuir, llegando ésta durante la prueba a ser negativa.

2) La curva con línea continua de la fig.B14 (b), muestra la variación del esfuerzo desviador vs deformación axial; se puede apreciar la existencia de un punto de inflexión que corresponde a la deformación en donde la presión de poro es máxima; para deformaciones aún mayores, la resistencia aumenta casi linealmente a medida que la presión de poro disminuye. Al igual que en los especímenes sueltos, el $\bar{\sigma}_{3\text{mín}}$ se tomó donde la presión de poro generada es máxima.

4.3.3 Resumen de las Características Esfuerzo-Deformación

En la tabla A3 se encuentran resumida la información de todas las pruebas CU. En esta tabla se incluyen el tipo de comportamiento esfuerzo-deformación y los números de las figuras para cada una de las pruebas; también se presenta la presión de consolidación, el ángulo de fricción interna para los criterios de falla $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{máx}}$ y $(\bar{\sigma}_1 / \bar{\sigma}_3)_{\text{máx}}$; así mismo se anota la relación de esfuerzos principales efectivos máxima, $(\bar{\sigma}_1 / \bar{\sigma}_3)_{\text{máx}}$. Las curvas esfuerzo-deformación de las pruebas se encuentran graficadas de la fig.B31 a la fig.B58.

4.4 Trayectorias de Esfuerzos Efectivos y Envolvente de Resistencia

Dos criterios de falla se emplean para describir la resistencia al corte del material. El primero ocurre a deformaciones pequeñas y se presenta cuando el esfuerzo desviador es máximo, $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{máx}}$; este criterio se aplica en la práctica al estudiar

la falla de un estrato de arena suelta confinado entre estratos impermeables y cargada con un peso muerto. Si el esfuerzo desviador inducido sobrepasa el valor de $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{máx}}$ que puede soportar el depósito, ocurre la falla bruscamente y con grandes deformaciones; este proceso de falla se presenta en las pruebas CU efectuadas con carga controlada. El segundo criterio corresponde a la condición $(\bar{\sigma}_1 / \bar{\sigma}_3)_{\text{máx}}$; este criterio puede ser de interés para estudiar la interacción entre una masa de arena suelta confinada y respaldos más rígidos. La compatibilidad de deformaciones entre arena y respaldos implica que al tratar de deformarse, la arena transfiere su carga a los respaldos y no se presenta una falla brusca. En el laboratorio se presenta esta situación, al efectuar las pruebas triaxiales CU con deformación controlada.

Se presentan características de la arena en el punto donde el exceso de presión de poro es máximo, esto se hace con el objeto de comparar resultados con los de otros autores, (3); este punto no representa un estado de falla como los mencionados anteriormente.

Las trayectorias de esfuerzos efectivos de las pruebas CU fueron obtenidas a partir de planos potenciales de falla a 60 grados con respecto al esfuerzo principal menor efectivo en cualquier etapa de la prueba. En la fig. B14 (c) la curva Y representa la trayectoria de esfuerzos efectivos para una arena suelta (prueba CU No. 26); al comienzo de la prueba la presión

de poro aumenta al igual que el esfuerzo cortante, τ , que crece hasta un valor máximo, luego disminuye como consecuencia del aumento continuo de la presión de poro, finalmente se alcanza la $u_{dm\acute{a}x}$ ($v=0.5$) cuando la trayectoria se encuentra cercana o sobre la envolvente de falla, calculada con el criterio de $(\bar{\sigma}_1/\bar{\sigma}_3)_{m\acute{a}x}$; a partir de este punto el esfuerzo cortante aumenta hasta que coincide con la envolvente de resistencia, debido ahora a la disminución en la presión de poro. En la curva (z) de la misma figura, se aprecia la trayectoria de esfuerzos efectivos para un espécimen en estado denso (prueba CU No. 27), se observa que la presión de poro generada es menor, pero al igual que en el material suelto ésta alcanza un valor máximo, $u_{dm\acute{a}x}$, el esfuerzo cortante en este punto no cae sobre la envolvente, aunque con el incremento del esfuerzo desviador la trayectoria de esfuerzos efectivos tiende asintóticamente a ésta. Las trayectorias de esfuerzos efectivos de las pruebas CU se presentan de la fig. B59 a la B63.

La envolvente de resistencia calculada con $(\bar{\sigma}_1/\bar{\sigma}_3)_{m\acute{a}x}$, resulta ser única e independiente de la relación de vacíos al inicio de la prueba, e_c , y de la presión de consolidación, $\bar{\sigma}_c$. Para $\bar{\sigma}_c$ menores de 3.0 kg/cm^2 , la envolvente presenta una curvatura que origina que el ángulo de fricción interna del material, ϕ , varíe de 28 grados a 56 grados en su parte más cercana al origen; para valores mayores que 3.0 kg/cm^2 de $\bar{\sigma}_c$ el ϕ no sufre variaciones apreciables siendo de 28 grados aproximadamente. La envolvente de resistencia para $(\bar{\sigma}_1/\bar{\sigma}_3)_{m\acute{a}x}$

se muestra en la fig. B14 (c). El ángulo de fricción interna calculado con el criterio de $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{máx}}$, $\phi_{(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{máx}}}$ varía de 16 a 33 grados para arenas sueltas, ver tabla A3. En la misma tabla se presenta el ángulo de fricción interna para $u_{\text{dmáx}}$, $\phi_{u_{\text{dmáx}}}$, el cual resulta prácticamente igual o semejante, pero siempre menor, al $\phi_{(\bar{\sigma}_1 / \bar{\sigma}_3)_{\text{máx}}}$; cabe señalar al respecto, que para los materiales que muestran un comportamiento contractivo $\phi_{u_{\text{dmáx}}} \approx \phi_{(\bar{\sigma}_1 / \bar{\sigma}_3)_{\text{máx}}}$ mientras que para materiales con comportamiento dilatante $\phi_{u_{\text{dmáx}}} < \phi_{(\bar{\sigma}_1 / \bar{\sigma}_3)_{\text{máx}}}$.

4.5 Línea $e_{F_{DC}}$

En la fig. B15 se muestra la variación de la presión efectiva mínima de confinamiento, $\bar{\sigma}_{3\text{mín}}$, en función de la relación de vacíos de la muestra consolidada isotrópicamente, e_c . Esta variación queda representada en dicha figura por medio de una línea denominada línea $e_{F_{DC}}$. Los puntos se obtienen en base a los resultados de las pruebas CU. El $\bar{\sigma}_{3\text{mín}}$ se calcula restando a la presión de consolidación, $\bar{\sigma}_c$, la presión de poro máxima generada durante la aplicación de la deformación axial, $u_{\text{dmáx}}$; la relación de vacíos durante la prueba se mantuvo prácticamente constante e igual a e_c por tratarse de pruebas no drenadas. Con los valores anteriores, e_c y $\bar{\sigma}_{3\text{mín}}$, se formó un par ordenado para cada prueba, que corresponden a los puntos a través de los cuales pasa la línea $e_{F_{DC}}$. En ésta se indica el tipo de comportamiento observado durante la prueba. No se presentan los puntos cuyo par $(e_c, \bar{\sigma}_c)$ es tal que caen, al final de la consolidación por debajo de la línea $e_{F_{DC}}$; el comporta-

miento de tales muestras se discutirá en el capítulo 6.

Es necesario mencionar que la presión de poro generada en un espécimen, durante una prueba CU, es consecuencia de pequeños cambios en el volumen de éste.

La línea $e_{F_{DC}}$ se obtiene, durante la prueba, en el primer paso del espécimen por la condición de cero velocidad de variación de volumen ($v=0.5$); éste corresponde al punto donde u_d es máxima, y a partir del cual el incremento de deformación axial genera una tendencia a la dilatancia.

4.6 Línea P

En la fig.B16 se presentan los puntos representativos de la relación de vacíos consolidada, e_c , contra la presión de consolidación, $\bar{\sigma}_c$, de cada prueba CU. Con diferente simbología se marcan los puntos de las pruebas que presentaron un máximo de $(\sigma_1 - \sigma_3)$ (comportamiento contractivo) y las que mostraron un comportamiento dilatante sin reducción del esfuerzo cortante aplicado $(\sigma_1 - \sigma_3)$. La línea P marca la frontera entre los dos comportamientos descritos anteriormente.

5. PRUEBAS TRIAXIALES CONSOLIDADAS DRENADAS (CD)

5.1 Condiciones de Prueba

5.1.1 Presiones de Consolidación Utilizadas

En la tabla A2 se muestran las presiones de consolidación, $\bar{\sigma}_c$, utilizadas y el número de pruebas realizadas con cada una de ellas. Para la $\bar{\sigma}_c$ de 6.0 kg/cm² solo se realizó una prueba debido a la capacidad del sistema de carga.

La cámara triaxial incluyendo las bases lubricadas y el sistema de carga, son los mismos que se utilizaron en pruebas CU.

5.1.2 Velocidad de Deformación Utilizada

La velocidad de deformación axial fue la misma que la utilizada en pruebas CU (2%/hora); esta velocidad es lo suficientemente pequeña para garantizar que en todo momento de la prueba la presión de poro es casi nula.

5.2 Cálculos y Correcciones

El cálculo del esfuerzo desviador durante la etapa de falla de las pruebas CD, estuvo basado en una área corregida dada por la expresión:

$$A_i = \frac{1 - \epsilon_v}{1 - \epsilon_z} A_c$$

donde: A_c área de la sección transversal de la muestra consolidada.

A_i área de la sección transversal de la muestra en cualquier instante de la prueba.

ϵ_z deformación axial (deformación de compresión es positiva)

ϵ_v deformación volumétrica (reducción de volumen es positivo)

La expresión anterior es válida solo para pruebas en las que las deformaciones laterales y axiales son uniformes.

La corrección en el esfuerzo desviador, debido al efecto de la membrana, fue la misma que se utilizó en las pruebas CU (inciso 4.2).

En cuanto a la influencia de la penetración de la membrana, esta solo afecta el volumen consolidado, como se mencionó en inciso 4.2, fig.B12 (b); durante la etapa de falla y en pruebas

drenadas, dicha penetración no tiene ninguna influencia, pues la presión efectiva de confinamiento permanece constante.

5.3 Comportamiento Esfuerzo-Deformación y Relación de Vacíos-Deformación

Se efectuó una serie de pruebas consolidadas drenadas (CD) para conocer el comportamiento de la arena bajo estas condiciones, y poder compararlo con el obtenido de pruebas CU. Las pruebas se realizaron en especímenes muy sueltos y densos.

Para propósitos de discusión las pruebas pueden ser separadas en dos grupos: 1) pruebas ejecutadas sobre especímenes densos y medianamente densos con densidades relativas consolidadas, D_{rc} , entre 50 y 100%; 2) pruebas ejecutadas sobre especímenes sueltos a medianamente sueltos con D_{rc} menores del 50%. En la fig.B17 las curvas (a) corresponden al espécimen suelto y las (b) al denso; con líneas llenas se presentan las curvas esfuerzo desviador vs deformación axial y con líneas punteadas la de relación de vacíos vs deformación axial.

5.3.1 Comportamiento de Especímenes Suelos

En estas muestras (curvas (a) fig.B17) se alcanza la resistencia máxima a deformaciones axiales del 20% aproximadamente, y se mantiene constante para deformaciones superiores a este valor, indicando que una condición de resistencia constante ha sido alcanzada.

Las curvas de relación de vacíos vs deformación axial muestran una disminución en el volumen de espécimen durante toda la prueba; a deformaciones superiores la relación de vacíos tiende asintóticamente a un valor constante, por lo tanto alcanzado éste, el espécimen se deforma durante el resto de la prueba a volumen constante. Las condiciones de resistencia y volumen constante se alcanzan al mismo nivel de deformación, lo que implica una dependencia entre ambas. Cuando el espécimen se deforma con resistencia y volumen constante durante una prueba, se dice que alcanza una condición límite, y a la relación de vacíos en esta etapa se la llamará relación de vacíos límite, $e_{\text{lím}}$, que depende de la presión de consolidación, $\bar{\sigma}_c$, y resulta independiente de la relación de vacíos consolidada de la muestra, e_c .

5.3.2 Comportamiento de Especímenes Densos

Las curvas de esfuerzo desviador vs deformación axial, muestran un pico para una deformación axial comprendida entre 5 y 10% y luego, a deformaciones mayores, la resistencia del espécimen disminuye. En probetas muy densas poco después del pico, se comienzan a formar planos de falla, no así en especímenes medianamente densos, en los que la resistencia del espécimen después del pico disminuye hasta alcanzar el mismo valor de especímenes sueltos sometidos a la misma presión de consolidación.

Las curvas de relación de vacíos vs deformación axial, para especímenes medianamente densos, muestran primero un decre-

mento de volumen y luego un aumento de éste hasta que a grandes deformaciones tienden a la misma relación de vacíos que los especímenes sueltos, $e_{lím}$, sometidos a la misma $\bar{\sigma}_c$. Los especímenes muy densos muestran al igual que los anteriores, un leve decremento en su volumen a pequeñas deformaciones axiales luego se presentan grandes aumentos hasta que se hace notorio un plano de falla, en el cual el incremento en el volumen de vacíos disminuye, pero siempre conservando la tendencia hacia la misma relación de vacíos de los especímenes sueltos y medianamente densos a grandes deformaciones, o sea hacia la condición límite de la prueba; lo anterior se lograría a deformaciones muy grandes y seguramente, antes de alcanzar esta condición, las deformaciones se concentrarían cerca del plano de falla, originando que el cambio en el volumen en esta zona, durante la deformación axial, no sea representativo de la muestra en promedio. Se enfatiza que el cambio en el volumen de vacíos fue calculado a partir de la variación en el volumen total del espécimen, por lo tanto, representa el cambio en la relación de vacíos promedio de la muestra.

Se concluye, que de pruebas CD en especímenes muy densos no se puede hacer una estimación aproximada de la relación de vacíos límite, $e_{lím}$. En la fig.B17 curvas (b), se presenta un espécimen en estado denso, en el cual no se observaron planos de falla por corte.

5.3.3 Resumen de las Características Esfuerzo-Deformación

En la tabla A4 se resumen las principales características de todas las pruebas CD. En esta tabla se anotan para cada prueba su número de identificación, la presión de consolidación utilizada, la relación de vacíos inicial, e_i , y la densidad relativa inicial, D_{ri} , así como la relación de vacíos consolidada, e_c , y densidad relativa consolidada, D_{rc} ; también se presentan la relación de esfuerzos principales máximo, $(\sigma_1/\sigma_3)_{\text{máx}}$, el ángulo de fricción interna para $(\sigma_1/\sigma_3)_{\text{máx}}$, $\phi_{(\sigma_1/\sigma_3)_{\text{máx}}}$; y la relación de vacíos límite, $e_{\text{lím}}$, para las pruebas en que se pudo determinar; finalmente se anexa el número de la figura en que se presenta cada prueba.

5.4 Trayectorias de Esfuerzos Efectivos y Envoltentes de Resistencia

Las envoltentes de resistencia se calcularon con el criterio de $(\sigma_1/\sigma_3)_{\text{máx}}$, fig.B18, éstas dependen de la relación de vacíos consolidada, e_c , y de la presión de consolidación, $\bar{\sigma}_c$; en la fig.B18 (b) con línea llena se presenta la envolvente de un material suelto, se observa que el ángulo de fricción interna varía con el nivel de presiones de consolidación utilizadas, desde valores de 33.7 grados, a presiones de consolidación de 0.3 kg/cm^2 , hasta 27.2 grados para valores de $\bar{\sigma}_c$ de 4.0 kg/cm^2 ; con línea punteada, fig.B18 (a), se muestra la envolvente de un material denso, al igual que en el caso anterior el ángulo ϕ varía con $\bar{\sigma}_c$ desde 37 grados (para $\bar{\sigma}_c$ de 0.3 kg/cm^2) hasta 30.2 grados (para $\bar{\sigma}_c$ de 4.0 kg/cm^2).

Las trayectorias de esfuerzos, de pruebas CD, se calcularon a partir de planos potenciales de falla a 60 grados con respecto al esfuerzo principal menor, $\bar{\sigma}_3 = \bar{\sigma}_c$. En la fig.B19 (a) se presenta una trayectoria de esfuerzos para una arena suelta, aquí se observa que el esfuerzo cortante siempre aumenta hasta tocar la envolvente de falla de materiales sueltos, una vez alcanzado este punto el esfuerzo cortante permanece constante, en otras palabras, al alcanzar la envolvente, el espécimen se deforma a resistencia constante y volumen constante, o bien alcanza la condición límite ya definida anteriormente. En la fig.B19 (b) se muestra la trayectoria para un espécimen en estado denso, se observa que el esfuerzo cortante alcanza un valor máximo que corresponde a un punto sobre la envolvente de resistencia para la arena en estado denso, luego el esfuerzo de corte disminuye hasta llegar a tocar a la envolvente de la arena en estado suelto, en este punto es cuando se alcanza la condición límite.

5.5 Línea \bar{e}_s

En la fig.B20 se muestra la línea \bar{e}_s obtenida a partir de pruebas consolidadas drenadas. Los puntos que definen esta línea son los pares ordenados formados por: la relación de vacíos límite, $e_{lím}$, y la presión de consolidación, $\bar{\sigma}_c$. Una discusión más amplia de este tema será dada en el capítulo 6 de este trabajo.

5.6 Línea e_s

La línea e_s fue obtenida a partir de pruebas CD con el objeto de poderla comparar con la línea $e_{F_{DC}}$ calculadas de pruebas CU.

Para ser congruente con la obtención de la línea $e_{F_{DC}}$ mencionada en el inciso 4.5, la línea e_s se obtiene de especímenes donde la variación de volumen durante la prueba sea el menor posible; esto se logra formando especímenes cerca de las relaciones de vacíos límite, $e_{lím}$, obtenidas de diferentes presiones de consolidación; al inicio de estas pruebas los especímenes muestran una reducción en su volumen llegando a un punto donde el material cambia su comportamiento de contractivo por dilatante o condición de cero velocidad de variación de volumen; las relaciones de vacíos en estos puntos, e_n , junto con sus respectivas presiones de consolidación, forman los puntos a través de los cuales se pasa la línea e_s (fig. B21). En la fig. B30 las curvas corresponden al de un espécimen con una relación de vacíos consolidada cercana a la límite para una determinada $\bar{\sigma}_c$ a partir del cual se obtiene un punto de la línea e_s .

6. DISCUSION DE LOS RESULTADOS

6.1 Significado de la Línea $e_{F_{DC}}$

La línea $e_{F_{DC}}$, como se mencionó en el inciso 4.5, es aquella que nos representa la variación de la presión efectiva mínima de confinamiento en función de la relación de vacíos consolidada.

Castro, ref. (3), obtuvo la línea $e_{F_{CC}}$ a partir de especímenes que presentaron licuación en su comportamiento (especímenes sueltos), llegando a que los especímenes que no se licúan nunca alcanzan la condición representada por esta línea.

En la fig.B22 se muestra las líneas $e_{F_{DC}}$ y P obtenidas en este trabajo. Se presentan además los puntos representativos de $\bar{\sigma}_{3mín}$ vs e_c y de $\bar{\sigma}_c$ vs e_c de los especímenes con respuesta globalmente dilatante; algunos de estos puntos ($\bar{\sigma}_c$ vs e_c) quedan

comprendidos entre las líneas P y $e_{F_{DC}}$ y en tal caso se observa, que al igual que en los especímenes sueltos, durante la etapa de falla, la presión confinante efectiva empieza a disminuir hasta que el punto representativo alcance la línea $e_{F_{DC}}$ (dentro del intervalo de errores experimentales de las pruebas). Una vez alcanzada la presión de poro máxima los especímenes se tornan dilatantes. Existen especímenes, cuyos puntos representativos al inicio de la etapa de falla se ubican claramente por debajo de la línea $e_{F_{DC}}$ (fig.B22); estas muestras cuyo comportamiento contractivo inicial es imperceptible, se tornan dilatantes casi de inmediato.

En la fig.B23 se muestran pruebas de Castro en especímenes dilatantes, con condiciones iniciales $(e_c, \bar{\sigma}_c)$ comprendidas entre la línea P (Castro) y línea $e_{F_{CC}}$ así como los que caen por debajo de ésta última; estas pruebas siguen el mismo comportamiento descrito en el párrafo anterior.

De todo lo expuesto en este inciso se llega a que los especímenes cuyos puntos representativos $(e_c, \bar{\sigma}_c)$, queden por encima de la línea $e_{F_{DC}}$, tendrán una reducción de sus esfuerzos efectivos igual a la distancia horizontal de la presión de consolidación a la línea $e_{F_{DC}}$.

Después de la falla por deslizamiento ocurrida en la presa Ft. Peck, Casagrande, ref.(4), desarrolló la hipótesis que cuando la arena es licuada y se encuentra fluyendo, debe tener una estruc-

tura diferente a la que tiene antes de la falla; durante el flujo cada grano estará girando constantemente en relación a todos los granos que lo rodean para así ofrecer una resistencia mínima de fricción. Casagrande denominó esta estructura "Flow Structure" y postuló que tales estructuras 1) se difundían por una reacción en cadena 2) existen solamente durante el flujo, y 3) que en el momento que el flujo cesa, los granos se reordenan recuperando su estructura original; después de que el exceso de presión de poro se disipa, la muestra en estado de reposo será levemente más densa que la muestra inicial.

En este trabajo no se aprecia un cambio brusco del comportamiento del material, al variar su densidad relativa, sino un cambio gradual en su respuesta que se debe a la variación de las condiciones esfuerzo, deformación y presión de poro dentro de los especímenes; lo anterior se puede observar en la línea $e_{F_{DC}}$ aquí obtenida, en la cual el material, independientemente de su estado inicial, llega a la condición establecida por ésta.

El cambio de forma de las trayectorias de esfuerzos efectivos, para una misma presión de consolidación, $\bar{\sigma}_c$, se lleva a cabo en una forma ordenada y paulatina de acuerdo con la relación de vacíos al inicio de la etapa de falla, e_c .

Por tanto, las pruebas efectuadas no ponen en evidencia en cambio brusco de estructura entre los especímenes muy sueltos y

densos, que justifique la hipótesis de existencia de una estructura granular peculiar, llamada "Estructura Fluidal o Flow Es-structure".

6.2 Posición Respectiva de las Líneas $e_{F_{DC}}$ y e_s

En la fig.B24 se observa que la línea e_s cae por encima de la línea $e_{F_{DC}}$, aunque se hayan obtenido siguiendo un mismo criterio (estado en el que la velocidad de deformación volumétrica es nula; incisos 4.5 y 5.6). Existen por tanto diferencias entre los resultados de las pruebas drenadas y no drenadas; estas diferencias pueden deberse a la diferencia en historia de cargas y de deformaciones entre ambos tipos de prueba.

6.3 Influencia de la Velocidad de Aplicación de la Carga en Pruebas CU

Casagrande, ref. (4), establece que la velocidad de deformación axial afecta el comportamiento del material, llegando a que para cada velocidad de deformación diferente se obtiene una línea e_F diferente; se menciona también que en las pruebas con carga controlada, donde la velocidad de deformación es aproximadamente 20,000 veces más grande que en pruebas con deformación controlada, la línea e_F calculada cae por debajo de las obtenidas a partir de velocidades de deformaciones menores.

Castro (3) muestra la línea $e_{F_{CC}}$ obtenida de pruebas aplicando el esfuerzo desviador con incrementos de carga (carga controlada), fig.B25, también se presentan dos líneas punteadas que co-

responden a pruebas realizadas, dentro del mismo trabajo, con una velocidad de deformación axial controlada del 1% y se observa que estos puntos caen dentro del intervalo de errores de las pruebas. Casagrande (4) presenta la línea $e_{F_{DC}}$ obtenida con el mismo material, fig.B26, y se observa que existe una separación con la línea $e_{F_{CC}}$ (Castro) que representa una diferencia del 2% en la relación de vacíos, por lo tanto es difícil establecer si en realidad esa discrepancia ocurre por la diferencia de velocidades de deformación axial o bien es debida a los errores que involucran las pruebas. Para ilustrar lo anterior se tiene que en la ref.(5) se reporta una densidad de sólidos de 2.67 para la arena "Bandíng Sand" mientras que Castro reporta 2.65, si se toma en cuenta esta diferencia y la línea $e_{F_{CC}}$ (Castro) se calcula con una densidad de sólidos de 2.67, ésta se desplaza hasta quedar muy cerca de la línea $e_{F_{DC}}$ (Casagrande), fig.B27. Si la arena de ottawa varía entre 2.65 y 2.67 en su densidad de sólidos, es de esperar que puedan existir errores de esa magnitud en la realización de las pruebas, a partir de las cuales se obtienen las líneas antes mencionadas.

De las pruebas realizadas en esta tesis, una fue llevada a cabo con una velocidad de deformación diferente (1%, prueba CU No.34) a la utilizada en todas las pruebas (2%/hora). Del resultado que se obtuvo no se observó ninguna influencia de la velocidad de deformación sobre el comportamiento del material.

En la fig.B28 se muestra la línea $e_{F_{DC}}$ obtenida en este tra-

bajo y la línea e_{FCC} de Castro que cae por encima de la anterior pero comprendida en la zona de dispersión de los puntos representativos de las pruebas aquí reportadas. En conclusión, la velocidad de deformación no parece tener influencia en la posición de la línea e_F .

6.4 Comparación Entre Envolventes de Resistencia

Como se mencionó en los incisos 4.4 y 4.5, la envolvente de resistencia en pruebas CU en única y presenta una curvatura hasta alcanzar un esfuerzo normal efectivo de 3.0 kg/cm^2 , a partir del cual presenta una variación prácticamente lineal. En pruebas CD las envolventes varían con la densidad del material y resultan curvas en todo el rango de presiones analizado.

En la fig.B29 se observa que las leyes de resistencia en pruebas CU y CD de materiales sueltos son parecidas, excepto a bajas presiones en el que ϕ en pruebas no drenadas es mayor.

La envolvente de especímenes densos en pruebas CD, fig.B29, resulta con una pendiente mayor a la de los sueltos, esto se debe al efecto de dilatancia que aumenta el ángulo de fricción interna del material (ϕ), (17) y (18).

6.5 Variación de $\text{tg}\phi$ y $\text{tg}\psi$

La curvatura de las envolventes obtenidas puede ser explicada por la variación, con la presión normal efectiva, del ángulo de fricción interparticular del material, ψ ; Mitchell (19) mencio-

na que el ángulo ψ decrece con el aumento del esfuerzo normal efectivo, $\bar{\sigma}$, variando como una función de $\sigma^{-1/3}$. Como se sabe el ángulo de fricción interna varía con la dilatancia que experimenta el material; para que los resultados en ϕ sean comparables, se eligieron los valores (de ϕ) para la condición de cero velocidad de deformación volumétrica ($\dot{\epsilon}_v=0$) en el caso de pruebas CU, y en el caso de pruebas CD, en materiales sueltos, para la condición de falla cuando $\dot{\epsilon}_v=0$; en estas condiciones la curvatura de las envolventes depende unicamente de la variación del ángulo ψ con el nivel de esfuerzos normales efectivos aplicados.

7. CONCLUSIONES

Las pruebas consolidadas no drenadas realizadas en esta tesis, muestran las siguientes características importantes en cuanto a su comportamiento:

- 1) Los especímenes en estado suelto presentan pérdida de resistencia como consecuencia del aumento en la presión de poro.
- 2) La envolvente de resistencia para $(\bar{\sigma}_1/\bar{\sigma}_3)_{\text{máx}}$ resulta ser única e independiente de la relación de vacíos al inicio de la etapa de falla, e_c , y de la presión de consolidación, $\bar{\sigma}_c$. Para $\bar{\sigma}_3$ menores de 3.0 kg/cm^2 , presenta una curvatura que origina que el ángulo de fricción interna aumente cerca del origen; a presiones de confinamiento mayores que 3.0 kg/cm^2 la envolvente es prácticamente lineal con un ϕ de 28 grados aproximadamente.
- 3) El ángulo ϕ para $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{máx}}$ es siempre menor que el obtenido para la relación de esfuerzos principales máxima, llegando a valores mínimos de 16 grados en arenas sueltas.
- 4) La línea e_F resulta ser independiente de la velocidad de

aplicación de la carga. El material al variar su densidad relativa presenta una variación paulatina de su comportamiento estructural sin presentar cambios bruscos que indiquen la presencia de estructuras peculiares que justificarían la llamada "Licuación". Esta línea no representa una condición estructural particular durante la prueba, sino la reducción del confinamiento que sufrirá un espécimen que en sus condiciones iniciales ($e_c, \bar{\sigma}_c$) que de representado por un punto localizado por encima de esta línea.

5) Una vez que los especímenes alcanzan la condición representada por la línea $e_F (u_{dm\acute{a}x})$ todos muestran tendencia a dilatarse.

En cuanto al comportamiento de especímenes en pruebas consolidadas drenadas se llega a:

1) La relación de vacíos al inicio de la etapa de falla, e_c , es el parámetro más importante en la variación del ángulo de fricción interna del material, ϕ . Se presenta la envolvente de especímenes en estado suelto y la correspondiente a los densos, en esta última se aprecia un aumento en la resistencia debida al efecto de dilatancia.

2) Las envolventes resultan curvas en todo el intervalo de presiones analizado, esto resulta como consecuencia de la variación del ángulo de fricción interparticular, ψ , con el esfuerzo normal efectivo aplicado.

3) La línea \bar{e}_s representa la condición en la que los especímenes se deforman con resistencia constante y volumen constante.

4) La envolvente de pruebas drenadas en materiales sueltos y la obtenida de pruebas CU resultan semejantes, excepto a ba-

jas presiones donde el ϕ obtenido de pruebas no drenadas es mayor.

5) La línea e_s y $e_{F_{DC}}$ no coinciden aún cuando se obtuvieron siguiendo un mismo criterio para pruebas drenadas y no drenadas (condición de velocidad de deformación volumétrica nula, $\dot{\epsilon}_v=0$). Esta discrepancia se debe probablemente a la diferencia en las historias de esfuerzos y deformaciones durante las pruebas CU y CD.

8. RECONOCIMIENTO

A J Alberro por su valiosa dirección durante el desarrollo de esta tesis. L Zeevaert W, E Juarez B, A Díaz R, V Porras, por sus sugerencias y críticas. G Hiriart ayudó durante la modificación del equipo y dió consejos para el desarrollo de las pruebas.

9. REFERENCIAS

1. Bjerrum, L., Kringstad, S., and Kummeneje, O., "The Shear Strength of a Fine Sand", Proceedings, Fifth ICSMFE, Vol. 1, Paris, 1961.
2. Lee, L.K., and Seed, H.B., "Undrained Strength Characteristics of Cohesionless Soil", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 93, No. SM6, Nov. 1967.
3. Castro, G., "Liquefaction of Sands", Harvard Soil Mechanics Series, No. 81, 1969.
4. Casagrande, A., "Liquefaction and Cyclic Deformation of Sands a Critical Review", Fifth Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Buenos Aires, Argentina, Nov. 1975 .
5. Poulos, E. J., "The Steady State of Deformation", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 107, No. GT5, May 1981.

6. Ladd, R. S., "Specimen Preparation and Liquefaction of Sands", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 100, No. GT10, Oct. 1974.
7. Mulilis, P., Seed, H., Chan, C. K., Mitchell, J., and Arulanandan, K., "Effects of Sample Preparation on Sand Liquefaction", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 103, No. GT2, Feb. 1977.
8. Black, K. D., and Lee, K. L., "Saturating Laboratory Samples by Back Pressure", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE Vol. 99, No. SMI, Jan. 1973.
9. Canadian Foundation Engineering Manual, "Properties of Soil and Rock", Mar. 1978.
10. Kolbuszewski, J. J., "An Experimental Study of the Maximum and Minimum Porosities of Sands", Proceedings of the Second International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rotterdam, Vol. 1, Jun 21 to 30, 1948.
11. Santoyo, E., y Reséndiz, D., "Una Cámara Triaxial de Precisión", Informe No. 235, Instituto de Ingeniería, UNAM, Méx. D.F., Agosto, 1969.
12. Rowe, P., and Barden, L., "Importance of the Free Ends in Triaxial Testing", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 90. No. SMI, Jan. 1964
13. Shockley, W. G., and Ahlvin, R. G., "Non-Uniform Conditions in Triaxial Test Specimens", Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils, ASCE, Boulder, Colorado, 1960.

14. Josseaume, H., "Etude de la pression Interstitielle", Rapport de Recherche No. 14, Mars. 1971.
15. Henkel, D. J., and Gilbert, G. D., "The Effect of the Rubber Membrane on the Measured Triaxial Compression Strength of Clay Samples", - Geotechnique 3, No. 1, 1952,.
16. Kiekbusch, M., and Schuppener, B., "Membrane Penetration and its Effect on Pore Pressure", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol 103, No. GT11, Nov. 1977.
17. Taylor, D.W., "Fundamentals of Soil Mechanics", 16th Printing, John Wiley and Sons. Inc., New York, U.S.A., Chapter 14th, 1948.
18. Bishop, A. W., "Stress strain Behaviour of Soils", First Impression, Pined in Great Britain by the Whiterfriars Press Ltd, London and Tonbridge, Session 1, 1972.
19. Mitchell, J. K., Fundamentals of Soil Behavior, John Wiley and Sons, New York, 1974

ANEXO A

TABLA A1

**Características de la Arena de Ottawa
para la Granulometría Escogida**

Propiedad Índice	Valor
Forma de las Partículas	Subredondeadas a Subangulosas
Gravedad Específica	2.67
Relación de Vacíos Máxima	0.75
Relación de Vacíos Mínima	0.61
Coeficiente de Uniformidad	1.80
Coeficiente de Curvatura	1.15
Clasificación según SUCS	SP

TABLA A2

Presiones Confinantes Utilizadas

Presiones de consolidación utilizadas (σ_c en kg/cm^2).	Clasificación de los especímenes probados en base a su D_{rc}	No de Pruebas CU	No. de Pruebas CD
0.3	Muy Suelto Suelto Medianamente Denso Denso	6	4
1.0	Muy suelto Suelto Medianamente Denso Denso	5	4
2.0	Muy Suelto Suelto Medianamente Denso Denso	5	4
4.0	Muy Suelto Suelto Medianamente Denso Denso	6	4
6.0	Muy Suelto Suelto Medianamente Denso Denso	6	1

TABLA A3

RESUMEN DE LAS PRUEBAS CU

Prueba CU No	$\bar{\sigma}_c$ kg/cm ²	e_i -	D _{ri} %	e_c -	D _{rc} %	Respuesta Esf-Def	$\rho(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{m\acute{a}x}}$ °	$\rho u_{d\text{m\acute{a}x}}$ °	Fig	$u_{d\text{m\acute{a}x}}$ kg/cm ²	$(\bar{\sigma}_1/\bar{\sigma}_3)_{\text{m\acute{a}x}}$ -	$\rho(\bar{\sigma}_1/\bar{\sigma}_3)_{\text{m\acute{a}x}}$ °
18	0.3	0.662	63	0.651	71	RD	—	30.24	B35	0.063	3.385	32.95
13	0.3	0.715	25	0.682	49	RD	—	43.49	B32	0.194	5.472	43.71
15	0.3	0.757	-5	0.734	11	RC	30.57	46.33	B33	0.243	6.276	46.48
17	0.3	0.718	23	0.695	40	RC	25.98	36.31	B34	0.176	3.903	36.31
12	0.3	0.750	0	0.710	29	RC	33.20	54.21	B31	0.273	10.630	55.90
36	0.3	0.694	40	0.681	49	RD	—	33.47	B36	0.065	3.658	34.79
1	1.0	0.688	44	0.686	46	RD	—	25.20	B37	0.227	2.904	29.19
2	1.0	0.736	10	0.731	14	RD	—	24.85	B38	0.486	2.859	28.80
3	1.0	0.769	-14	0.735	11	RC	20.15	39.19	B39	0.848	4.434	39.19
6	1.0	0.801	-36	0.728	16	RC	22.07	45.97	B40	0.931	6.246	46.39
14	1.0	0.726	17	0.695	39	RC	20.93	35.19	B41	0.843	3.720	35.19
10	2.0	0.681	49	0.662	63	RD	—	28.19	B45	1.104	2.931	29.42
8	2.0	0.662	63	0.646	74	RD	—	19.50	B43	0.365	2.804	28.31
11	2.0	0.750	0	0.723	19	RC	18.83	34.47	B46	1.763	3.687	34.98
7	2.0	0.840	-64	0.757	-5	RC	17.36	51.83	B42	1.966	8.568	52.28
* 9	2.0	0.767	-12	0.718	23	RC	16.01	42.43	B44	1.946	5.815	44.95
23	4.0	0.765	-11	0.730	14	RC	18.23	29.14	B47	3.131	2.899	29.14
24	4.0	0.772	-16	0.742	6	RC	16.95	30.36	B48	3.657	3.025	30.36
26	4.0	0.786	-26	0.744	4	RC	18.30	38.84	B49	3.805	4.364	38.84
27	4.0	0.654	68	0.637	81	RD	—	24.43	B50	1.718	2.709	27.44
28	4.0	0.668	59	0.653	69	RD	—	25.46	B51	1.701	2.761	27.92
+34	4.0	0.715	25	0.691	42	RC	19.99	30.24	B52	3.253	3.029	30.24
29	6.0	0.733	12	0.697	38	RC	18.83	32.47	B53	5.375	3.355	32.74
30	6.0	0.716	24	0.686	45	RC	20.64	32.15	B54	4.808	3.326	32.52
32	6.0	0.708	30	0.679	51	RC	17.18	25.86	B56	4.529	2.776	28.06
31	6.0	0.703	34	0.674	54	RC	18.47	27.79	B55	4.751	2.882	29.00
33	6.0	0.647	74	0.623	91	RD	—	26.01	B57	2.170	2.814	28.40
35	6.0	0.682	49	0.659	65	RD	—	27.93	B58	3.262	2.878	28.97

* La velocidad de deformación controlada utilizada en esta prueba fue del 1%/hr.

+ Se colocó látex por dentro de la membrana.

RC Respuesta contractiva.

RD Respuesta dilatante.

TABLA A4

Resumen de las Pruebas CD

Prueba CD No	$\bar{\sigma}_c$	e_i	Dr_i	e_c	Dr_c	σ_1/σ_3 máx	ϕ $(\frac{\sigma_1}{\sigma_3})$ máx	$e_{lím}$	Dibujado en la Fig
-	kg/cm	-	%	-	%	-	.	-	-
1	6.0	0.788		0.732		2.478	25.15	-	B68
2	4.0	0.796	-33	0.732	13	2.688	27.24	0.686	B67
3	4.0	0.729	15	0.710	29	2.853	28.75	0.695	B67
4	4.0	0.709	29	0.693	41	2.872	27.91	0.691	B67
5	4.0	0.687	45	0.679	51	3.029	30.24	0.686	B67
6	2.0	0.683	48	0.677	52	3.178	31.42	0.691	B66
7	2.0	0.802	-37	0.747	2	3.192	31.53	0.700	B66
8	2.0	0.753	-2	0.732	13	3.012	30.09	0.710	B66
9	2.0	0.637	81	0.625	89	3.391	32.98	-	B66
10	1.0	0.679	51	0.661	64	3.589	34.35	-	B65
11	1.0	0.722	20	0.703	34	3.054	30.44	0.694	B65
12	1.0	0.798	-34	0.735	11	3.371	32.85	0.691	B65
13	1.0	0.641	78	0.629	86	3.651	34.75	-	B65
14	0.3	0.722	20	0.704	33	3.497	33.72	0.699	B64
15	0.3	0.683	48	0.671	56	4.023	37.01	-	B64
16	0.3	0.759	-6	0.738	9	2.813	28.40	0.728	B64

ANEXO B



Fig. B1 Microfotografía de las Partículas de Arena.

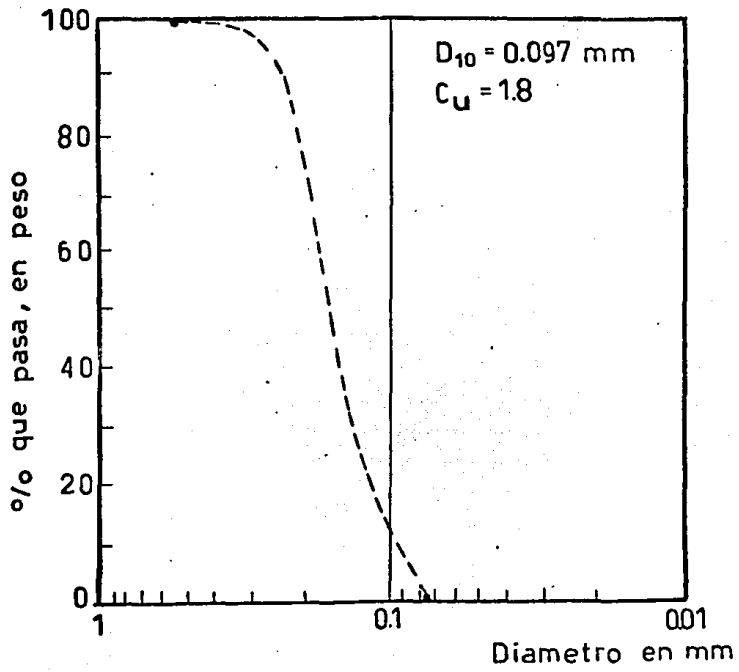


Fig. B2 Granulometría de la Arena Utilizada

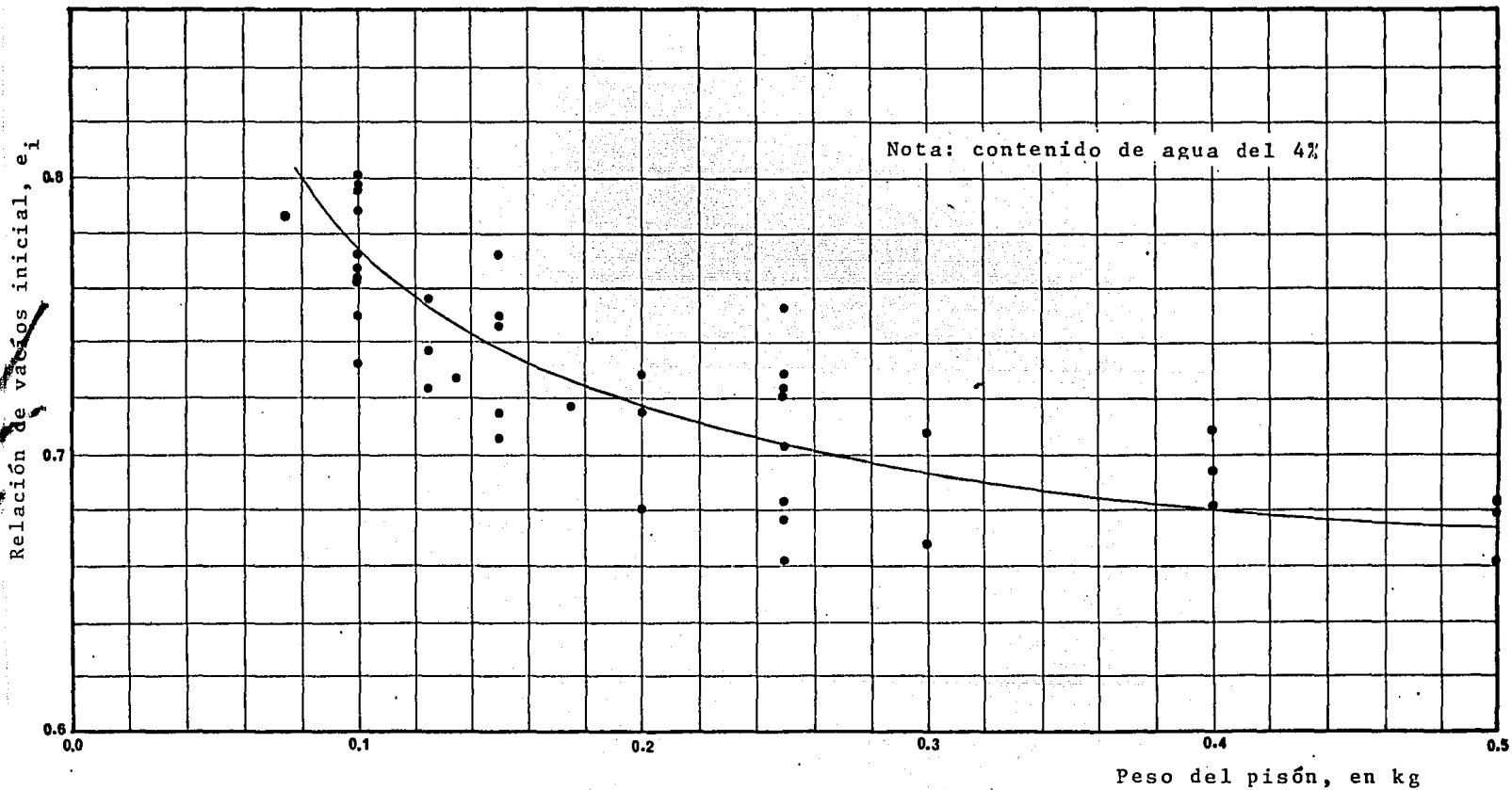


Fig.B3 Relación de Vacíos Inicial vs Peso del Pisón de Compactación.

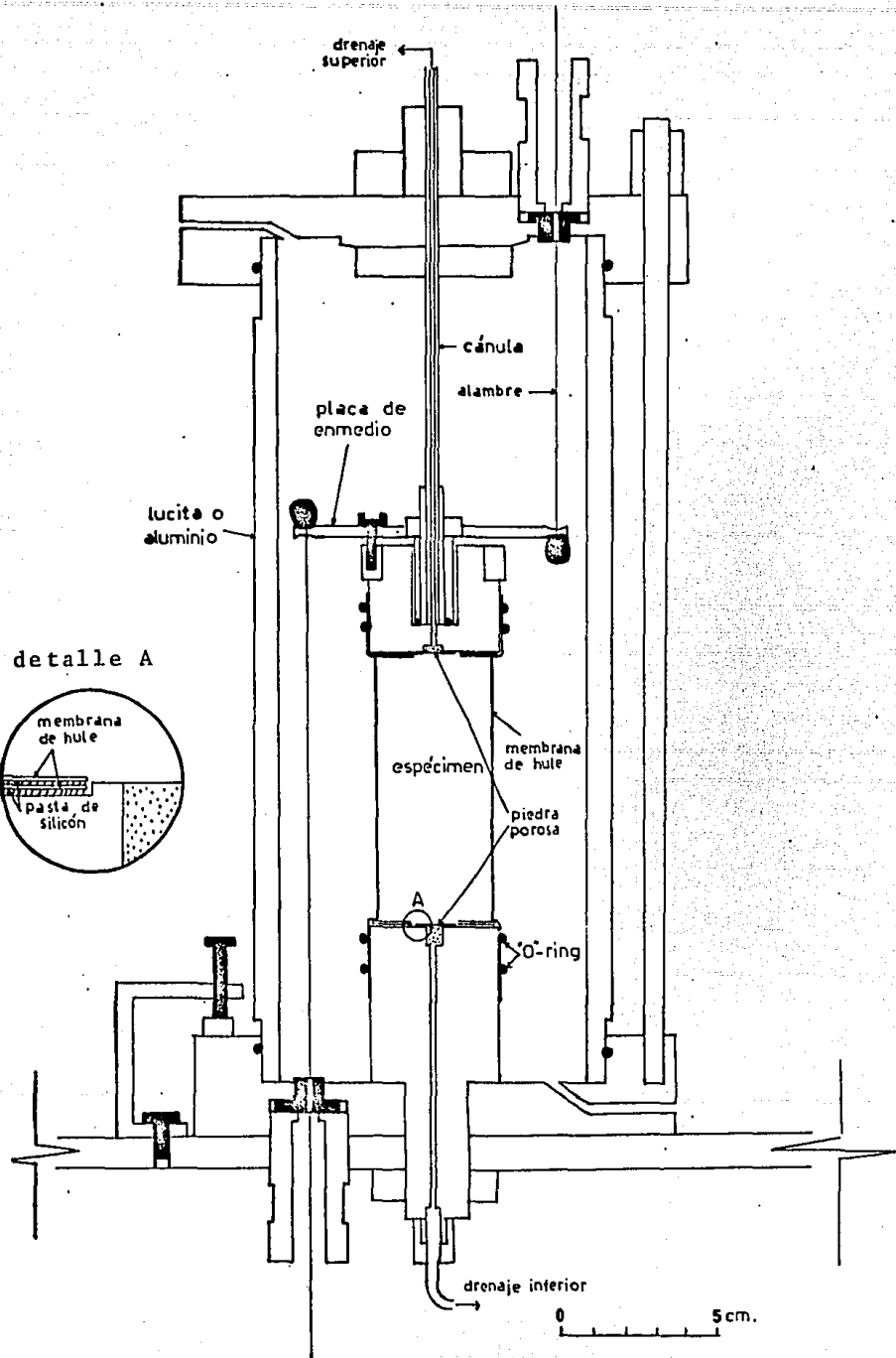


Fig.B4 Sección Transversal de la Cámara Triaxial.

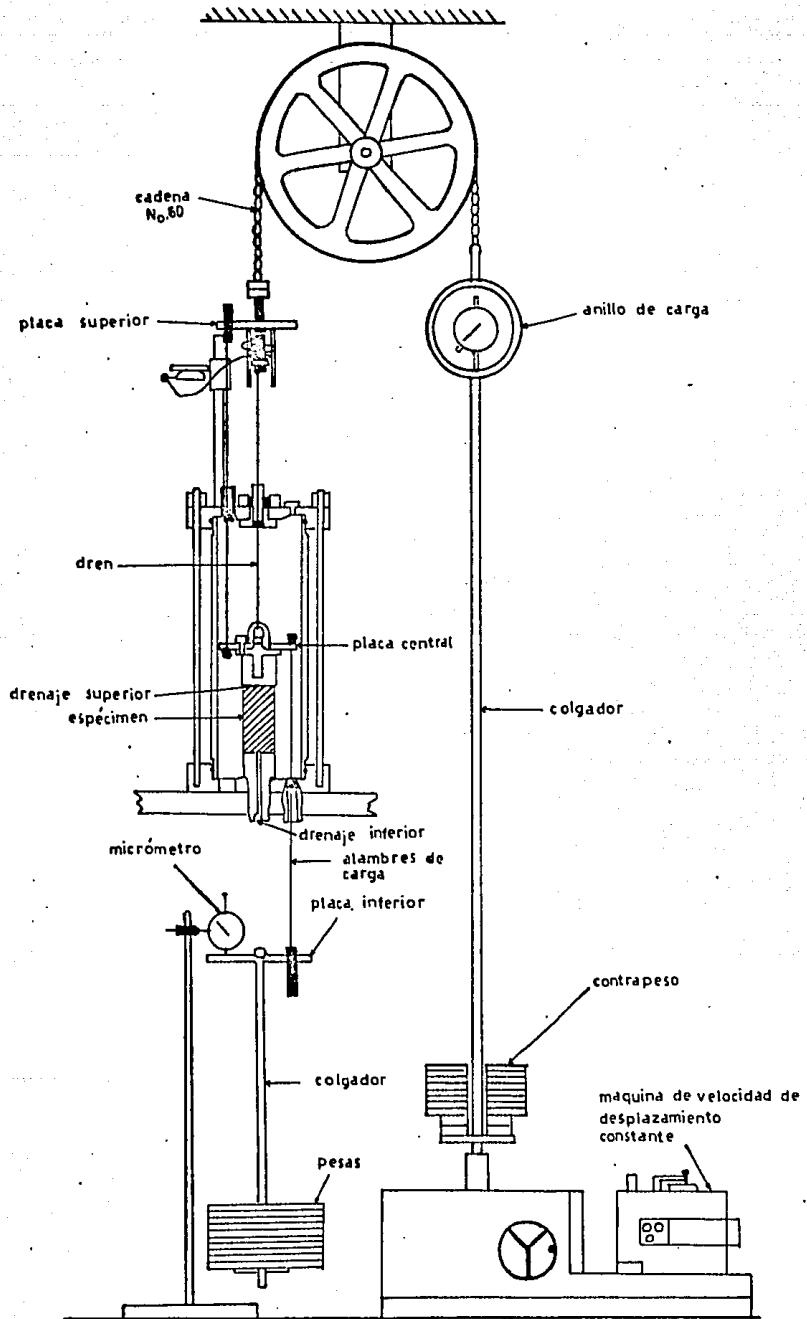


Fig. B5 Sistema de Carga.



Fig.B6 Fotografía de un espécimen
con una deformación axial del
10% durante una prueba CU.

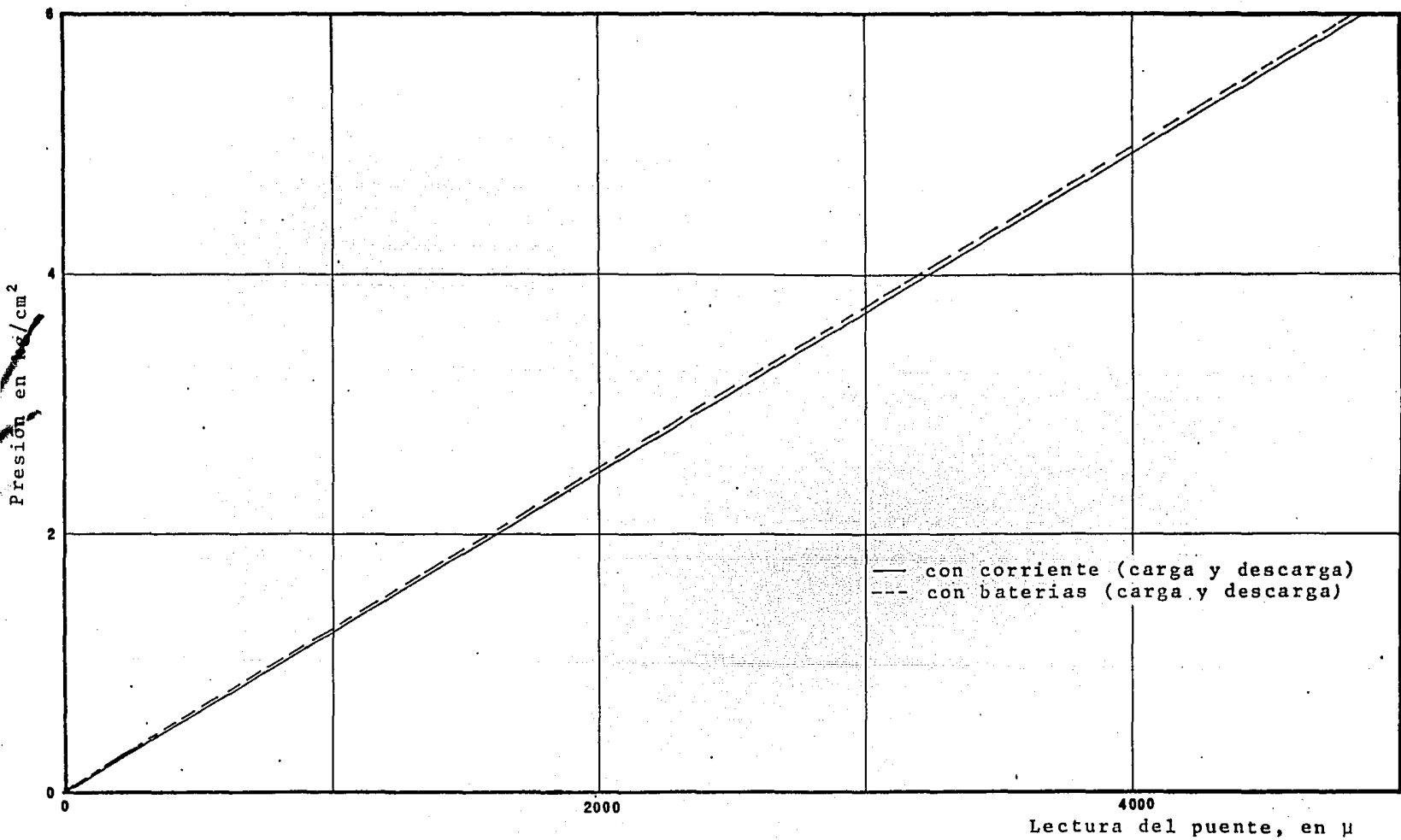


Fig.B7 Curva de Calibración del Transductor Statham con el Puente Vishay.

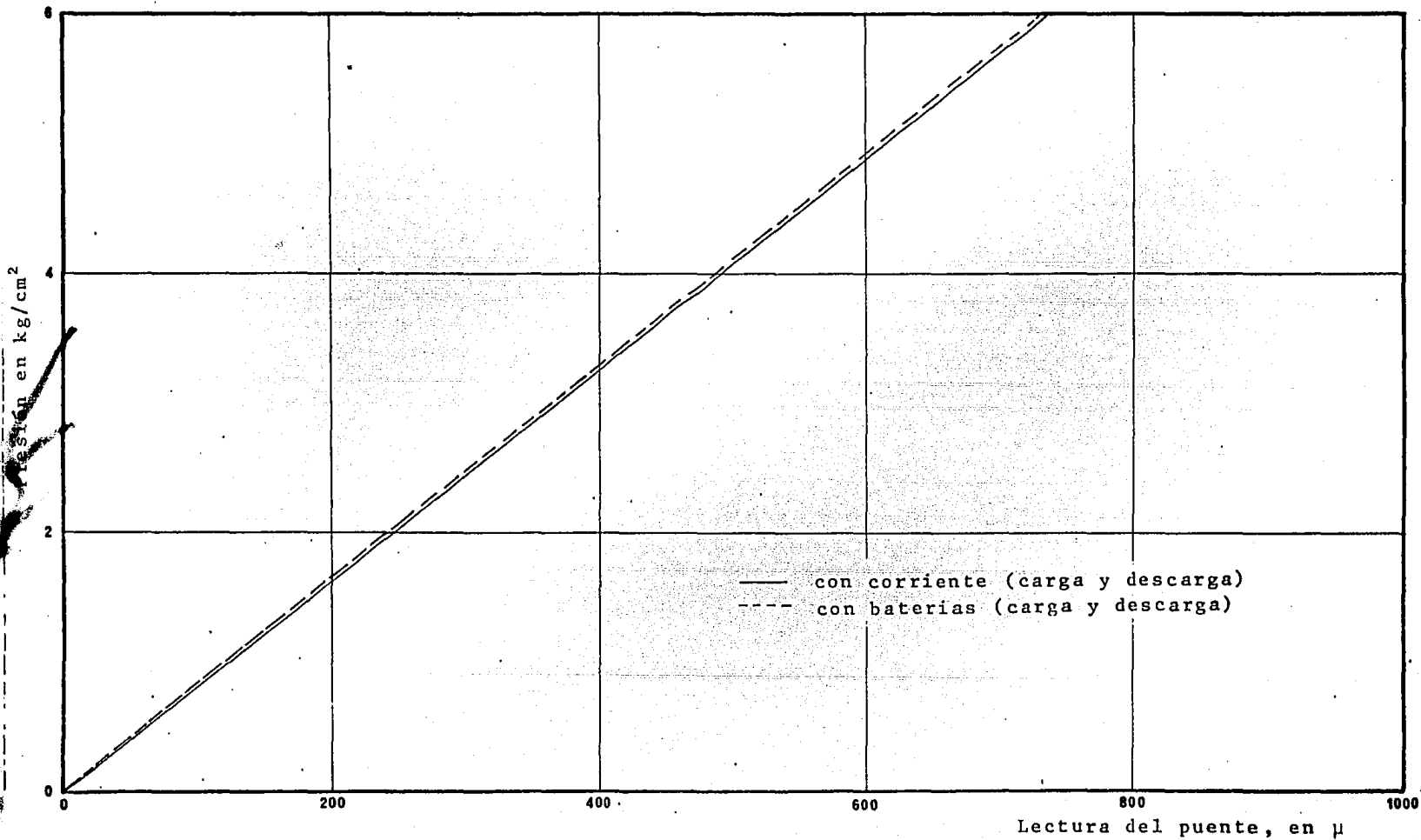


Fig.B8 Curva de Calibración del Transductor Precise Sensors con el Puente Vishay.

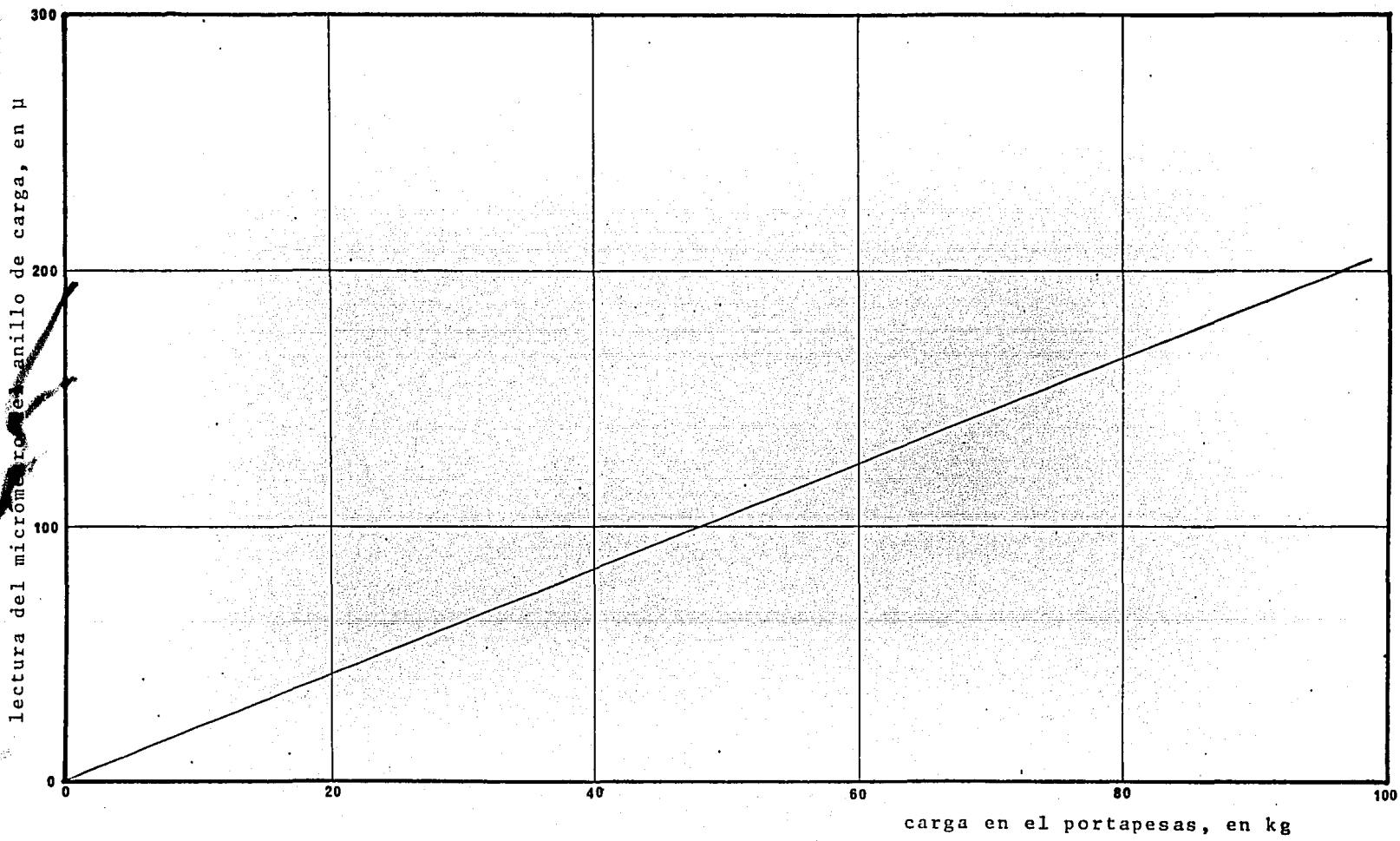


Fig.B9 Calibración del Anillo de Carga.

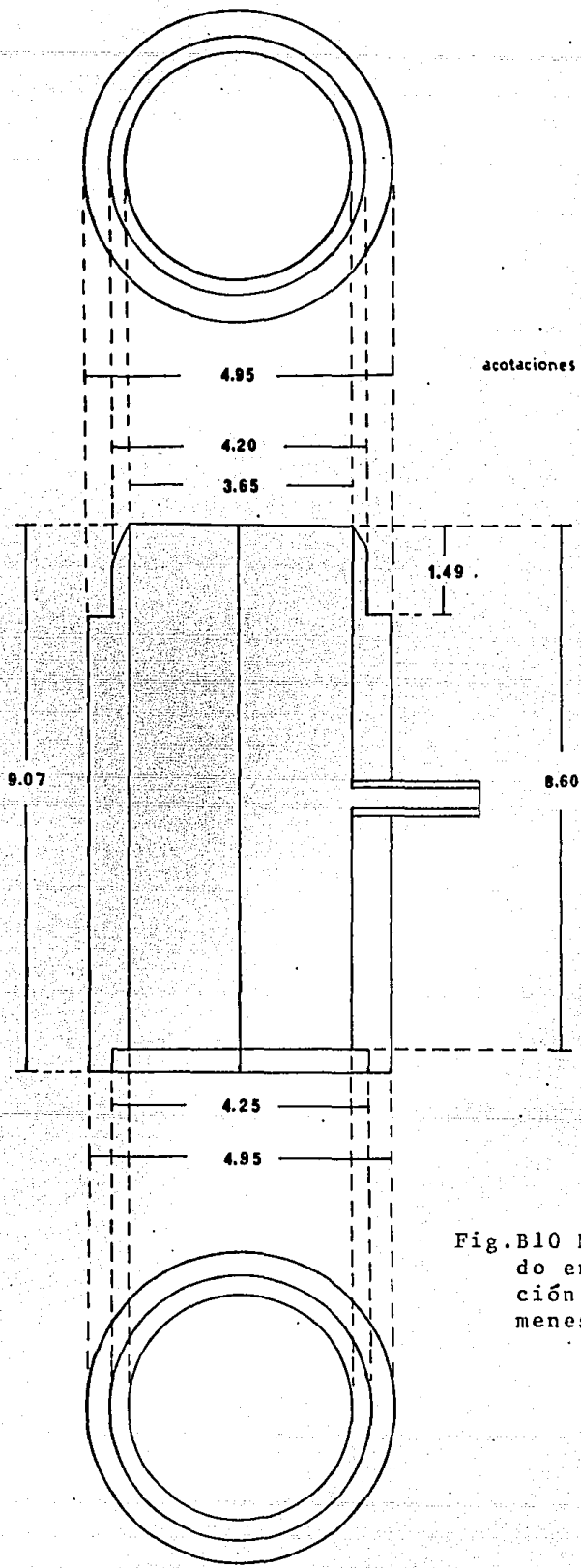


Fig.B10 Molde Utilizado en la Fabricación de los especímenes.

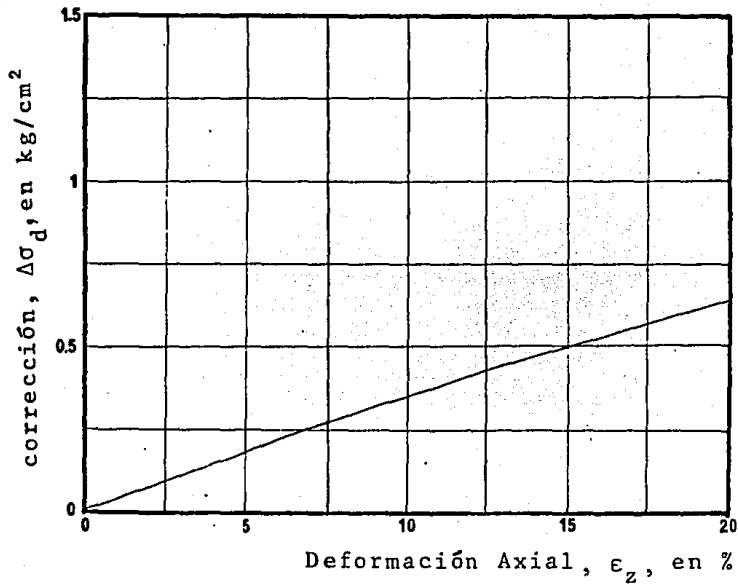


Fig.B11 Corrección del Esfuerzo Desviador por Efecto de la Membrana.

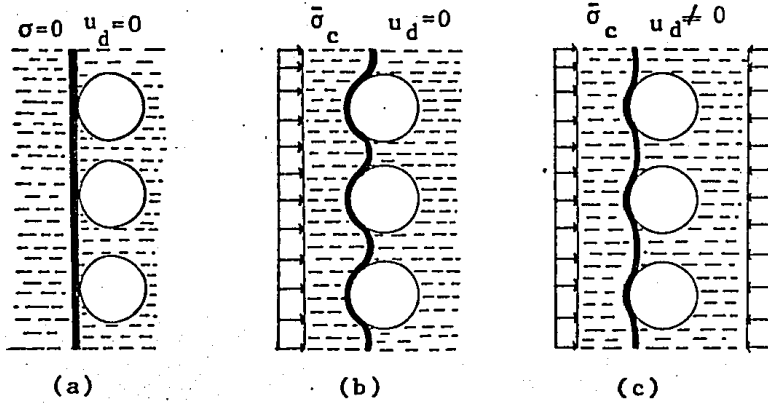


Fig.B12 Esquemas Ilustrativos de la Penetración de la Membrana en la Superficie Lateral de la Muestra.

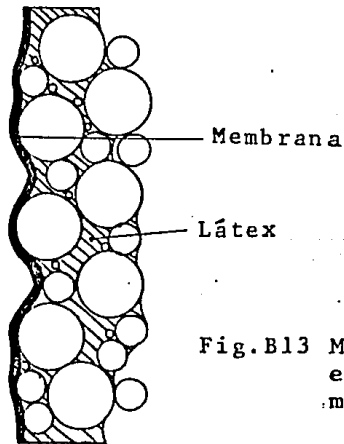


Fig.B13 Membrana con Látex en el Interior del Espécimen.

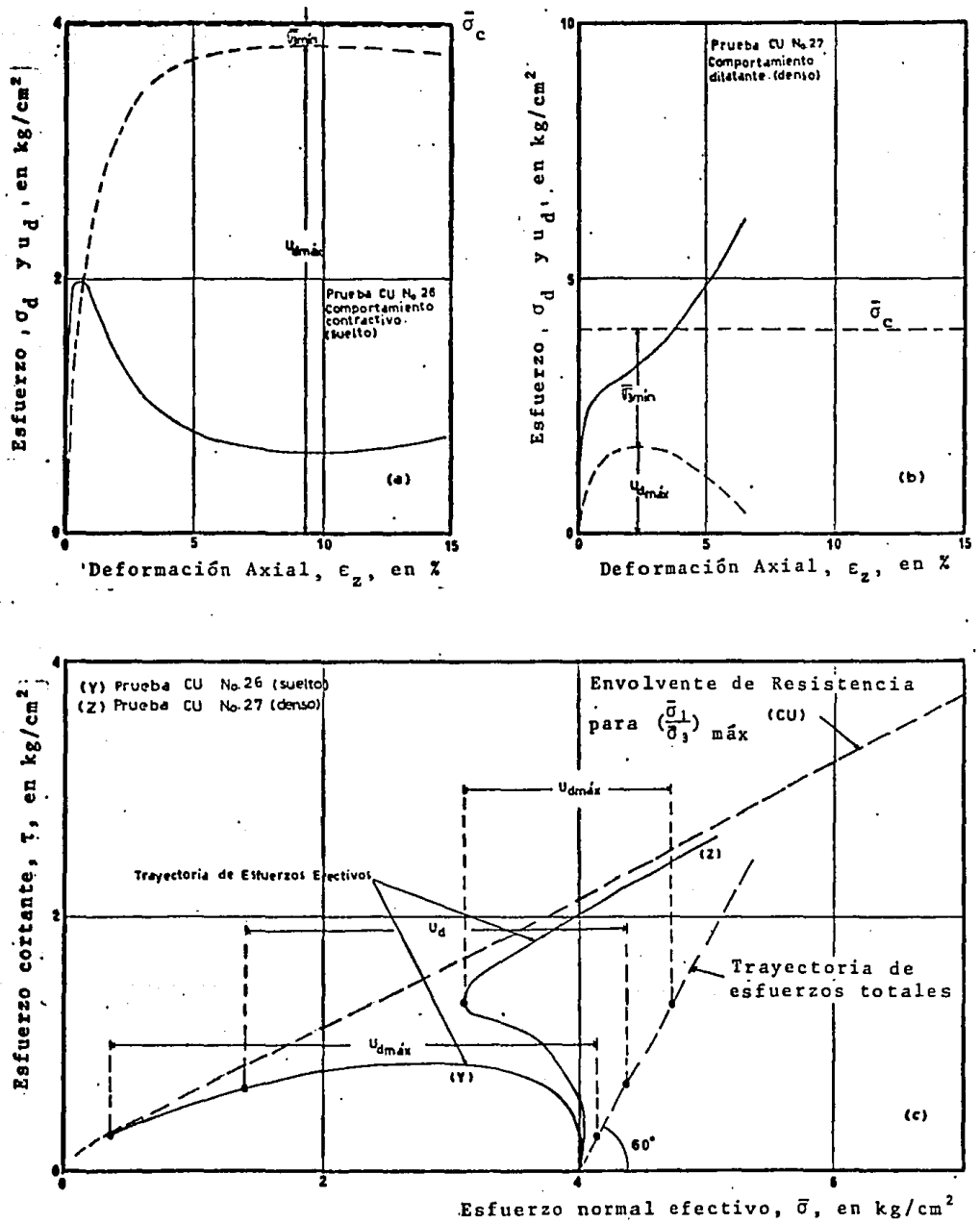


Fig.B14 Curvas Esfuerzo-Deformación Axial y Trayectorias de Esfuerzos Típicas de Pruebas CU.

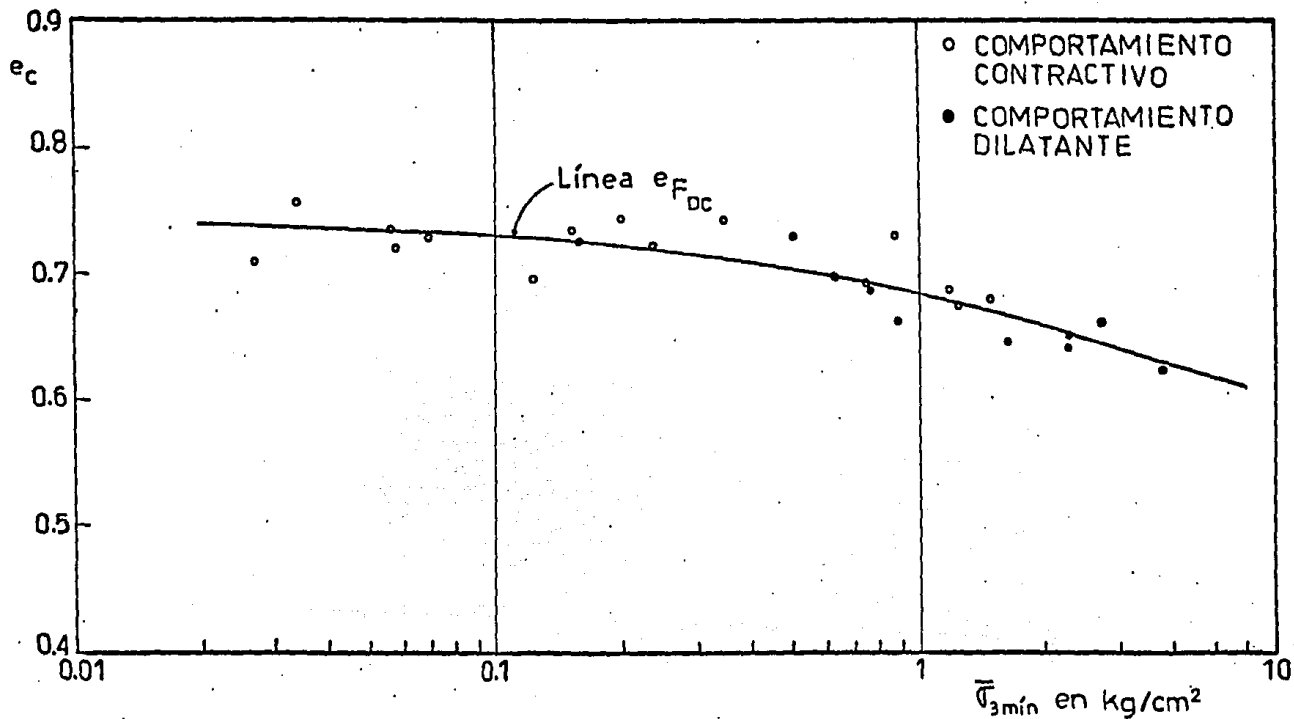


Fig. B15 Línea $e_{F_{DC}}$

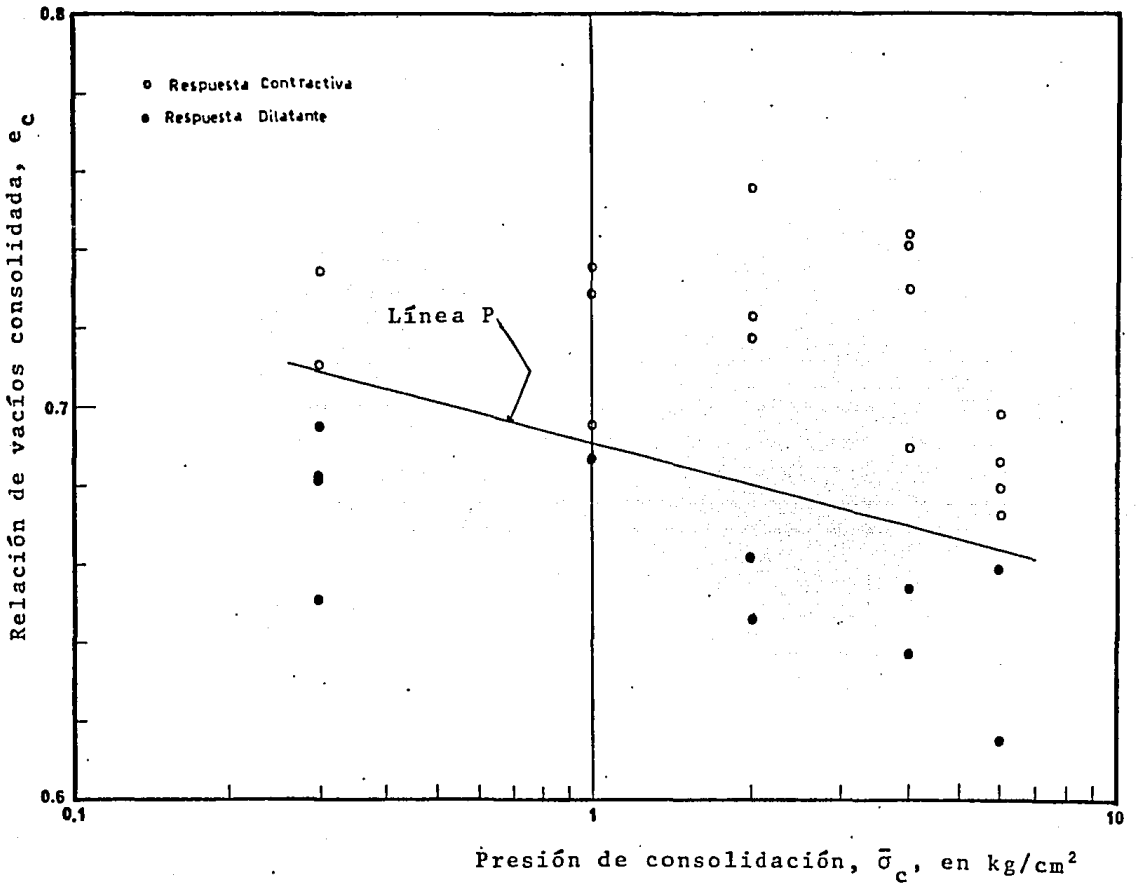


Fig. B16 Línea P.

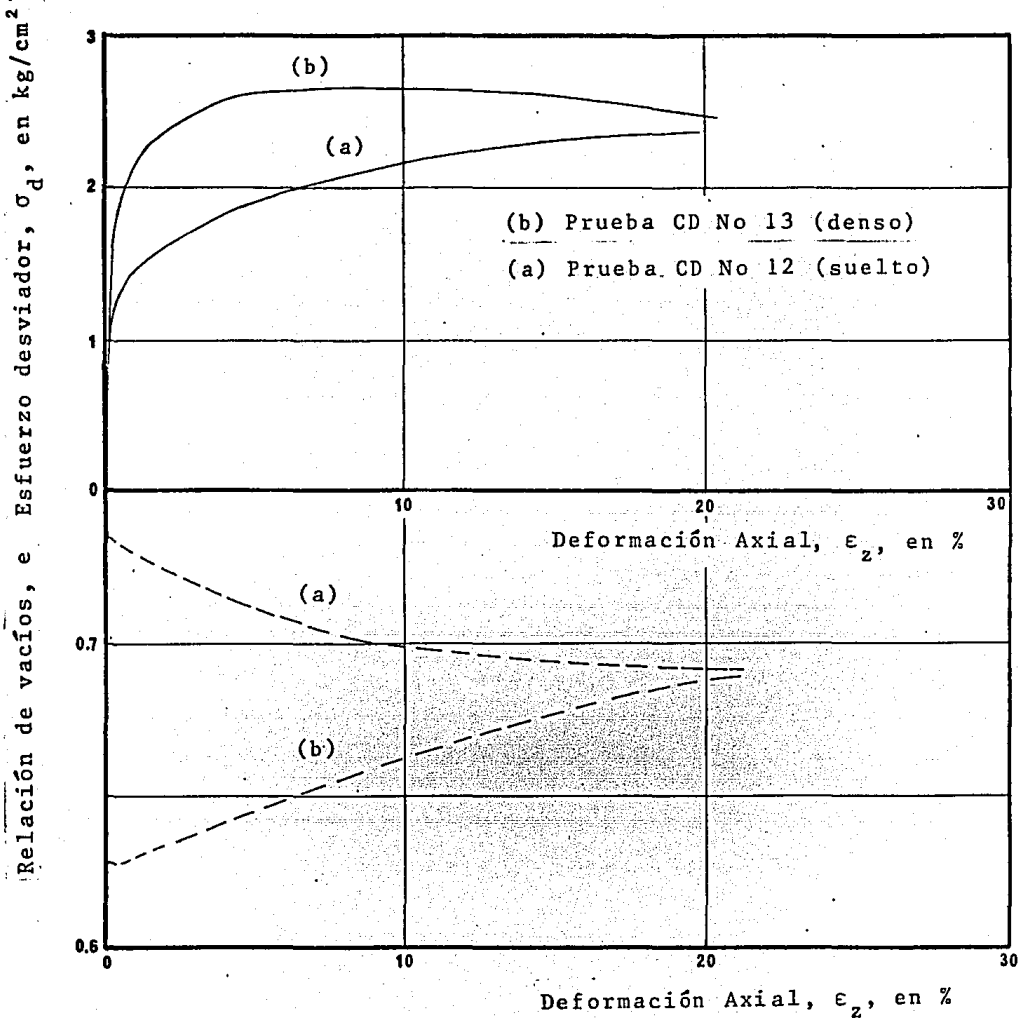


Fig.B17 Curvas Típicas Esfuerzo-Deformación Axial en Pruebas CD.

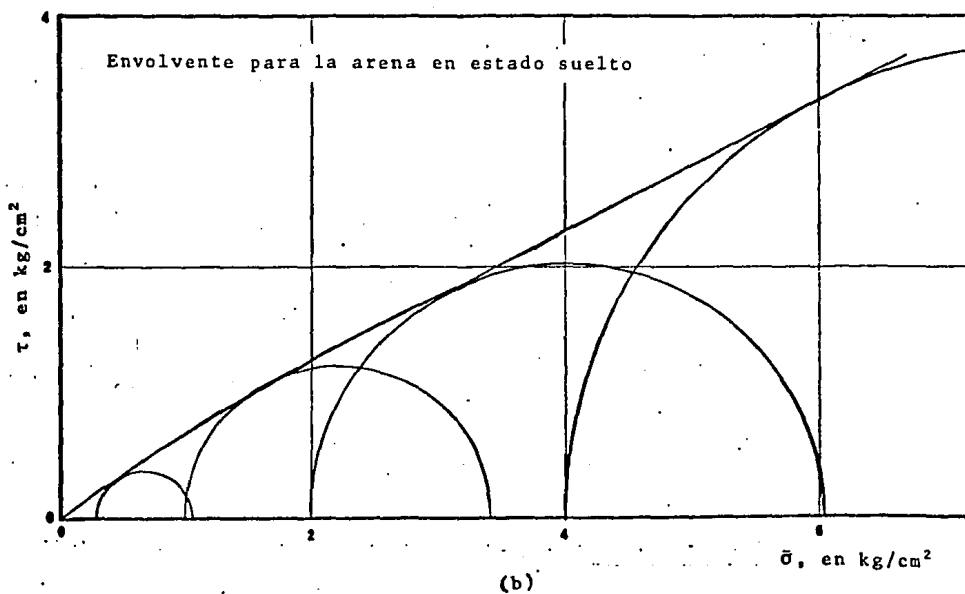
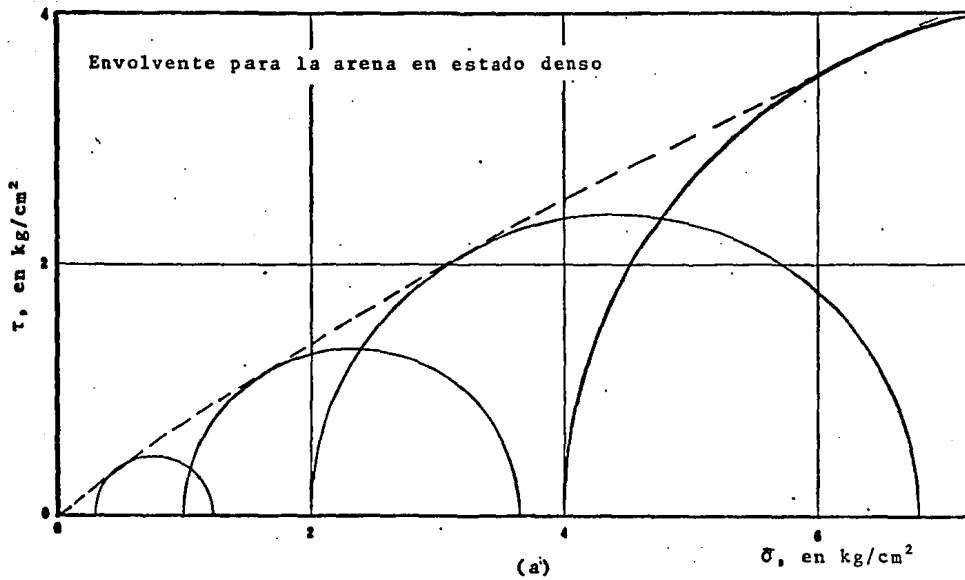


Fig.B18 Envolventes de Resistencia en Pruebas CD.

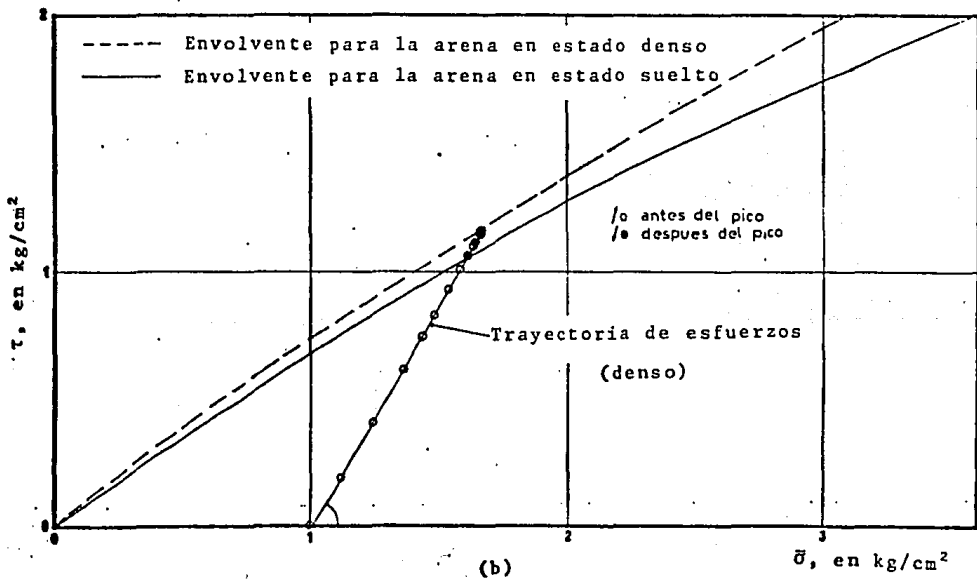
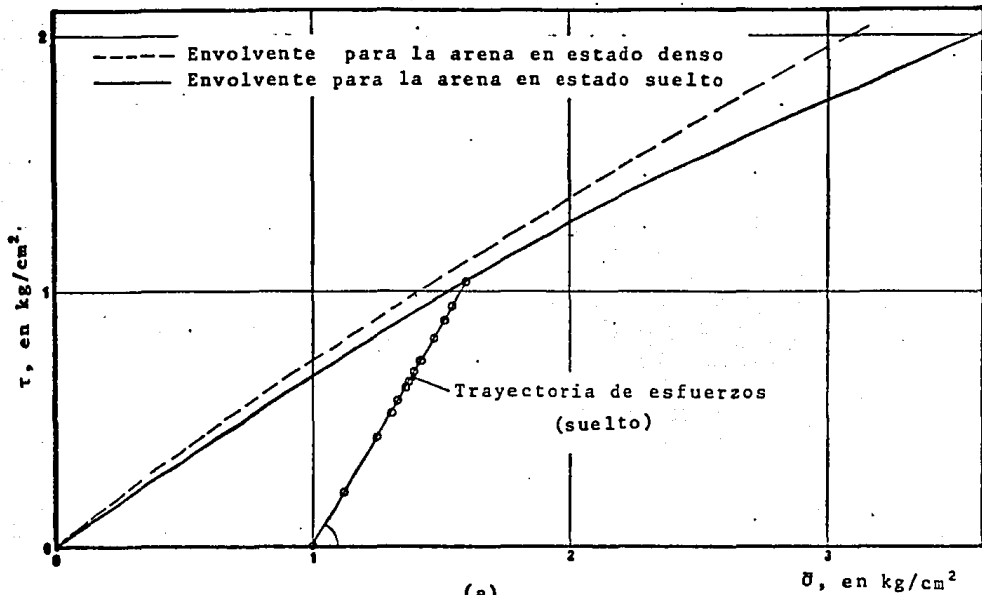
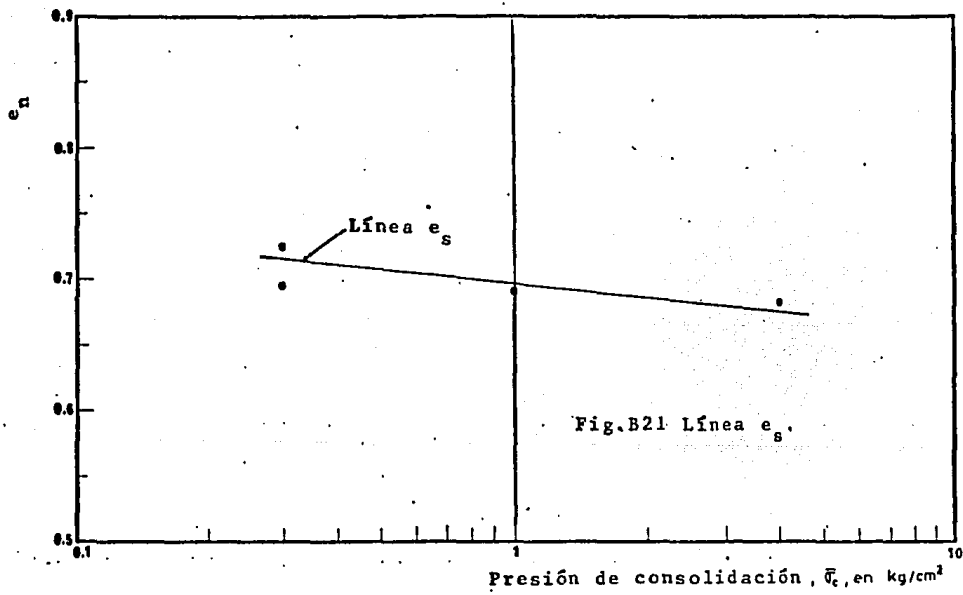
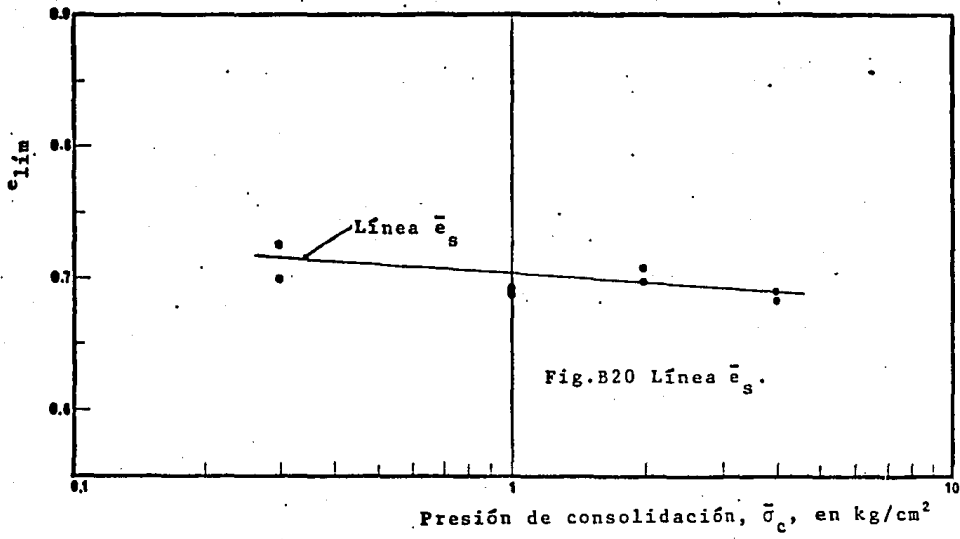
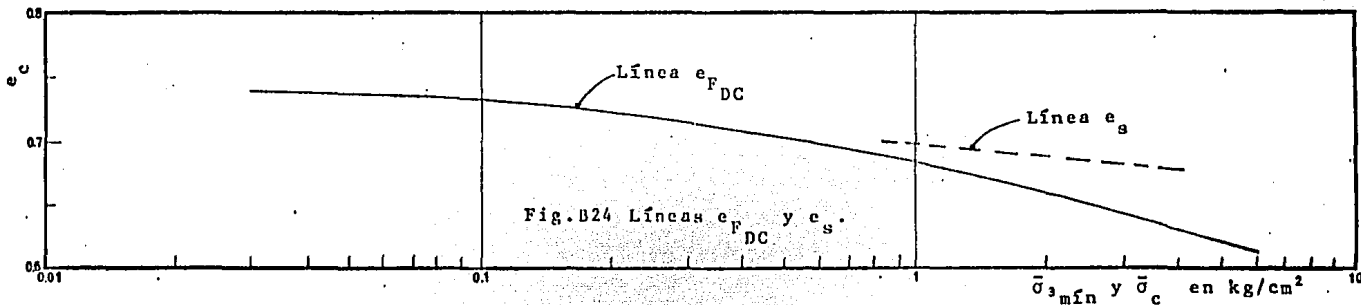
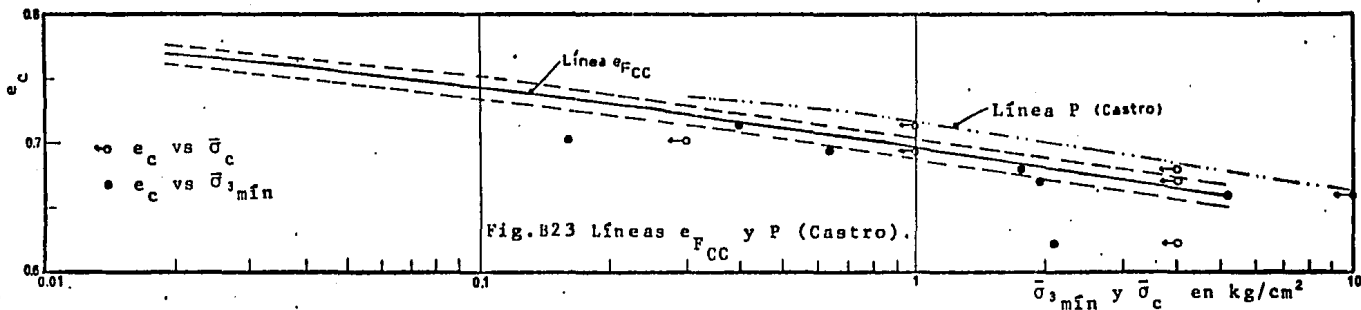
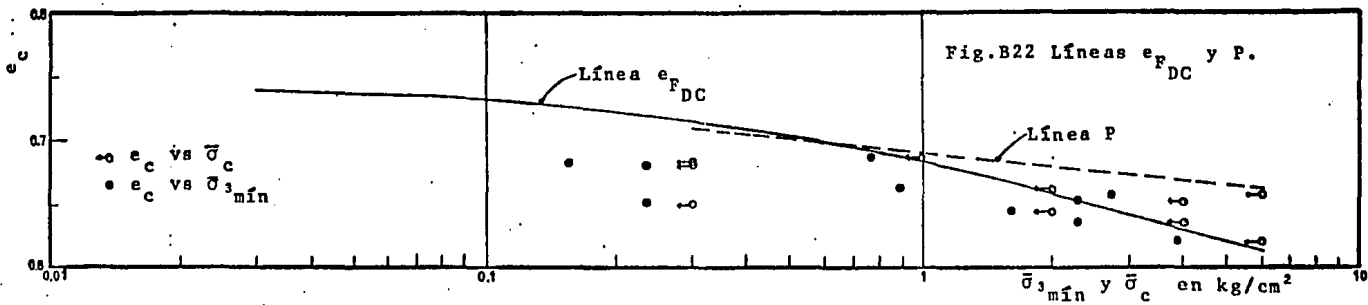
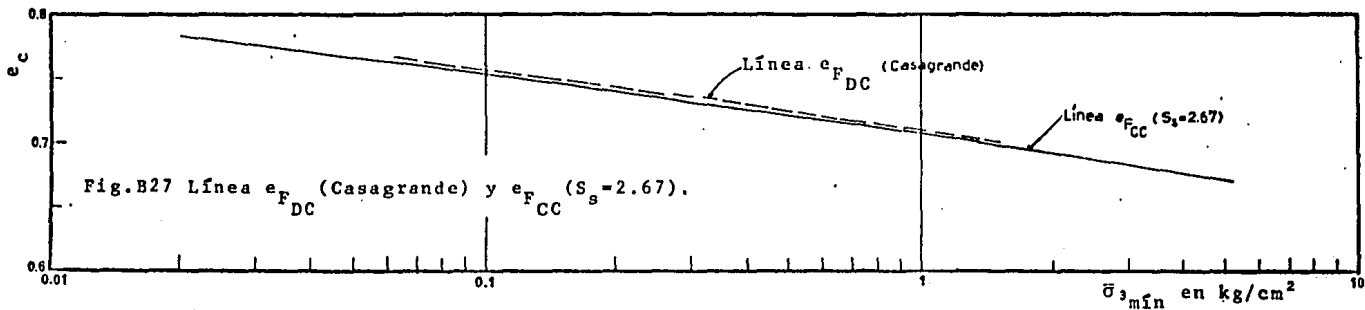
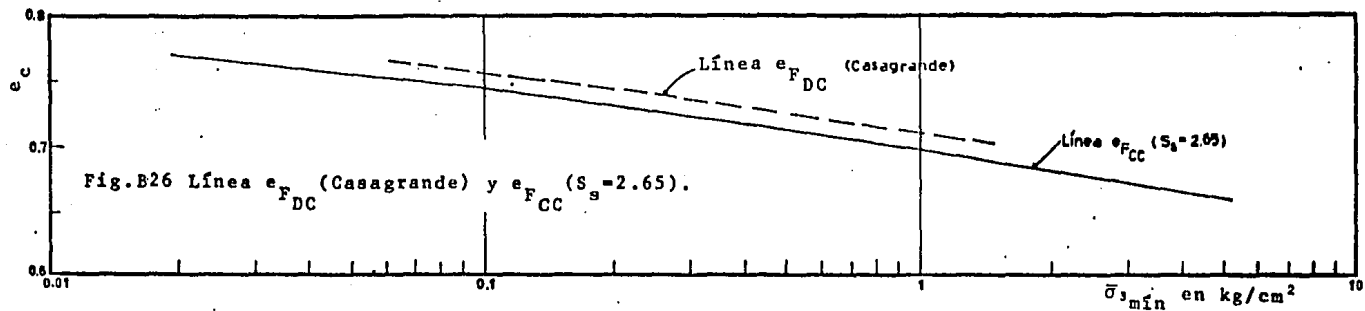
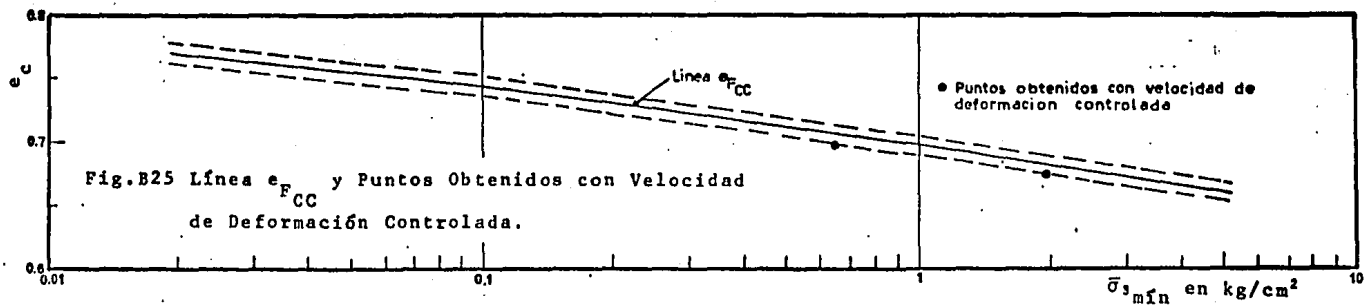


Fig.B19 Trayectorias de Esfuerzos en Pruebas CD.







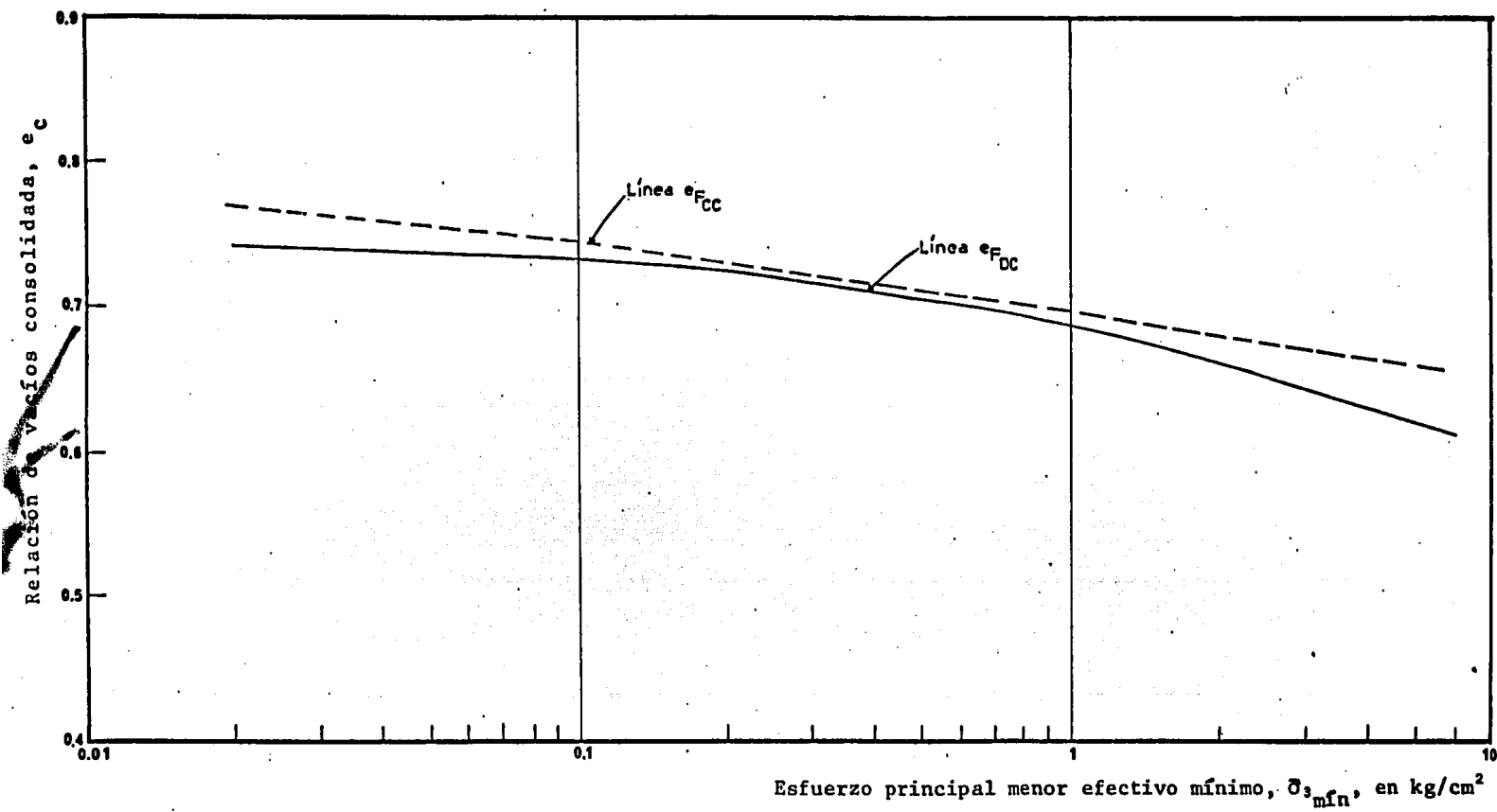


Fig. B28 Líneas e_{FDC} y e_{FCC} .

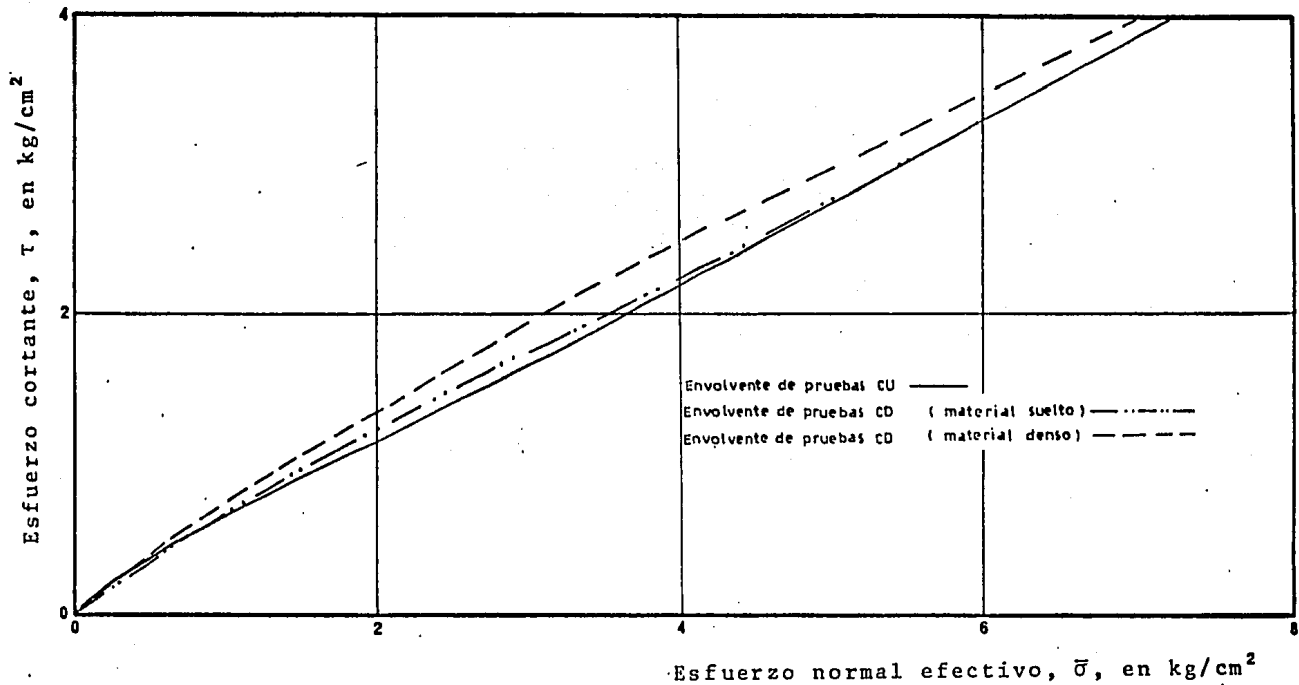


Fig.B29 Envoltentes de Resistencia de Pruebas CU y CD.

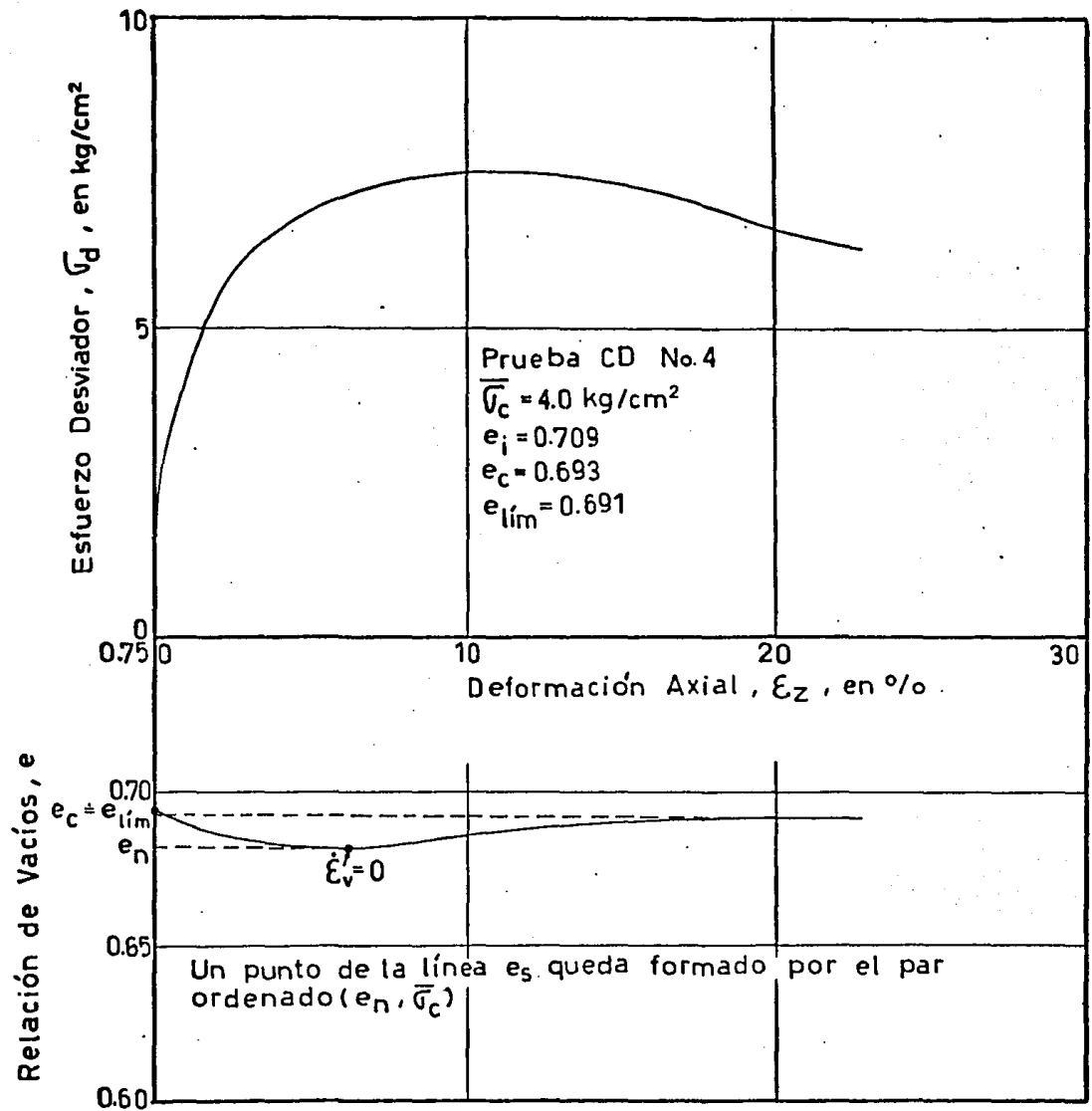


Fig.B30 ESQUEMA PARA LA OBTENCION DE UN PUNTO DE LA LINEA e_s

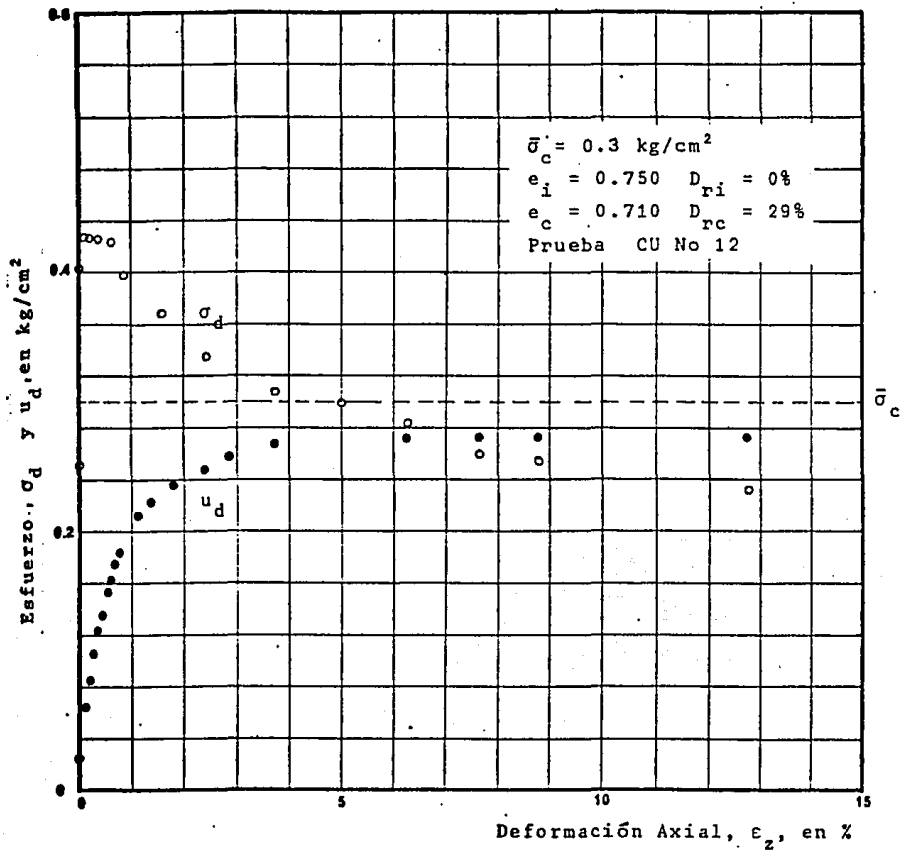


Fig.B31 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial.

(Prueba CU No.12).

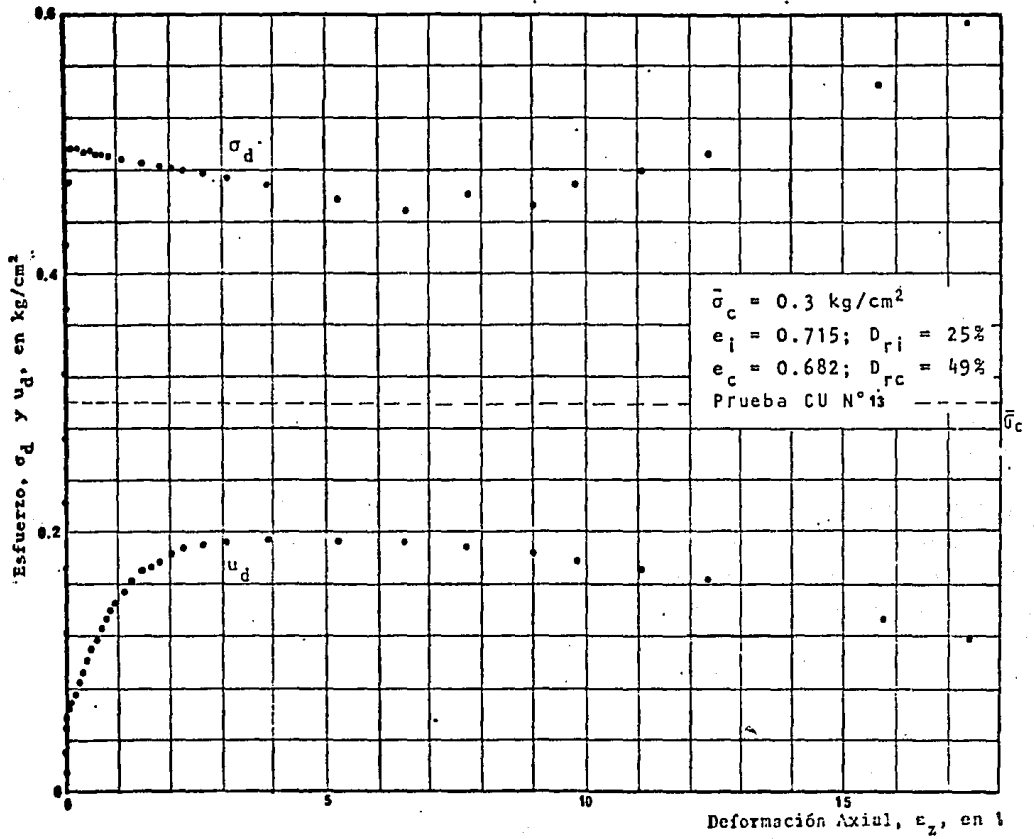


Fig. B32 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba CU No.13).

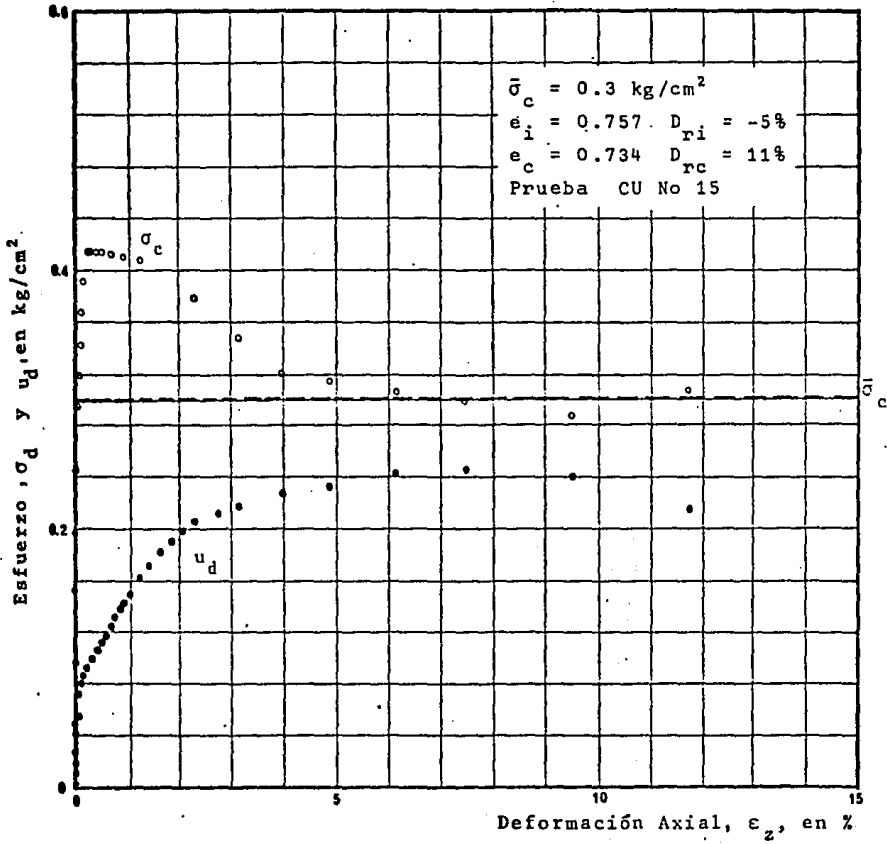


Fig. B33 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba CU No.15).

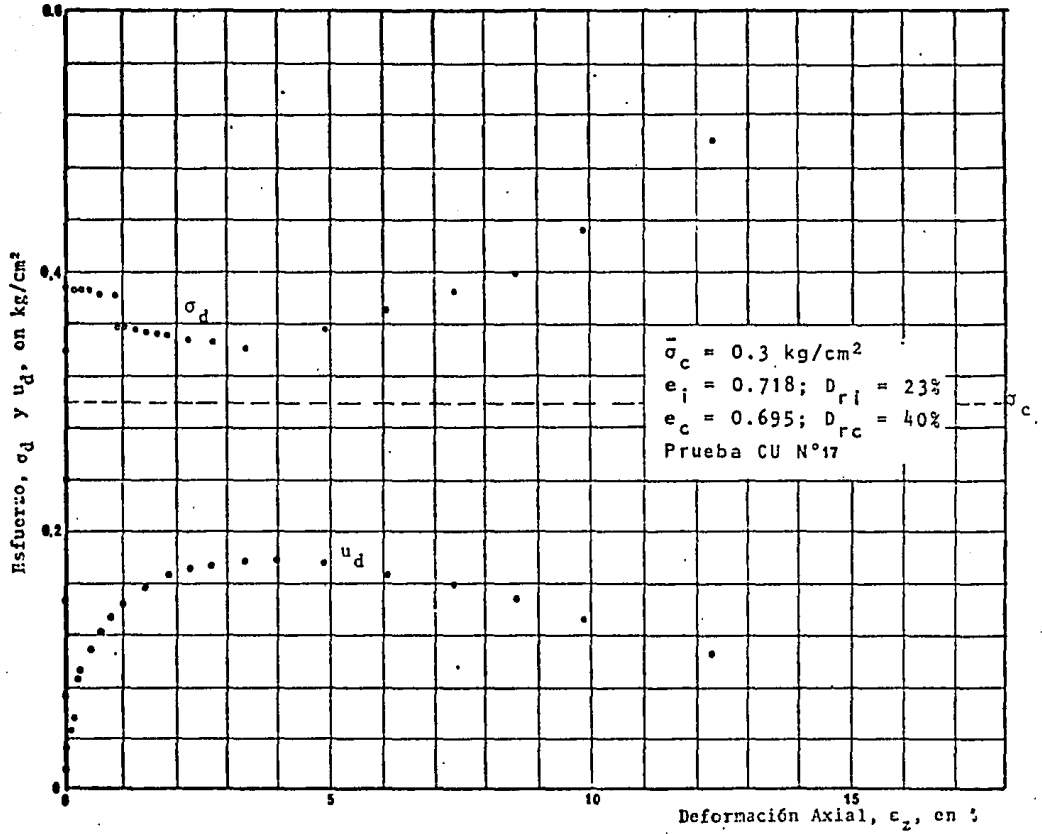


Fig. B34 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial
(Prueba CU No.17).

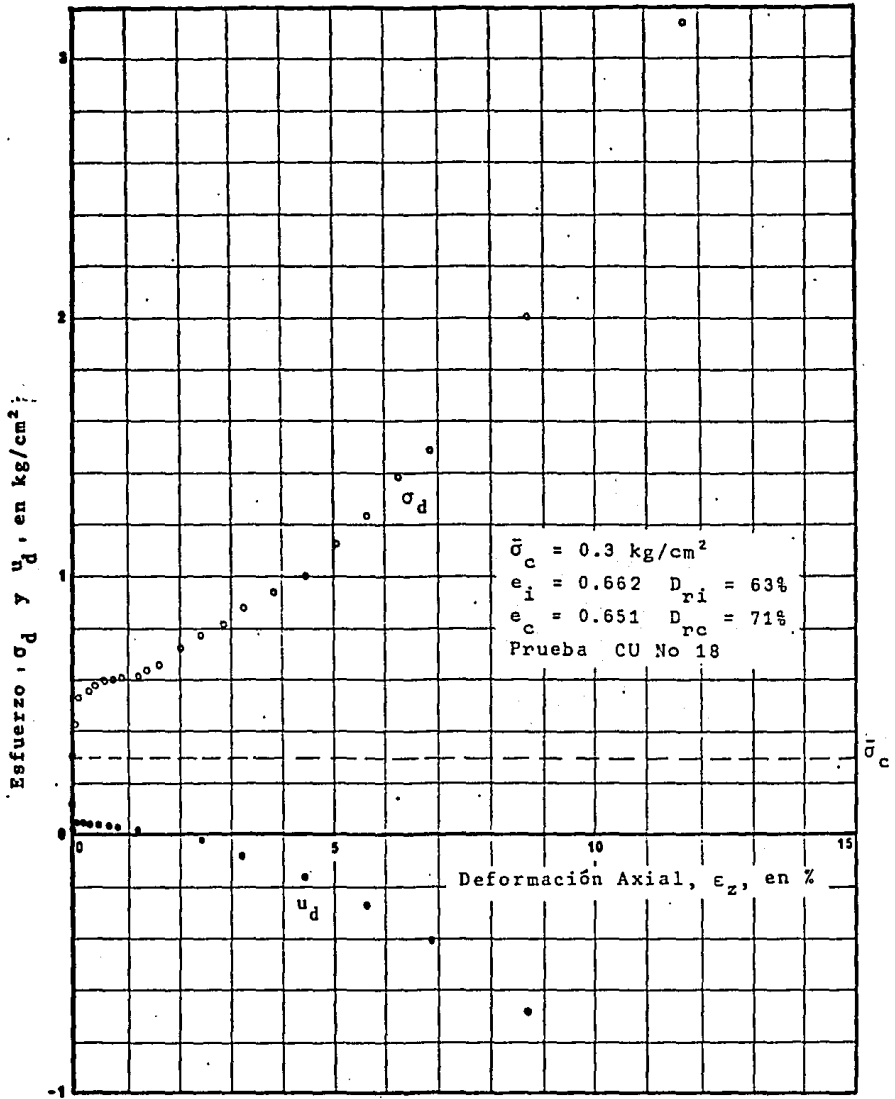


Fig. B35 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial
 (Prueba CU No. 18).

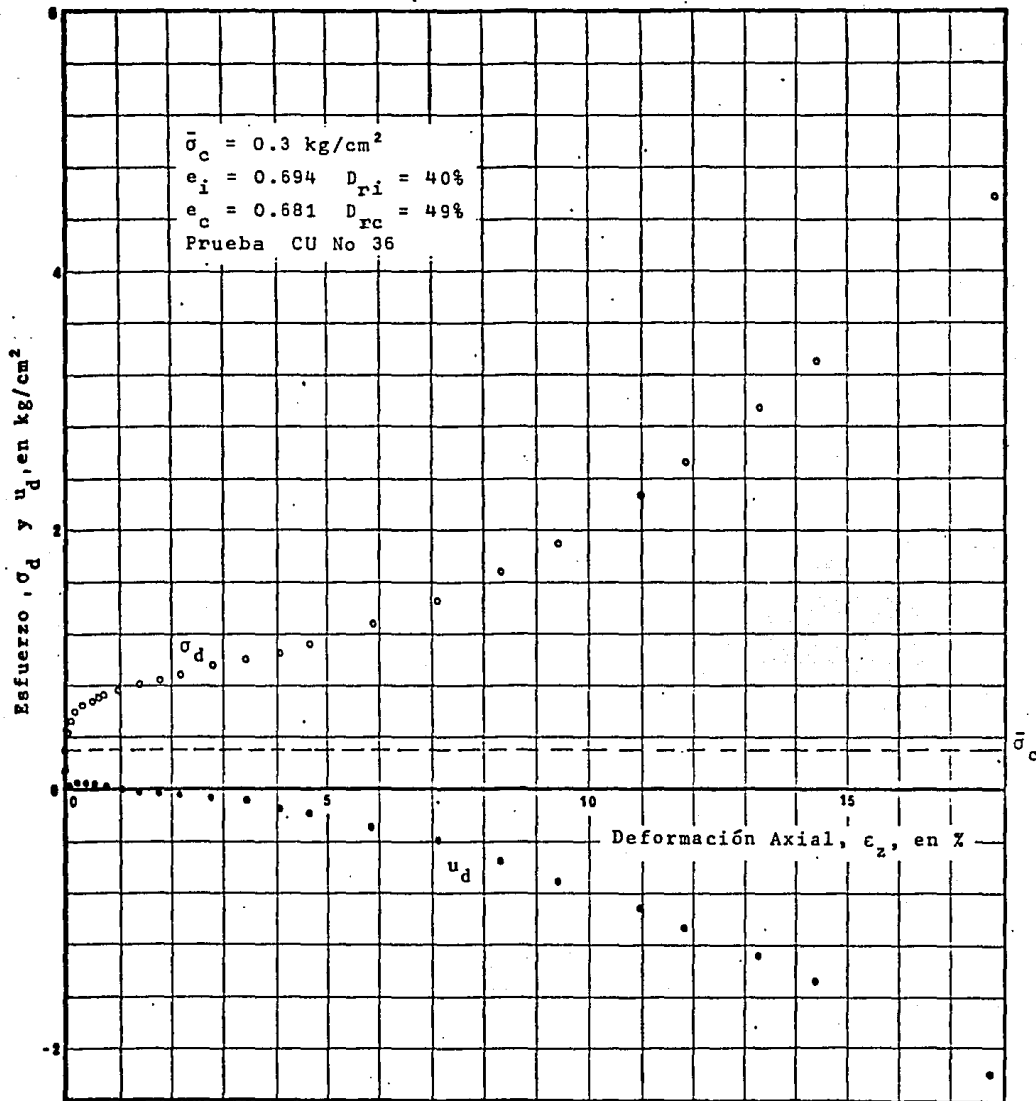


Fig. B36 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial

(Prueba CU No.36).

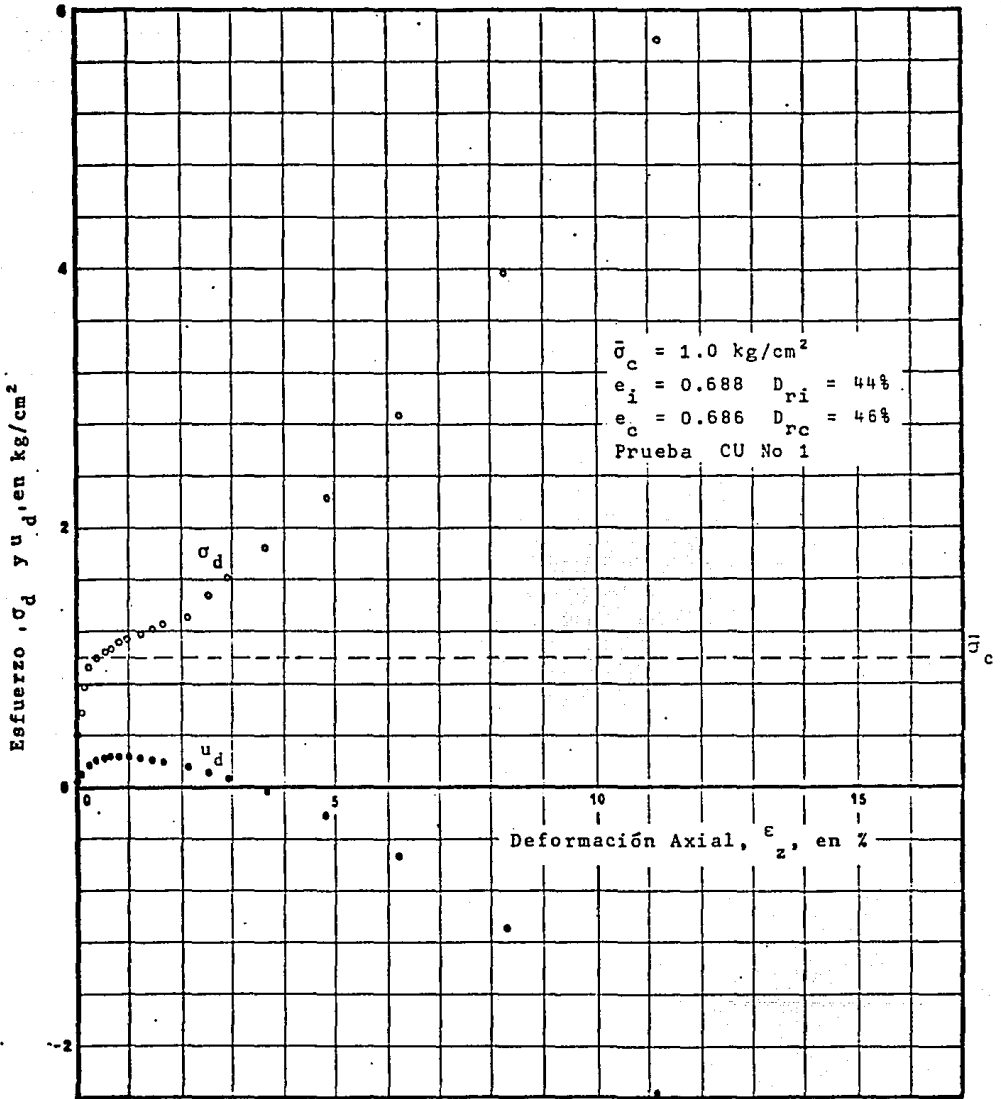


Fig. B37 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba CU No.1).

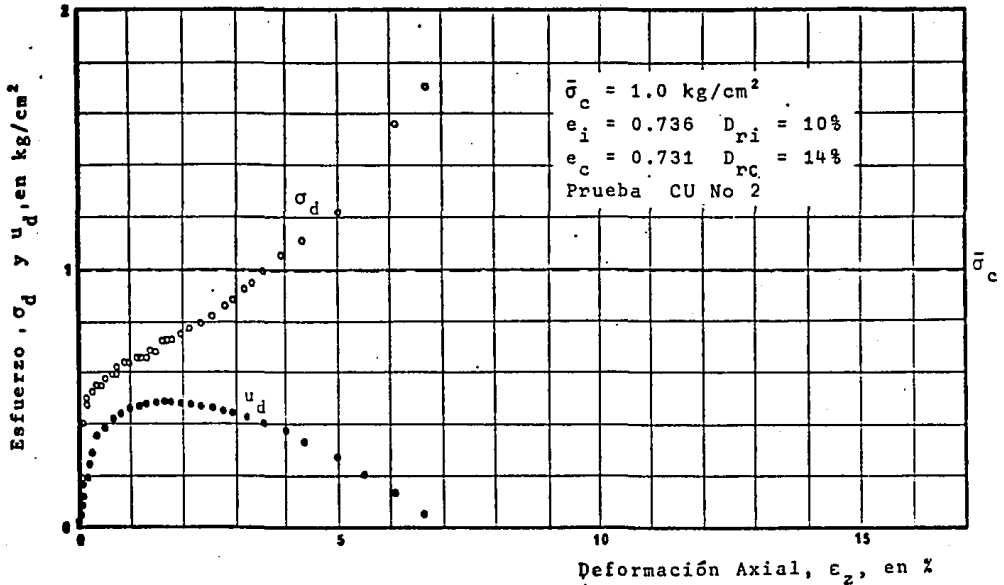


Fig.B38 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba CU No.2).

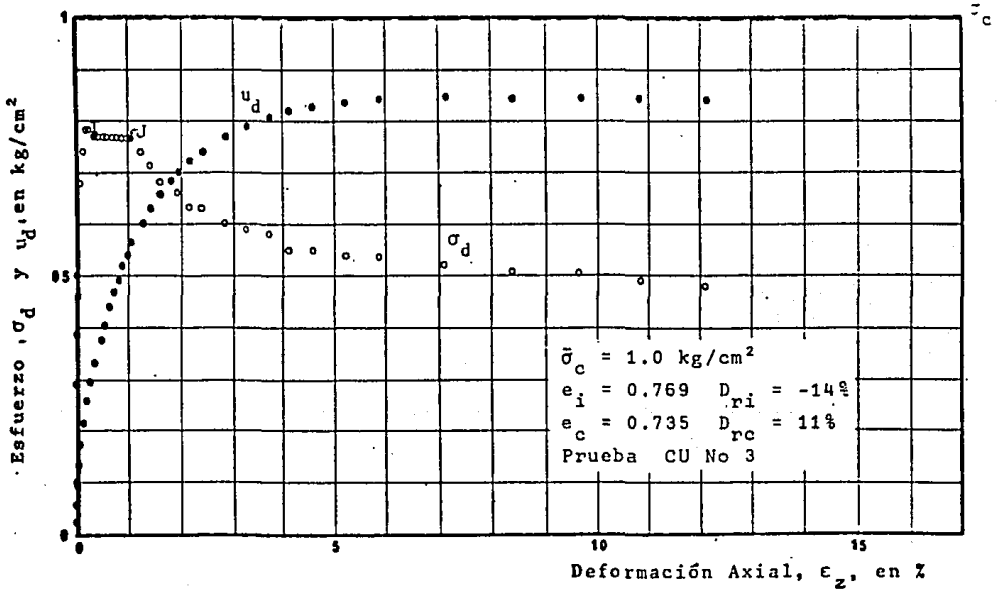


Fig.B39 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba CU No.3).

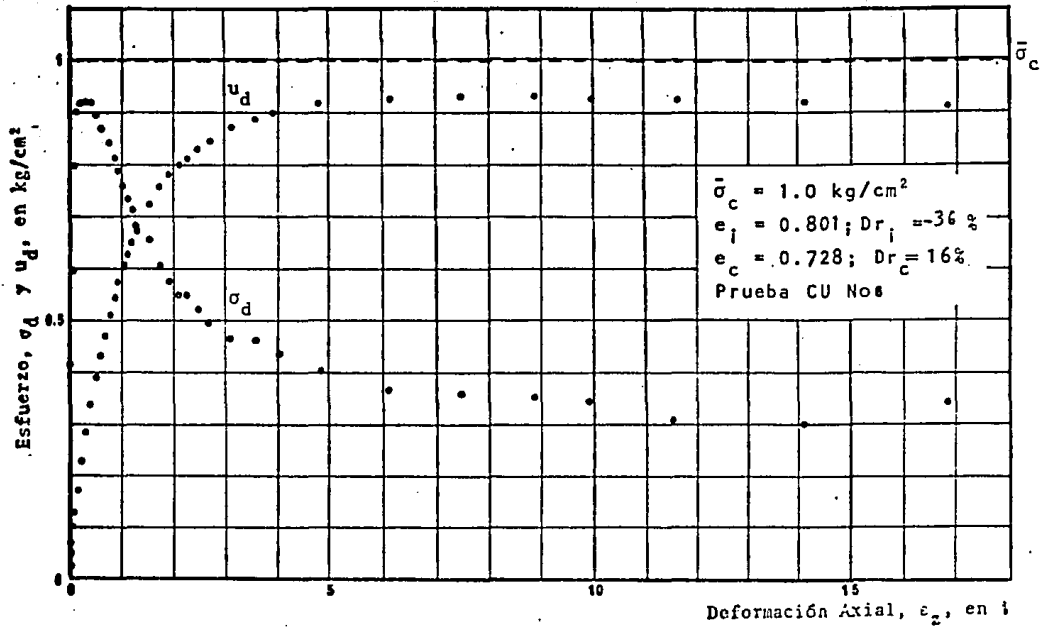


Fig.B40 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba CU No.6).

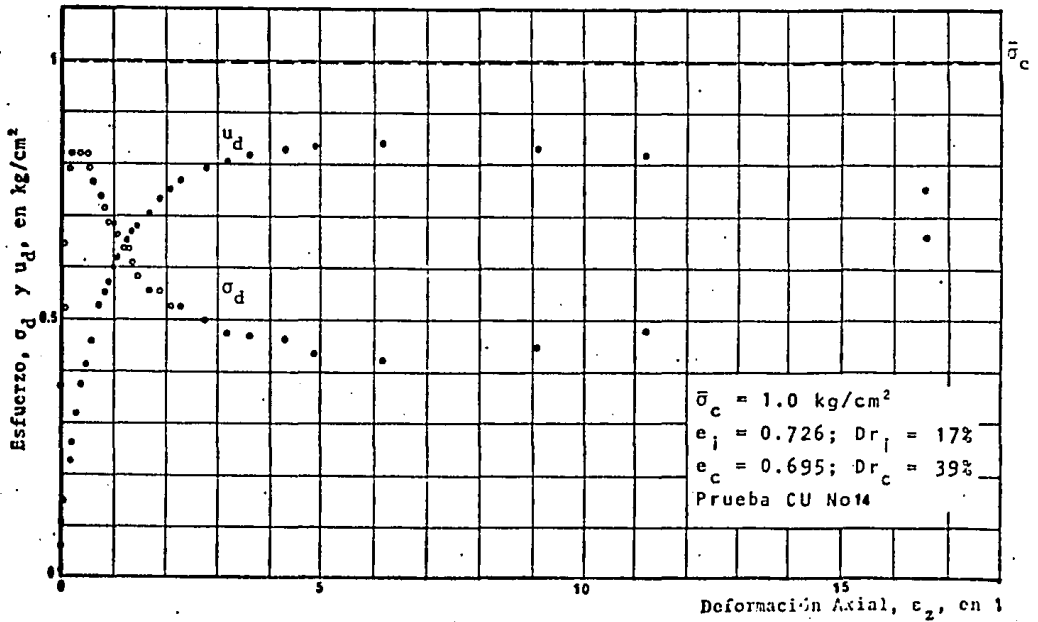


Fig.B41 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba CU No.14).

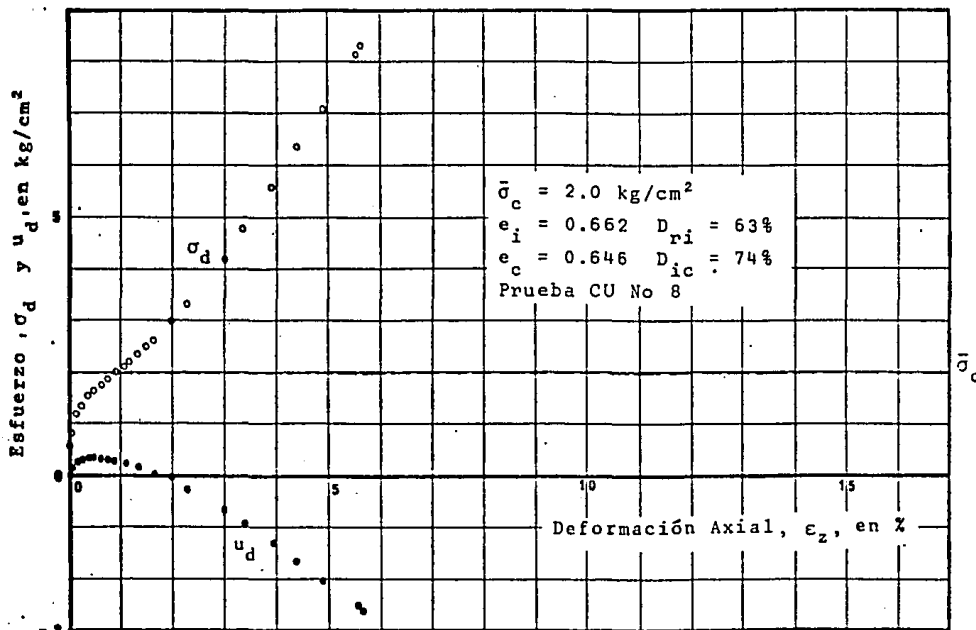
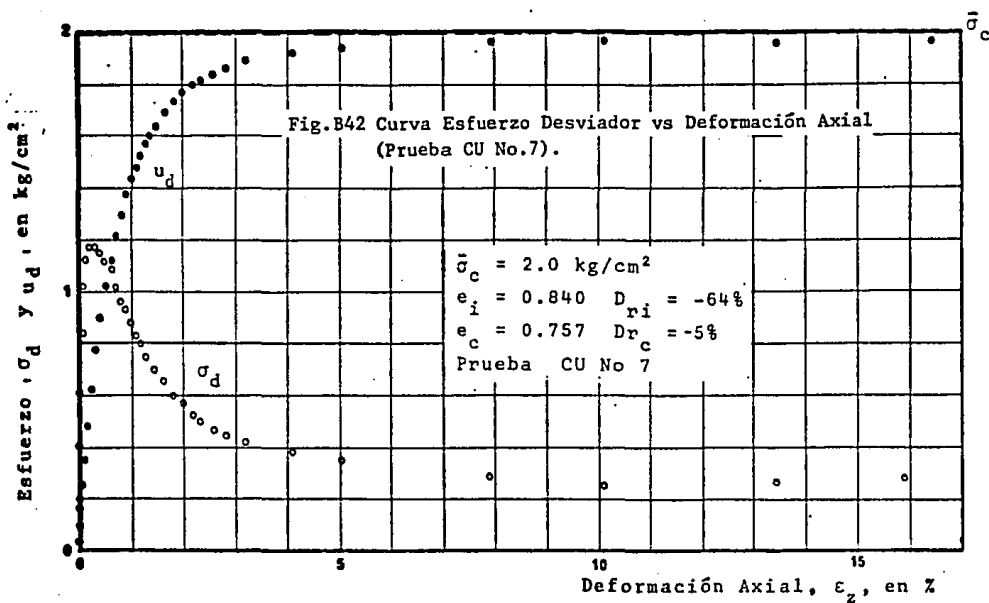


Fig.B43 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial
(Prueba CU No.8).

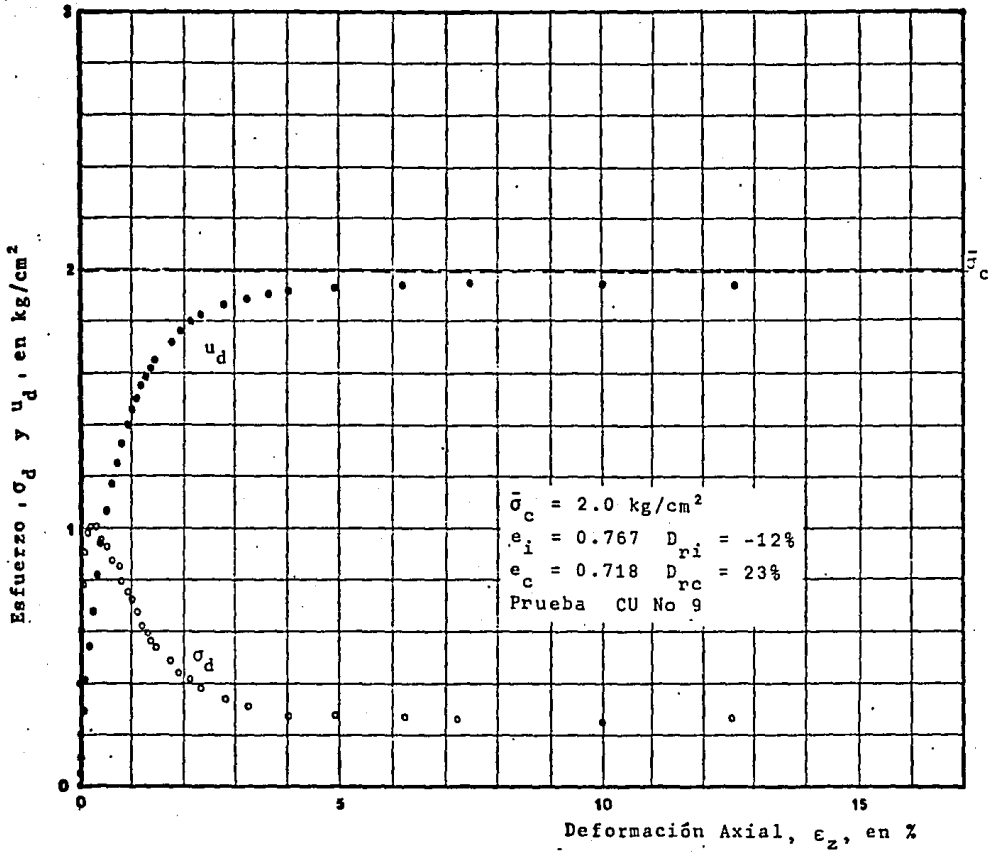


Fig.B44 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba CU No.9).

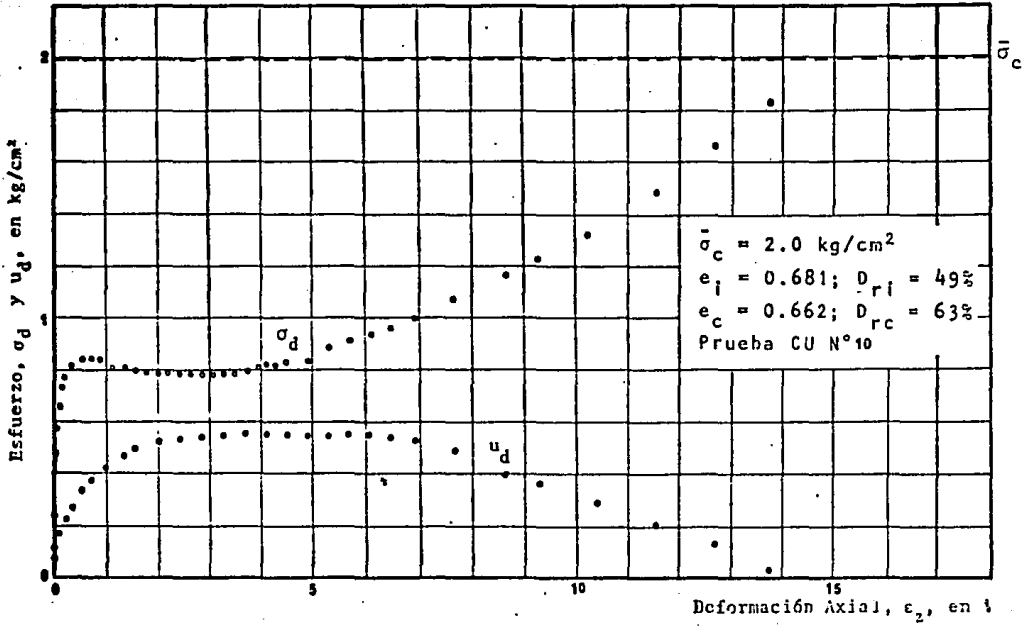


Fig.B45 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba CU No.10).

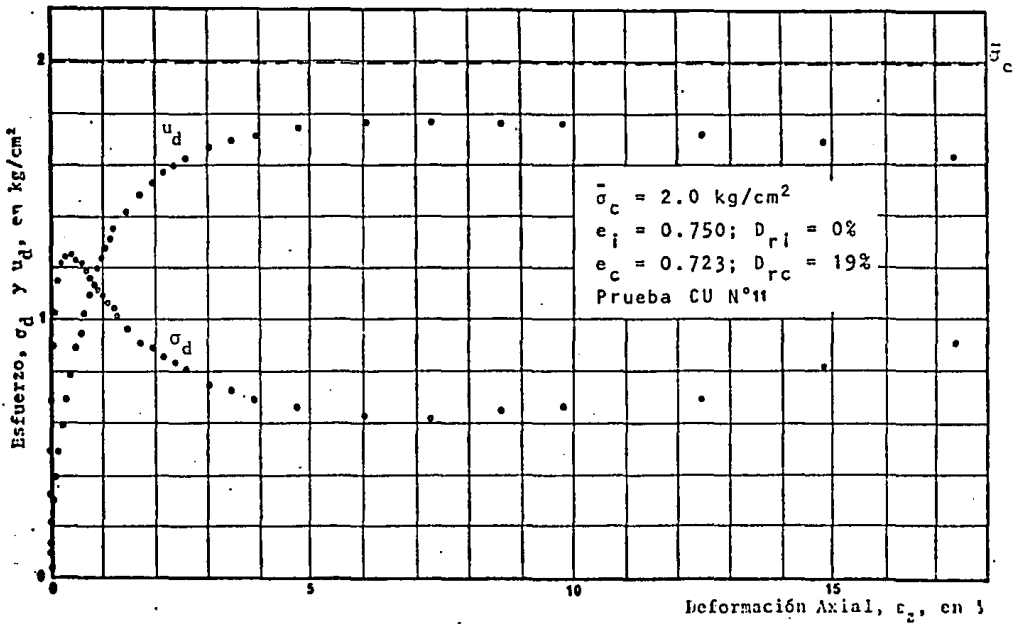


Fig.B46 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba CU No.11).

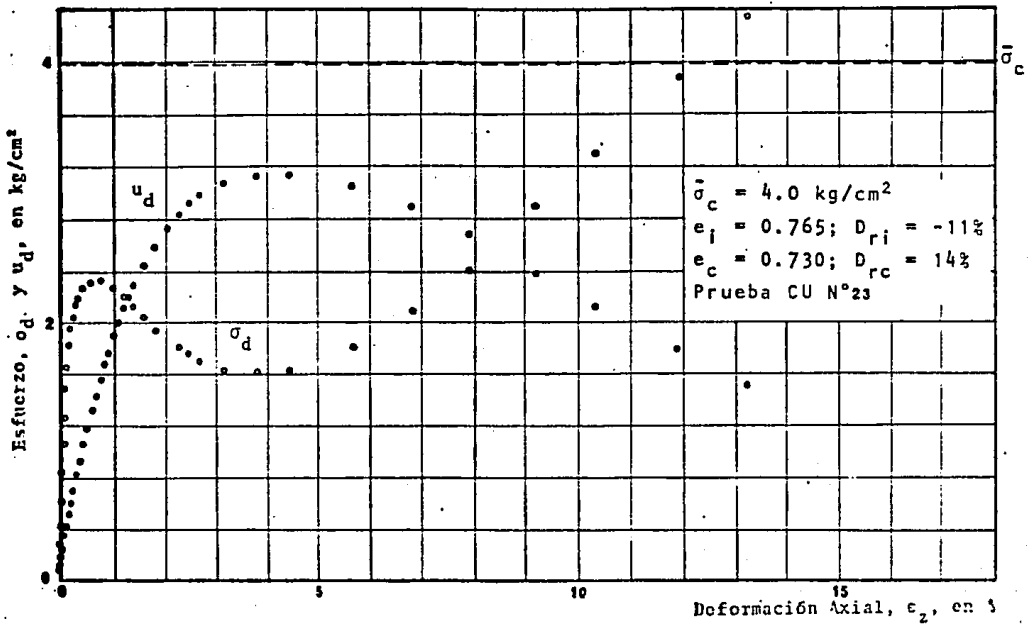


Fig.B47 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba CU No.23).

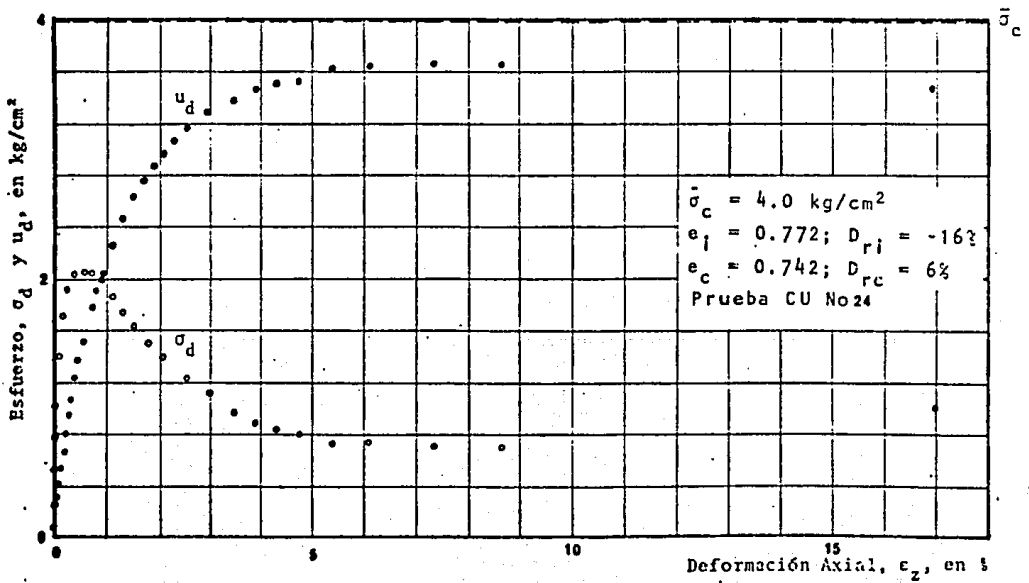


Fig.B48 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba CU No.24).

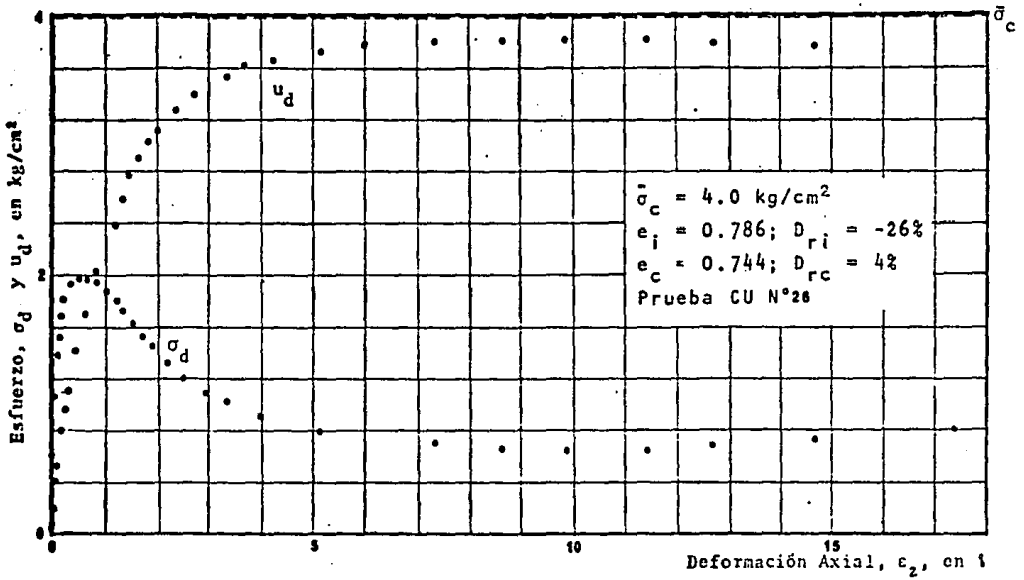


Fig.B49 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba CU No.26).

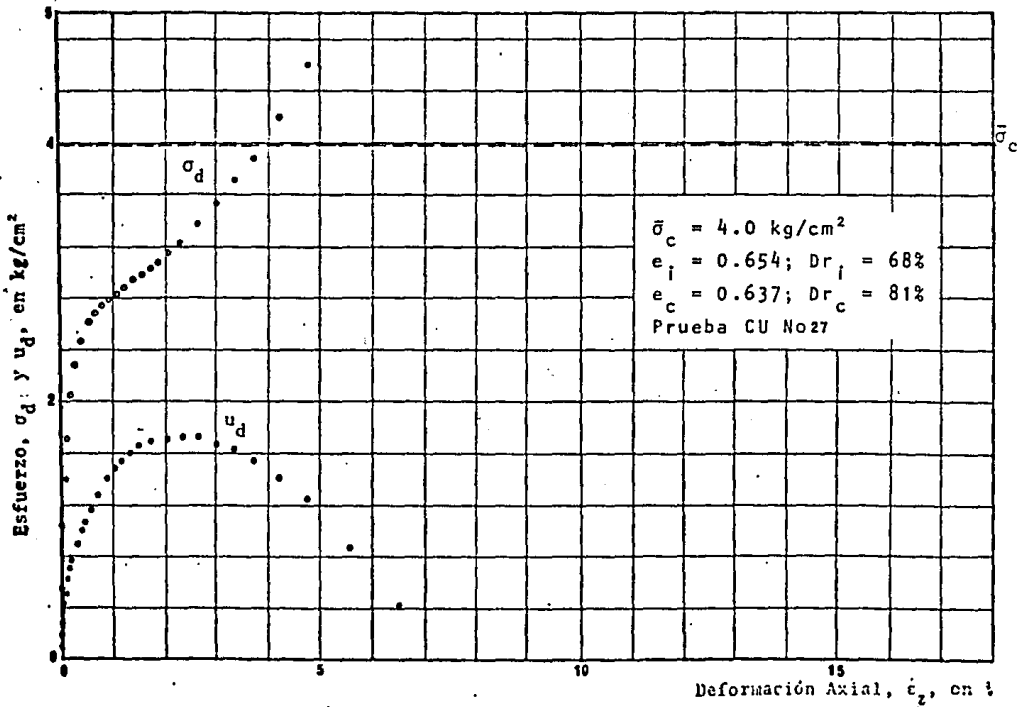


Fig.B50 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba CU No.27).

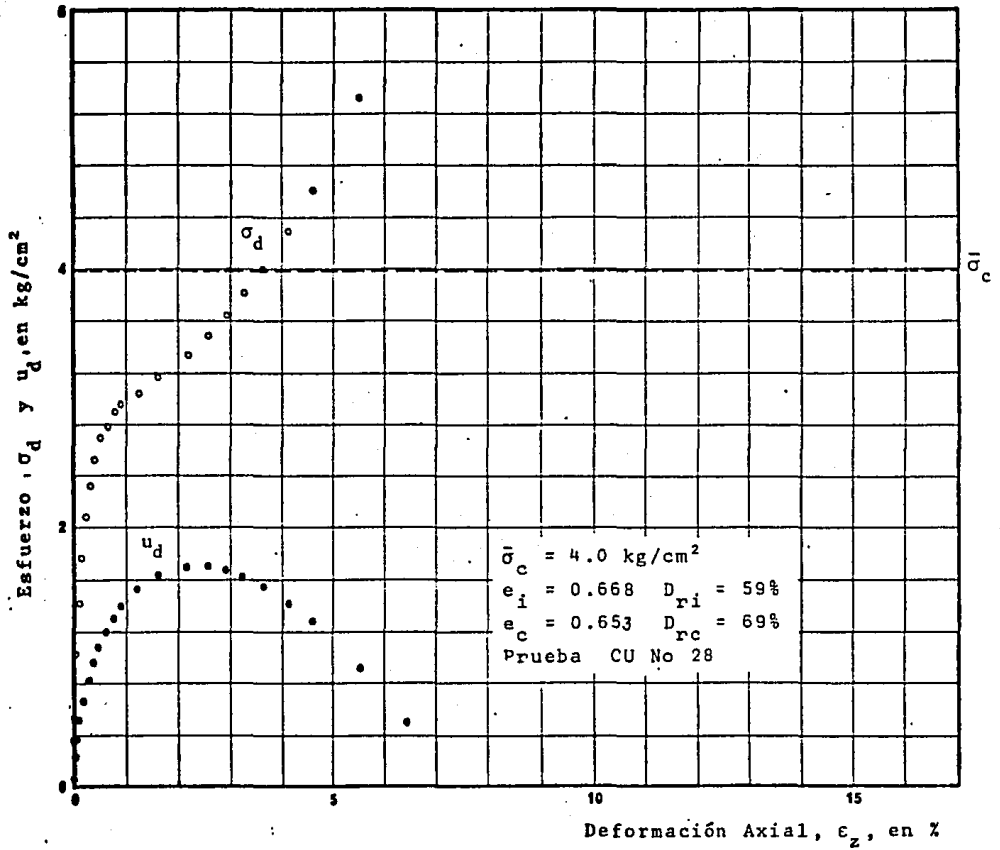


Fig.B51 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba CU No.28).

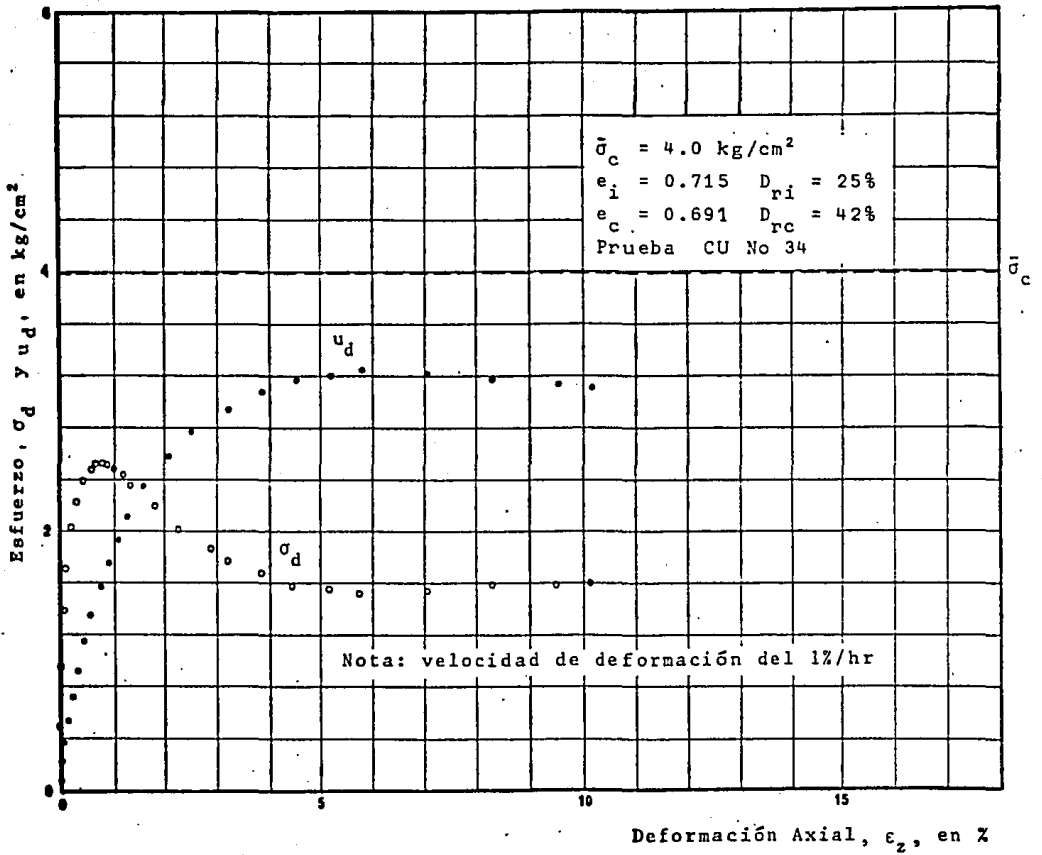


Fig. B52 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba CU No.34).

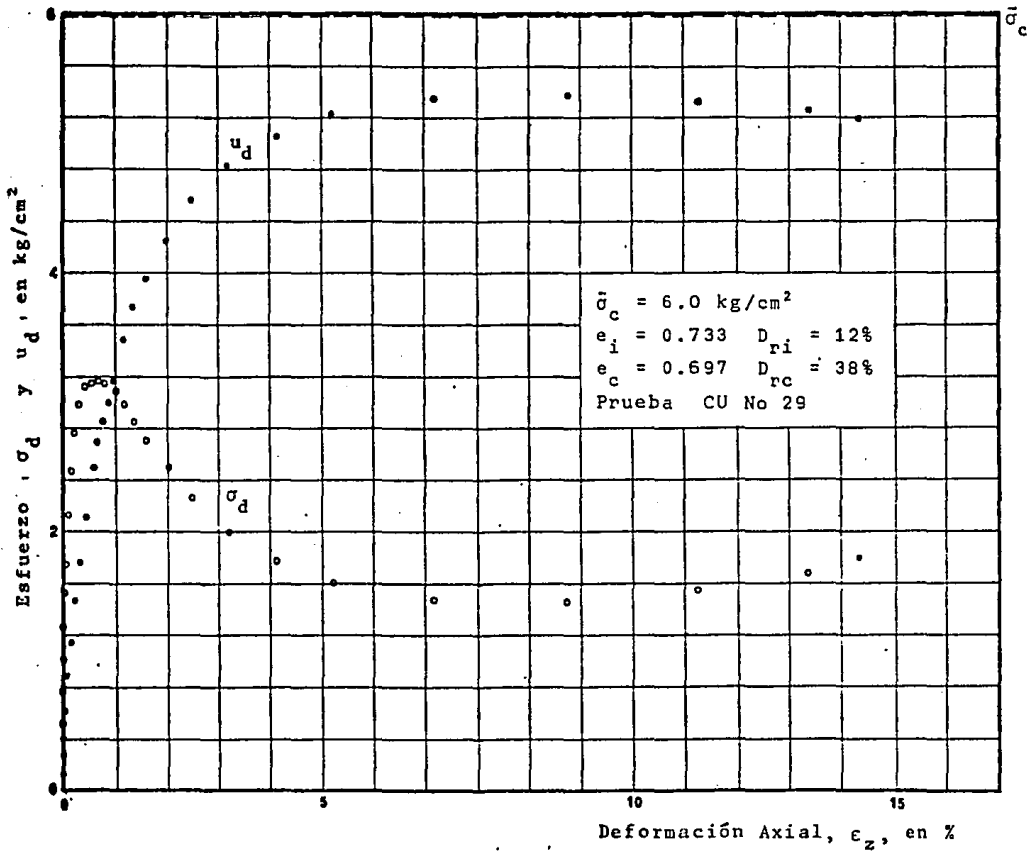


Fig. B53 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba CU No.29).

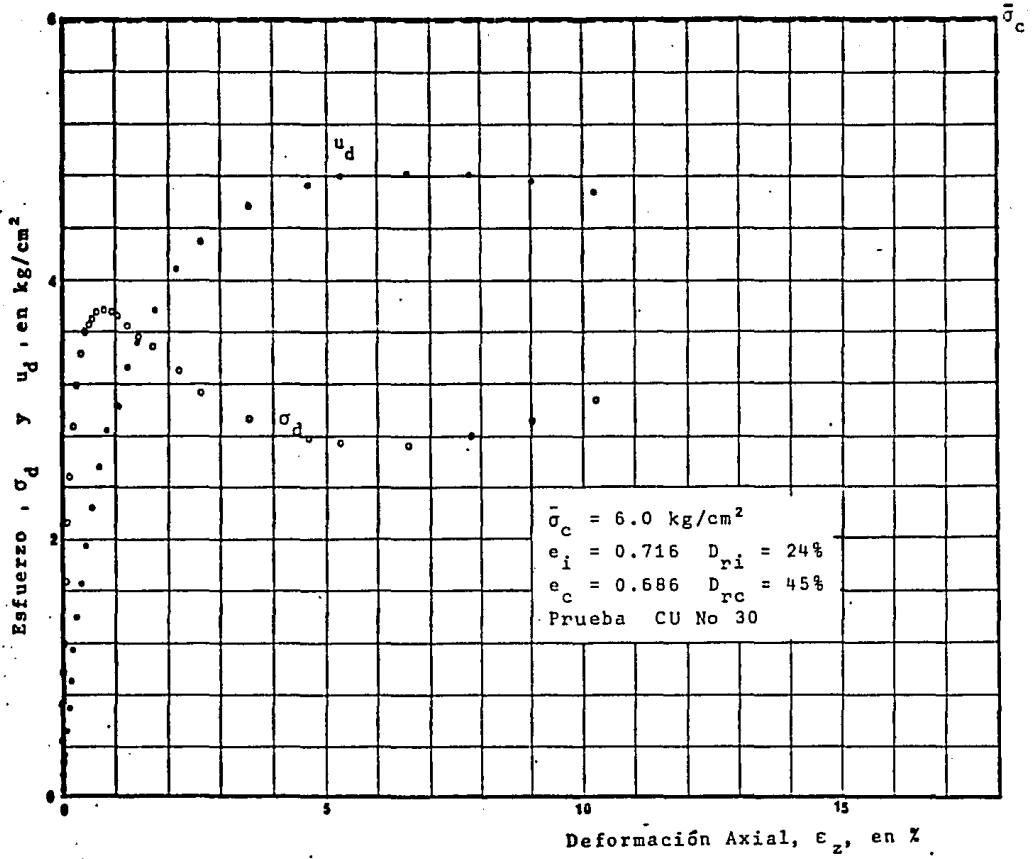


Fig.B54 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba CU No.30).

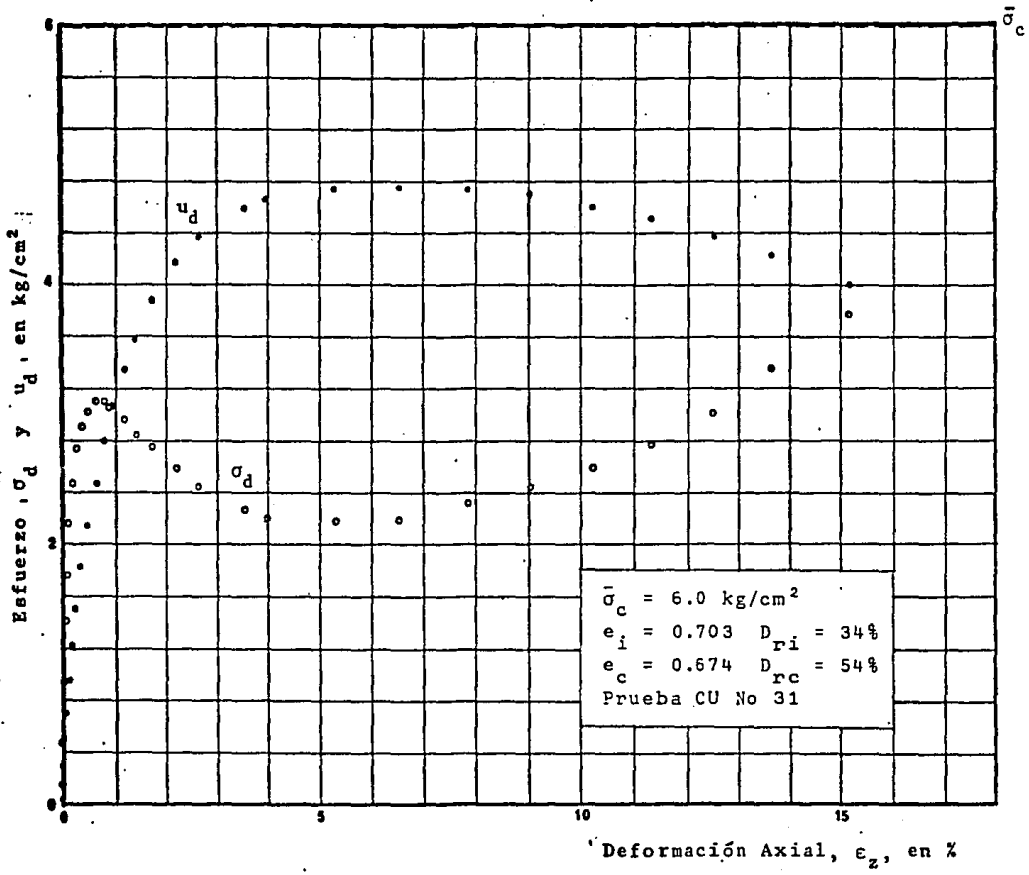


Fig.B55 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba CU No.31).

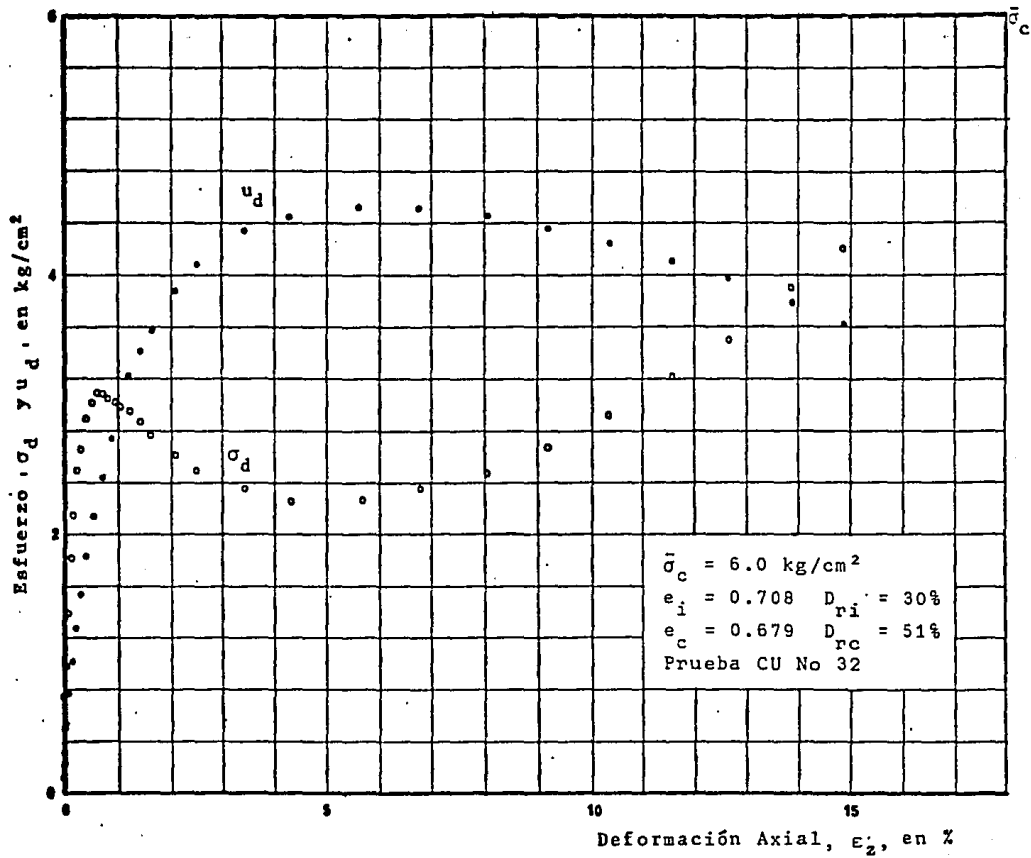


Fig.B56 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba CU No.32).

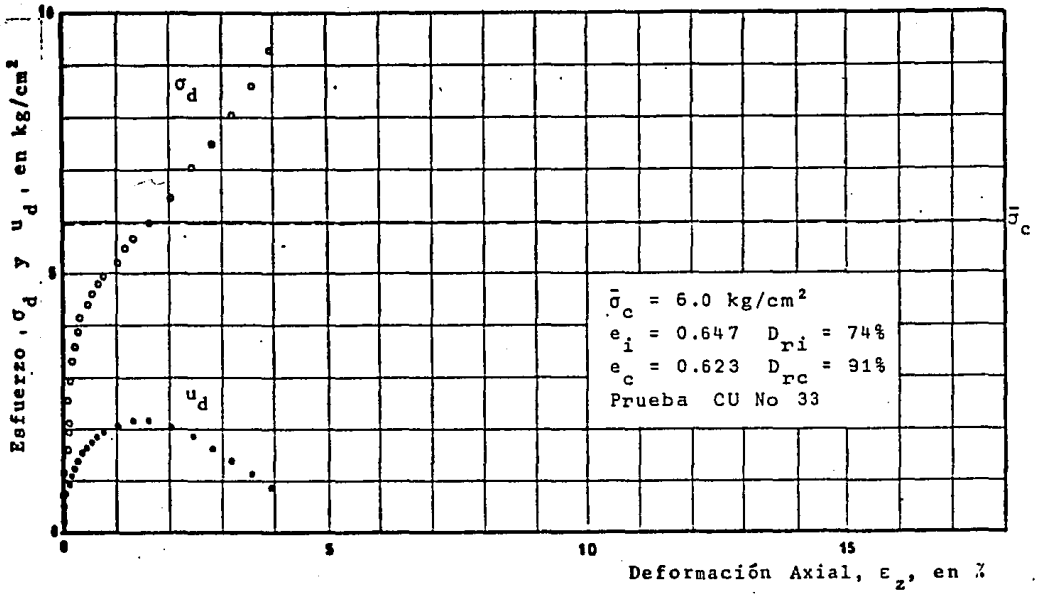


Fig.B57 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba CU No.33).

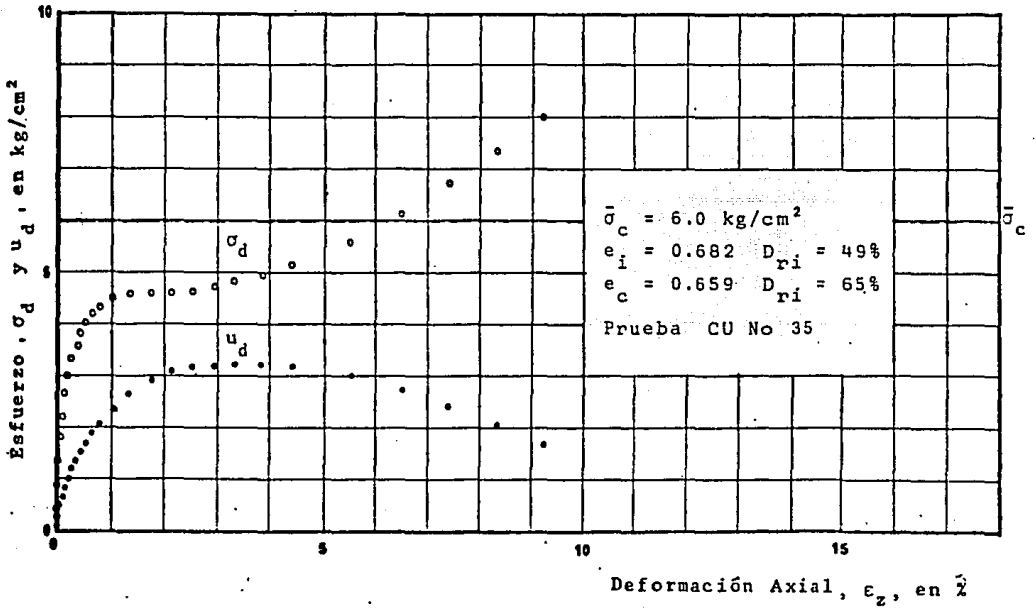


Fig.B58 Curva Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial (Prueba CU No.35)

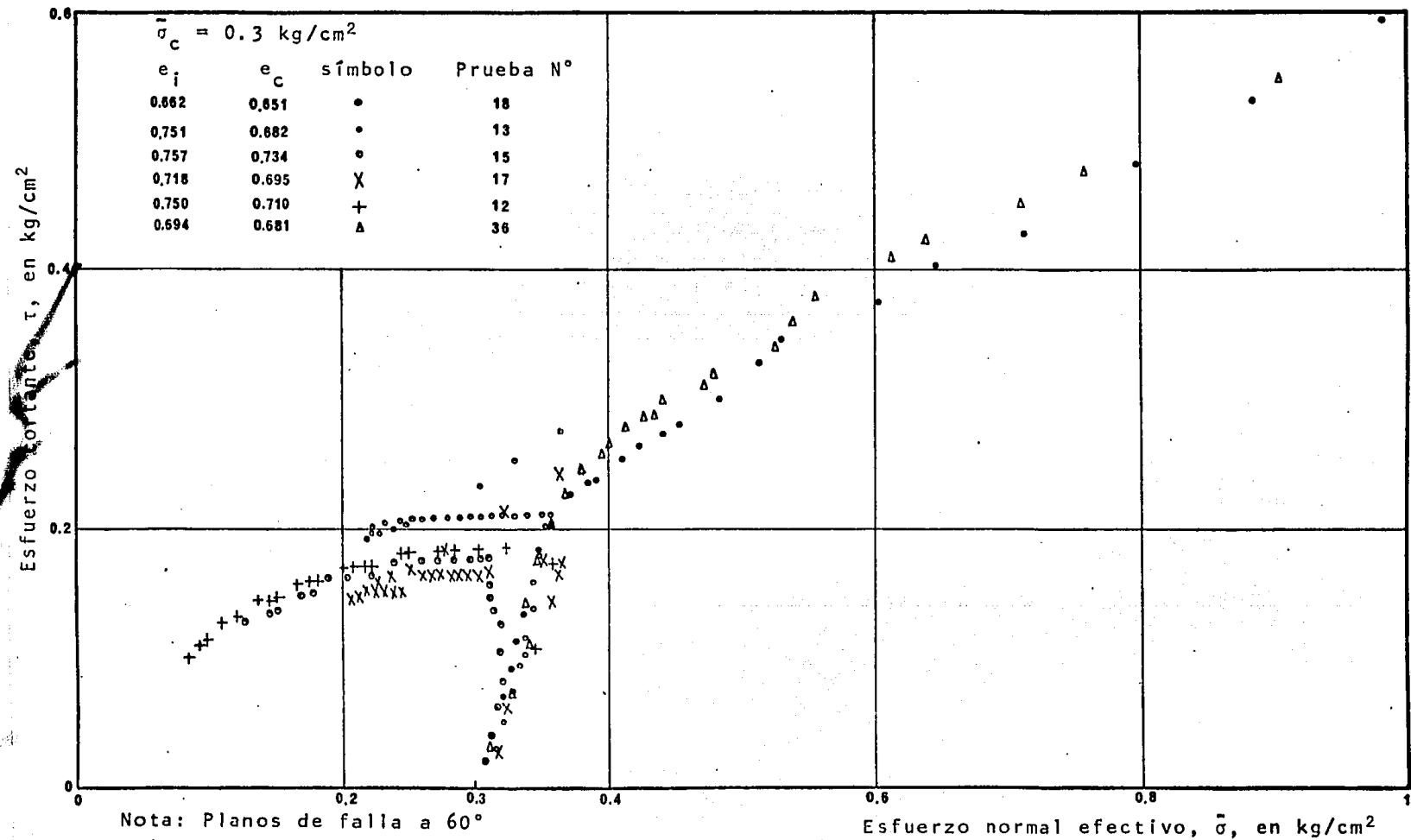


Fig.B59 Trayectorias de Esfuerzos Efectivos. Pruebas CU, $\bar{\sigma}_c = 0.3 \text{ kg/cm}^2$.

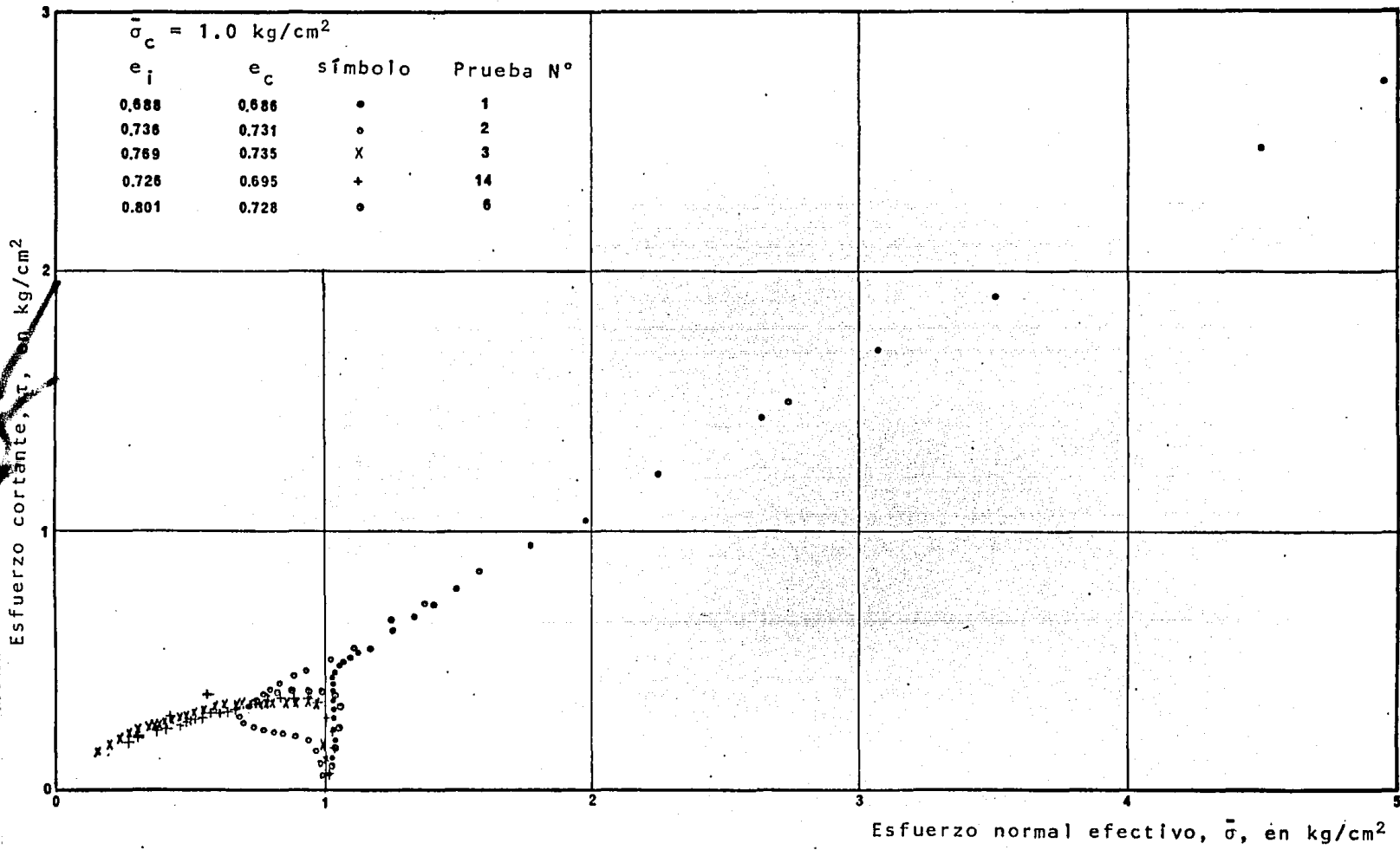


Fig.B60 Trayectorias de Esfuerzos Efectivos. Pruebas CU, $\bar{\sigma}_c = 1.0 \text{ kg/cm}^2$.

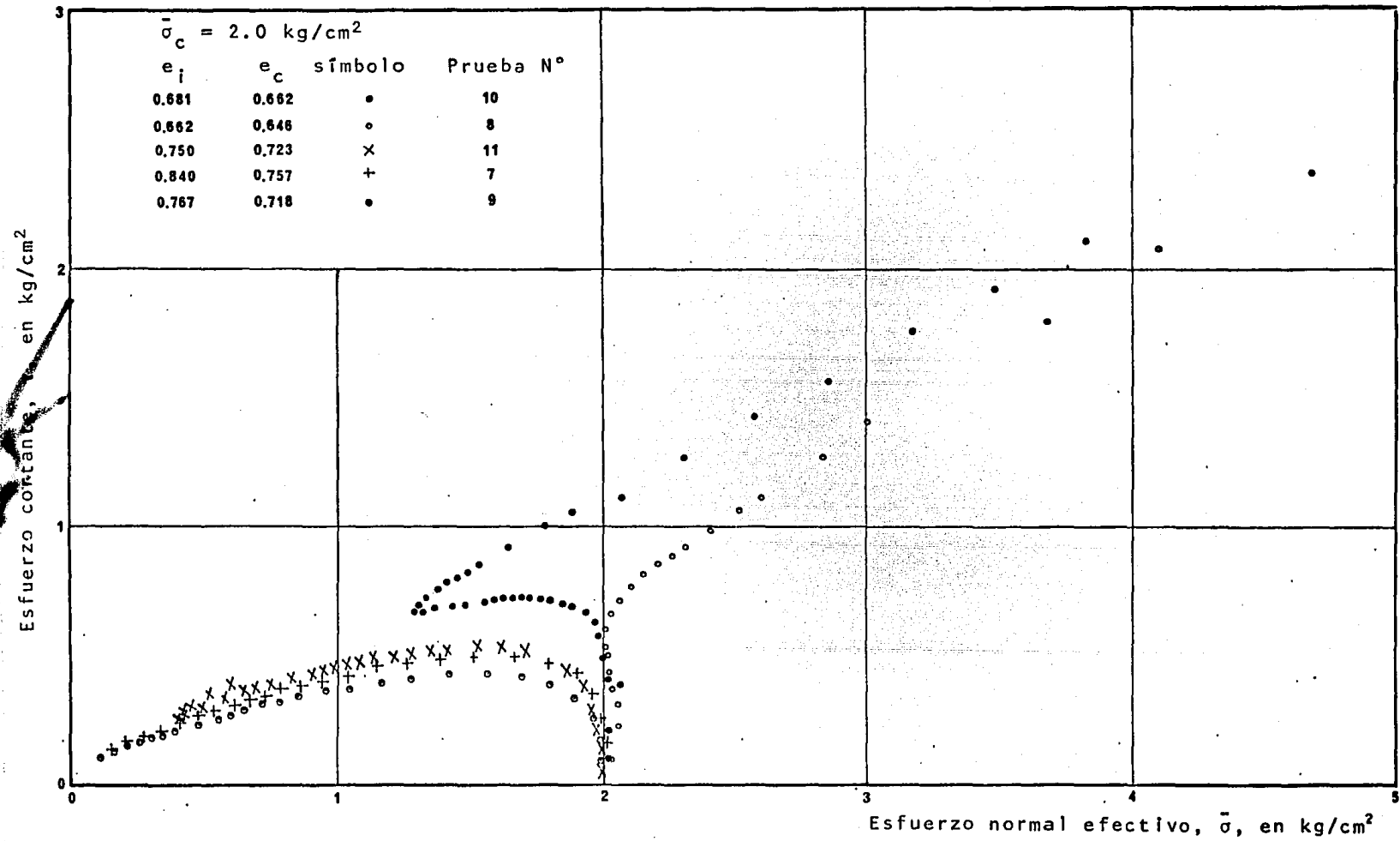


Fig.B61 Trayectorias de Esfuerzos Efectivos, Pruebas CU, $\bar{\sigma}_c = 2.0 \text{ kg/cm}^2$.

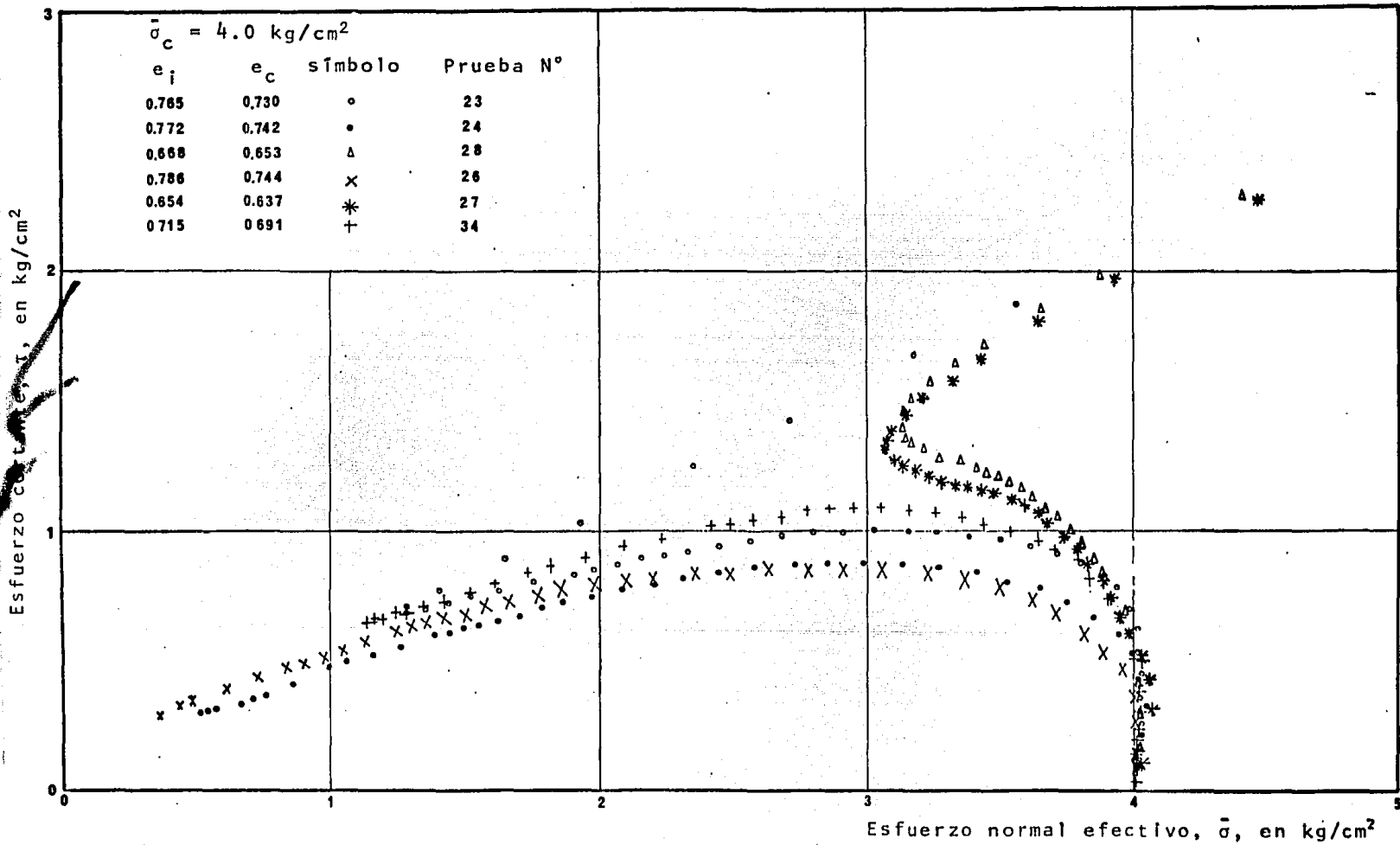


Fig.B62 Trayectorias de Esfuerzos Efectivos. Prueba CU, $\bar{\sigma}_c = 4.0 \text{ kg/cm}^2$.

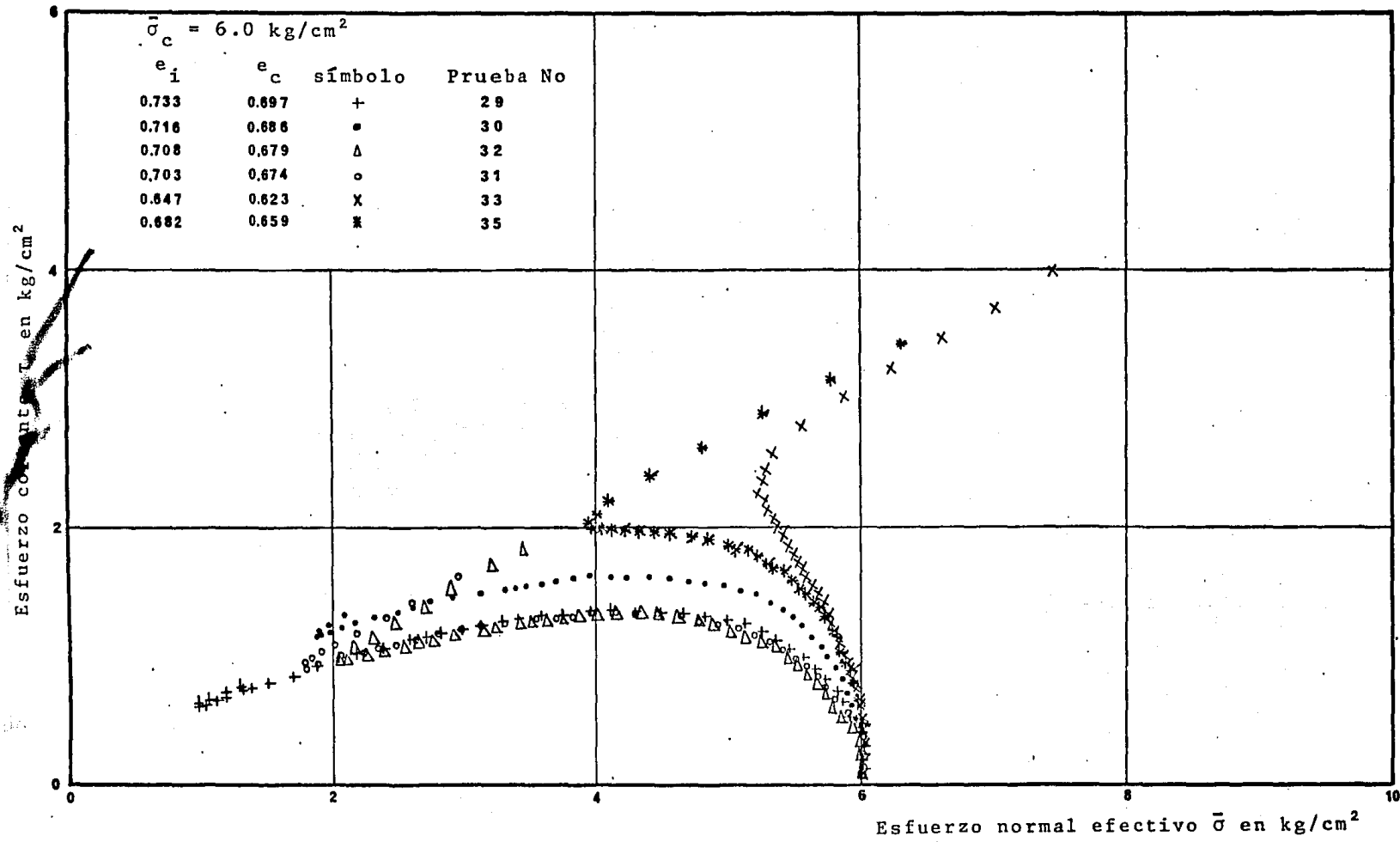


Fig.B63 Trayectorias de Esfuerzos Efectivos. Pruebas CU, $\bar{\sigma}_c = 6.0 \text{ kg/cm}^2$.

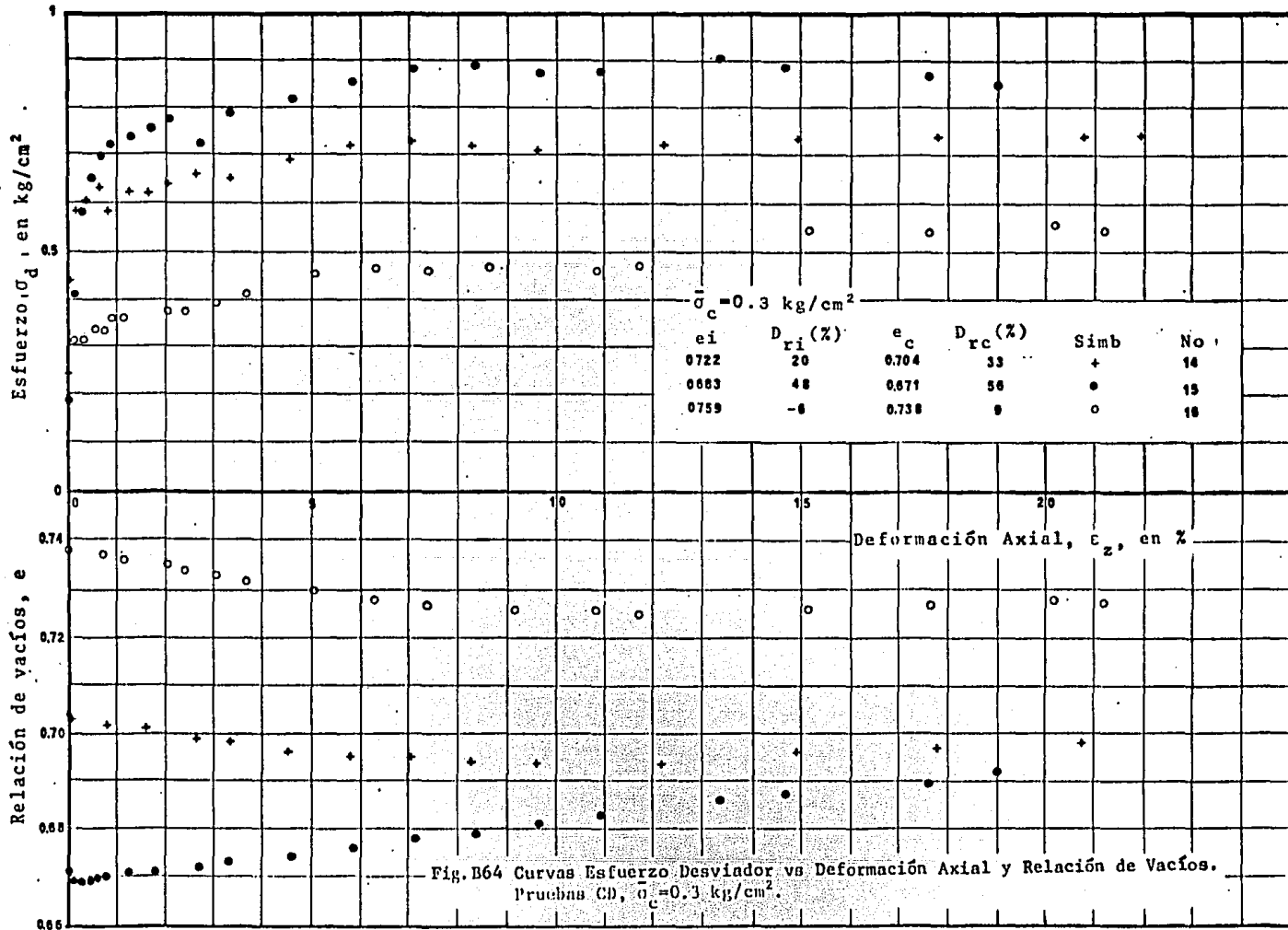


Fig. B64 Curvas Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial y Relación de Vacíos.
Pruebas CD, $\bar{\sigma}_c = 0.3 \text{ kg/cm}^2$.

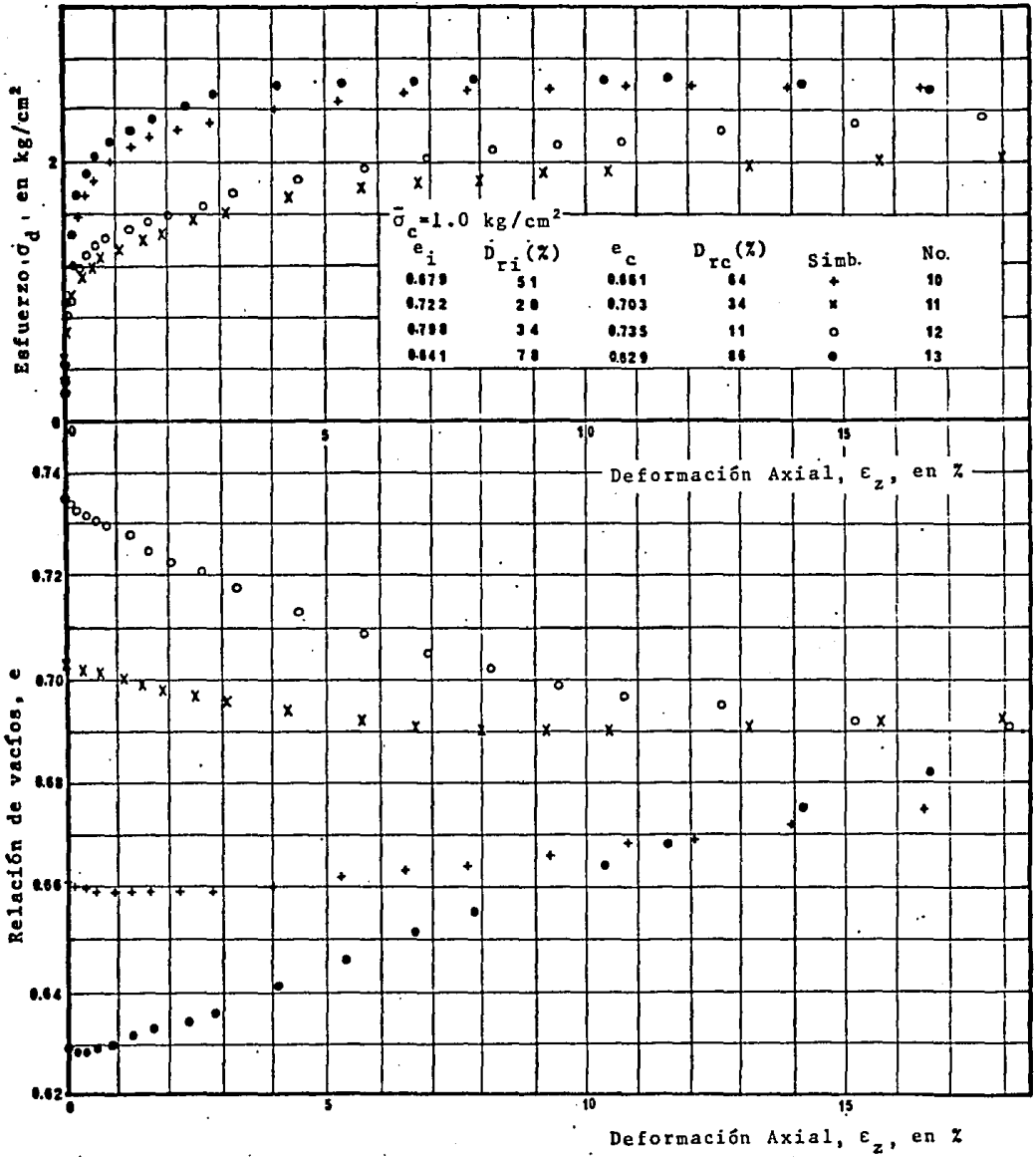


Fig.B65 Curvas Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial y Relación de Vacíos.

Pruebas CD, $\bar{\sigma}_c = 1.0 \text{ kg/cm}^2$.

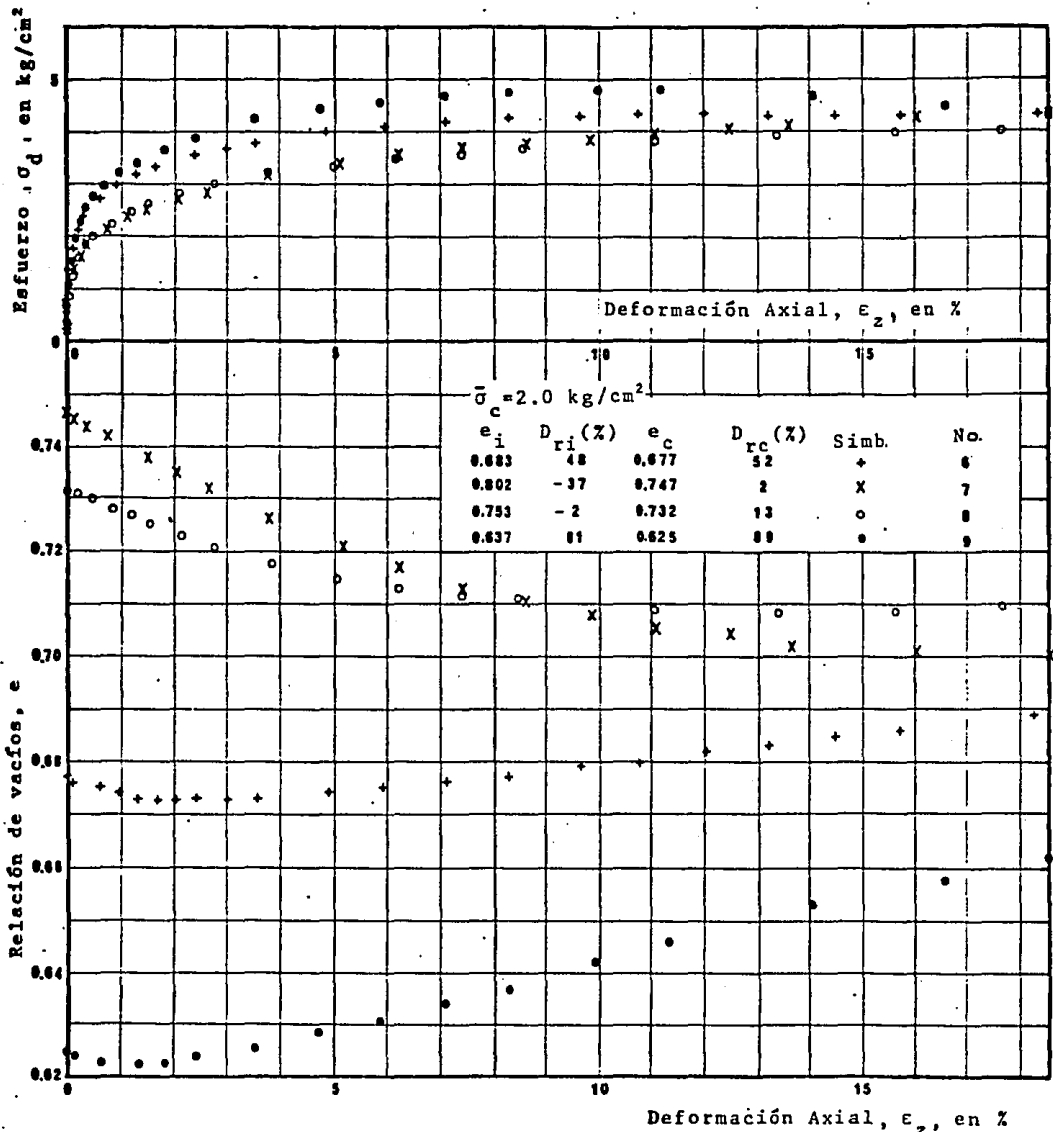


Fig.B66 Curvas Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial y Relación de Vacíos.
Pruebas CD, $\bar{\sigma}_c = 2.0 \text{ kg/cm}^2$.

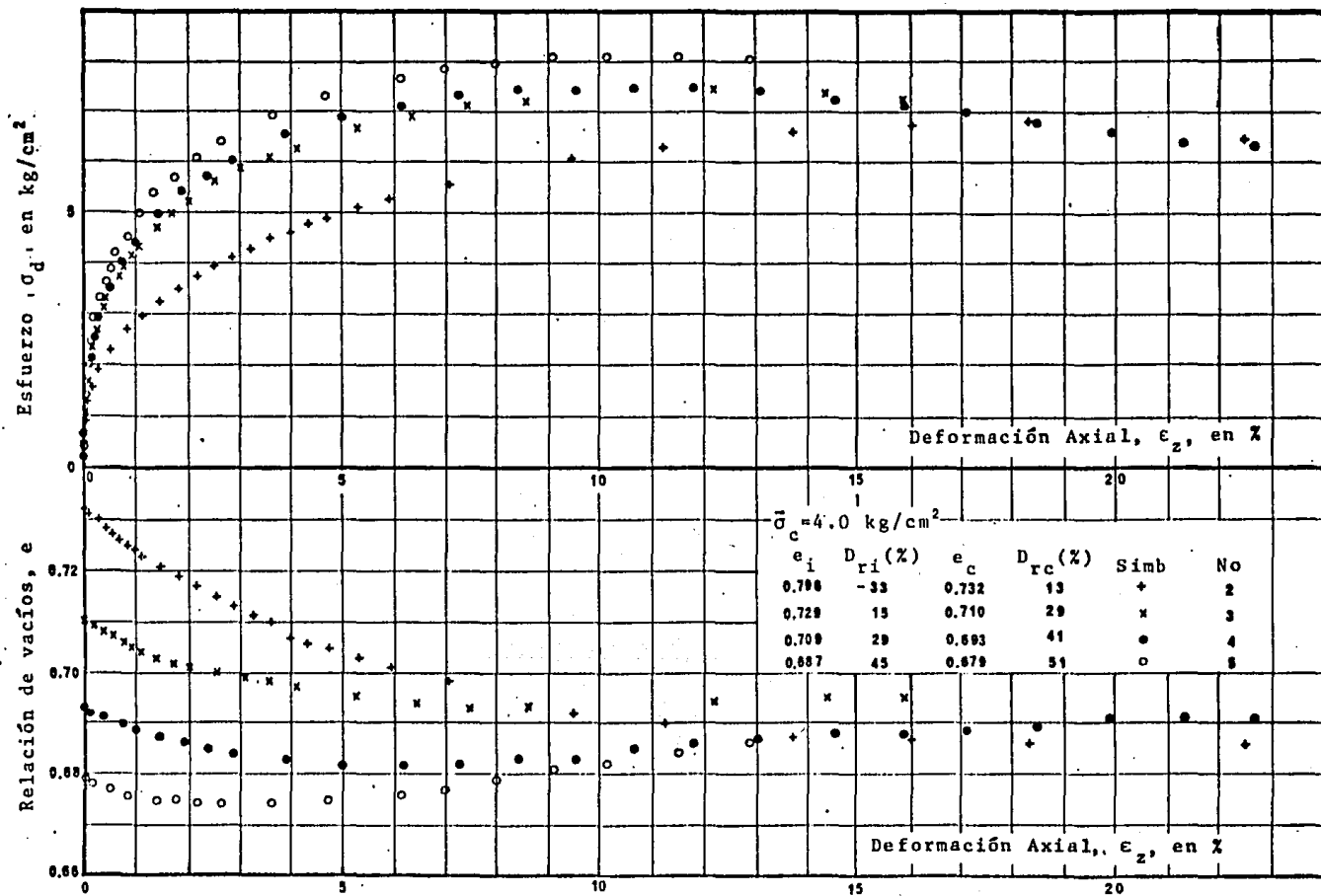


Fig.B67 Curvas Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial y Relación de Vacíos.
Pruebas CD, $\bar{\sigma}_c = 4.0 \text{ kg/cm}^2$.

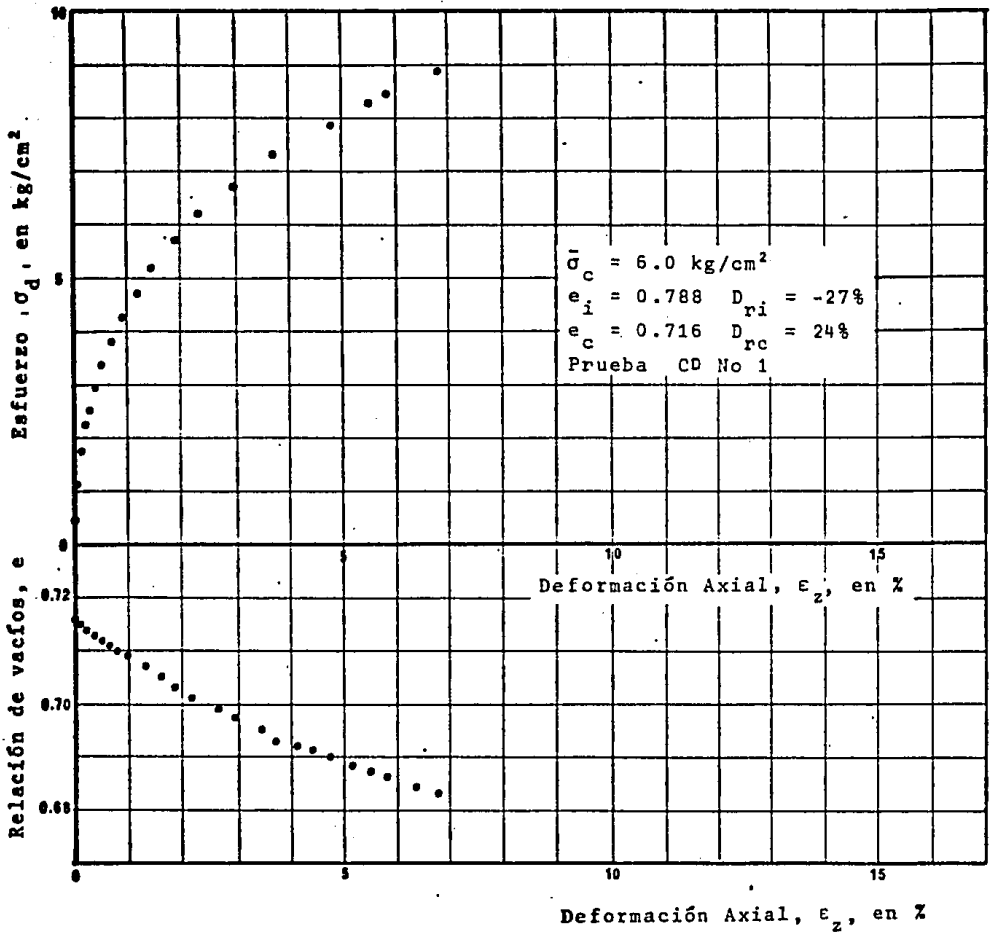


Fig.B68 Curvas Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial y Relación de Vacíos. Prueba CD, $\bar{\sigma}_c = 6.0 \text{ kg/cm}^2$

APENDICE A

APENDICE A:**DETERMINACION DE LAS RELACIONES DE VACIOS MAXIMA Y MINIMA****Equipo Utilizado:**

- Molde cilíndrico metálico de 3.60 cm de diámetro y 8.50 cm de altura con collarín de extensión de 3.20 cm de longitud.
- Embudo de 140 cm³ de capacidad y tramo recto de 15.10 cm de longitud con una tapa circular de cartón a la salida, la cual pende con hilos del tramo recto quedando a 0.5 cm de la boca inferior.
- Vibrador eléctrico manual.

Procedimiento de Prueba:**a) Relación de Vacíos Máxima.**

Se introduce el embudo en el molde, con la salida descansando sobre la base del mismo. Se colocan 150 gr de material en el embudo y se procede a levantar éste con una velocidad constan-

te, describiendo un movimiento espiral para mantener la superficie de la arena al mismo nivel todo el tiempo y procurando que la tapa de cartón quede ligeramente sobre el material que se ha depositado. Durante esta etapa el material que va saliendo choca contra la tapa y se esparce en el interior del molde fig.A1. Una vez que todo el material se ha colocado se retira el collarín, se enrasa cuidadosamente la superficie para no producir vibraciones que alteren el resultado buscado; finalmente se pesan el molde y su contenido. Este procedimiento se repite hasta que los resultados sean consistentes para luego sacar un promedio de ellos.

b) Relación de Vacíos Mínima.

Se dividen 150 gr de material en tres partes. Se colocan los primeros 50 gr en el molde, se aplana la superficie y encima se coloca un sobrepeso de 689 gr , fig.A2, luego con el vibrador eléctrico se excitan tanto el molde como el sobrepeso hasta lograr que el material no se compacte más; a continuación se colocan las dos capas restantes siguiendo el mismo procedimiento descrito anteriormente para cada una de las capas; finalmente se quita el collarín, se enrasa la superficie del molde y se pesa éste y su contenido. Como en el caso anterior, el procedimiento se repite varias veces y se toma un promedio de los valores así determinados.

c) Cálculo.

La relación de vacíos, e , se calcula con la siguiente expresión:

$$e = \frac{S_s V_m}{W_m} - 1$$

donde: S_s gravedad específica de los granos
 V_m volumen del molde
 W_s peso del suelo contenido en el molde.

d) Comentarios.

El cálculo de la relación de vacíos máxima y mínima depende de varios factores como son: tamaño del recipiente de medición del volumen, velocidad de vertido, altura de caída de las partículas, diferencia entre vertido en agua o en aire, etc. Todos los factores anteriores alteran en forma significativa los valores buscados; en otra palabras, cuando se altera el procedimiento los valores, $e_{m\acute{a}x}$ y $e_{m\acute{i}n}$, varían; (9) y (10).

Los valores de la relación de vacíos máxima y mínima son los valores límites de e , obtenidos con un determinado procedimiento ya establecido. El recipiente propuesto para la determinación de la $e_{m\acute{a}x}$ y $e_{m\acute{i}n}$, y el molde de formación de los especímenes de prueba, ambos tenían las mismas dimensiones. La diferencia que presenta un molde grande en relación con uno pequeño, es que en el segundo la cercanía de las paredes del recipiente da lugar a un efecto de fricción entre arena y molde, originándose valores de la relación de vacíos mayores que en el molde de dimensiones mayores.

En este trabajo se reportan valores de la relación de vacíos

inicial, e_i , mayores que la $e_{m\acute{a}x}$ obtenida con el procedimiento descrito en este apéndice, esto se debe al método de formación de los especímenes de prueba, ver inciso 2.2, en el cual el humedecimiento (con agua destilada) de la arena da como resultado una mayor presión entre granos debido a las fuerzas capilares que se originan; la estructura obtenida depende como es bién sabido del método de formación de los especímenes, lo que explica la diferencia entre e_i y $e_{m\acute{a}x}$.

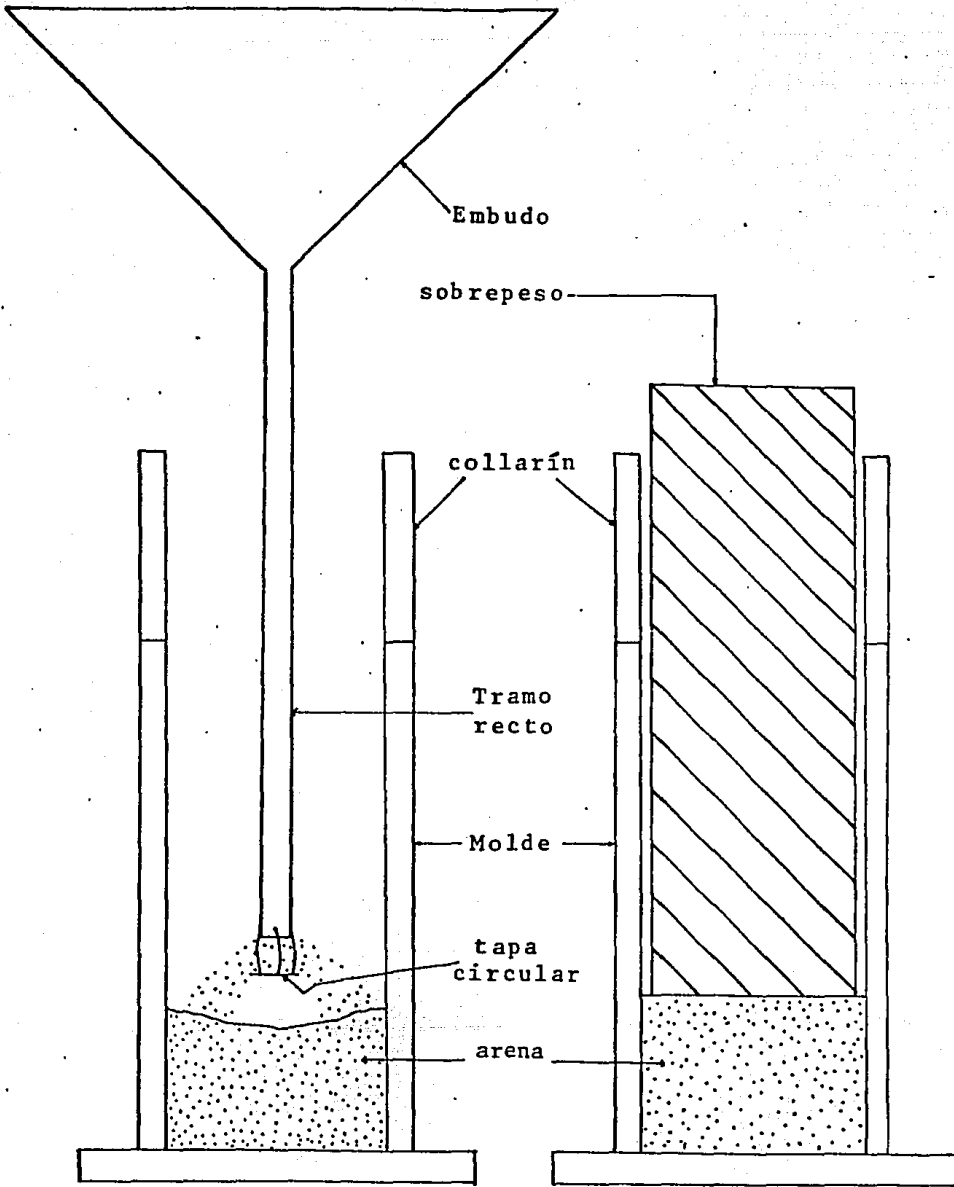


Fig.A1 Dispositivo Experimental para la obtención de la relación de vacíos máxima.

Fig.A2 Dispositivo Experimental para la Obtención de la relación de vacíos mínima.