

01163
ley
3



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERIA

INFLUENCIA DE LA FORMA DE LAS PARTICULAS EN EL
COMPORTAMIENTO DE LOS MEDIOS GRANULARES

T E S I S

que presenta

HERNAN PATIRO NIETO

para obtener el grado de

MAESTRO EN INGENIERIA

(Mecánica de Suelos)

01163
1983

JURADO

- DR. LEONARDO ZEEVAERT WIECHERS. . . .
- DR. EULALIO JUAREZ BADILLO
- ING. JESUS ALBERRO ARAMBURU
- ING. GUILLERMO SPRINGALL CARAM
- DR. J. ABRAHAM DIAZ RODRIGUEZ

EL COORDINADOR DE LA SECCION

DR. J. ABRAHAM DIAZ RODRIGUEZ

EL SECRETARIO ACADEMICO

En I GABRIELA MOELLER DE JALIFE

TRABAJA CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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 esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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

CONTENIDO

- 1. OBJETIVO**
- 2. ANTECEDENTES**
- 3. DESCRIPCION DEL MATERIAL UTILIZADO Y FABRICACION DE PARTICULAS**
 - 3.1. DESCRIPCION DEL MATERIAL UTILIZADO**
 - 3.2. FABRICACION DE PARTICULAS**
 - 3.2.1. EQUIPO**

3.2.2. FORMACION DE PARTICULAS

3.2.3. ESFERICIDAD

3.2.4. DISTRIBUCION GRANULOMETRICA

4. FORMACION DE ESPECIMENES

**4.1. DETERMINACION DE LA RELACION DE VACIOS
MAXIMA Y MINIMA**

4.1.1. GENERALIDADES

4.1.2. EQUIPO

4.1.3. PROCEDIMIENTO

4.2. FORMACION DE PROBETAS

4.3. ETAPA DE SATURACION

4.4. ETAPA DE CONSOLIDACION

4.5. ETAPA DE FALLA

5. EQUIPO TRIAXIAL

5.1. DESCRIPCION GENERAL

5.2. MECANISMO DE CARGA

5.3. EQUIPO DE MEDICION

5.3.1. DESCRIPCION

5.3.2. CALIBRACIONES

6. PRUEBAS TRIAXIALES CONSOLIDADAS NO DRENADAS MIDIENDO PRESION DE PORO (CU)

6.1. ESFUERZOS DE CONSOLIDACION

6.2. CONDICIONES INICIALES DE PRUEBA

6.3. VELOCIDAD DE DEFORMACION

6.4. CORRECCIONES

6.4.1. EFECTOS PRODUCIDOS POR PENETRACION DE LA MEMBRANA

6.4.2. CORRECCION POR MEMBRANA

6.4.3. CORRECCION EN LA SECCION TRANSVERSAL DE LA PROBETA

6.5. COMPORTAMIENTO ESFUERZO-DEFORMACION

6.6. COMPORTAMIENTO PRESION DE PORO-DEFORMACION

- 6.7. TRAYECTORIA DE ESFUERZOS EFECTIVOS**
- 6.8. ENVOLVENTES DE RESISTENCIA**
- 6.9. COMPORTAMIENTO RESISTENCIA-ESFERICIDAD**
- 6.10. COMPORTAMIENTO DEFORMACION-ESFERICIDAD**

- 7. PRUEBAS TRIAXIALES CONSOLIDADAS DRENADAS (CD)**
 - 7.1. ESFUERZOS DE CONSOLIDACION**
 - 7.2. CONDICIONES INICIALES DE PRUEBA**
 - 7.3. VELOCIDAD DE DEFORMACION**
 - 7.4. CORRECCIONES**
 - 7.4.1. EFECTO DE LA PENETRACION DE LA -
MEMBRANA**
 - 7.4.2. CORRECCION POR MEMBRANA**
 - 7.4.3. CORRECCION EN LA SECCION TRANSVER-
SAL DE LA PROBETA**
 - 7.5. COMPORTAMIENTO ESFUERZO-DEFORMACION**
 - 7.6. COMPORTAMIENTO RELACION DE VACIOS-DEFORMA
CION**

7.7. ENVOLVENTES DE RESISTENCIA

7.8. COMPORTAMIENTO RESISTENCIA-ESFERICIDAD

7.9. COMPORTAMIENTO DEFORMACION-ESFERICIDAD

7.9.1. DEFORMACION AXIAL

7.9.2. VARIACION DE LA RELACION DE DEFORMACIONES PRINCIPALES.

8. ANALISIS DE RESULTADOS

8.1. VARIACION DE LA RELACION DE VACIOS CON LA ESFERICIDAD

8.2. COMPORTAMIENTO ESFUERZO-DEFORMACION

8.3. PRESION DE PORO Y VARIACION VOLUMETRICA

8.4. ENVOLVENTES DE RESISTENCIA

8.5. VARIACION DE LA RESISTENCIA CON LA ESFERICIDAD

8.6. VARIACION DEL MODULO DE DEFORMACION SECANTE CON LA ESFERICIDAD

8.7. VARIACION DE LA PRESION DE PORO CON EL ESFUERZO DESVIADOR

9. CONCLUSIONES

10. RECONOCIMIENTOS

11. REFERENCIAS

APENDICE A.

DETERMINACION DE LA ESFERICIDAD DE ARENAS

APENDICE B.

**DEMOSTRACION DE LA EXPRESION RECOMENDADA PARA
DETERMINAR LA ESFERICIDAD DE PARTICULAS DE ARENA**

LISTA DE FIGURAS

- 3.1. Esquema del Equipo utilizado en la Fabricación de Partículas.
- 3.2. Placas de Carga del Equipo de Fabricación de Partículas.
- 3.3. Distribución Granulométrica del Material utilizado.
- 4.1. Molde utilizado en la Formación de Especímenes.
- 4.2. Esquema ilustrativo de la Determinación de la Relación de Vacíos.
- 4.3. Variación de la Relación de Vacíos en función de la Esfericidad.
- 5.1. Sección Transversal de la Cámara Triaxial.
- 5.2. Esquema ilustrativo del Sistema de Carga.
- 5.3. Curva de Calibración del Anillo de Carga.
- 5.4. Curva de Calibración del Transductor "Dynisco" - con el Puente "Vishay".
- 6.1. Esquema ilustrativo de la penetración de Membrana y Medidas Correctivas.
- 6.2. Efectos de la Medida Correctiva a la penetración de Membrana.
- 6.3. Influencia de las Franjas Plásticas en el Comportamiento Esfuerzo-Deformación (Arena de Ottawa).

- 6.4. Corrección del Esfuerzo Desviador por Efecto de la Membrana, (Henkel.).
- 6.5. Curvas Esfuerzo Desviador y Presión de Poro vs Deformación Axial. (PRUEBA CU N°01)
- 6.6. Curvas Esfuerzo Desviador y Presión de Poro vs Deformación Axial. (PRUEBA CU N°02)
- 6.7. Curvas Esfuerzo Desviador y Presión de Poro vs Deformación Axial. (PRUEBA CU N°03)
- 6.8. Curvas Esfuerzo Desviador y Presión de poro vs Deformación Axial. (PRUEBA CU N°04)
- 6.9. Curvas Esfuerzo Desviador y Presión de Poro vs Deformación Axial. (PRUEBA CU N°05)
- 6.10. Curvas Esfuerzo Desviador y Presión de Poro vs Deformación Axial. (PRUEBA CU N°06)
- 6.11. Curvas Esfuerzo Desviador y Presión de Poro vs Deformación Axial. (PRUEBA CU N°07)
- 6.12. Curvas Esfuerzo Desviador y Presión de Poro vs Deformación Axial. (PRUEBA CU N°08, 19, 20)
- 6.13. Curvas Esfuerzo Desviador y presión de Poro vs Deformación Axial. (PRUEBA CU N°09)
- 6.14. Curvas Esfuerzo Desviador y Presión de Poro vs Deformación Axial. (PRUEBA CU N°10)
- 6.15. Curvas Esfuerzo Desviador y Presión de Poro vs Deformación Axial. (PRUEBA CU N°11)

- 6.16. Curvas Esfuerzo Desviador y Presión de Poro vs De formación Axial. (PRUEBA CU N° 12)
- 6.17. Curvas Esfuerzo Desviador y Presión de Poro vs De formación Axial. (PRUEBA CU N°13)
- 6.18. Curvas Esfuerzo Desviador y Presión de Poro Vs De formación Axial. (PRUEBA CU N°14)
- 6.19. Curvas Esfuerzo Desviador Y Presión de Poro vs De formación Axial. (PRUEBA CU N°15)
- 6.20. Curvas Esfuerzo Desviador y Presión de Poro vs De formación Axial. (PRUEBA CU N°16)
- 6.21. Presión de Poro vs Esfericidad.
- 6.22. Envolventes de Resistencia. (PRUEBAS CU; $\Psi=1.0$)
- 6.23. Envolventes de Resistencia. (PRUEBAS CU; $\Psi=0.96$)
- 6.24. Envolventes de Resistencia. (PRUEBAS CU; $\Psi=0.86$)
- 6.25. Envolventes de Resistencia. (PRUEBAS CU; $\Psi=0.74$)
- 6.26. Relación de Esfuerzos Principales Efectivos vs De formación Axial. (PRUEBAS CU; $\Psi=1.0$)
- 6.27. Relación de Esfuerzos Principales Efectivos vs De formación Axial. (PRUEBAS CU; $\Psi=0.96$)
- 6.28. Relación de Esfuerzos Principales Efectivos vs De formación Axial. (PRUEBAS CU; $\Psi=0.86$)
- 6.29. Relación de Esfuerzos Principales Efectivos vs De formación Axial. (PRUEBAS CU; $\Psi=0.74$)

- 6.30. Angulo de Fricción Interna vs Esfericidad (PRUEBAS CU).
- 6.31. Módulo Secante, $(E_s)_{50}$ vs Esfericidad. (PRUEBAS CU).
- 7.1. Curvas Esfuerzo Desviador y Relación de Vacíos vs Deformación Axial. (PRUEBAS CD; $\Psi=1.0$)
- 7.2. Curvas Esfuerzo Desviador y Relación de Vacíos vs Deformación Axial. (PRUEBAS CD; $\Psi=0.96$)
- 7.3. Curvas Esfuerzo Desviador y Relación de Vacíos vs Deformación Axial. (PRUEBAS CD; $\Psi=0.86$)
- 7.4. Curvas Esfuerzo Desviador y Relación de Vacíos vs Deformación Axial. (PRUEBAS CD; $\Psi=0.74$)
- 7.5. Envolventes de Resistencia. (PRUEBAS CD; $\Psi=1.0$)
- 7.6. Envolventes de Resistencia. (PRUEBAS CD; $\Psi=0.96$)
- 7.7. Envolventes de Resistencia. (PRUEBAS CD; $\Psi=0.86$)
- 7.8. Envolventes de Resistencia. (PRUEBAS CD; $\Psi=0.74$)
- 7.9. Relación de Esfuerzos Principales Efectivos vs Deformación Axial. (PRUEBAS CD; $\Psi=1.0$)
- 7.10. Relación de Esfuerzos Principales Efectivos vs Deformación Axial. (PRUEBAS CD; $\Psi=0.96$)
- 7.11. Relación de Esfuerzos Principales Efectivos vs Deformación Axial. (PRUEBAS CD; $\Psi=0.86$)
- 7.12. Relación de Esfuerzos Principales Efectivos vs Deformación Axial. (PRUEBAS CD; $\Psi=0.74$)

- 7.13. Angulo de Fricción Interna vs Esfericidad. (PRUEBAS CD)
- 7.14. Módulo Secante $(E_s)_{50}$ vs Esfericidad (PRUEBAS CD)
- 7.15. Módulo Secante $(E_s)_{vc}$ vs Esfericidad (PRUEBAS CD)
- 7.16. Relación de Deformaciones Principales vs Deformación Axial. (PRUEBAS CD; $\Psi=1.0$)
- 7.17. Relación de Deformaciones Principales vs Deformación Axial. (PRUEBAS CD; $\Psi=0.96$)
- 7.18. Relación de Deformaciones Principales vs Deformación Axial. (PRUEBAS CD; $\Psi=0.86$)
- 7.19. Relación de Deformaciones Principales vs Deformación Axial. (PRUEBAS CD; $\Psi=0.74$)
- 7.20. Relación de Deformaciones Principales Máxima vs - Esfericidad. (PRUEBAS CD)
- 8.1. Relación de Vacfos Consolidada vs Presión de Consolidación.
- 8.2. Esquema Indicativo del Efecto "Stick-Slip "
- 8.3. Relación de Densidades Relativas vs Deformación - Axial. (PRUEBAS CD; $\bar{\sigma}_c=0.3\text{Kg/cm}^2$)
- 8.4. Relación de Densidades Relativas vs Deformación - Axial. (PRUEBAS CD; $\bar{\sigma}_c=1.0\text{Kg/cm}^2$)
- 8.5. Relación de Densidades Relativas vs Deformación - Axial. (PRUEBAS CD; $\bar{\sigma}_c=2.0\text{Kg/cm}^2$)
- 8.6. Relación de Densidades Relativas vs Deformación - Axial. (PRUEBAS CD; $\bar{\sigma}_c=4.0\text{Kg/cm}^2$)

- 8.7. Densidad Relativa en la Falla vs Esfericidad. (-
PRUEBAS CD)
- 8.8. Envolventes de Resistencia. (PRUEBAS CU 08, 19, 20)
- 8.9. Angulo de Fricción Interna vs Relación de Vacíos.
(PRUEBAS CU; $\gamma=1.0, 0.96, 0.86, 0.74$)
- 8.10. Presión de Poro vs Esfuerzo Desviador. (PRUEBAS CU) :

LISTA DE SIMBOLOS

A_c	-Area de la sección transversal de la probeta después de la etapa de consolidación
A_1	-Area de la sección transversal de la probeta en cualquier instante de la etapa de falla.
A_1	-Area de la proyección de una esfera con volumen igual al de la partícula.
A_2	-Area de la proyección de la partícula.
B	-Coeficiente de presión de poro, definido por Skempton como la relación entre la presión de poro generada por el incremento en la presión de cámara y el incremento de presión en la cámara.
C_e	-Coeficiente de variación, definido como la relación entre la desviación estándar y el valor medio.
CD	-Prueba consolidada drenada.
CU	-Prueba consolidada no drenada.
C_c	-Coeficiente de curvatura, $\frac{d_{30}^2}{d_{10} \times d_{60}}$
C_u	-Coeficiente de uniformidad, $\frac{d_{60}}{d_{10}}$
D	-Diámetro del espécimen al inicio de la etapa de falla.

- D_r -Densidad relativa, $\frac{e_{m\acute{a}x} - e_{fina}}{e_{m\acute{a}x} - e_{m\acute{i}n.}} \times 100$, en%
- D_{ri} -Densidad relativa antes de la etapa de consolidaci3n.
- D_{rc} -Densidad relativa despu3s de la etapa de consolidaci3n.
- D_{rf} -Densidad relativa en la falla.
- D_{rt} -Densidad relativa en cualquier instante de la prueba.
- $D_r(\sigma_1/\sigma_3)_{m\acute{a}x}$ -Densidad relativa en la falla.
- d_{10} -Tama1o efectivo de la part\cula.
- d_{30} -Tama1o de la part\cula, tal que el 30 % en peso sea igual o menor.
- d_{60} -Tama1o de la part\cula, tal que el 60 % en peso sea igual o menor.
- $d_{m\acute{a}x.}$ -Tama1o m\acute{a}ximo de part\cula.
- $(E_s)_{50}$ -M3dulo de deformaci3n secante, evaluado por la relaci3n (σ_d/ϵ_z) en el punto donde $\sigma_d = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_{m\acute{a}x.}}{2}$.
- $(E_s)_{vc}$ -M3dulo de deformaci3n secante, evaluado por la relaci3n (σ_d/ϵ_z) , para la condici3n cero deformaci3n volum3trica, $\epsilon_v = 0$.

- e -Relación de vacíos.
- e_c -Relación de vacíos después de la etapa de consolidación.
- e_i -Relación de vacíos recién formado el espécimen de prueba.
- e_t -Relación de vacíos en cualquier instante de la prueba.
- $e_{m\acute{a}x.}$ -Relación de vacíos máxima.
- $e_{m\acute{i}n.}$ -Relación de vacíos mínima.
- $e_{(\sigma_1/\sigma_3) m\acute{a}x}$ -Relación de vacíos calculada cuando la relación de esfuerzos principales es máxima durante la prueba.
- h_p -Altura de la partícula.
- M -Módulo de elasticidad de la membrana de hule, despreciando la influencia de las franjas plásticas. ($M=0.27 \text{ Kg/cm}^2$, por unidad de ancho).
- S_s -Gravedad específica de las partículas.
- 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 del 100 %.

u	-Contrapresión, en Kg/cm^2 .
u_d	-Presión de poro en exceso a la contapre. sión, ó, presión de poro generada en la etapa de falla, en Kg/cm^2 .
$(u_d)_{3\%}$	-Presión de poro generada, evaluada para el 3% de deformación axial, en Kg/cm^2 .
V_e	-Volumen efectivo del recipiente utilizado en la formación de especímenes, en cm^3 .
V_m	-Volumen del molde, en cm^3 .
V_w	-Volumen de agua desalojado al verter par- tículas de arena en un tubo capilar, en m.m.^3 .
V_1	-Volumen de la membrana de hule, en cm^3 .
V_2	-Volumen de las franjas plásticas coloca- das en la interfase membrana-partículas, en cm^3 .
W_s	-Peso de sólidos contenidos en el molde.
e_z	-Deformación axial, en %.
e_v	-Deformación volumétrica, en %.
\dot{e}_v	-Velocidad de deformación volumétrica.
\bar{v}	-Esfericidad de las partículas.
ψ	-Angulo de fricción interparticular, en grados.

ϕ	-Angulo de fricción interna, en grados.
$\phi(\sigma_1/\sigma_3)_{\text{máx}}$	-Angulo de fricción interna calculado cuando la relación de esfuerzos principales es máxima durante la prueba, grados.
$\phi(\sigma_1-\sigma_3)_{\text{máx}}$	-Angulo de fricción interna calculado para la condición de máximo esfuerzo desviador, en grados.
σ	-Esfuerzo normal efectivo, en Kg/cm ² .
$\bar{\sigma}_c$	-Esfuerzo efectivo de consolidación, en Kg/cm ² .
σ_d	-Esfuerzo desviador, en Kg/cm ² .
$\bar{\sigma}_1$	-Esfuerzo principal mayor efectivo, Kg/cm ² .
$\bar{\sigma}_3$	-Esfuerzo principal menor efectivo, Kg/cm ² .
$(\sigma_1-\sigma_3)$	-Esfuerzo desviador, en Kg/cm ² .
$(\sigma_1-\sigma_3)_{\text{máx}}$	-Esfuerzo desviador máximo, en Kg/cm ² .
$(\bar{\sigma}_1/\bar{\sigma}_3)$	-Relación de esfuerzos principales efectivos.
$(\bar{\sigma}_1/\bar{\sigma}_3)_{\text{máx}}$	-Máxima relación de esfuerzos principales efectivos.
τ	-Esfuerzo cortante, en Kg/cm ² .
Δe_1	-Incremento de deformación en la dirección principal "z".

$\Delta \epsilon_3$

-Incremento de deformación en la dirección principal "y".

$\frac{\Delta \epsilon_3}{\Delta \epsilon_1}$

-Relación del incremento de deformaciones principales.

$\Delta \sigma_d$

-Corrección en el esfuerzo desviador por efecto de la membrana.

1.- OBJETIVO

La investigación realizada, analiza la influencia de la forma de las partículas en el comportamiento de los medios granulares, manteniendo constantes ciertos parámetros, como: distribución granulométrica, densidad relativa inicial, ángulo de fricción interparticular, tipo de prueba, etc.

La influencia del parámetro anteriormente mencionado, se analiza a partir de pruebas triaxiales consolidadas no drenadas (CU), midiendo presión de poro y pruebas triaxiales consolidadas drenadas (CD).

Las principales características a analizar son:

a) Resistencia. Tanto en las pruebas drenadas como en las no drenadas, se analiza el comportamiento esfuerzo-deformación y se determinan las envolventes de resistencia, así como las trayectorias de esfuerzos efectivos.

b) Compresibilidad. En las pruebas CU^* , se describe la variación de la presión de poro con la deformación axial. En las pruebas CD^* se estudia también la variación del volumen en función de la forma de las partículas.

*

Las pruebas triaxiales realizadas son de compresión, manteniendo constante la presión en la cámara y aumentando el esfuerzo axial.

2.- ANTECEDENTES

Son muy pocas las investigaciones realizadas al respecto; sin embargo, en las últimas décadas, investigadores como Cambou (1), Vesić (2), Morris (3) Kolbuszewski (4) y otros (5) (6), han abordado someramente el tema.

Lundgren (5), en 1948 propuso la utilización de la fórmula empírica presentada en la tabla N° 2.1. ; de acuerdo con él, el ángulo de fricción interna de gravas y arenas puede ser afectado dentro de un rango de variación de 1° a -5°, dependiendo de la -

TABLA N° 2.1

VALORES DEL ANGULO DE FRICCION INTERNA
DE MEDIOS GRANULARES

$\phi^{\circ} = 36^{\circ} + \phi_1^{\circ} + \phi_2^{\circ} + \phi_3^{\circ} + \phi_4^{\circ}$			
Compacidad	ϕ_1°	Suelto	-6°
		Mediano	0
		Denso	+6°
Forma y rugosidad de los granos	ϕ_2°	Angulosos	+1°
		Medianos	0
		Redondeados	-3°
		Esféricos	-5°
Tamaño de los granos	ϕ_3°	Arena	0
		Grava fina	+1°
		Grava media y gruesa	+2°
Granulometría	ϕ_4°	Cu [*] bajo	-3°
		Cu medio	0
		Cu alto	+3°

* Coeficiente de uniformidad

forma de las partículas. La fórmula propuesta por --
Lundgren está respaldada por la experiencia, pero es --
de resaltar el hecho de no tener ninguna base experi --
mental.

Morris (3) (1959) analiza el efecto de
la forma y textura de las partículas, en la resisten -
cia de agregados no cohesivos. Menciona que la resis -
tencia y la estabilidad de agregados tales como la gra -
va y la arena, no depende solamente de la resistencia a
la compresión de las partículas, sino también de la --
forma y textura de las partículas. Enfatiza que la -
resistencia de estos materiales es sensible a muy peque -
ños cambios en uno u otro parámetro, puesto que la for -
ma gobierna el número de contactos entre partículas --
adyacentes. Concluye Morris, que la forma y la tex -
tura de las partículas, afectan las propiedades fric -
cionantes del agregado, teniendo igual importancia ambos
parámetros. Es así como la variación de cualquiera de -
los parámetros puede dar origen a cambios en la resistencia,
en más o menos un 30%; la variación de los dos paráme -
tros simultáneamente, puede incrementar el cambio a ---
más del 40%. En esta investigación se hicieron prue--

bas triaxiales en probetas formadas con partículas de basalto de más o menos 1/8 de pulgada de diámetro, a las que se les cambiaba la forma por abrasión en la máquina de los Angeles.

Kolbuszewski (4), menciona en su trabajo que no es difícil entender que, la posición relativa entre granos, juega un papel importante en el comportamiento del medio y que el arreglo de éstos, es función del tamaño y forma de partículas, por ser las variables independientes más importantes. De pruebas triaxiales sobre probetas formadas con dos tipos de arena diferente, una redondeada y otra angulosa con igual gravedad específica, concluye Kolbuszewski que la forma y el tamaño de las partículas tienen un efecto significativo en el comportamiento de un material granular; menciona que son muchos los problemas concernientes a la medición de estos parámetros y que solamente podrán ser solucionados en futuras investigaciones. El Profesor Kolbuszewski recomienda para futuras investigaciones, desarrollar una teoría basada en un buen análisis experimental cuantitativo en el que se puedan evaluar las variables independientes, -

principalmente la forma de las partículas. Desarrollada la teoría, ésta puede ser utilizada para predecir el comportamiento de los medios granulares, pero sería mucho más fácil manejar un modelo general de masas granulares, al que se le pueda incorporar variables como la forma y el tamaño de las partículas; tal modelo debe ser desarrollado.

Cambou (1) (1972), analizó la influencia de la forma y dimensión de las partículas en las propiedades mecánicas de un medio granular, mediante pruebas triaxiales ejecutadas con probetas de 15 centímetros de diámetro, formadas con gravas redondeadas o angulosas, manteniendo en algunos casos constante la relación de vacíos y en otros casos la manera de formación de probetas. Concluye que :

- a) El ángulo de fricción interna de un arreglo de partículas esféricas depende esencialmente del estado de superficie de las partículas.

- b) La compacidad de un material redondeado es mayor que la de un material anguloso colocado de igual manera.

- c) En general, el ángulo de fricción interna de los materiales angulosos es mayor que el de los materiales redondeados. Cuando el material está suelto los valores son semejantes.

- d) El esfuerzo de rotura de partículas es mayor cuando el arreglo es de partículas redondeadas.

Vesić (2), (1968), realizó pruebas con materiales granulares de cinco diferentes composiciones mineralógicas (cuarzo, feldespato, clorita, calcita y mica), variando el tamaño de las partículas, forma de las partículas y distribución granulométrica. Encontró el Profesor Vesić que el coeficiente de uniformidad no tiene influencia independiente en la resistencia al corte de los minerales ensayado y que todas las diferencias observadas son originadas por la varial

ción de otros parámetros, tales como la relación de vacíos y el tamaño de las partículas. Estudió el efecto del tamaño de las partículas comparando el ángulo de fricción interna, de muestras de arena, todas con igual relación de vacíos y coeficiente de uniformidad y variando el diámetro efectivo (d_{10}); observó que el ángulo de fricción interna aumenta cuando disminuye el tamaño de las partículas, pero hace notar que ese incremento es causado probablemente por la diferencia en la forma de las partículas. Para determinar la influencia de la forma, realizó pruebas triaxiales drenadas con probetas formadas de partículas de cuarzo que tenían diferente esfericidad, pero manteniendo constante la relación de vacíos, el diámetro efectivo y el coeficiente de uniformidad, encontrando marcadas diferencias en el ángulo de fricción interna, y concluyendo que la forma de las partículas tiene un muy pronunciado efecto en la resistencia al esfuerzo cortante de un arreglo de partículas.

A pesar de no ser del tema en cuestión, es de gran importancia para esta investigación tener en cuenta los trabajos realizados por Morris ⁽³⁾, (1959),

que concluye que todos los materiales ensayados exhiben la misma resistencia para el mismo grado de rugosidad, independientemente de su composición mineralógica. Y Skinner ⁽⁶⁾, (1969), que concluye que el ángulo de fricción interna es independiente del ángulo de fricción interparticular; a pesar de ser una conclusión basada en un amplio programa experimental, ha sido motivo de crítica.

Se puede observar que son muchas las incertidumbres que rodean a la influencia de la forma de las partículas en el comportamiento de los medios granulares. El trabajo que en los siguientes capítulos se presenta, ayuda a eliminar parte de estas incertidumbres, ya que los resultados serán de utilidad a dos tipos de profesionales:

- a) Al investigador interesado en profundizar en el conocimiento del comportamiento de los materiales.
- y b) Al ingeniero práctico, ya que la tendencia en las últimas décadas, es la de fabricar los materiales que serán

utilizados en la construcción de estructuras térreas, en las que es posible seleccionar el material a utilizar, por ejemplo, en presas de tierra y enrocamientos, en estructuras de contención a base de gaviones, en terraplenes, etc.

En particular se puede citar un caso en el que es de utilidad conocer la influencia de la forma de las partículas, para ayudar a hacer una mejor elección del procedimiento a seguir en el control de la forma de éstas; el caso se presenta cuando el material a utilizar debe ser pasado por una trituradora y el equipo puede ser elegido dependiendo de las necesidades.

3.- DESCRIPCION DEL MATERIAL UTILIZADO Y FABRICACION DE PARTICULAS

3.1 DESCRIPCION DEL MATERIAL UTILIZADO

Utilizar arenas cuya forma de partícula sea diferente, impide mantener constante algunos parámetros, por ejemplo, el ángulo de fricción interparticular. La única manera de evaluar solamente la influencia de la forma de las partículas en el comportamiento de un medio granular, es recurriendo a la utilización de un material ideal, puesto que manejar simultáneamente dos parámetros tan importantes como lo son

la forma de las partículas y el estado de superficie - de éstas, es complicado. La influencia de estos dos - parámetros, en el comportamiento de medios granulares, debe ser analizado aisladamente, teniendo en cuenta - que los términos anguloso y redondeado hacen referen- - cia al estado de superficie, mientras que las particu- - las tienen forma esférica, planar y acicular.

Después de investigar diferentes materia- - les se optó por trabajar con balines de acero, a los - que mediante un tratamiento, que se describe en el si- - guiente inciso, se les cambia la esfericidad.

Los balines utilizados son fabricados por la SKF, en acero al cromo, con una dureza de 60 a 65 - HRC (7). Esta especificación de fabricante garantiza que durante las pruebas no se presentará rotura de par- - tículas.

La gravedad específica de las partículas - es 7.88, según datos suministrados por el fabricante ; el valor calculado en el laboratorio es 7.92. Los va- - lores de la relación de vacíos máxima $e_{m\acute{a}x}$ y mínima - $e_{m\grave{i}n}$, se presentan en la tabla N° 3.1.

3.2 FABRICACION DE PARTICULAS

3.2.1 EQUIPO

En la figura N° 3.1, se presenta esquemáticamente el equipo utilizado para deformar las partículas; consiste básicamente en dos placas de acero, una superior (A) y una inferior (B), un micrómetro (C) y el sistema de carga (D).

Las placas superior (A) e inferior (B), fueron fabricadas en acero de alta resistencia, para evitar la penetración de las partículas durante el proceso de deformación. Las dimensiones se indican en la figura N° 3.2. ; las guías en la placa inferior y el círculo en bajo relieve sobre la placa superior, garantizan una deformación uniforme de las partículas.

El micrómetro utilizado es de la marca Federal, con una aproximación de 0.01 m.m.

El sistema de carga está constituido por un marco de carga, un gato hidráulico con capacidad -

de 100 toneladas y un sistema de rótula. La rótula, junto con el círculo en bajo relieve sobre la placa superior mencionado anteriormente, garantizan que la aplicación de la carga es vertical y está aplicada justamente en el centro de la placa superior; sólo así se logra formar partículas uniformes.

3.2.2 FORMACION DE PARTICULAS

Para facilitar el proceso, previamente a la deformación, las placas y las partículas son sometidas a tratamientos térmicos; las placas son endurecidas y las partículas ablandadas. Posteriormente las placas son rectificadas y las partículas se someten al proceso de limpieza que se menciona más adelante.

En incisos anteriores se hizo énfasis en que el ángulo de fricción interparticular debería ser constante. El tratamiento térmico da origen a una "cascarilla", que en algunas partículas se puede remover con cierta facilidad, en otras no; por este motivo se optó por hacer una rigurosa limpieza en todo el material a utilizar. Des---

pués de ensayar varios métodos se optó por utilizar un estanque de remoción de óxidos.

El estanque de remoción de óxidos del Instituto de Física, es un recipiente metálico que contiene detergente ácido, por el que se hacen circular ondas ultrasónicas en todas las direcciones.

Para cambiar la esfericidad de las partículas, éstas se colocan simétricamente distribuidas en la placa inferior, después de colocar la placa superior, se aplica carga axial hasta que el micrómetro (C) de la figura N° 3.1., registre la separación deseada entre placas. Al retirar la carga, las partículas tienen rebote elástico; para garantizar las dimensiones elegidas y la uniformidad de las partículas, se hacen tres lecturas en el micrómetro, girando el conjunto placas-partículas, de tal manera que la separación entre placas sea determinada en puntos cercanos a las guías, por estar igualmente separadas. Si alguna de las lecturas difiere de la dimensión especificada en más o menos 0.02 milímetros, las partículas son rechazadas.

3.2.3 ESFERICIDAD

Teniendo en cuenta los criterios de Wadell (8) que define la esfericidad como :

$$\gamma = \frac{A_1}{A_2} \quad (*)$$

Las partículas esféricas que inicialmente son de 1/8 de pulgada de diámetro, después de la deformación tienen las dimensiones y los valores de esfericidad presentados en la tabla N° 3.1 .

3.2.4 DISTRIBUCION GRANULOMETRICA

El material utilizado es perfectamente uniforme, antes y después de la deformación de las partículas. El diámetro inicial es de 1/8 de pulgada; después de la deformación el diámetro se incrementa

(*) A_1 = Area de la proyección de una esfera con volumen igual al de la partícula.

A_2 = Area de la proyección de la partícula.

puesto que ésta ocurre a volumen constante. La distribución granulométrica para las diferentes esfericidades es presentada en la figura N° 3.3 .

Nótese que el hecho de cambiar la esfericidad no tiene influencia en la distribución granulométrica, solamente se presenta un pequeño desplazamiento de las curvas hacia la derecha (figura N° 3.3), pero sin que los coeficientes de uniformidad (C_u) y de curvatura (C_c) se vean afectados. El parámetro que se afecta al deformar las partículas es el tamaño, pero al tener una relación diámetro de la probeta, a diámetro máximo de partícula, $D/d_{m\acute{a}x}$ (igual a 9.7 (9)), se garantiza que el efecto de escala no tendrá influencia en los parámetros de resistencia.

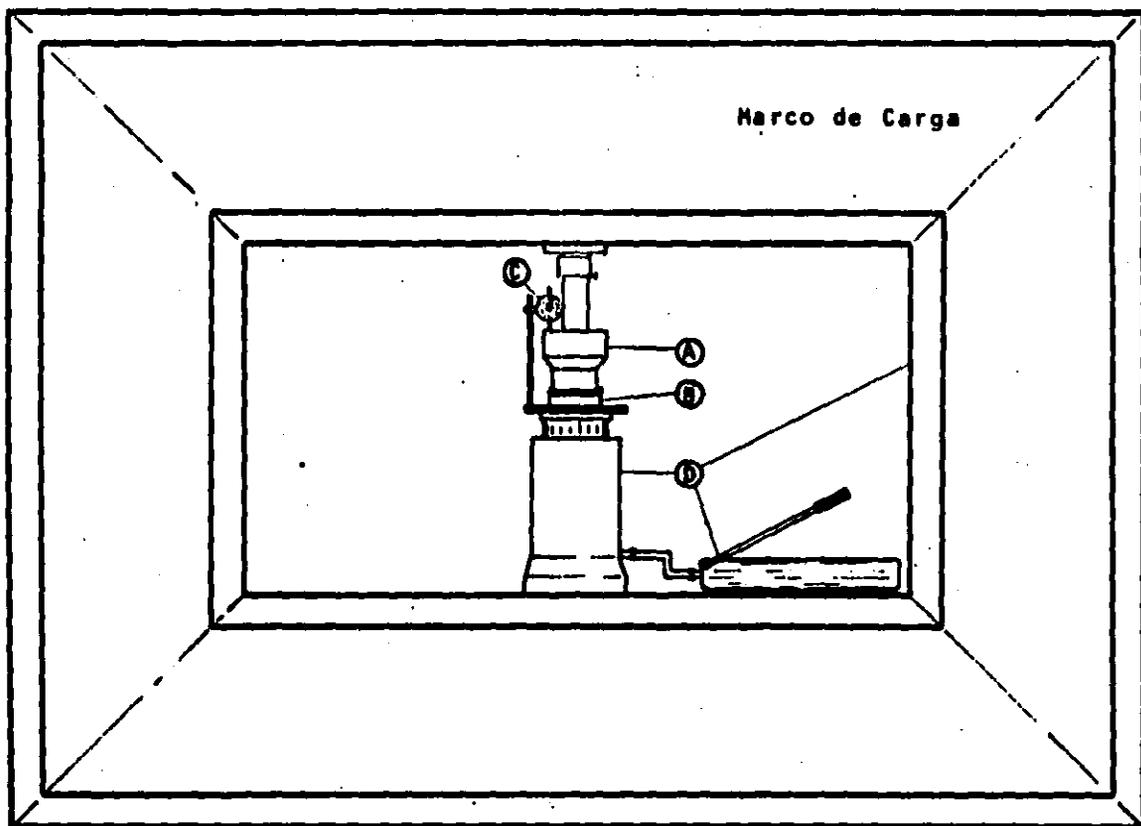


Fig. 3.1. Esquema del Equipo utilizado en la Fabricación de Partículas

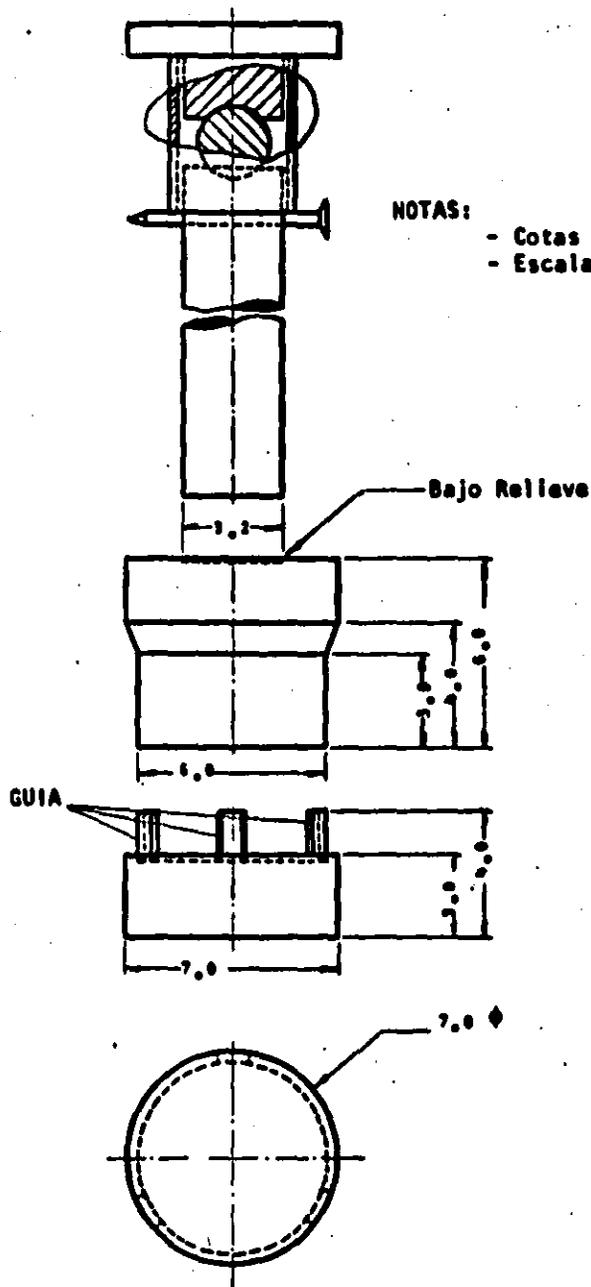


Fig. 3.2. Placas de Carga del Equipo de Fabricación de Partículas.

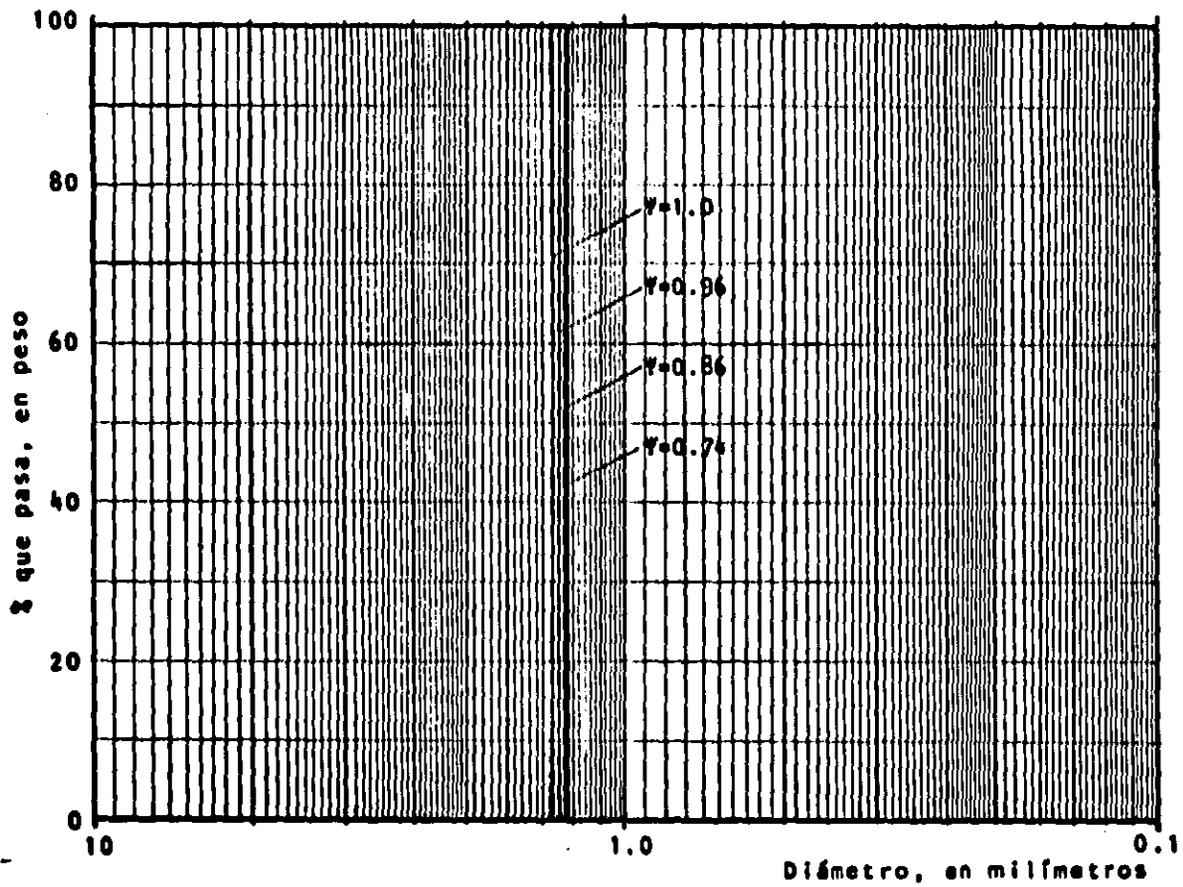


Fig. 3.3. Distribución Granulométrica del Material utilizado

TABLA N° 3.1

PROPIEDADES DE LAS PARTICULAS

Gravedad Específica 7.917				
Esfericidad	1.0	0.96	0.86	0.74
Diámetro mayor (m.m)	3.2	3.26	3.46	3.72
Altura (m.m)	3.2	2.80	2.40	2.00
Relación de Vacíos Máxima	0.751	0.734	0.701	0.684
Relación de Vacíos Mínima	0.650	0.559	0.525	0.496
Coefficiente de Uniformidad	1.0	1.0	1.0	1.0
Coefficiente de Curvatura	1.0	1.0	1.0	1.0

4.- FORMACION DE ESPECIMENES

4.1 DETERMINACION DE LA RELACION DE VACIOS MAXIMA Y MINIMA.

4.1.1 GENERALIDADES

El procedimiento de formación de las probas influye notablemente en el comportamiento del material, debido a que la variación de ciertos factores, - tales como: tamaño del recipiente utilizado para medir el volumen, altura de caída de las partículas, velocidad de vertido, interfase molde-partículas ⁽¹⁰⁾ ,

etc., de origen a diferente estructura, para la misma relación de vacíos. Este efecto fue estudiado por Ladd (11) y Mullis (12).

Para eliminar los errores que se pudieran originar por pequeños cambios en los factores anteriormente mencionados, fue estandarizado el procedimiento a seguir en la formación de probetas. También se tuvo en cuenta el hecho de reproducir las condiciones que reinarían durante el montaje de las probetas en la cámara triaxial; es así como en la determinación de la relación de vacíos máxima ($e_{m\acute{a}x}$) y mínima ($e_{m\grave{i}n}$), fue utilizado el molde que se emplea en la formación de las probetas para la prueba triaxial, con las mismas condiciones de frontera, es decir, colocando una membrana de hule en la interfase partícula-molde.

4.1.2 EQUIPO

El equipo utilizado en la determinación de la relación de vacíos máxima y mínima, fue el siguiente :

a) Molde partido de metal cuyas dimensiones son : 3.63 cm. de diámetro por -
8.61 cm. de altura (figura N° 4.1)

b) Embudo plástico

c) Base metálica

d) Membrana de hule

e) Collarín

f) Vibrador eléctrico

Figura N° 4.2

4.1.3 PROCEDIMIENTO

Se presentan dos casos :

a) Relación de vacíos máxima.

Inicialmente se introduce el embudo vacío en el molde, hasta que descansa en el fondo de éste -
(figura N° 4.2.a). Se vierten las partículas en el -

embudo hasta llenarlo (figura N° 4.2.b). Para que las partículas se depositen por peso propio y sin altura de caída, el embudo se levanta lentamente, agregando al mismo tiempo más partículas a éste (figura N° 4.2.c). Una vez lleno el molde se retira el collarín (figura N° 4.2.d). Finalmente se enrasa y se pesa (figura N° 4.2.e).

b) Relación de vacíos mínima.

El procedimiento seguido es semejante al presentado anteriormente; difiere únicamente en que antes de enrasar y pesar, se coloca encima de las partículas un sobrepeso. El conjunto molde-partículas-sobrepeso, es excitado con el vibrador eléctrico hasta lograr que el material no exhiba compactación. En todos los casos la vibración se mantuvo durante dos minutos, por ser un tiempo suficiente para lograr este objetivo. Finalmente se enrasa y las partículas contenidas en el molde se pesan. En los dos casos y para cada esfericidad, el procedimiento se repite 50 veces y se toma el promedio de los valores así determinados. El coeficiente máximo de variación $Cv_{máx}^*$ fue 0.4%.

* Cv , coeficiente de variación definido como la relación entre la desviación estándar y el valor medio.

La relación de vacíos máxima ($e_{m\acute{a}x}$) y mínima ($e_{m\acute{i}n}$), fue evaluada mediante la expresión :

$$e = \frac{Y_s}{Y_w} \frac{V_m}{W_s} - 1$$

donde :

- e, relación de vacíos
- Y_s , Peso volumétrico de sólidos
- Y_w , Peso volumétrico del agua
- V_m , Volumen del molde
- W_s , Peso de sólidos

En la figura N° 4.3, se presenta la variación de la relación de vacíos en función de la esfericidad.

4.2 FORMACION DE PROBETAS

En el conjunto molde-membrana, y con la ayuda de un embudo plástico, se vierten las partículas en seco, permitiendo su acomodo únicamente por peso propio, es decir, sin altura de caída. La membrana se mantiene solidaria al molde, mediante la aplicación de vacío y -

sobre ésta se pegan tiras plásticas de un centímetro de ancho y 0.015 milímetros de espesor, traslapadas - 1.5 milímetros; la función de las tiras plásticas es impedir la penetración de membrana. (En el capítulo N° 6 se analiza más detalladamente este aspecto).

Previamente al vertido de partículas, se determina el volumen efectivo (V_e) * y por ende el peso de sólidos necesario para lograr una relación de vacíos prefijada. Posteriormente el conjunto molde - partículas, en estado suelto, es vibrado hasta que - las partículas queden a ras con el molde.

Realizada esta operación se coloca la cabeza superior y se desdobra la membrana alrededor de ésta y de la base inferior; como sello se colocan - dos "o-ring" en cada cabeza.

Una vez sellado el sistema, se aplica vacío por el drenaje superior, manteniendo cerrada la

$$V_e^* , \text{ volumen efectivo} = V_m - V_1 - V_2$$

donde : V_m , Volumen del molde

V_1 , Volumen de la membrana

V_2 , Volumen de las tiras plásticas

válvula del drenaje inferior, y se retira el molde partido. En todos los casos el vacío aplicado en el interior de la probeta, fue de 0.15 Kg/cm^2 , garantizando así que el vacío más la presión de cámara (0.15 Kg/cm^2) durante la saturación, siempre fuera menor que el esfuerzo de consolidación $\bar{\sigma}_c$.

Después de retirar el molde se determinan las dimensiones reales de la probeta y se calcula la relación de vacíos inicial e_1 .

4.3 ETAPA DE SATURACION

Después de formar la probeta, se pone en equilibrio el sistema de carga, y se hace solidario con la cabeza superior. Posteriormente se llena la cámara con agua y se aplica una presión de 0.1 Kg/cm^2 , manteniendo el vacío por el drenaje superior y con el drenaje inferior cerrado. La válvula del drenaje inferior, que está conectada a una bureta que contiene agua desaireada, se abre para permitir que el agua fluya ascendentemente a través de la probeta, hasta que el agua salga

por el drenaje superior. Se cierran las válvulas de drenaje; se elimina el vacío y se conecta el drenaje superior a la bureta; se incrementa la presión de cámara y también la contrapresión a través de la bureta. El esfuerzo efectivo de confinamiento, durante la saturación, varió de 0.2 Kg/cm^2 a 0.5 Kg/cm^2 , dependiendo del esfuerzo de consolidación, $\bar{\sigma}_c$. Con contrapresión que varía de 2 Kg/cm^2 a 5 Kg/cm^2 , se mantienen las probetas durante un período no inferior a doce horas.

Para evaluar el grado de saturación del espécimen se determina el coeficiente de presión de poro, B^* , de Skempton. Con las válvulas de drenaje cerradas y antes de la etapa de consolidación, se incrementa la presión de cámara y se registra la presión de poro generada por este incremento. En todos los casos el coeficiente de presión de poro B , resultó ser mayor que 0.96; valor aceptable para considerar saturada la probeta (13).

* B , coeficiente de presión de poro, definido por Skempton como la relación entre la presión de poro generada por un incremento en la presión de cámara y el incremento de presión en la cámara.

4.4 ETAPA DE CONSOLIDACION

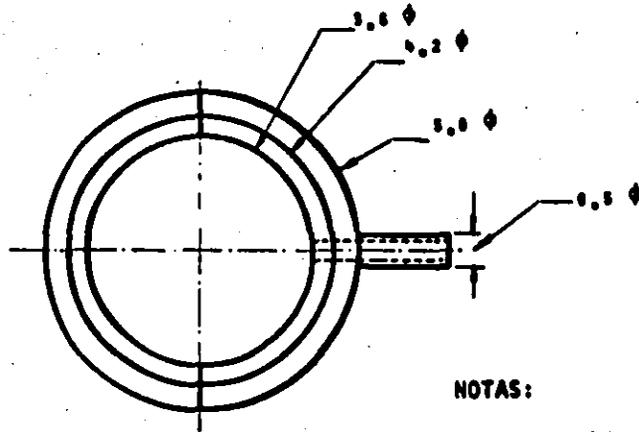
Una vez efectuada la saturación de la probeta se incrementa la presión de cámara, se abren las válvulas del drenaje y se registra el cambio volumétrico en la bureta que está conectada a las bases de la probeta.

4.5 ETAPA DE FALLA

Tanto en las pruebas consolidadas no drenadas (CU), como en las consolidadas drenadas (CD) previamente a la aplicación del esfuerzo desviador, se cierran las válvulas del drenaje para verificar mediante el puente, la disipación total de la presión de poro (u_d)*. Si la disipación es total, se abren las válvulas del drenaje si las pruebas son consolidadas drenadas, y se aplica el esfuerzo desviador; si las

* En este trabajo se entenderá como presión de poro, (u_d), a la presión en el agua en exceso a la contrapresión, (u , en Kg/cm^2).

pruebas son consolidadas no drenadas, se aplica el es fuerza desviador, manteniendo cerrado el sistema de drenaje. La velocidad de deformación vertical en la máquina de desplazamiento controlado (Wykeham-Farran ce), fue en todos los casos igual al 4% de la altura de la probeta, por hora (0.057 m.m./min.) .



NOTAS:

- Cotas en Centímetros
- Escala 1:1

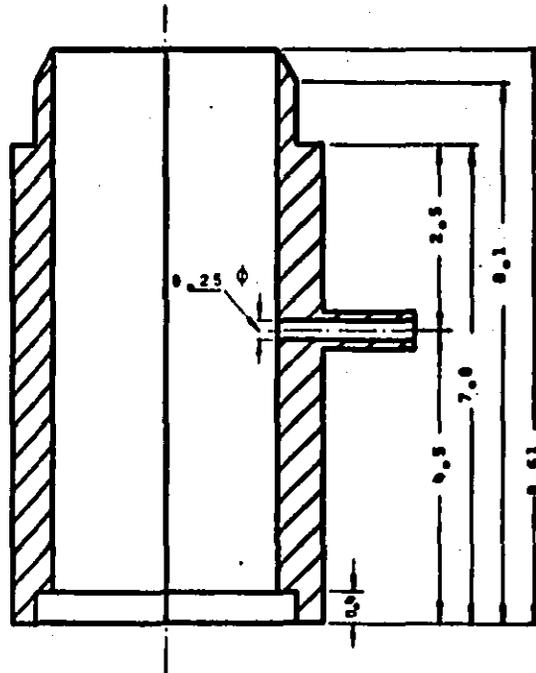


Fig. 4.1. Molde utilizado en la Formación de Especímenes

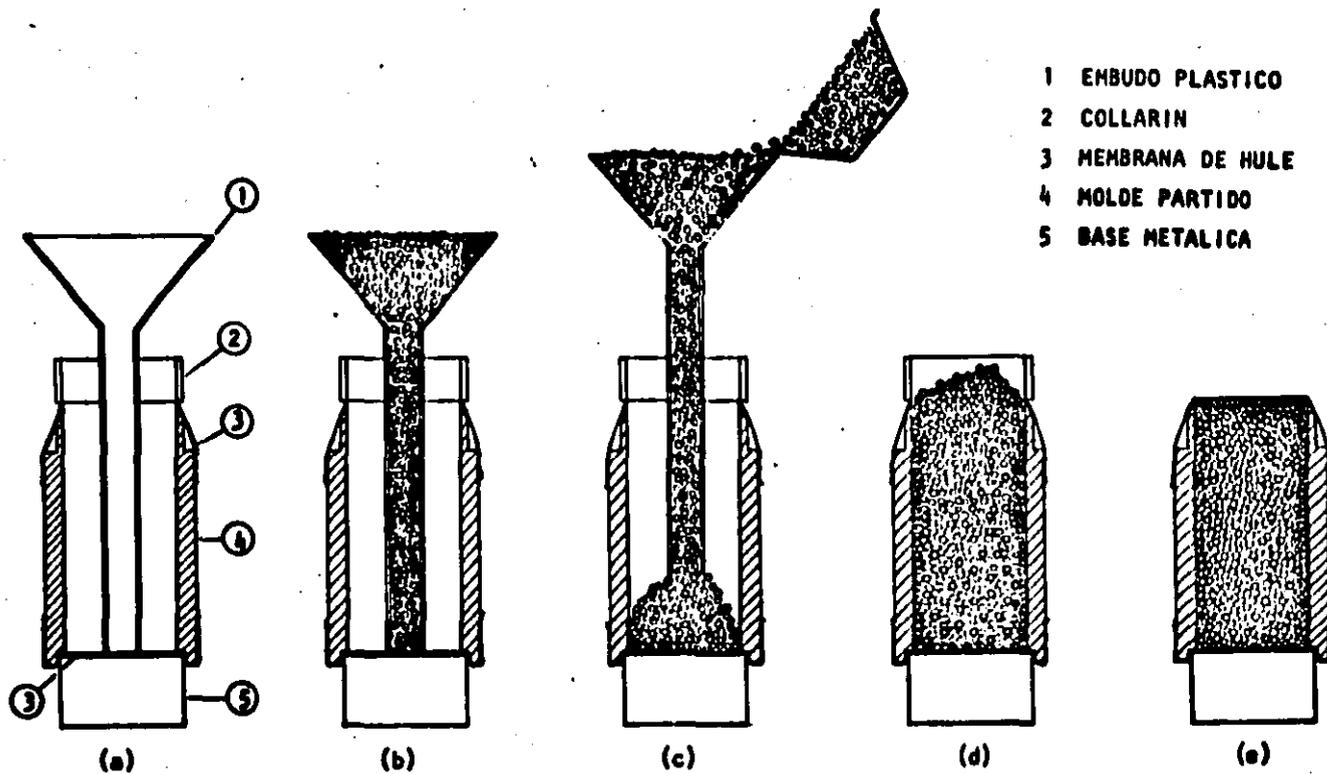


Fig. 4.2. Esquema Ilustrativo de la Determinación de la Relación de Vacíos.

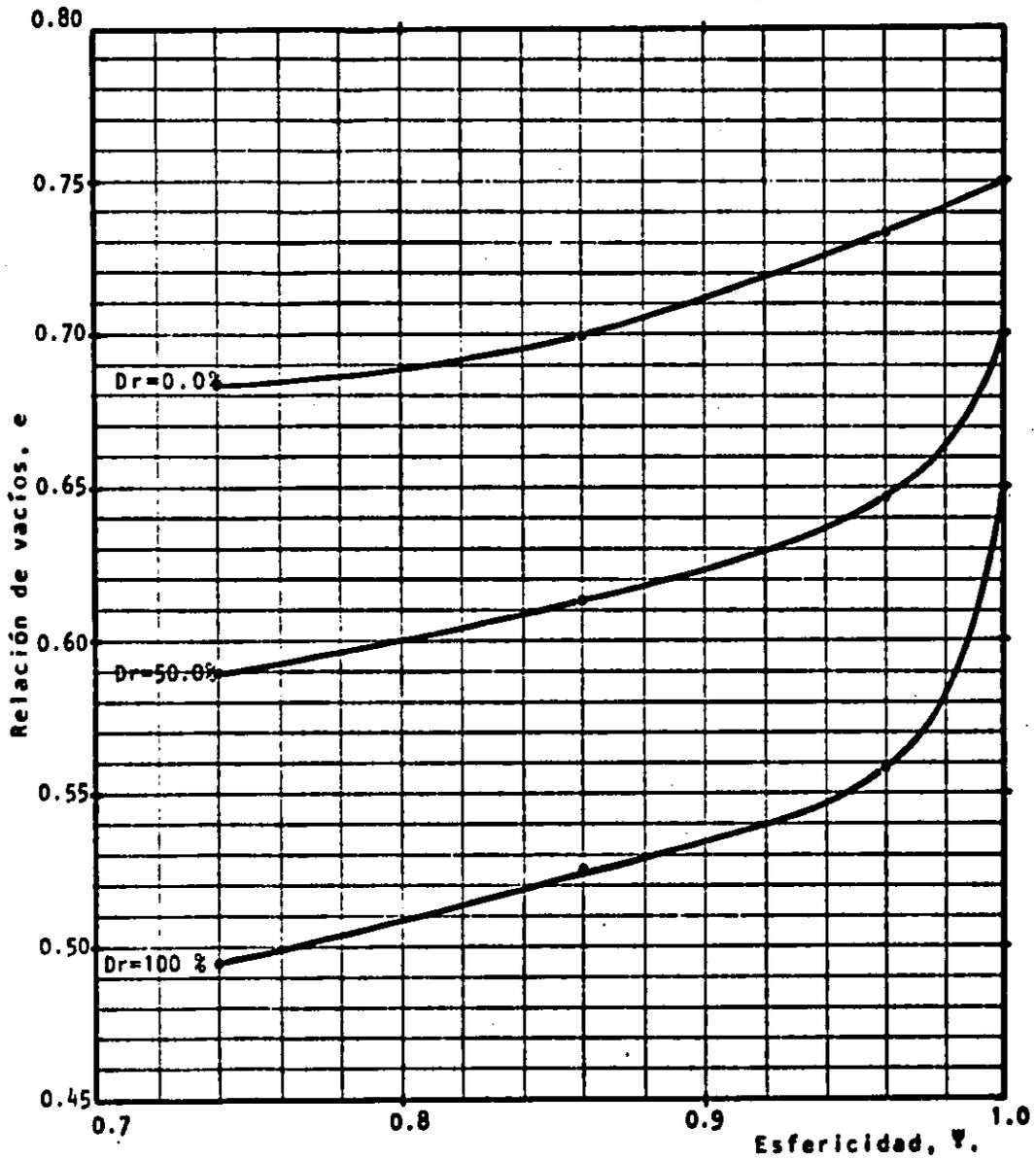


Fig. 4.3. Variación de la Relación de Vacíos en función de la Esfericidad.

5.- EQUIPO TRIAXIAL

5.1 DESCRIPCION GENERAL

El equipo utilizado fue la cámara triaxial de precisión INING 2 ⁽¹⁴⁾, desarrollada en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, en 1969. La cámara triaxial INING 2 consiste básicamente de la cámara propiamente dicha, caracterizada por la sencillez del mecanismo de carga axial que se describe más adelante. El equipo fue inicialmente diseñado para hacer pruebas

con suelos blandos; posteriormente en 1981, fue modificado el sistema de carga, para poder hacer pruebas con arenas, sin embargo, la capacidad del equipo permitía así, realizar pruebas con arenas sueltas a presiones de consolidación hasta de 6 Kg/cm^2 , y con arenas densas a bajas presiones de consolidación; en 1982 se incrementó la capacidad del equipo y es así como en la actualidad se puede aplicar una carga axial hasta de 300 Kgs. Para presiones hasta de 6 Kg/cm^2 se utiliza camisa confinante de lucita, para presiones mayores, camisa de aluminio.

Las membranas utilizadas son fabricadas en Inglaterra por la Wykeham-Farrance; el espesor varía de 0.017 cm. a 0.036 cm.

En la figura N°5.1 se muestra una sección transversal de la cámara, el detalle ampliado indica que las bases en contacto con la probeta son lubricadas (15). Las bases son de 4.2 cm. de diámetro y las dimensiones de las probetas ensayadas son: 3.63 cm. de diámetro, por 8.61 cm. de altura. Las bases lubricadas permiten que las probetas desarrollen deformacio-

nes más o menos uniformes en toda su altura; al utilizar bases convencionales, la aplicación de carga axial hace que las probetas se abarrilen, debido a que la restricción al desplazamiento lateral en el contacto bases probeta, origina concentración de es fuerzas, y deformaciones no uniformes.

La presión de poro es medida con un sistema puente Vishay-transductor; la precisión del conjunto es de 0.002 Kg/cm^2 a 20°C . No se tuvo en cuenta en la medición la variación que se pudiera presentar por cambios de temperatura, puesto que las pruebas se realizan en un cuarto con temperatura controlada de 20 ± 1 grados centígrados.

El drenaje de la probeta se realiza a través de las bases de contacto, unidas mediante conductos metálicos a una bureta que permite medir cambios volumétricos con una precisión de 0.05 cm^3 . Para evitar la evaporación del agua drenada y la disolución de aire en el agua que contiene la muestra, la parte superior de la bureta contiene aceite de si licón de 0.5 cp de viscosidad y 15.9 dinas/cm. de tensión superficial.

5.2 MECANISMO DE CARGA

El sistema de carga mostrado en la figura N° 5.2, transmite la carga a la probeta mediante un sistema de alambres a tensión. El dispositivo de carga consiste básicamente de tres placas (superior, central e inferior) y 6 alambres de acero; tres de los alambres unen la placa central con la placa inferior y los tres restantes unen la placa central con la placa superior. La placa superior está unida a una cadena tensionada por un contrapeso. La placa inferior está acoplada a un colgador que permite colocar las pesas de carga.

5.3 EQUIPO DE MEDICION

5.3.1 DESCRIPCION

Mediante un anillo de carga con capacidad de 250 Kgs., que tiene adaptado un micrómetro, fabricado por la B.C. AMES CO., Waltham, Mass, con una pre

cisión de 0.001 m.m., se puede medir con suficiente -
aproximación la carga axial en cualquier momento de -
la prueba, en virtud de que la fricción en este sistema
de carga es muy baja.

Con un transductor de presión modelo -
PT31-3C, fabricado por la Microdot Inc., conectado a
un puente fabricado por la Vishay Instruments, Inc. ,
se mide la presión de poro. El transductor utilizado
es de tipo no cementado; la presión de trabajo varía
de 0 a 300 psi . (0 a 20 Kg/cm²).

Utilizando un micrómetro fabricado por la
Mitutoyo, se miden las deformaciones axiales con una
precisión de 0.01 m.m. El micrómetro se instala so-
bre la ya mencionada placa inferior del sistema de -
carga.

5.3.2 CALIBRACIONES

La calibración del anillo de carga se realiza
colocando suficiente carga en el contrapeso del

sistema de carga, después se colocan pesos conocidos en el colgador de la placa inferior y se registra la respuesta del anillo. Con los resultados se elabora la curva de calibración presentada en la figura - - N° 5.3 .

El sistema transductor-puente se calibra comparando las lecturas del transductor con las observadas en un manómetro de mercurio. El sistema se calibró tanto en carga como en descarga, en un intervalo de presiones de 0 a 6.0 Kg/cm². La correspondiente curva de calibración se presenta en la figura - - N° 5.4 .

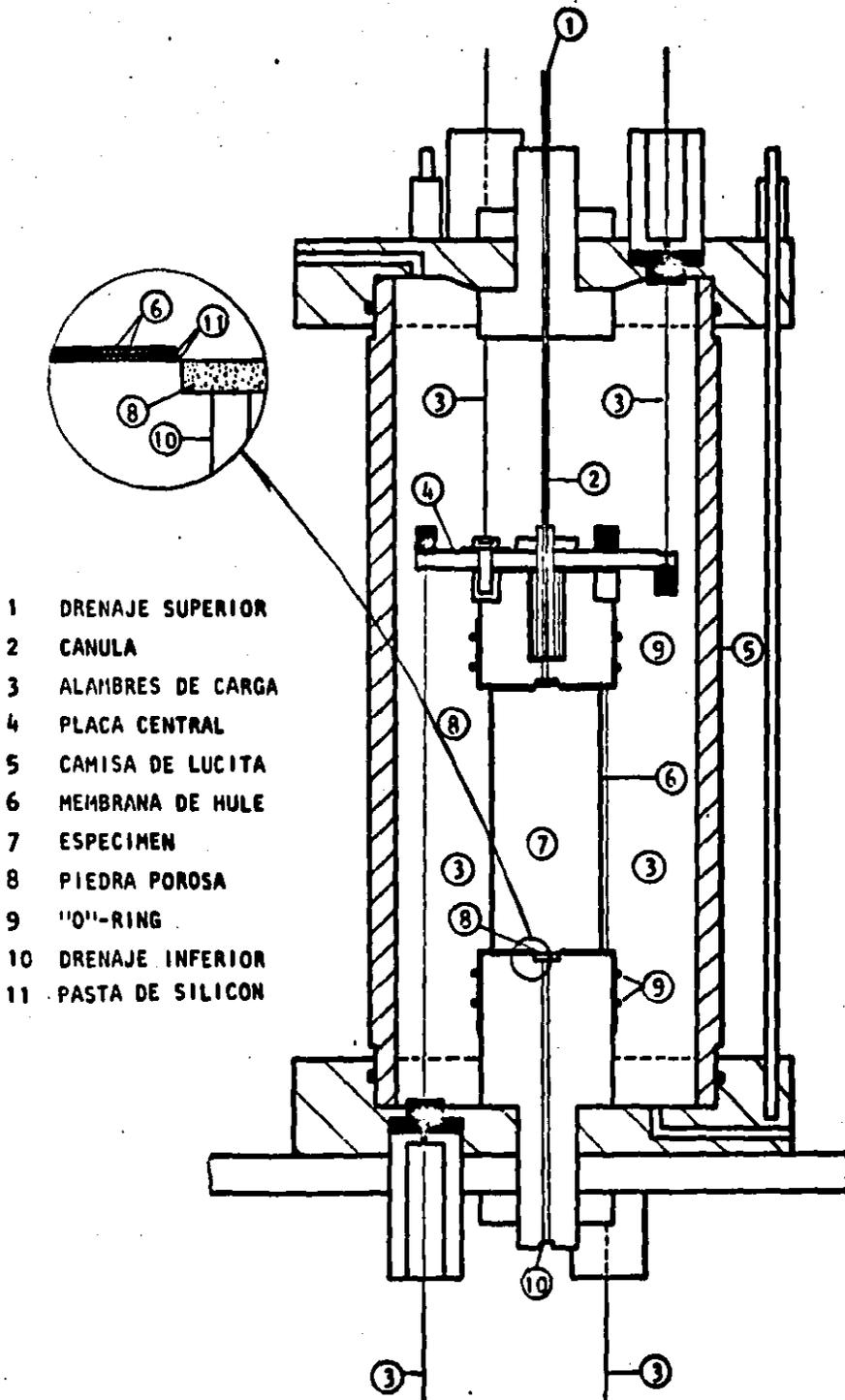
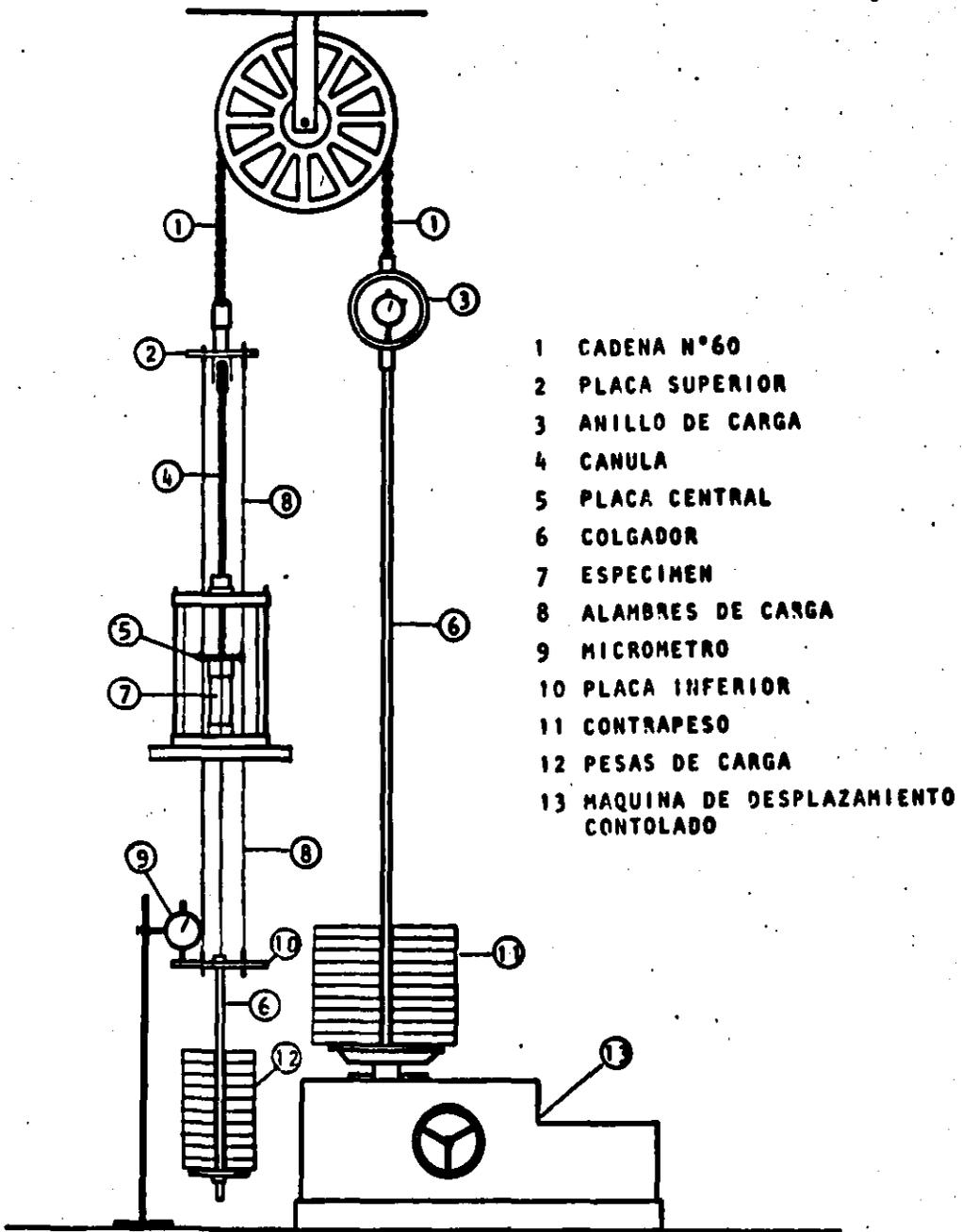


Fig. 5.1. Sección Transversal de la Cámara Triaxial



- 1 CADENA N°60
- 2 PLACA SUPERIOR
- 3 ANILLO DE CARGA
- 4 CANULA
- 5 PLACA CENTRAL
- 6 COLGADOR
- 7 ESPECIMEN
- 8 ALAMBRES DE CARGA
- 9 MICROMETRO
- 10 PLACA INFERIOR
- 11 CONTRAPESO
- 12 PESAS DE CARGA
- 13 MAQUINA DE DESPLAZAMIENTO CONTROLADO

Fig. 5.2. Esquema ilustrativo del Sistema de Carga.

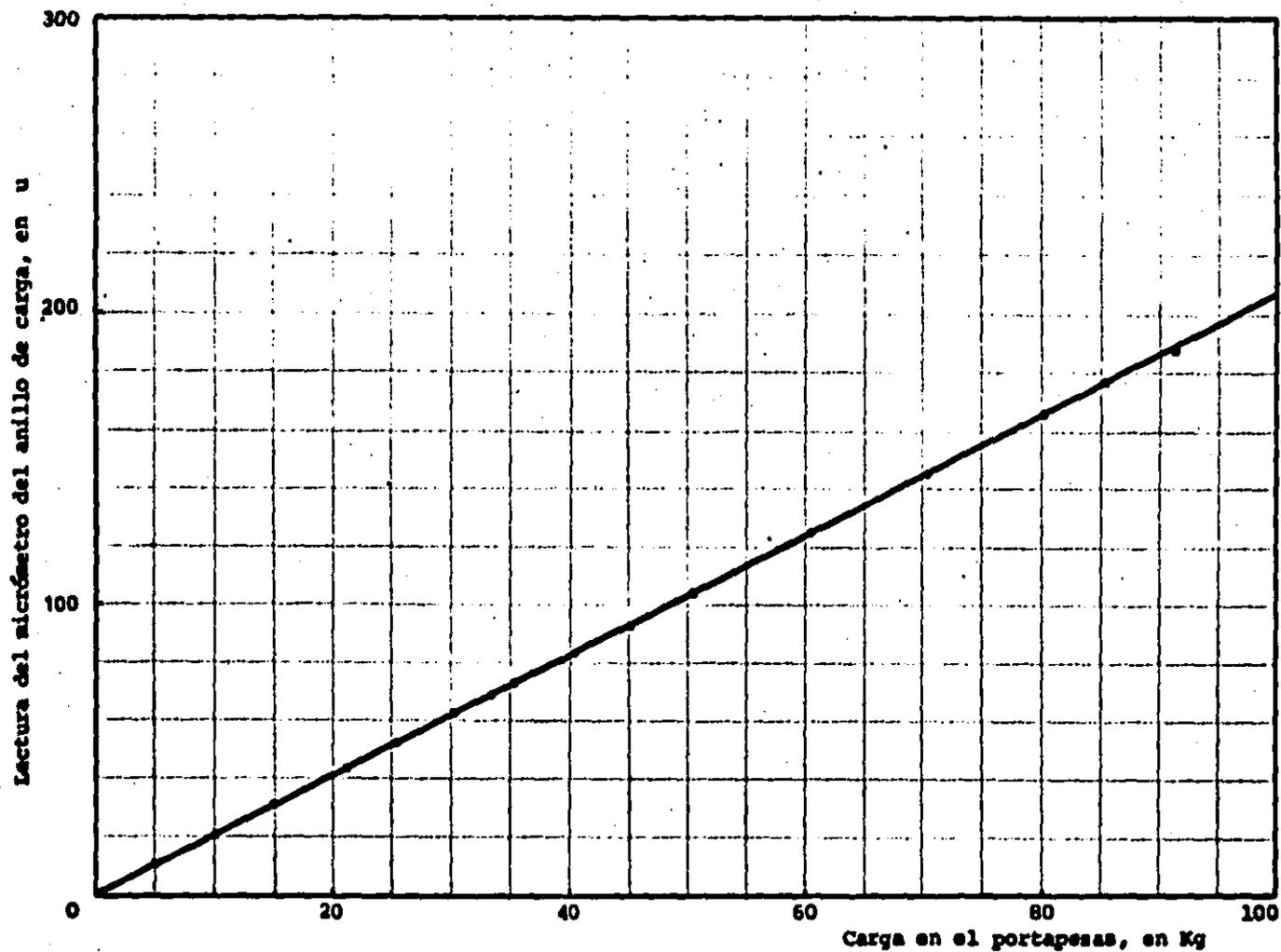


Fig. 5.3. Calibración del anillo de carga

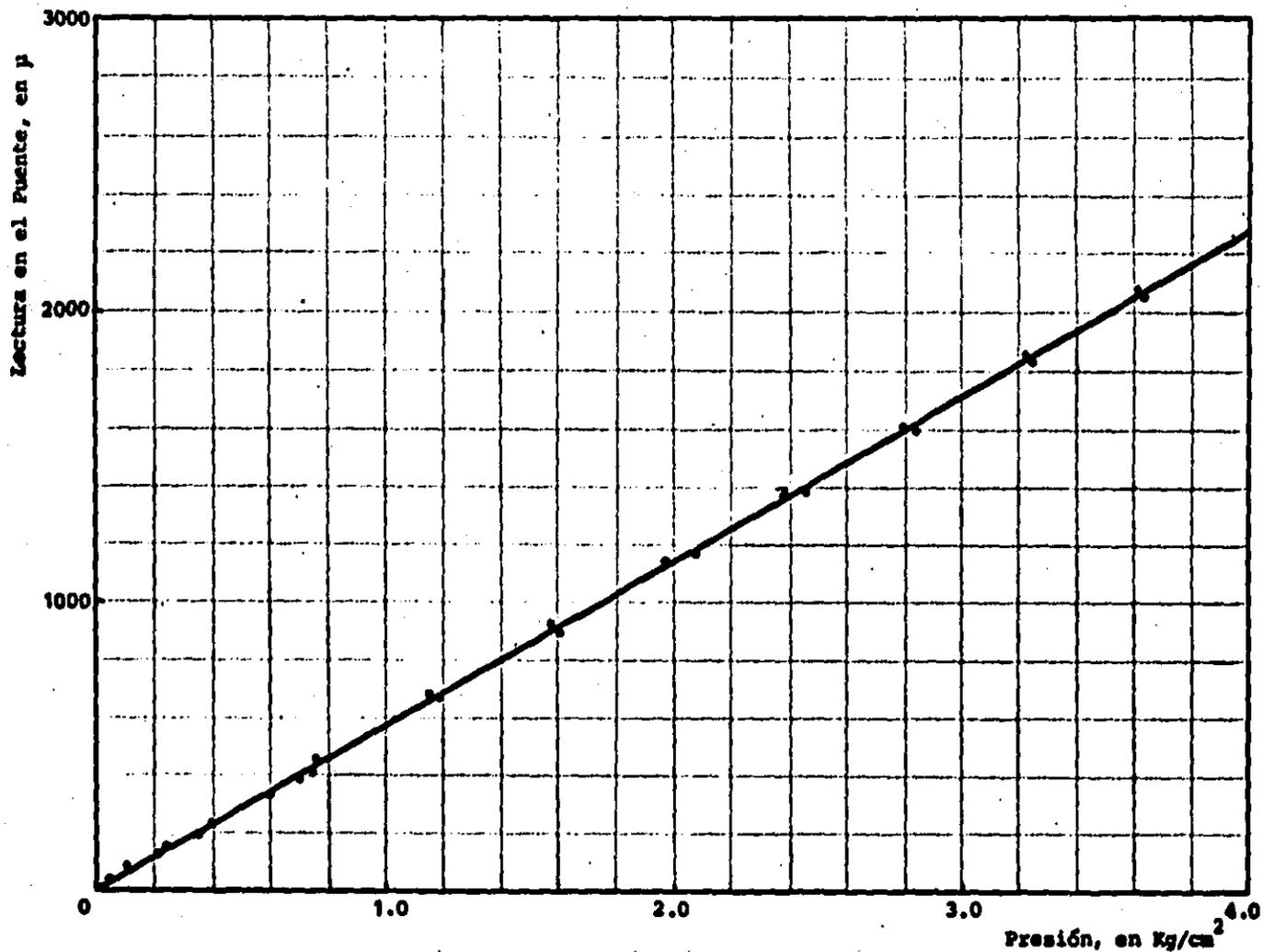


Fig. 5:4. Curva de Calibración del Transductor "Dynisco" con el Punteo "Vishay".

6.- PRUEBAS TRIAXIALES CONSOLIDADAS NO DRENADAS MIDIENDO PRESION DE PORO (CU)

6.1. ESFUERZOS DE CONSOLIDACION

Para analizar el comportamiento esfuerzo - deformación y determinar las trayectorias de esfuerzos y envolventes de resistencia, se realizaron pruebas triaxiales consolidadas no drenadas midiendo la presión de poro generada en la etapa de falla. Las presiones de consolidación $\bar{\sigma}_c$, fueron : 0.3, 1.0, 2.0 y 4.0 Kg/cm².

6.2. CONDICIONES INICIALES DE PRUEBA

La relación de vacíos inicial es la que corresponde a una densidad relativa, (D_r), igual al 50%. Con este criterio se formaron probetas en las que se variaba únicamente la esfericidad de las partículas. En la tabla N° 6.1. se presentan los valores de diferentes parámetros al inicio de las pruebas.

Teniendo en cuenta la referencia (13) , y con valores del parámetro B de Skempton superiores a 0.95, se puede considerar que la saturación en todas las pruebas fue muy cercana al 100%.

6.3. VELOCIDAD DE DEFORMACION

La velocidad de deformación axial impuesta por la máquina de deformación controlada, fue en todos los casos del 4% de altura de la probeta, por hora.

Basándose en investigaciones realizadas por Bishop y Gibson, Josseume (16), presenta la relación que permite evaluar el tiempo de prueba necesario para alcanzar el 95% de homogenización de la presión de poro dentro del espécimen. En función del tiempo de consolidación, la relación es :

$$t_{95} = 2.12 t_{100} \quad (6.1)$$

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

t_{100} es el tiempo necesario para lograr el 100% de consolidación, en la etapa de carga isotrópica con drenaje en ambas caras y sin drenaje en la periferia.

Por tratarse de un material grueso, la consolidación es inmediata, sin embargo, el sistema de drenaje se mantiene abierto durante media hora, para garantizar que la presión de poro se ha disipado totalmente. Según la relación (6.1), las pruebas se podrían haber

realizado rápidamente. El tiempo de duración de las pruebas fue de 4 horas, lo que garantiza que la homogenización de la presión de poro fue en todo momento superior al 95%.

6.4. CORRECCIONES

6.4.1 EFECTOS PRODUCIDOS POR PENETRACION DE LA MEMBRANA

El tamaño de las partículas utilizadas en la formación de las probetas, hace que la penetración de la membrana dentro del espécimen, sea un efecto - que, además de impedir el progreso de la prueba al presentarse la rotura de ésta, origina errores en la determinación del cambio volumétrico en la etapa de consolidación y en la presión de poro durante la falla.

Kiekbush (17), Flavigny (18) y Lade (19), han estudiado los efectos de la penetración de la membrana, sin que actualmente se cuente con alguna co-

rección para pruebas CU, que elimine el problema que a continuación se describe: En el momento de formar la probeta, la membrana permanece sin penetrar (Figura N° 6.1 a), pero al aplicar la presión de consolidación y permitir el drenaje, la membrana penetra en los vacíos de la superficie lateral de la probeta, (Figura N° 6.1 b); finalmente, al aplicar el esfuerzo desviador con las válvulas de drenaje cerradas, la presión de poro y la penetración de la membrana se alteran (Figura N° 6.1 c). Lo anterior conduce a pequeñas variaciones en el volumen de la probeta, originando alteraciones en la presión de poro durante la aplicación del esfuerzo desviador.

Kieckbusch y Schuppener (17), proponen como solución al problema, aplicar sobre la membrana antes de formar la probeta, una película de hule fluido que pase a llenar los vacíos de la interfase membrana-partículas en el momento de verter las partículas en el molde (Fig. N° 6.1 d).

El tamaño de partículas utilizado en esta investigación, impide que la solución propuesta en el

inciso anterior, surta efecto (Fig. N° 6.1 e). Se realizó una prueba aplicando el método, pero además de conservarse la penetración, el problema fue mayor porque las partículas en contacto con el hule fluido se oxidaron.

Como medida correctiva se recomienda colocar en la interfase membrana-partículas, franjas verticales de plástico (Fig. N° 6.1 f), traslapadas lo suficiente para que éstas se separen cuando la deformación axial sea más o menos del 20%. El método fue desarrollado y experimentado durante el transcurso de esta investigación, con resultados satisfactorios. En la Figura N° 6.2 se presenta la influencia que tiene la penetración de la membrana, en la determinación del cambio volumétrico durante la etapa de consolidación.

Para determinar cómo se afecta la rigidez de la membrana y los resultados de la prueba al utilizar franjas plásticas, se realizaron dos pruebas triaxiales consolidadas no drenadas (CU), con arena de Ottawa; en una, se utilizaron franjas plásticas, y

en la otra no. En estas pruebas de comparación se utilizó arena de Ottawa, porque su granulometría ayuda a que el efecto de penetración de la membrana sea despreciable, permitiendo así atribuir las posibles diferencias en los resultados, a la presencia de las franjas plásticas en la interfase partículas-membrana, ya que las condiciones de prueba en los dos casos fueron muy semejantes. La consistencia de resultados observada en la Fig. N° 6.3, permite concluir que la rigidez inducida en la membrana por la presencia de las franjas plásticas es despreciable.

6.4.2 CORRECCION DE MEMBRANA

Henkel y Gilbert (20), suponen que la membrana y el espécimen se deforman solidariamente y proponen restarle al esfuerzo desviador la siguiente expresión :

$$\Delta\sigma_d = \frac{4 M \epsilon_z (1-\epsilon'_z)}{D} \quad (6.2)$$

donde : $\Delta\sigma_d$, es la corrección al esfuerzo desviador por la presencia de membrana.

M , es el módulo de elasticidad de la membrana por unidad de ancho, despreciando la rigidez inducida por la presencia de franjas plásticas
($M = 0.27 \text{ Kg/cm}^2$) .

ϵ_z , es la deformación axial

D , es el diámetro inicial del espécimen.

La anterior corrección supone que :

- a) La membrana actúa como un cascarón que confina el material, incrementando su resistencia.
- b) El espécimen durante la deformación , mantiene su forma cilíndrica.

La anterior corrección se presenta graficada en función de la deformación axial, en la figura N° 6.4 .

6.4.3 CORRECCION EN LA SECCION TRANSVERSAL DE LA PROBETA BETA

Al aplicar el esfuerzo desviador, la probeta se deforma axialmente, originando en todo momento un incremento del área de la sección transversal. Suponiendo que las deformaciones laterales y axiales son uniformes y que el volumen permanece constante, el área de la sección transversal de la probeta en cualquier momento de la etapa de falla, se determina con la siguiente expresión :

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

donde : A_c , es el área corregida de la sección transversal de la probeta en cualquier instante de la prueba

A_i , es el área inicial de la sección transversal de la probeta, después de la consolidación

ϵ_z , es la deformación axial

6.5 COMPORTAMIENTO ESFUERZO DEFORMACION

Las curvas esfuerzo-deformación se presentan de la Fig. N°6.5 a la Fig. N°6.20; en ellas se puede observar en general la existencia de un punto de inflexión, correspondiente a la deformación en que la presión de poro es máxima; después del punto de inflexión el esfuerzo desviador aplicado varía casi linealmente, con la deformación axial hasta un máximo - que coincide con la mínima presión de poro.

Nótese la presencia del efecto usualmente denominado "stick-slip", (21), que será analizado - en el inciso 8.2.

6.6 COMPORTAMIENTO PRESION DE PORO DEFORMACION

En las Figuras N° 6.5 a 6.20, se observa - que la presión de poro alcanza un valor máximo y después disminuye hasta hacerse negativa. La presión de poro máxima siempre fue menor de 1.0 Kg/cm^2 y se presenta para deformaciones axiales menores del 1%. Nóte se que la presión de poro se torna luego negativa en

todas las pruebas, y disminuye a medida que disminuye la esfericidad de las partículas, hasta un valor mínimo, Fig. N° 6.21, después del cual la disminución en la esfericidad de las partículas genera mayor presión de poro durante la etapa de falla.

6.7 TRAYECTORIA DE ESFUERZOS EFECTIVOS

Las trayectorias de esfuerzos fueron obtenidas para los planos potenciales de falla, supuestamente inclinados a 60° con respecto a la dirección del esfuerzo principal menor. En las Figuras N° 6.22, 6.23, 6.24 y 6.25, se observa que la presión de poro positiva generada, es pequeña y presenta un máximo a partir del cual los puntos representativos (τ, σ) se acercan asintóticamente a una recta que pasa por el origen del sistema coordenado.

6.8 ENVOLVENTES DE RESISTENCIA

Se considera en general que la falla ocurre cuando se presentan sea :

- a) El máximo esfuerzo desviador σ_d
 sea
 b) La máxima relación de esfuerzos efectivos principales $(\bar{\sigma}_1/\bar{\sigma}_3)_{\text{máx}}$

En la tabla 6.1, (pag.90), se presentan los valores del ángulo de fricción interna (ϕ), calculados teniendo en cuenta los dos criterios anteriores; nótese que el ángulo de fricción interna es menor cuando el criterio de falla es el máximo esfuerzo desviador.

Las Figuras N° 6.26, 6.27, 6.28 y 6.29, presentan la variación de la relación de esfuerzos principales efectivos, $(\bar{\sigma}_1/\bar{\sigma}_3)$, en función de la deformación axial, ϵ_z . Si las envolventes de resistencia fueran líneas rectas, la variación de la relación de esfuerzos principales efectivos, en función de la deformación axial, sería única e independiente del esfuerzo de consolidación, $\bar{\sigma}_c$; el incremento en la dispersión de resultados, con la disminución de la esfericidad, permite visualizar la influencia de la forma de las partículas en la curvatura de las envolventes de resistencia.

6.9 COMPORTAMIENTO RESISTENCIA ESFERICIDAD

La resistencia aumenta a medida que disminuye la esfericidad de las partículas (Fig. N°6.30)

En la Fig. N° 6.30 se puede observar que, a misma esfericidad Ψ y para valores de Ψ menores que 0.96, el ángulo de fricción interna disminuye al aumentar el esfuerzo de consolidación $\bar{\sigma}_c$. Este efecto es tanto más notorio, cuanto menor es el valor de la esfericidad.

6.10 COMPORTAMIENTO DEFORMACION ESFERICIDAD

La Fig. N° 6.31 presenta la variación del módulo de deformación secante $(E_s)_{s_0}$. El módulo secante se incrementa a medida que disminuye la esfericidad de las partículas y alcanza su máximo valor cuando la esfericidad es cercana a 0.9. Para valores de Ψ menores que 0.9, la deformabilidad del medio se incrementa ligeramente.

$(E_s)_{s_0}$, Módulo secante evaluado por la relación (σ_d/c_2) en el punto donde $\sigma_d = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2) \text{ máx}}{2}$

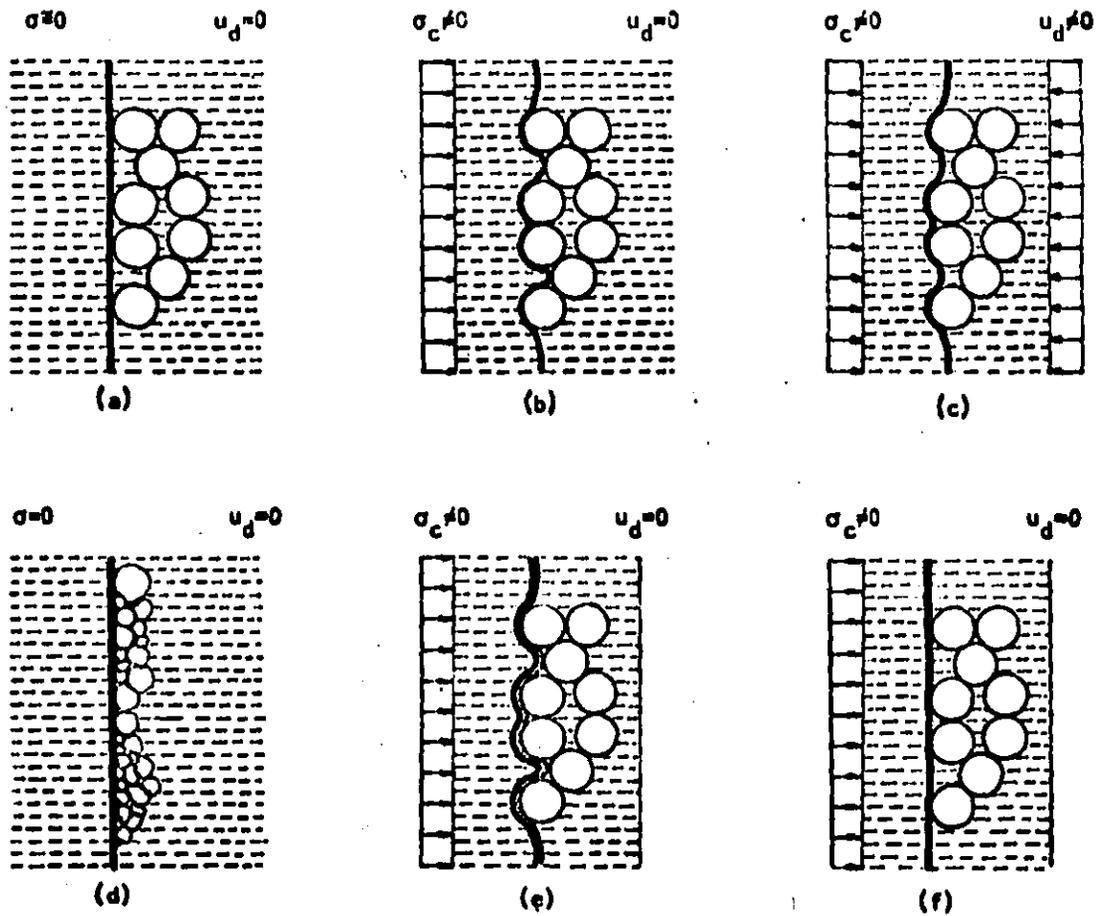
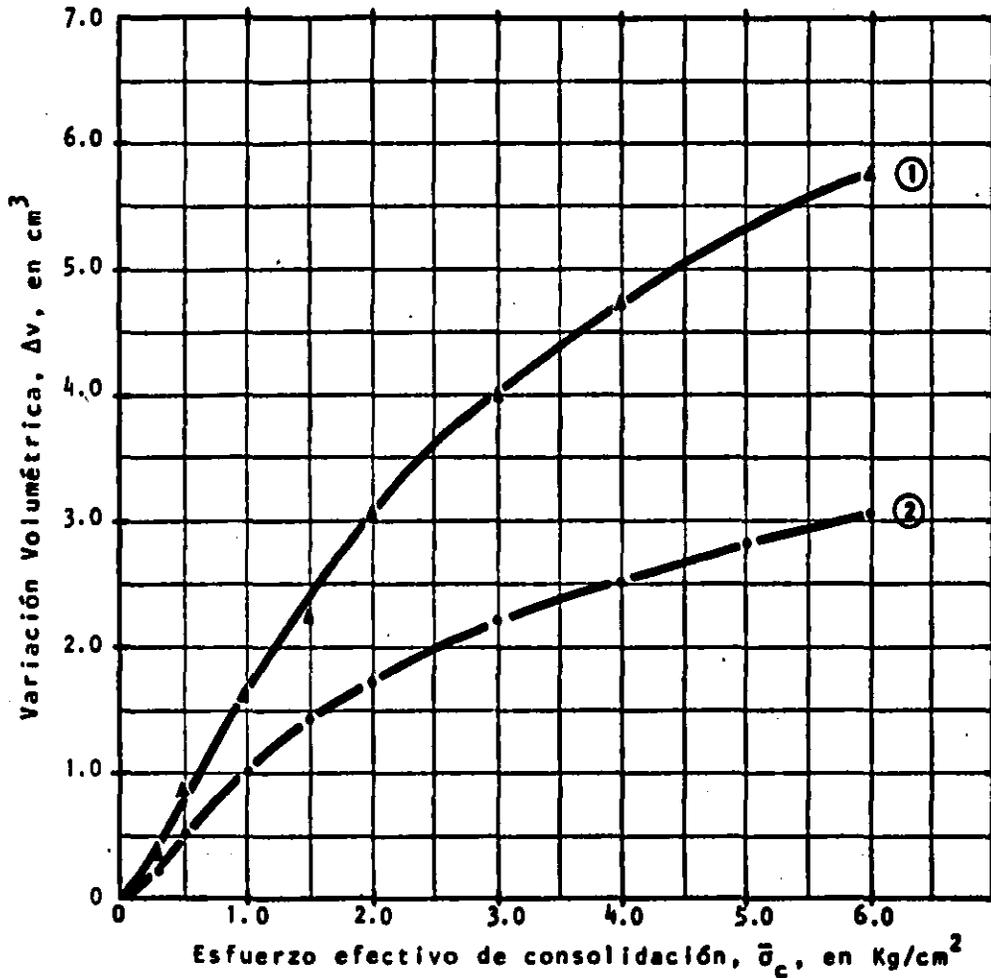


Fig. 6.1. Esquemas ilustrativos de penetración de membrana y medidas correctivas



- ① Sin tiras plásticas en la membrana de hule
 ② Con tiras plásticas en la membrana de hule

Fig. 6.2. Efectos de la Medida Correctiva a la Penetración de Membrana.

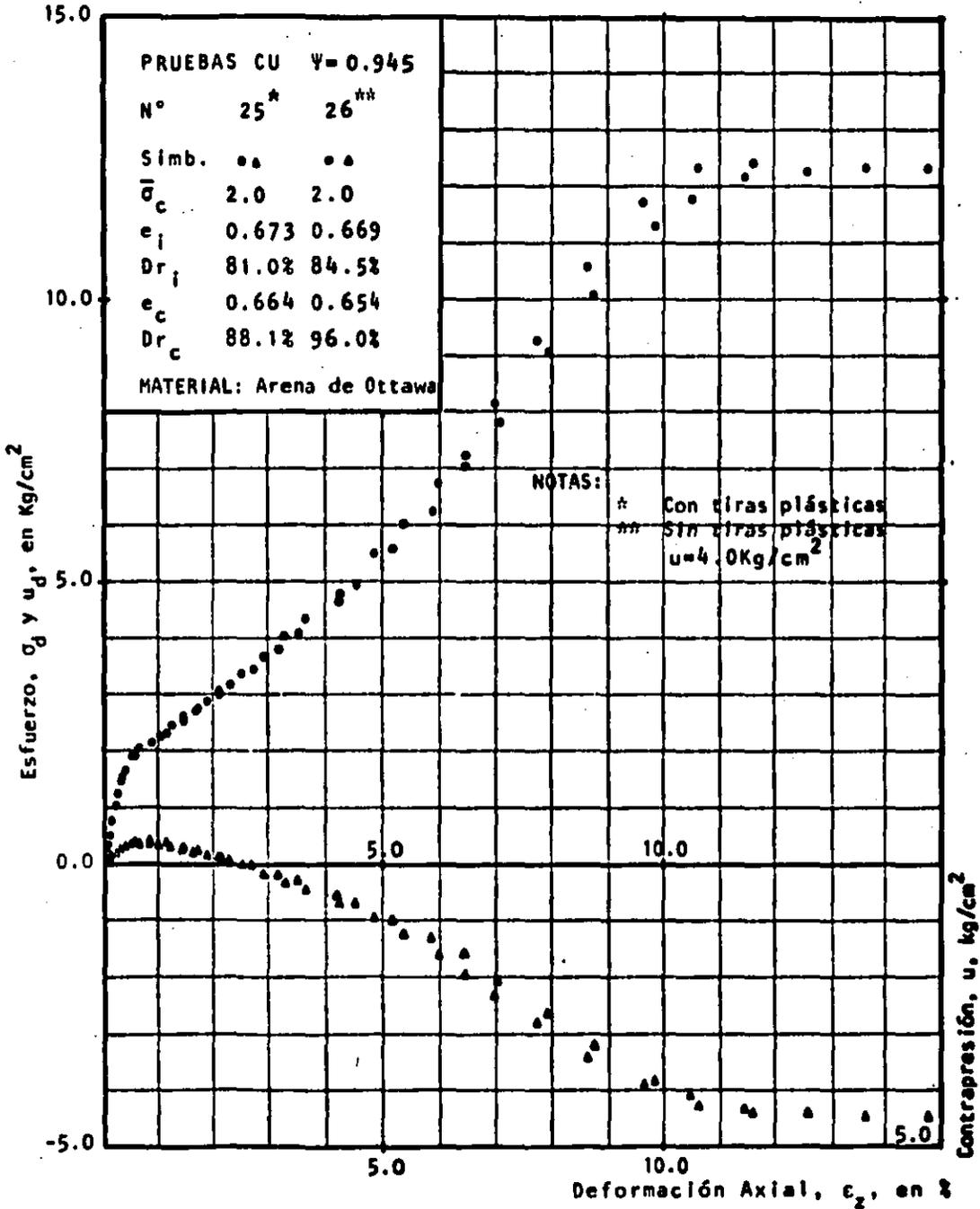


Fig. 6.3. Influencia de las Franjas Plásticas en el Comportamiento Esfuerzo-Deformación. (Arena de Ottawa)

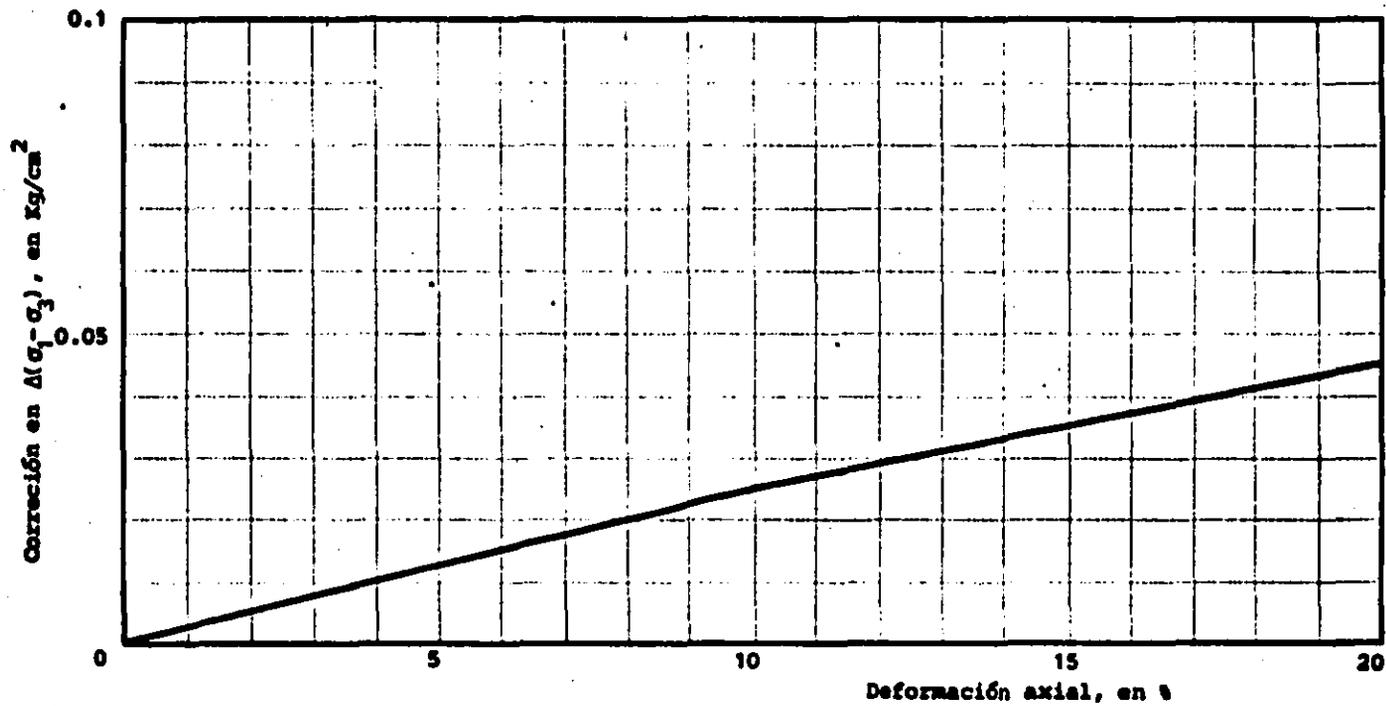


Fig. 6.4. Corrección del Esfuerzo Desviador por Efecto de la Membrana (HENKEL)

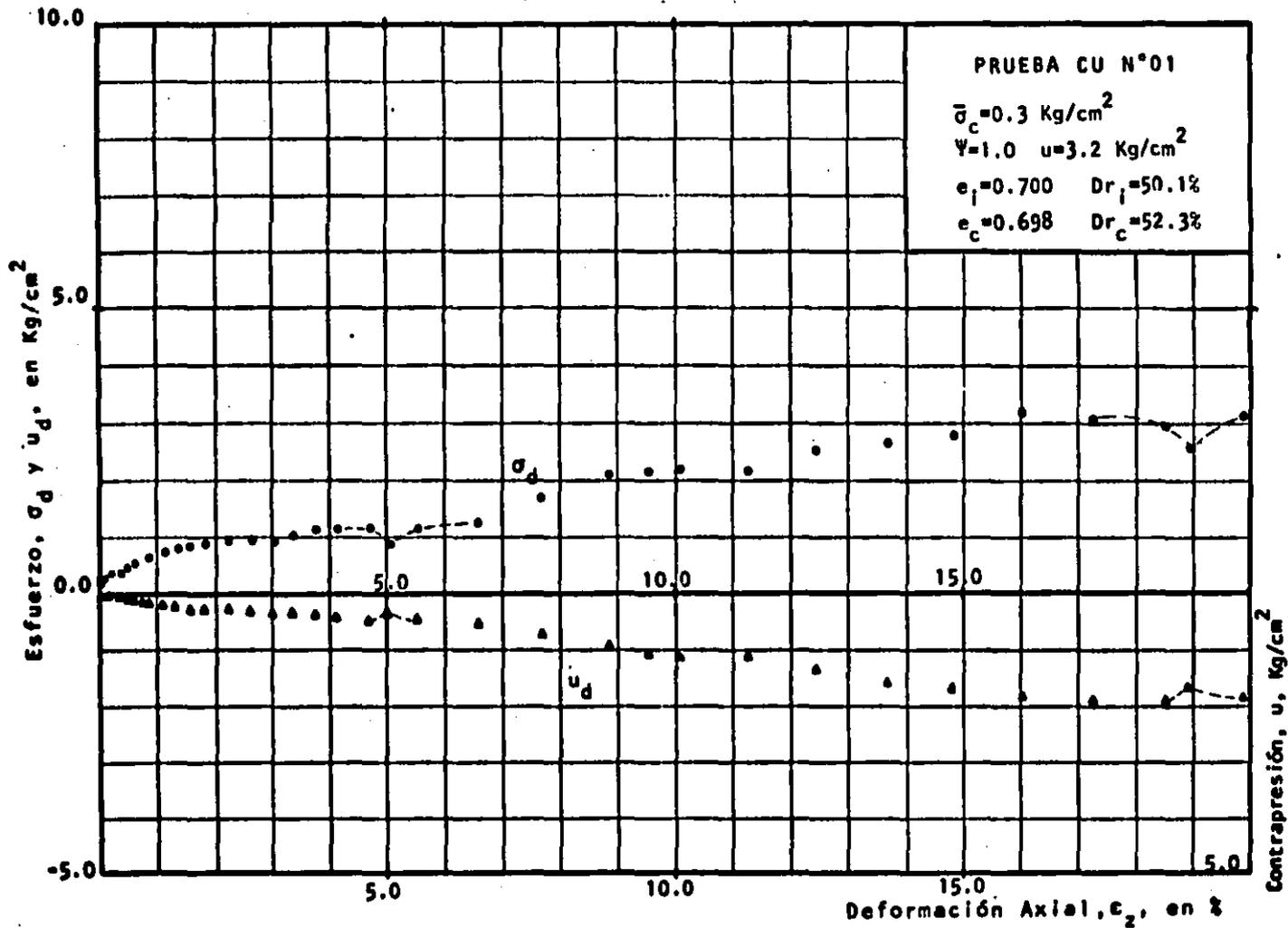


Fig. 6.5. Curvas Esfuerzo Desviador y Presión de Poro vs Deformación Axial. (PRUEBA CU 01)

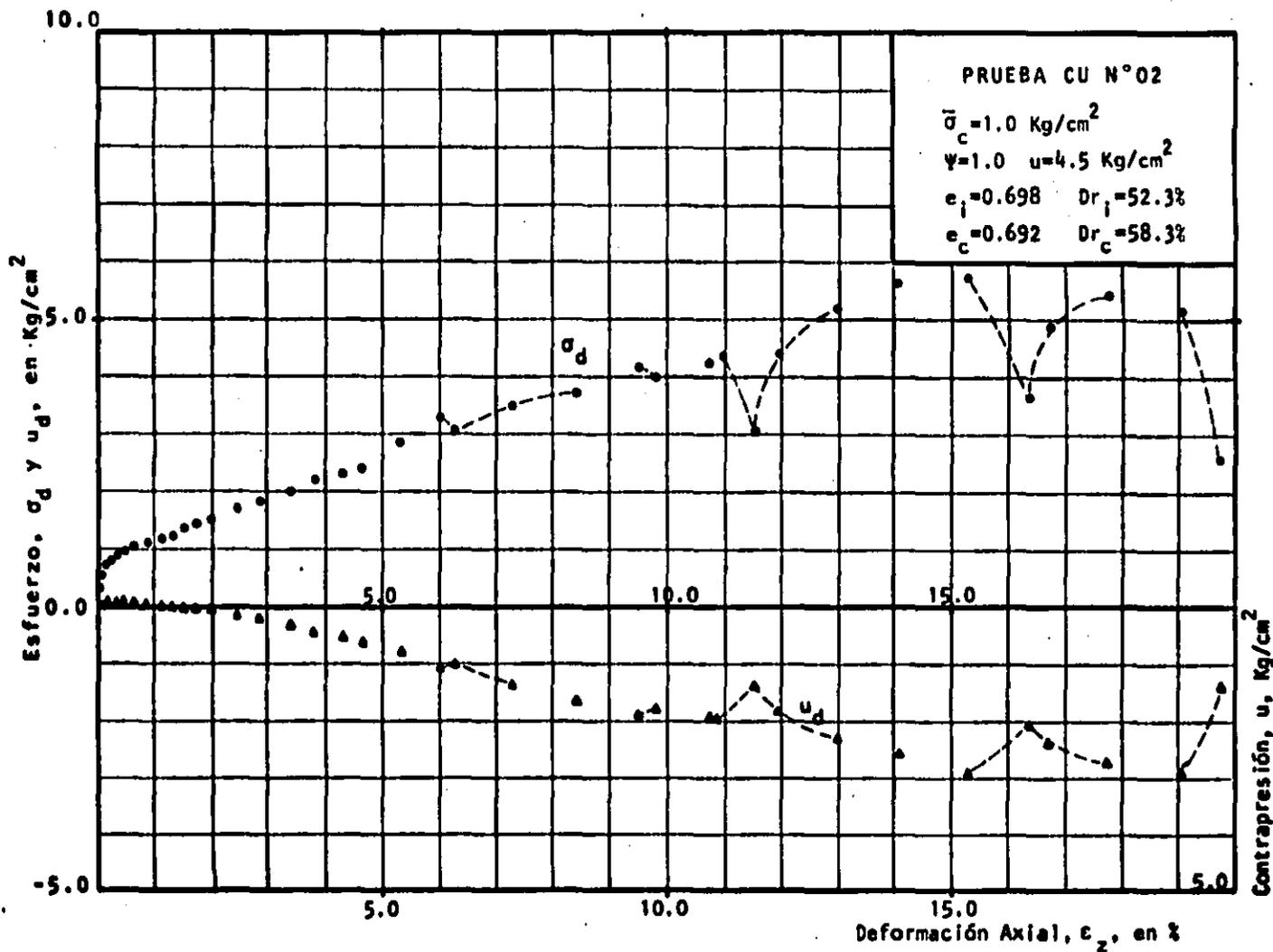


Fig. 6.6. Curvas Esfuerzo Desviador y Presión de Poro vs Deformación Axial. (PRUEBA CU 02)

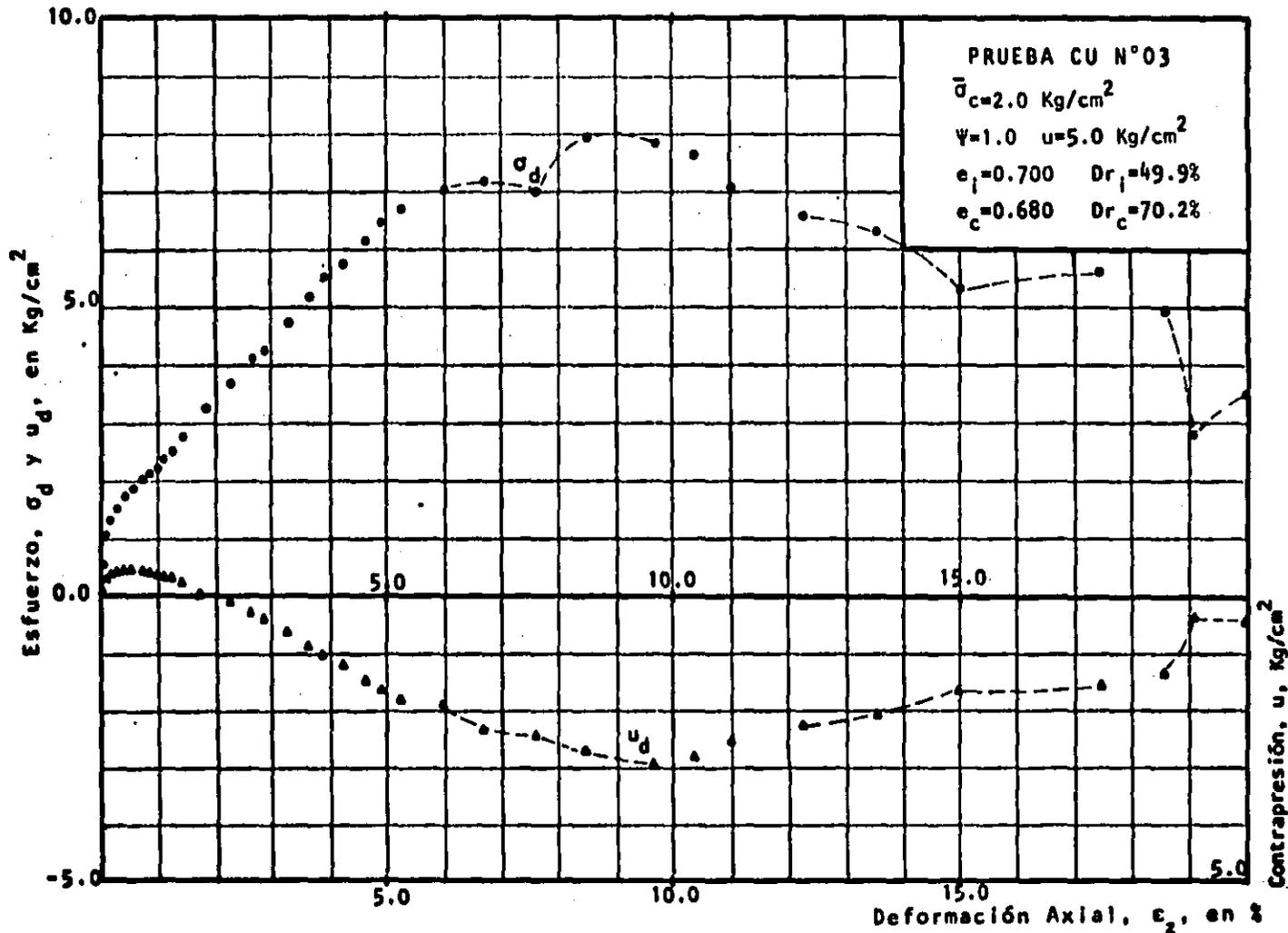


Fig. 6.7. Curvas Esfuerzo Desviador y Presión de Poro vs Deformación Axial. (PRUEBA CU 03)

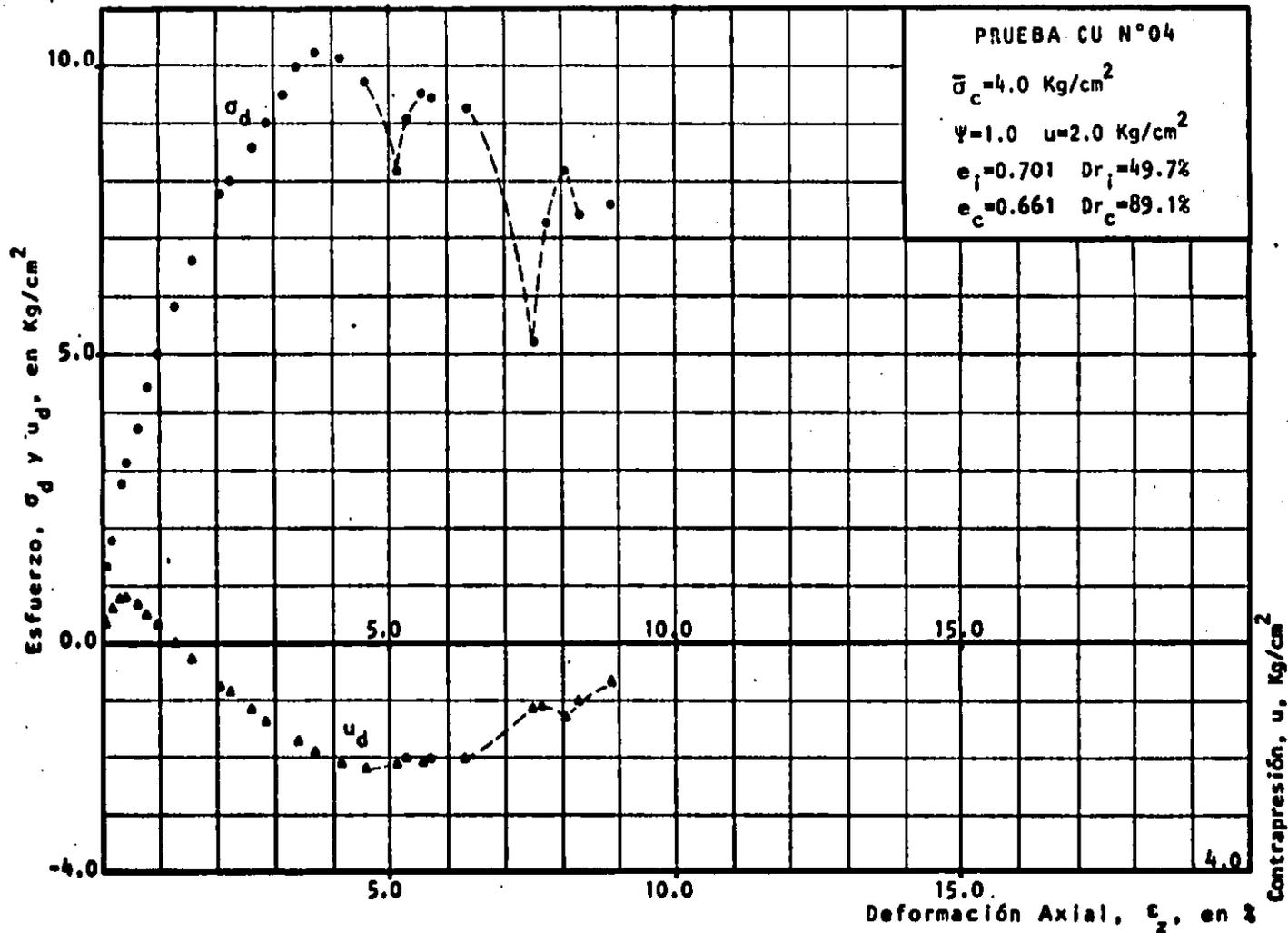


Fig. 6.8. Curvas Esfuerzo Desviador y Presión de Poro vs Deformación Axial. (PRUEBA CU 04)

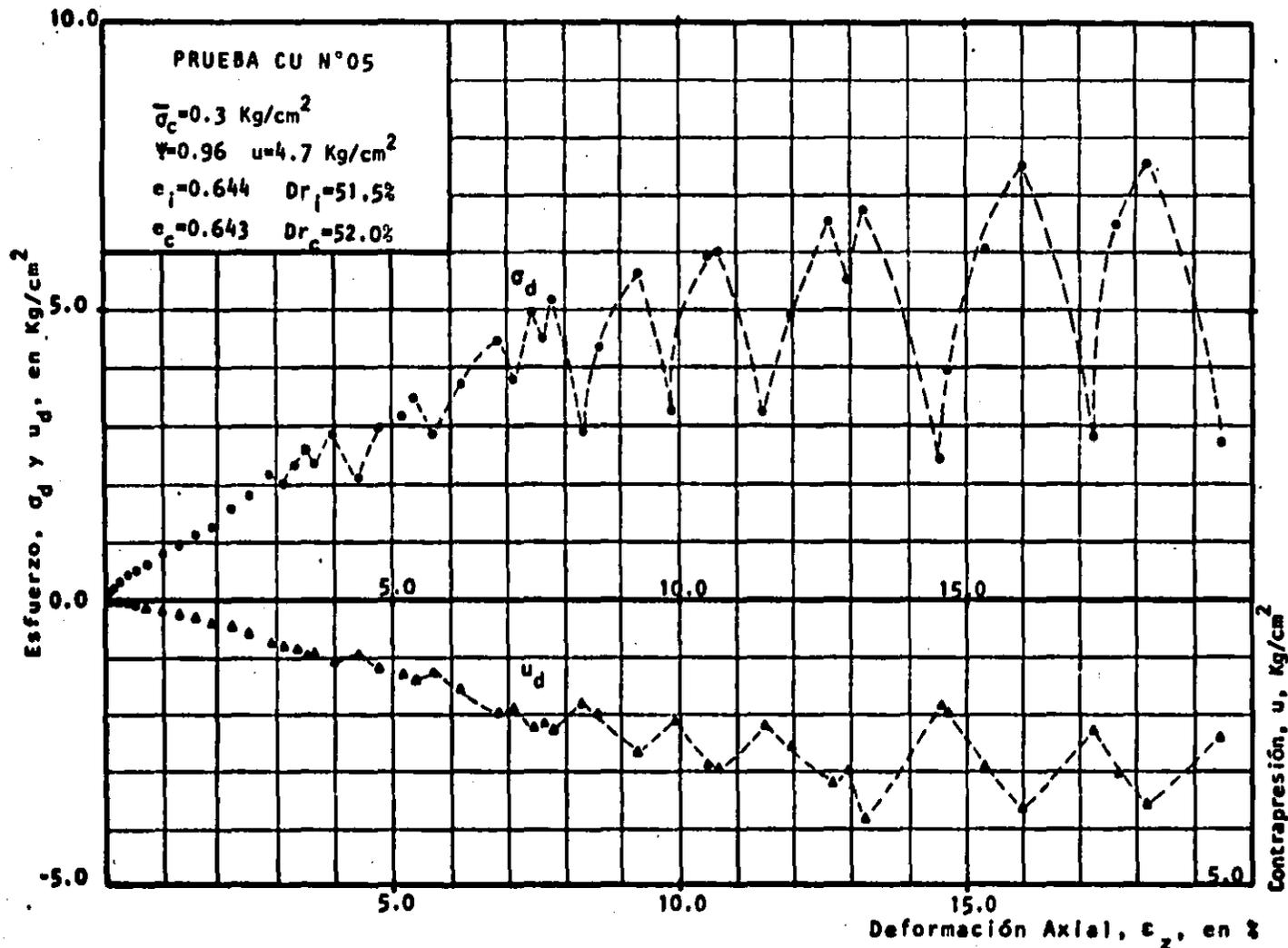


Fig. 6.9. Curvas Esfuerzo Desviador y Presión de Poro vs Deformación Axial. (PRUEBA CU 05)

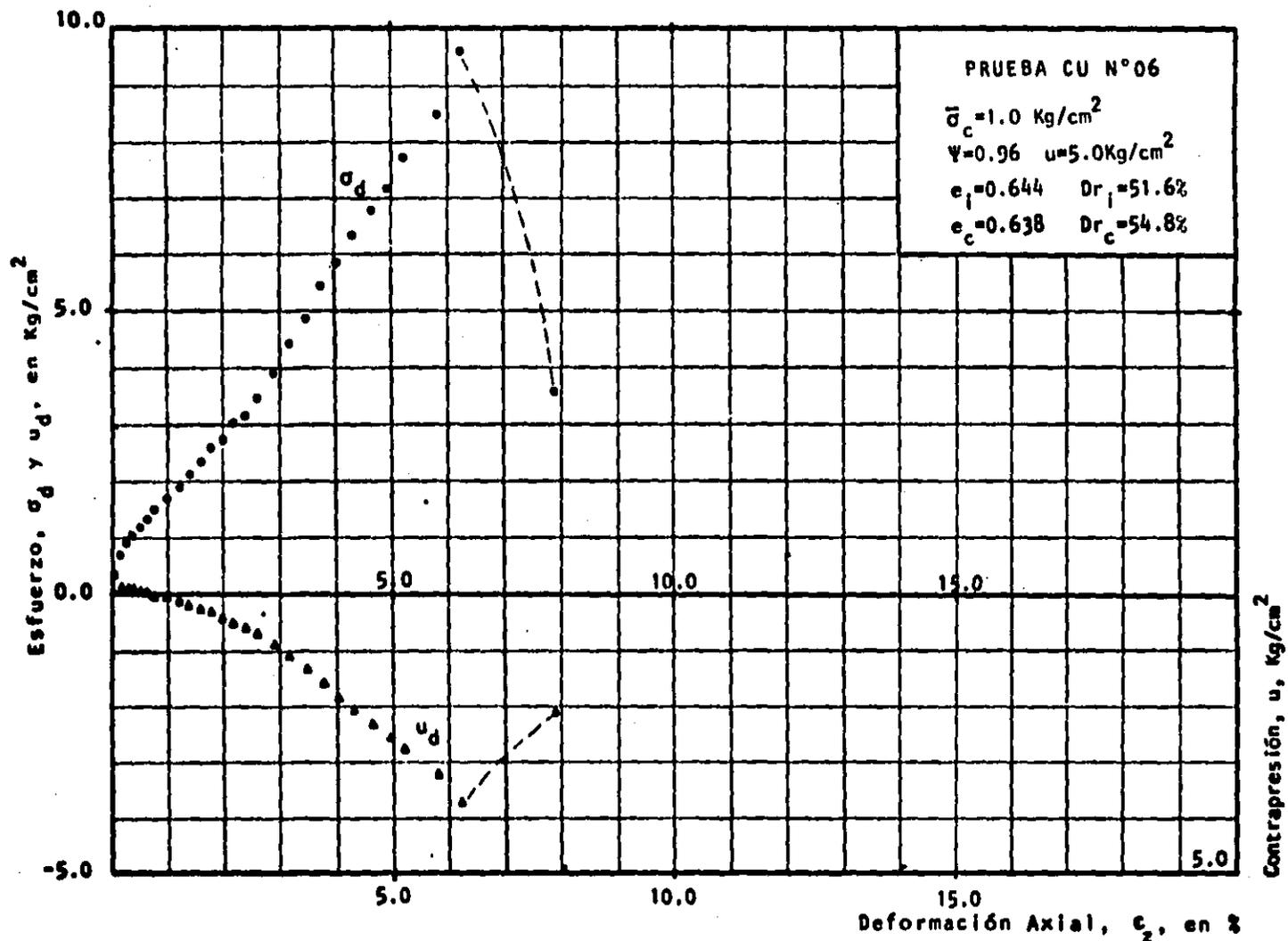


Fig. 6.10. Curvas Esfuerzo Desviador y Presión de Poro vs Deformación Axial. (PRUEBA CU 06)

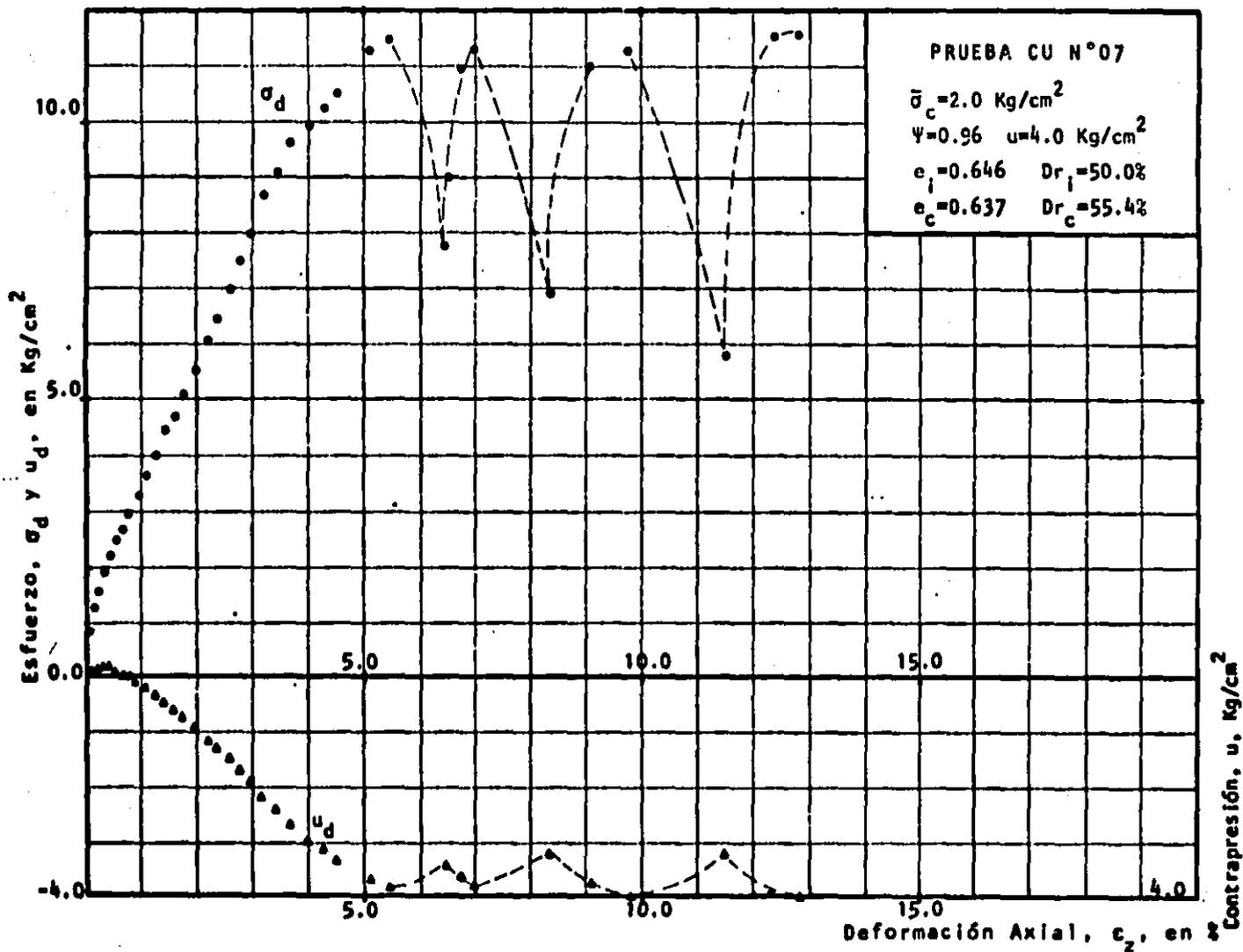


Fig. 6.11. Curvas Esfuerzo Desviador y Presión de Poro vs Deformación Axial. (PRUEBA CU 07).

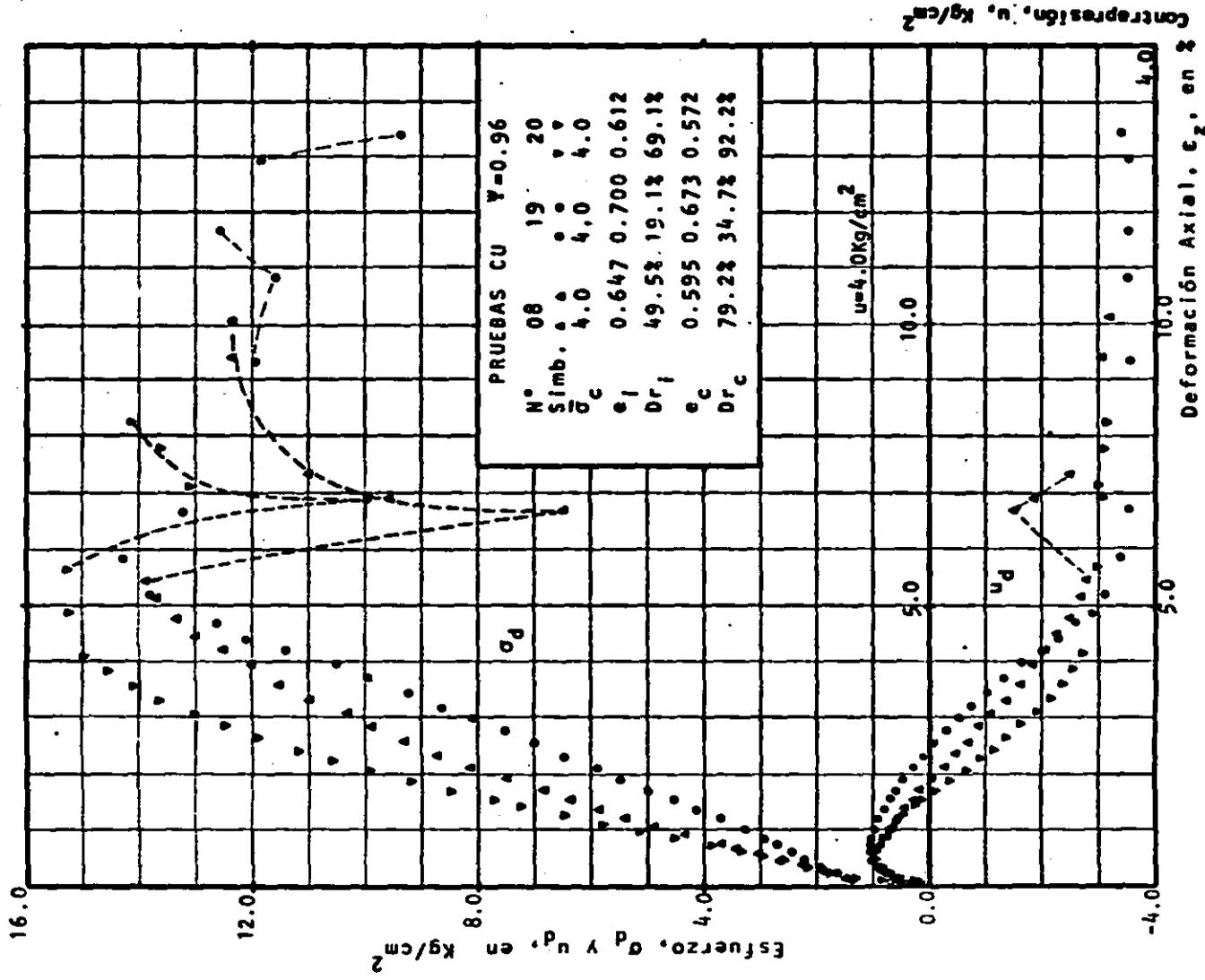


Fig. 6.12. Curvas Esfuerzo Desviador y Presión de Poro vs Deformación Axial. (PRUEBAS CU 08, 19, 20)

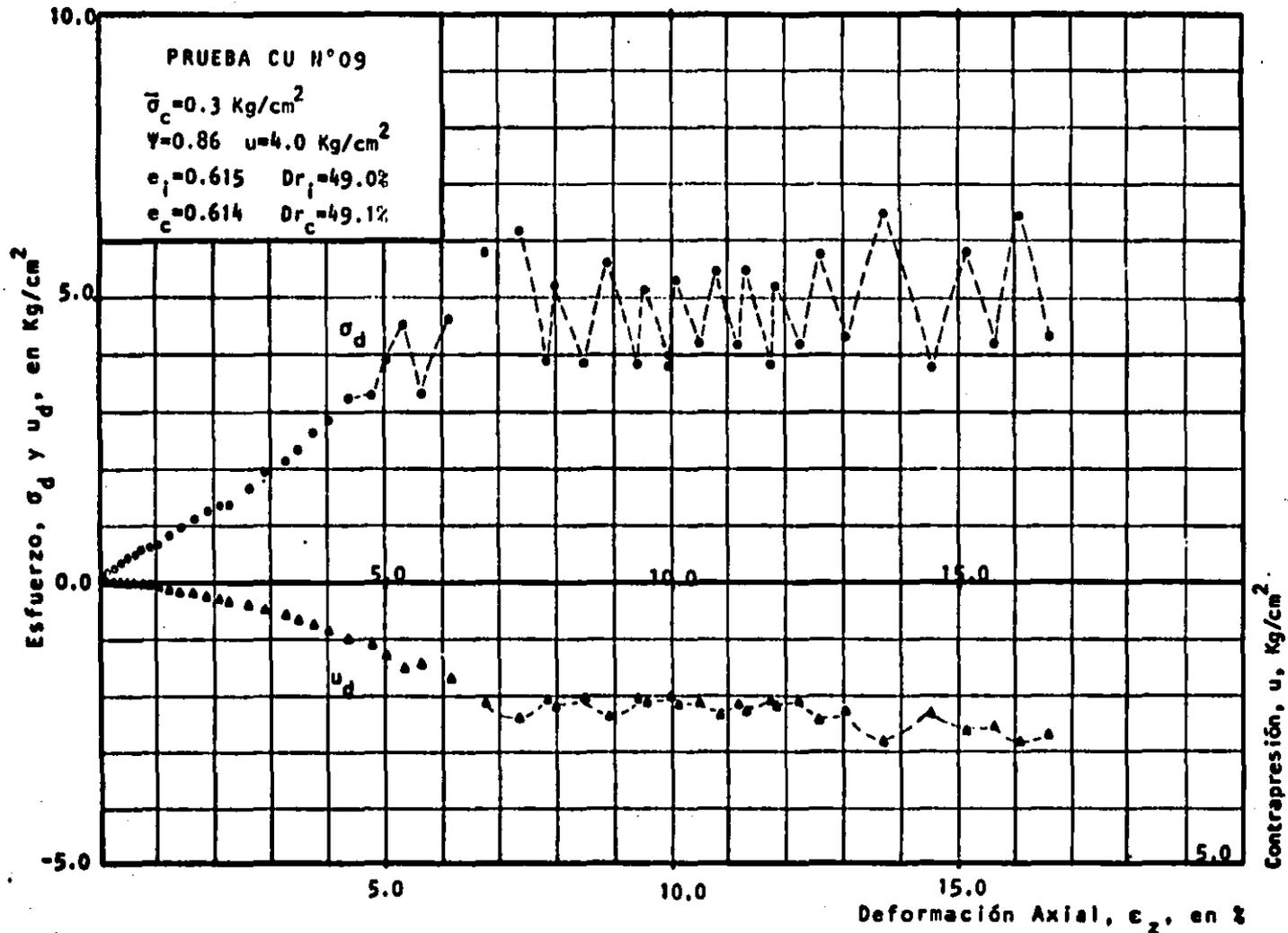


Fig. 6.13. Curvas Esfuerzo Desviador y Presión de Poro vs Deformación Axial. (PRUEBA CU 09)

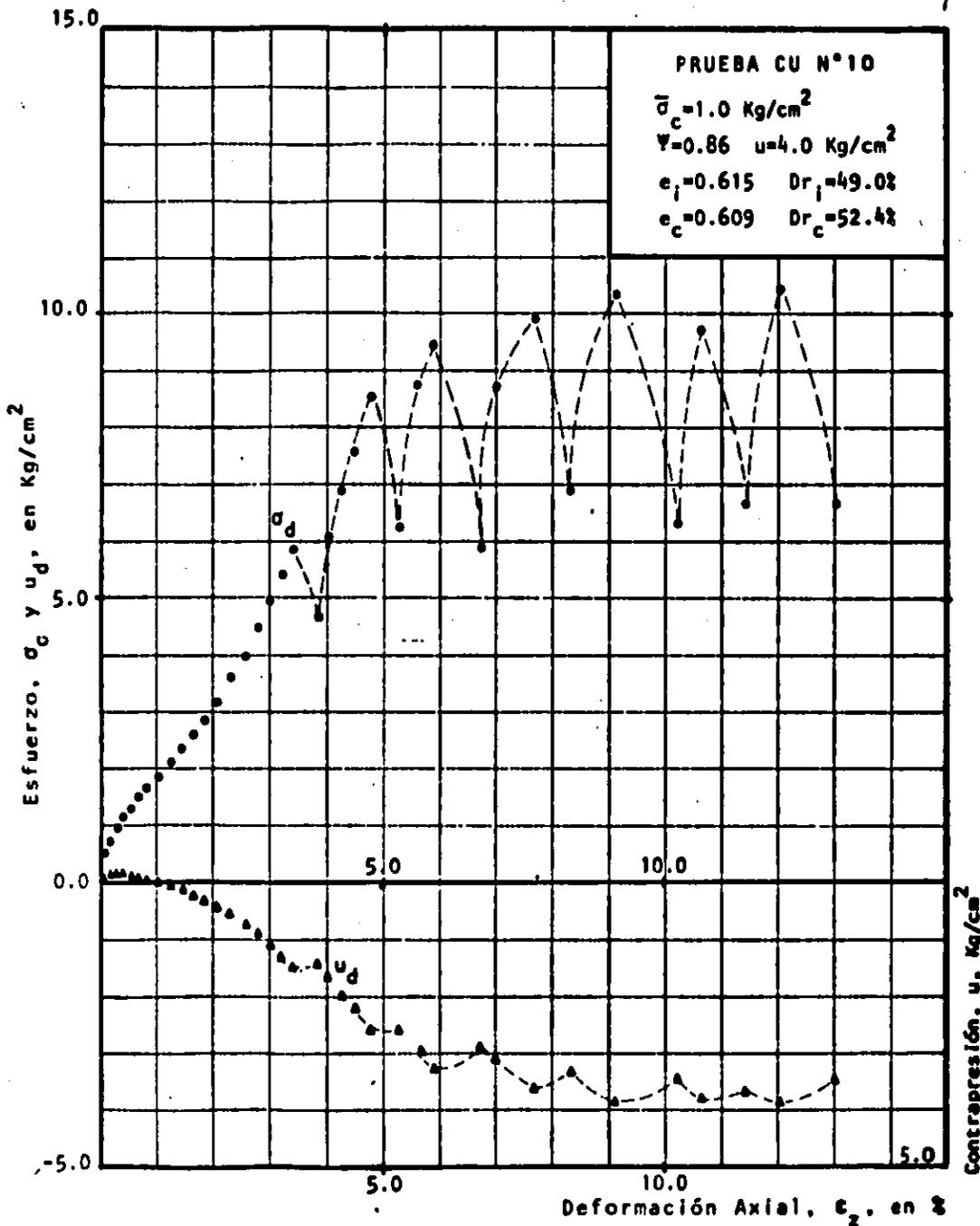


Fig. 6.14. Curvas Esfuerzo Desviador Y Presión de Poro vs Deformación Axial. (PRUEBA CU 10)

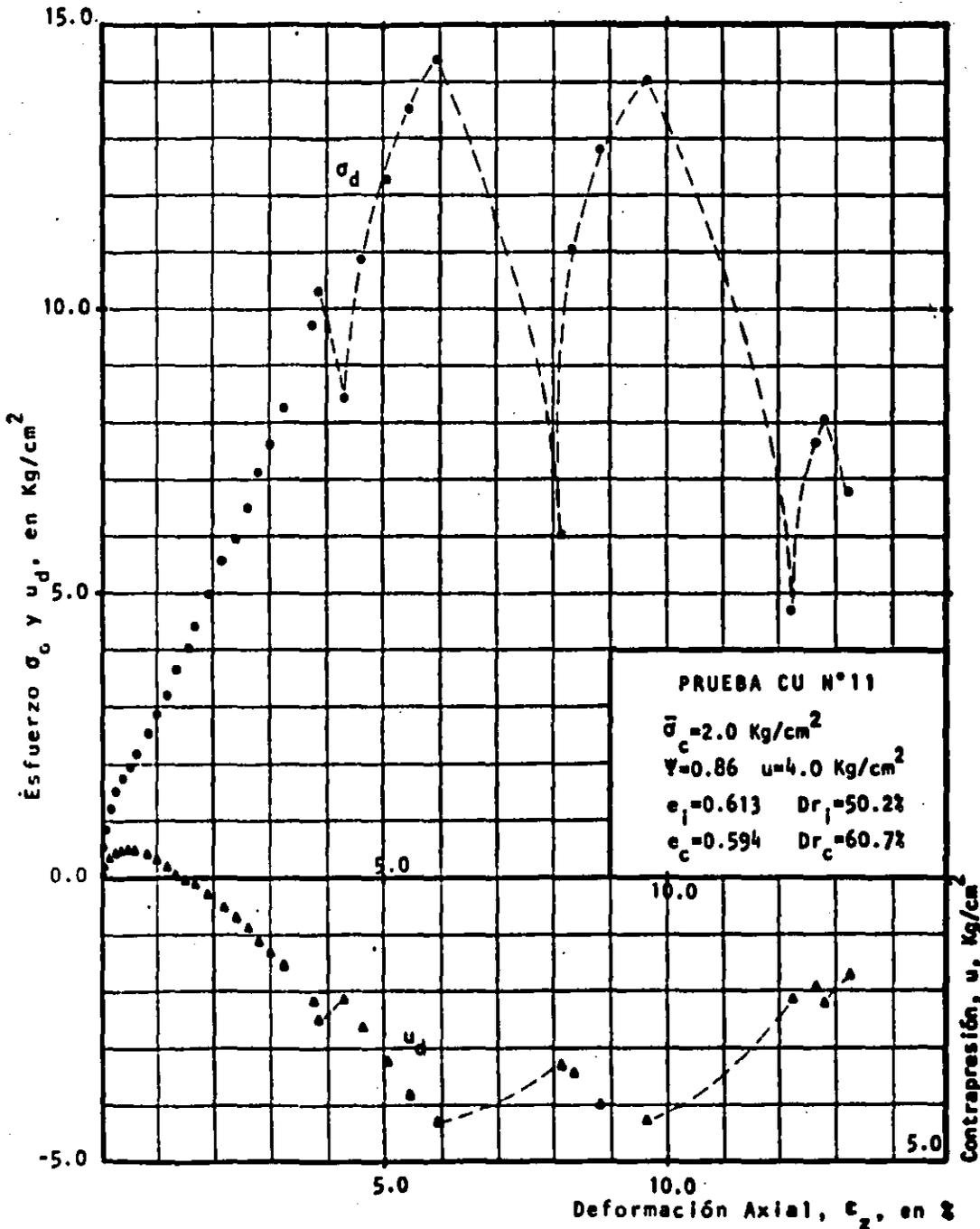


Fig. 6.15. Curvas Esfuerzo Desviador y Presión de Poro vs Deformación Axial. (PRUEBA CU 11)

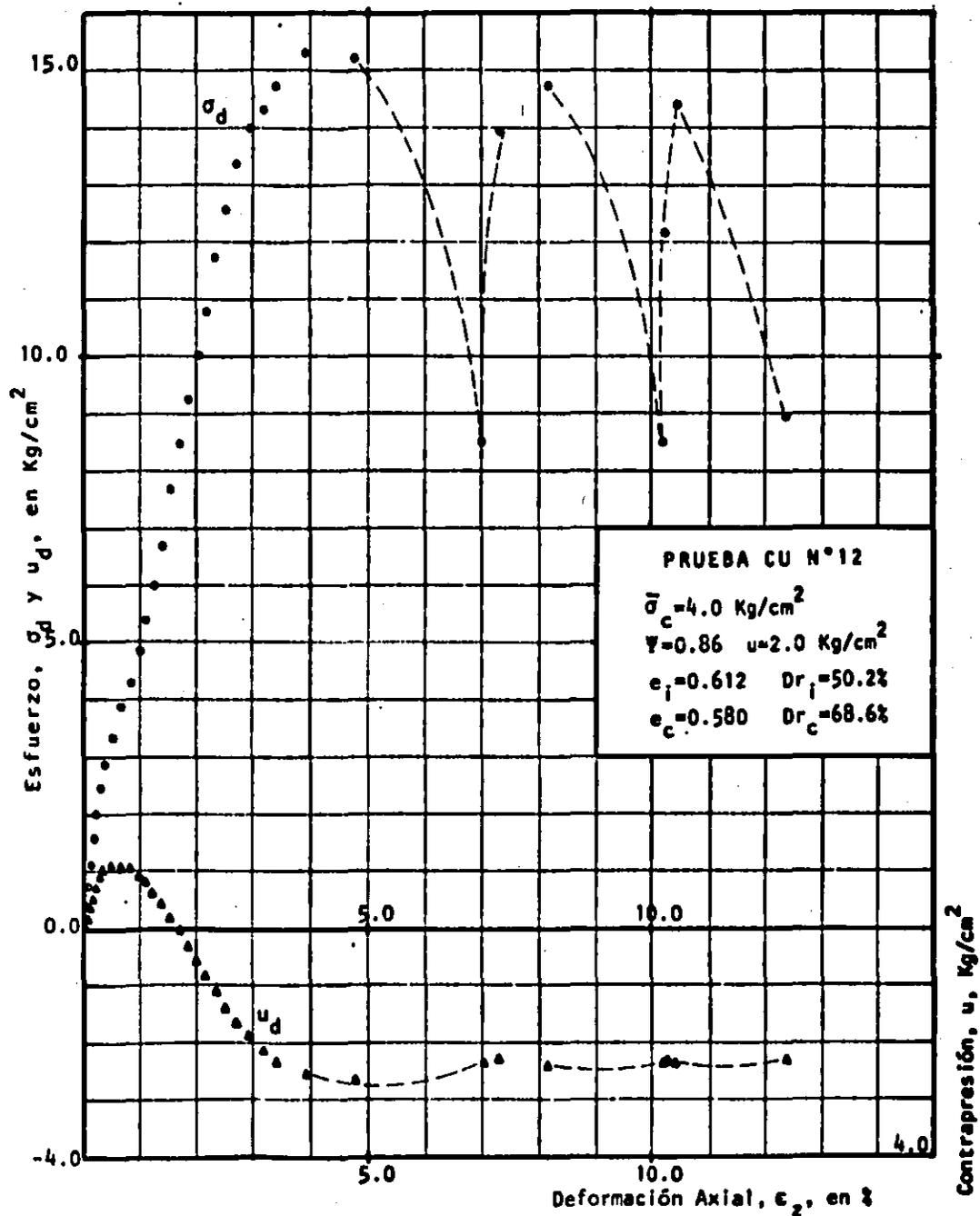


Fig. 6.16. Curvas Esfuerzo Desviador y Presión de Poro vs Deformación Axial. (PRUEBA CU 12)

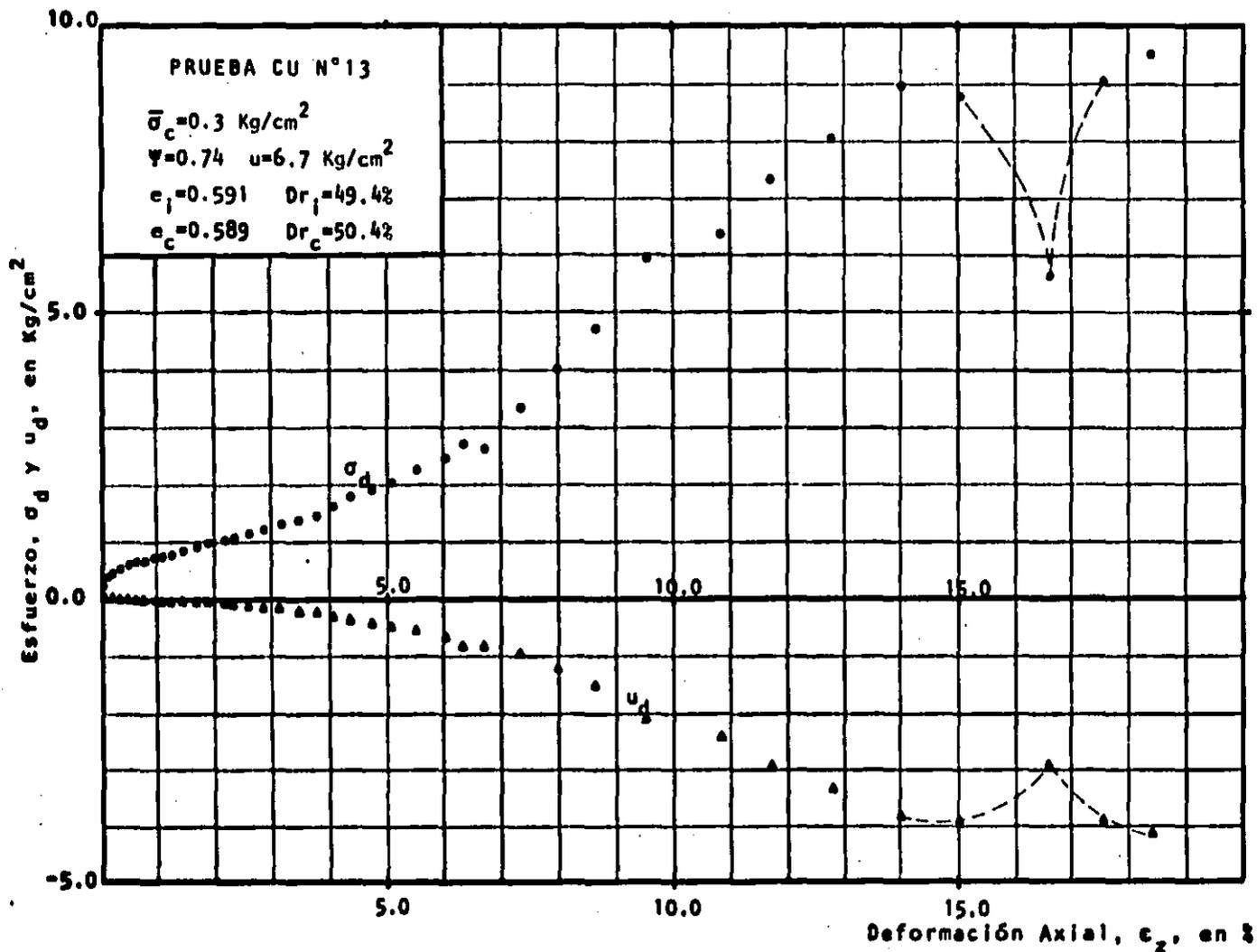


Fig. 6.17. Curvas Esfuerzo Desviador y Presión de Poro vs Deformación Axial. (PRUEBA CU 13)

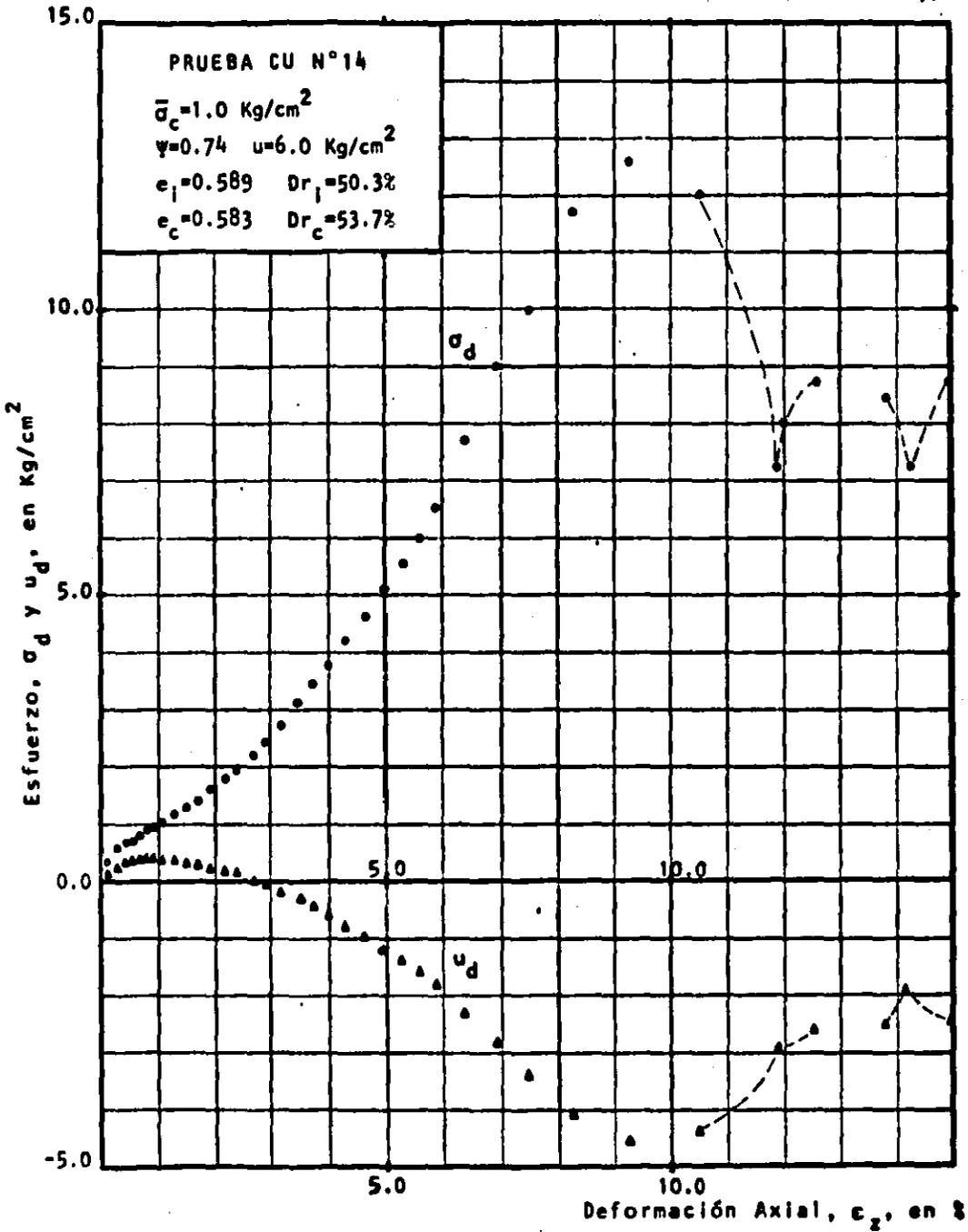


Fig. 6.18. Curvas Esfuerzo Desviador y Presión de Poro vs Deformación Axial. (PRUEBA CU 14)

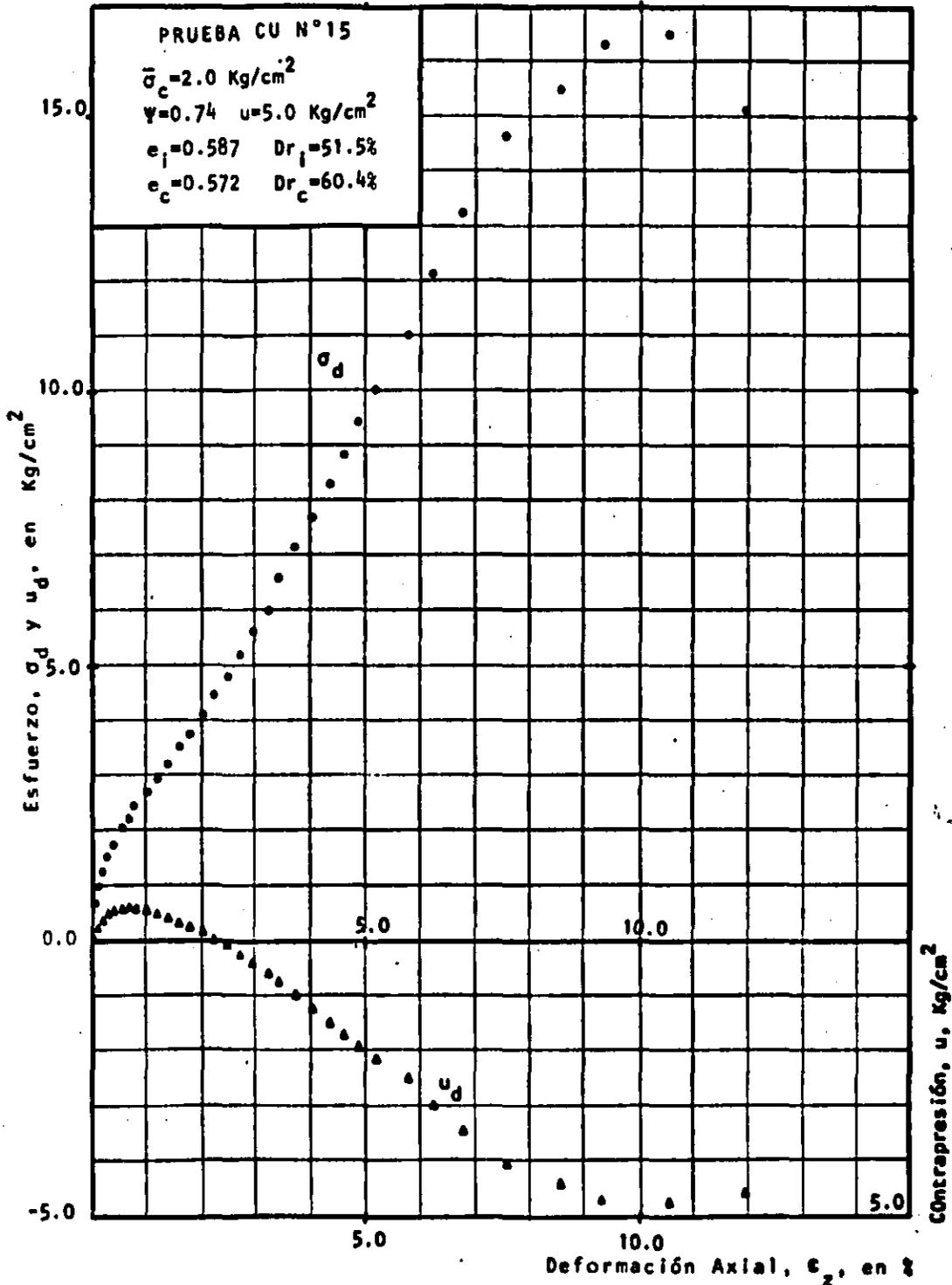


Fig. 6.19. Curvas Esfuerzo Desviador y Presión de Poro vs Deformación Axial. (PRUEBA CU 15)

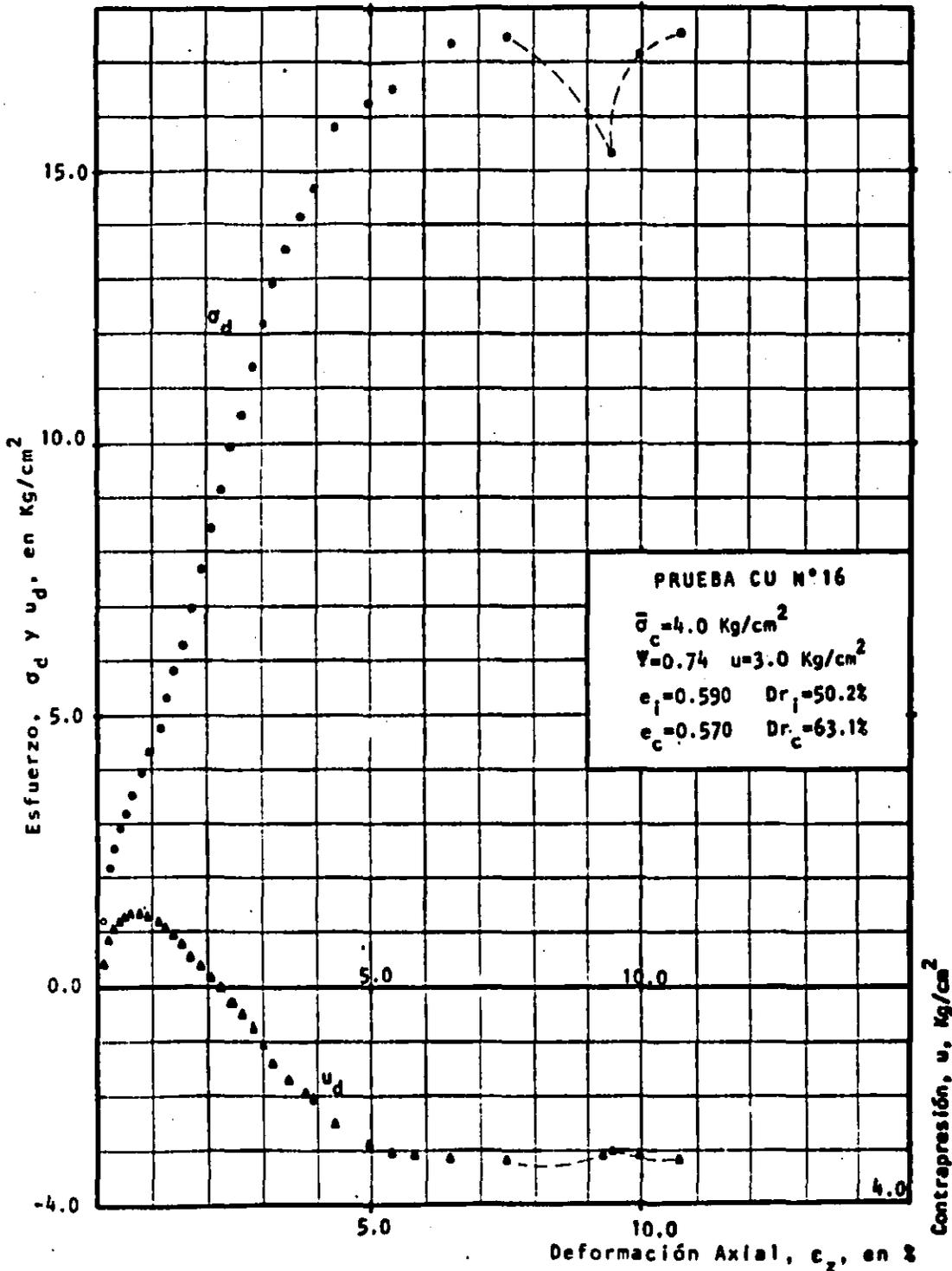


Fig. 6.20. Curvas Esfuerzo Desviador y Presión de Poro vs Deformación Axial. (PRUEBA CU 16)

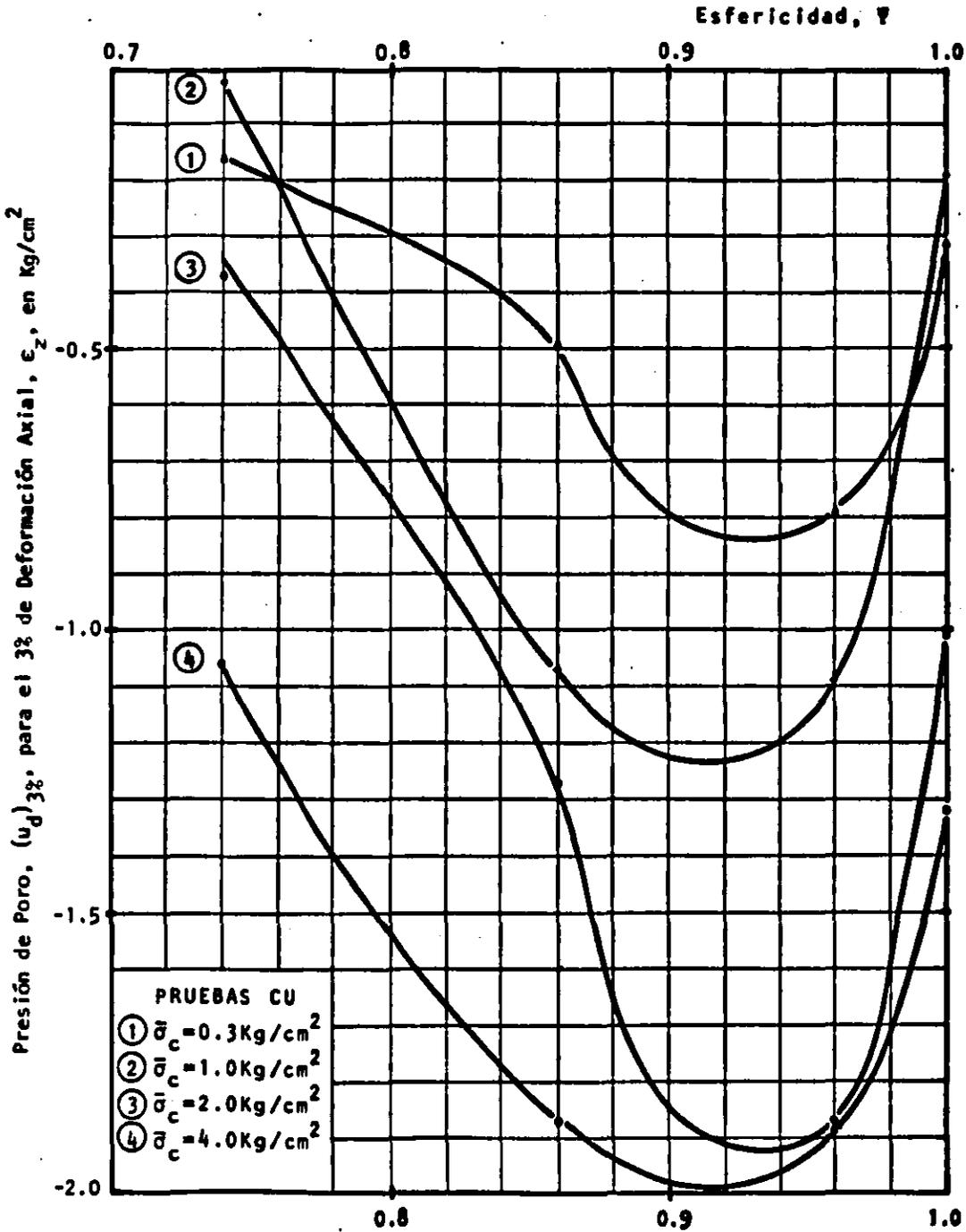


Fig. 6.21. Presión de Poro vs Esfericidad. (PRUEBAS CU)

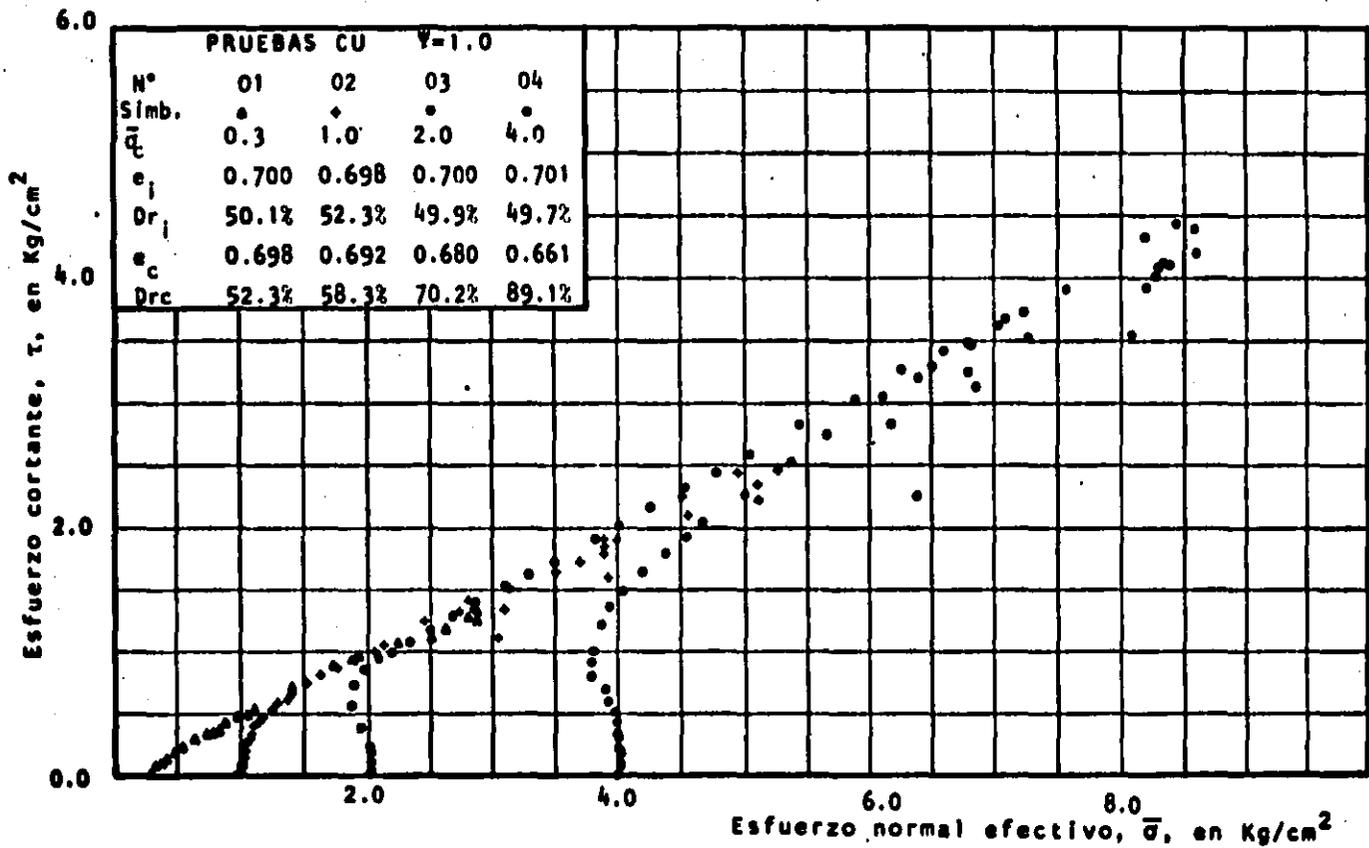


Fig. 6.22. Envolventes de Resistencia. (PRUEBAS CU; $\psi=1.0$)

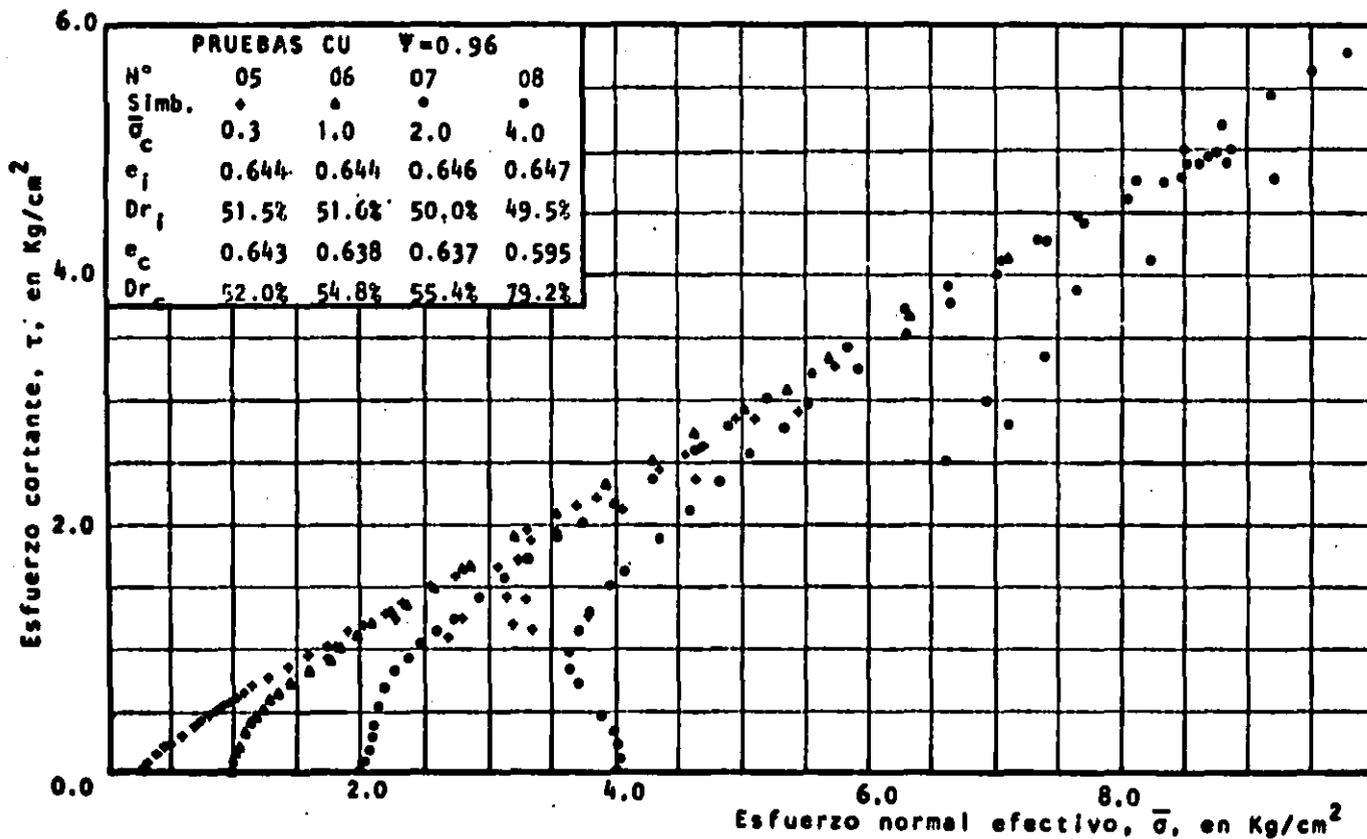


Fig. 6.23. Envolventes de Resistencia. (PRUEBAS CU; $\Psi=0.96$)

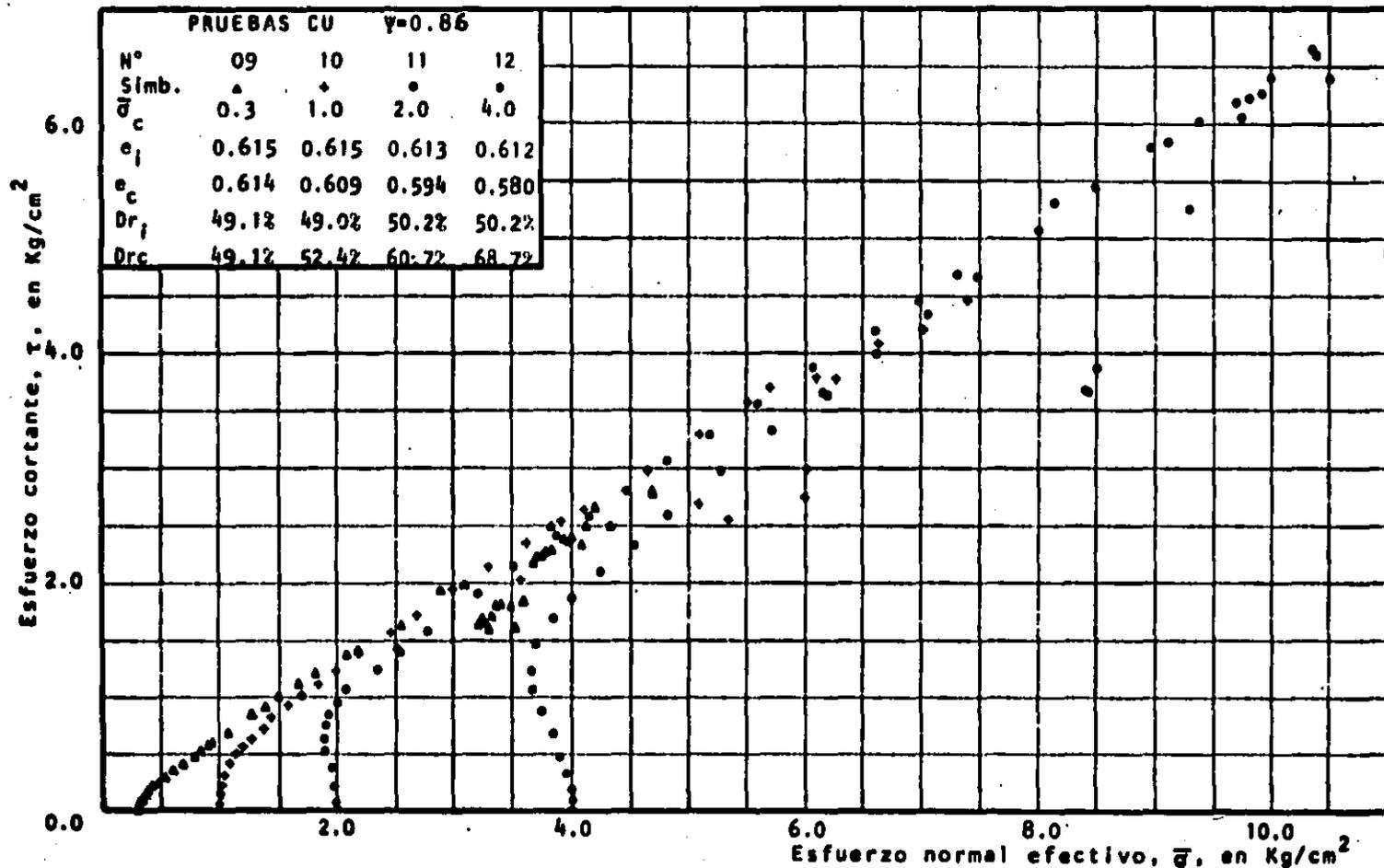


Fig. 6.24. Envolventes de Resistencia. (PRUEBAS CU; $\gamma=0.86$)

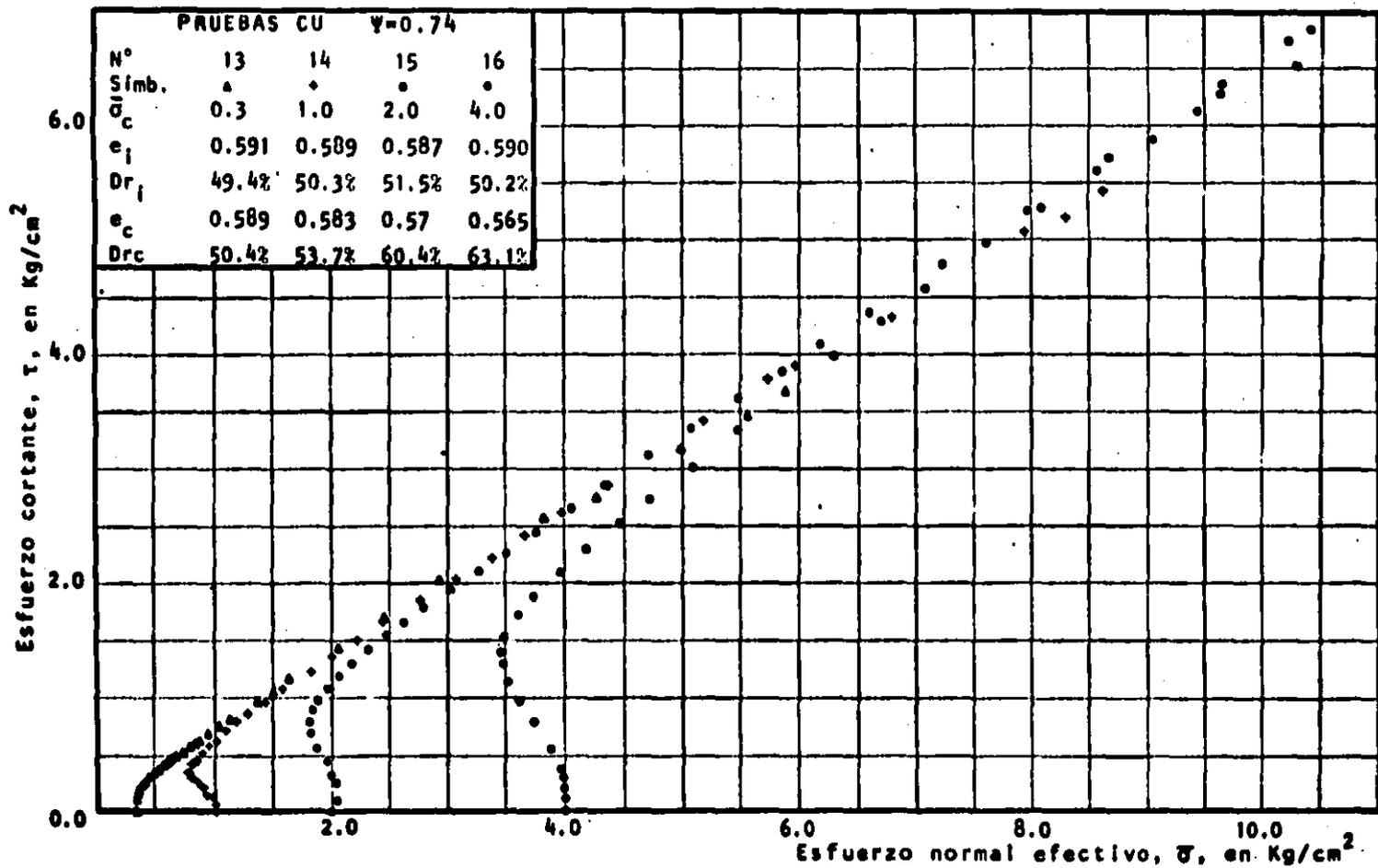


Fig. 6.25. Envolventes de Resistencia. (PRUEBAS CU; $\psi=0.74$)

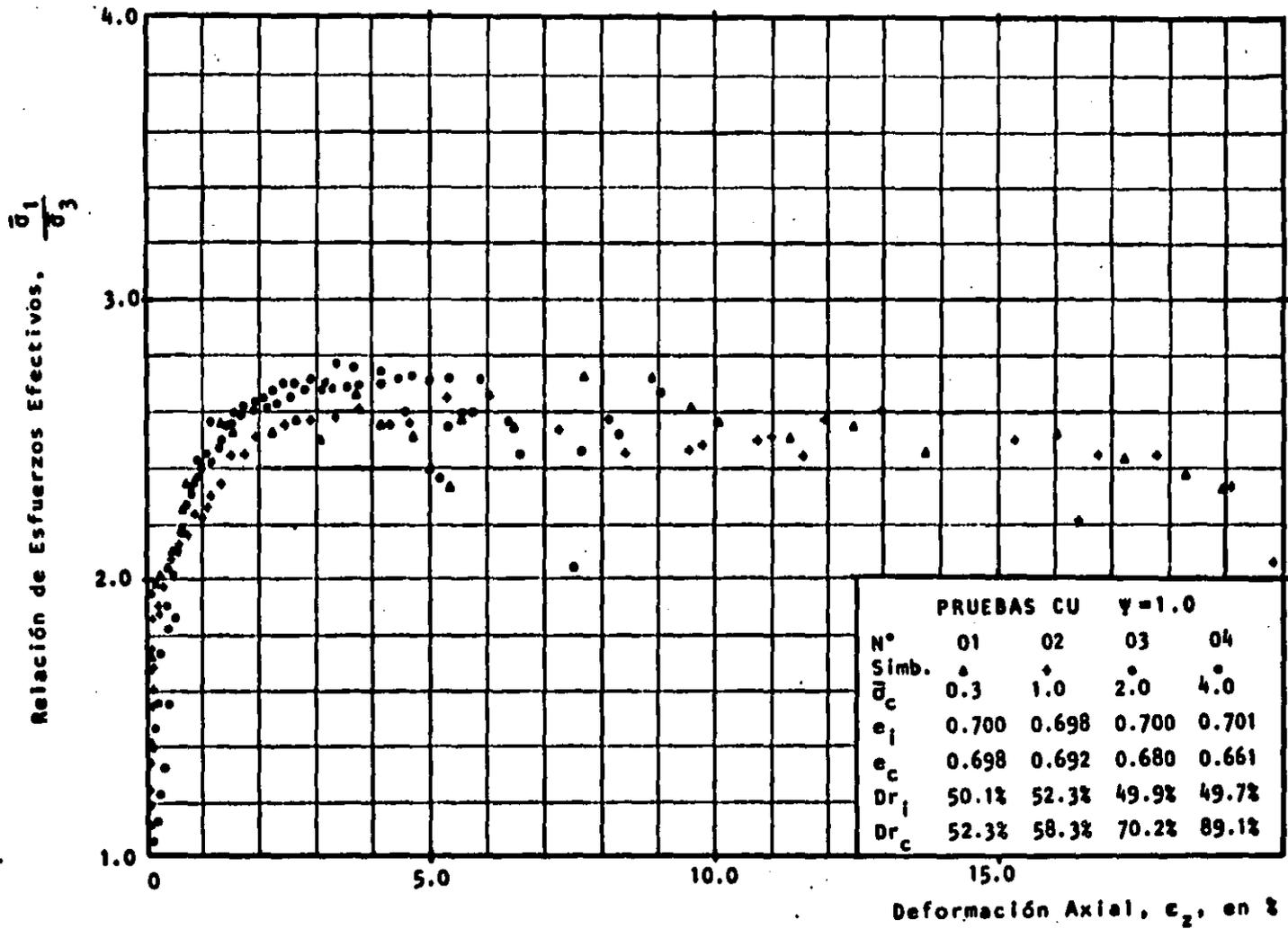


Fig. 6.26. Relación de Esfuerzos Principales Efectivos vs Deformación Axial. (PRUEBAS CU; $\gamma=1.0$)

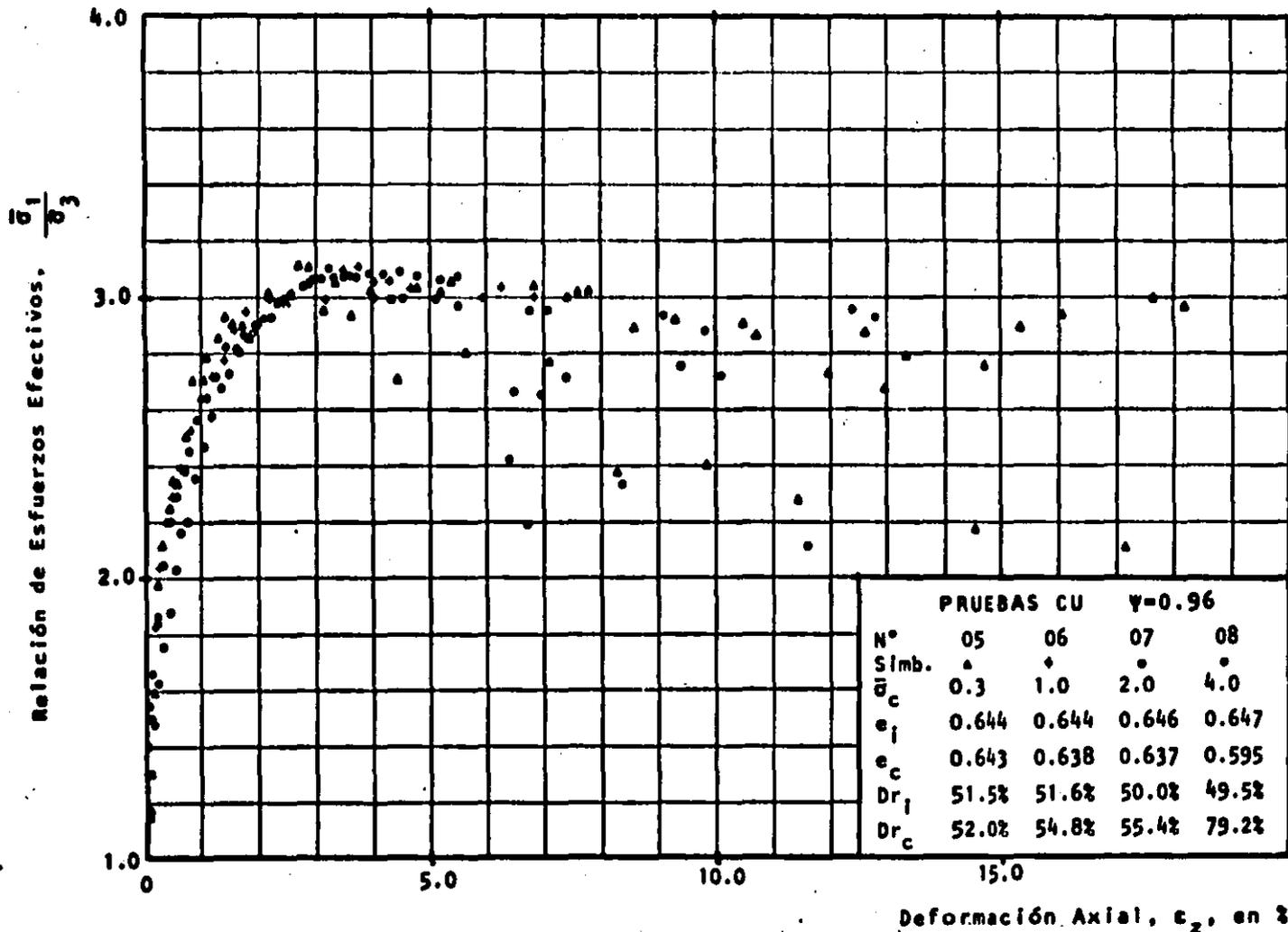


Fig. 6.27. Relación de Esfuerzos Principales Efectivos vs Deformación Axial. (PRUEBAS CU; $\psi=0.96$)

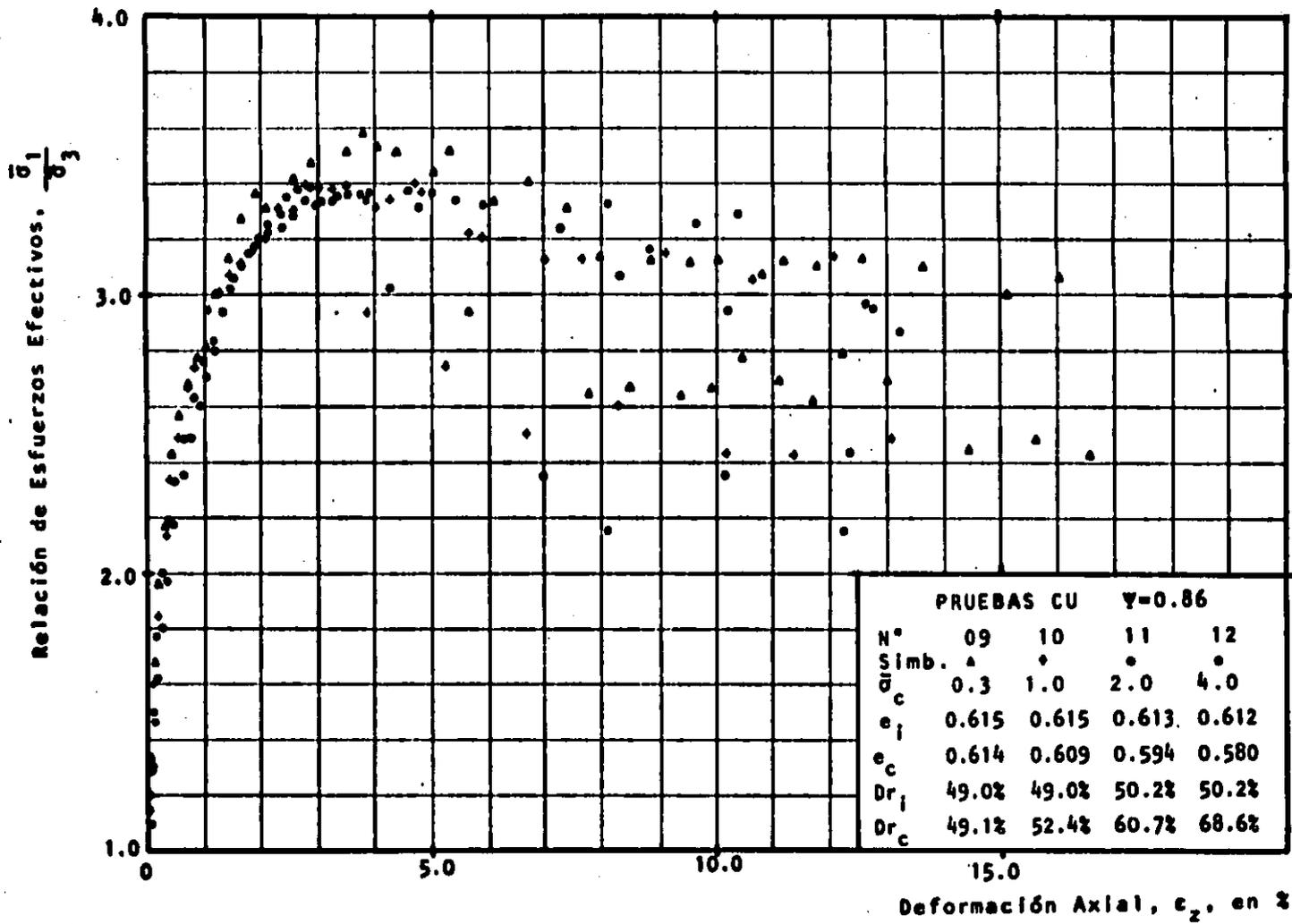


Fig. 6.28. Relación de Esfuerzos Principales Efectivos vs Deformación Axial. (PRUEBAS CU; $\nu=0.86$)

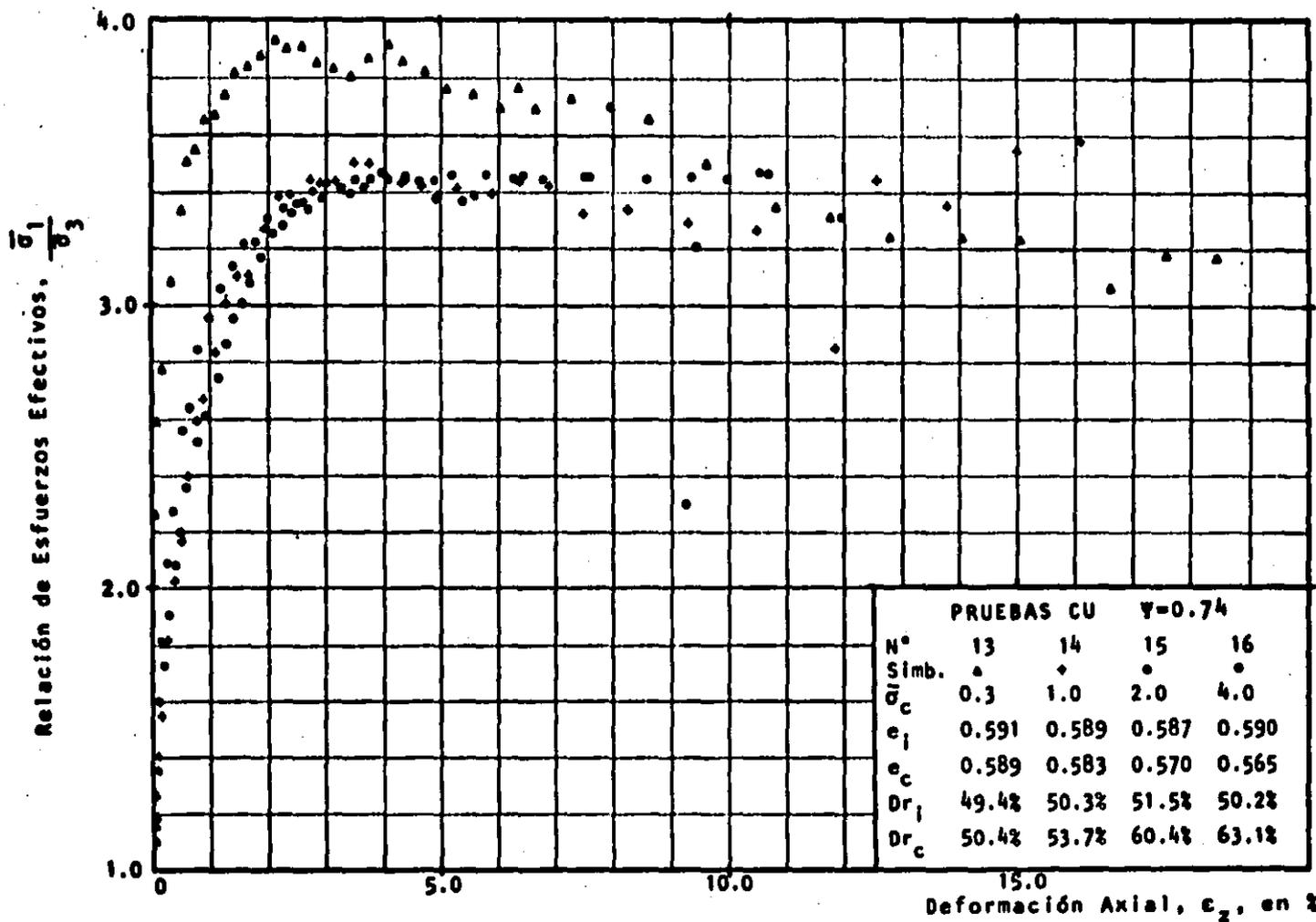


Fig. 6.29. Relación de Esfuerzos Principales Efectivos vs Deformación Axial. (PRUEBAS CU; $\gamma=0.74$)

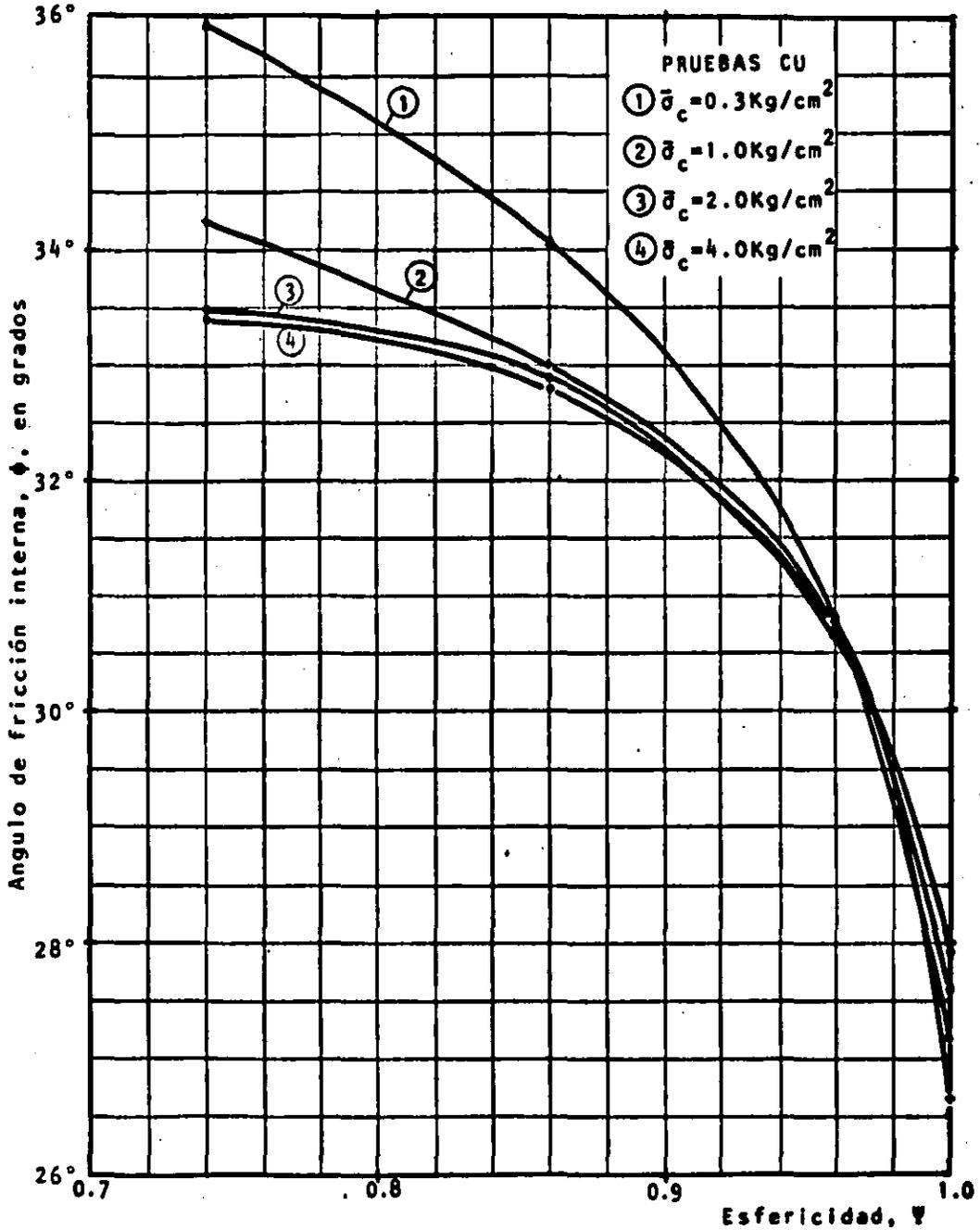


Fig. 6.30. Angulo de Fricción Interna vs Esfericidad. (PRUEBAS CU)

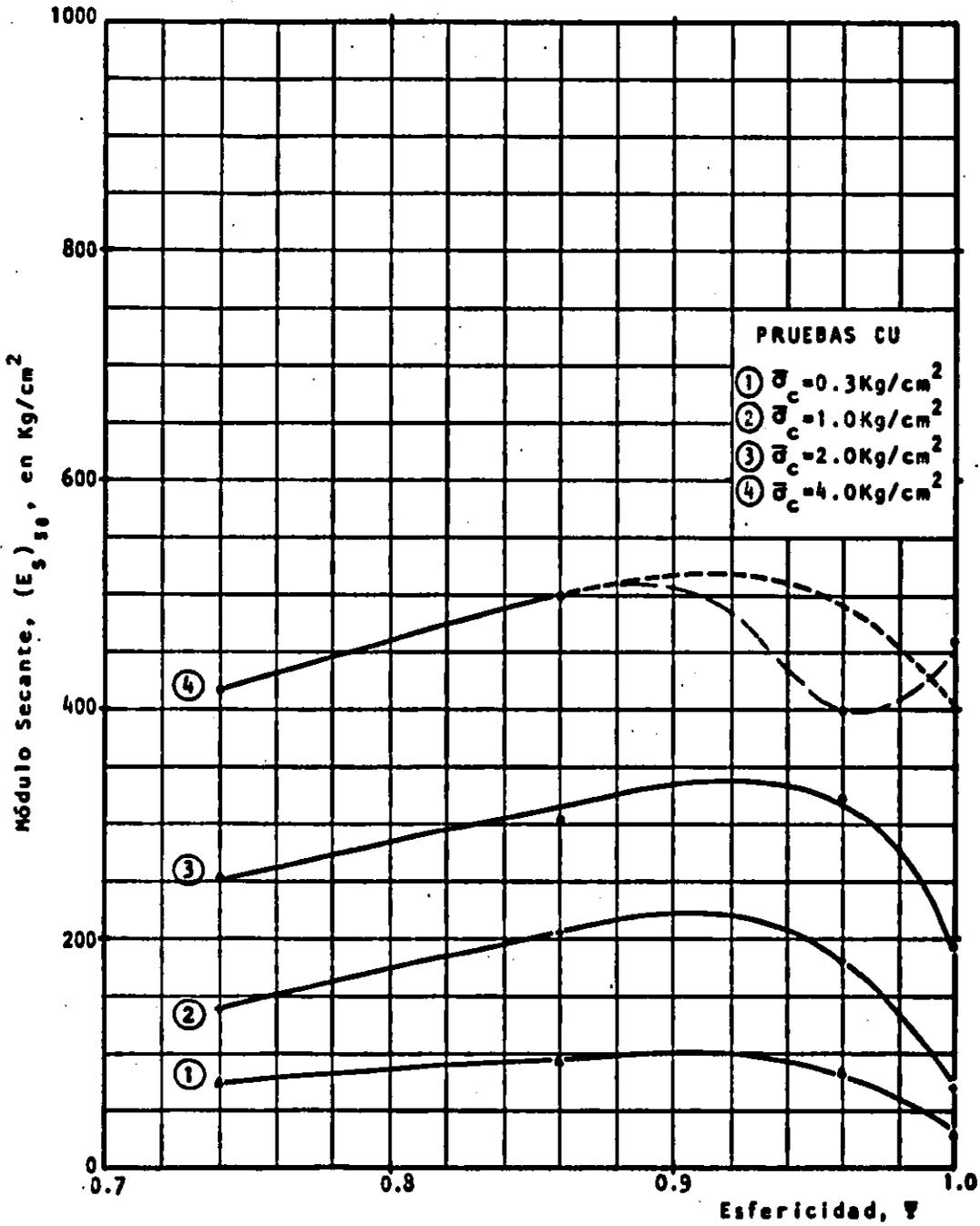


Fig. 6.31. Módulo Secante, $(E_s)_{50}$, vs Esfericidad. (PRUEBAS CU)

TABLA N° 6.1
PRUEBAS CU
RESUMEN GENERAL DE RESULTADOS

N°	ψ	σ_c	u	e_i	e_c	Dr_i	Dr_c	$(\sigma_1/\sigma_3)_{\max}$	$\phi(\sigma_1/\sigma_3)_{\max}$	$\phi(\sigma_1-\sigma_3)_{\max}$	$(u_d)3\%$	$(E_s)_{50}$
01	1.0	0.3	3.2	0.700	0.698	50.1	52.3	2.72	27.21	25.43	-0.31	31.54
02	1.0	1.0	4.5	0.698	0.692	52.3	58.3	2.64	26.65	25.11	-0.19	70.92
03	1.0	2.0	5.0	0.700	0.680	49.9	70.2	2.73	27.61	27.46	-1.01	196.1
04	1.0	4.0	2.0	0.701	0.661	49.7	89.1	2.76	27.92	27.75	-1.32	434.8
05	.96	0.3	4.7	0.644	0.643	51.5	52.0	3.12	30.85	29.51	-0.79	86.96
06	.96	1.0	5.0	0.644	0.638	51.6	54.8	3.11	30.81	30.24	-1.09	178.5
07	.96	2.0	4.0	0.646	0.637	50.0	55.4	3.10	30.76	29.35	-1.87	322.6
08	.96	4.0	3.0	0.647	0.595	49.5	79.2	3.09	30.72	30.51	-1.89	400.0
09	.86	0.3	4.0	0.615	0.614	49.0	49.1	3.58	34.08	30.55	-0.49	95.24
10	.86	1.0	4.0	0.615	0.609	49.0	52.4	3.40	33.01	31.16	-1.07	208.3
11	.86	2.0	4.0	0.613	0.594	50.2	60.7	3.38	32.89	32.72	-1.27	303.0
12	.86	4.0	2.0	0.612	0.580	50.2	68.6	3.37	32.79	32.43	-1.87	500.0
13	.74	0.3	6.7	0.591	0.589	49.4	50.4	3.93	35.97	31.27	-0.16	76.34
14	.74	1.0	6.0	0.589	0.583	50.3	53.7	3.58	34.24	32.21	-0.02	142.9
15	.74	2.0	5.0	0.587	0.570	51.5	60.4	3.46	33.46	33.46	-0.37	227.3
16	.74	4.0	3.0	0.590	0.565	50.2	63.1	3.46	33.43	33.41	-1.06	416.7
17	1.0	4.0	3.0	0.745	0.714	56.8	36.0	2.65	26.86	26.79		
18	1.0	4.0	3.0	0.650	0.643	101.	108.	2.79	28.55	27.80		
19	.96	4.0	3.0	0.700	0.673	19.1	34.7	2.95	29.59	29.59		
20	.96	4.0	3.0	0.612	0.572	69.5	92.2	3.24	31.86	31.58		
21	.86	4.0	3.0	0.648	0.606	29.8	53.8	3.18	31.44	29.54		
22	.86	4.0	3.0	0.700	0.651	0.45	28.2	3.09	30.73	27.9		
23	.74	4.0	3.0	0.686	0.660	-.96	12.8	3.18	31.48	30.60		
24	.74	4.0	3.0	0.495	0.478	100.	109.	4.15	37.34	37.34		
		Kg/cm ²	Kg/cm ²			%	%		°	°	Kg/cm ²	Kg/cm ²

7.- PRUEBAS TRIAXIALES CONSOLIDADAS DRENADAS (CD)

7.1. ESFUERZOS DE CONSOLIDACION

Para observar el comportamiento esfuerzo de de formación y determinar las envolventes de resistencia en condiciones drenadas, se realizaron pruebas triaxiales consolidadas drenadas midiendo el cambio volumétrico en la etapa de falla. Las presiones de consolidación, $\bar{\sigma}_c$, fueron como en el caso de las pruebas consolidadas no drenadas: 0.3, 1.0, 2.0 y 4.0 Kg/cm².

7.2 CONDICIONES INICIALES DE PRUEBA

Variando únicamente la esfericidad de las partículas, se formaron probetas cuya relación de vacíos es la que corresponde al 50% de densidad relativa, Dr. En la tabla N° 7.1, se presentan los valores de diferentes parámetros al inicio de la prueba.

El grado de saturación se puede considerar cercano al 100% puesto que, al determinar el parámetro B de Skempton, en todos los casos fue superior a 0.96 (13).

7.3 VELOCIDAD DE DEFORMACION

La velocidad de deformación axial impuesta por la máquina de deformación controlada, fue igual a la utilizada en las pruebas CU (0.057 m.m./min.). El tamaño y la uniformidad de las partículas utilizadas hacen que la permeabilidad del medio sea muy alta, por lo tanto, esta velocidad es lo suficientemente pequeña para garantizar que el drenaje se presenta libremente

y sin que se genere presión de poro durante la etapa de falla.

7.4 CORRECCIONES

7.4.1 EFECTO DE LA PENETRACION DE LA MEMBRANA

Como en estas pruebas el esfuerzo efectivo de confinamiento es constante, la penetración de la membrana tiene influencia solamente durante la etapa de consolidación. En el capítulo N° 6 ya se mencionó la medida correctiva que elimina la penetración de la membrana.

7.4.2 CORRECCION POR MEMBRANA

La rigidez inducida por la membrana fue tenida en cuenta, restando del esfuerzo desviador calculado la expresión (6.2). En la figura N° 6.4 se presenta graficado el valor de la corrección en función de la deformación axial.

7.4.3 CORRECCION EN LA SECCION TRANSVERSAL DE LA PROBETA

Suponiendo que las deformaciones axiales y laterales son uniformes, la sección transversal de la probeta en cualquier momento de la etapa de falla, se determina mediante la expresión :

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

donde: A_c , es el área corregida de la sección transversal de la probeta en cualquier instante de la prueba.

A_i , es el área inicial de la sección transversal de la probeta, después de la consolidación.

ϵ_z , es la deformación axial.

ϵ_v , es la deformación volumétrica.

7.5 COMPORTAMIENTO ESFUERZO DEFORMACION

En las curvas esfuerzo desviador vs deformación axial presentadas en las figuras N° 7.1, 7.2, 7.3 y 7.4, se observa que el esfuerzo desviador se incrementa hasta un máximo, correspondiente a la deformación en que la curva variación de la relación de vacíos vs deformación axial presenta un punto de inflexión. Después del pico el esfuerzo desviador disminuye ligeramente, o tiende a permanecer constante.

7.6 COMPORTAMIENTO RELACION DE VACIOS DEFORMACION

La variación de la relación de vacíos presentada en las figuras N° 7.1, 7.2, 7.3 y 7.4, corresponde a la relación de vacíos promedio de la probeta en función de la deformación axial, dado que, el cambio en el volumen de vacíos fue evaluado como el volumen de agua que entra o sale de la probeta.

Nótese en las ya mencionadas figuras, que todos los especímenes ensayados exhiben a pequeñas deforma

maciones axiales un leve decremento de volumen y luego un notable incremento. La pendiente de la curva e vs ϵ_z disminuye a partir del punto de inflexión, conforme aumenta ϵ_z .

7.7 ENVOLVENTES DE RESISTENCIA

Las envolventes de resistencia fueron calculadas con el criterio de $(\bar{\sigma}_1/\bar{\sigma}_3)_{\text{máx}}$, para los planos potenciales de falla supuestamente inclinados a 60° con respecto a la dirección del esfuerzo principal menor. Las figuras N° 7.5, 7.6, 7.7 y 7.8, presentan las envolventes de resistencia de las cuatro esfericidades estudiadas; en ellas no se nota claramente su curvatura, pero los valores del ángulo de fricción interna, ϕ , reportados en la tabla 7.1, (pag.121), indican que éste varía con el esfuerzo de confinamiento. La curvatura de las envolventes puede ser explicada por la variación, con la presión normal efectiva, del ángulo de fricción interparticular del material, ψ ; Mitchel (22) menciona que el ángulo ψ decrece con el aumento del esfuerzo normal efectivo, $\bar{\sigma}$, variando como una función de $\bar{\sigma}^{-\frac{1}{2}}$.

En el inciso 6.8, se comentó la influencia de la forma de las partículas en la curvatura de las envolventes de resistencia; nótese en las figuras N° 7.9, 7.10, 7.11 y 7.12, que la relación $(\bar{\sigma}_1/\bar{\sigma}_3)_{\text{máx}}$ se incrementa a medida que disminuye el esfuerzo de confinamiento, siendo más notorio el incremento cuando disminuye la esfericidad de las partículas.

7.8.- COMPORTAMIENTO RESISTENCIA ESFERICIDAD

Para la misma esfericidad, ψ , el ángulo de fricción interna aumenta al disminuir el esfuerzo de consolidación, $\bar{\sigma}_c$. En la Fig. N° 7.13, se presenta la variación de éste en función de la esfericidad; las líneas continuas corresponden a los resultados obtenidos a partir de pruebas triaxiales consolidadas drenadas, CD, mientras que las líneas a trazos representan los resultados obtenidos a partir de pruebas consolidadas no drenadas, CU. Nótese que:

a) El ángulo de fricción interna disminuye a medida que aumenta la esfericidad de las partículas.

b) El ángulo de fricción interna resulta ser mayor cuando se determina a partir de pruebas consolidadas drenadas. En el capítulo 8 se comenta ampliamente este resultado.

7.9 COMPORTAMIENTO DEFORMACION ESFERICIDAD

7.9.1 DEFORMACION AXIAL

En la Fig. N° 7.14 se presenta la variación del módulo de deformación secante, $(E_s)_{s_0}$. La línea a trazos largos que une los puntos experimentales deja notar cierta dispersión en los resultados. Sin embargo, teniendo en cuenta los resultados de las pruebas CU (Fig. N° 6.31) y la curva número tres de la Fig. N° 7.14, se infiere que el módulo secante se incrementa a medida que disminuye la esfericidad de las partículas y alcanza un máximo valor, después del cual el módulo disminuye al disminuir la esfericidad.

Para que los resultados en módulo secante, E_s , sean comparables con los obtenidos en las pruebas CU, se eligieron los valores de E_s para la condición -

de cero velocidad de deformación volumétrica, $\dot{\epsilon}_v=0$, es decir, en el momento en que termina el comportamiento contractivo e inicia el comportamiento dilatante. La Fig. N° 7.15. presenta la variación del módulo secante $(E_s)_{Vc}^*$ en función de la esfericidad; ésta asevera la variación inferida anteriormente.

7.9.2. VARIACION DE LA RELACION DE DEFORMACIONES PRINCIPALES $(-\frac{\Delta \epsilon_2}{\Delta \epsilon_1})$

Todas las probetas ensayadas presentaron comportamiento semejante (Figs. N° 7.16 a 7.19). La relación de deformaciones principales, $-\frac{\Delta \epsilon_2}{\Delta \epsilon_1}$, se incrementa rápidamente al inicio de la prueba hasta un valor máximo, después del cual la relación de deformaciones principales disminuye ligeramente, tendiendo a ser igual a 0,5 cuando la deformación axial es grande.

* $(E_s)_{Vc}$, módulo secante evaluado por la relación σ_d/ϵ_2 , en el punto donde la deformación axial ϵ_2 , es la que corresponde a la condición de cero deformación volumétrica, $\epsilon_v=0$, al inicio de la prueba.

En función de la esfericidad de las partículas, la relación de deformaciones principales alcanza su máximo valor para valores de Ψ cercanos a 0.9 (figura N° 7.20) .

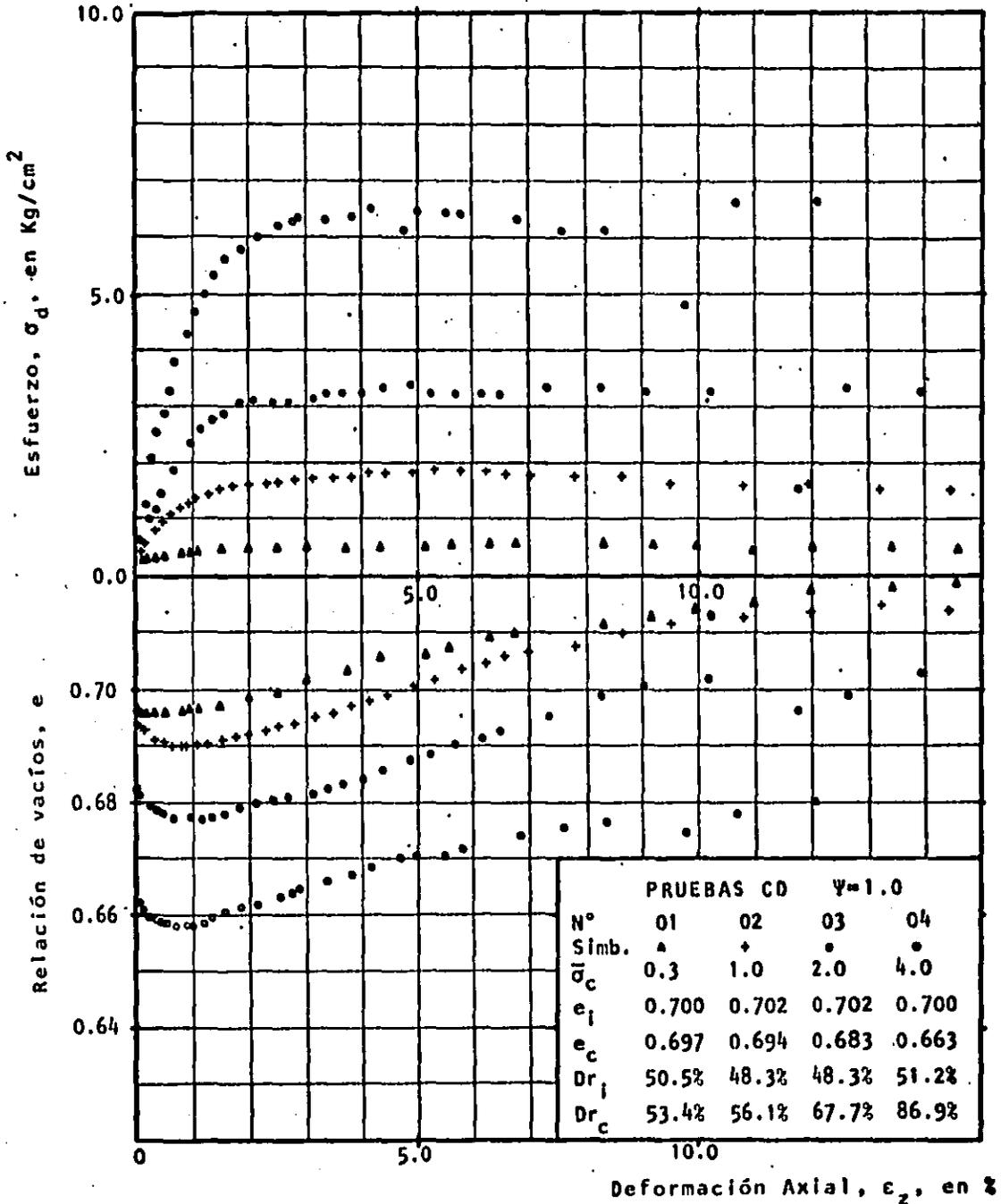


Fig. 7.1. Curvas Esfuerzo Desviador y Relación de Vacíos vs Deformación Axial. (PRUEBAS CD; $\Psi=1.0$)

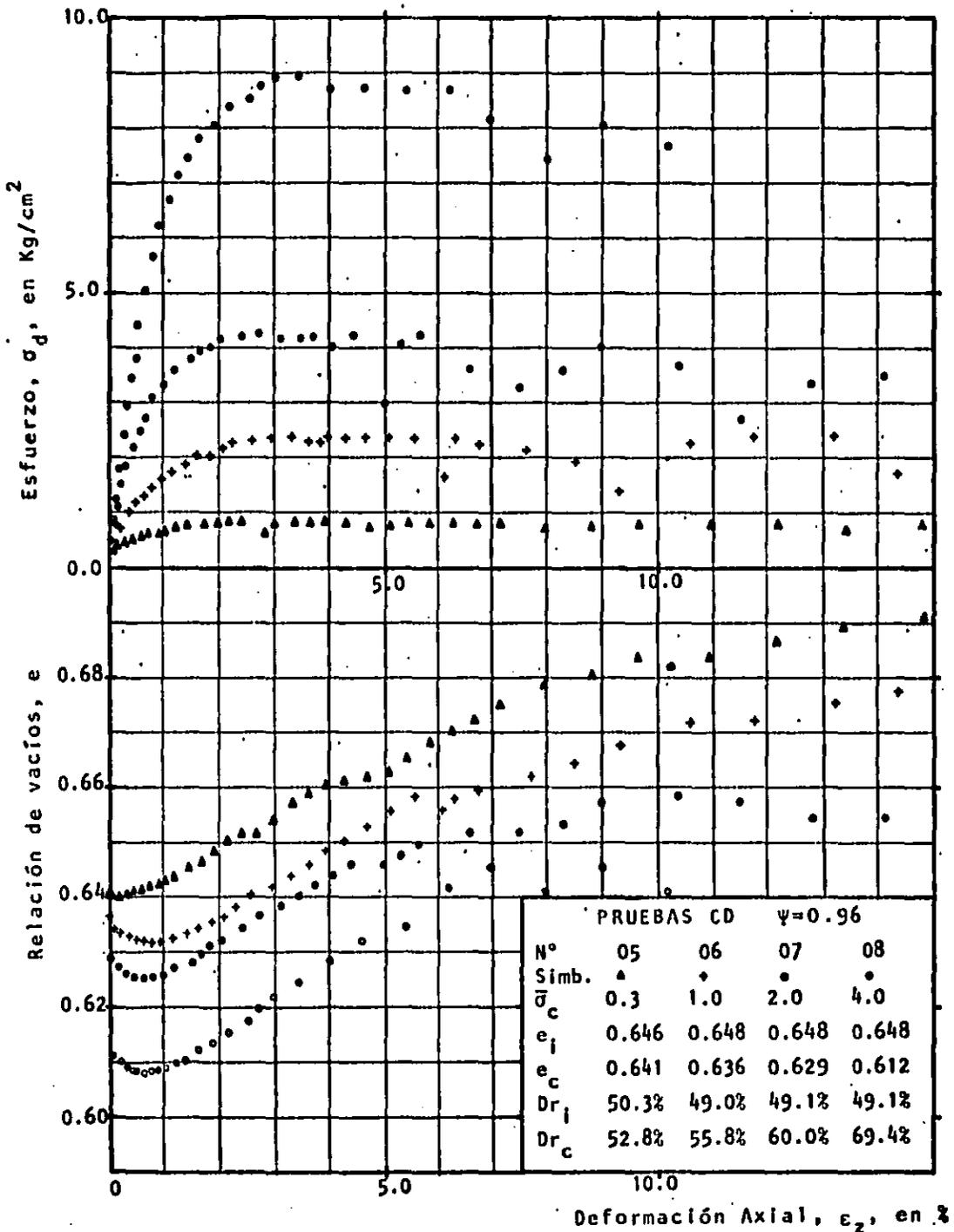


Fig. 7.2. Curvas Esfuerzo Desviador y Relación de Vacíos vs Deformación Axial. (PRUEBAS CD; $\psi=0.96$)

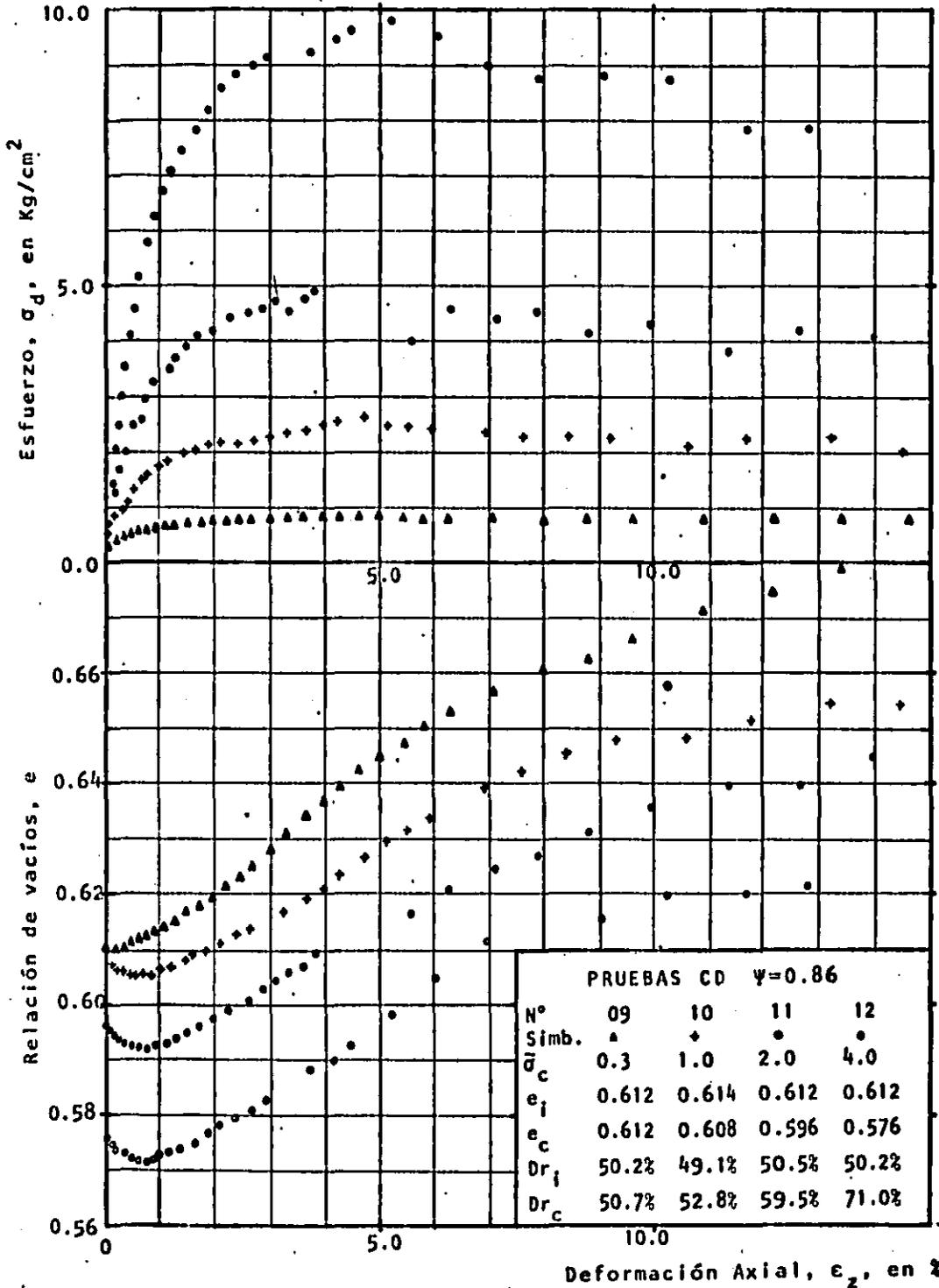


Fig. 7.3. Curvas Esfuerzo Desviador y Relación de Vacíos vs Deformación Axial. (PRUEBAS CD; $\Psi=0.86$)

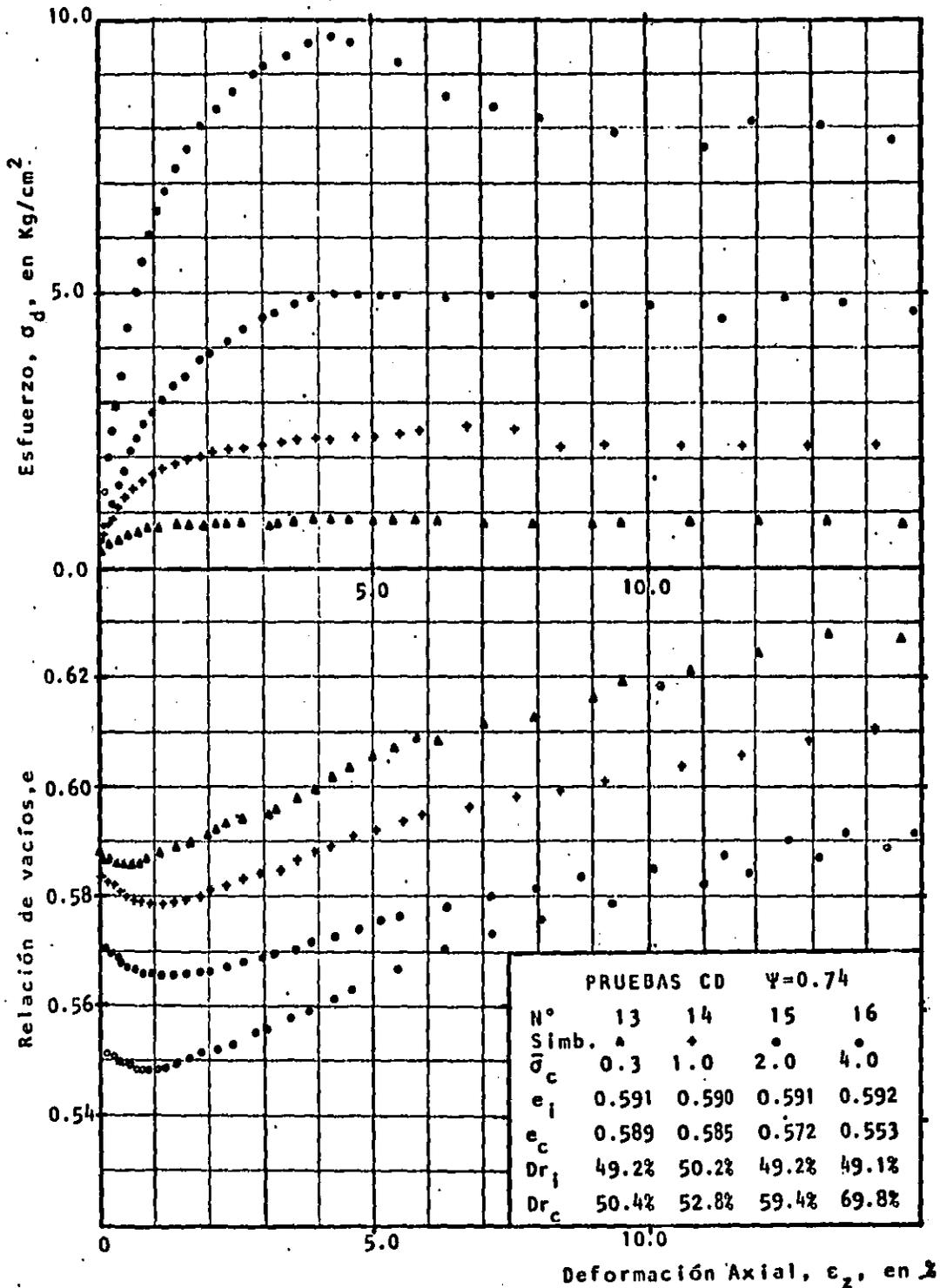


Fig. 7.4. Curvas Esfuerzo Desviador y Relación de Vacíos vs Deformación Axial. (PRUEBAS CD; $\Psi=0.74$)

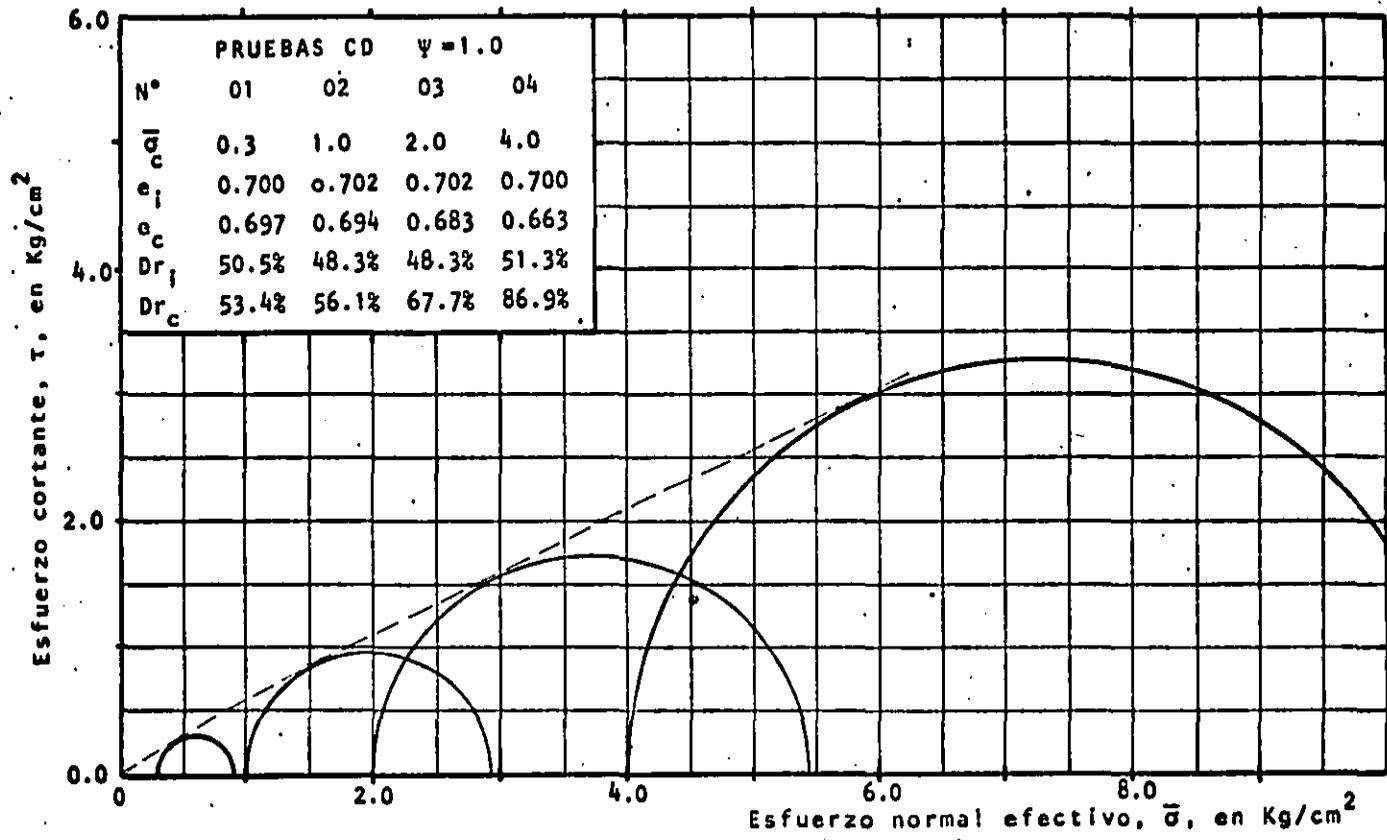


Fig. 7.5. Envolventes de Resistencia. (PRUEBAS CD; $\psi = 1.0$)

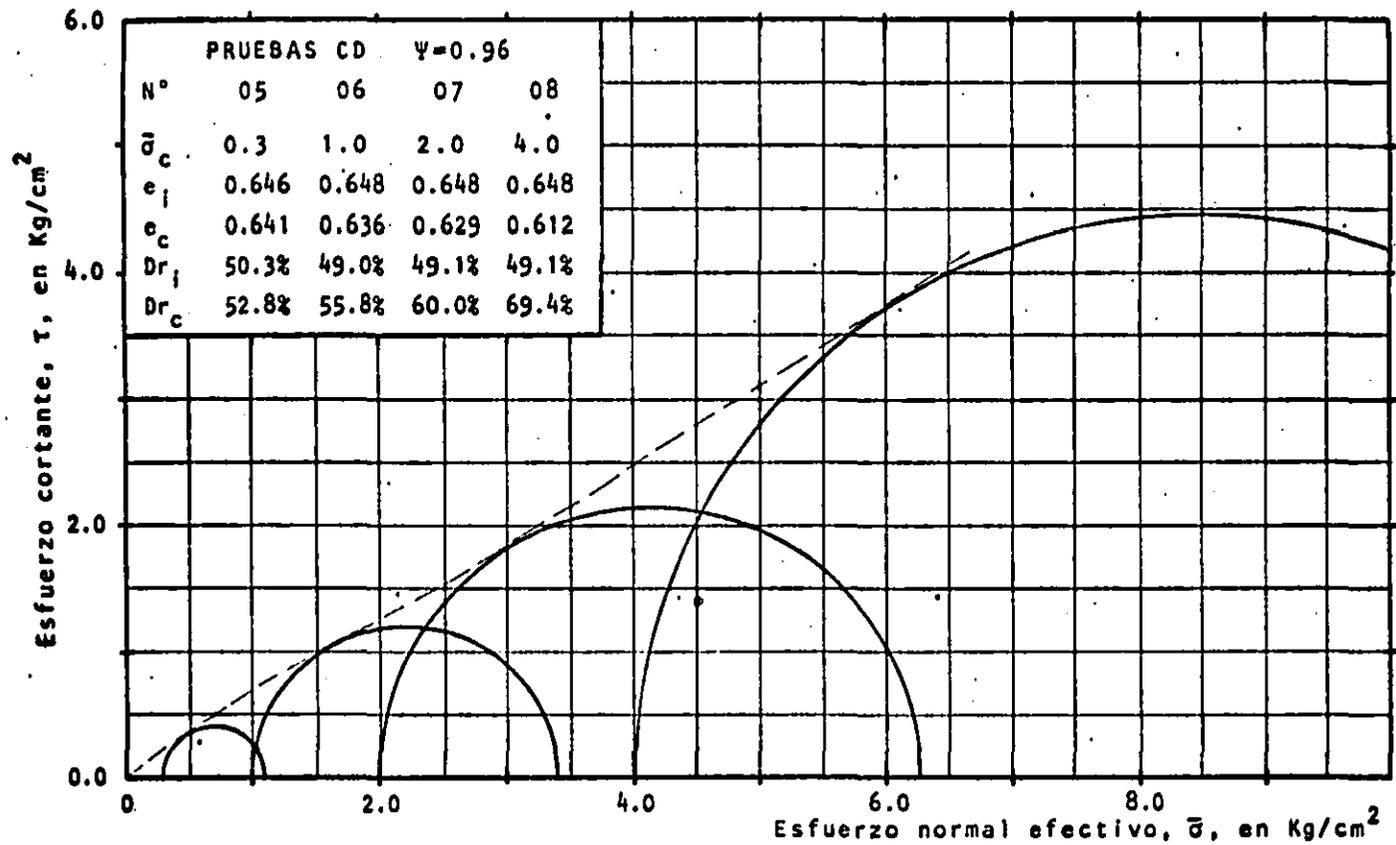


Fig. 7.6. Envolventes de Resistencia. (PRUEBAS CD; $\Psi=0.96$)

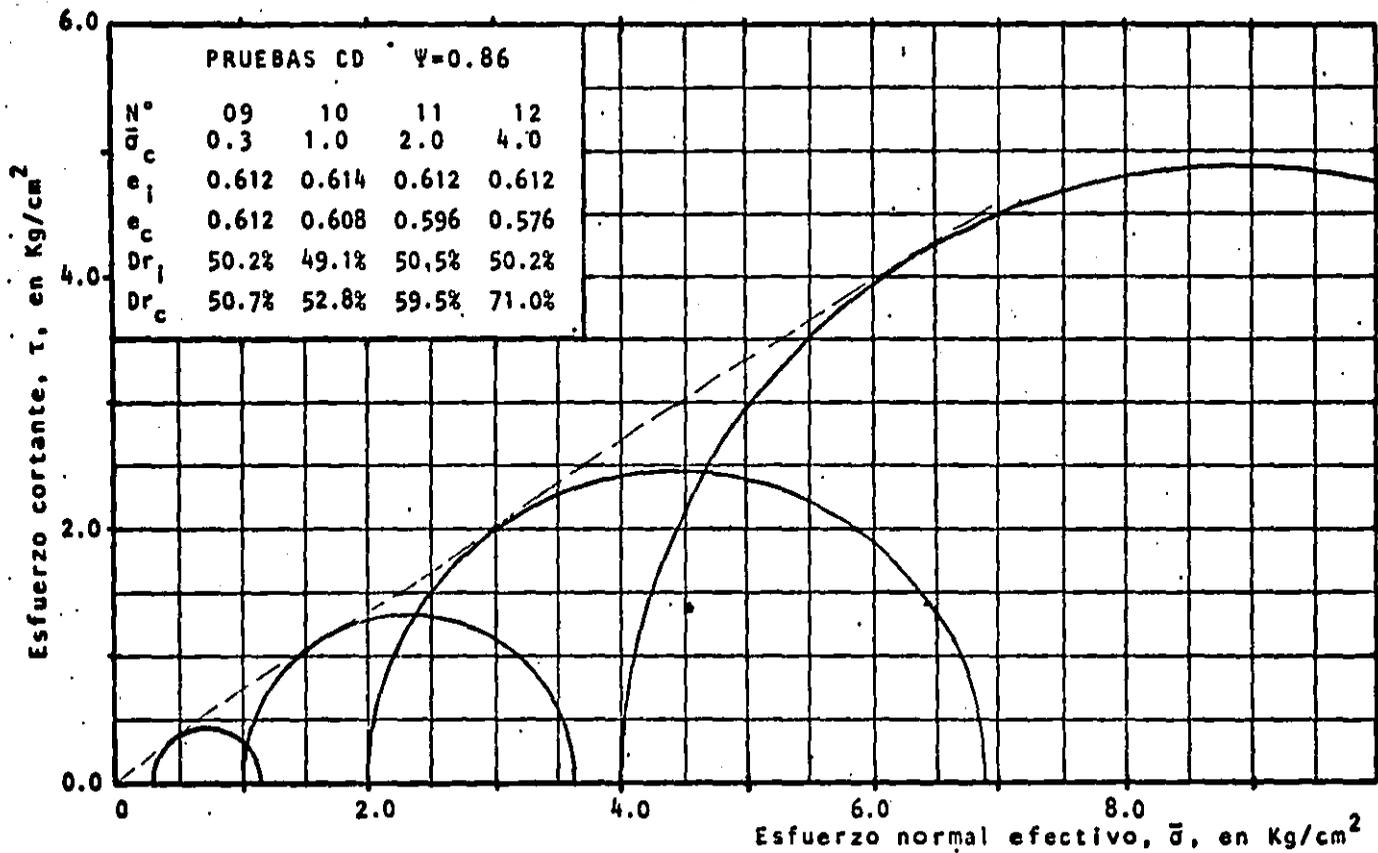
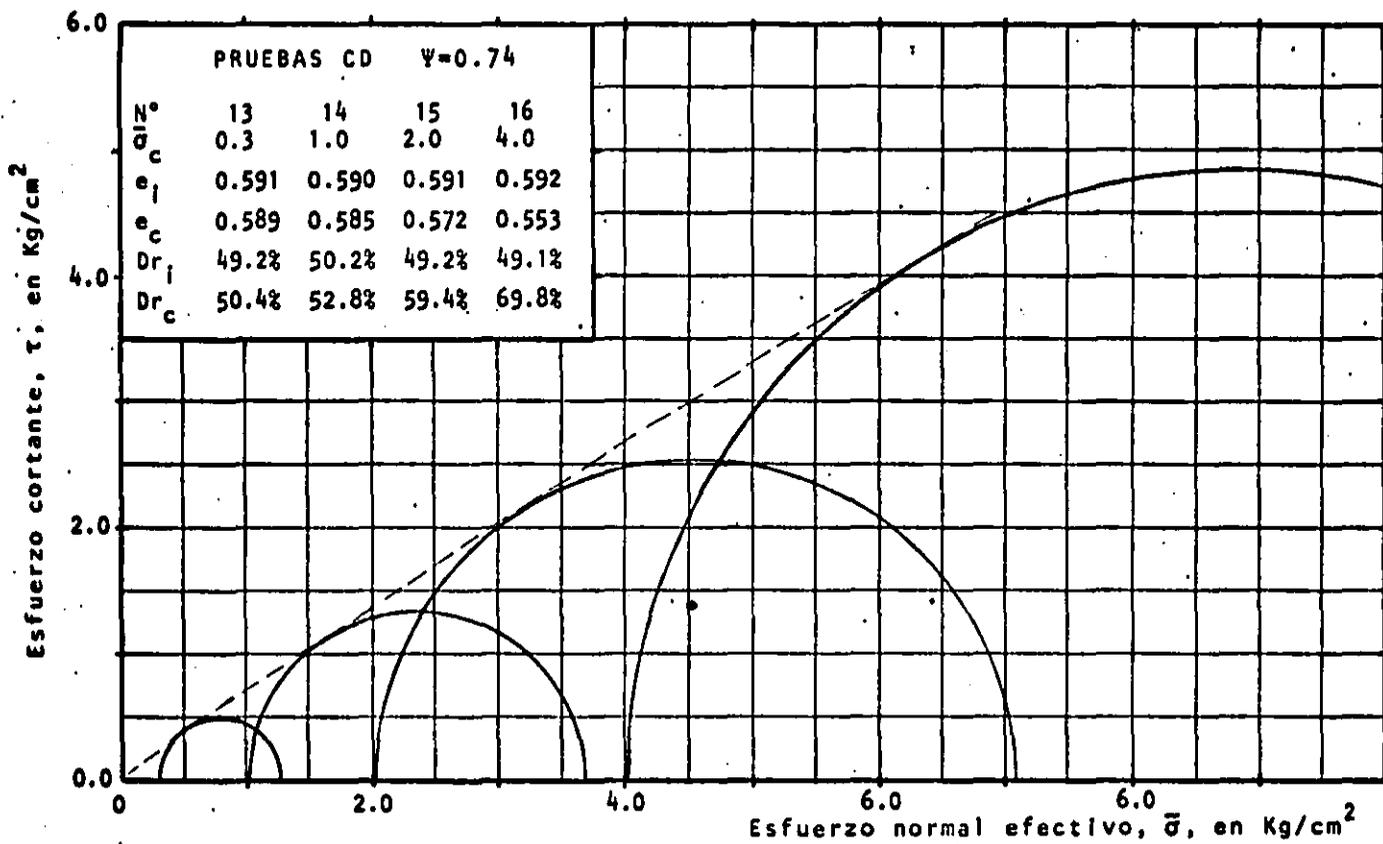


Fig. 7.7. Envolventes de Resistencia. (PRUEBAS CD; $\Psi=0.86$)



PRUEBAS CD		$\Psi=0.74$			
N°		13	14	15	16
$\bar{\sigma}_c$		0.3	1.0	2.0	4.0
e_i		0.591	0.590	0.591	0.592
e_c		0.589	0.585	0.572	0.553
Dr_i		49.2%	50.2%	49.2%	49.1%
Dr_c		50.4%	52.8%	59.4%	69.8%

Fig. 7.8. Envolventes de Resistencia. (PRUEBAS CD; $\Psi=0.74$)

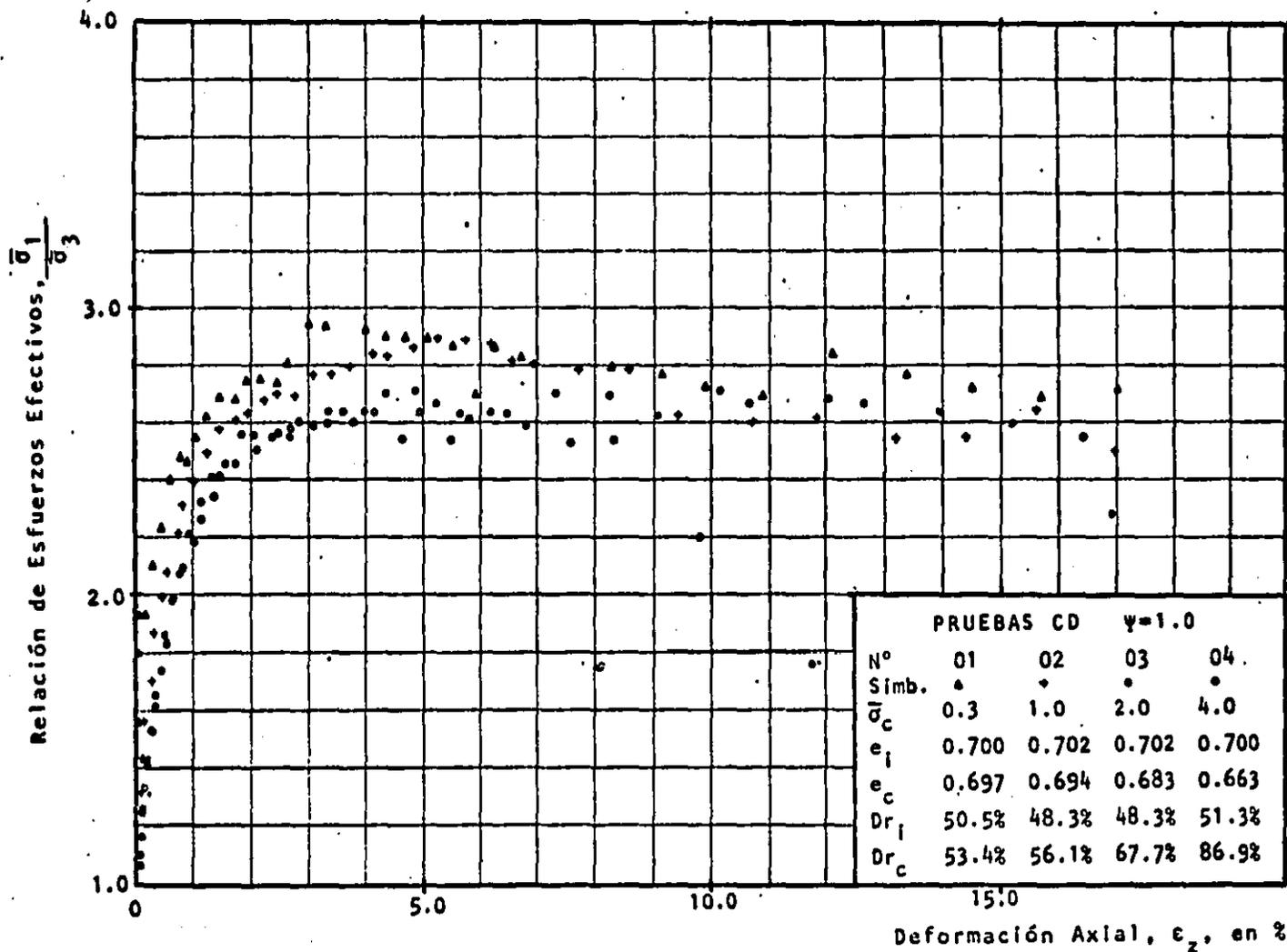


Fig. 7.9. Relación de Esfuerzos Principales Efectivos vs Deformación Axial. (PRUEBAS CD; $\psi=1.0$)

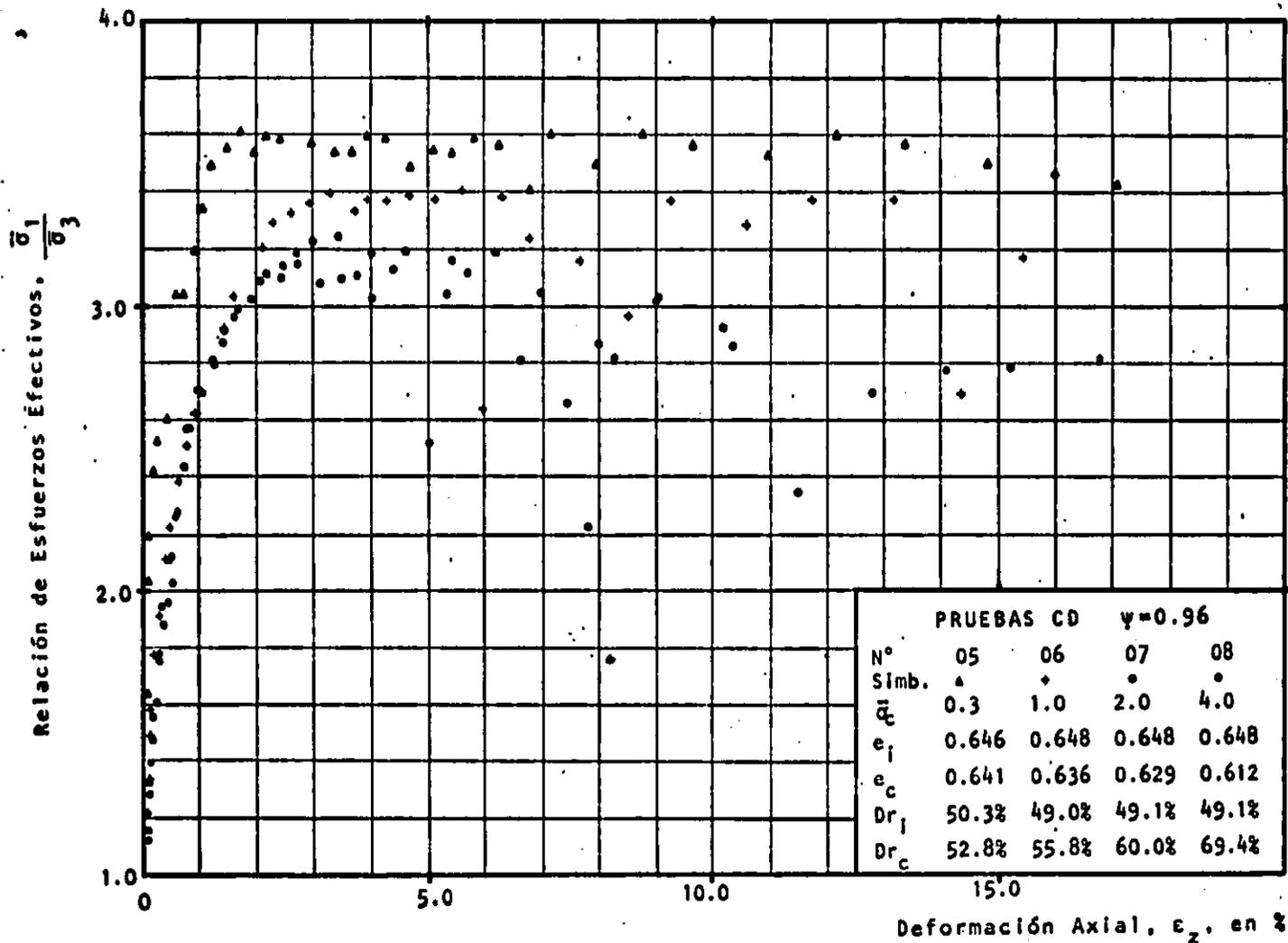


Fig. 7.10. Relación de Esfuerzos Principales Efectivos vs Deformación Axial. (PRUEBAS CD; $\psi=0.96$)

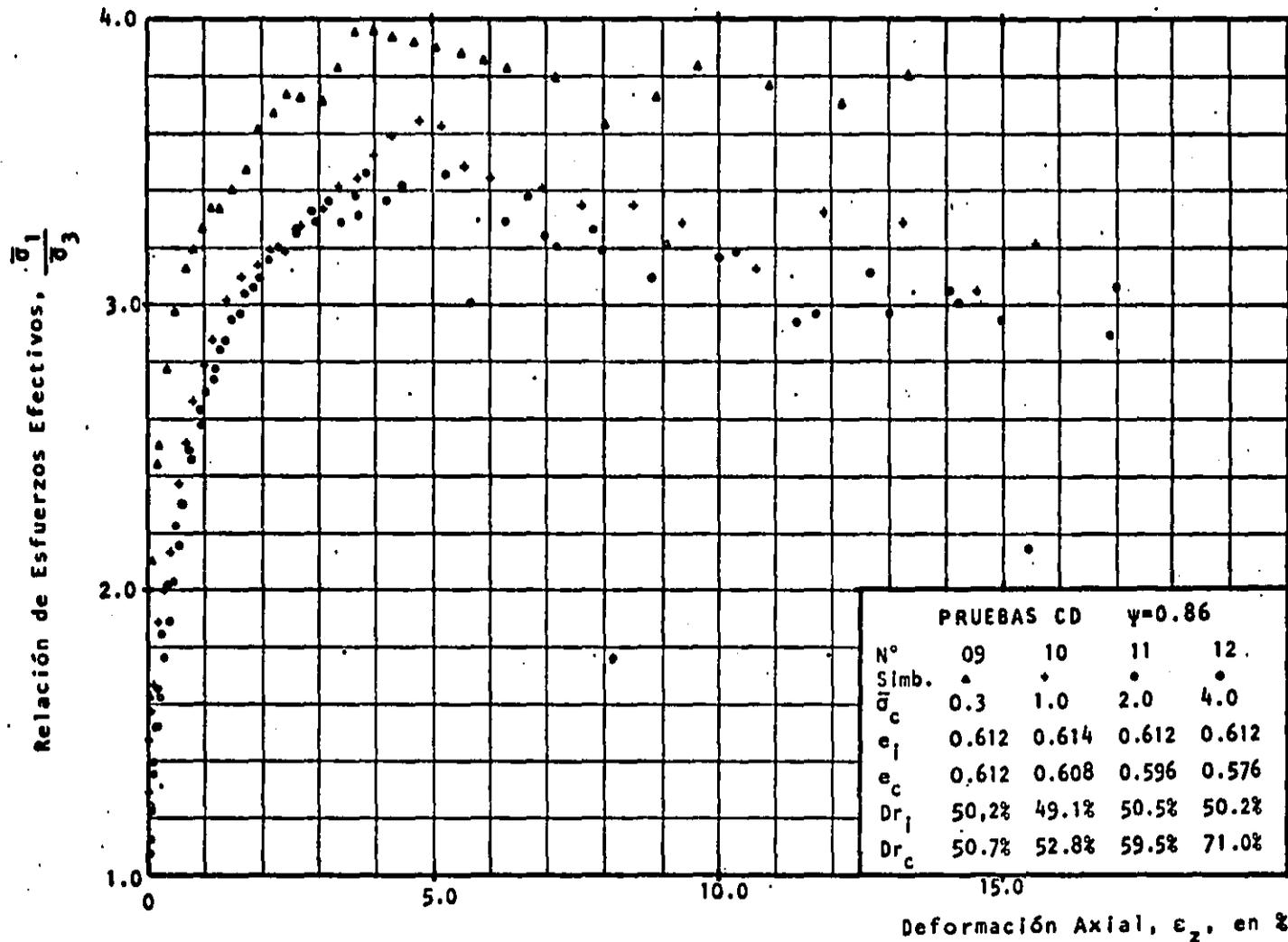


Fig. 7.11. Relación de Esfuerzos Principales Efectivos vs Deformación Axial. (PRUEBAS CD; $\psi=0.86$)

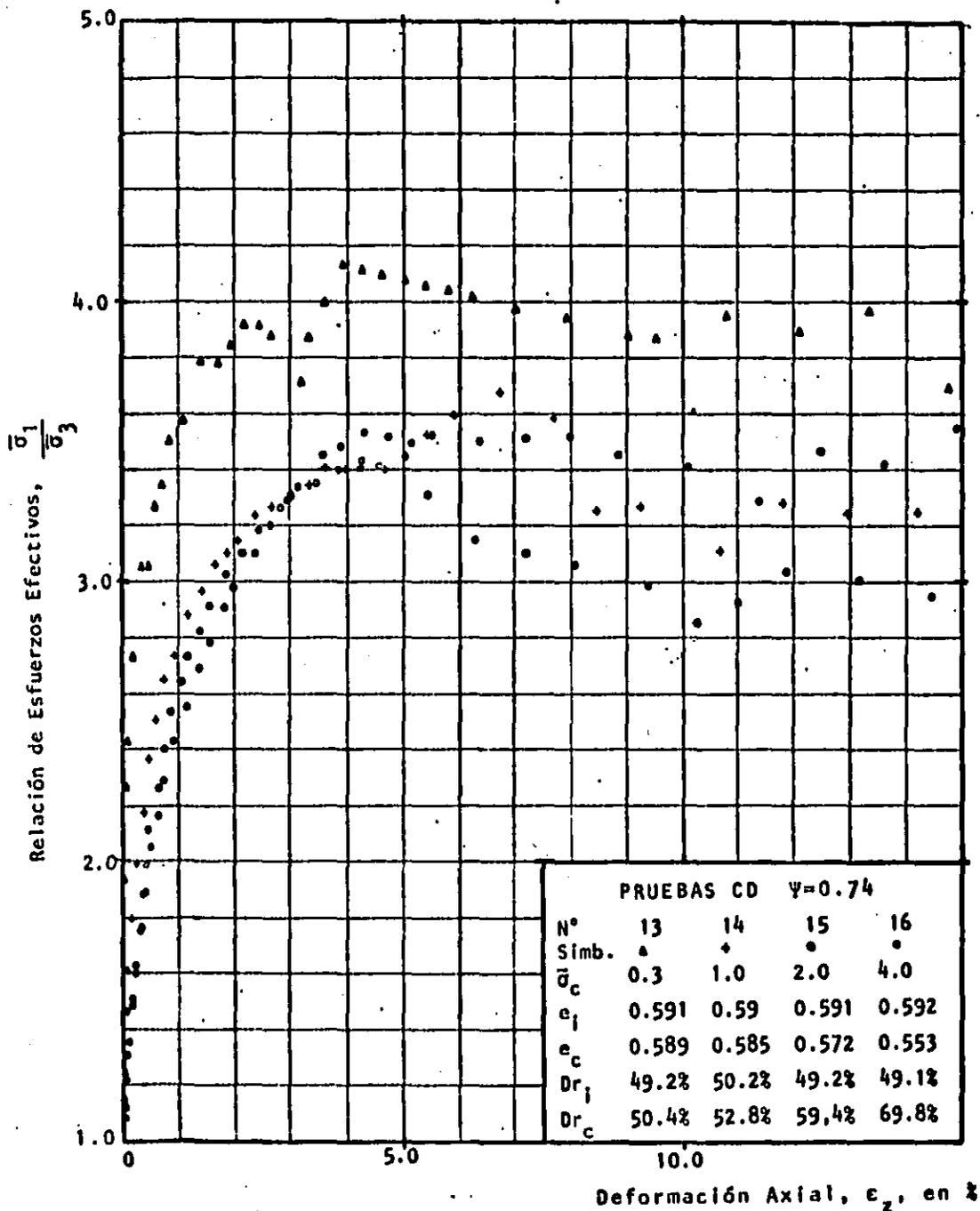


Fig. 7.12. Relación de Esfuerzos Principales Efectivos vs Deformación Axial. (PRUEBAS CD; $\psi=0.74$)

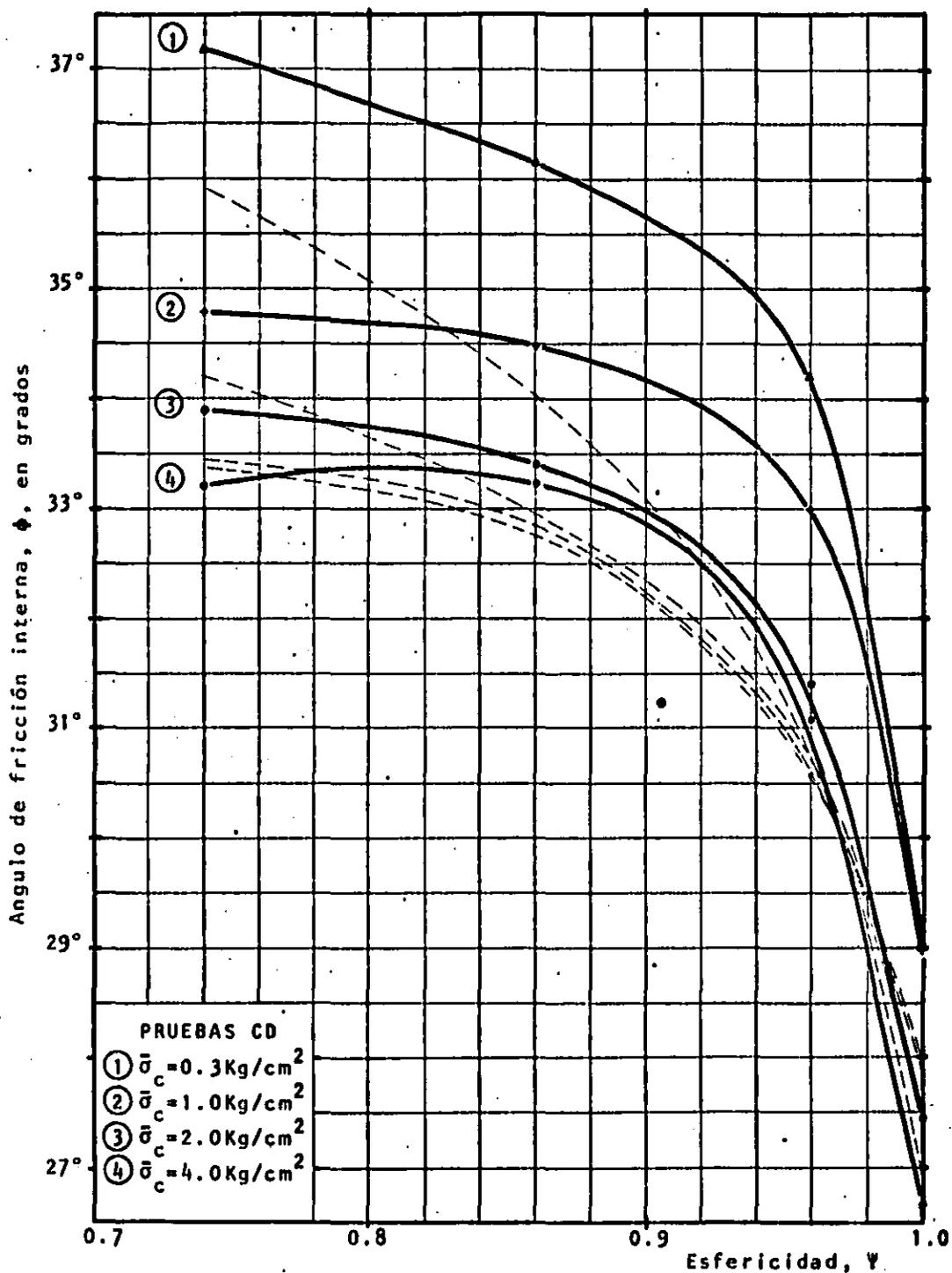


Fig. 7.13. Angulo de Fricción Interna vs Esfericidad. (PRUEBAS CD)

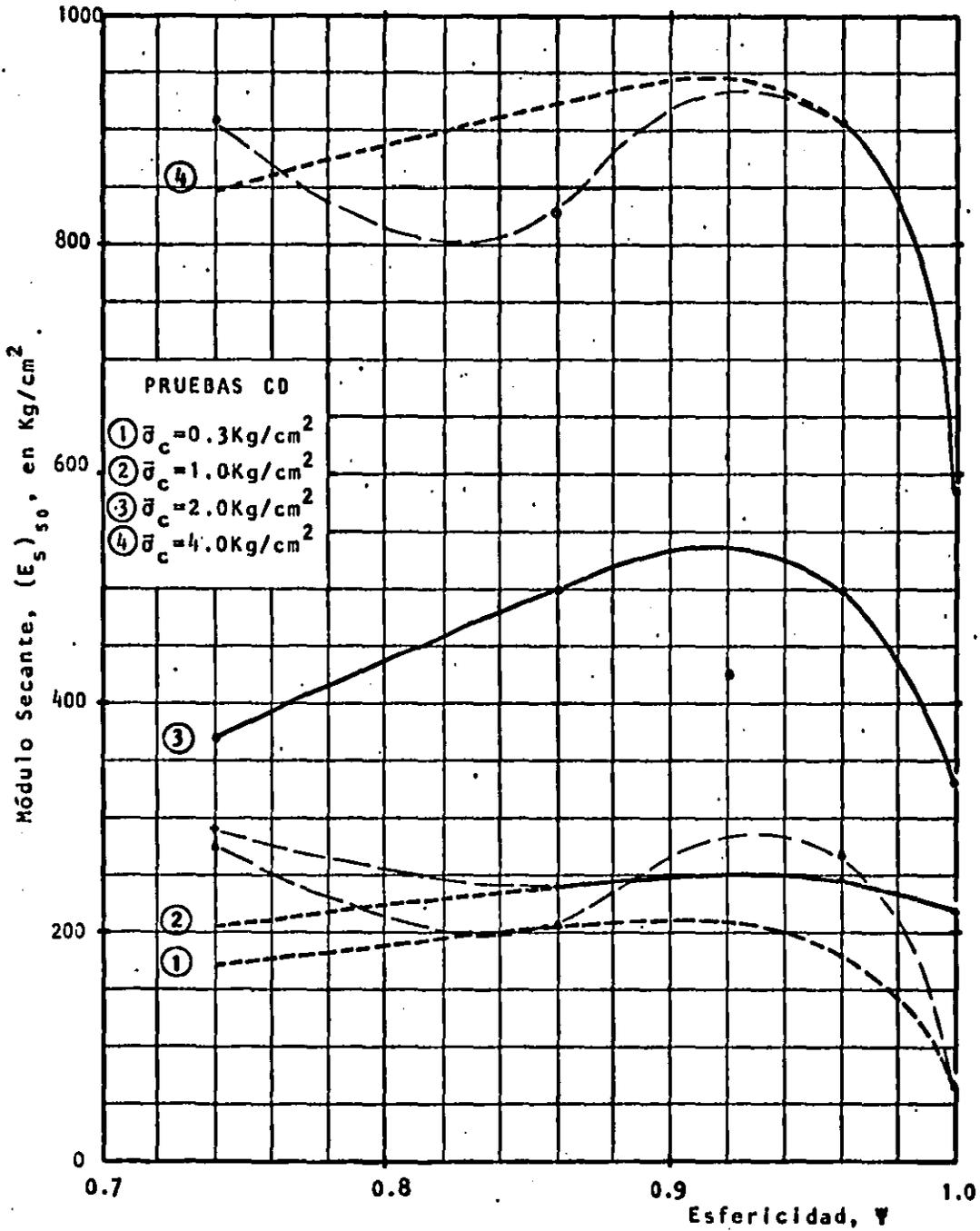


Fig. 7.14. Módulo Secante, $(E_s)_{50}$, vs Esfericidad. (PRUEBAS CD)

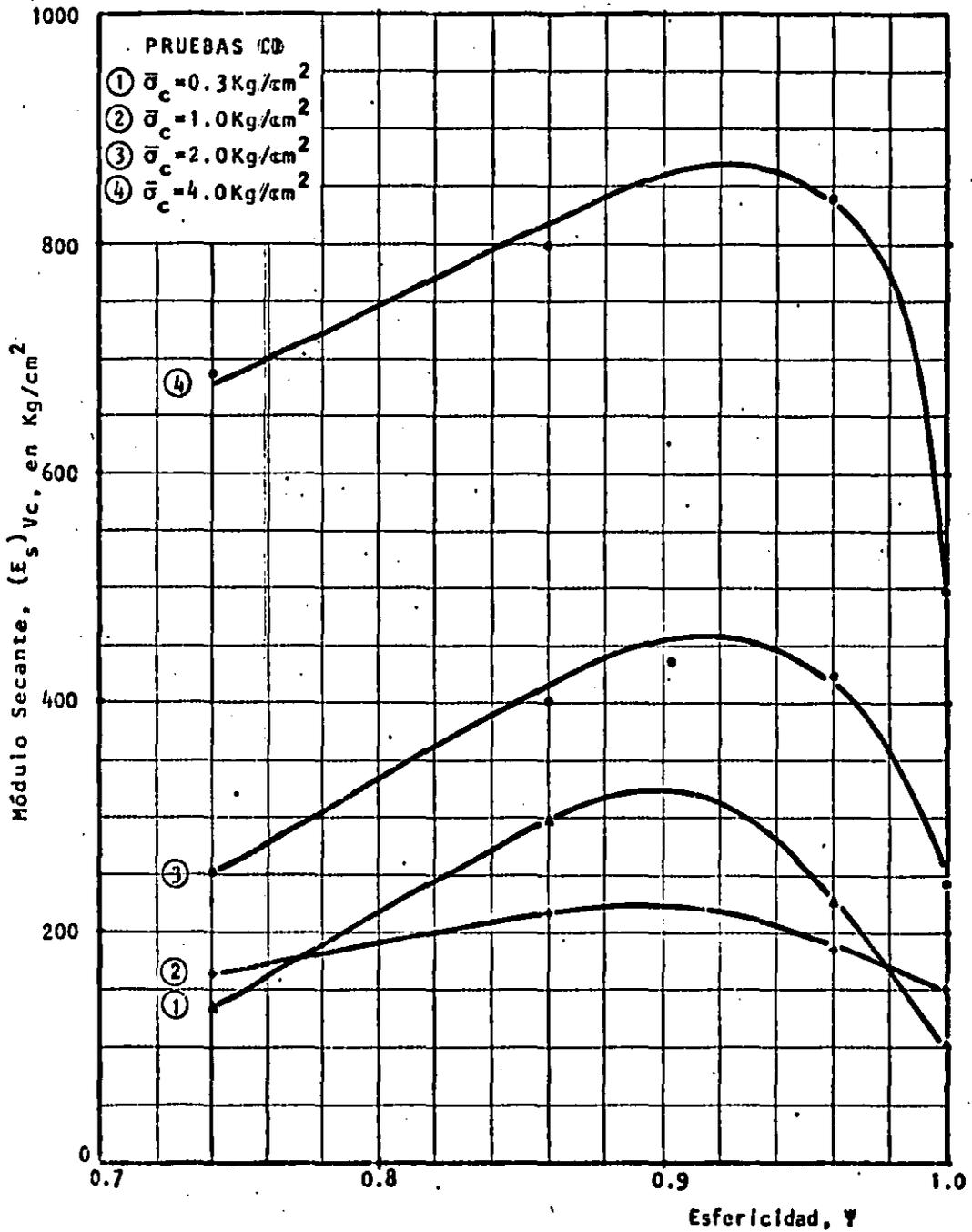


Fig. 7.15. Módulo Secante, $(E_s)_{vc}$, vs Esfericidad. (PRUEBAS CD)

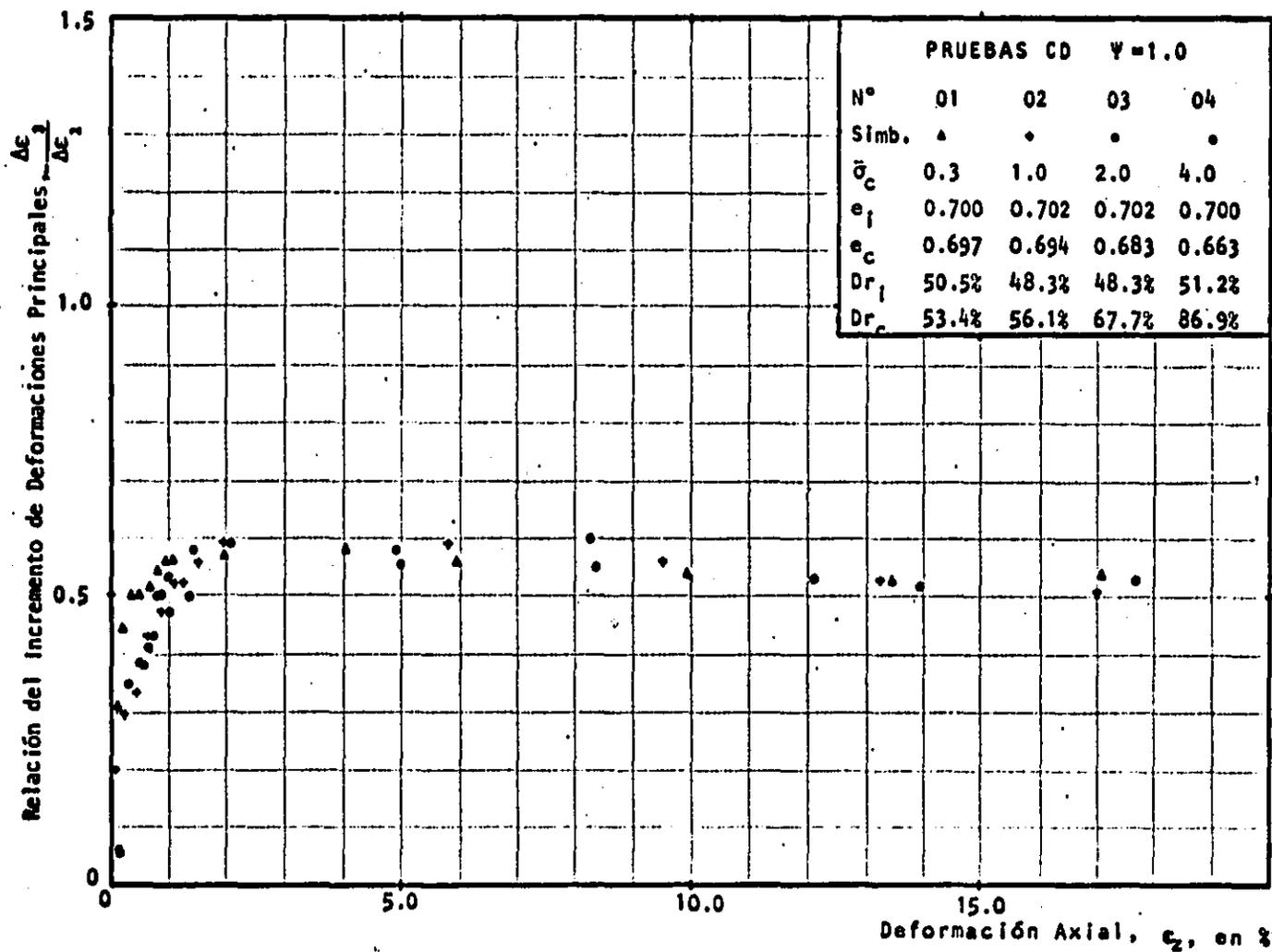


Fig. 7.16. Relación de Deformaciones Principales vs Deformación Axial. (PRUEBAS CD; $\Psi=1.0$)

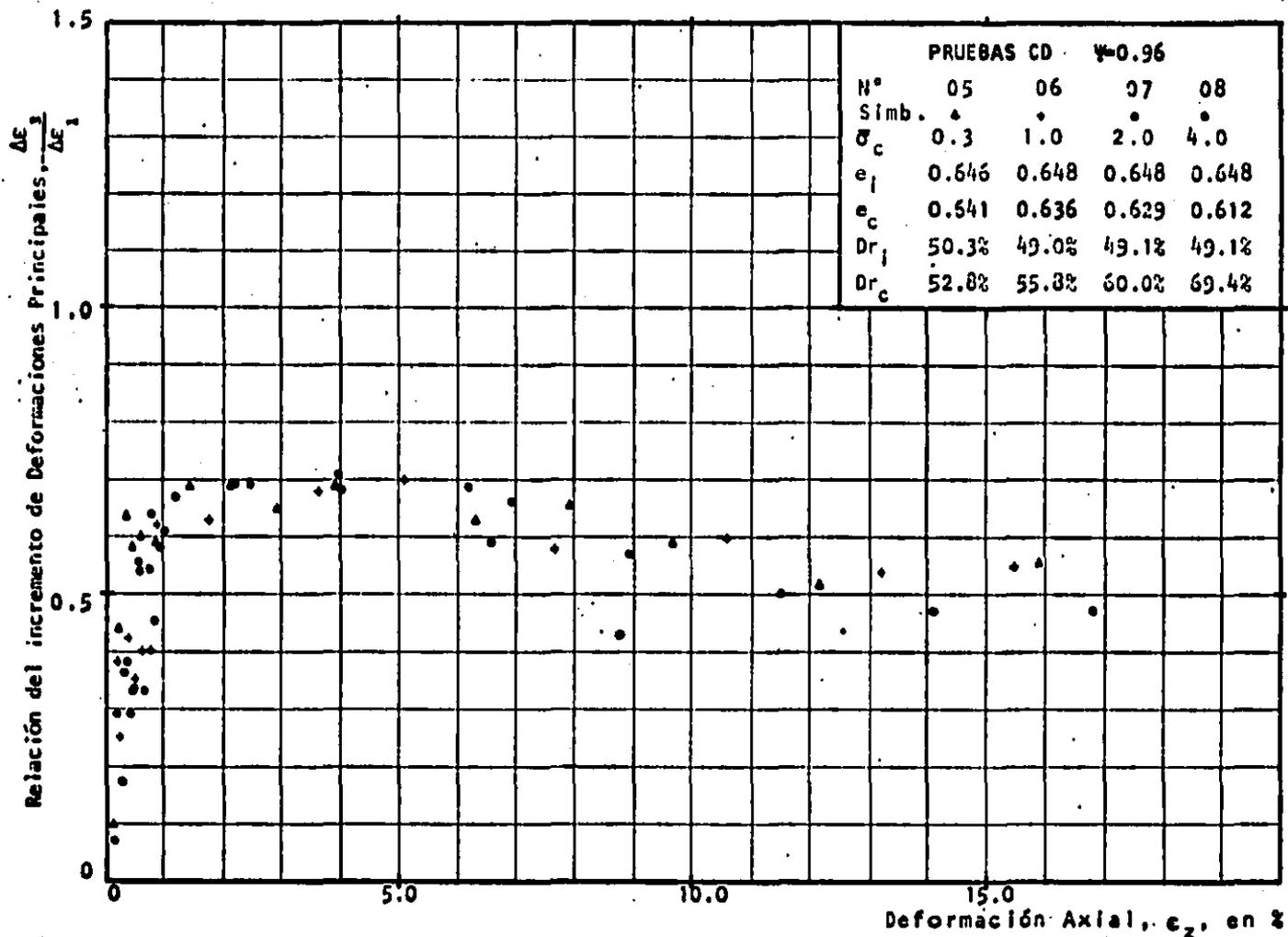


Fig. 7.17. Relación de Deformaciones Principales vs Deformación Axial. (PRUEBAS CD; $\psi=0.96$)

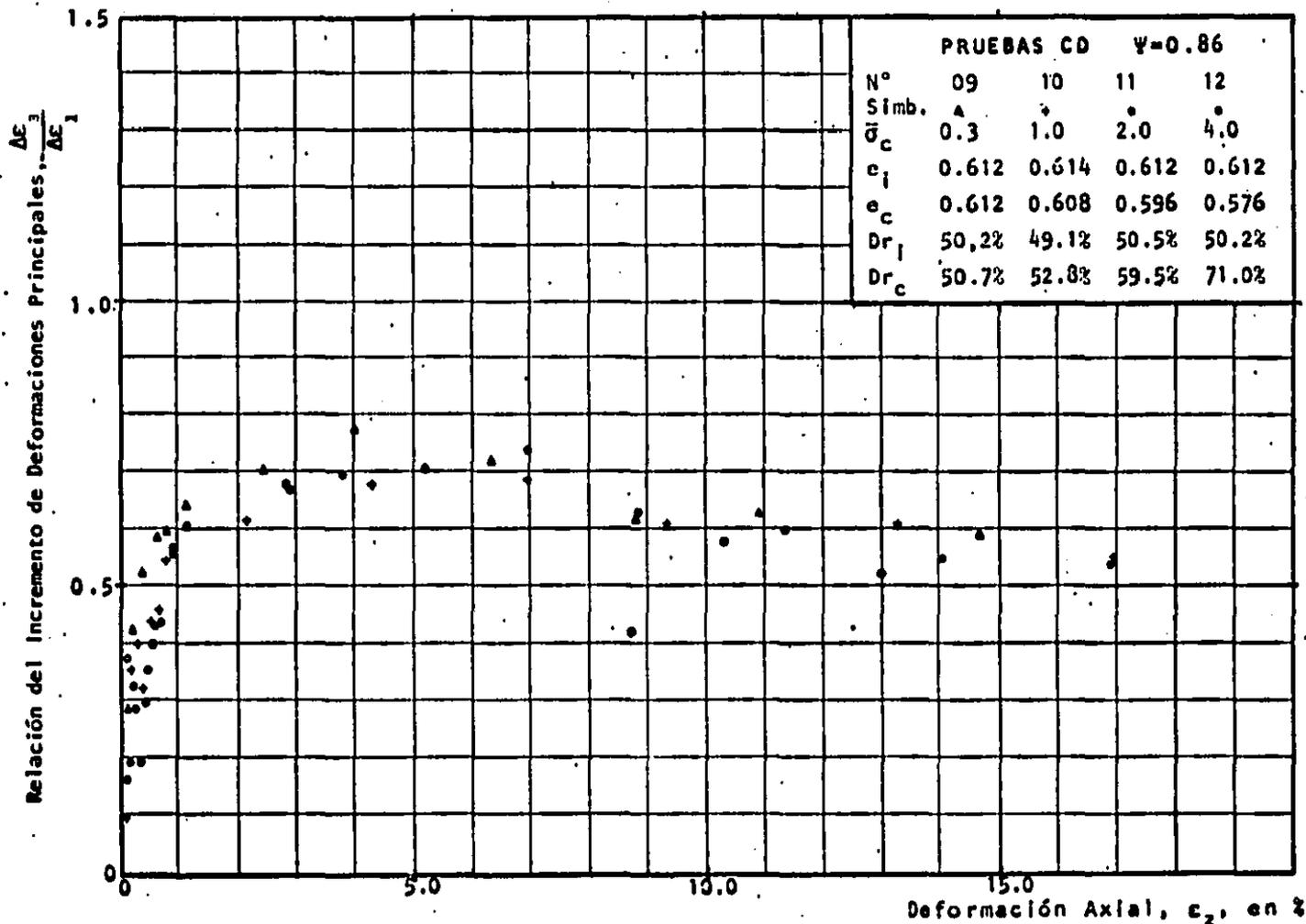


Fig. 7.18. Relación de Deformaciones Principales vs Deformación Axial. (PRUEBAS CD; $\psi=0.86$)

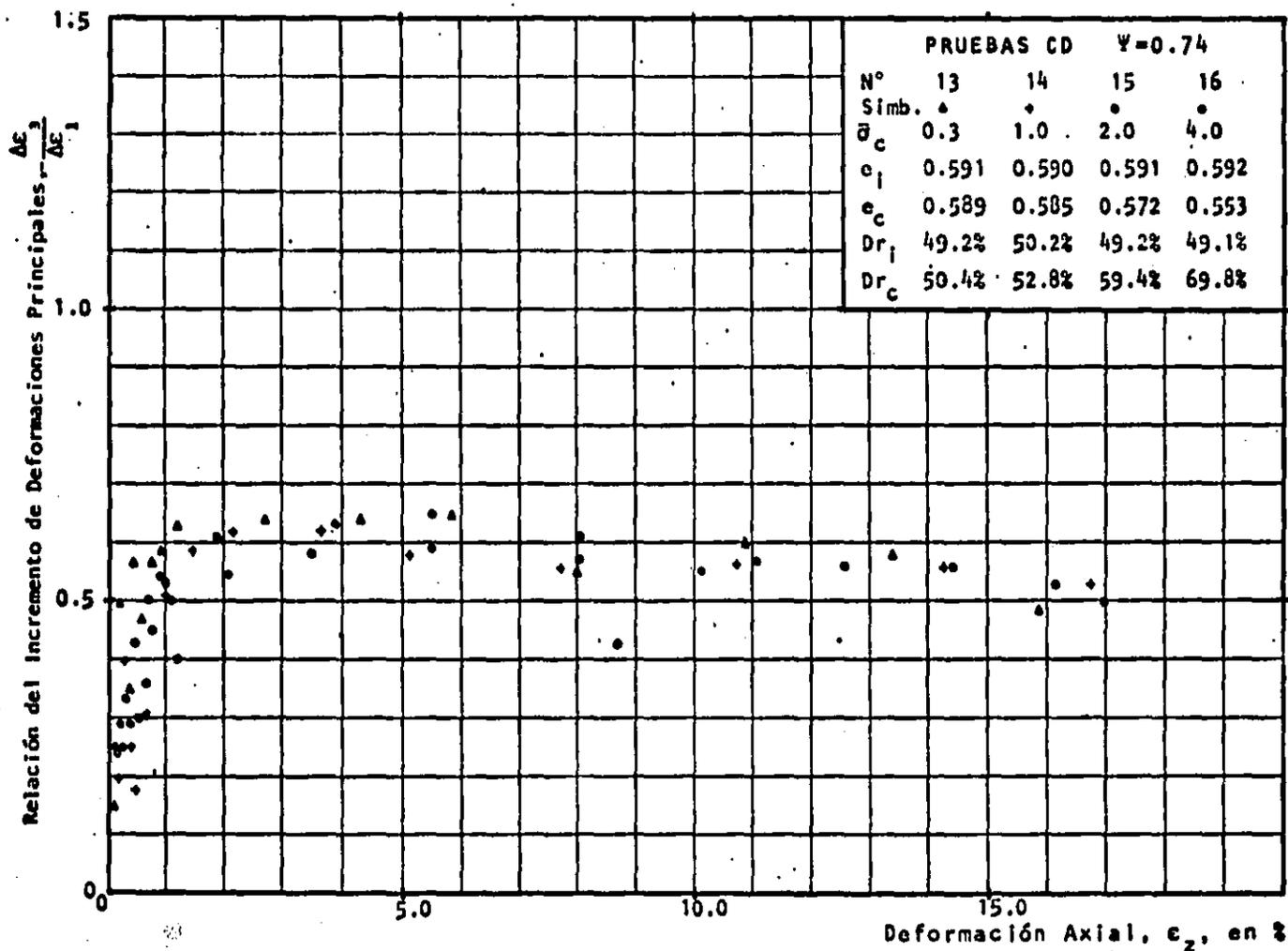


Fig. 7.19. Relación de Deformaciones Principales vs Deformación Axial. (PRUEBAS CD; $\Psi=0.74$)

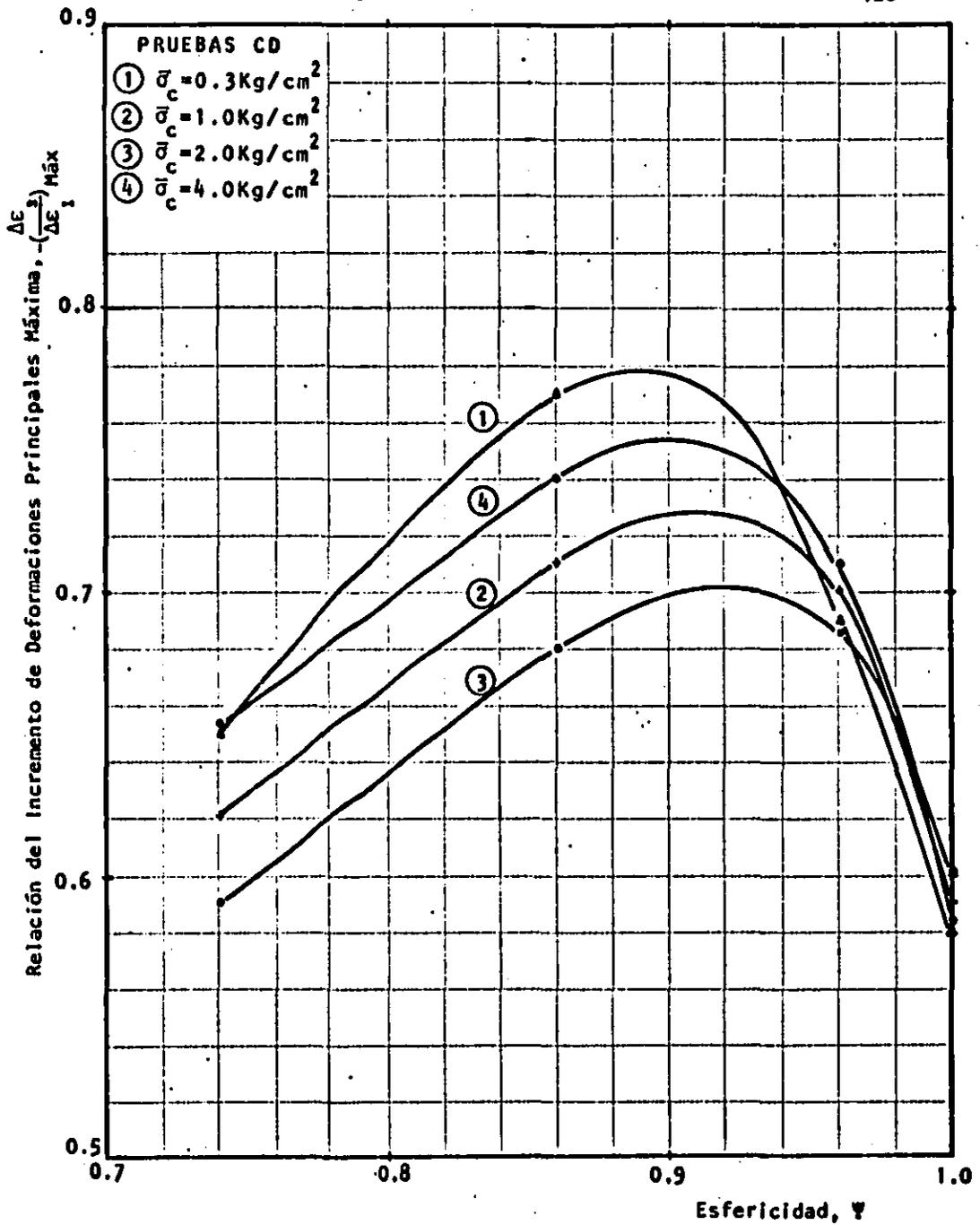


Fig. 7.20. Relación del Incremento de Deformaciones Principales vs Esfericidad (PRUEBAS CD)

TABLA N° 7.1.
PRUEBAS CD
RESUMEN GENERAL DE RESULTADOS

N°	Ψ	σ_c	u	e_1	e_c	Dr_1	Dr_c	$(\sigma_1/\sigma_3)_{m\acute{a}x}$	$e_{(\sigma_1/\sigma_3)_{m\acute{a}x}}$	$\phi_{(\sigma_1/\sigma_3)_{m\acute{a}x}}$	$e_{m\acute{a}x}$	$Dr_{(\sigma_1/\sigma_3)_{m\acute{a}x}}$	$(E_s)_{50}$
01	1.0	0.3	6.7	0.700	0.697	50.5	53.4	2.95	0.702	29.05	0.72	48.31	70.92
02	1.0	1.0	6.0	0.702	0.694	48.3	56.1	2.90	0.702	28.99	0.72	48.31	222.2
03	1.0	2.0	5.0	0.702	0.683	48.3	67.7	2.71	0.687	27.44	0.71	62.85	333.3
04	1.0	4.0	3.0	0.700	0.663	51.3	86.9	2.66	0.668	26.89	0.68	72.50	588.2
05	.96	0.3	6.7	0.646	0.641	50.3	52.8	3.62	0.647	34.22	0.69	47.63	270.3
06	.96	1.0	6.0	0.648	0.636	49.0	55.8	3.39	0.644	33.02	0.68	51.46	249.9
07	.96	2.0	5.0	0.648	0.629	49.1	60.0	3.14	0.637	31.07	0.66	55.63	500.0
08	.96	4.0	3.0	0.648	0.612	49.1	69.4	3.23	0.624	31.41	0.65	62.65	909.1
09	.86	0.3	6.7	0.612	0.612	50.2	50.7	3.96	0.635	36.15	0.68	37.50	212.8
10	.86	1.0	6.0	0.614	0.608	49.1	52.8	3.64	0.627	34.48	0.66	42.42	243.9
11	.86	2.0	5.0	0.612	0.596	50.5	59.5	3.45	0.617	33.40	0.65	47.78	500.0
12	.86	4.0	3.0	0.612	0.576	50.2	71.0	3.45	0.598	33.22	0.62	58.24	833.3
13	.74	0.3	6.7	0.591	0.589	49.2	50.4	4.14	0.601	37.2	0.63	44.32	277.7
14	.74	1.0	6.0	0.590	0.585	50.2	52.8	3.68	0.597	34.78	0.61	46.23	294.1
15	.74	2.0	4.0	0.591	0.572	49.2	59.4	3.53	0.573	33.89	0.60	58.92	370.4
16	.74	4.0	3.0	0.592	0.553	49.1	69.8	3.43	0.562	33.21	0.59	64.86	909.1
		Kg/cm ²	Kg/cm ²			%	%			°		%	Kg/cm ²

8. ANALISIS DE RESULTADOS

8.1. VARIACION DE LA RELACION DE VACIOS CON LA ESFERICIDAD

Los términos: relación de vacíos máxima ($a_{m\acute{a}x}$), y relación de vacíos mínima ($a_{m\acute{i}n}$), no corresponden al valor máximo y mínimo teórico. Los resultados reportados en la tabla N° 3.1 y Fig. N° 4.3., corresponden a valores obtenidos experimentalmente, para un determinado método de formación de probetas.

La relación de vacíos máxima disminuye ligeramente a medida que disminuye la esfericidad, mientras

que la variación de la relación de vacíos mínima es más drástica. Nótese en la Fig. N° 4.3., que la diferencia entre la relación de vacíos máxima y mínima para una esfericidad dada, disminuye al incrementar la esfericidad.

En la etapa de consolidación tiende a disminuir ligeramente el cambio en la relación de vacíos, cuando disminuye la esfericidad de las partículas, figura N° 8.1.

8.2. COMPORTAMIENTO ESFUERZO-DEFORMACION

En las curvas esfuerzo-deformación (Figura N° 6.5 a 6.20), se observa que en las pruebas CU el comportamiento corresponde al de especímenes semidensos, en los que el esfuerzo desviador aumenta con la deformación hasta un máximo, después del cual disminuye ligeramente. Simultáneamente se presentan súbitos desplazamientos relativos entre partículas, "Stick-Slip", posiblemente originados por:

a) Al inicio de la prueba, la deformación axial lleva a posiciones inestables algunos paquetes de partículas que encuentran el equilibrio cuando la fuer-

za necesaria para vencer la fricción dinámica es pequeña. Este efecto se esquematiza en la Fig. N° 8.2.; - no debe ser confundido con la dilatación, puesto que - se trata de pruebas a volumen constante, por lo tanto, dentro de la probeta deberán ocurrir desplazamientos - relativos entre paquetes de partículas, que equilibren la tendencia al incremento de volumen. Para iniciar - el movimiento relativo entre el paquete A y el paquete B, se requiere de una fuerza F_1 , (Fig. N° 8.2.a) , y para mantener el movimiento una fuerza menor F_2 , - (Fig. N° 8.2.b) que disminuye gradualmente hasta que la posición relativa entre paquetes es la indicada en la Fig. N° 8.2.c., en ese momento la fuerza necesaria, F_3 , para mantener el movimiento es mínima, ya que - únicamente hay que vencer la fricción entre partículas, y un desplazamiento súbito ocurrirá (figura - N° 8.2.d). Este efecto es tan significativo como un_l formes y lisas sean las partículas.

b) En la medida que progresa la prueba el efecto puede ser originado por la combinación de dos - factores: el ya mencionado anteriormente y la liberación del aire disuelto en el agua, cuando la presión de poro generada, $(-u_d)$, se acerca a la contrapresión (u) .

Nótese que los desplazamientos súbitos son menos importantes en la medida que disminuye la esfericidad de las partículas, esto puede deberse a que las partículas, después de cierto grado de achatamiento, -- tienden a orientarse de tal manera que, durante la de-- formación, algunos paquetes de partículas no tienen que montar a otros como en la Fig. 8.2., sino que deslizan sobre ellos.

En las Figs. 7.1 a 7.4., se observa que en las pruebas consolidadas drenadas el " Stick-Slip " es un efecto poco notorio; se justifica este hecho por tra-- tarse de pruebas en las que al permitir cambios de vo-- lumen, el desplazamiento relativo entre partículas ---- ocurre ordenada y paulatinamente.

8.3. PRESION DE PORO Y VARIACION VOLUMETRICA

La presión de poro generada por la aplica-- ción del esfuerzo desviador en las pruebas consolidadas no drenadas, está influenciada directamente por la for-- ma de las partículas; no se presenta en este trabajo

la variación de la presión de poro en la falla, en función de la esfericidad, porque por limitaciones del equipo utilizado no se pudo aplicar esfuerzos de contrapresión lo suficientemente grandes, para permitir que la presión de poro se generara libremente sin limitarla a la contrapresión (u). No obstante, la Fig. N° 6.21 presenta la variación de la presión de poro con la esfericidad, evaluada para el 3% de deformación axial, pero es de suponer que la tendencia en la falla sea semejante.

Las Figs. N° 7.1 a 7.4 presentan la variación de la relación de vacíos durante la aplicación del esfuerzo desviador en las pruebas consolidadas drenadas; en ellas se manifiesta claramente que el comportamiento al inicio de la prueba es contractivo, después dilatante y finalmente tiende a permanecer constante el volumen. Como el rango de variación de la relación de vacíos cambia con la esfericidad de las partículas, estas gráficas no son muy útiles para analizar la influencia de la forma de las partículas en la variación volumétrica; las Figs. N° 8.3 a 8.6 eliminan la incertidumbre puesto que en ellas se presenta la variación de la densidad relati-

va $(Dr_t)^*$, normalizada con respecto a la densidad relativa de consolidación (Dr_c) , en función de la deformación axial. Estas gráficas y las Figs. N° 8,7 y 6,21 ponen de manifiesto que la dilatancia de un medio granular se incrementa en la medida que disminuye la esfericidad de las partículas, hasta un valor máximo después del cual la orientación de las partículas hace que el efecto sea menos importante.

8.4 ENVOLVENTES DE RESISTENCIA

En general las envolventes presentan una curvatura que es más importante en las pruebas consolidadas drenadas. En las Figs. N° 7.5 a 7.8 y 6.21 a 6.24, no se observa claramente la curvatura, pero los valores del ángulo de fricción interna reportados en las tablas 6.1 y 7.1, para los diferentes esfuerzos de consolidación, $\bar{\sigma}_c$, ponen de manifiesto el efecto.

La curvatura de las envolventes es más importante en la medida que disminuye la esfericidad de

* Dr_t , densidad relativa para cualquier tiempo, (t), durante la etapa de falla.

las partículas y su efecto puede ser visualizado con la ayuda de las Figs. N° 6.25 a 6.28 y 7.9 a 7.12; en ellas se presenta la variación de la relación de esfuerzos efectivos $(\bar{\sigma}_1/\bar{\sigma}_3)$, con la deformación axial. Nótese que, cuando la esfericidad es igual a uno ($\psi=1$) la variación de la relación $(\bar{\sigma}_1/\bar{\sigma}_3)$, en función de la deformación axial, para diferentes esfuerzos de consolidación, define una franja relativamente pequeña, mientras que al disminuir la esfericidad, la relación de esfuerzos efectivos es más influenciada por el esfuerzo de consolidación, y la franja de variación se hace más grande. Como ejemplo puede observarse en la tabla N° 7.1, que la diferencia que hay en la relación $(\bar{\sigma}_1/\bar{\sigma}_3)_{\text{máx}}$, cuando el esfuerzo de consolidación pasa de 0.3 kg/cm^2 a 4.0 kg/cm^2 , es 0.29 para $\psi=1$, mientras que para la misma variación en el esfuerzo de consolidación, la diferencia en la relación $(\bar{\sigma}_1/\bar{\sigma}_3)_{\text{máx}}$ es 0.71 para $\psi=0.74$. En las mismas figuras se puede observar que la relación de esfuerzos efectivos crece rápidamente con deformación axial mínima, al inicio de la prueba; nótese que en algunos casos, la variación de la relación de esfuerzos efectivos, $(\bar{\sigma}_1/\bar{\sigma}_3)$, con la deformación axial, es prácticamente vertical

Michell (22), menciona que la curvatura de las envolventes puede ser explicada por la variación, con la presión normal efectiva, del ángulo de fricción interparticular, ψ ; de tal manera que el ángulo ψ de crece con el aumento del esfuerzo normal efectivo, $\bar{\sigma}$.

Las envolventes de resistencia, resultan con una pendiente mayor cuando la esfericidad de las partículas disminuye. Para dilucidar si estas diferencias son originadas únicamente por el cambio de esfericidad, se realizaron ocho pruebas triaxiales consolidadas no drenadas, en las que variando la esfericidad se reproducían probetas con igual relación de vacíos; en la Fig. N° 8.9 se observa que, a igual relación de vacíos, el ángulo de fricción interna aumenta al disminuir la esfericidad de las partículas.

Las Figs. N° 6.12, 8.8 y 8.9, permiten aseverar que utilizar materiales ideales para eliminar la influencia de la variación de otros parámetros, es una solución muy acertada, ya que los resultados en lo que respecta a la variación de la relación de vacíos, son cualitativamente iguales a los presentados por

Taylor (23) y Kezdi (5), que trabajando con arenas, encontraron que al aumentar la relación de vacíos, la presión de poro generada en la etapa de falla es mayor, el esfuerzo desviador máximo es menor y el ángulo de fricción interna disminuye.

Para valorar la importancia de las diferencias encontradas al variar la esfericidad de las partículas en comparación con las diferencias originadas por la variación de otros parámetros, por ejemplo la densidad relativa, que han sido motivo de mayor atención, la ya citada Fig. N° 8.9 es de gran utilidad ya que en ella se puede observar que al variar la densidad relativa de $D_r=0\%$ a $D_r=100\%$ y manteniendo constante la esfericidad, la máxima diferencia en términos del ángulo de fricción interna es de 6° , cuando $\Psi=0.74$; mientras que, a igual densidad relativa y variando la esfericidad de $\Psi=1.0$ a $\Psi=0.74$, la máxima diferencia en términos del ángulo de fricción interna es de 8.5° , cuando $D_r=100\%$.

8.5. VARIACION DE LA RESISTENCIA CON LA ESFERICIDAD

Las líneas continuas en la Fig. N° 7.13 representan la variación del ángulo de fricción interna - en función de la esfericidad, evaluado a partir de - pruebas triaxiales consolidadas drenadas y las líneas a trazos, a partir de pruebas consolidadas no drenadas ; en los dos casos la resistencia se incrementa a medida que disminuye la esfericidad, siendo mayor la resistencia cuando se evalúa a partir de pruebas consolidadas - drenadas; ésta puede deberse a la combinación de dos - factores, a saber :

a) En las pruebas consolidadas drenadas el esfuerzo efectivo de confinamiento es constante e igual al esfuerzo de consolidación, mientras que en las pruebas consolidadas no drenadas el esfuerzo efectivo de - confinamiento se ve incrementado en la medida que disminuye la presión de poro. Al variar únicamente el tipo de prueba se observa que el esfuerzo normal efectivo $\bar{\sigma}$, en el punto donde la relación $(\bar{\sigma}_1/\bar{\sigma}_3)$ es máxima, - es mayor cuando la prueba es consolidada no drenada y - según Michell (22), el ángulo de fricción interparticula-

lar ψ decrece con el aumento del esfuerzo normal efectivo, $\bar{\sigma}$.

b) En las pruebas consolidadas drenadas, además de la componente de resistencia por fricción pura, existe una componente por la dilatancia que experimenta el material. Bishop ⁽²⁴⁾, estudió este efecto y encontró que al mantener constante el esfuerzo de confinamiento, el ángulo de fricción interna es mayor cuando el espécimen experimenta mayor dilatancia; es decir, cuando el material está en estado denso.

8.6. VARIACION DEL MODULO DE DEFORMACION SECANTE CON LA ESFERICIDAD

Las Figs. N° 6.31 y 7.15 indican que el módulo de deformación secante se incrementa a medida que disminuye la esfericidad de las partículas y presenta un máximo cuando ψ es cercano a 0.9, para valores menores de $\psi=0.9$, el módulo secante disminuye ligeramente. El módulo secante es mayor cuando se evalúa a partir de pruebas drenadas, este resultado puede ser explicado por la presencia de dilatancia en las pruebas a volumen variable.

En pruebas consolidadas drenadas la restricción que ofrecen las partículas a los desplazamientos relativos, por efectos de fricción entre ellas, es incrementado por la dificultad que tienen las partículas, para montar unas a las otras; obviamente la deformabilidad del medio disminuye mientras que, en las pruebas no drenadas, la tendencia a la dilatancia se traduce en presión de poro negativa que incrementa los esfuerzos normales efectivos, por tanto, el ángulo de fricción interparticular disminuye y con él la restricción a los desplazamientos relativos entre partículas, originando un medio más deformable.

8.7. VARIACION DE LA PRESION DE PORO CON EL ESFUERZO DESVIADOR

En la Fig. N° 8.10. se puede ver que a mismo esfuerzo desviador, σ_d , la presión de poro generada en la etapa de falla, se incrementa en la medida que disminuye la esfericidad de las partículas; siendo más notorio este efecto, cuanto mayor es el esfuerzo de consolidación. La cercanía entre las curvas 3 y 4; permite inferir que la generación de presión de poro, en

función de la esfericidad de las partículas, está acotada superiormente.

En la ya mencionada figura se observa que, como en las arenas, un medio que presenta comportamiento puramente dilatante a bajos estados de esfuerzos, puede cambiar la tendencia al inicio de la prueba, pasando a tener comportamiento contractivo, al incrementar el es fuerzo de consolidación.

Nótese que los resultados son consistentes con lo observado por E. Juárez Badillo⁽²⁶⁾. Al inicio de la prueba, la variación de la presión de poro con el esfuerzo desviador, es prácticamente lineal, con pendiente $A=1/3$, y que corresponde a la presión de poro generada por la "componente isotrópica" del estado de esfuerzos; posteriormente la presión de poro en exceso a la producida por la "componente isotrópica", es generada por la degradación de la estructura, originada por esfuerzos cortantes.

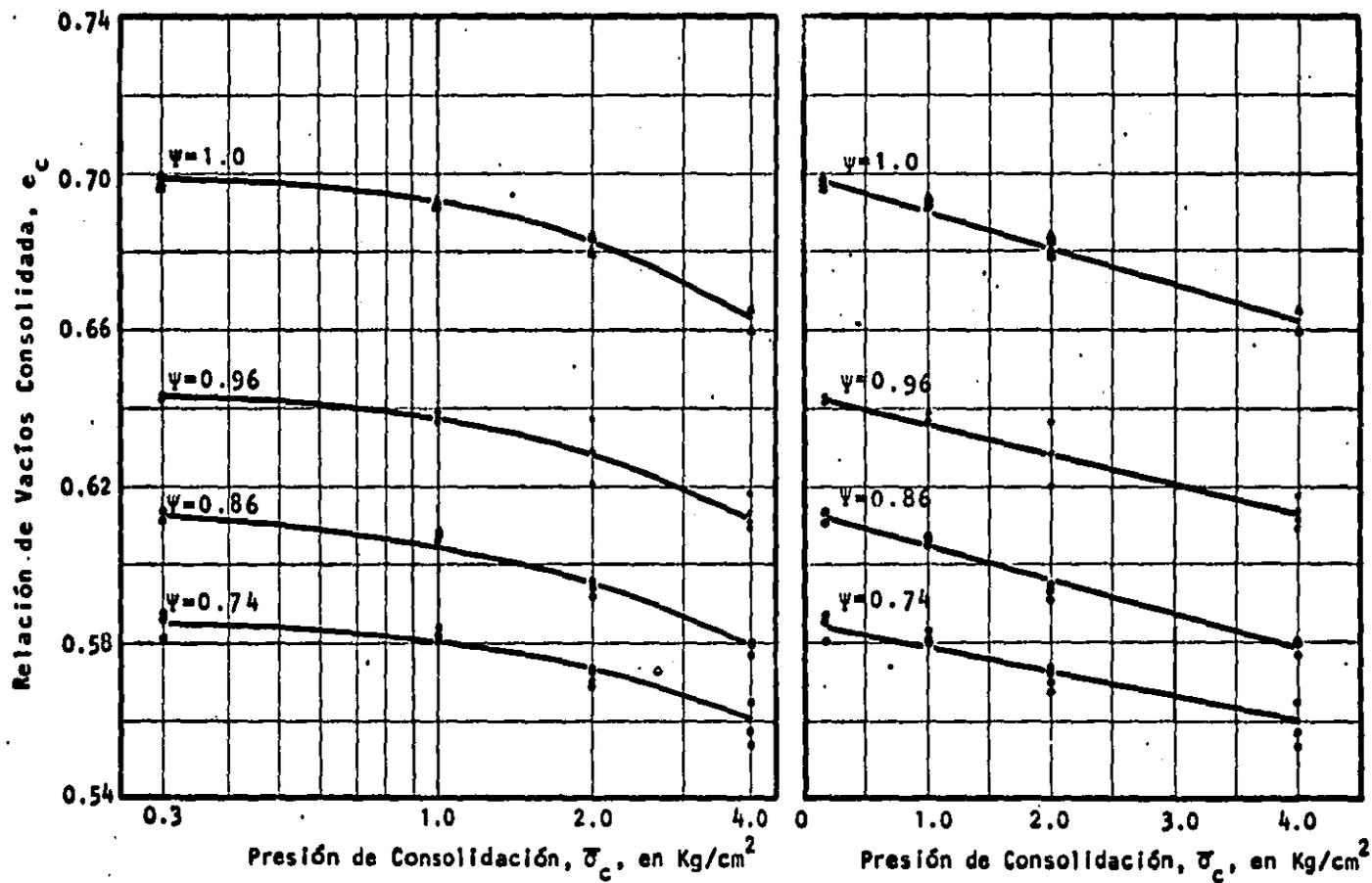


Fig. 8.1. Relación de Vacuos Consolidada vs Presión de Consolidación.

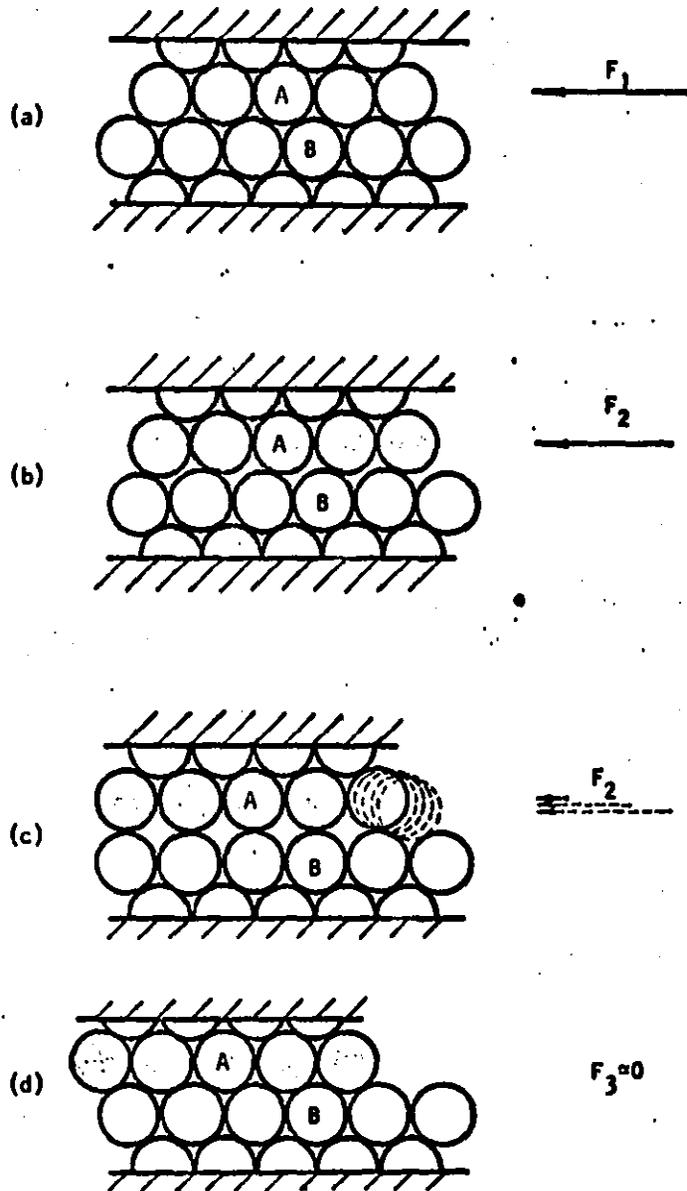


Fig. 8.2. Esquema Indicativo del Efecto " Stick-Slip "

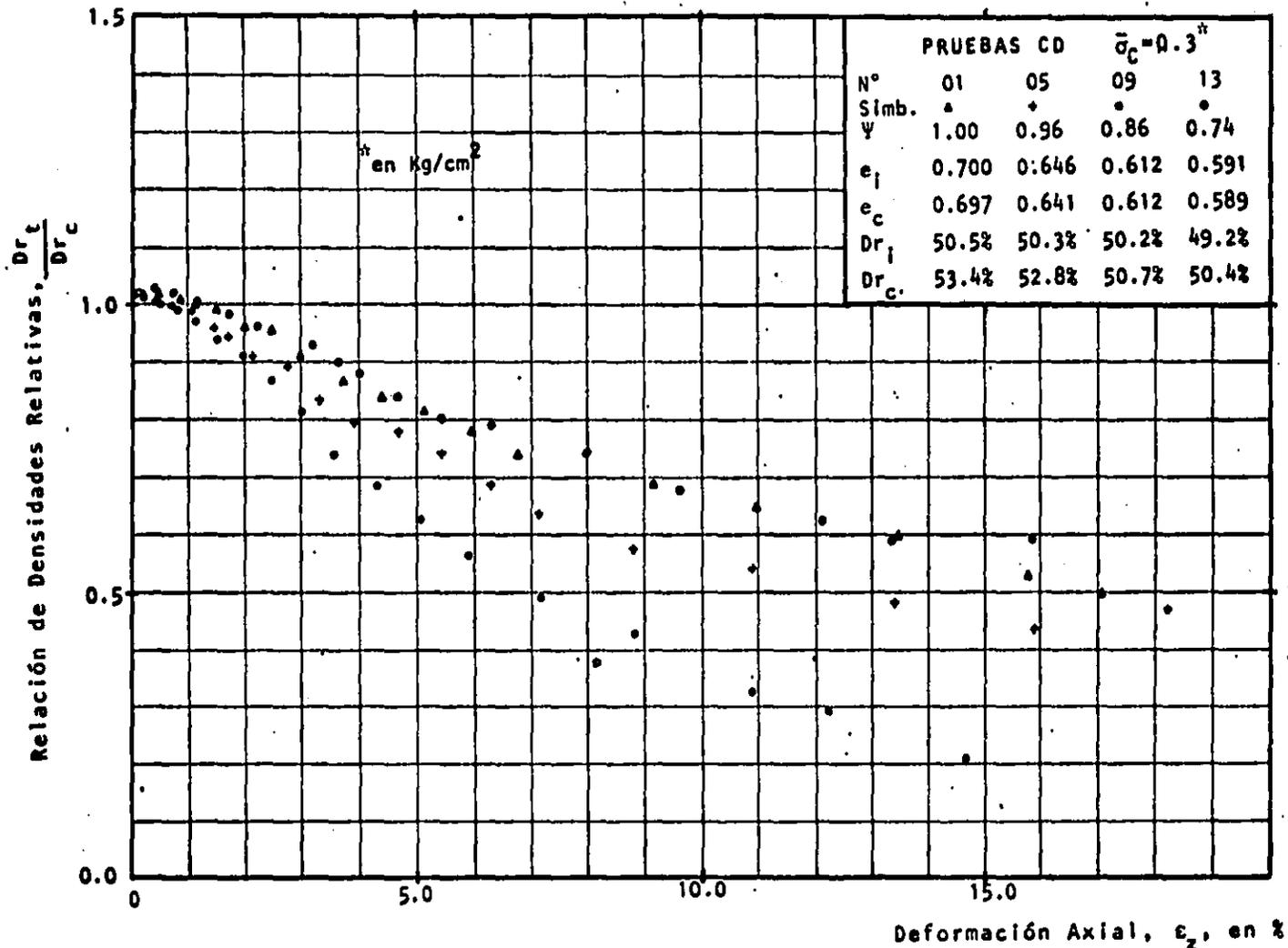


Fig. 8.3. Relación de Densidades Relativas vs Deformación Axial. (PRUEBAS CD; $\bar{\sigma}_c = 0.3 \text{kg/cm}^2$)

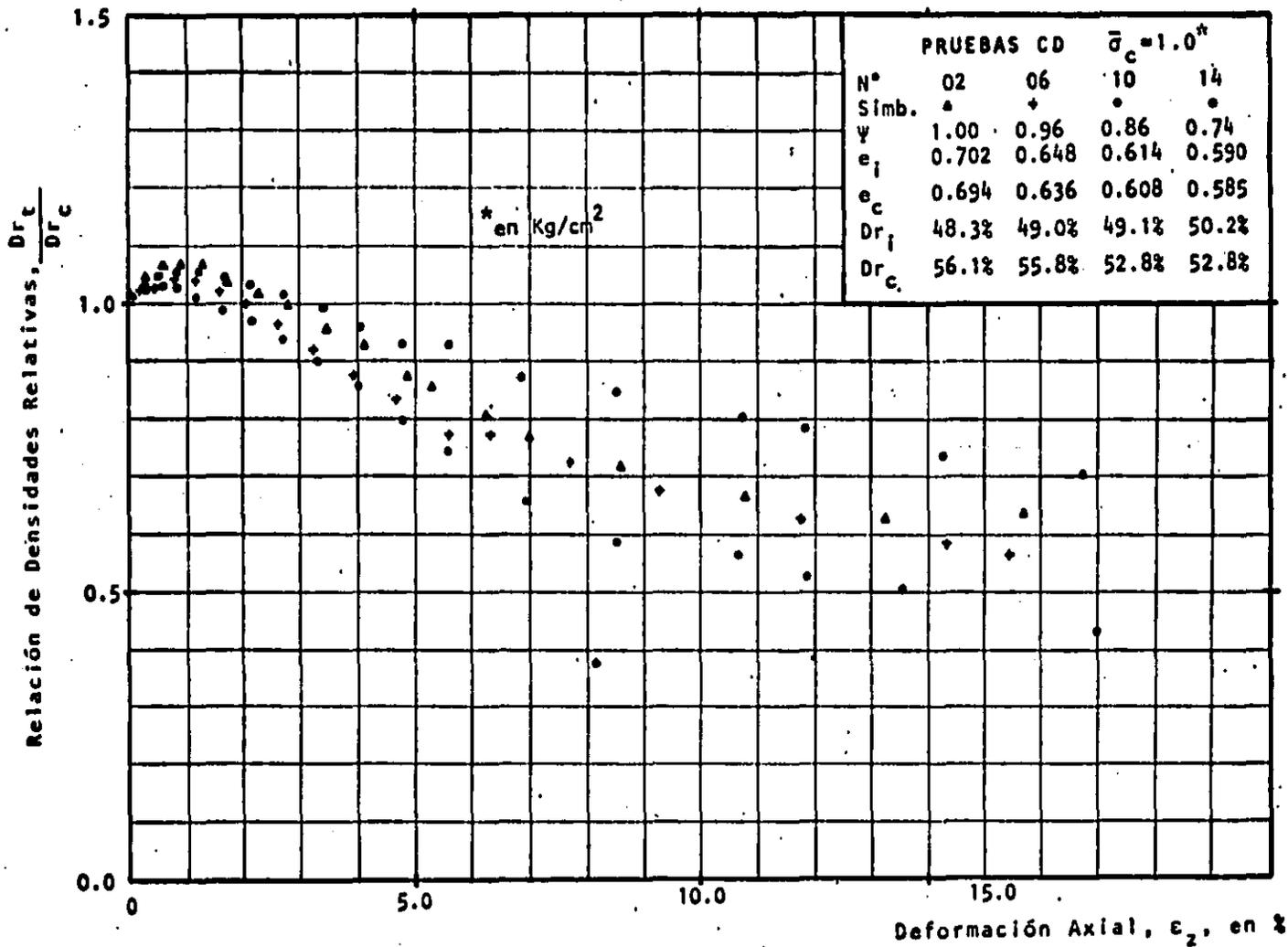


Fig. 8.4. Relación de Densidades Relativas vs Deformación Axial. (PRUEBAS CD; $\bar{\sigma}_c = 1.0 \text{ Kg/cm}^2$)

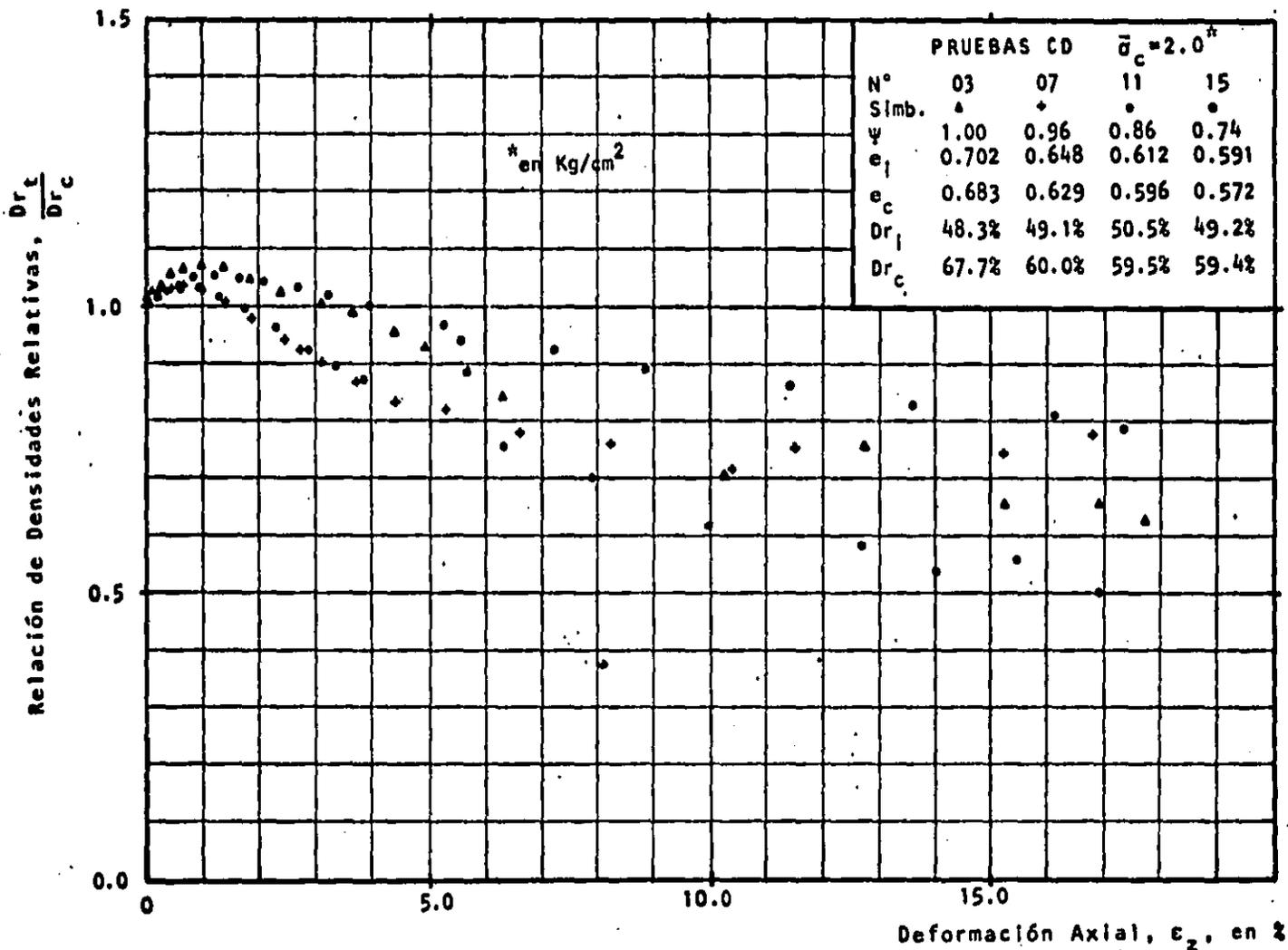


Fig. 8.5. Relación de Densidades Relativas vs Deformación Axial. (PRUEBAS CD; $\bar{\sigma}_c = 2.0 \text{ Kg/cm}^2$)

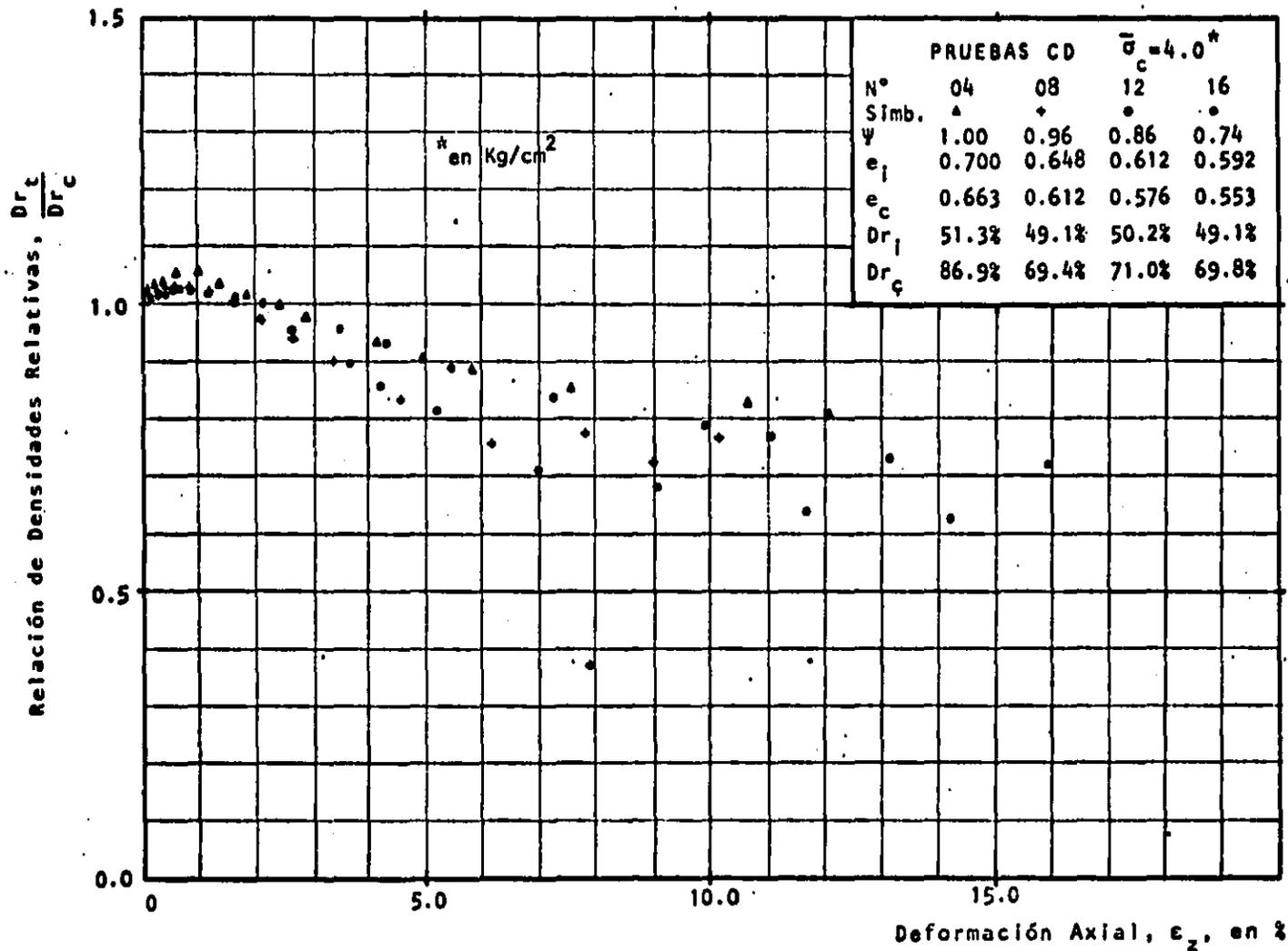


Fig. 8.6. Relación de Densidades Relativas vs Deformación Axial. (PRUEBAS CD; $\bar{\sigma}_c = 4.0 \text{ Kg/cm}^2$)

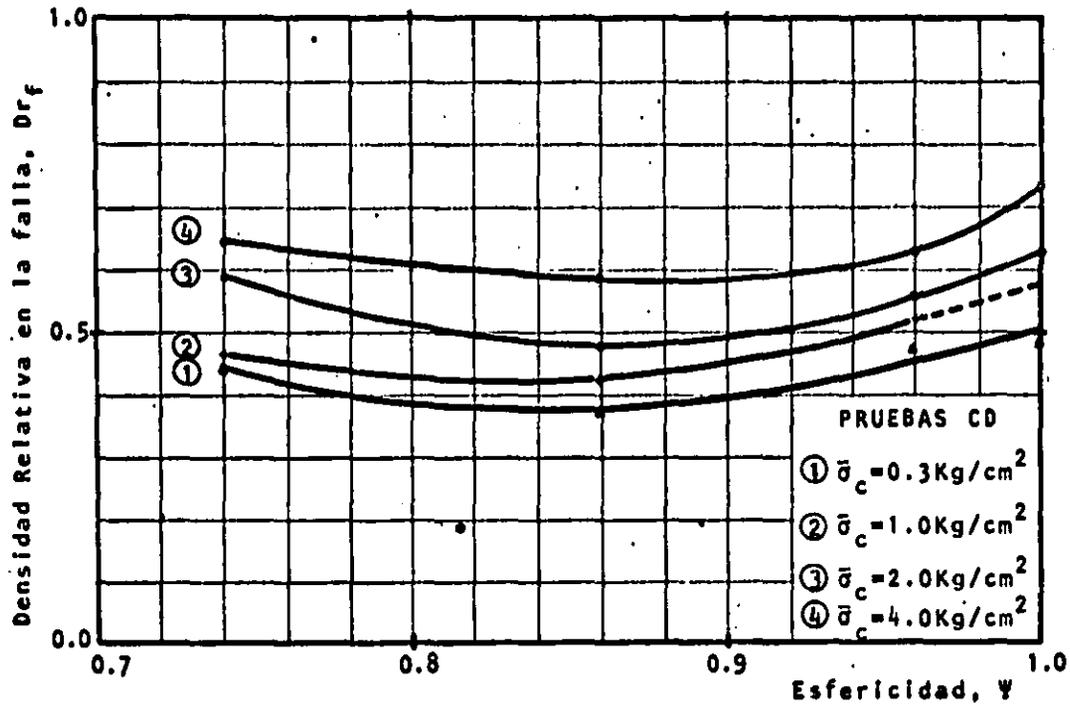


Fig. 8.7. Densidad Relativa en la Falla vs Esfericidad. (PRUEBAS CD)

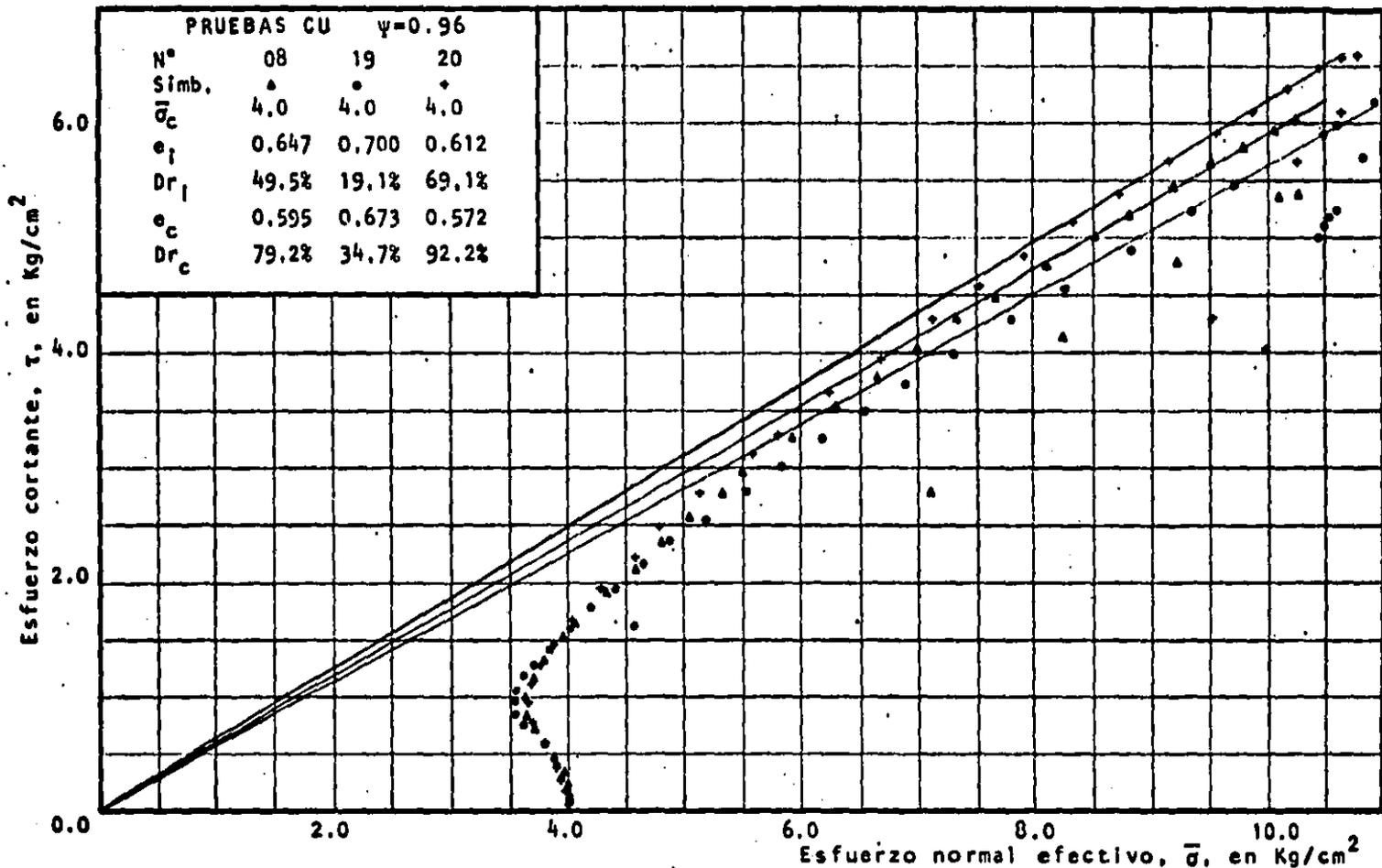


Fig. 8.8. Envolventes de Resistencia. (PRUEBAS CU 08, 19, 20; $\Psi=0.96$)

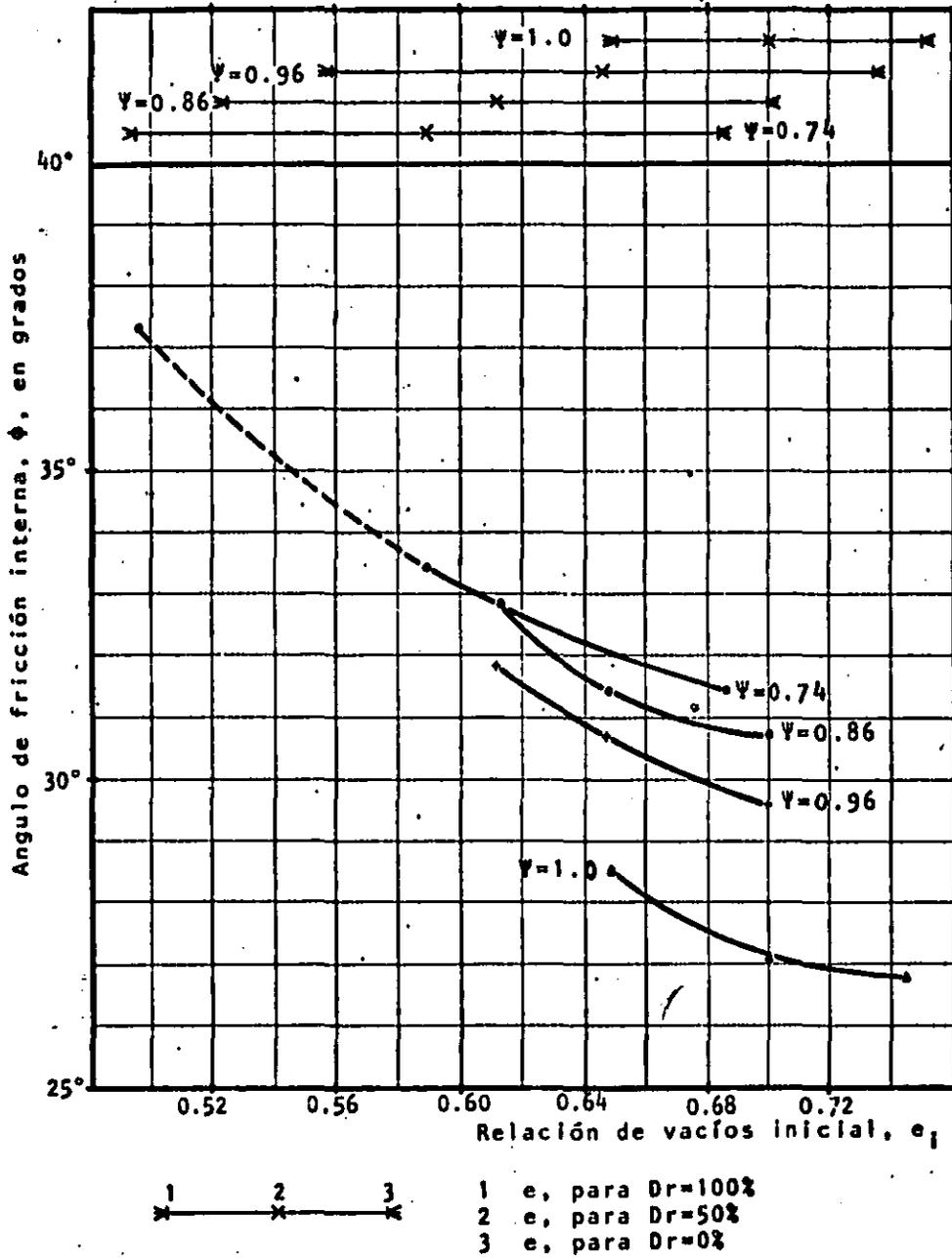


Fig. 8.9. Angulo de Fricción Interna vs Relación de Vacíos.
(PUEBAS CU; $\psi=1.0, 0.96, 0.86, 0.74$)

Esfuerzo Desviador, σ_d , en Kg/cm^2

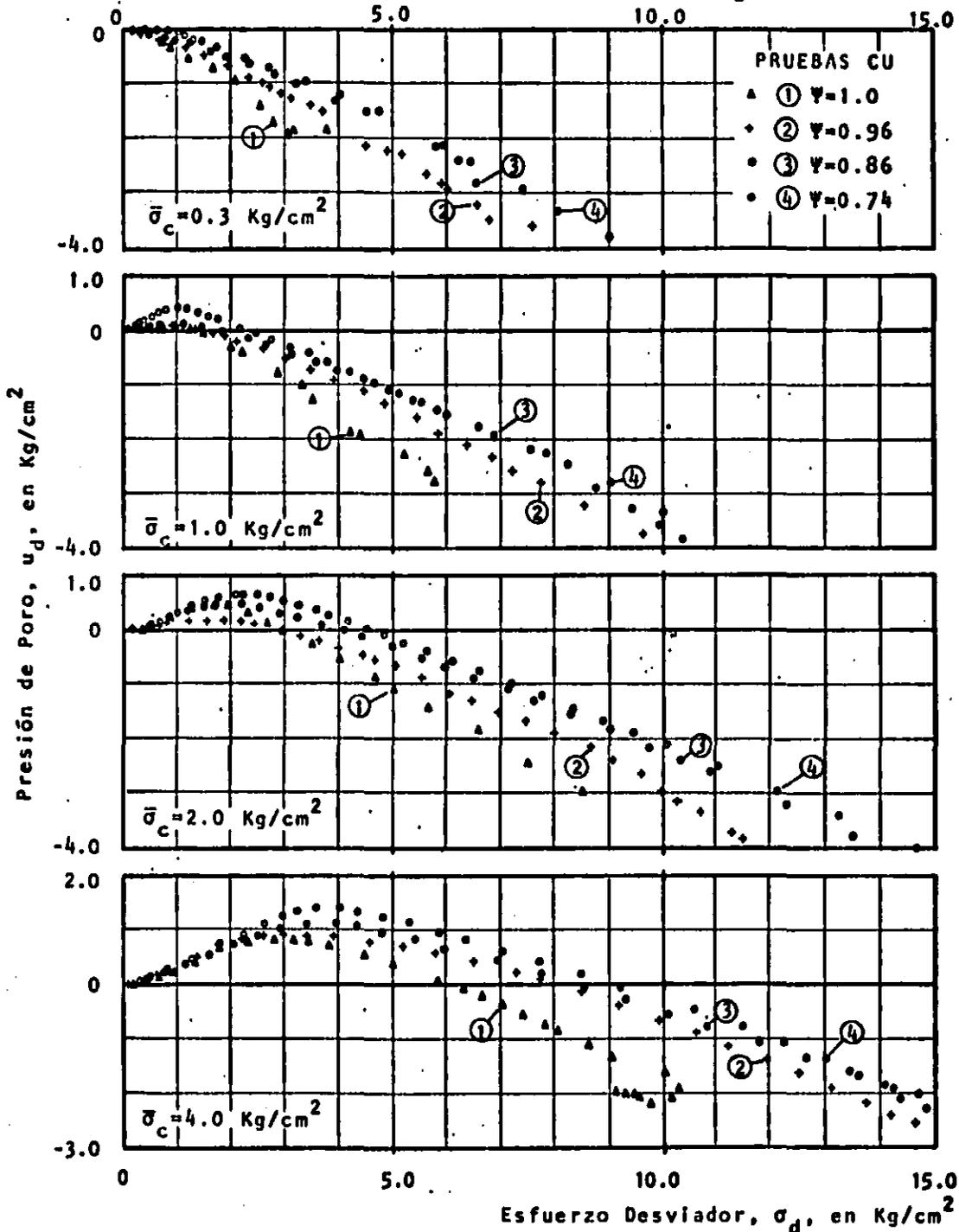


Fig. 8.10. Presión de Poro vs Esfuerzo Desviador. (PRUEBAS CU)

9. CONCLUSIONES

1) El comportamiento del material utilizado es cualitativamente igual al de las arenas, en lo que respecta a, por ejemplo:

- a) Variación del ángulo de fricción interna con la relación de vacíos.
- b) Comportamiento esfuerzo-deformación y Presión de poro deformación.
- c) Trayectoria de esfuerzo.

- d) Curvatura de las envolventes de resistencia.
- e) Variación de la presión de poro con el esfuerzo desviador.

Puede afirmarse entonces que la utilización de materiales ideales, en investigaciones que requieran aislar variables independientes, es un camino acertado.

- 2) La esfericidad de las partículas tiene un efecto más importante en la variación de la relación de vacíos mínima; el rango de variación de la relación de vacíos, para una esfericidad dada, disminuye con el incremento de esfericidad de las partículas.
- 3) Las diferencias observadas al variar la esfericidad de las partículas dentro de un rango relativamente pequeño, permite asegurar que la forma de las partículas es un parámetro tan importante, o más importante, que otros parámetros a los que se les ha prestado mayor atención.

- 4) La dilatancia de un medio granular se incrementa hasta un máximo conforme disminuye la esfericidad de las partfculas, después del cual, al disminuir la esfericidad de las partfculas, éstas se orientan y la dilatancia es menos importante.
- 5) La dilatancia hace que la resistencia sea mayor y la deformabilidad del medio menor, cuando la aplicación de la carga se efectúa en condiciones drenadas.
- 6) El ángulo de fricción interna, ϕ , para el criterio de falla $(\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_3)_{máx}$, es menor que el obtenido para el criterio $(\bar{\sigma}_1 / \bar{\sigma}_3)_{máx}$.
- 7) La curvatura de las envolventes de resistencia es más importante cuanto más achatadas son las partfculas. En investigaciones realizadas anteriormente, se le atribuye la curvatura de las envolventes a la rotura de partfculas, y a la dilatancia y Michell, en particular a la variación del ángulo de

fricción interparticular. En el material en sayado no se presentó rotura de partículas, la dilatancia se incrementa hasta un valor máximo que corresponde a partículas con esfericidad cercana a 0.86 (Figura N°8. 7.), después del cual disminuye; sin embargo, la curvatura es más importante para valores de $\Psi < 0.86$ (inciso 8.4.). Se infiere que la forma de las partículas juega un papel importante en la curvatura de las envolventes de resistencia.

- 8) Para la resistencia de un medio granular, la forma de las partículas es un factor más importante que la componente de resistencia por dilatancia, ya que la dilatancia para valores de $\Psi < 0.86$ disminuye, sin embargo, la resistencia aumenta. Se justifica el hecho si se tiene en cuenta que: a) el profesor Terzaghi encontró en su teoría de adherencia, que la fuerza tangencial que origina el desplazamiento relativo entre partículas, es proporcional al área de contacto entre éstas, y b) al disminuir la esfericidad de las partículas, el radio de curvatura amen

ta y según Hertz ⁽²⁵⁾ a mayor radio de curvatura, mayor área de contacto.

- 9) Dentro del rango de esfericidades estudiado la resistencia aumenta con la disminución de esfericidad y las deformaciones axiales y laterales alcanzan valores mínimos y máximos respectivamente, cuando la esfericidad de las partículas es aproximadamente 0.9 .

10. RECONOCIMIENTOS

Un reconocimiento especial y muy cordial de mi parte, merecen los profesores Dr. Raúl J. Marsal e Ing. Jesús Alberro, por el apoyo y la orientación que me han brindado desde mi llegada a México. Igual reconocimiento merecen el Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M. y la Compañía Ingeniería e Hidrosistemas Ltda., de Bogotá-Colombia.

Al Ing. Jesús Alberro, por tan acertada dirección, y al distinguido cuerpo de sinodales, ya

que sus críticas constructivas ayudaron a enriquecer el contenido de este trabajo.

A la señorita Ma. Leticia Rivas Guzmán y -
al Arq. Arturo Patiño Nieto, por su amable e invaluable colaboración durante la edición del manuscrito.

11.- REFERENCIAS

1. Cambou, B., "Compressibilité d'un Milieu Pulvérulent.. Influence de la Forme et de la Dimension des Particules sur les Propriétés Mécaniques d'un Milieu Pulvérulent", L'Université Scientifique et Médicale de Grenoble, Mai 1972.
2. Vesic, A., "Strength and Compressibility of Granular Materials", Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Specialty Session N° 13, Mexico, August 1969.

3. Morris, H., "Effect of Particule Shape and Texture on the Strength of Noncohesive Aggregates", ASTM, Spec. Tech., Pub. N° 254, 1959.
4. Kolbuszewski, J., "The Significance of Particle - Shape and Size on the Mechanical Behaviour of Granular Materials", European Conference on Soil Mechanics - and Foundation Engineering, Wiesbaden, Sect 4, - Paper N° 9.
5. Kózdí, A., "Manual de Mecánica de Suelos", Ediciones de la Biblioteca, Caracas, 1975.
6. Skinner, A., "A Note on the Influence of Interparticle Friction on the Shearing Strength of a Random - Assembly of Spherical Particle", Géotechnique, - Vol. XIX, 1969.
7. "Bolas, Rodillos y Cilindros, S.K.F. de México, - 1980.
8. Harr, M., "Mechanics of Particulate Media, McGraw Hill, 1977.

9. Comments by the Organizer "Specimen Size", Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico, August 1969.
10. Kolbuszewski, J., "An Experimental Study of the Maximum and Minimum Porosities of Sand", Proceedings of the Second International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rotterdam, Vol. 1, Jun. 1948.
11. Ladd, R., "Specimen Preparation and Liquefaction of Sands", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 100, N° GT10, Oct. 1974.
12. Mullis, P., Seed, C., Mitchell, J., and Arulanandau, K., "Effects of Sample Preparation on Sand Liquefaction; Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 103, N° GT2, Feb. 1977.
13. Black, K., and Lee, K., " Saturating Laboratory Samples by Back Pressure", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE Vol. 99, N° SM1, Jan. 1973.

14. Santoyo, E., y Reséndiz, D., "Una Cámara Triaxial de Precisión" Informe N° 235, Instituto de Ingeniería, U.N.A.M., México, Agosto, 1969.
15. Rowe, P., and Barden, L. "Importance of the Free Ends in Triaxial Testing", Journal of the Soil - Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 90, N° SM1, Jan. 1964.
16. Josseaumé, H., "Etude de la pression Interstitielle", Repport de Recherche N° 14, Mars. 1971.
17. Kiekbusch, H. and Schuppener, B., "Membrane - Penetration and Its Effect on Pore Pressures", - Journal of the Geotechnical Engineering Division - N° GT11, Nov. 1977.
18. Flavigny, E. and Darne, F. "Membrane Penetration and Its Effects on Pore Pressures", Journal of - the Geotechnical Engineering Division, N° GT1, Jan. 1979.

19. Lade, O. and Hernandez S. "Membrane Penetration Effects in Undrained Tests", Journal of the Geotechnical Engineering Division, N° GT2, Feb. 1977.
20. Henkel, D. and Gilbert, G., "The Effect of the Rubber Membrane on the Measured Triaxial Compression Strength of Clay Samples", Geotechnique 3, N° 1, 1952.
21. Jaeger, J. and Cook, N., "Fundamentals of Rock Mechanics", Methuen Co Ltda, 1969.
22. Mitchell, J., "Fundamentals of Soil Behavior", John Wiley and Sons, New York 1974.
23. Taylor, D., "Fundamentals of Soil Mechanics", John Wiley and Sons, New York, 1963.
24. Bishop, A., "Stress Strain Behaviour of Soils", First Impression, Printed in Great Britain by the Whiterfriars Press Ltd, London and Tonbridge, Session 1, 1972.

25. Timoschenko, S. and Goodier, J., "Theory of Elasticity", McGraw Hill Book Co., 1951.
26. Juárez Badillo, E. y Rico, A., "Mecánica de Suelos": Tomo 1, Limusa, 1980.

APENDICE A

DETERMINACION DE LA ESFERICIDAD DE ARENAS

El criterio a seguir es el propuesto por Wadell⁽⁸⁾, que define la esfericidad, Ψ , como :

$$\Psi^* = \frac{A_1}{A_2}$$

* $\Psi = \frac{A_1}{A_2}$ Donde: A_1 , es el área de la proyección de una esfera con volumen igual al de la partícula

A_2 , es el área de la proyección de la partícula.

El problema radica en la evaluación del volumen y el área proyectada de un número representativo de partículas. En este trabajo se desarrolló un método que dió buenos resultados; los pasos a seguir son:

- a) Elaborar un fotodibujo como el de la figura A.1., y evaluar el área de cada partícula, A_2 .
- b) En un tubo capilar que contenga agua, colocar una escala de tal manera que la parte inferior del menisco coincida con una lectura exacta (figura N° A.2.a.) .
- c) Verter partículas elegidas al azar , hasta que la parte inferior del menisco coincida nuevamente con una lectura exacta (Fig. N° A.2.b.) .
- d) Medir con un micrómetro la altura de cada partícula, h_p .

Con los anteriores datos y haciendo uso de la siguiente expresión :

$$Y = \frac{1.209}{A_2^{1/3}} \left[\frac{h_p V_w}{\Sigma V_{p_a}} \right]^{2/3}, \text{ se aplica el}$$

criterio de Wadell

donde : Y , es la esfericidad de cada partícula

A_2 , es el área de la proyección de cada partícula

h_p , es la altura de cada partícula

V_w , es el volumen de agua desalojada al verter las partículas en el tubo capilar

V_{p_a} , volumen aparente de cada partícula -
($V_{p_a} = h_p A_2$)

El número de partículas elegido no debe ser exagerado porque el método se tornaría inaplicable.

El promedio de los valores así calculados, representa la esfericidad media, Y , y el coeficiente

de variación C_e , indica qué tan uniformes son las partículas en lo que respecta a la forma.

Haciendo uso de cámaras de televisión y programas muy elaborados de computador, se puede calcular con mucha precisión, el área de cada partícula. Sin embargo, una recomendación práctica que da suficiente aproximación, es determinar el área de cada partícula, por peso. El procedimiento a seguir es el siguiente:

- a) Recórtese el fotodibujo de la figura - A.1., de tal manera que se defina una figura geométrica de área conocida.
- b) Pésese la figura geométrica de área conocida.
- c) Recórtense cada una de las partículas y pésense.
- d) Calcúlese en proporción al peso de la figura geométrica de área conocida, el área de cada partícula.

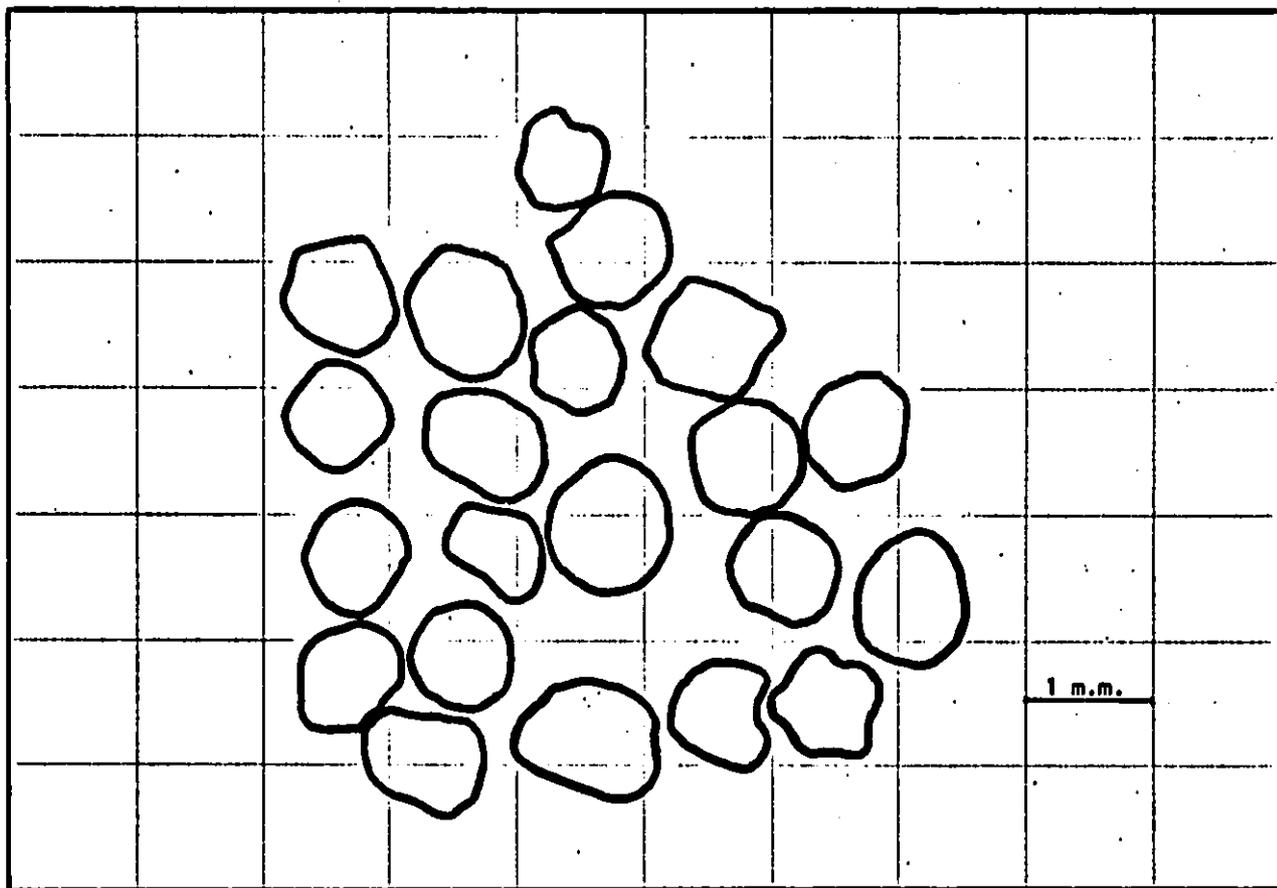


Fig. A.1. Fotodibujo de Partículas de Arena de Ottawa.

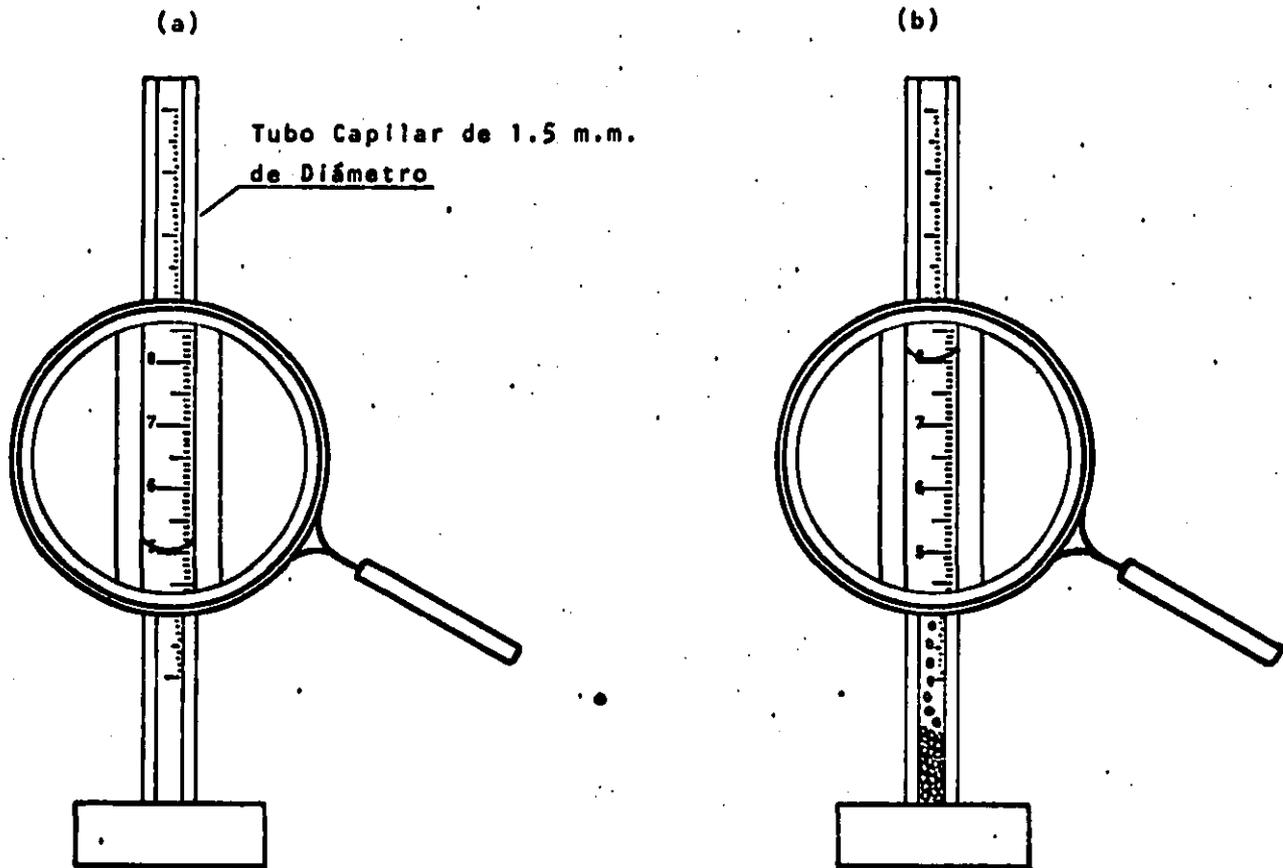


Fig. A.2. Esquema Indicativo de la Determinación del Volumen de Partículas de Arena.

APENDICE 8

DEMOSTRACION DE LA EXPRESION RECOMENDADA PARA DETERMINAR LA ESFERICIDAD DE PARTICULAS DE ARENA

Definición de Términos:

$$\Psi = \frac{A_1}{A_2}$$

Esfericidad de las partículas.

A_1

Area de la proyección de una esfera con igual volumen al de la partícula.

A_2

Area de la proyección de la partícula.

h_p

Altura de partícula.

$$(A_2 h_p)_i = V_a$$

Volumen aparente de la partícula (i).

V_w Volumen de agua desalojado al verter (n) partículas en el tubo capilar.

Como en volumen aparente de cada partícula, corresponde al volumen de un paralelepípedo de base irregular, éste debe ser corregido, para calcular el volumen real de cada partícula. La corrección es el factor definido por la relación entre el volumen total medido, y el volumen total aparente, de tal manera que, el volumen real de la partícula (i) es:

$$(A_2 h_p)_i \left[\frac{V_w}{\Sigma V_a} \right] \quad (B.1.)$$

El diámetro de la esfera con igual volumen al de la partícula (i) -- dado por la expresión (B.1.), es:

$$D_i = \left\{ \frac{6}{\pi} \left[(A_2 h_p)_i \left[\frac{V_w}{\Sigma V_a} \right] \right] \right\}^{1/3} \quad (B.2.)$$

El área de la proyección de la esfera de diámetro D_i , es:

$$A_{1_i} = \frac{\pi}{4} \left\{ \frac{6}{\pi} \left[(A_2 h_p)_i \left[\frac{V_w}{\Sigma V_a} \right] \right] \right\}^{2/3} \quad (B.3.)$$

Dividiendo la expresión (B.3.) por el área de la proyección de la partícula (i), simplificando y ordenando términos se tiene que:

$$Y_i = \frac{1.209}{A_{2_i}^{1/3}} \left[\frac{h_p V_w}{\Sigma V_a} \right]^{2/3}$$