

01163  
lej.  
1

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
FACULTAD DE INGENIERIA



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

ROTURA DE PARTICULAS EN PRUEBAS TRIAXIALES  
DE COMPRESION

T E S I S

que presenta

JAVIER BENAVENTE LEIJA

para obtener el grado de

MAESTRO EN INGENIERIA

(Mecánica de Suelos)

J U R A D O

DR. RAUL J. MARSAL CORDOBA . . .

ING. JESUS ALBERRO ARAMBURU. . .

ING. GUILLERMO SPRINGALL CARAM .

DR. LEONARDO ZEEVAERT WIECHERS .

M en I J. ABRAHAM DIAZ RODRIGUEZ

*Raul Marsal*  
*Jesus Alberro*  
*Guillermo Springall*  
*Leonardo Zeevaert*  
*Abraham Diaz Rodriguez*

01163  
1983

Cd. Universitaria, México, D.F., Abril ,1983

TESIS 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

	Pag.
Lista de Tablas	
Lista de Figuras	
Notación	
1.- INTRODUCCION	1
2.- EQUIPO DE ALTA PRESION	3
2.1 Cámara Triaxial	
2.2 Sistema de Carga	
2.3 Instrumentación	
2.4 Calibración de las celdas de medición de la presión de poro	
3.- CARACTERIZACION DE LOS MATERIALES UTILIZADOS	7
3.1 Descripción de los materiales	
3.1.1 Arena de Tarandacuao	
3.1.2 Arena de Ottawa (C-109)	
3.1.3 Microesferas de vidrio (Ballotini)	
3.1.4 Arena de Ottawa	
3.2 Formación de los especímenes	
3.3 Relaciones de vacíos iniciales	
3.4 Montaje, saturación y consolidación de los especímenes	
4.- PRUEBAS TRIAXIALES DE COMPRESION	13
4.1 Compresión isotrópica	
4.1.1 Presiones de cámara ( $\bar{\sigma}_3$ )	
4.1.2 Comportamiento relación de vacíos (e) vs tiempo (t)	

- 4.1.3 Comportamiento relación de vacíos (e) vs  $\log \bar{\sigma}_3$
- 4.1.4 Comportamiento relación de vacíos (e) vs presión de cámara ( $\bar{\sigma}_3$ )
- 4.1.5 Rotura de partículas
- 4.2 Pruebas triaxiales consolidadas drenadas (CD)
  - 4.2.1 Presiones de consolidación ( $\bar{\sigma}_c$ )
  - 4.2.2 Comportamiento relación de vacíos (e) vs  $\log \bar{\sigma}_3$  (Etapa de consolidación)
  - 4.2.3 Comportamiento Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial y Deformación Volumétrica vs Deformación Axial
  - 4.2.4 Rotura de partículas
  - 4.2.5 Envolvente de falla
- 4.3 Pruebas Triaxiales consolidadas no drenadas con medición de presión de poro (CU)
  - 4.3.1 Relaciones de vacíos (e)
  - 4.3.2 Presiones de consolidación ( $\bar{\sigma}_c$ )
  - 4.3.3 Comportamiento Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial y Presión de Poro vs Deformación Axial

## 5.- ANALISIS DE LOS RESULTADOS

24

- 5.1 Pruebas de Compresión Isotrópica
- 5.2 Pruebas Triaxiales Consolidadas Drenadas (CD)
- 5.3 Pruebas Triaxiales Consolidadas no Drenadas con medición de presión de poro (CU)

## 6.- CONCLUSIONES

30

7.- RECONOCIMIENTO 33

8.- REFERENCIAS 34

ANEXO A FIGURAS

APENDICE A OBTENCION DE LA RELACION DE VACIOS  
MAXIMA Y MINIMA

APENDICE B ROTURA INDIVIDUAL DE PARTICULAS

## Lista de Tablas

### tabla No

- 1 Relaciones de vacíos iniciales
- 2 Presiones de cámara
- 3 Valores de la presión de cámara ( $\bar{\sigma}_3$ ) en los cuales cambia notablemente la ley de las curvas de compresibilidad
- 4 Magnitudes de rotura de las partículas en pruebas de compresión isotrópica
- 5 Resumen Pruebas Triaxiales consolidadas drenadas (CD)
- 6 Presiones de consolidación de las pruebas consolidadas drenadas (CD)
- 7 Valores del Angulo de fricción interna ( $\phi$ ) siguiendo el criterio de  $\left(\frac{\bar{\sigma}_1}{\bar{\sigma}_3}\right)_f$

## Lista de Figuras

### figura No

- 1 Sección Transversal de la Cámara Triaxial de Alta Presión (T-3.6-2000)
- 2 Diagrama General del Equipo de Alta Presión
- 3 Curva de Calibración Celda (0 a 90 kg/cm<sup>2</sup>)
- 4 Curva de Calibración Celda (0 a 400 kg/cm<sup>2</sup>)
- 5 Granulometría inicial de los materiales utilizados
- 6 Granulometría de la arena utilizada por Argüello
- 7 Molde utilizado en la fabricación de los especímenes
- 8 a 10 Curvas Relación de Vacíos vs tiempo (Prueba isotrópica 1.a, 1.b, 1.c) arena de Tarandacuao

- 11 a 13 Curvas Relación de Vacíos vs tiempo ( Prueba isotrópica 2.a,2.b,2.c ) Arena de Ottawa (C-109)
- 14 a 16 Curvas Relación de Vacíos vs tiempo (Prueba isotrópica 3.a,3.b,3.c ) Esferas de vidrio
- 17 Curvas de Compresibilidad (e vs  $\log \bar{\sigma}_3$ ) prueba 1.a, 1.b y 1.c Arena de Tarandacuao
- 18 Curvas de Compresibilidad (e vs  $\log \bar{\sigma}_3$ ) prueba 2.a, 2.b y 2.c Arena de Ottawa (C-109)
- 19 Curvas de Compresibilidad (e vs  $\log \bar{\sigma}_3$ ) prueba 3.a, 3.b y 3.c Esferas de vidrio
- 20 Coeficiente de Compresibilidad vs  $\log \bar{\sigma}_3$  prueba 1.a, 1.b y 1.c Arena de Tarandacuao
- 21 Coeficiente de Compresibilidad vs  $\log \bar{\sigma}_3$  prueba 2.a, 2.b y 2.c Arena de Ottawa (C-109)
- 22 Coeficiente de Compresibilidad vs  $\log \bar{\sigma}_3$  prueba 3.a, 3.b y 3.c Esferas de vidrio
- 23 a 25 Curvas Relación de Vacíos vs  $\bar{\sigma}_3$  prueba 1.a, 1.b y 1.c Arena de Tarandacuao
- 26 a 28 Curvas Relación de Vacíos vs  $\bar{\sigma}_3$  prueba 2.a, 2.b y 2.c Arena de Ottawa (C-109)
- 29 a 31 Curvas Relación de Vacíos vs  $\bar{\sigma}_3$  prueba 3.a, 3.b y 3.c Esferas de vidrio
- 32 Curvas de Compresibilidad (e vs  $\log \bar{\sigma}_3$ ) prueba 1.d, 1.e y 1.f Arena de Tarandacuao
- 33 Curvas de Compresibilidad (e vs  $\log \bar{\sigma}_3$ ) prueba 2.d, 2.e y 2.f Arena de Ottawa (C-109)
- 34 Granulometría inicial y final prueba 1.d, 1.e y 1.f Arena de Tarandacuao
- 35 Granulometría inicial y final prueba 2.d, 2.e y 2.f Arena de Ottawa (C-109)

- 36 Diagramas  $\Delta W_k$   
prueba 1.d, 1.e y 1.f Arena de Tarandacuao
- 37 Diagramas  $\Delta W_k$   
prueba 2.d, 2.e y 2.f Arena de Ottawa (C-109)
- 38a y 38b Curvas  $D_{10i}/D_{10f}$ ,  $(B_g)q$  vs  $\bar{\sigma}_3$  y  $(B_g)q$  vs  $D_{10i}/D_{10f}$   
Arena de Tarandacuao
- 39a y 39b Curvas  $D_{10i}/D_{10f}$ ,  $(B_g)q$  vs  $\bar{\sigma}_3$  y  $(B_g)q$  vs  $D_{10i}/D_{10f}$   
Arena de Ottawa (C-109)
- 40 Curvas de Compresibilidad (etapa de consolidación)  
pruebas CD 1.a.1 a 1.a.6 Arena de Tarandacuao
- 41 Curvas de Compresibilidad (etapa de consolidación)  
pruebas CD 1.b.1 a 1.b.6 Arena de Tarandacuao
- 42 Curvas de Compresibilidad (etapa de consolidación)  
pruebas CD 1.c.1 a 1.c.6 Arena de Tarandacuao
- 43 Curvas de Compresibilidad (etapa de consolidación)  
pruebas CD 2.a.1 a 2.a.6 Arena de Ottawa (C-109)
- 44 Curvas de Compresibilidad (etapa de consolidación)  
pruebas CD 2.b.1 a 2.b.6 Arena de Ottawa (C-109)
- 45 Curvas de Compresibilidad (etapa de consolidación)  
pruebas CD 2.c.1 a 2.c.5 Arena de Ottawa (C-109)
- 46 y 47 Curvas Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial y Deformación Volumétrica  
pruebas CD 1.a.1 a 1.a.6 Arena de Tarandacuao
- 48 y 49 Curvas Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial y Deformación Volumétrica  
pruebas CD 1.b.1 a 1.b.6 Arena de Tarandacuao
- 50 y 51 Curvas Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial y Deformación Volumétrica  
pruebas CD 1.c.1 a 1.c.6 Arena de Tarandacuao

- 52 y 53 Curvas Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial y Deformación Volumétrica  
pruebas CD 2.a.1 a 2.a.6 Arena de Ottawa (C-109)
- 54 y 55 Curvas Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial y Deformación Volumétrica  
pruebas CD 2.b.1 a 2.b.6 Arena de Ottawa (C-109)
- 56 y 57 Curvas Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial y Deformación Volumétrica  
pruebas CD 2.c.1 a 2.c.5 Arena de Ottawa (C-109)
- 58 Curvas  $\bar{\sigma}_1 / \bar{\sigma}_3$  vs Deformación Axial  
pruebas CD 1.a.1 a 1.a.6 Arena de Tarandacuao
- 59 Curvas  $\bar{\sigma}_1 / \bar{\sigma}_3$  vs Deformación Axial  
pruebas CD 1.b.1 a 1.b.6 Arena de Tarandacuao
- 60 Curvas  $\bar{\sigma}_1 / \bar{\sigma}_3$  vs Deformación Axial  
pruebas CD 1.c.1 a 1.c.6 Arena de Tarandacuao
- 61 Curvas  $\bar{\sigma}_1 / \bar{\sigma}_3$  vs Deformación Axial  
pruebas CD 2.a.1 a 2.a.6 Arena de Ottawa (C-109)
- 62 Curvas  $\bar{\sigma}_1 / \bar{\sigma}_3$  vs Deformación Axial  
pruebas CD 2.b.1 a 2.b.6 Arena de Ottawa (C-109)
- 63 Curvas  $\bar{\sigma}_1 / \bar{\sigma}_3$  vs Deformación Axial  
pruebas CD 2.c.1 a 2.c.5 Arena de Ottawa (C-109)
- 64 Granulometría inicial y final  
pruebas CD 1.a.1 a 1.a.6 Arena de Tarandacuao
- 65 Granulometría inicial y final  
pruebas CD 1.b.1 a 1.b.6 Arena de Tarandacuao
- 66 Granulometría inicial y final  
pruebas CD 1.c.1 a 1.c.6 Arena de Tarandacuao
- 67 Granulometría inicial y final  
pruebas CD 2.a.1 a 2.a.6 Arena de Ottawa (C-109)
- 68 Granulometría inicial y final  
pruebas CD 2.b.1 a 2.b.6 Arena de Ottawa (C-109)

- 69 Granulometría inicial y final  
pruebas CD 2.c.1 a 2.c.5 Arena de Ottawa (C-109)
- 70 Diagramas  $\Delta W_k$   
pruebas CD 1.a.1 a 1.a.6 Arena de Tarandacuao
- 71 Diagramas  $\Delta W_k$   
pruebas CD 1.b.1 a 1.b.6 Arena de Tarandacuao
- 72 Diagramas  $\Delta W_k$   
pruebas CD 1.c.1 a 1.c.6 Arena de Tarandacuao
- 73 Diagramas  $\Delta W_k$   
pruebas CD 2.a.1 a 2.a.6 Arena de Ottawa (C-109)
- 74 Diagramas  $\Delta W_k$   
pruebas CD 2.b.1 a 2.b.6 Arena de Ottawa (C-109)
- 75 Diagramas  $\Delta W_k$   
pruebas CD 2.c.1 a 2.c.5 Arena de Ottawa (C-109)
- 76 Curvas (Bg)q vs Esfuerzo Octaédrico ( $\sigma_{oc}$ )  
Arena de Tarandacuao
- 77 Curvas (Bg)q vs Esfuerzo Octaédrico ( $\sigma_{oc}$ )  
Arena de Ottawa (C-109)
- 78 a 80 Envolvente de Falla, Arena de Tarandacuao  
edo. suelto, med.suelto y compacto
- 81 a 83 Envolvente de Falla, Arena de Ottawa (C-109)  
edo. suelto, med:suelto y compacto
- 84 Gráfica Angulo  $\phi$  vs Presión de Consolidación  
Arena de Tarandacuao
- 85 Gráfica Angulo  $\phi$  vs Presión de Consolidación  
Arena de Ottawa (C-109)
- 86 a 91 Curvas Esfuerzo Desviador vs Deformación Axial y Presión de Poro vs Deformación Axial  
pruebas CU No 1 a 6
- 92 Ubicación de las pruebas CU, respecto a la línea  $e_f$  obtenida por Argüello  
DC

**A1**      **Dispositivo Experimental para obtener la Relación  
de Vacíos máxima (1) y mínima (2)**

**B1**      **Carga de rotura de las partículas vs Diámetro medio  
de la partícula (Arena de Tarandacuao y Arena de  
Ottawa (C-109) )**

## NOTACION

$A_i$	Area de la sección recta de la muestra en cualquier instante de la prueba
$A_c$	Area de la sección recta de la muestra <u>consolidada</u>
$a_v$	Coefficiente de Compresibilidad = $\frac{\Delta e}{\Delta P}$ , $\text{cm}^2/\text{kg}$
$B$	Coefficiente de presión de poro de Skempton definido como el cociente de presión de poro generada por un incremento de la presión de cámara entre la presión de cámara
$B_g$	Parámetro que mide el porcentaje de rotura de granos (Peso de las partículas, en %, que ha <u>sufrido</u> rotura)
$(B_g)_q$	Parámetro que mide el porcentaje de rotura de partículas por unidad de volumen total = $\frac{B_g}{1+e_i}$
CU	Prueba triaxial consolidada no drenada
CD	Prueba triaxial consolidada drenada
$C_u$	Coefficiente de uniformidad = $D_{10}/D_{60}$
$D_{10}$	Tamaño efectivo igual al tamaño del grano, tal que el 10% en peso sea igual o menor, mm
$D_{60}$	Tamaño del grano, tal que el 60% en peso sea igual o menor, mm
$D_{10i}$	Tamaño efectivo igual al tamaño del grano, tal que el 10% en peso sea igual o menor, obtenido de la curva granulométrica antes de que se presente el fenómeno de rotura en los granos, mm

$D_{10f}$	Tamaño efectivo igual al tamaño del grano, tal que el 10% en peso sea igual o menor, obtenido de la curva granulométrica después de efectuada la prueba, mm
$d$	Diámetro medio de la sección menor de las partículas
$e$	Relación de vacíos
$e_i$	Relación de vacíos al formar el espécimen de prueba
$e_c$	Relación de vacíos del espécimen después de ser consolidado
$e_f$	Relación de vacíos en la falla, cuando la deformación axial sea igual al 30%
$e_{m\acute{a}x}$	Relación de vacíos máxima
$e_{m\acute{i}n}$	Relación de vacíos mínima
$S_s$	Gravedad específica de los granos
$t$	Tiempo, minutos
$u_d$	Presión de poro generada durante la etapa de falla, $kg/cm^2$
$u_d\ m\acute{a}x$	Presión de poro máxima generada durante la etapa de falla, $kg/cm^2$
$V_m$	Volumen del molde, $cm^3$
$W_{k_i}$	Peso (en %) retenido en la malla $k$ antes de la rotura de granos
$W_{k_f}$	Peso (en %) retenido en la malla $k$ después de la rotura de granos
$W_s$	Peso del suelo contenido en el molde, gr
$\epsilon_v$	Deformación volumétrica, en %
$\epsilon_a$	Deformación axial, en %
$\epsilon_l$	Deformación lateral, en %

$\phi$	Angulo de fricción interna, grados
$\nu$	Relación de Poisson
$\eta, \lambda$	Parámetros característicos de los materiales, utilizados en la fórmula que define la carga de rotura de los granos ( $P = \eta d^\lambda$ )
$\bar{\sigma}$	Esfuerzo normal efectivo, $\text{kg/cm}^2$
$\bar{\sigma}_1$	Esfuerzo principal mayor efectivo, $\text{kg/cm}^2$
$\bar{\sigma}_3$	Esfuerzo principal menor efectivo, $\text{kg/cm}^2$
$\bar{\sigma}_3 \text{ mín}$	Esfuerzo principal menor efectivo mínimo durante una prueba ( $\bar{\sigma}_c - u_d \text{ máx}$ ), $\text{kg/cm}^2$
$\bar{\sigma}_c$	Presión confinante efectiva de consolidación aplicada en la cámara durante la etapa de consolidación, $\text{kg/cm}^2$
$\sigma_d$	Esfuerzo desviador, $\text{kg/cm}^2$
$(\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_3)$	Esfuerzo desviador efectivo, $\text{kg/cm}^2$
$(\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_3)_f$	Esfuerzo desviador efectivo cuando $\epsilon_d = 30\%$ , $\text{kg/cm}^2$
$(\bar{\sigma}_1 / \bar{\sigma}_3)$	Relación de esfuerzos principales efectivos
$(\bar{\sigma}_1 / \bar{\sigma}_3)_f$	Relación de esfuerzos principales efectivos en la falla
$\sigma_{oc}$	Esfuerzo octaédrico = $\frac{2\bar{\sigma}_3 + \bar{\sigma}_1}{3}$ , $\text{kg/cm}^2$
$\tau$	Esfuerzo cortante, $\text{kg/cm}^2$

## 1. INTRODUCCION

Esta investigación se debió al gran interés que existe por conocer el comportamiento mecánico de los materiales granulares sometidos a altas presiones y en particular, el fenómeno de rotura de sus partículas. En la práctica, este proceso de rotura es importante, para ponderar la evolución y magnitud de las deformaciones que se presentan en los enrocamientos, así como el cambio de granulometría y por lo tanto de permeabilidad de los materiales usados en los filtros y drenes, sometidos en presas de tierra a presiones altas.

Los aspectos fundamentales del comportamiento de los materiales granulares son:

### a) Compresibilidad

- Definir la deformabilidad volumétrica de los materiales al incrementar la presión hidrostática
- Determinar la influencia del fenómeno de rotura de los granos en el cambio de compresibilidad y de permeabilidad del material.

- Cuantificar la rotura de las partículas al finalizar la prueba

b) Resistencia.- Estudiar las propiedades de resistencia al esfuerzo cortante de dos arenas, sometidas a diferentes presiones de confinamiento y con diferentes compacidades iniciales, en relación con el fenómeno de rotura de las partículas

- Examinar el comportamiento de las arenas en condiciones no drenadas bajo compresión triaxial, ampliando el intervalo de presiones de consolidación utilizado en la referencia (9)

La cuantificación de la rotura de granos se efectuó utilizando el parámetro " $B_g$ " propuesto por Marsal (1). Para su determinación se compara la granulometría del material resultante, una vez finalizada la prueba, con la granulometría inicial. Se miden las diferencias " $\Delta W_k$ " entre los pesos (en por ciento) inicial " $W_{ki}$ " y final " $W_{kf}$ " retenidos en cada una de las mallas usadas. Siendo la " $\Sigma \Delta W_k$ " igual a cero.

El parámetro " $B_g$ " es la suma de todos los valores positivos de " $\Delta W_k$ ", expresados en por ciento. Este parámetro representa el peso de las partículas, en porcentaje, que han sufrido rotura.

## 2. EQUIPO DE ALTA PRESION

### 2.1. Cámara Triaxial

El equipo se encuentra instalado en el laboratorio de enrocamientos "Nabor Carrillo" del Instituto de Ingeniería, de la UNAM, fué diseñado para efectuar pruebas en suelos granulares y especímenes cilíndricos de roca, aplicando altas presiones de confinamiento. Está constituido por la cámara triaxial y el sistema de carga; este último se detallará en el siguiente inciso.

La cámara triaxial de la cual se presenta una sección transversal en la fig 1 , se ha designado con las siglas T-3.6-2000 indicando estas el tipo de prueba, el diámetro del espécimen ensayado y la presión máxima que se puede aplicar en  $\text{Kg/cm}^2$ . Las dimensiones de los especímenes de prueba son 3.6 cm. de diámetro y 9.3 cm. de altura.

El pistón además de transmitir la carga axial al espécimen, se utiliza para generar presión confinante en el interior de la cámara. La forma adoptada para construir el pistón fué para evitar que al hacer contacto con el cabezal, colocado inicial-

mente sobre el espécimen, se generaran fuerzas de fricción significativas entre la pared interior de la camisa confinante y el pistón, permitiendo de este modo girar ligeramente el cabezal, para quedar el pistón esférico en condiciones de desplazarse verticalmente sin llegar a encajarse en la pared de la camisa (5). El cabezal tiene en la parte superior el mismo radio de curvatura que presenta el pistón esférico.

Para sellar perfectamente la camisa y evitar la fuga del líquido confinante, que en este caso es aceite, el pistón esférico cuenta con un empaque O-ring colocado alrededor de él (fig 1).

El contacto entre el pistón esférico y el cabezal, que se realiza al inicio y al final de la etapa de consolidación del espécimen, se comprueba mediante un circuito de baterías y foco. Las terminales de este circuito se localizan en el centro de la base del pistón y en la base de apoyo del espécimen, encendiéndose el foco al ponerse en contacto.

El drenaje del espécimen durante la prueba se efectúa por las bases superior e inferior, a través de las piedras porosas localizadas tanto en el cabezal como en la base (fig 1). El cabezal se comunica por medio de una cánula de acero inoxidable a la base, para de ahí hacer la conexión final a una bureta de vidrio en donde se miden los cambios volumétricos. La precisión de la bureta es de  $0.05 \text{ cm}^3$  y  $0.485 \text{ cm}^2$  el área de su sección transversal.

La base del aparato cuenta también con un conducto para llenar la cámara con el líquido confinante.

Las membranas utilizadas son de hule de 0.9 mm de espesor. La camisa confinante se fabricó de una sola pieza, lo que aunado a las características de resistencia del acero utilizado y al espesor de la pared, permiten la operación con presiones confinantes hasta de  $2000 \text{ kg/cm}^2$ .

## 2.2. Sistema de carga

Este sistema está constituido básicamente por un marco de carga y un gato hidráulico de doble acción.

El pistón de carga del gato permite aplicar esfuerzos axiales al espécimen a través del pistón esférico, mientras que un pistón auxiliar se utiliza para levantar el pistón de carga. En ambos casos la recámara del gato es alimentada de aceite por las bombas del equipo de carga. Este equipo forma parte integral del sistema de carga y está constituido por dos bombas neumáticas (aire-aceite) de alta ( $B_a$ ) y baja presión ( $B_b$ ) con capacidades de  $408 \text{ kg/cm}^2$  y  $70 \text{ kg/cm}^2$ , respectivamente. Mediante el uso de un regulador de presión con manómetro de carátula y capacidad de 0 a  $11 \text{ kg/cm}^2$  se controla la presión del aceite tanto en la cámara triaxial como en el gato hidráulico.

En la fig 2 se presenta un diagrama general del equipo de alta presión.

## 2.3. Instrumentación

Se instalaron dos celdas de mínimo desplazamiento volumétrico para medir la presión de poro, estas celdas se fabricaron en el Instituto de Ingeniería y trabajan en los intervalos de 0 a  $90 \text{ kg/cm}^2$  y de 0 a  $400 \text{ kg/cm}^2$ .

Para registrar la presión de poro se utilizó un puente fabricado por la Vishay Instruments, Inc., al cual se conecta la celda de presión antes de iniciar la prueba.

Las deformaciones axiales experimentadas por el espécimen en el transcurso de la prueba, se evaluaron mediante un micrómetro fabricado por la compañía Mitutoyo, con una precisión de 0.01 mm en la lectura.

También se cuenta con seis manómetros de carátula calibrados; tres se utilizan para medir la presión confinante actuante en la cámara de 0 a  $7 \text{ kg/cm}^2$ , de 0 a  $60 \text{ kg/cm}^2$  y de 0 a  $700 \text{ kg/cm}^2$ .

Los restantes registran la presión aplicada en la recámara del pistón de carga del gato hidráulico; sus intervalos de trabajo son de 0 a 60 kg/cm<sup>2</sup>, 0 a 210 kg/cm<sup>2</sup> y de 0 a 700 kg/cm<sup>2</sup>.

#### 2.4. Calibración de las celdas de medición de la presión de poro

La calibración de las celdas para medir la presión de poro se realizó con un calibrador de presiones tipo MP-25 fabricado por Amsler, instalado también en el laboratorio de enrocamientos mencionado. Esta calibración se llevó a cabo instalando una por una las celdas en el aparato y comparando las lecturas dadas por la celda en el puente con las presiones aplicadas con el calibrador. En las figs 3 y 4 se presentan las curvas obtenidas.

### 3. CARACTERIZACION DE LOS MATERIALES UTILIZADOS

#### 3.1. Descripción de los materiales

Los materiales utilizados para la fabricación de los especímenes de prueba son: Arena de Tarandacuao, arena silicea conocida con el nombre comercial de "Ottawa Sand C-109" y microesferas de vidrio (ballotini).

##### 3.1.1. Arena de Tarandacuao

La arena de Tarandacuao obtenida en el poblado del mismo nombre, Edo. de Guanajuato, es una arena de cuarzo, uniforme y de granos angulosos. Previamente a la selección, el material se lavó con detergente para eliminar todos los finos que contenía.

Una vez seco el material se cribó por mallas utilizando el material retenido en la malla No. 40 (0.42 mm).

La gravedad específica de los granos en este material es de 2.61. Su relación de vacíos máxima\* es de 0.82 ( $e_{m\acute{a}x}$ ) y su m\acute{i}

\* Las relaciones de vacíos máxima y mínima se obtienen con el material en estado seco.

nima de 0.66 ( $e_{mfn}$ ). La descripción detallada del procedimiento utilizado para determinar las relaciones de vacíos máxima y mínima, tanto en este material como en los que a continuación se describen, se presenta en el apéndice A.

La granulometría seleccionada de esta arena se muestra en la fig 5.

### 3.1.2 Arena de Ottawa (C-109)

La Ottawa Sand C-109 es vendida por la Ottawa Silica Co., Ottawa Illinois y manufacturada por la St. Peter Sandstone por cribado y lavado. Es una arena de cuarzo, uniforme y limpia, con granos subredondeados a subangulosos.

En este caso no se efectuó ninguna selección adicional del material, pues se trabajó con la granulometría original de fábrica. Esta arena pasa por la malla No 16 (1.19 mm) y se retiene en la malla No 200 (0.074 mm), la fig 5 presenta su curva granulométrica.

La gravedad específica de los granos es de 2.66. Se determinó una relación de vacíos máxima de 0.69 ( $e_{m\acute{a}x}$ ) y una mínima de 0.51 ( $e_{mfn}$ ).

### 3.1.3 Microesferas de vidrio

Las microesferas de vidrio (ballotini) clasificadas como A-35, se consiguieron en esta ciudad en Ballotini Panamericana, S.A. El material se cribó a través de un juego de mallas, utilizando la fracción que pasa la malla No 16 (1.19 mm) y es retenida en la malla No 30 (0.59 mm).

La gravedad específica de las esferas de vidrio es de 2.49. Para este material se obtuvo una relación de vacíos máxima de 0.69 ( $e_{m\acute{a}x}$ ) y una mínima de 0.56 ( $e_{mfn}$ ).

La granulometría elegida de este material se presenta en la fig 5.

### 3.1.4 Arena de Ottawa

Por último se trabajará con la granulometría obtenida por cribado selectivo de la Ottawa Sand C-109, material que fué utilizado por J. Martín Argüello (9). Este material presenta las mismas características ya mencionadas anteriormente, variando la gravedad específica de los granos a 2.67 y la relación de vacíos máxima ( $e_{m\acute{a}x}$ ) y mínima ( $e_{m\acute{i}n}$ ) a 0.75 y 0.61 respectivamente. La granulometría elegida del material pasa por la malla No 40 (0.42 mm) y se retiene en la No 200 (0.074 mm), en la fig 6 se presenta la curva granulométrica de esta arena.

### 3.2 Formación de los especímenes

Ya que se necesitaba obtener especímenes con diferentes grados de compacidad, fué necesario seguir dos procedimientos para la formación de los especímenes: en estado húmedo y en estado seco.

La formación de especímenes en estado húmedo, se efectuó agregando el 4% en peso de agua destilada al material previamente secado al horno, y compactándolo dentro de una membrana de hule soportada por un molde partido de 3.82 cm de diámetro interior y 10.5 cm de altura (fig 7). La compactación se efectuó mediante 10 pisonadas sobre cada una de las 10 capas que forman el espécimen, por medio de un pisón de 1.5 cm de diámetro sobre el cual se aplica una carga estática.

La altura del espécimen se determina mediante la diferencia entre las mediciones efectuadas interiormente a partir del borde superior del molde (ya con la membrana) a la base y la realizada a partir del mismo borde a la superficie de la última capa compactada; estas medidas se tomaron en dos pares de puntos diametralmente opuestos.

Ya formado el espécimen se coloca el cabezal y se desdobra la membrana alrededor de este, para sellar finalmente mediante dos O-ring. En la base se utilizó el mismo procedimiento. Se co-

necta la canula de acero inoxidable del cabezal a la base.

Hecho esto, se coloca en la corredera del dispositivo de molienda y se le aplica vacío a través del conducto de drenaje de la base, lo que equivale a una pequeña presión confinante, luego se retira el molde.

Se procede a la medición del diámetro del espécimen a diferentes alturas (arriba, en medio y abajo).

El procedimiento en estado húmedo se siguió para obtener especímenes en estado suelto y medianamente suelto.

El procedimiento en estado seco, para formar especímenes compactos, es igual al procedimiento mencionado anteriormente, pero utilizando material seco.

La carga estática aplicada por medio del apisonador varía de 0.050 kg a 0.800 kg., en el procedimiento en estado húmedo y de 0.100 kg a 0.400 kg en estado seco, dependiendo en ambos casos del material y el grado de compactación que se quería obtener.

En la formación de dos especímenes para las pruebas consolidadas no drenadas con medición de presión de poro (CU), en los cuales no fué posible obtener la compactación requerida por medio de la aplicación de cargas estáticas, fué necesario modificar el procedimiento en estado seco.

La formación de estos especímenes se realizó en tres capas de arena seca, colocando sobre cada una de ellas un cilindro de 3.44 cm de diámetro y 6.41 cm de altura, con un peso de 440 gr; vibrando cada una de las capas a través del molde por espacio de dos minutos con un vibrador manual (véase Apéndice A). El resto del procedimiento no varía.

### 3.3. Relaciones de vacíos iniciales

De acuerdo a los resultados obtenidos en la calibración para la formación de especímenes con los tres materiales descritos en el inciso 3.1; la tabla 1 presenta los valores de las relaciones

TABLA 1. Relaciones de vacíos iniciales

RELACION DE VACIOS	
ARENA DE TARANDACUAO	
Estado suelto	$e_i = 0.92$
Estado med. suelto	$e_i = 0.84$
Estado compacto	$e_i = 0.71$
ARENA DE OTTAWA (C-109)	
Estado suelto	$e_i = 0.76$
Estado med. suelto	$e_i = 0.63$
Estado compacto	$e_i = 0.57$
ESFERAS DE VIDRIO	
Estado suelto	$e_i = 0.72$
Estado med. suelto	$e_i = 0.70$
Estado compacto	$e_i = 0.61$

de vacíos considerados como representativos para cada uno de los estados suelto, medianamente suelto y compacto.

#### 3.4. Montaje, saturación y consolidación de los especímenes

Una vez efectuadas las mediciones del diámetro del espécimen se coloca la camisa de la cámara atornillándola a la base y se instala el pistón esférico en la posición superior de la camisa, evitando hacer contacto con el cabezal. Se desliza la cámara a través de la corredera de montaje hasta el centro del sistema de carga. Tres tornillos colocados en la parte inferior del marco de carga permite el correcto centrado de la cámara con respecto al eje del gato hidráulico.

Se conecta el conducto de la base con la línea de alimentación y se inicia el llenado de la cámara con el líquido confinante utilizando la bomba de baja presión, la que al término del llenado permitirá aplicar una presión confinante de  $1.0 \text{ kg/cm}^2$ . Se suspende el vacío y se inicia la saturación parcial del espécimen abriendo la válvula del drenaje inferior, que se encuentra conectada a una bureta que contiene agua desaerada, dejando fluir el agua dentro del espécimen con un gasto de aproximadamente de  $0.5 \text{ cm}^3/\text{min}$  en dirección ascendente, hasta que el agua salga por el conducto de drenaje superior.

Se conecta el conducto de drenaje superior con la bureta y se procede a aplicar contrapresión en el agua intersticial para saturar el espécimen. Para esto se establece una presión de aire de  $5.0 \text{ kg/cm}^2$ , por medio de un regulador de presión, que es transmitida al espécimen a través de la columna de agua de la bureta de vidrio y los conductos de drenaje superior e inferior.

La contrapresión se aplicó por incrementos de  $1.0 \text{ kg/cm}^2$ , simultáneamente con incrementos de la misma presión en el líquido confinante, de tal manera que la presión confinante efectiva de

1,0 kg/cm<sup>2</sup> se mantenga. El espécimen se deja en este estado durante 12 horas, con las válvulas de drenaje abiertas para asegurar la saturación.

El grado de saturación del espécimen se determina con la medición del coeficiente de presión de poro "B" de Skempton. Este coeficiente se define como el cociente de la presión de poro (medida en el puente) entre el incremento de la presión de cámara, midiéndose los cambios volumétricos sufridos por el espécimen en cada incremento mediante la bureta de vidrio.

#### 4. PRUEBAS TRIAXIALES DE COMPRESION

##### 4.1. Compresión isotrópica

Estas pruebas se efectuaron con varios propósitos:

- 1) Definir la deformabilidad volumétrica de los materiales al incrementar la presión hidrostática
- 2) Determinar la influencia del fenómeno de rotura de los granos en el cambio de compresibilidad y de permeabilidad del material
- 3) Cuantificar la rotura de partículas efectuando una granulometría al final de cada prueba

Se realizaron 9 pruebas, utilizando los tres materiales descritos en el inciso 3.1 y cuyas granulometrías se presentan en la fig 5.

Para cada suelo se fabricaron especímenes en estado suelto (serie a), medianamente suelto (serie b) y compacto (serie c), de acuerdo con los valores de la relación de vacíos que se presentan en la tabla 1.

Debido a que con las esferas de vidrio, el fenómeno de rotura de

partículas propicia la perforación de la membrana y la contaminación del material, se desechó el uso de este material para las pruebas triaxiales CD.

#### 4.1.1 Presiones de cámara ( $\bar{\sigma}_3$ )

Las presiones aplicadas isotrópicamente a los especímenes cubren un intervalo de valores amplio que permite apreciar claramente el fenómeno de rotura de los granos; en la tabla 2 se presentan las presiones máximas alcanzadas en cada caso.

#### 4.1.2 Comportamiento relación de vacíos (e) vs tiempo (t)

En las pruebas efectuadas, se observó también la evolución de las deformaciones volumétricas con el tiempo para cada uno de los incrementos de presión, presentándose los resultados en las figs 8 a 16.

En estas puede observarse que a presiones menores a la presión de inicio de la rotura de granos de acuerdo a la tabla 3, sea cual sea el material y su compacidad, la estabilización del valor de la relación de vacíos (e) es casi inmediata a la aplicación del incremento de presión. No ocurre así cuando la presión rebasa la de inicio de la rotura de partículas, necesitándose entonces mayor tiempo para lograr tal estabilización.

#### 4.1.3 Comportamiento relación de vacíos (e) vs $\log \bar{\sigma}_3$

Los resultados de las pruebas, en lo relativo a variación de e versus  $\log \bar{\sigma}_3$ , se presentan en las figs 17 a 19.

En ellas puede notarse que a una cierta presión de cámara ( $\bar{\sigma}_3$ ) la pendiente de la curva cambia notablemente; esta presión es variable dependiendo del estado de compacidad inicial ( $e_1$ ) y del material; en la tabla 3 se presentan los valores aproximados correspondientes.

Se graficaron los valores del coeficiente de compresibilidad ( $\alpha_v$ ) en términos del  $\log \bar{\sigma}_3$ , con el propósito de definir claramente

**TABLA 2. PRESIONES DE CAMARA**

<b>MATERIAL.</b>	<b>COMPACIDADES</b>	<b>PRESIONES MAX. DE PRUEBA Kg/cm<sup>2</sup></b>
<b>Arena de Tarandacuao</b>	<b>suelta</b>	<b>250</b>
	<b>med. suelta</b>	<b>350</b>
	<b>compacta</b>	<b>400</b>
<b>Arena de Ottawa (C-109)</b>	<b>suelta</b>	<b>400</b>
	<b>med. suelta</b>	<b>450</b>
	<b>compacta</b>	<b>550</b>
<b>Esferas de Vidrio</b>	<b>suelta</b>	<b>250</b>
	<b>med. suelta</b>	<b>250</b>
	<b>compacta</b>	<b>250</b>

Tabla 3 Valores de la presión de cámara ( $\bar{\sigma}_3$ ) en los cuales cambia notablemente la ley de las curvas de compresibilidad.

material	compacidad	prueba	presión de cámara ( $\bar{\sigma}_3$ ) en kg/cm <sup>2</sup>
arena de Tarandacuao	suelta	1.a	40
	med. suelta	1.b	60
	compacta	1.c	80
arena de Ottawa (C-109)	suelta	2.a	140
	med. suelta	2.b	150
	compacta	2.c	200
Esferas de vidrio	suelta	3.a	30
	med. suelta	3.b	40
	compacta	3.c	70

te la presión inicial que provoca la rotura de los granos, figs 20 a 22 y tabla 3.

#### 4.1.4 Comportamiento relación de vacíos ( $e$ ) vs presión de cámara ( $\bar{\sigma}_3$ )

El fenómeno de rotura de las partículas se manifiesta en las gráficas  $e$  versus  $\bar{\sigma}_3$ , figs 23 a 31, a partir de una transición de leyes de comportamiento diferentes. En estas figuras se ha señalado por medio de una flecha, trazada en la vertical del quiebre de comportamiento, el inicio del intervalo de presiones en el que ocurre el fenómeno de rotura de los granos

La compacidad del espécimen ensayado y la resistencia individual de las partículas del material (Apéndice B), influyen en la magnitud de las presiones de rotura.

#### 4.1.5 Rotura de partículas

Además, se efectuaron 6 pruebas con el fin de cuantificar el porcentaje de rotura de las partículas, al someter los especímenes de prueba a diferentes niveles de presiones isotrópicas. Se efectuaron 3 de estas pruebas con arena de Tarandacuao y las restantes con arena de Ottawa (C-109). Ambos suelos se probaron con muestras en estado medianamente suelto.

La cuantificación de la rotura de granos se efectuó utilizando el parámetro " $B_g$ " propuesto por Marsal (1). Para su determinación se compara la granulometría del material resultante, una vez finalizada la prueba, con la granulometría inicial. Se miden las diferencias " $\Delta W_k$ " entre los pesos (en por ciento) inicial " $W_{k_i}$ " y final " $W_{k_f}$ " retenidos en cada una de las mallas usadas.

El parámetro " $B_g$ " es de la suma de todos los valores positivos de " $\Delta W_k$ ", expresados en por ciento. Este parámetro representa el peso de las partículas, en porcentaje, que han sufrido rotura.

Las gráficas relación de vacíos ( $e$ ) versus  $\log \bar{\sigma}_3$ , correspondientes aparecen en las figs 32 y 33. Se presentan con fines comparativos, las curvas granulométricas inicial y final de ambos suelos y para cada una de las presiones isotrópicas máximas aplicadas (figs 34 y 35).

Los correspondientes valores de " $B_g$ " se anotan en cada caso (tabla 4).

Los diagramas de " $\Delta W_k$ " obtenidos, figs 36 y 37, no solo son útiles para determinar el parámetro " $B_g$ " anteriormente señalado, sino para definir el diámetro de las partículas del material más afectado por la rotura.

Además, se calculó para ambas arenas el valor del parámetro

$(B_g)_q = \frac{B_g}{1+e_i}$ , que representa el volumen de partículas rotas por unidad del volumen total, así como el cociente de los diámetros efectivos " $D_{10}$ " inicial ( $D_{10_i}$ ) y " $D_{10}$ " final ( $D_{10_f}$ ) por efecto de la rotura; ambos se graficaron en función del esfuerzo  $\bar{\sigma}$ ; (figs 38a y 39a). En las figs 38b y 39b, se muestra la correlación entre  $(B_g)_q$  y el cociente  $\frac{D_{10_i}}{D_{10_f}}$ ; por lo que cabe tomar como parámetro índice de la rotura de granos uno u otro.

#### 4.2. Pruebas triaxiales consolidadas drenadas (CD)

Para conocer las propiedades de resistencia al esfuerzo cortante de las arenas de Tarandacuao y de Ottawa (C-109) y su relación con el fenómeno de rotura de las partículas, se realizaron 35 pruebas triaxiales consolidadas drenadas. Para cada uno de los estados de compacidad considerados (tabla 1) se formaron 6 especímenes, excepto para el caso de la arena de Ottawa (C-109) en estado compacto que se probó con solo 5 muestras.

Al término de las pruebas, se determinó la distribución granulométrica del material resultante para compararla con la inicial y estimar el porcentaje de rotura de las partículas ( $B_g$ ).

Tabla 4 Magnitudes de rotura de las partículas en pruebas de compresión isotrópica

material	compacidad	prueba	presión de cámara ( $\sigma_3$ ) máx Kg/cm <sup>2</sup>	B <sub>g</sub> en %	(B <sub>g</sub> ) <sub>q</sub> en %
arena de Tarandacuao	med. suelta	1d	60	11.4	6.1
		1e	150	35.6	19.2
		1f	350	56.3	30.5
arena de Ottawa (C-109)	med. suelta	2d	150	3.2	1.9
		2e	350	7.6	4.6
		2f	500	20.5	12.5

En la tabla 5 se presenta un resumen de los resultados obtenidos en las pruebas triaxiales de compresión, consolidadas drenadas (CD).

#### 4.2.1 Presiones de consolidación ( $\bar{\sigma}_c$ )

La tabla 6 indica las presiones de consolidación utilizadas, que se eligieron tomando en cuenta las gráficas relación de vacíos ( $e$ ) vs presiones de cámara ( $\bar{\sigma}_3$ ) (figs 23 a 31) de las pruebas de compresión isotrópica.

#### 4.2.2 Relación de vacíos ( $e$ ) vs $\log \bar{\sigma}_c$ (etapa de consolidación)

Para llegar a la presión de consolidación ( $\bar{\sigma}_c$ ) elegida para cada ensaye, se procedió por incrementos midiendo la deformación volumétrica que experimentaba el espécimen el término de cada incremento. En las figs 40 a 45 se presentan las curvas de compresibilidad resultantes (etapa de consolidación) para los tres estados de compacidad de dos materiales. La dispersión en los valores de  $e$  que se observan en alguna de estas gráficas, puede ser atribuido a la dificultad para reproducir una misma relación de vacíos y a posibles errores en la ejecución de la prueba.

#### 4.2.3 Comportamiento Esfuerzo desviador vs Deformación axial y Deformación volumétrica vs Deformación axial

La aplicación de esfuerzo desviador ( $\sigma_d$ ), se controla por medio de los manómetros instalados en el equipo para medir la presión actuante en la recámara del pistón de carga del gato hidráulico, fig 2.

El cálculo del esfuerzo desviador ( $\sigma_d$ ), durante la etapa de falla, se efectuó tomando en cuenta el área corregida dada por la expresión,

$$A_1 = A_c \frac{(1 - \epsilon_v)}{1 - \epsilon_z}$$

Tabla 5 Resumen Pruebas triaxiales consolidadas drenadas (CD)

material	compacidad	prueba	$\bar{\sigma}_c$ kg/cm <sup>2</sup>	$e_i$	$e_c$	$e_f$	$(\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_3) f$ kg/cm <sup>2</sup>	$\phi$ grados	$(\frac{\bar{\sigma}_1}{\bar{\sigma}_3}) f$	Bg %	(Bg)q %	v
arena de Tarandacuao	suelta	1.a.1	30	0.917	0.822	0.572	75	33.7	3.50	46.0	23.9	0.38
		1.a.2	40	0.925	0.818	0.548	92	32.3	3.31	50.9	26.4	0.38
		1.a.3	60	0.922	0.751	0.451	140	32.3	3.33	62.4	32.4	0.38
		1.a.4	90	0.922	0.695	0.396	215	32.9	3.38	72.7	37.8	0.42
		1.a.5	150	0.920	0.593	0.341	357	32.9	3.38	78.1	40.6	0.44
		1.a.6	250	0.926	0.567	0.358	510	30.3	3.04	80.3	41.6	0.46
	med. suelta	1.b.1	30	0.843	0.765	0.553	72	33.0	3.41	44.7	24.2	0.39
		1.b.2	60	0.839	0.717	0.445	134	31.8	3.21	63.8	34.6	0.38
		1.b.3	70	0.836	0.691	0.406	151	31.2	3.15	66.3	36.1	0.39
		1.b.4	150	0.839	0.574	0.311	350	32.5	3.33	78.9	42.9	0.43
		1.b.5	250	0.838	0.485	0.268	580	32.4	3.34	82.1	44.6	0.47
		1.b.6	350	0.842	0.434	0.267	740	30.9	3.14	84.0	45.6	0.50
	compacta	1.c.1	30	0.703	0.650	0.527	73	33.2	3.43	42.6	25.0	0.41
		1.c.2	60	0.710	0.626	0.411	140	32.5	3.33	63.2	36.9	0.41
		1.c.3	90	0.711	0.602	0.358	205	32.1	3.27	73.1	42.7	0.42
		1.c.4	150	0.718	0.545	0.300	355	32.8	3.36	81.4	47.3	0.43
		1.c.5	250	0.713	0.467	0.258	590	32.7	3.36	86.4	50.4	0.46
		1.c.6	350	0.719	0.410	0.230	860	33.4	3.45	88.4	51.4	0.50
arena de Ottawa (C-109)	suelta	2.a.1	50	0.763	0.695	0.606	104	30.6	3.08	12.0	6.8	0.45
		2.a.2	100	0.757	0.674	0.469	190	29.1	2.90	30.4	17.3	0.36
		2.a.3	150	0.754	0.648	0.387	310	30.5	3.06	39.4	22.4	0.36
		2.a.4	300	0.767	0.544	0.248	685	32.2	3.28	51.4	29.0	0.42
		2.a.5	400	0.765	0.487	0.258	880	31.5	3.20	56.6	32.0	0.41
		2.a.6	500	0.758	0.490	0.290	980	29.6	2.96	58.5	33.2	0.50
	med. suelta	2.b.1	50	0.643	0.592	0.541	100	30.0	3.00	10.6	6.4	0.45
		2.b.2	100	0.636	0.571	0.424	210	30.8	3.10	29.8	18.2	0.40
		2.b.3	200	0.634	0.541	0.322	410	30.4	3.05	44.6	27.2	0.40
		2.b.4	300	0.635	0.523	0.274	610	30.2	3.05	51.0	31.1	0.40
		2.b.5	400	0.638	0.438	0.215	790	29.7	2.97	55.1	33.6	0.46
		2.b.6	500	0.636	0.426	0.209	1140	32.1	3.28	57.4	35.0	0.49
	compacta	2.c.1	100	0.577	0.521	0.423	205	30.4	3.05	30.2	19.1	0.40
		2.c.2	200	0.569	0.466	0.276	390	29.5	2.95	44.2	28.1	0.41
		2.c.3	300	0.572	0.455	0.236	700	32.5	3.33	51.4	32.6	0.42
		2.c.4	400	0.564	0.458	0.233	920	32.3	3.30	57.5	36.7	0.46
		2.c.5	500	0.559	0.437	0.212	1110	31.7	3.22	57.7	37.0	0.50

**TABLA 6. PRESIONES DE CONSOLIDACION DE LAS  
PRUEBAS CONSOLIDADAS DRENADAS (CD)**

MATERIAL	COMPACIDADES	PRESIONES Kg/cm <sup>2</sup>
Arena de Tarandacuao	suelta	30
		40
		60
		90
		150
		250
	med. suelta	30
		60
		70
		150
		250
		350
	compacta	30
		60
		90
150		
250		
350		
Arena de Ottawa (C-109)	suelta	50
		100
		150
		300
		400
		500
	med. suelta	50
		100
		200
		300
		400
		500
	compacta	100
		200
		300
400		
500		

donde

- $A_c$  Es el área de la sección transversal de la muestra consolidada
- $A_1$  El área de la sección transversal de la muestra en cualquier instante de la prueba
- $\epsilon_z$  Deformación axial
- $\epsilon_v$  Deformación volumétrica

En estas pruebas no se hizo ninguna corrección al esfuerzo desviador por efecto de la membrana, ya que como lo subraya Vesic (2) el mencionado efecto es despreciable a altas presiones.

Las curvas esfuerzo-deformación obtenidas en las pruebas con las dos arenas, con diferentes grados de compacidad y sometidas a altas presiones de confinamiento, se asemejan al de una arena suelta sometida a bajas presiones; figs 46 a 57. La resistencia máxima se alcanza a deformaciones axiales del 25% y mayores, presentándose una pequeña disminución del esfuerzo desviador ( $\sigma_d$ ) después de la falla, en las pruebas en que se llegó a ella.

Los incrementos de resistencia que se presentan bruscamente en las curvas Esfuerzo-Deformación, son generados por la rotura y el reacomodo de los granos en el espécimen.

Las curvas Deformación volumétrica ( $\epsilon_v$ ) vs Deformación axial ( $\epsilon_a$ ), muestran una disminución continua del volumen del espécimen durante la prueba; a deformaciones grandes esta curva tiende a ser asintótica y el espécimen se deforma a volumen constante.

Se graficaron también los resultados de las pruebas triaxiales consolidadas drenadas, utilizando la relación de esfuerzos principales ( $\frac{\sigma_1}{\sigma_3}$ ) contra la deformación axial ( $\epsilon_a$ ), figs 58 a 63; en ellos se puede ver que una vez rebasada la presión de cámara ( $\bar{\sigma}_3$ ), obtenidas en las pruebas de compresión isotrópica (figs 23 a 31), a partir de la cual se inicia la rotura de las partículas el comportamiento que presentan los materiales puede con

siderarse cuasi único y seguir la ley  $\frac{d\sigma_1}{d\varepsilon_a} = K \varepsilon_a$ , en el intervalo de 0% a 20% de la deformación axial ( $\varepsilon_a$ ).

#### 4.2.4 Rotura de partículas.

Para cuantificar la rotura de partículas se utilizó el método descrito en el inciso 4.1.5. En las figs 64 a 69 se comparan las curvas granulométricas inicial y final obtenidas para cada prueba, así como el valor de " $B_g$ " determinado de los diagramas de " $\Delta W_k$ ", además se calcularon los valores de  $(B_g)_q$  para cada prueba y se graficaron contra el esfuerzo octaédrico ( $\sigma_{oc}$ ), presentando los resultados en las figs 76 y 77. Las curvas obtenidas indican que un material en estado compacto se rompe más que en estado suelto; en efecto, el volumen total de sólidos en estado compacto es grande, mientras que en el caso del material suelto se cuenta con una cantidad mucho menor de material susceptible de romperse.

En la tabla 4 y las figs 76 y 77 se presentan los valores de  $(B_g)_q$  obtenidos para las pruebas hidrostáticas de las dos arenas, pudiéndose comprobar el efecto notable que tiene en el fenómeno de rotura de las partículas, la aplicación del esfuerzo desviador.

#### 4.2.5 Envolventes de falla

Una vez obtenidas todas las curvas Esfuerzo desviador ( $\sigma_d$ ) vs Deformación axial ( $\varepsilon_a$ ), se calcularon las envolventes de falla para cada uno de los estados de compacidad de los materiales, considerando el esfuerzo correspondiente a  $\varepsilon_a = 30\%$  como el desviador de falla  $(\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_3)_f$ , aún cuando no se había llegado al valor máximo  $(\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_3)_{m\acute{a}x}$ . Se seleccionó este criterio debido a que en algunas pruebas no fue posible alcanzar el valor de  $(\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_3)_{m\acute{a}x}$  debido a la alta compresibilidad de los materiales y a limitaciones del equipo en cuanto a que no podía deformar los especímenes más allá de un cierto límite.

En las envolventes de Mohr-Coulomb presentadas (figs 78 a 83) usando el criterio de falla considerado, se aprecia que algunos círculos cortan la envolvente y determinan un valor mayor del ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) del material; estos círculos corresponden a la pruebas en que se alcanzó realmente el máximo valor de  $(\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_3)$ .

En la tabla 3 se presentan los valores de la Relación de Poisson ( $\nu$ ) calculados como  $\nu = -\frac{|\Delta \epsilon_v|}{|\Delta \epsilon_a|} = -\frac{|\Delta \epsilon_v + \Delta \epsilon_a|}{|2 \Delta \epsilon_a|}$ , alcanzados cuando  $\epsilon_a = 30\%$ , teniéndose valores de  $\nu = 0.50$  solo en aquellas pruebas en los que realmente se llegó a tener el  $(\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_3)_{\max}$  y por lo tanto la estabilización volumétrica con la deformación axial considerada.

Con el propósito de eliminar el efecto de la compresión volumétrica en los resultados se calculó el ángulo de fricción interna del material ( $\phi$ ), utilizando el esfuerzo desviador medio correspondiente a una sola velocidad de deformación volumétrica  $\frac{\Delta \epsilon_v}{\Delta \epsilon_a} = 0.22$ , aproximadamente; graficándose los datos obtenidos contra la presión de consolidación ( $\bar{\sigma}_c$ ), figs 84 y 85.

Para la arena de Tarandacuao, se observa la influencia que tiene en la disminución del ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) el fenómeno de rotura de las partículas mientras que en la arena de Ottawa (C-109) se considera que el ángulo  $\phi$  se mantiene constante en el intervalo de presiones analizado, presentándose cierta dispersión en los resultados debido a posibles errores en la ejecución de las pruebas.

En la tabla 7 se presentan los resultados del cálculo del ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) utilizando el criterio de  $\left(\frac{\bar{\sigma}_1}{\bar{\sigma}_3}\right)_f$ , siendo válidas las consideraciones mencionadas anteriormente en cuanto al criterio de falla.

#### 4.3 Pruebas triaxiales consolidadas no drenadas con medición de presión de poro (CU)

Con objeto de conocer el comportamiento de las arenas satura-

Tabla 7 Valores del Angulo de fricción interna ( $\phi$ )  
siguiendo el criterio de  $(\frac{\bar{\sigma}_1}{\bar{\sigma}_3})f$

material	compacidad	prueba	$\bar{\sigma}_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$(\frac{\bar{\sigma}_1}{\bar{\sigma}_3})f$	$\phi$ grados
arena de Tarandacuao	suelta	1.a.1	30	3.50	33.7
		1.a.2	40	3.31	32.1
		1.a.3	60	3.33	32.3
		1.a.4	90	3.38	32.9
		1.a.5	150	3.38	32.9
		1.a.6	250	3.04	30.3
	med. suelta	1.b.1	30	3.41	33.1
		1.b.2	60	3.21	31.6
		1.b.3	70	3.15	31.2
		1.b.4	150	3.33	32.5
		1.b.5	250	3.34	32.6
		1.b.6	350	3.14	31.1
	compacta	1.c.1	30	3.43	33.2
		1.c.2	60	3.33	32.5
		1.c.3	90	3.27	32.1
		1.c.4	150	3.36	32.7
		1.c.5	250	3.36	32.7
		1.c.6	350	3.45	33.4
arena de Ottawa (C-109)	suelta	2.a.1	50	3.08	30.6
		2.a.2	100	2.90	29.1
		2.a.3	150	3.06	30.4
		2.a.4	300	3.28	32.1
		2.a.5	400	3.20	31.5
		2.a.6	500	2.96	29.6
	med. suelta	2.b.1	50	3.00	30.0
		2.b.2	100	3.10	30.8
		2.b.3	200	3.05	30.4
		2.b.4	300	3.05	30.4
		2.b.5	400	2.97	29.7
		2.b.6	500	3.28	32.1
	compacta	2.c.1	100	3.05	30.4
		2.c.2	200	2.95	29.5
		2.c.3	300	3.33	32.5
2.c.4		400	3.30	32.3	
2.c.5		500	3.22	31.7	

das en condiciones no drenadas y en pruebas de compresión triaxial, ampliando el intervalo de presiones de consolidación ( $\bar{\sigma}_c$ ) utilizado por Argüello (9), se efectuó una serie de 6 pruebas trabajando con el mismo material seleccionado por él.

Las características de este material se dieron en el inciso 3.1, y su granulometría se presenta en la fig 6. El equipo fué el mismo que se utilizó para efectuar las pruebas consolidadas drenadas,

Es conveniente hacer notar que la contrapresión utilizada para llevar a cabo la saturación del espécimen es de 5.0 kg/cm<sup>2</sup>. Al igual que en las pruebas "CD" no se efectuó corrección del esfuerzo desviador por efecto de membrana, considerando que este era despreciable (2).

El cálculo del esfuerzo desviador ( $\sigma_d$ ) durante la etapa de falla estuvo basado en una área corregida, de acuerdo a la fórmula:

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

donde

$A_c$  Es el área de la sección transversal de la muestra consolidada

$A_i$  El área de la sección transversal de la muestra en cualquier instante de la prueba

$\epsilon_z$  Deformación axial

#### 4.3.1 Relaciones de vacíos (e)

Se definieron dos relaciones de vacíos: 0.70 y 0.64, las cuales debido a la dispersión de este valor en la formación de los especímenes se dieron aproximadamente.

El propósito de trabajar con estos valores era obtener, con base en los resultados de Argüello (9), diferentes comportamientos en el material debido al grado de compacidad alcanzado con el espécimen al efectuar la consolidación.

#### 4.3.2 Presiones de consolidación ( $\bar{\sigma}_c$ )

Las presiones de consolidación ( $\bar{\sigma}_c$ ) utilizadas fueron de 20 y 40 kg/cm<sup>2</sup>, haciendo uso de la primera en cuatro especímenes formados con las dos relaciones de vacíos dadas en el inciso anterior y la de 40 kg/cm<sup>2</sup> en las dos muestras restantes, con relación de vacíos de 0,70.

#### 4.3.3 Comportamiento Esfuerzo desviador vs Deformación axial y Presión de poro vs Deformación axial

En las pruebas efectuadas se puede observar que el material utilizado presenta dos comportamientos, dependiendo de la relación de vacíos del espécimen ( $e_c$ ) al inicio de la etapa de falla: contractivo o dilatante.

El comportamiento observado en las figs 86 a 88 corresponden a un espécimen en estado suelto, mientras que el de las figs 89 a 91 es el de especímenes compactos. En todas las gráficas se indica con una línea punteada horizontal, la magnitud de la presión de consolidación utilizada ( $\bar{\sigma}_c$ ).

La gráfica Relación de vacíos consolidada ( $e_c$ ) versus  $\bar{\sigma}$ ; mínimo se presenta en la fig 92. En ella se puede ver la línea  $e_{fDC}$  obtenida por Argüello y la ubicación que tienen las pruebas efectuadas.

En este caso no se utilizaron las cabezas tipo lubricadas, lo cual es un factor que influye apartando los puntos representativos (1,2 y 3) de la curva obtenida por Argüello; ya que experimentalmente se ha observado que en los especímenes que presentan un comportamiento contractivo, la presión de poro generada no es uniforme dentro del espécimen por efecto de las cabezas utilizadas, teniéndose valores menores en la base.

Para las pruebas 5 y 6 la presión de poro negativa que se desarrolla ocasiona la aparición del aire inicialmente disuelto, que impide la generación de presiones de poro negativas mayores.

Por este motivo, el estado final de los puntos representativos de 5 y 6 deberían correrse hacia la derecha de no aparecer el aire inicialmente disuelto.

Las características presentadas por las curvas Esfuerzo-Deformación de los especímenes sueltos son: gran rigidez al inicio de la prueba y pequeña deformación de falla, aproximadamente el 1%.

En las gráficas de Presión de poro ( $u_d$ ) vs Deformación axial ( $\epsilon_a$ ) de los especímenes compactos se observa que la presión de poro ( $u_d$ ) llega a un valor máximo y después comienza a disminuir, hasta valores negativos en algunas pruebas; en la curva Esfuerzo-Deformación se puede apreciar la existencia de un punto de inflexión que coincide con el máximo de presión de poro.

A deformaciones mayores, la resistencia aumenta casi linealmente conforme la presión de poro disminuye.

## 5. ANALISIS DE LOS RESULTADOS

### 5.1. Pruebas de compresión isotrópica

1. La evolución de las deformaciones volumétricas con el tiempo presentan dos comportamientos diferentes (figs 8 a 16): El primero de ellos se observa en el intervalo de presiones confinantes ( $\bar{\sigma}_3$ ) menores de aquella en que se inicia la rotura de las partículas, teniéndose en él una estabilización casi instantánea de la relación de vacíos en cada incremento de presión, sin importar el material y la compacidad del mismo. El segundo de estos comportamientos tiene lugar una vez que se rebasa la presión de rotura, pudiendo apreciarse que el proceso de rotura de las partículas no se presenta en forma instantánea, sino que es un fenómeno de rotura progresiva; en la arena de Tarandacuao para lograr la estabilización total de la relación de vacíos se requiere hasta una hora por incremento.

2. La presión de rotura de las partículas se define por los puntos de la curva donde se tiene el mínimo radio de curvatura (figs 17 a 19), presentándose a partir de esta un incremento

de la compresibilidad de los especímenes ensayados.

3. La tabla 3 muestra aproximadamente los valores de las presiones en las cuales se inicia la rotura de partículas, para los tres estados de compacidad de los materiales ensayados. Estos valores permiten conocer la influencia que tiene la relación de vacíos inicial de los especímenes, en el nivel de presiones confinantes a partir de la cual la compresibilidad del material aumenta notablemente. Sin excepción las presiones de cámara son mayores para los especímenes inicialmente compactos, que en aquellos originalmente en estado suelto.

La gran diferencia que existe entre las presiones de confinamiento a partir de las cuales se presenta el fenómeno de rotura de las partículas, entre la arena de Ottawa (C-109) y la de Tarandacuao, es debida a la diferencia de resistencia individual de los granos (Apéndice B), ya que la carga estadística de rotura para las partículas de la arena de Ottawa (C-109) es mayor que en las de Tarandacuao.

4. La tendencia que muestra el valor del coeficiente de compresibilidad ( $\alpha_v$ ) en todas las pruebas, es a disminuir conforme aumenta la presión de confinamiento (figs 20 a 22), teniéndose cierta dispersión en los valores de  $\alpha_v$  debidos posiblemente a errores en la ejecución de la prueba.

5. El tiempo necesario para que se efectue la consolidación del espécimen (figs 8 a 16) no varía apreciablemente de un incremento de presión a otro, por lo cual el único factor que afecta notablemente la permeabilidad del espécimen es el coeficiente de compresibilidad ( $\alpha_v$ ). En las figuras 20 a 22, se observa que al aumentar la presión aplicada de 1 a 500 kg/cm<sup>2</sup> el valor del coeficiente  $\alpha_v$  disminuye aproximadamente cien veces, como en el caso de la arena de Tarandacuao, por lo que también el coeficiente de permeabilidad ha de disminuir en la misma proporción.

6. El fenómeno de rotura de las partículas tiene lugar a partir de cierta presión aplicada, en las curvas  $\epsilon-\bar{\sigma}$ , (figs 23 a 31) se indica aproximadamente el inicio de las presiones en las que se presenta la rotura, por medio de la flecha trazada por la vertical en el quiebre. Es conveniente efectuar un número mayor de pruebas para definir con mayor precisión la presión en la cual se inicia la rotura de las partículas.

7. Las partículas de tamaño intermedio son las más afectadas por el fenómeno de rotura en las pruebas de compresión isotrópica, cumpliéndose esto tanto para la arena de Tarandacuao como para la de Ottawa (C-109) (figs 36 y 37).

## 5.2. Pruebas triaxiales consolidadas drenadas (CD)

1. La variación volumétrica sufrida por los especímenes hasta la falla es notable, observándose siempre decrementos de volumen. En ninguna de las pruebas se notan efectos de dilatación, debido a que el fenómeno de rotura de las partículas adquiere gran importancia en la disminución del volumen de los especímenes durante la prueba.

Las curvas Esfuerzo-Deformación de las pruebas efectuadas, se asemejan todas a la obtenida al ensayar un espécimen en estado suelto a bajas presiones de confinamiento (figs 46 a 57).

2. En algunas de las pruebas efectuadas no se llegó a la falla, debido a la alta compresibilidad de los materiales y a limitaciones del equipo, por lo que se consideró como criterio de falla al 30% de la deformación axial ( $\epsilon_a$ ). En la tabla 5 se presentan los valores de la Relación de Poisson ( $\nu$ ) para  $\epsilon_a = 30\%$ , alcanzándose valores de 0.5 solo en aquellas pruebas en que se llegó al máximo valor de  $(\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_3)$  y por lo tanto a la estabilización volumétrica con deformaciones axiales iguales al 30%; una relación de Poisson menor que 0.5 indica que no se alcanzó el valor máximo de  $(\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_3)$  para  $\epsilon_a = 30\%$ .

3. En las figuras 58 a 63, se presenta la variación de la deformación axial durante la etapa de falla en función de la relación de esfuerzos principales efectivos  $(\frac{\bar{\sigma}_1}{\bar{\sigma}_3})$ . Si el esfuerzo de confinamiento sobrepasa la presión hidrostática capaz de fragmentar partículas, se tiene una relación cuasi unívoca de  $(\bar{\sigma}_1/\bar{\sigma}_3)$  y  $\epsilon_a$ , independientemente de la relación de vacíos inicial, desde cero hasta el 20% de  $\epsilon_a$ .

El comportamiento observado en la prueba 1.a.6 no pudo ser explicado, atribuyéndose a posibles errores en la ejecución de la prueba.

4. En las pruebas consolidadas drenadas (CD), los tamaños de partículas más afectados por el fenómeno de rotura varían de acuerdo a la presión de confinamiento aplicada (figs 70 a 75). A baja presión los tamaños intermedios son los que sufren rotura, y conforme aumenta la presión, las partículas fragmentadas son de dimensión menor.

Por ejemplo en el caso de la arena de Tarandacuao, es notable en la fig 72 que la proporción de material retenido en la malla 60 aumenta para presiones confinantes hasta de 60 kg/cm<sup>2</sup> y disminuye en 10% al aumentar la presión confinante aplicada.

La tabla 4 muestra los valores de  $(Bg)_q$  obtenidos en las pruebas de compresión isotrópica con la arena de Tarandacuao y la de Ottawa (C-109); comparando estos valores con los de pruebas consolidadas drenadas (figs 76 y 77), se puede apreciar la notable influencia que tiene la aplicación del esfuerzo desviador en el fenómeno de rotura de las partículas.

7. La envolvente de falla para cada una de las compacidades de los materiales se calculó con el criterio de falla  $\epsilon_a = 30\%$ , obteniéndose ángulos de fricción aparente prácticamente constantes de 32° y 31°, para la arena de Tarandacuao y la de Ottawa (C-109), respectivamente.

Sin embargo, si se elimina la influencia que tiene la compresión volumétrica del espécimen durante la prueba tomando para

definir la falla el valor de  $\nu = 0,39$ , resulta que en el caso de la arena de Tarandacuao disminuye el ángulo de fricción  $\phi$  por efecto de la rotura de partículas, conforme aumenta la presión de confinamiento  $\phi$  varía de  $34^\circ$  a  $29^\circ$  cuando la presión confinante aumenta de 10 a  $350 \text{ kg/cm}^2$ .

En las mismas condiciones, o sea definiendo la falla para un valor constante de la relación de Poisson, el ángulo de fricción de la arena de Ottawa (C-109) se mantiene constante en todo el intervalo de presiones experimentado, ver fig 85.

### 5.3 Pruebas triaxiales consolidadas no drenadas con medición de presión de poro (CU)

Las discrepancias de las pruebas efectuadas (fig 92; 1,2,3,4,5 y 6) con respecto a la curva obtenida por Argüello, se deben a varios factores.

a) Ausencia de cabezas lubricadas que no se utilizaron en estas pruebas. La no uniformidad resultante del campo de esfuerzos afecta primordialmente la uniformidad de la presión de poro en la muestra, generándose así presiones de poro menores en la base que en la parte central de la probeta cuando el comportamiento de la probeta es contractivo. (figs 86, 87, 88 y puntos 1,2,3 en la fig 92).

b) al generarse presiones de poro negativas iguales a la contrapresión utilizada ( $5,0 \text{ kg/cm}^2$ ) para saturar el espécimen (figs 90, 91 y puntos 5 y 6 de la fig 92), el aire que inicialmente se había disuelto en el agua se desprende nuevamente. En esas condiciones las presiones de poro medidas al final de la prueba no son correctas.

c) la aplicación de los incrementos en el esfuerzo desviador se efectúa por medio de carga controlada; esta limitación del equipo, induce falla brusca en los especímenes que presentan comportamiento contractivo, no pudiéndose realizar ninguna lectura

durante el intervalo de 2 a 18% de la deformación axial ( $\epsilon_a$ ). Con el propósito de definir en forma más precisa la ubicación de la curva obtenida por Argüello en el intervalo de presiones experimentado, es necesario efectuar un número mayor de pruebas utilizando cabezas lubricadas.

## 6. CONCLUSIONES

Las pruebas de *compresión isotrópica* realizadas, ponen en evidencia las siguientes características importantes del comportamiento de las arenas ensayadas:

1. Las deformaciones sufridas por el espécimen en el intervalo de presiones menores a la rotura, se producen en forma instantánea sin importar el material y la compacidad inicial del espécimen (ver figs 8 a 16).

2. La rotura de las partículas no se presenta en forma instantánea, sino que es un fenómeno de rotura progresiva generado por la fragmentación de ciertos granos en estado crítico de esfuerzos, lo que induce nuevos arreglos en la estructura.

3. La presión de rotura de las partículas se define por los puntos de la curva donde se tiene el mínimo radio de curvatura (curvas  $e$  vs  $\log \bar{\sigma}_3$ , figs 17 a 19) a partir de la cual la compresibilidad del espécimen aumenta apreciablemente.

4. La presión de rotura de los granos varía con la relación de vacíos inicial ( $e_i$ ) del espécimen, presentando presiones de inicio de rotura mayores en los especímenes en estado compacto que en aquellos originalmente sueltos, como lo demuestran las

figuras 23 a 31.

5. A mayor resistencia individual de los granos de una arena mayor será la presión en la cual se inicia el fenómeno de rotura de las partículas en el suelo (véase Apéndice B)

6. El coeficiente de compresibilidad ( $\alpha_v$ ) disminuye paulatinamente conforme aumenta la presión confinante (figs 20 a 22).

7. En las pruebas de compresión hidrostática el tamaño intermedio de los granos es el más afectado por el fenómeno de rotura, véase figs 36 y 37.

La aplicación que puede hacerse en la práctica de los resultados y conclusiones obtenidos en las pruebas de compresión isotrópica son:

a) Calcular los asentamientos, tanto en magnitud como su evolución, que se presentan en los respaldos de enrocamientos de las grandes presas (12)

b) Evaluar, aunque indirectamente, el cambio de la permeabilidad que por efecto de la rotura de los granos sufren los filtros y drenes de presas, sometidos a altas presiones.

En cuanto al comportamiento de las pruebas *triaxiales consolidadas drenadas* (CD) se concluyó lo siguiente:

1. Las curvas Esfuerzo-Deformación se asemejan al de una arena en estado suelto, ensayada a bajas presiones de confinamiento. Los efectos de dilatación desaparecen al cobrar importancia el fenómeno de rotura de granos.

2. Cuando se rebasa la presión hidrostática que provoca la rotura de partículas, la relación de  $(\bar{\sigma}_1/\bar{\sigma}_3)$  y  $\epsilon_a$  es aproximadamente única, en el intervalo de cero al 20% de  $\epsilon_a$  (ver figs 58 a 63)

3. El tamaño de las partículas afectado por el fenómeno de rotura es variable dependiendo de la presión aplicada; a presiones menores se rompen los tamaños intermedios. Conforme aumenta la presión, disminuye la dimensión de las partículas que sufren rotura (figs 70 a 75)

4. La influencia que tiene la aplicación del esfuerzo desviador en el fenómeno de rotura de partículas, es notable; en terminos del parámetro  $(B\gamma)_q$  la fragmentación de granos se duplica respecto a la inducida por esfuerzo hidrostático al mismo nivel (figs 76 y 77).

5. Con el criterio de  $\epsilon_a = 30\%$  para definir la falla y considerando el intervalo de presiones analizado, el ángulo de fricción aparente es practicamente constante e igual a  $32^\circ$  y  $31^\circ$  para la arena de Tarandacuao y la de Ottawa (C-109), respectivamente (figs 78 a 83).

6. Eliminando la influencia de la compresión volumétrica, o sea tomando para definir la falla un mismo valor de la relación de Poisson incremental  $\nu = 0.39$ , el ángulo  $\phi$  en la arena de Tarandacuao disminuye por efecto de la rotura de partículas de  $34^\circ$  a  $29^\circ$ , al aumentar la presión confinante de 30 a 350  $\text{kg/cm}^2$ ; mientras que en la arena de Ottawa (C-109), se mantiene constante e igual a  $30^\circ$ , en el intervalo de presiones confinantes ensayado (figs 84 y 85).

En este caso, la utilización práctica de estas conclusiones es la siguiente:

a) La relación cuasi unívoca entre  $\left(\frac{\bar{\sigma}_1}{\sigma_3}\right)$  y  $\epsilon_a$  para valores de la presión confinante superiores al de inicio de la rotura, permite calcular en forma confiable el comportamiento Esfuerzo-Deformación de las arenas o enrocamientos cuando tales materiales estan sometidos a niveles de esfuerzos elevados.

b) La reducción, del ángulo de fricción interna del material ( $\phi$ ) por la rotura de partículas (caso de la arena de Tarandacuao) es significativa para resolver problemas de capacidad de carga en suelos granulares sometidos a altas presiones bajo pilas y pilotes de punta (2,8,11)

## 7. RECONOCIMIENTO

Los consejos y la ayuda del Ing. Jesús Alberro A. y del Ing. Marcos Mazari, hicieron posible la realización de este trabajo.

Al Dr. Raúl J. Marsal C., Dr. Leonardo Zeevaert W., M. en I. Abraham Díaz R. y el Ing. Guillermo Springall C. por las sugerencias aportadas.

Al personal del Laboratorio de Enrocamientos del Instituto de Ingeniería y a la Srta. Isabel Vilchis por el trabajo de mecanografía.

## 8. REFERENCIAS

1. Marsal, R. J. (1973) *Mechanical properties of rockfill*. Em bankment Dam Engineering Casagrande Volumen, Wiley and Sons, New York, U.S.A.
2. Vesic, A. S. and Clough, W. (1968) *Behavior of granular materials under high stresses* Proceedings of the A.S.C.E., USA
3. Informe S.R.H.; C.F.E.; Instituto de Ingenieria, UNAM. (1976) *Comportamiento de presas constuidas en México*. Contribución al XII Congreso Internacional de Grandes Presas, México
4. Dantu, P. (1957) *Contributton a l'Etude Mecanique et Geomé trique des Milieux Pulvérulents*. Proceedings, IV Conferen cia Internacional de Mecánica de Suelos e Ingenieria de Ci mentaciones, tomo I, Londres, U.K.
5. Rábago, A. (1976) *Cámara Triaxial de Alta Presión (T-3.6-2000)*. Informe del Instituto de Ingenieria, UNAM, elaborado para C.F.E.

6. Juarez, B. y Rico, R. (1976) *Mecánica de Suelos*, tomo I, 3ra. Ed., Editorial Limusa, México
7. Ramirez, R. E. (1980) *Comportamiento de un suelo granular a altas presiones de confinamiento* Tesis de Maestría - DESFI-UNAM, México
8. Vesic, A. S. (1973) *Proceedings, VIII Conferencia Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones* vol IV, 2a. parte (pag 78 a 81), Moscú
9. Argüello, J. M. (1982) *Comportamiento de arenas saturadas en condiciones drenadas y no drenadas*. Tesis de Maestría DESFI-UNAM, México
10. Billam, J. (1971) *Some aspects of the behaviour of granular materials at high pressures*. *Proceedings of the Roscoe Memorial Symposium*, Cambridge University, UK
11. Vesic, A. S. (1977) *Design of pile foundations*. National Cooperative Highway Research Program Synthesis of Highway Practice, No 42, USA
12. Marsal, R. J. (1965) *Stochastic processes in the grain skeleton of soils* *Proceedings of the Sixth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Vol I, Montreal, Canadá

**ANEXO A FIGURAS**

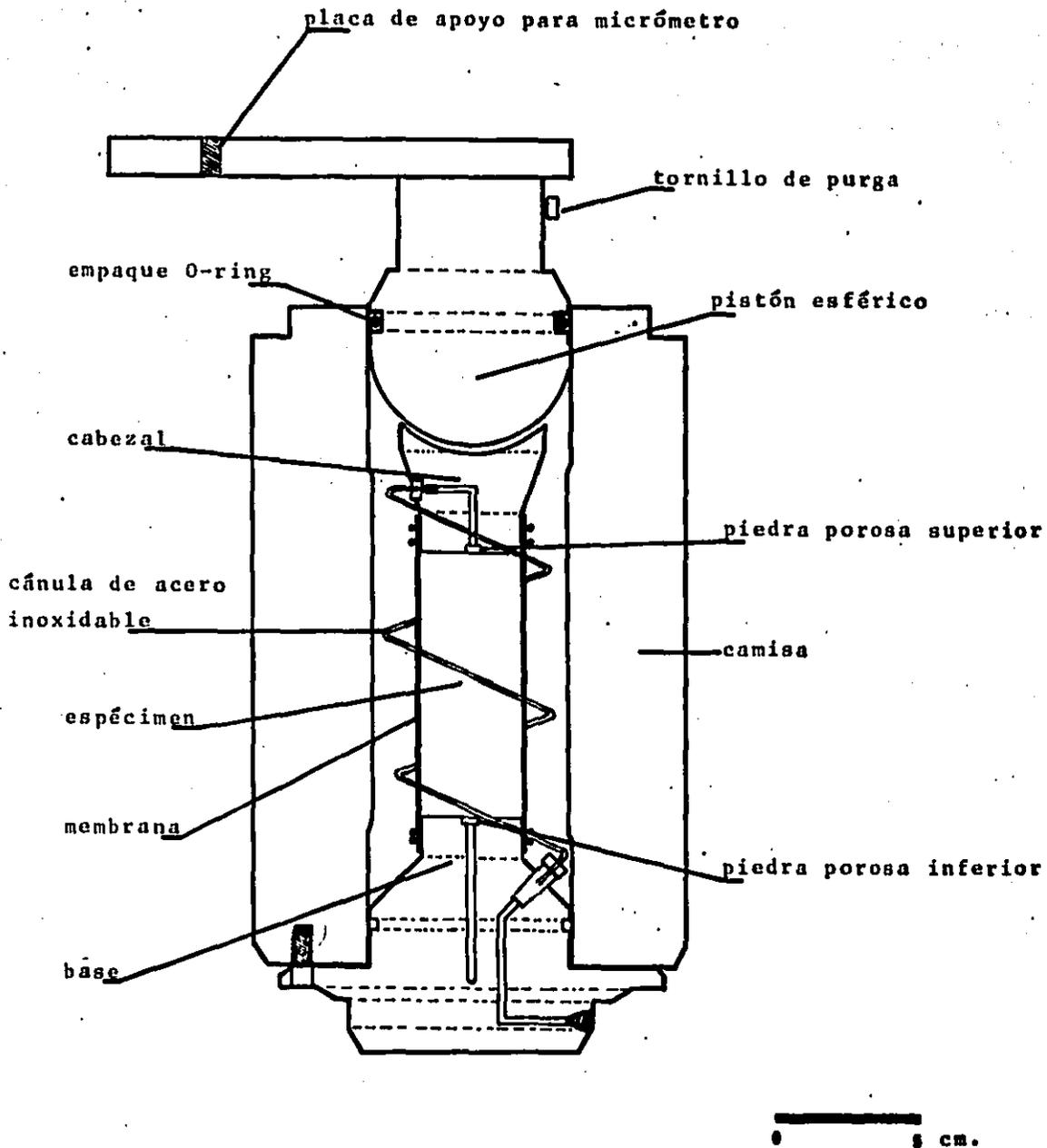


Fig. 1. Sección Transversal de la Cámara  
 Triaxial de Alta Presión ( T-3.6-2000 )

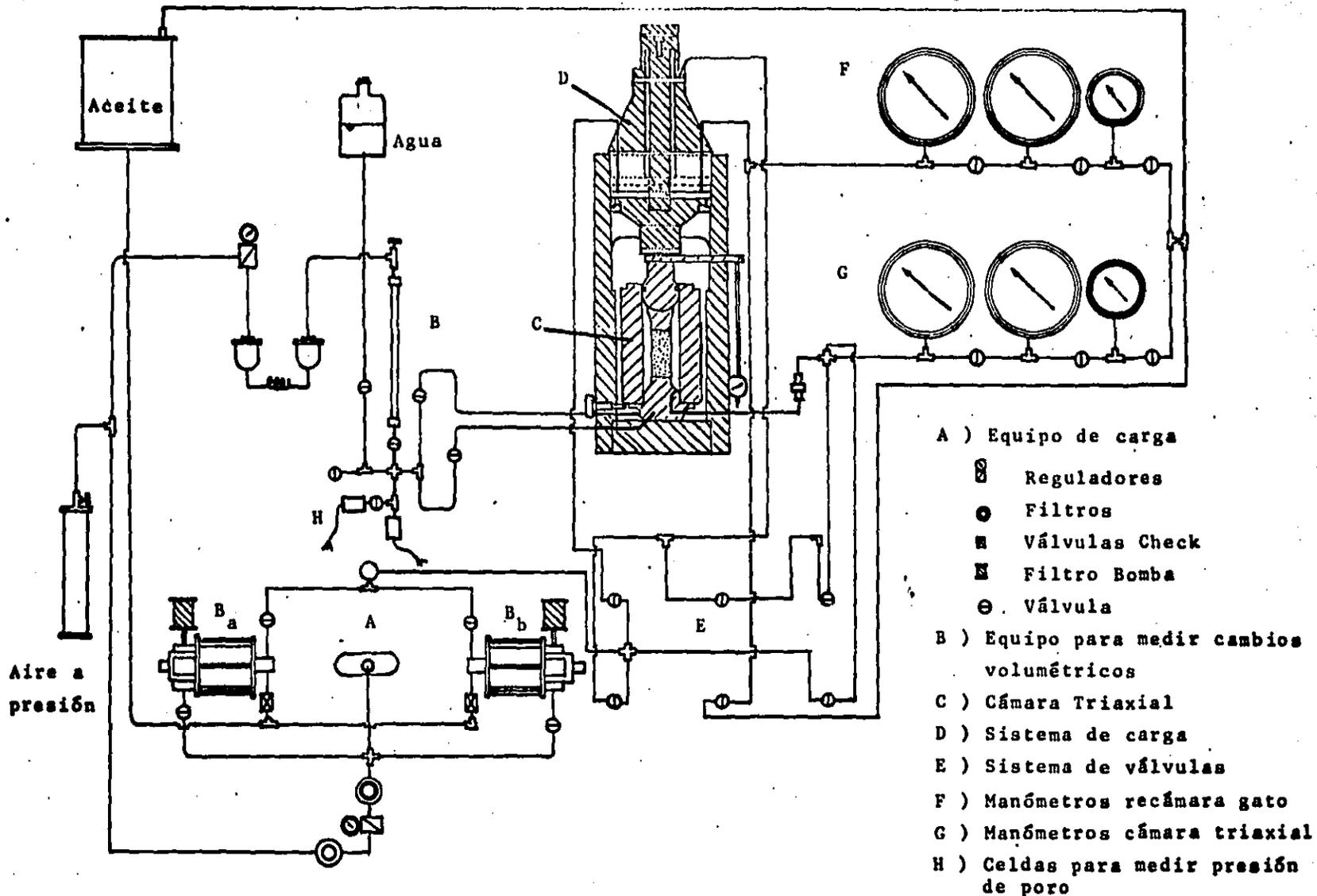


Fig. 2. Diagrama General del Equipo de Alta Presión

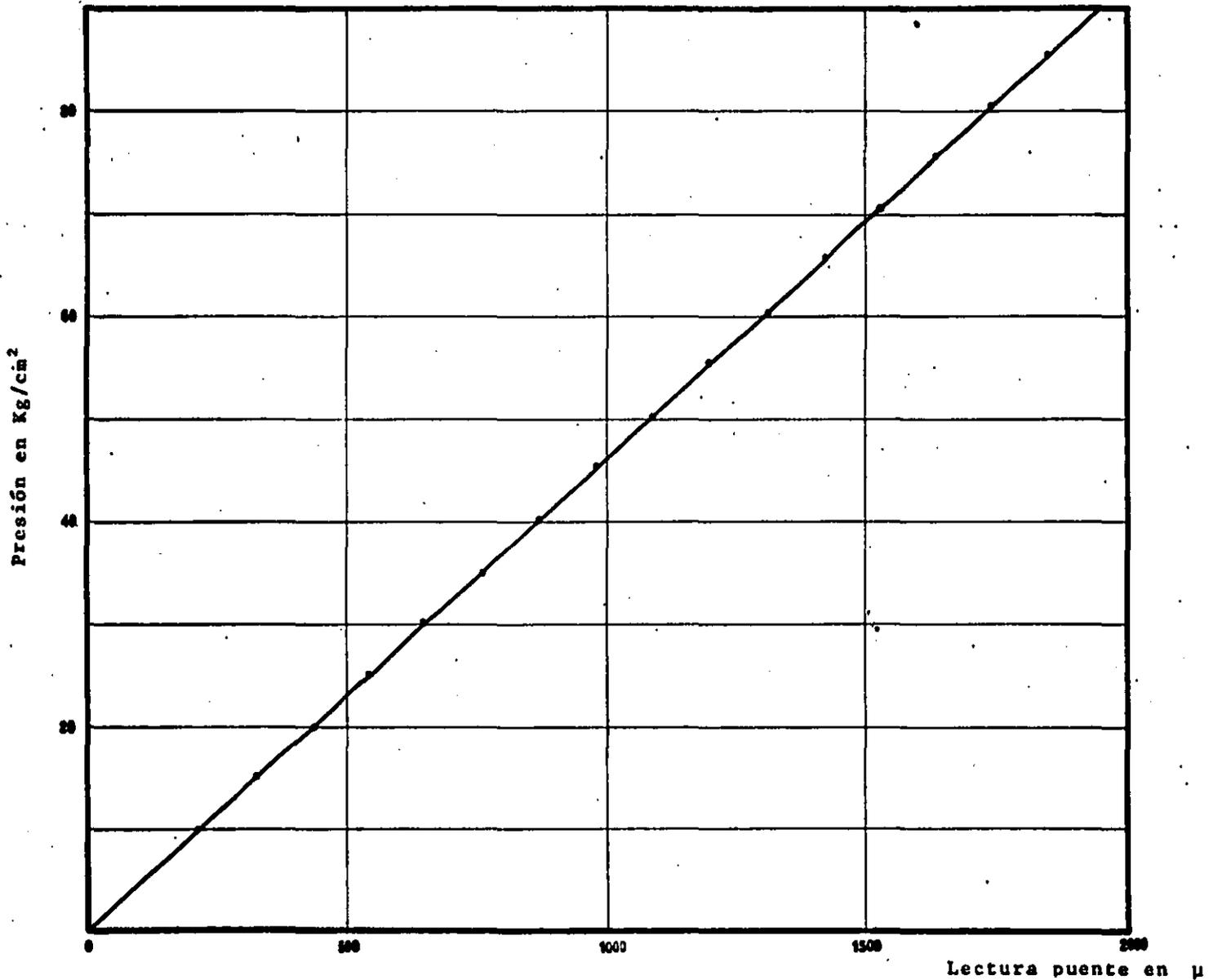


Fig. 3. Curva de Calibración Celda (0 a 90 Kg/cm $^2$ )

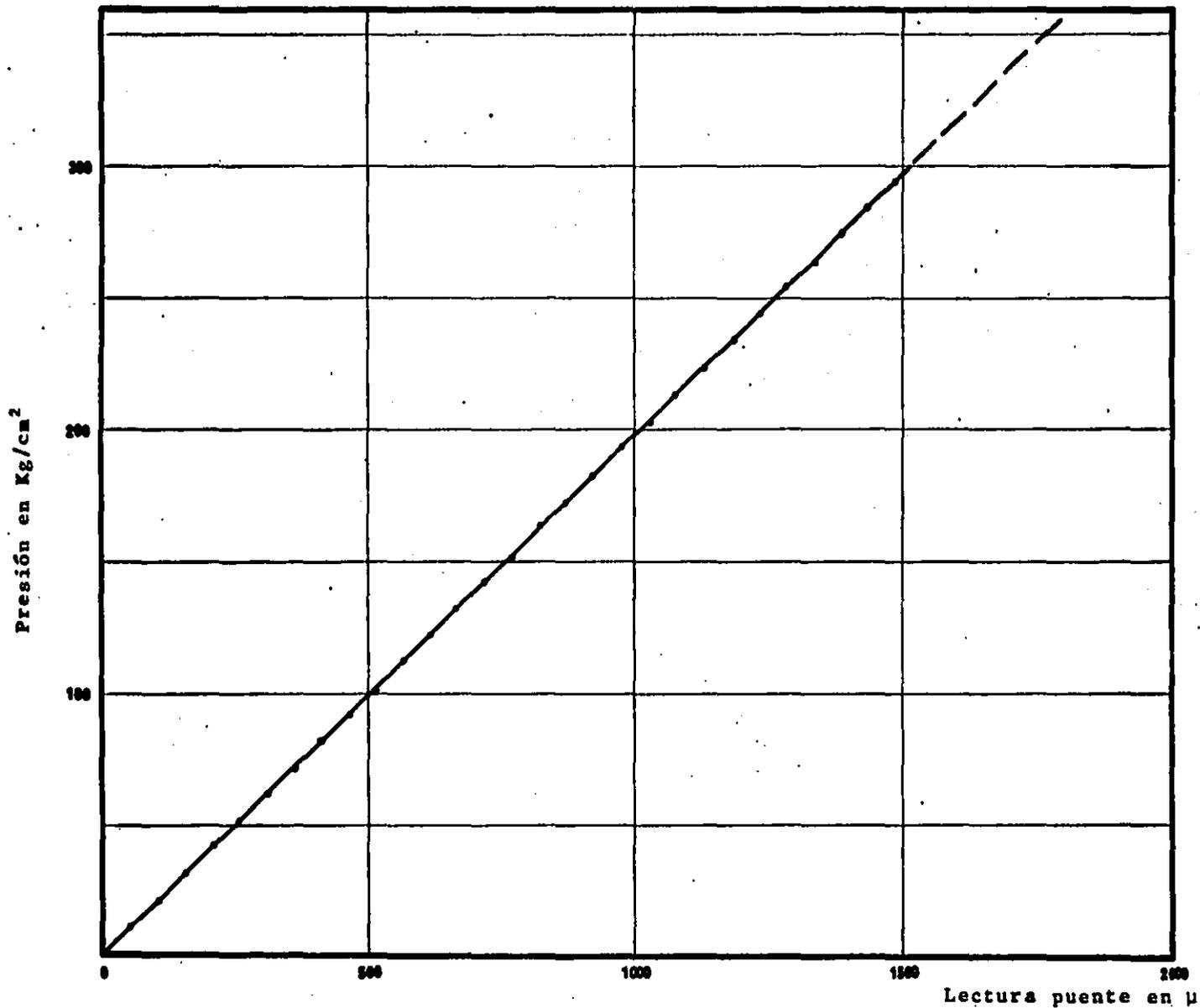


Fig. 4. Curva de Calibración Celda (0 a 400Kg/cm<sup>2</sup>)

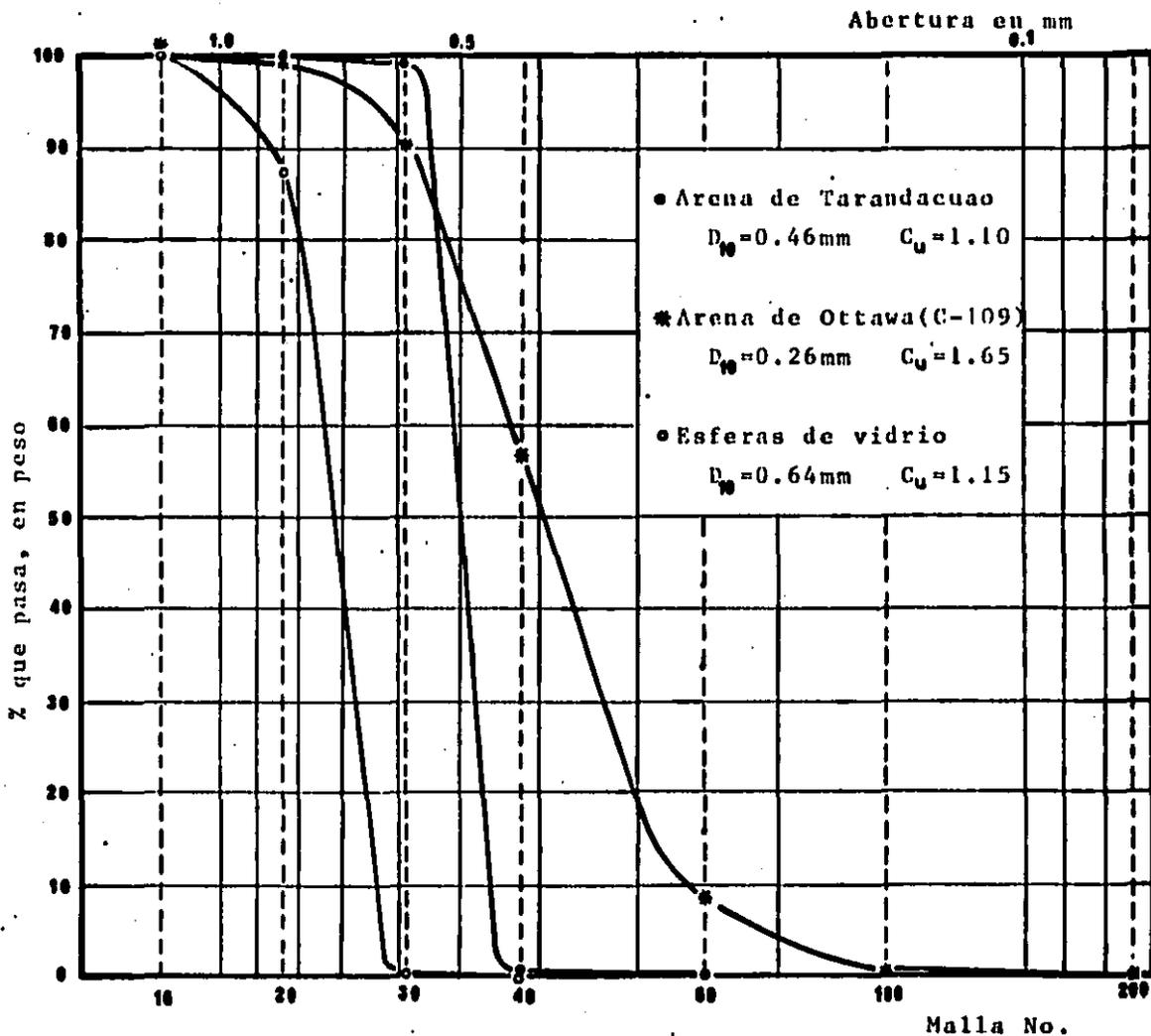


Fig. 5. Granulometría inicial de los materiales utilizados

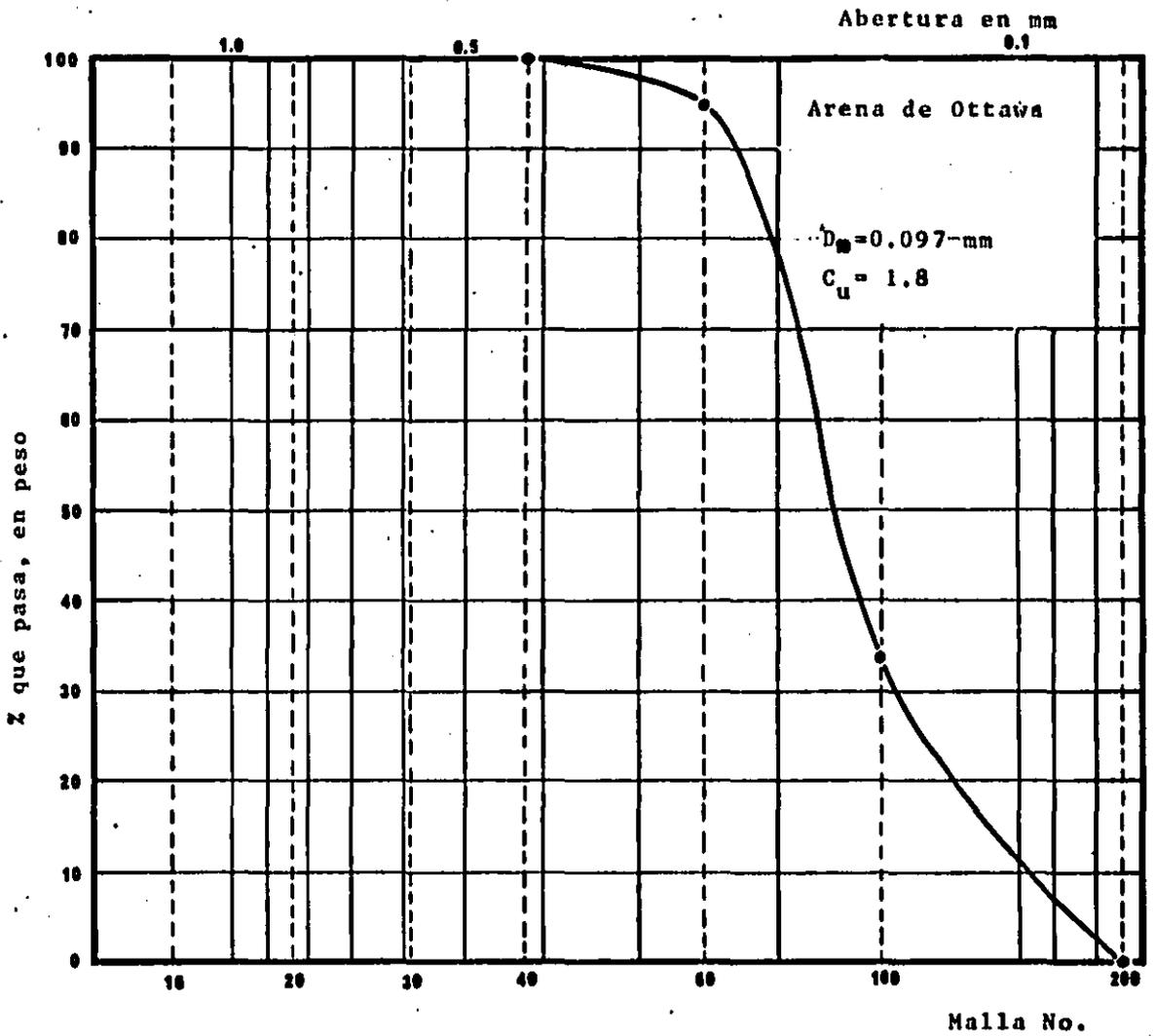


Fig. 6. Granulometría de la arena utilizada por J. M. Argüello (ref 9)

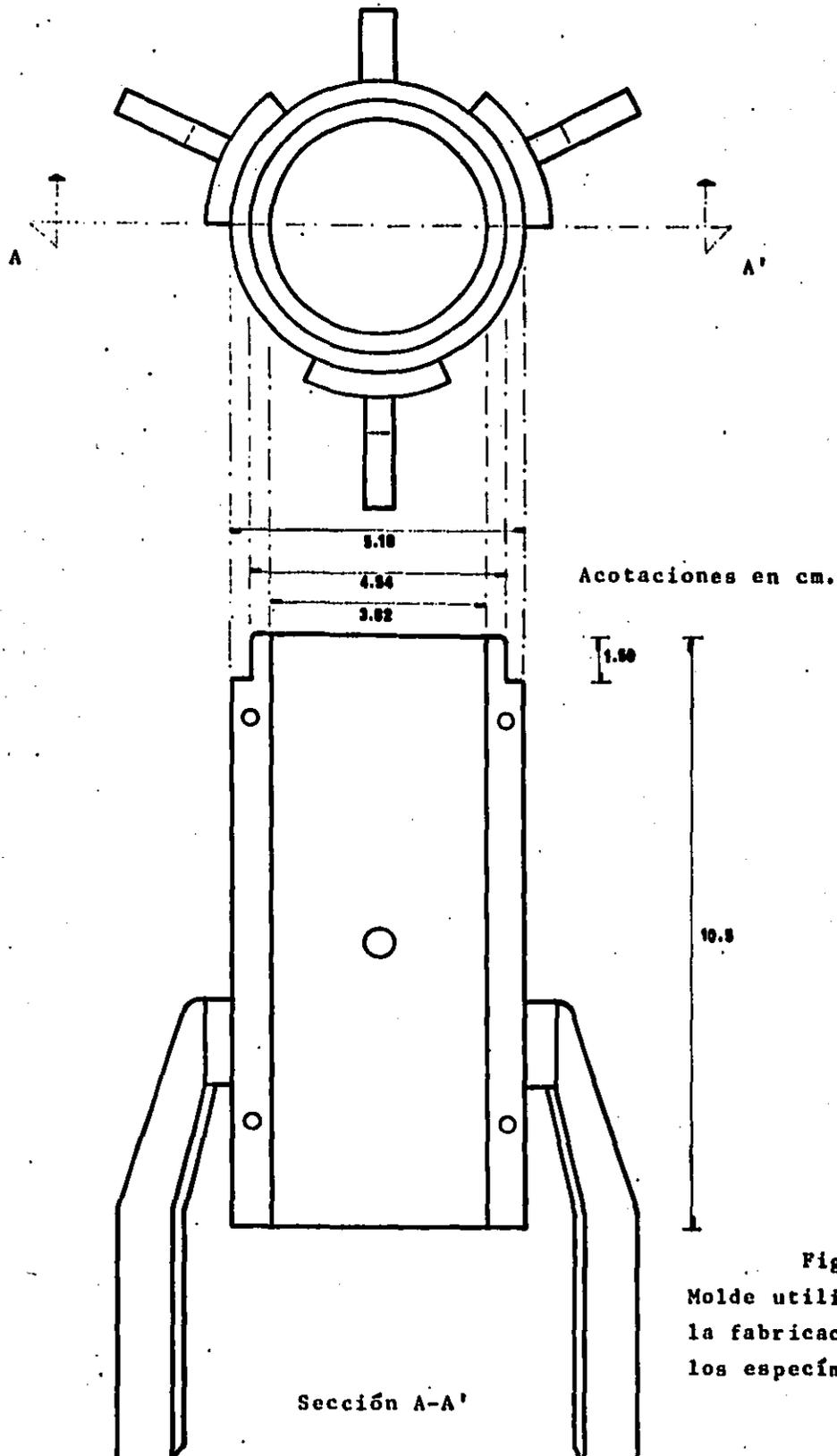


Fig. 7.  
 Molde utilizado  
 la fabricación  
 los especímenes

t en minutos

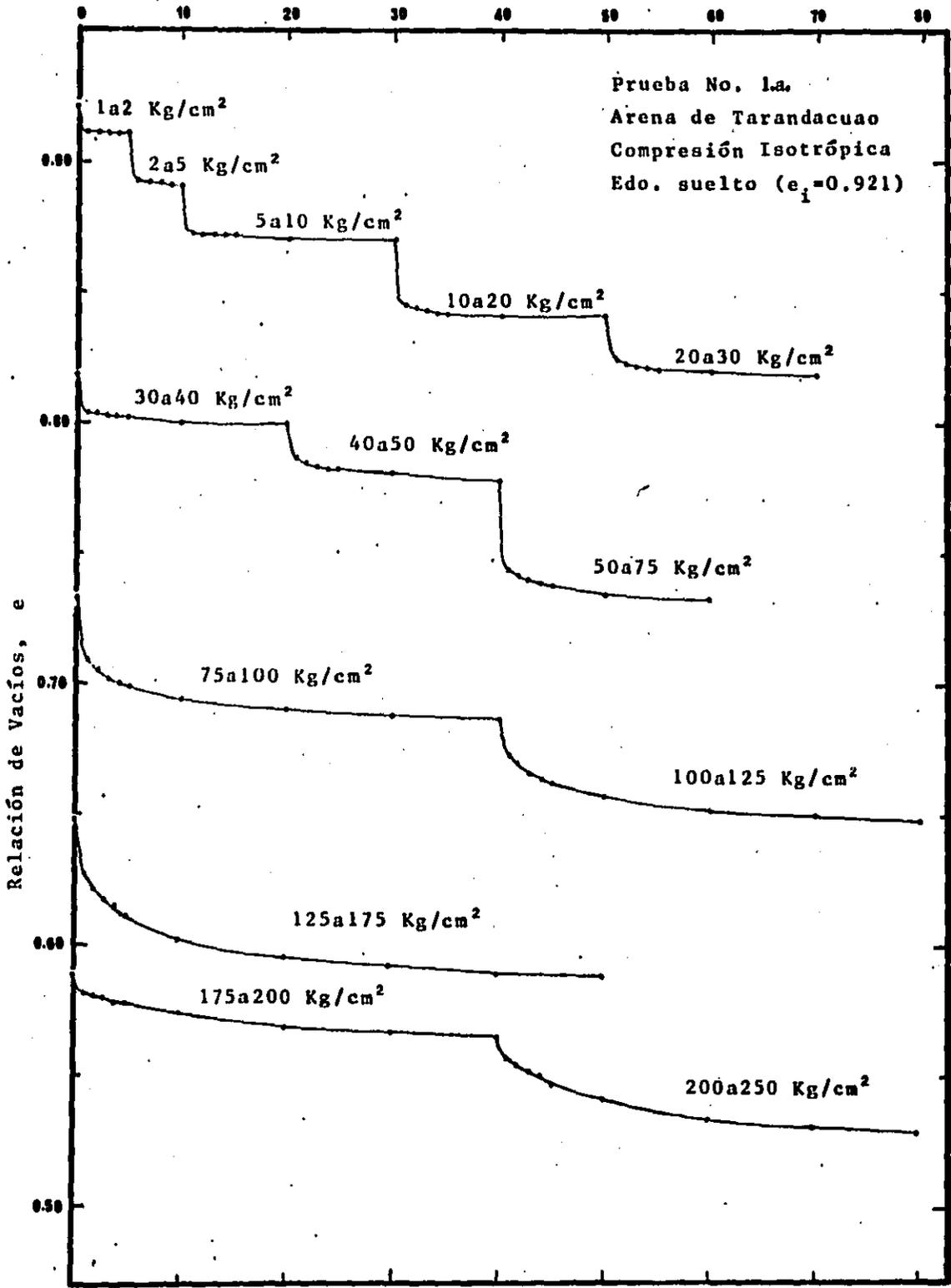


Fig. 8. Curvas Relación de Vacíos vs tiempo

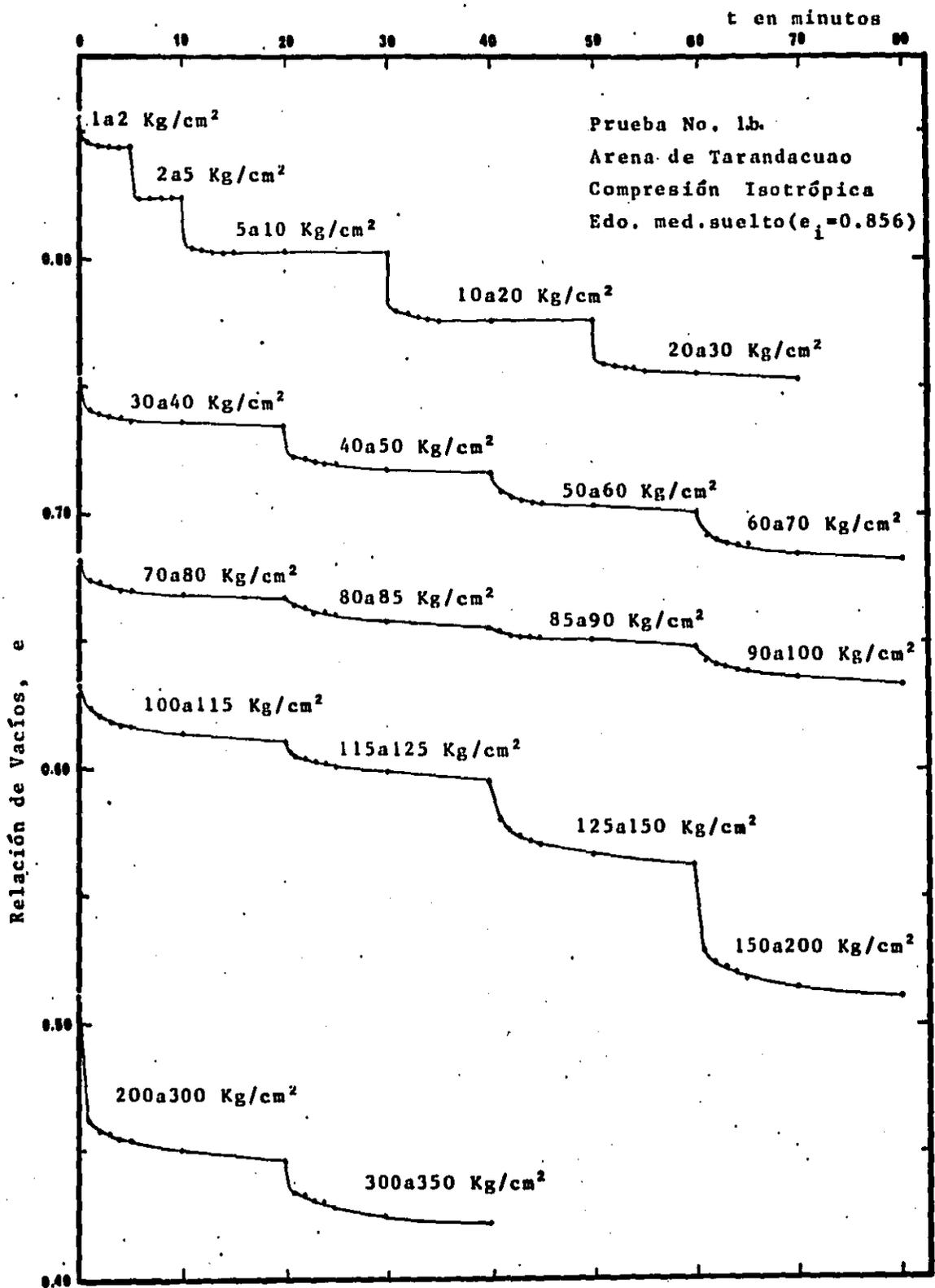


Fig. 9. Curvas Relación de Vacíos vs tiempo

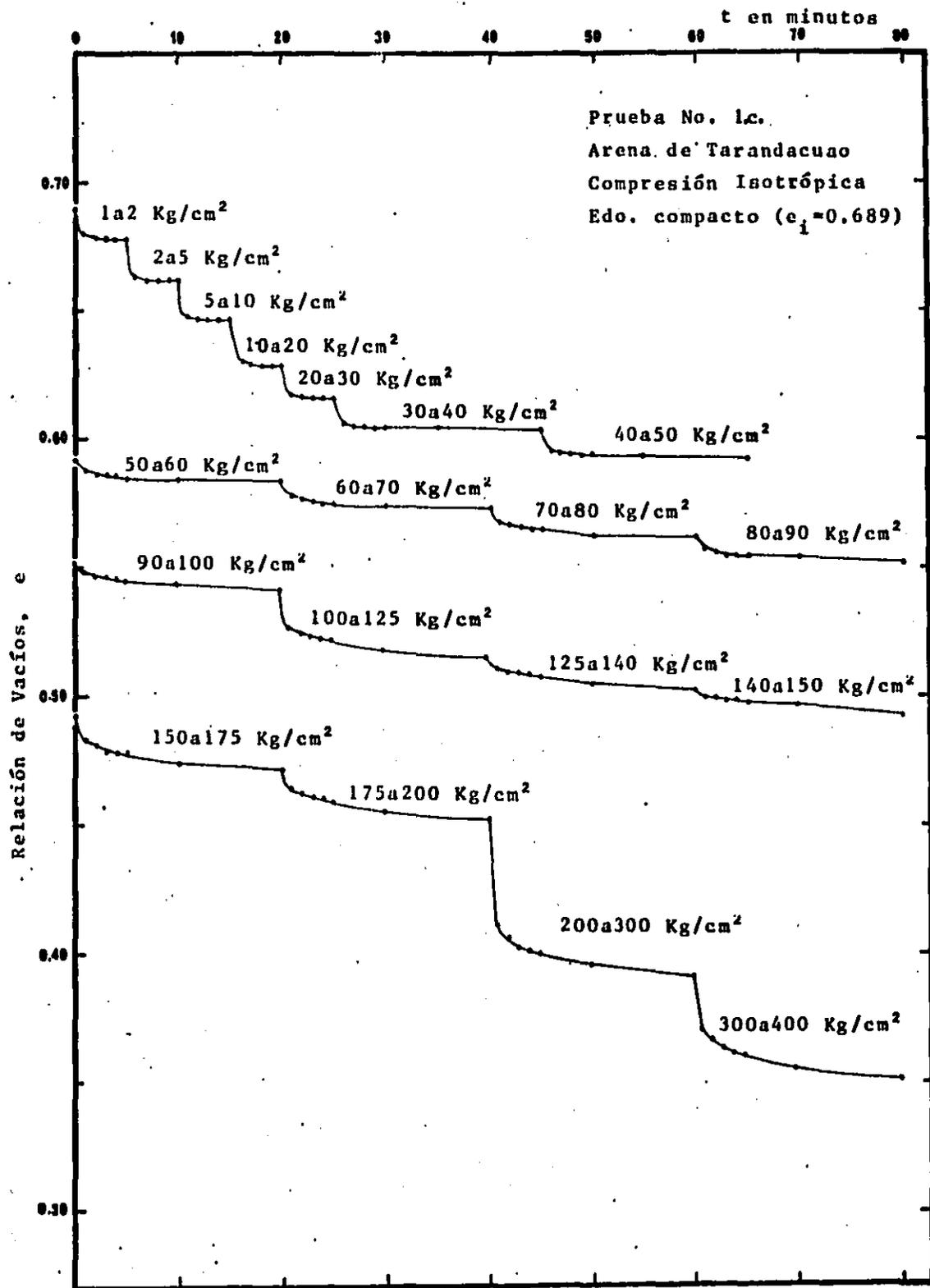


Fig. 10. Curvas Relación de Vacíos vs tiempo

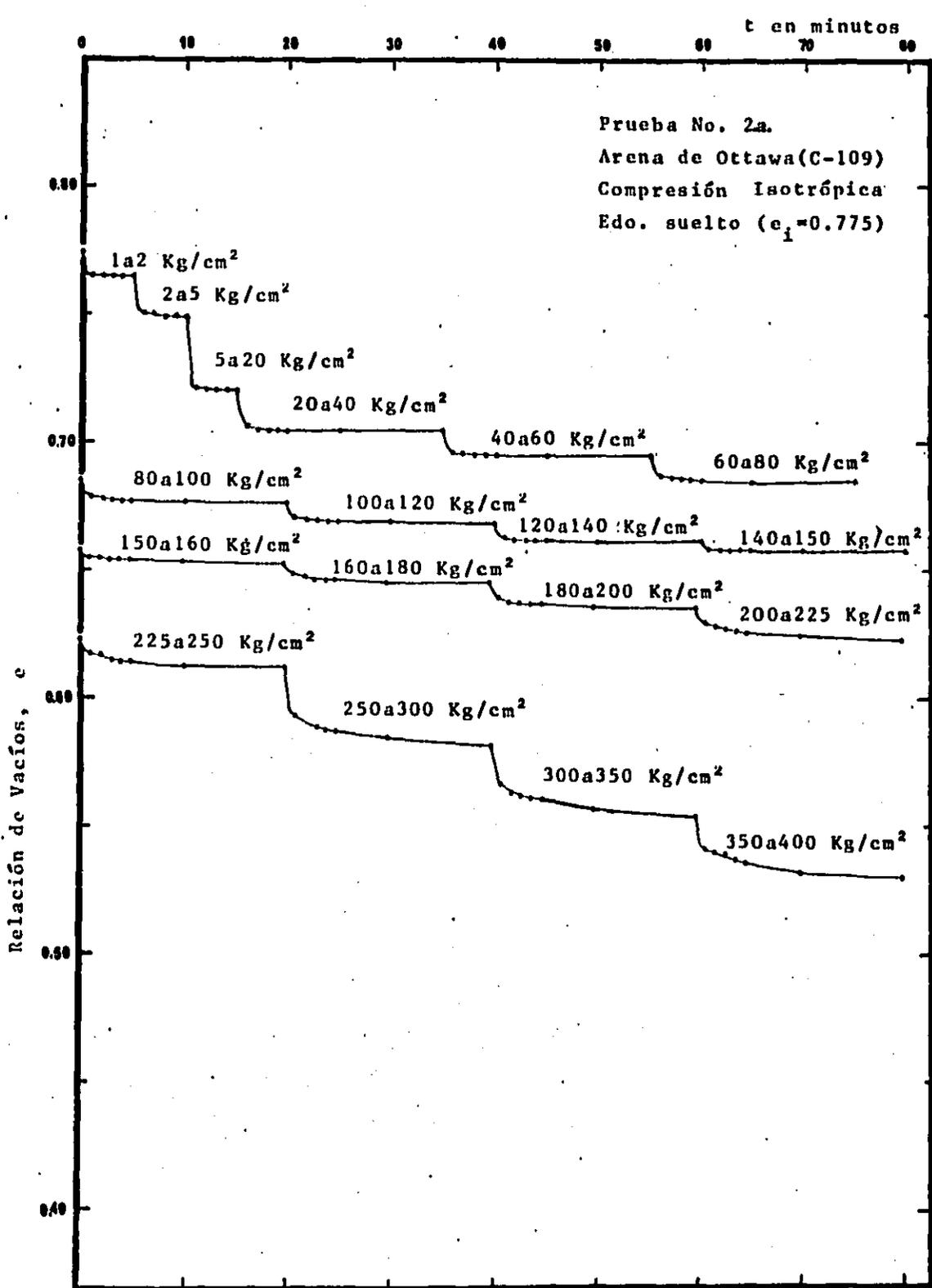


Fig. 11. Curvas Relación de Vacíos vs tiempo

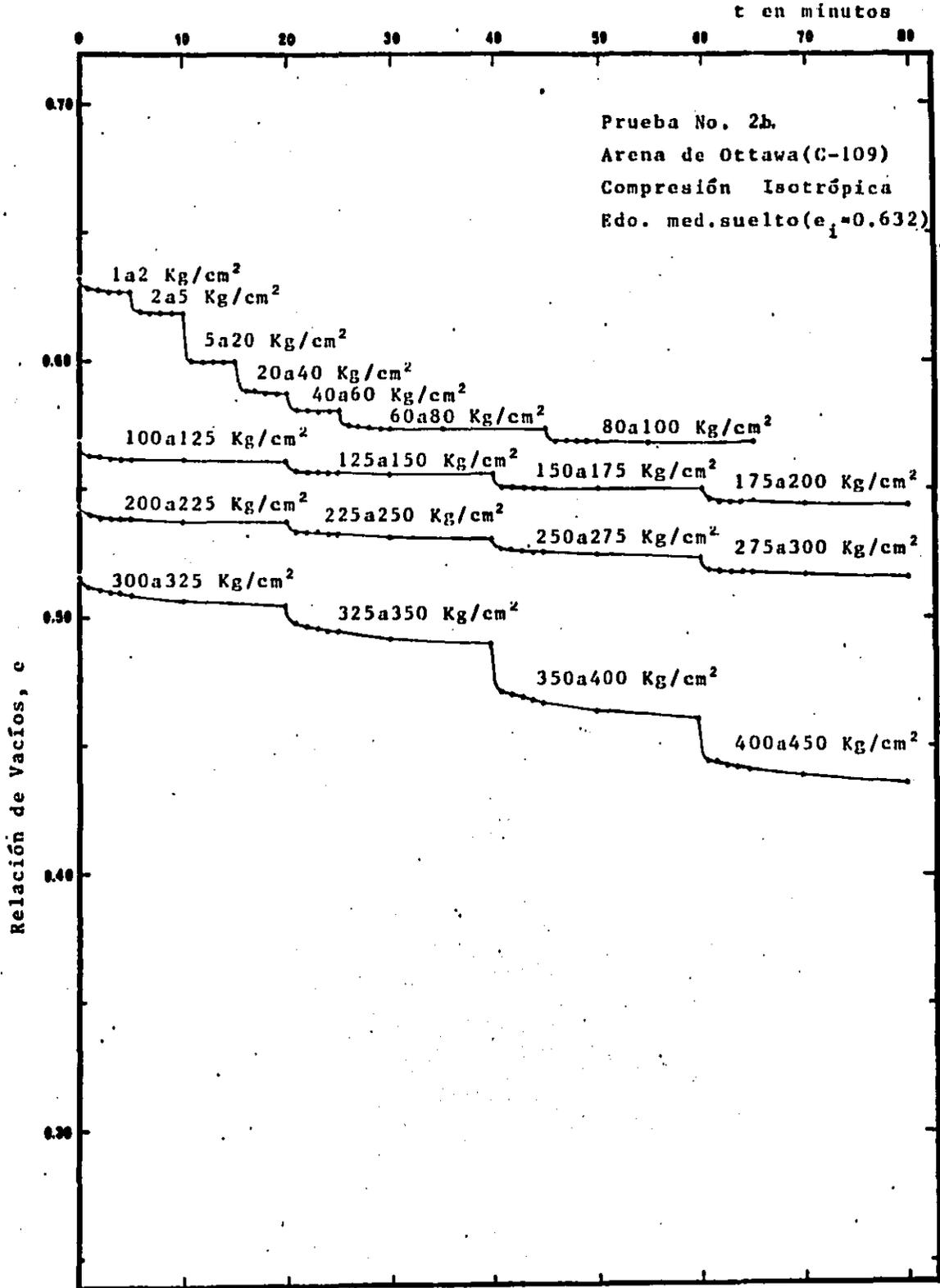


Fig. 12. Curvas Relación de Vacíos vs tiempo

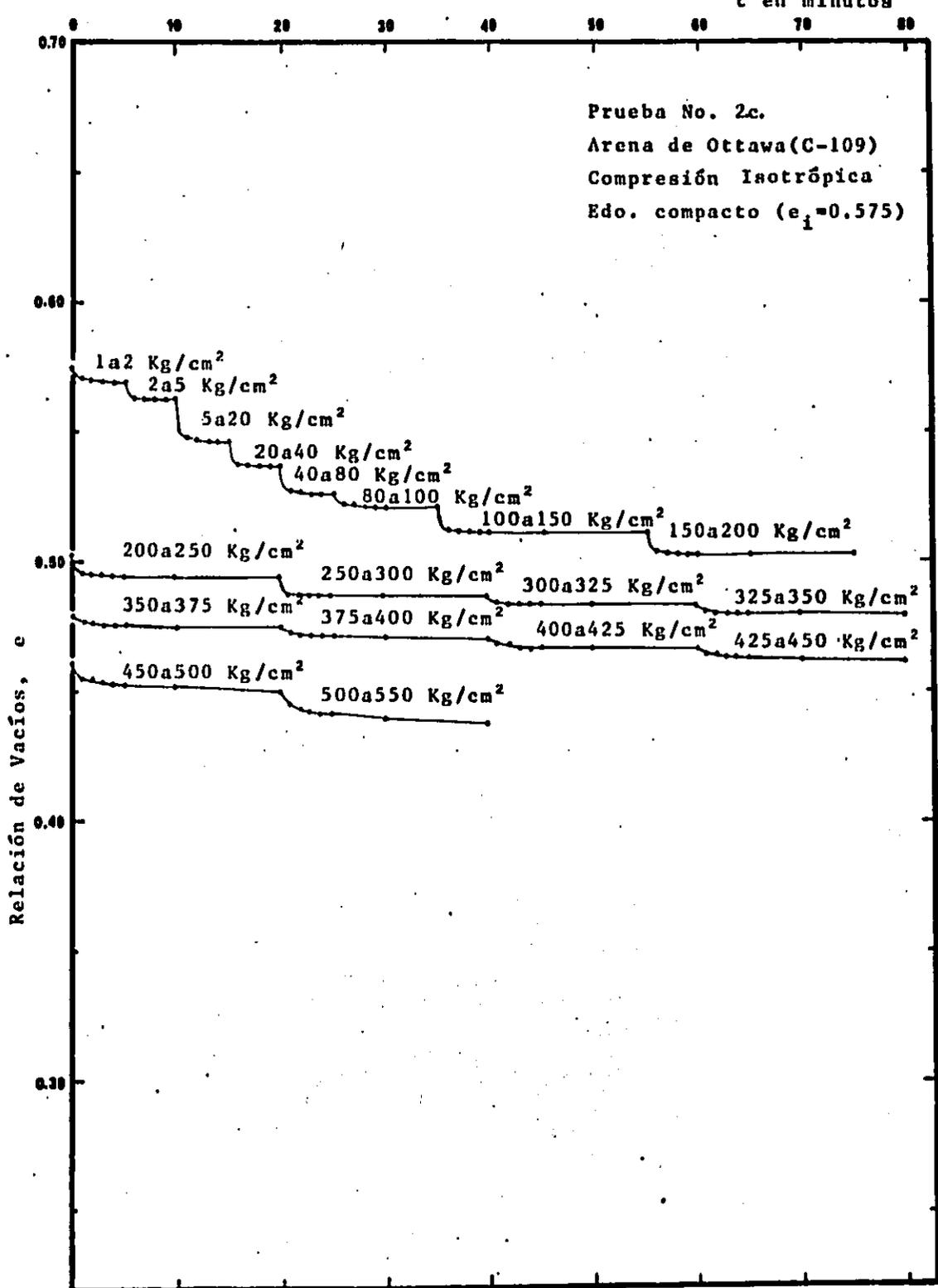


Fig. 13. Curvas Relación de Vacíos vs tiempo

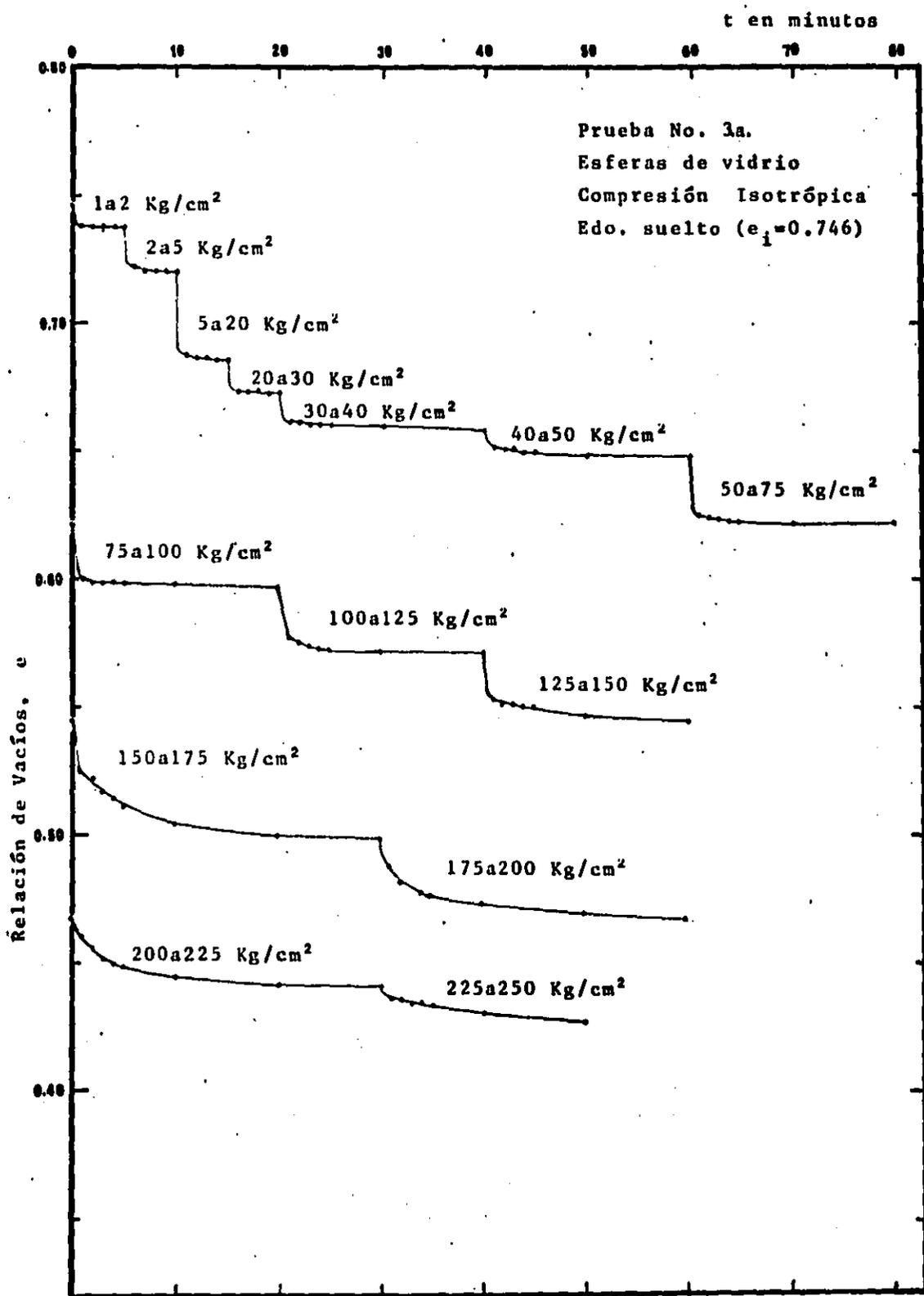


Fig. 14. Curvas Relación de Vacíos vs tiempo

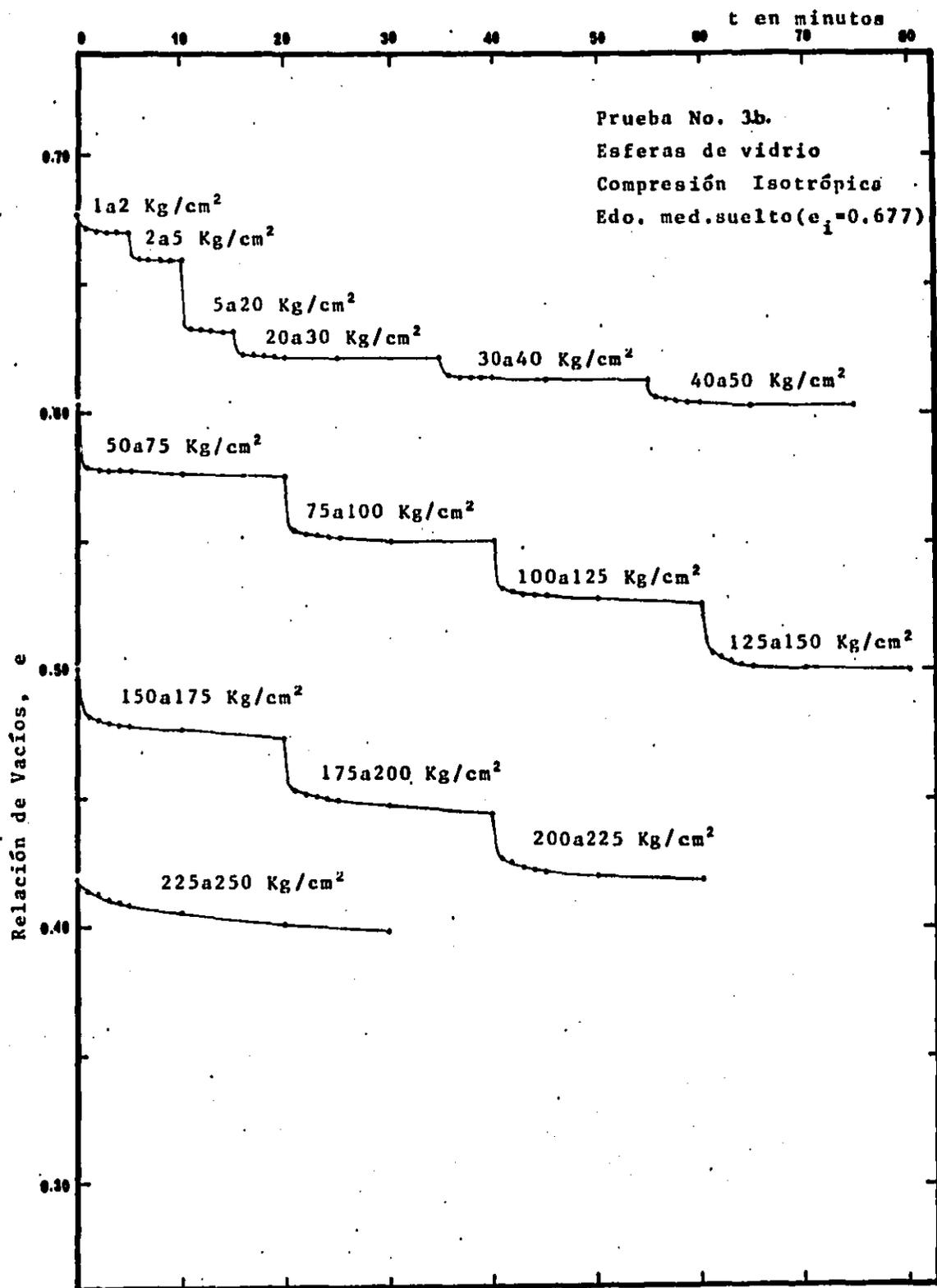


Fig. 15. Curvas Relación de Vacíos vs tiempo

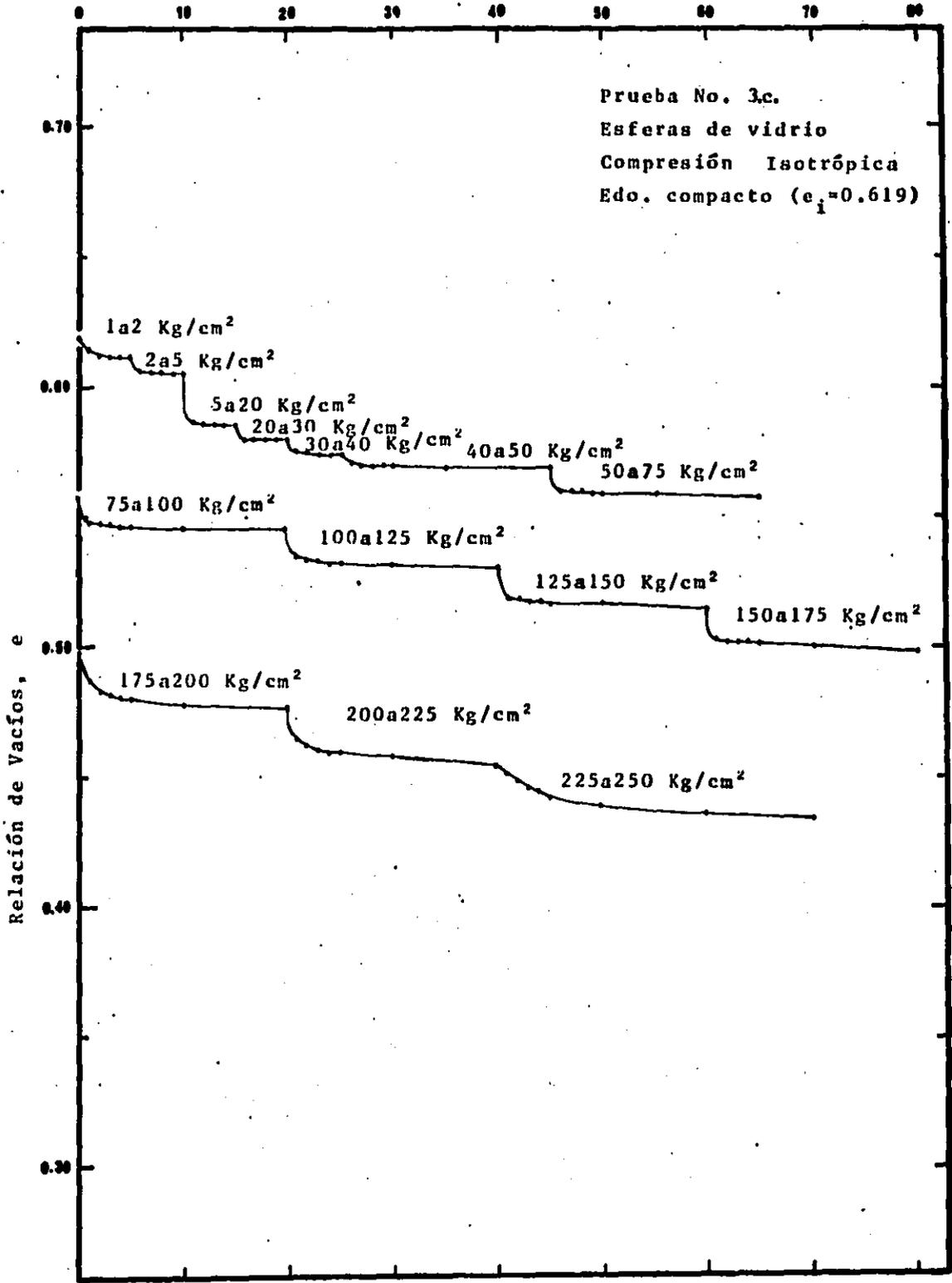


Fig. 16. Curvas Relación de Vacíos vs tiempo



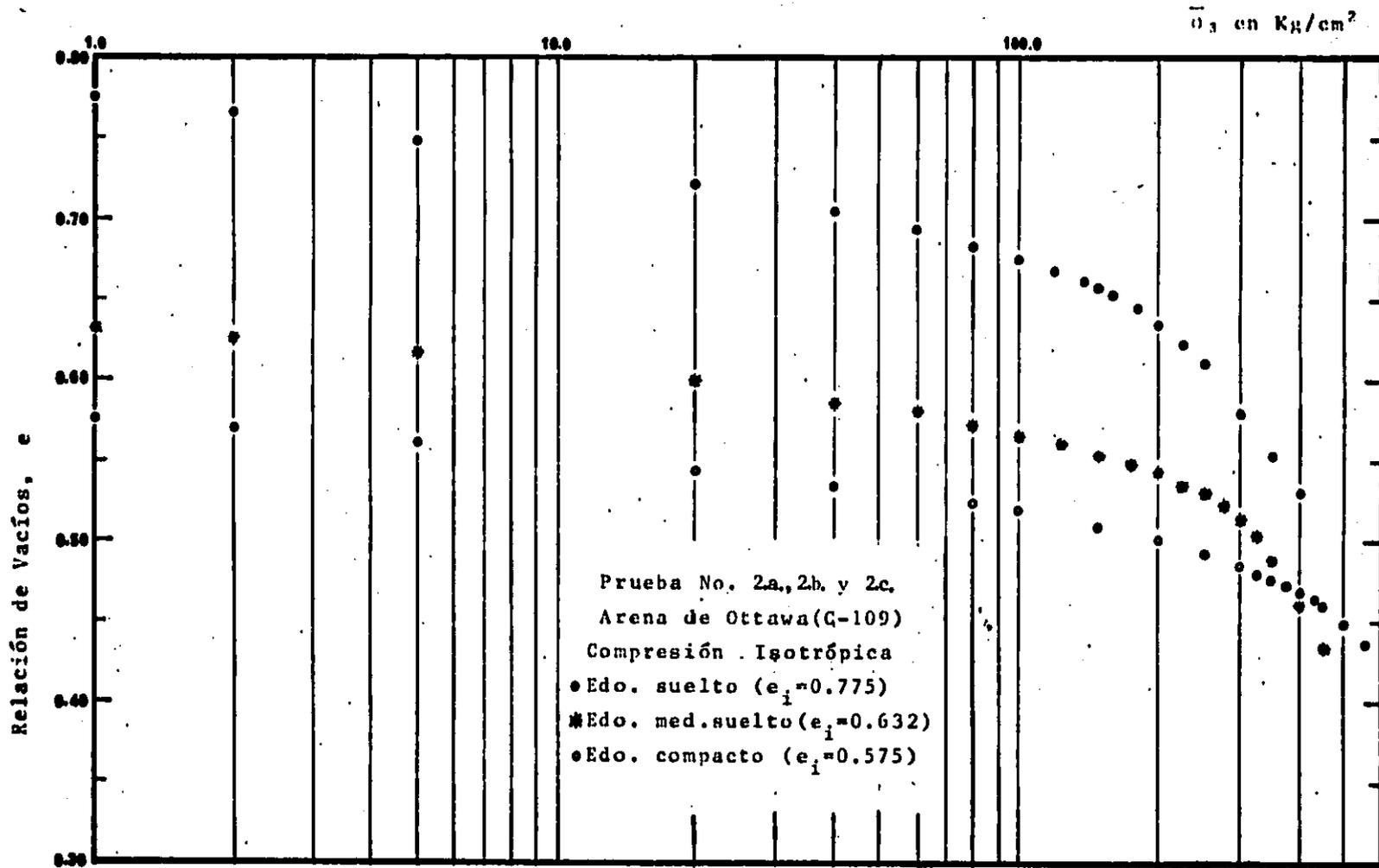


Fig. 18. Curvas de Compresibilidad

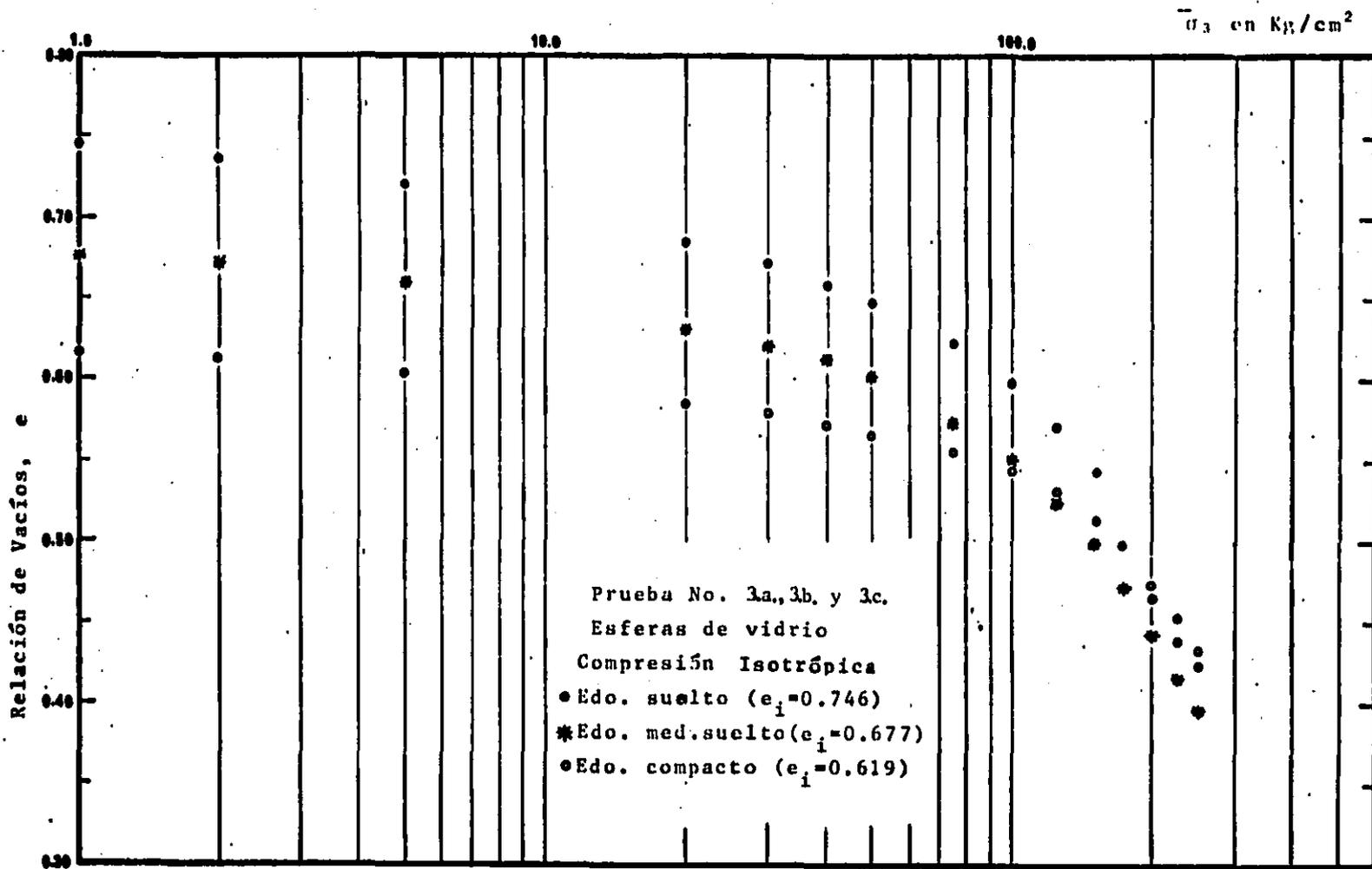


Fig. 19. Curvas de Compresibilidad

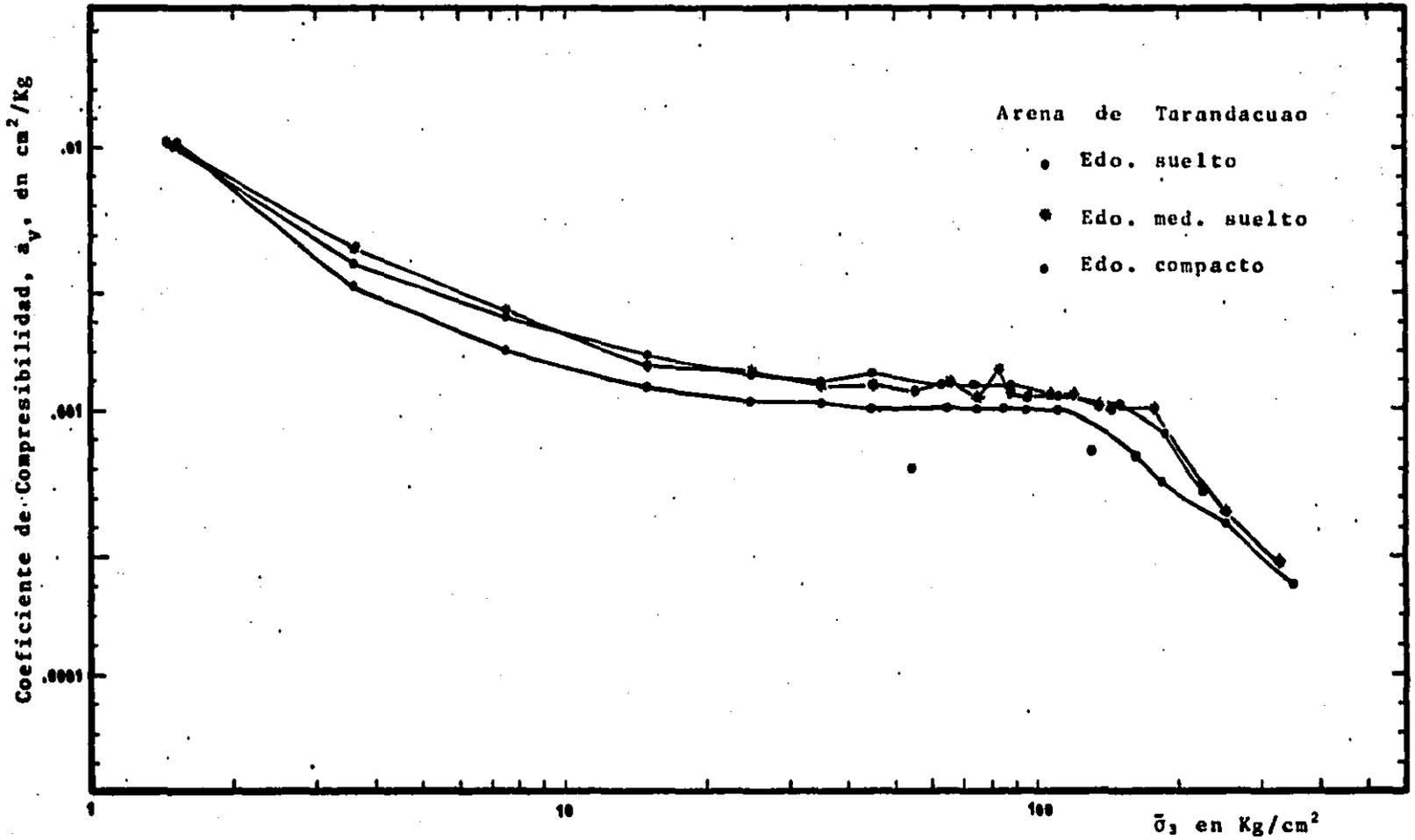


Fig 20. Coeficiente de Compresibilidad vs  $\bar{\sigma}_3$

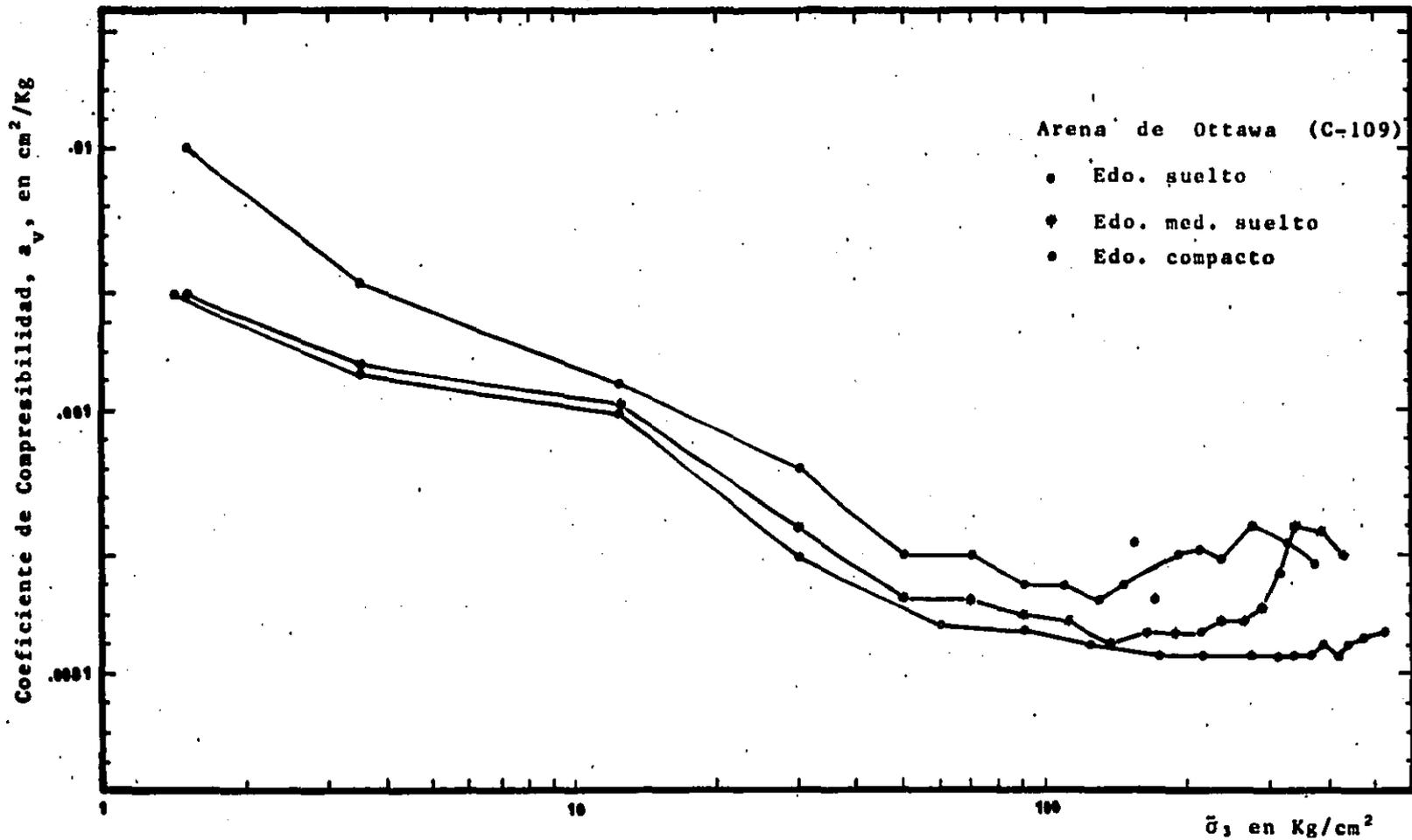


Fig 21 Coeficiente de Compresibilidad vs  $\bar{\sigma}_v$

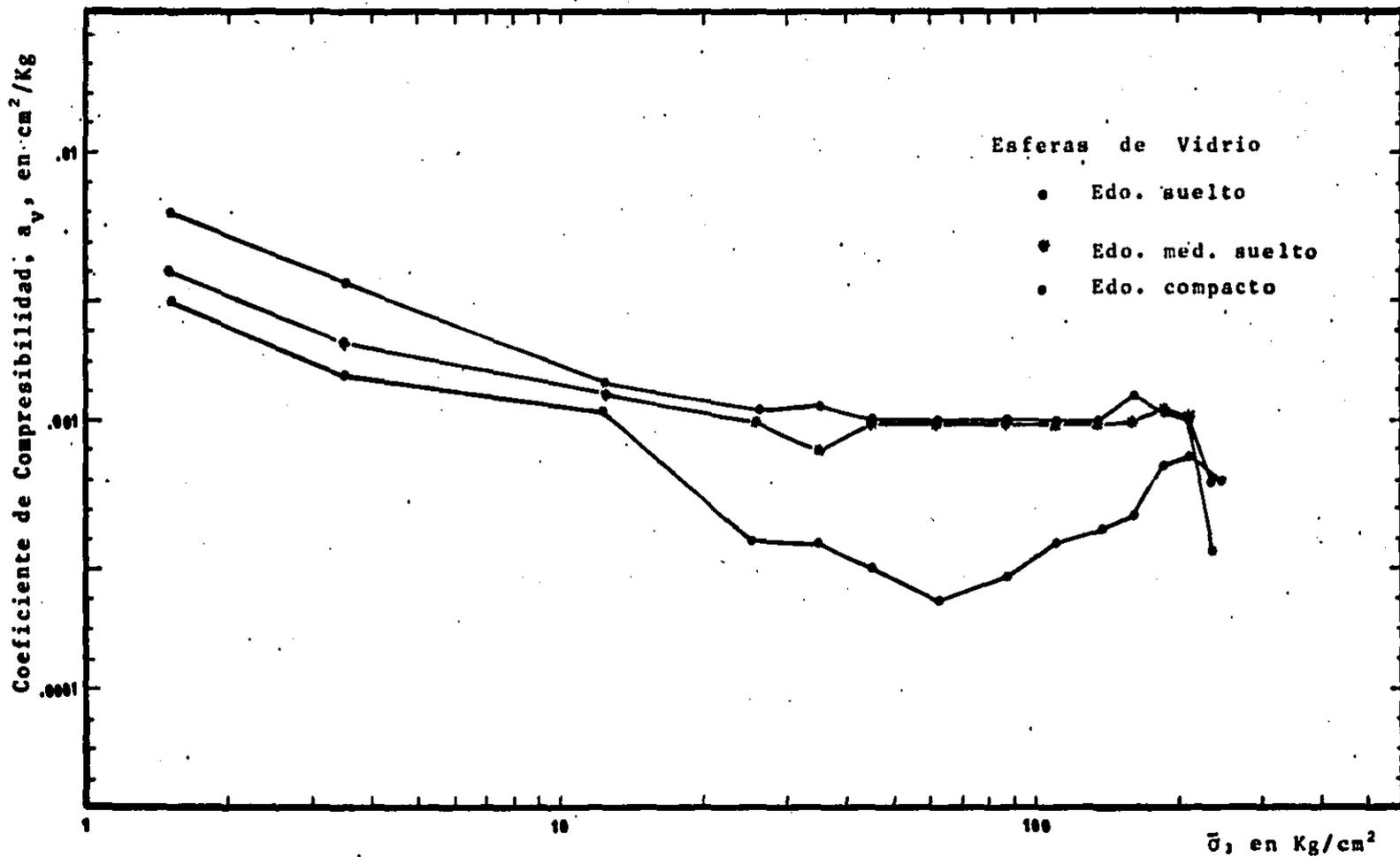
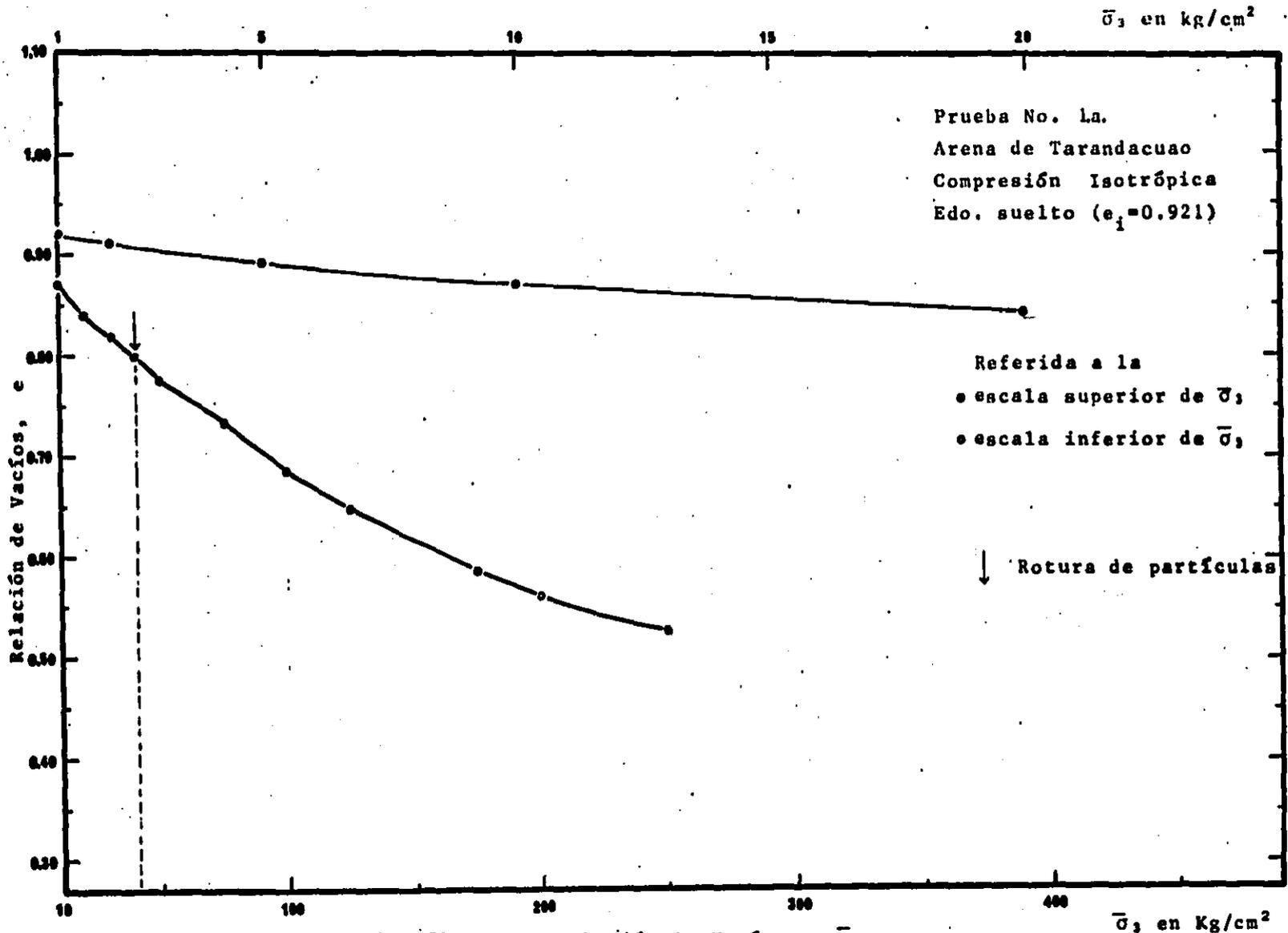


Fig 22. Coeficiente de Compresibilidad vs  $\bar{\sigma}_1$



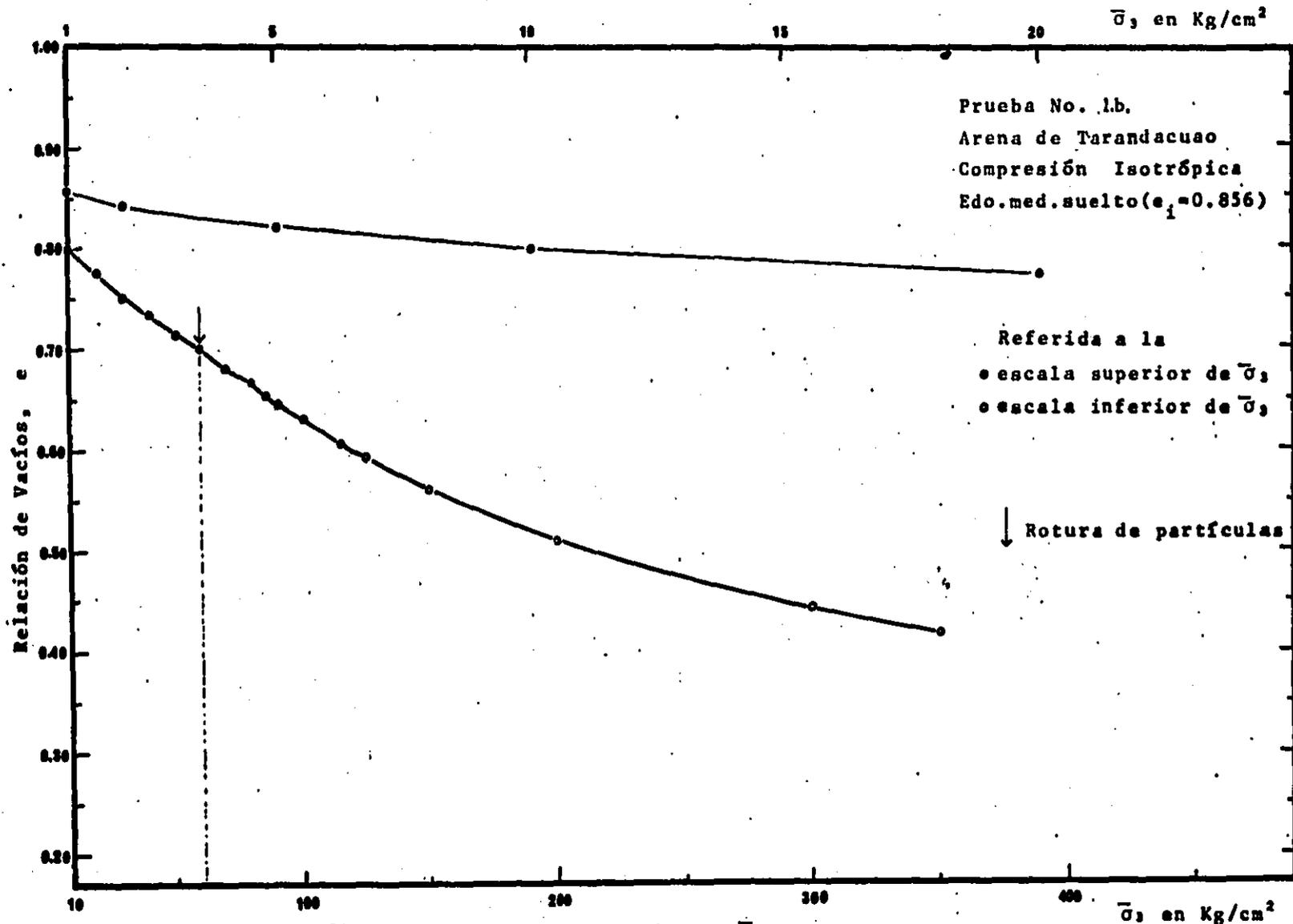
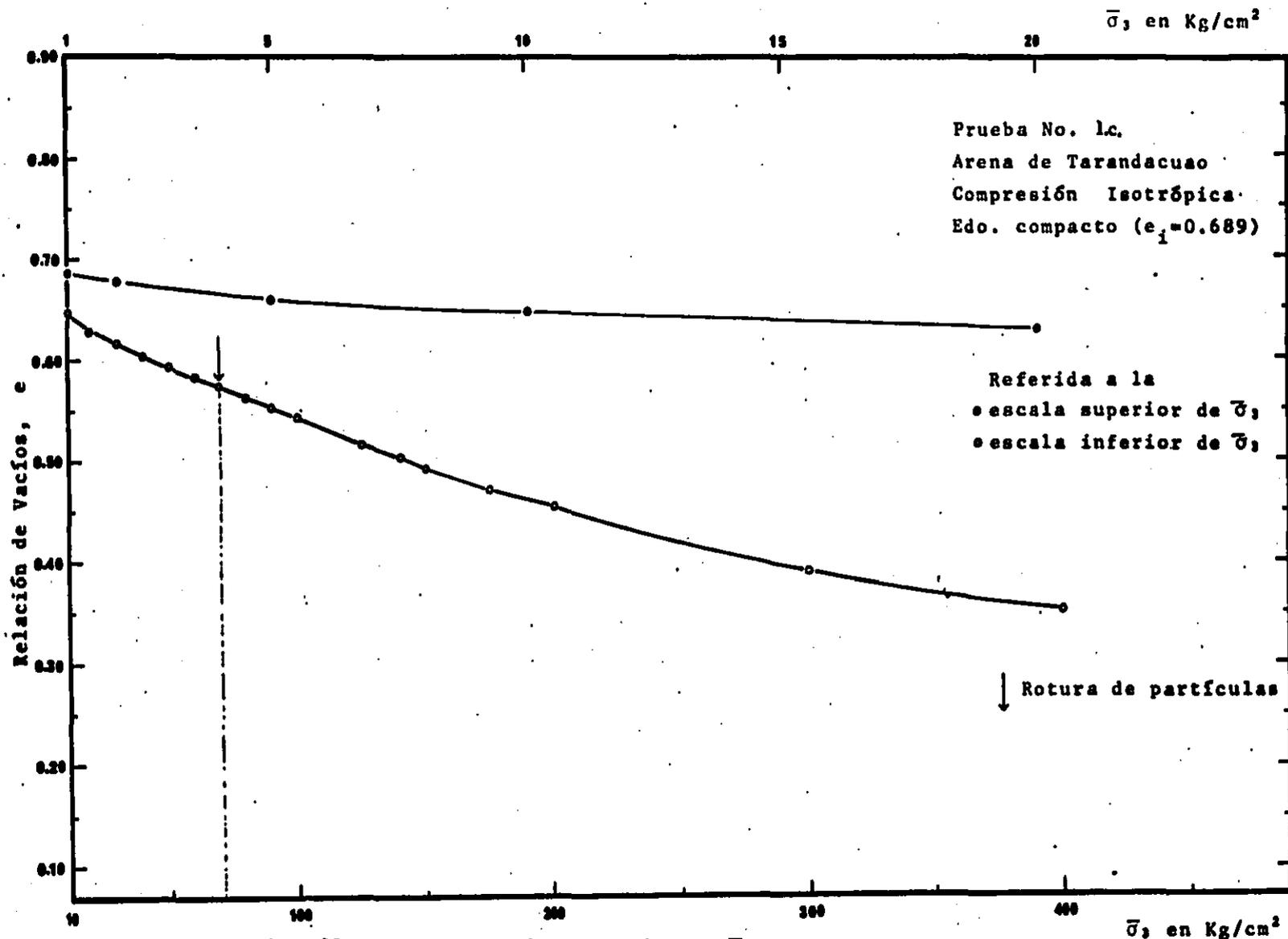


Fig. 24. Curva Relación de Vacíos vs  $\bar{\sigma}_v$



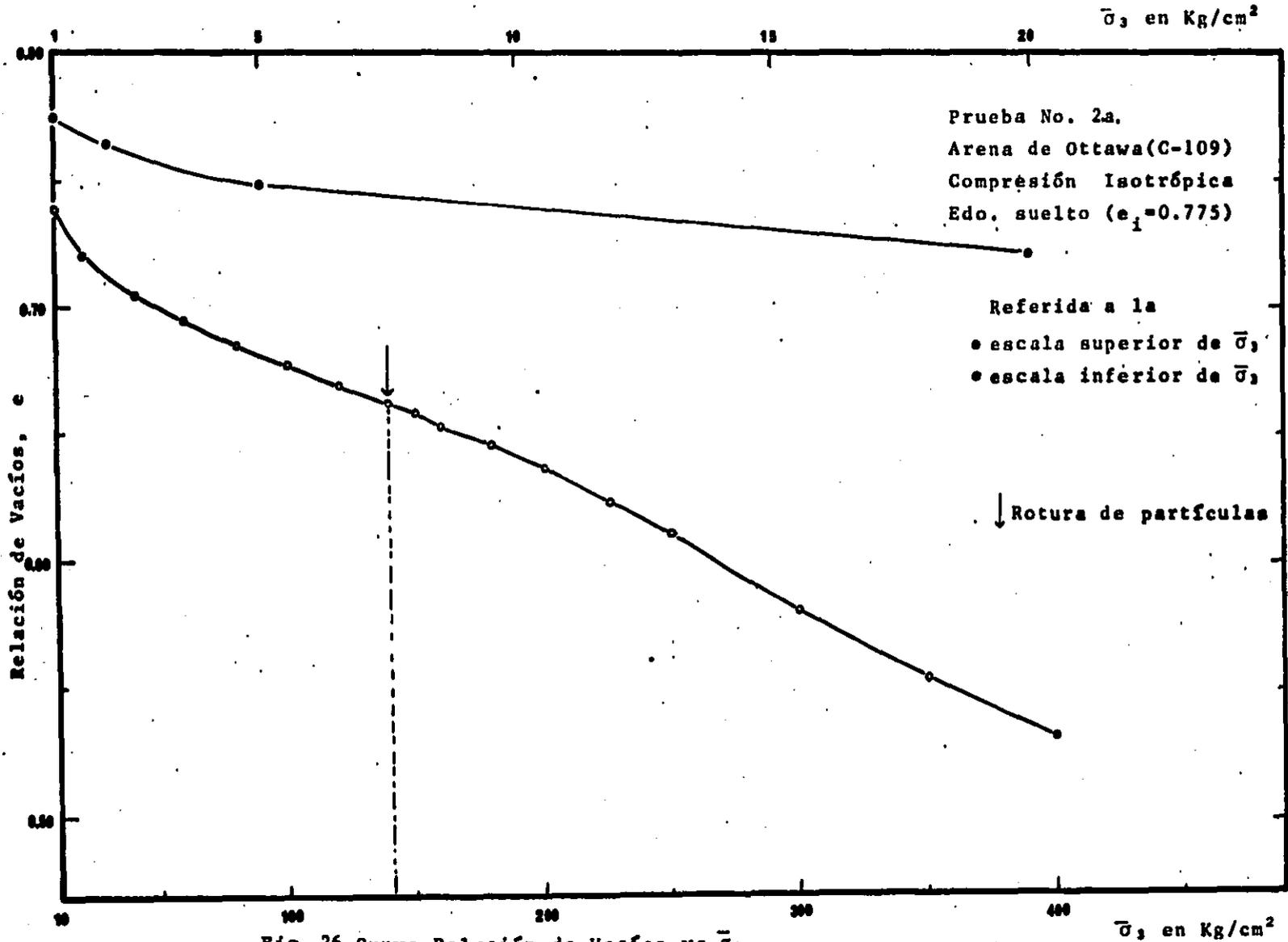


Fig. 26. Curva Relación de Vacíos vs  $\bar{\sigma}_3$

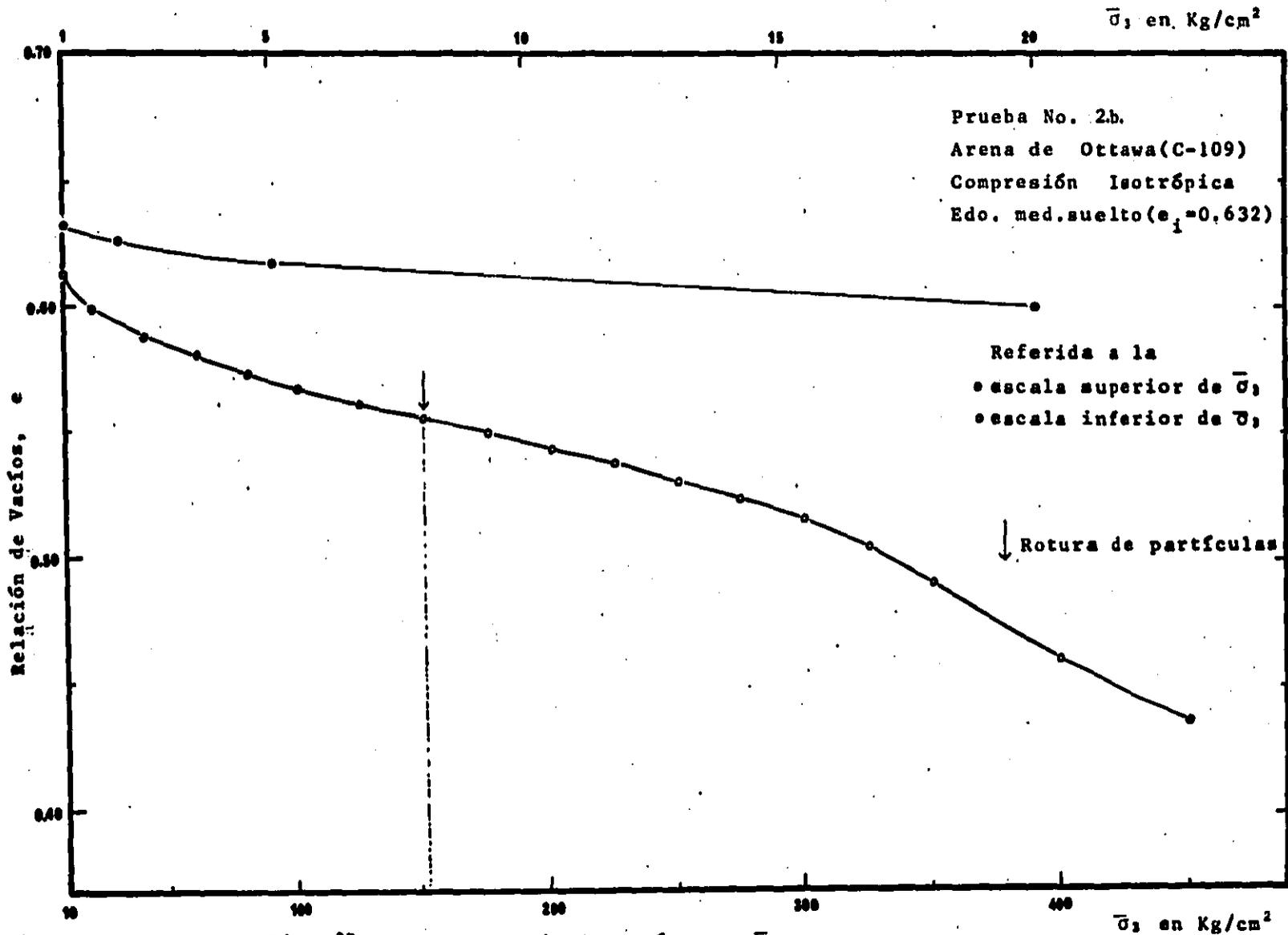


Fig. 27. Curva Relación de Vacíos vs  $\bar{\sigma}_3$

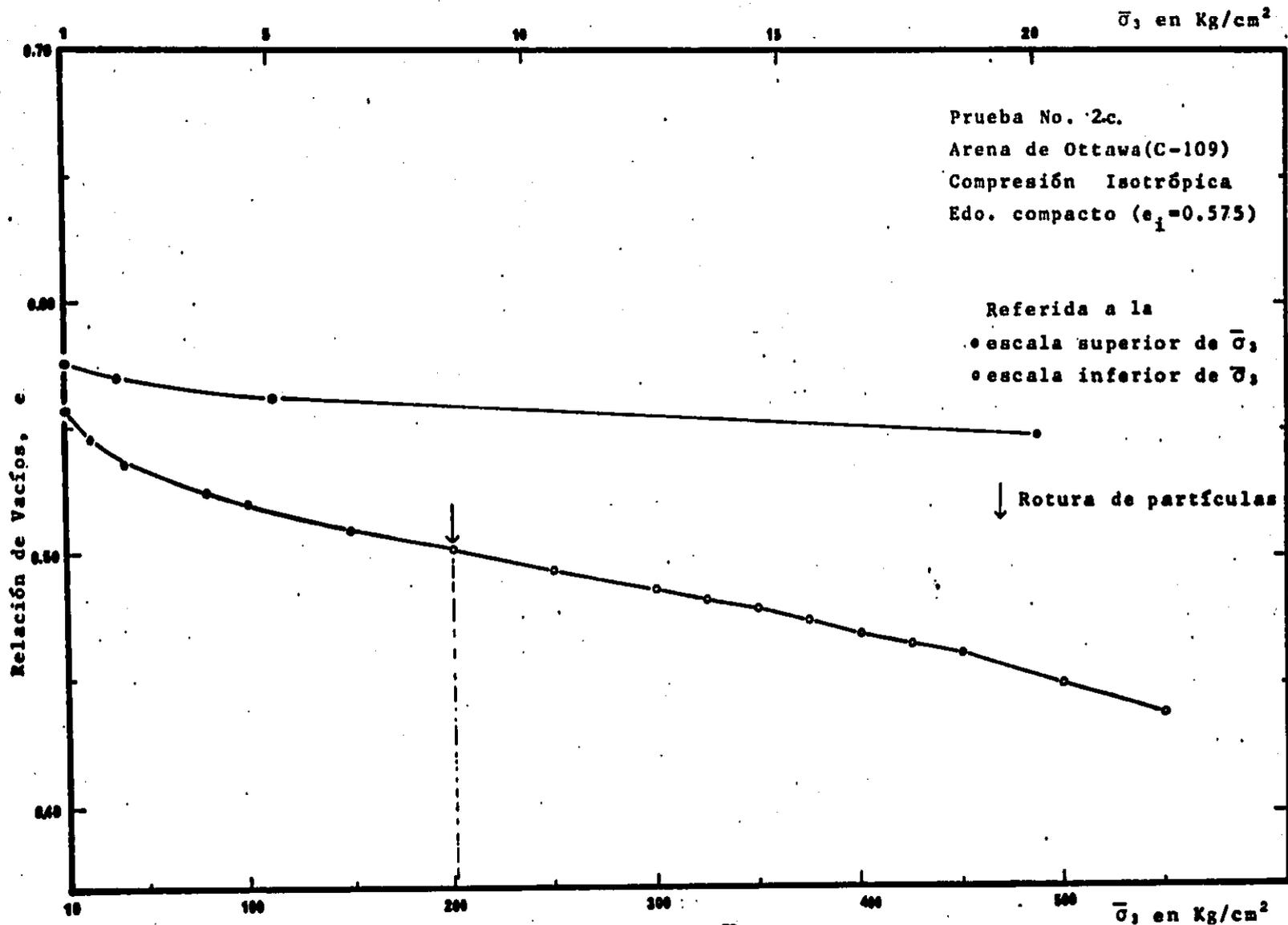


Fig. 28. Curva de Relación de Vacíos vs  $\bar{\sigma}_3$

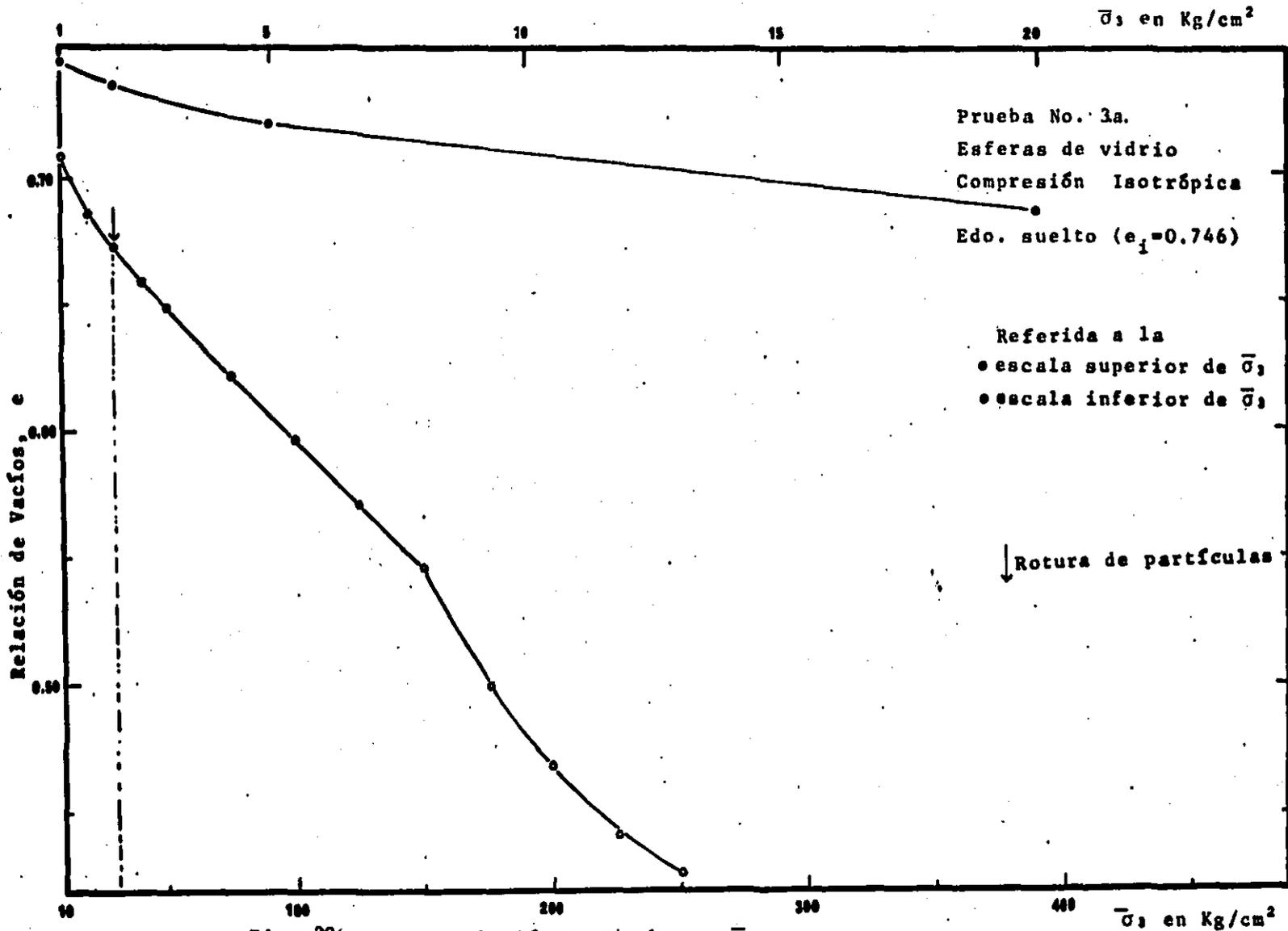


Fig. 29. Curva Relación de Vacíos vs  $\bar{\sigma}_3$

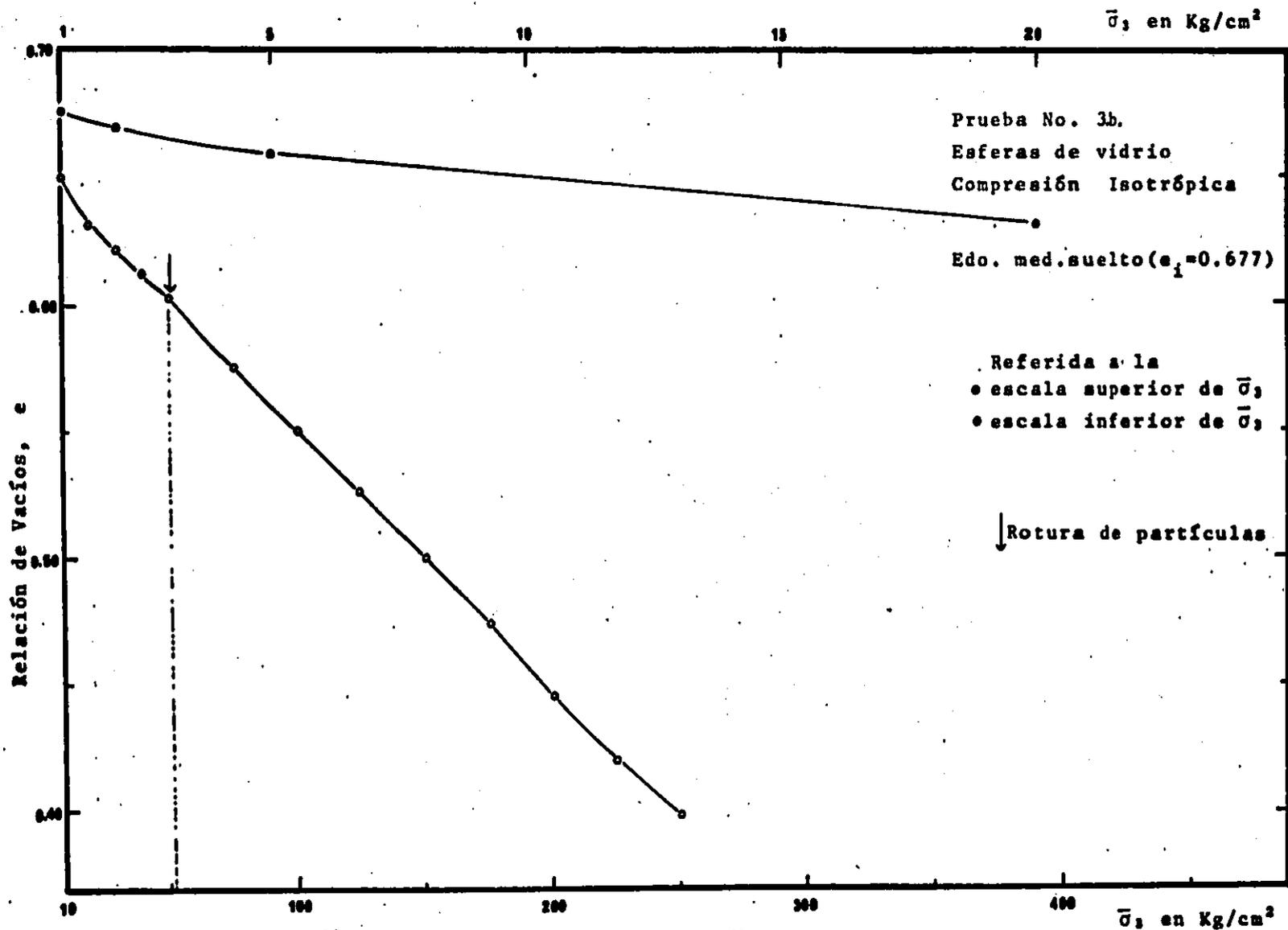


Fig. 30. Curva Relación de Vacíos vs  $\bar{\sigma}_3$

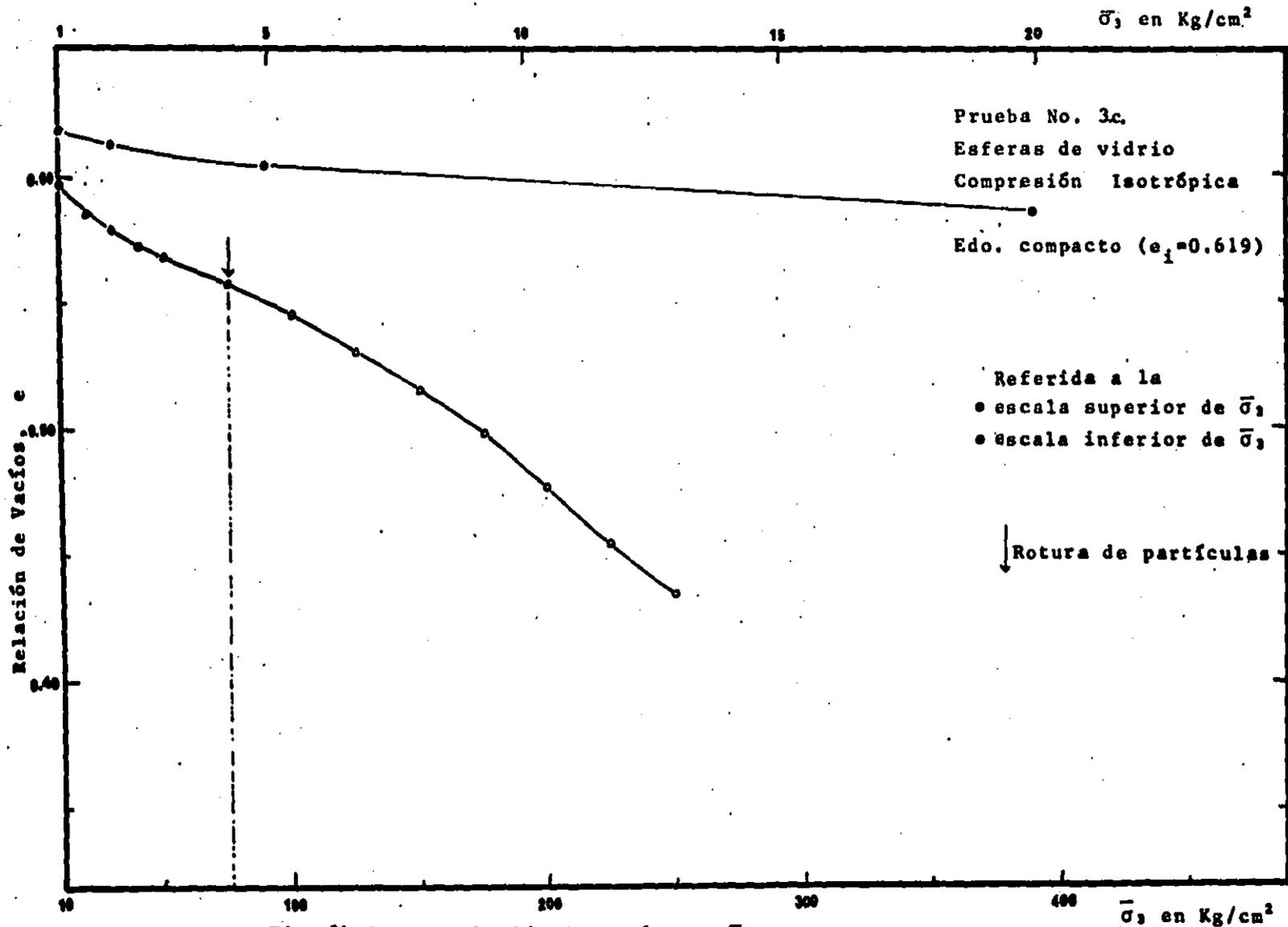


Fig. 31. Curva Relación de Vacíos vs  $\bar{\sigma}_3$





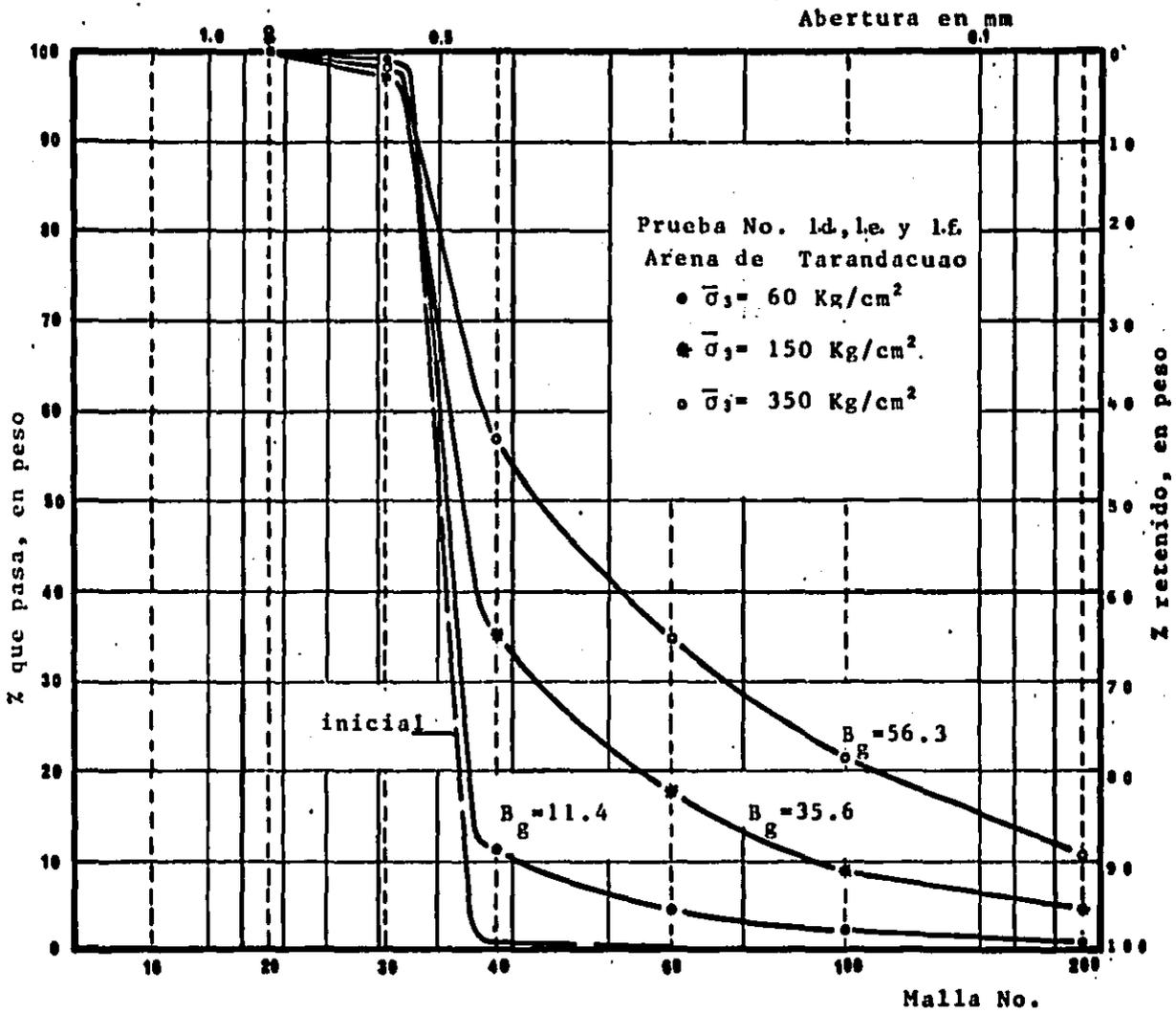


Fig. 34. Granulometría inicial y final

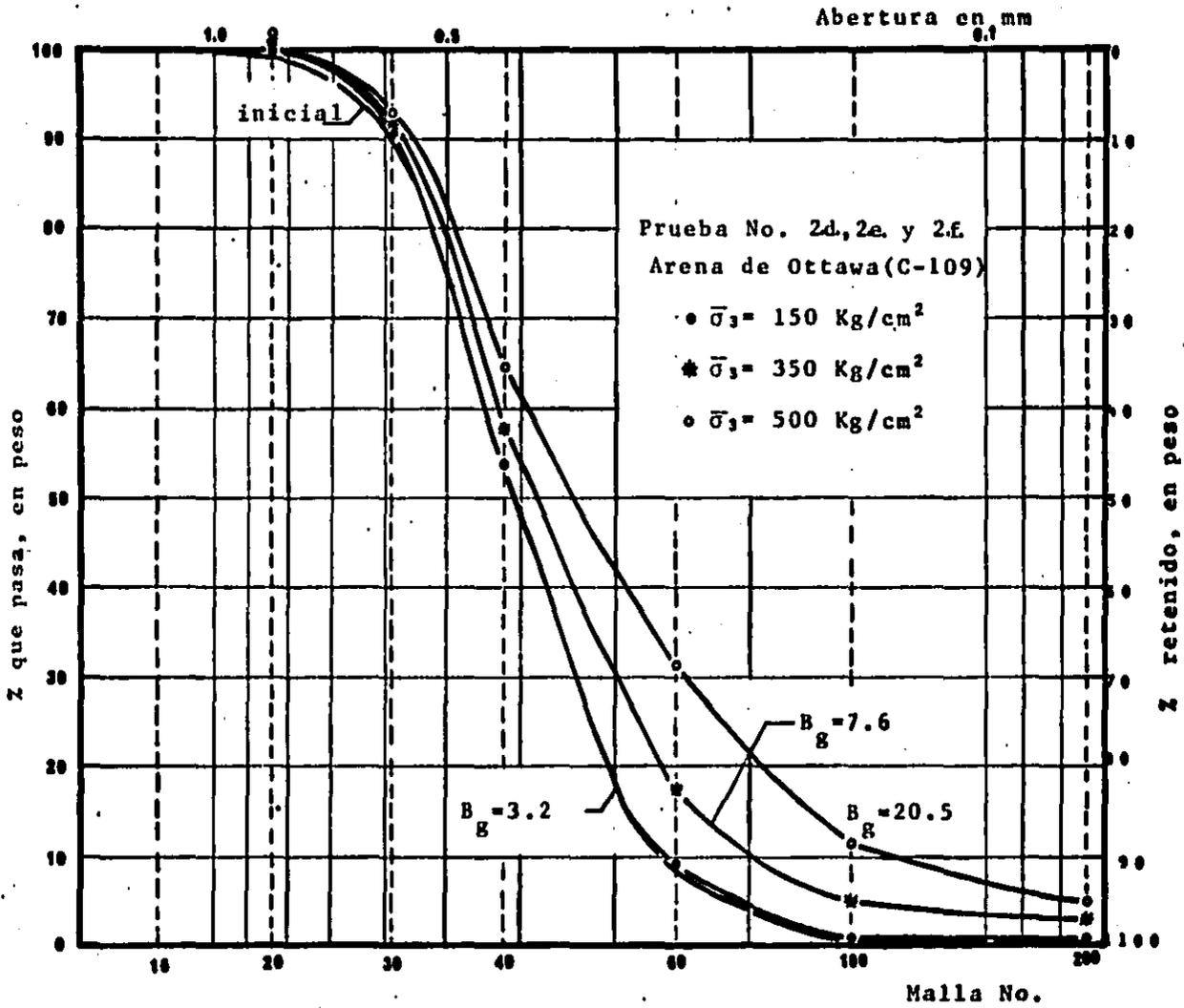


Fig. 35. Granulometría inicial y final

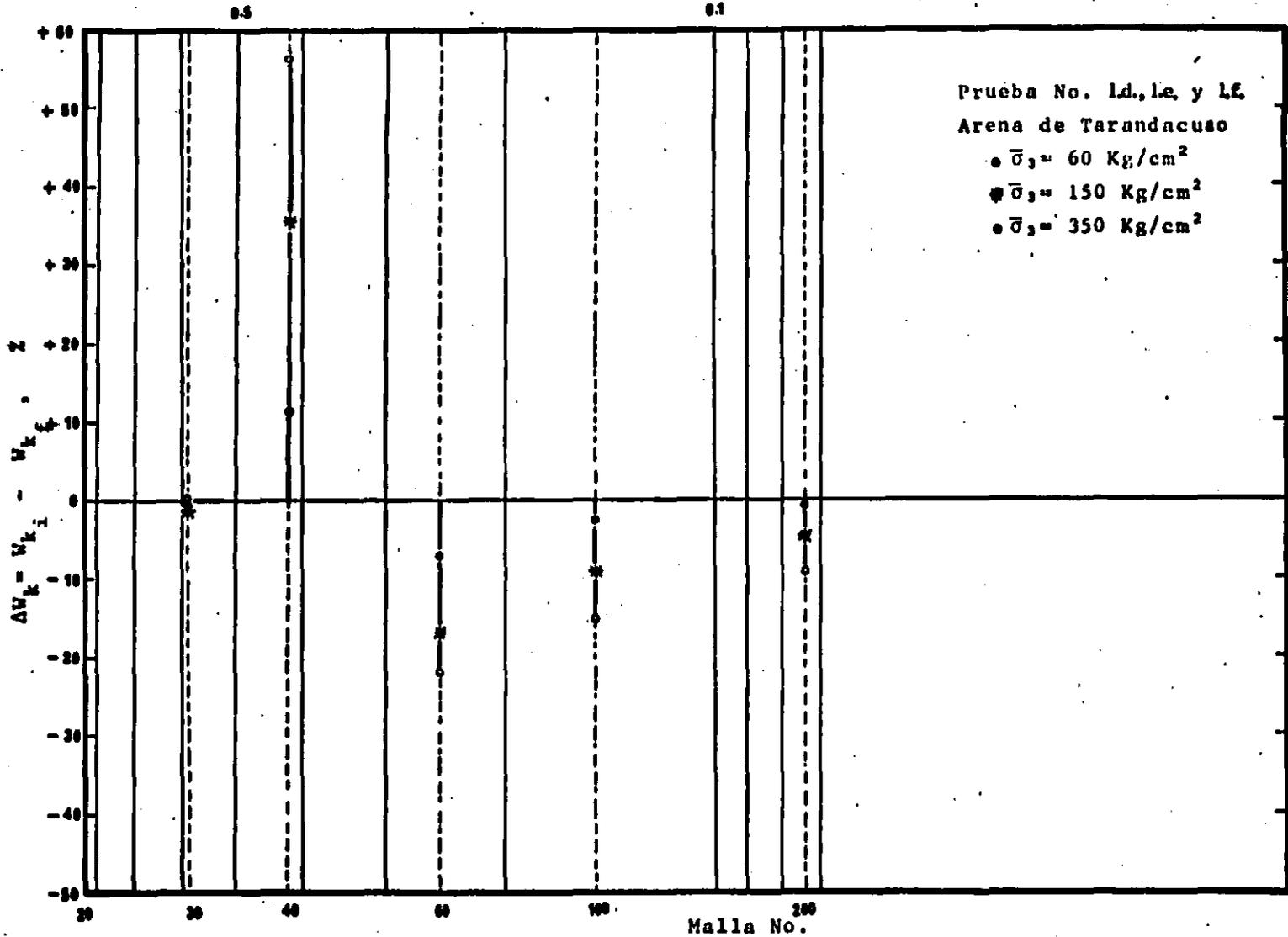


Fig. 36. Diagrama de  $\Delta W_k$

tamaño de partículas en mm

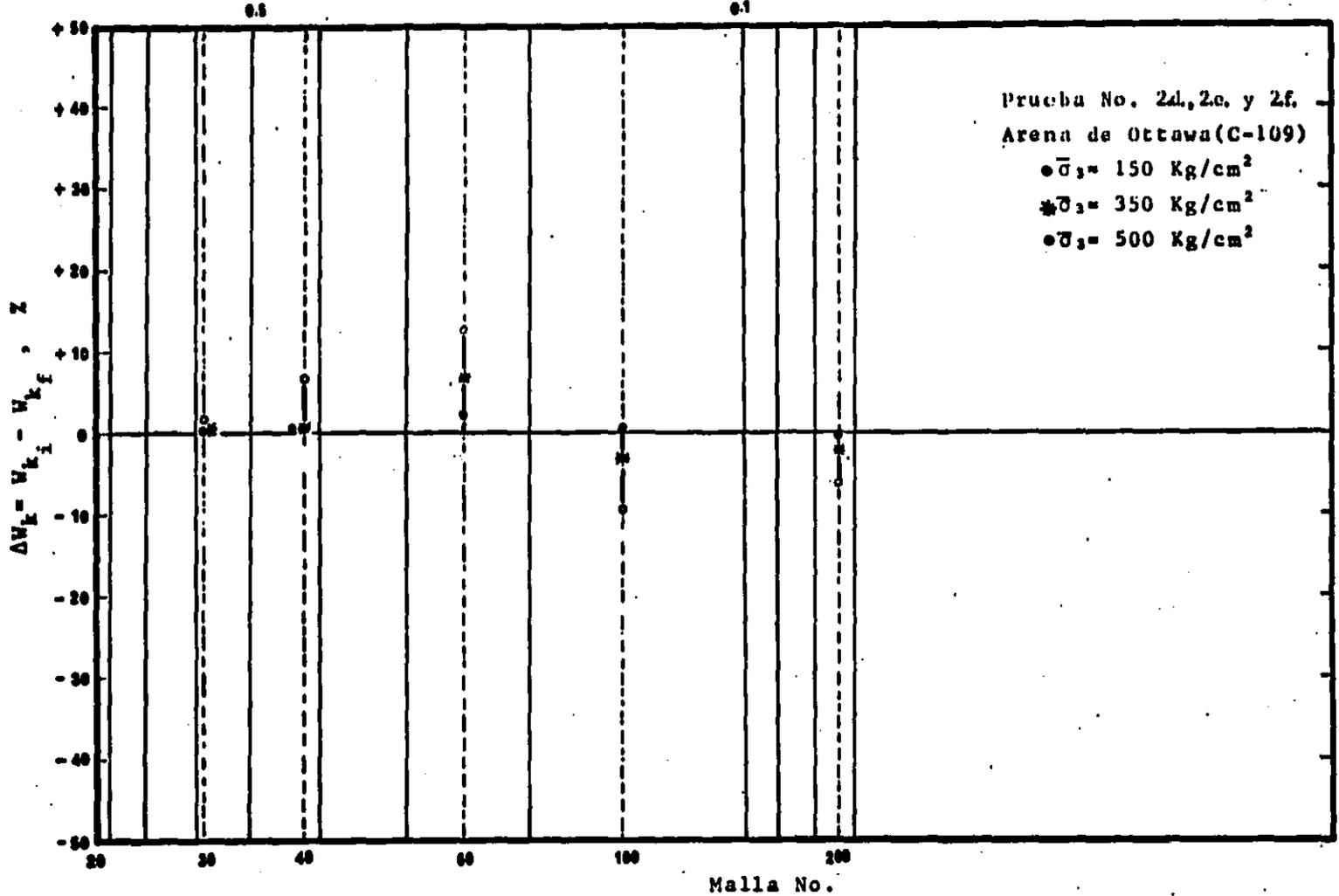


Fig. 37. Diagramas de  $\Delta W_k$

Arena de Tarandacua  
 Compresión Isotrópica  
 Edo. med. suelto

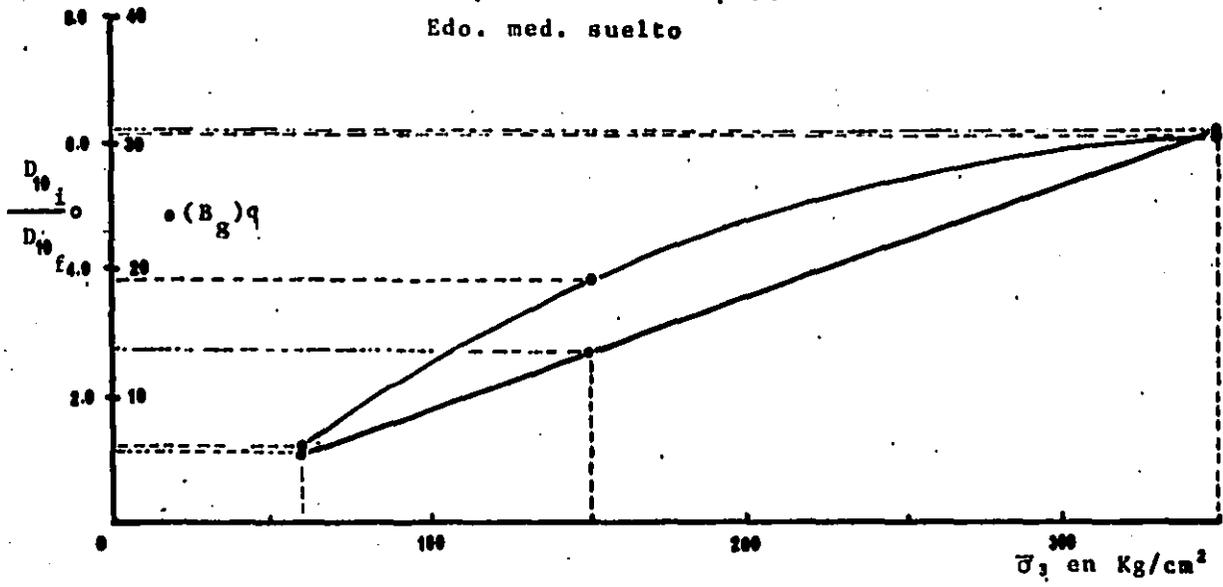


Fig. 38.a. Curva  $D_{wi}/D_{wf} \cdot (B_g)q$  vs  $\bar{\sigma}_3$

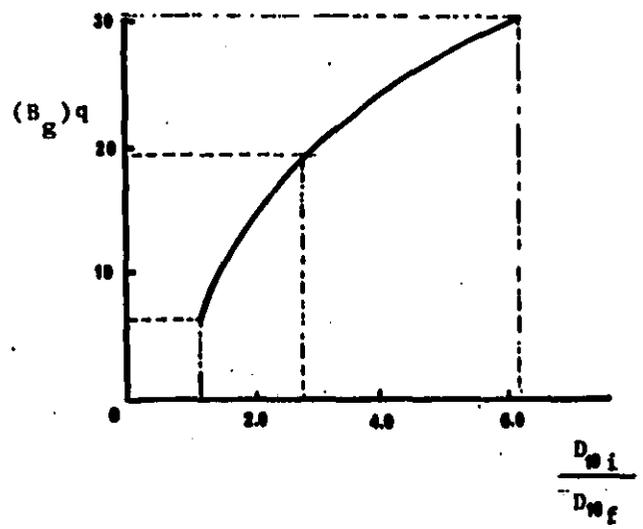


Fig. 38.b. Curva  $(B_g)q$  vs  $D_{wi}/D_{wf}$

Arena de Ottawa(C-109)  
 Compresión Isotrópica  
 Edo. med. suelto

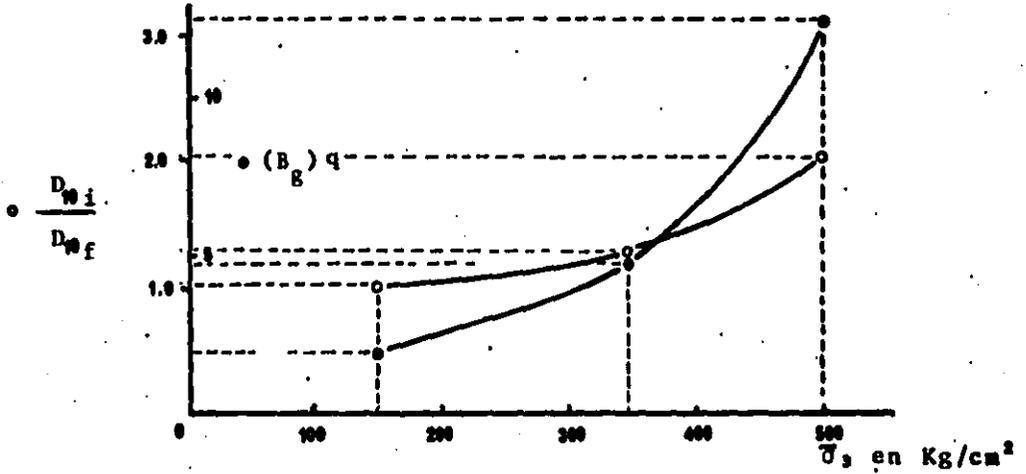


Fig. 39.a. Curva  $D_{wi}/D_{wf}$ ,  $(B_g)q$  vs  $\bar{\sigma}_3$

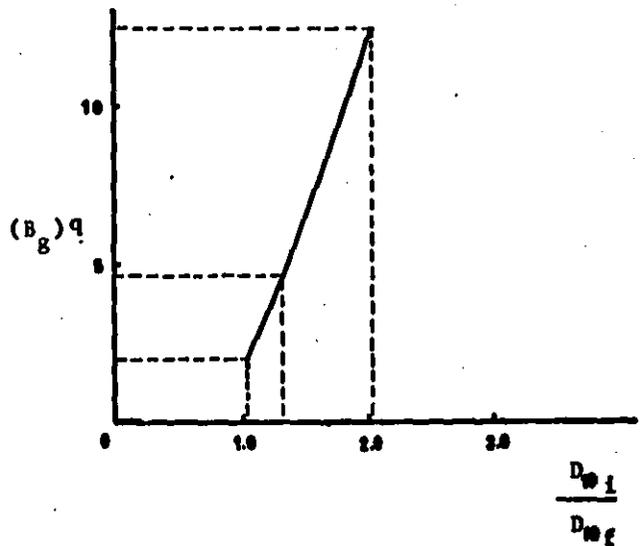


Fig. 39.b. Curva  $(B_g)q$  vs  $D_{wi}/D_{wf}$

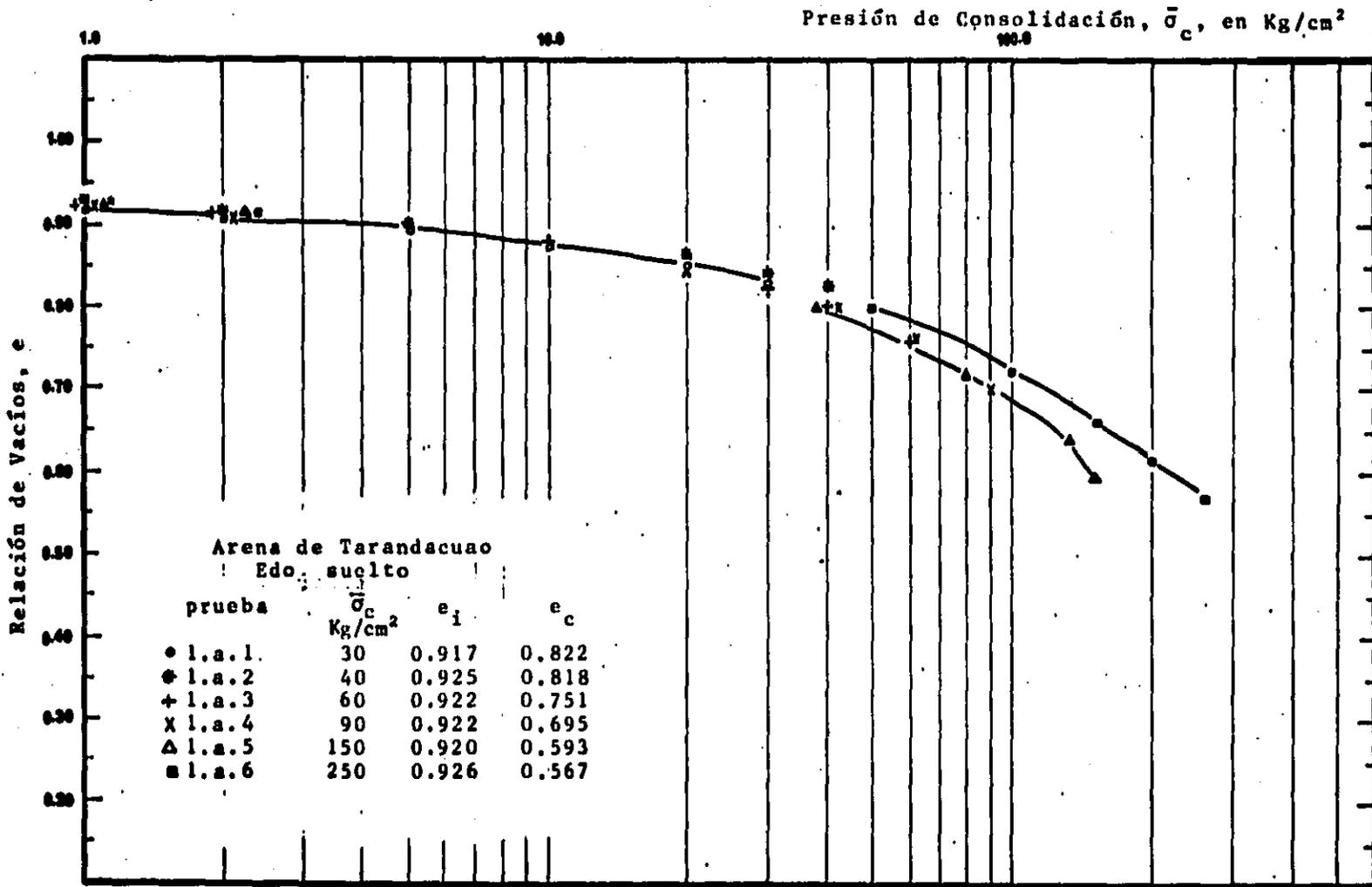


Fig. 40. Curvas de Compresibilidad ( Etapa de Consolidación )

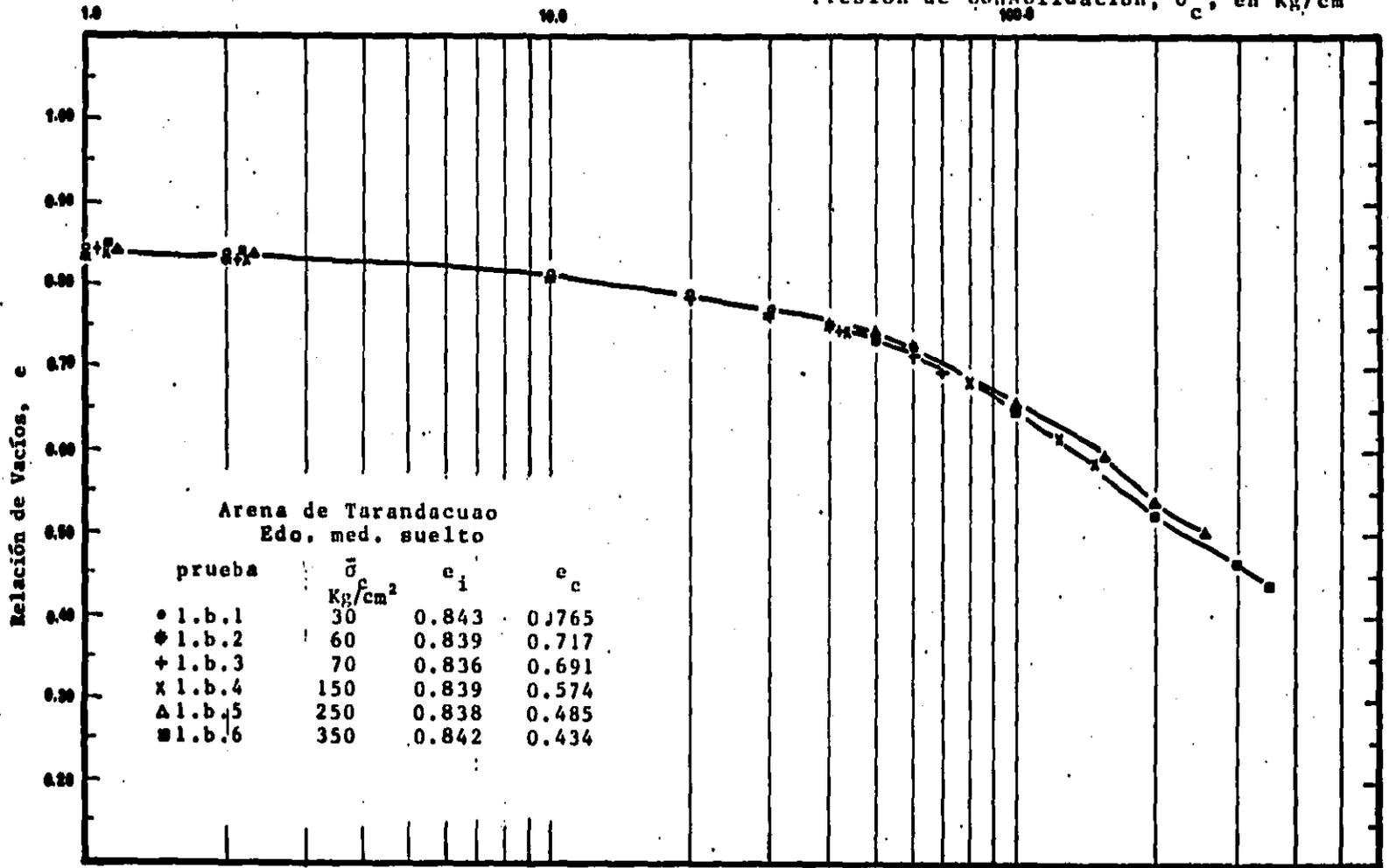


Fig. 41. Curvas de Compresibilidad ( Etapa de Consolidación )

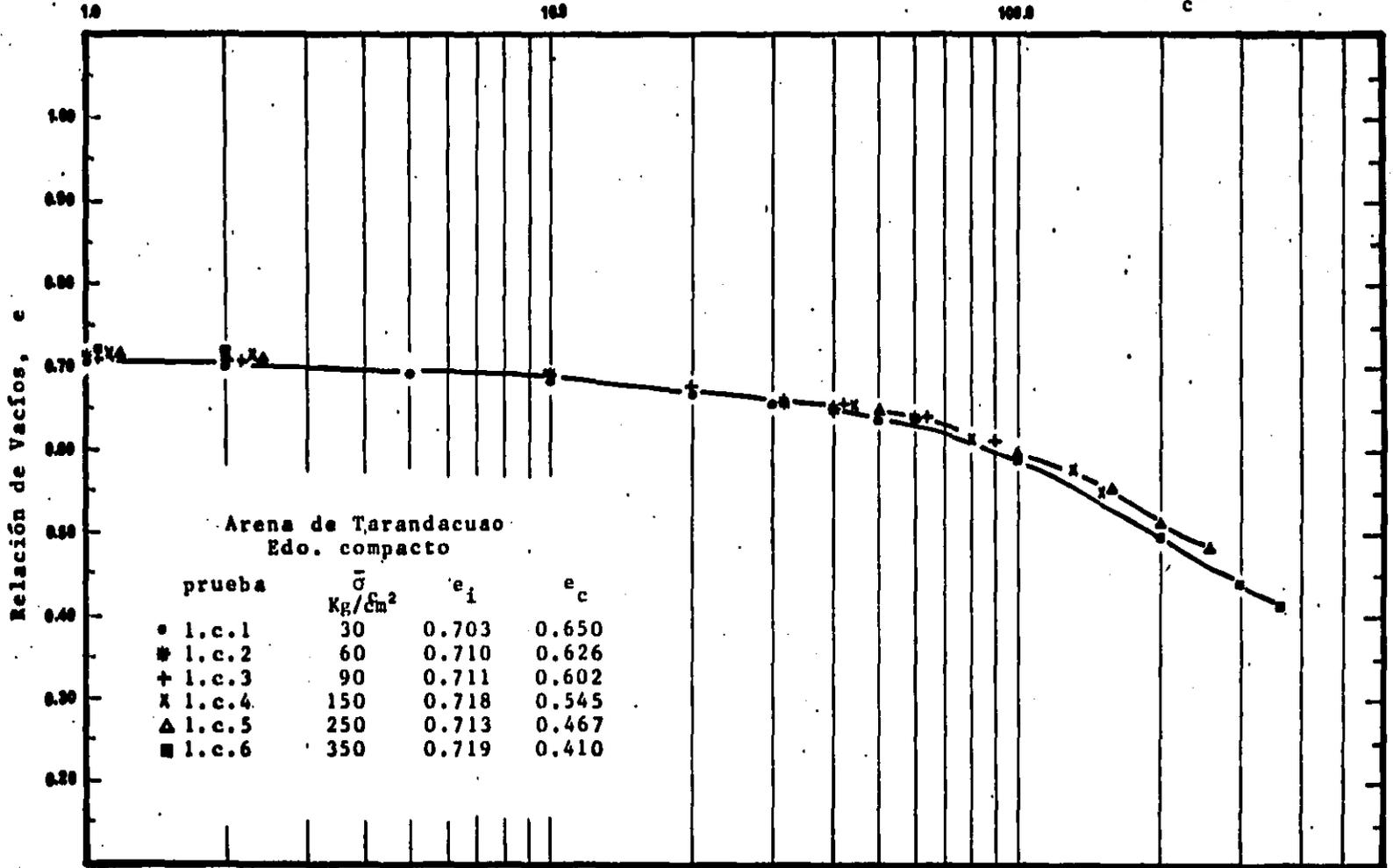


Fig. 42. Curvas de Compresibilidad ( Etapa de Consolidación )

Presión de Consolidación,  $\bar{\sigma}_c$ , en Kg/cm<sup>2</sup>

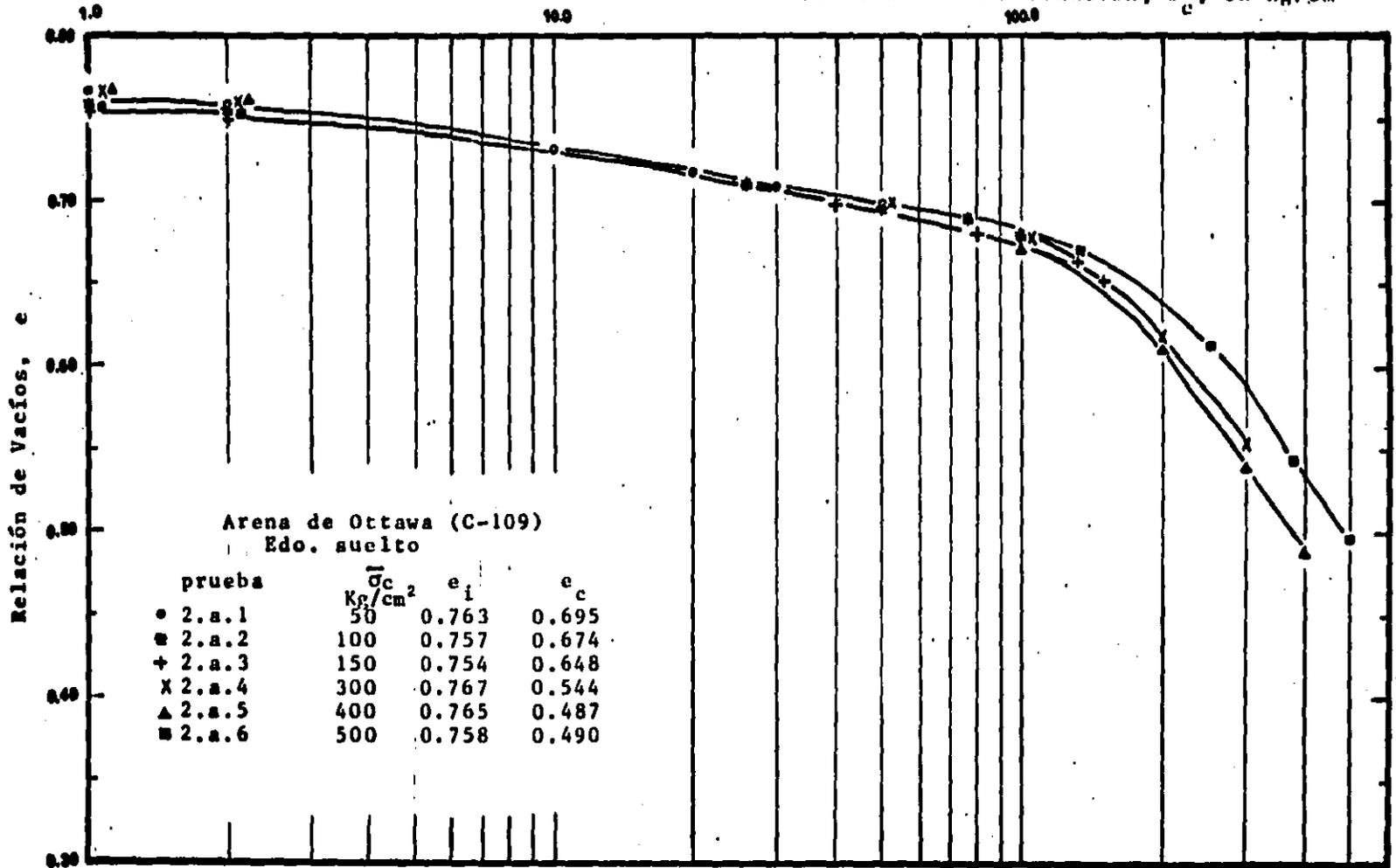


Fig. 43. Curvas de Compresibilidad ( Etapa de Consolidación )



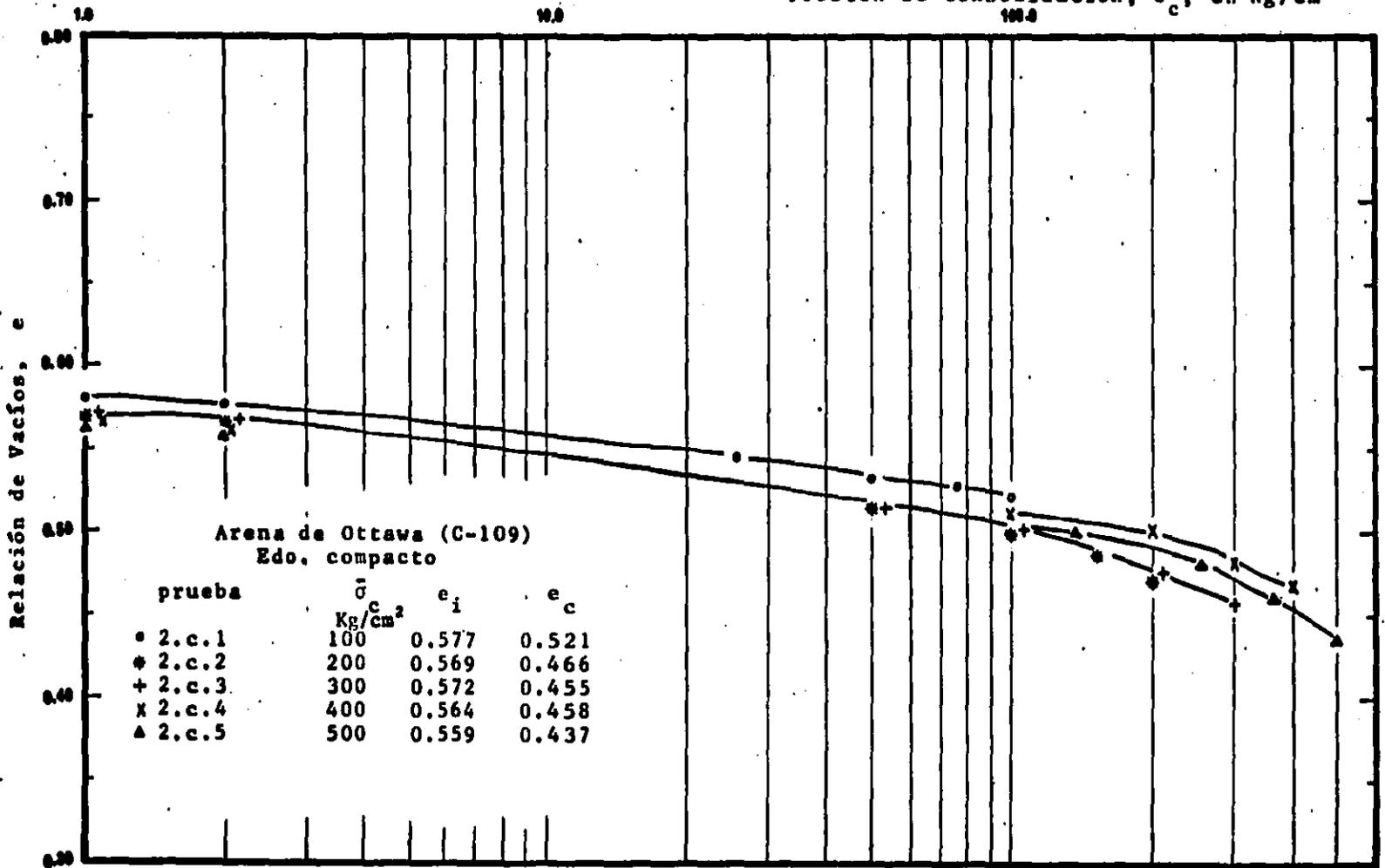


Fig.45. Curvas de Compresibilidad ( Etapa de Consolidación )

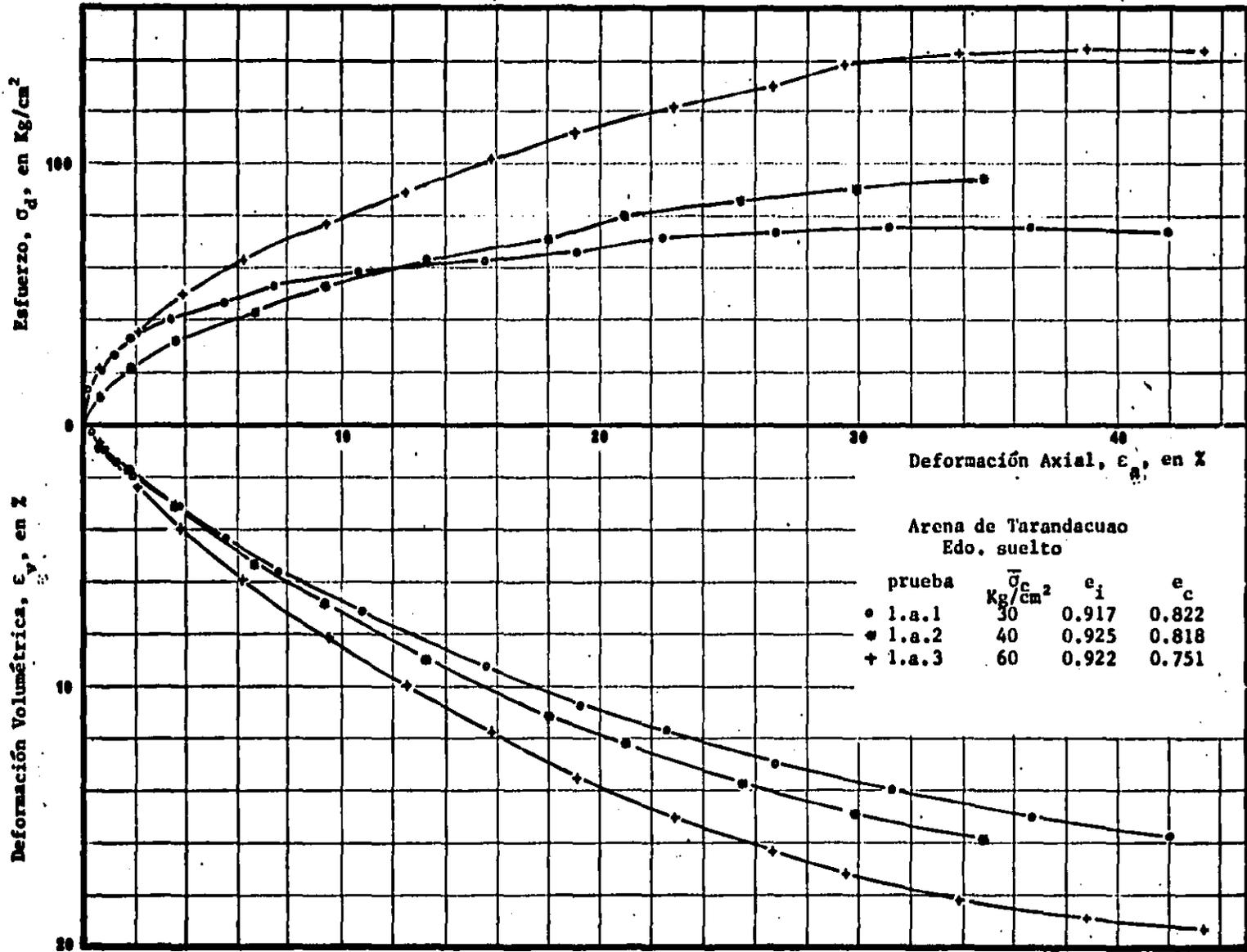


Fig.46. Curva Esfuerzo Desviador, Deformación Volumétrica vs Deformación Axial

Esfuerzo,  $\sigma_d$ , en Kg/cm<sup>2</sup>

Deformación Volumétrica,  $\epsilon_v$ , en %

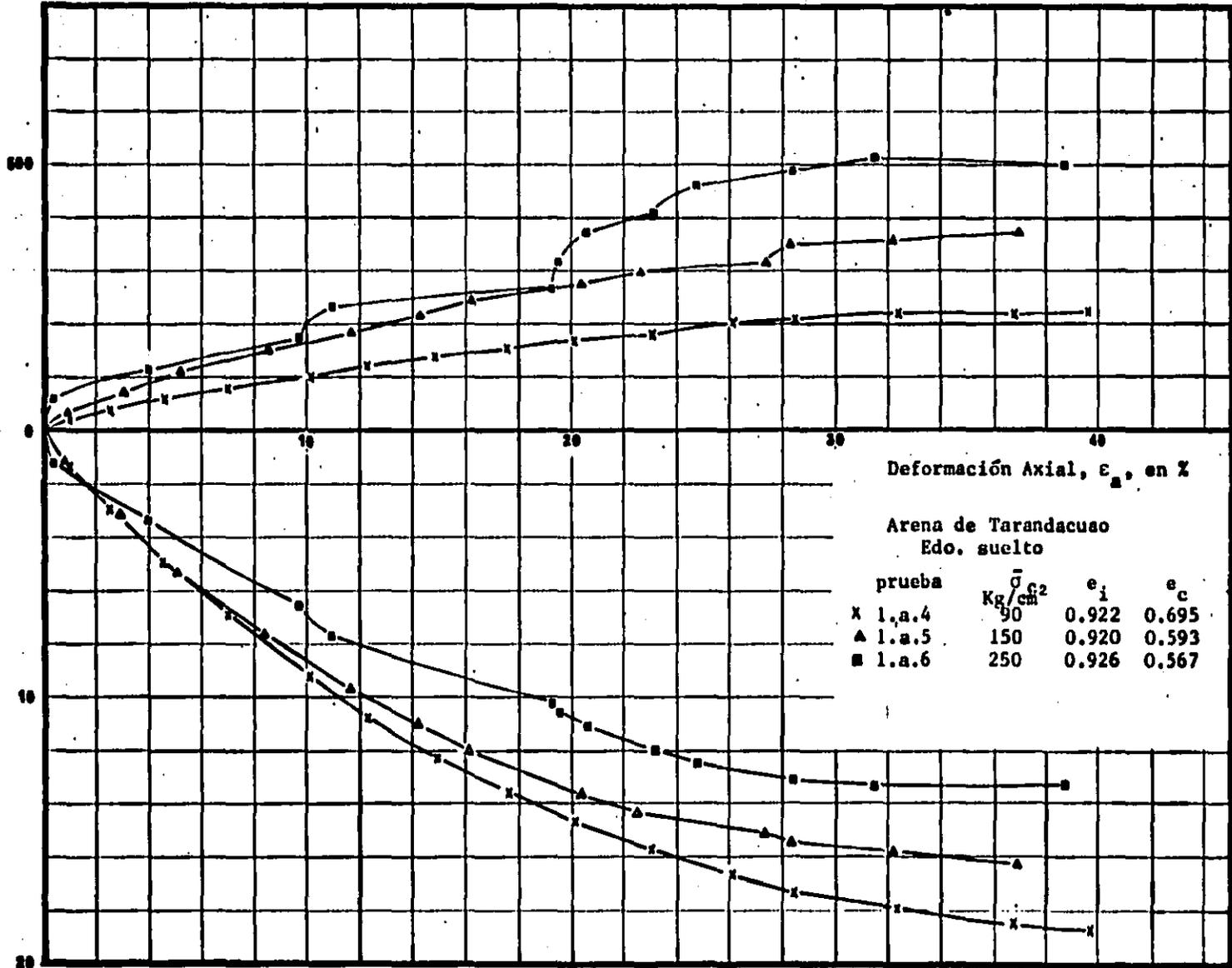


Fig.47. Curva Esfuerzo Desviador, Deformación Volumétrica vs Deformación Axial

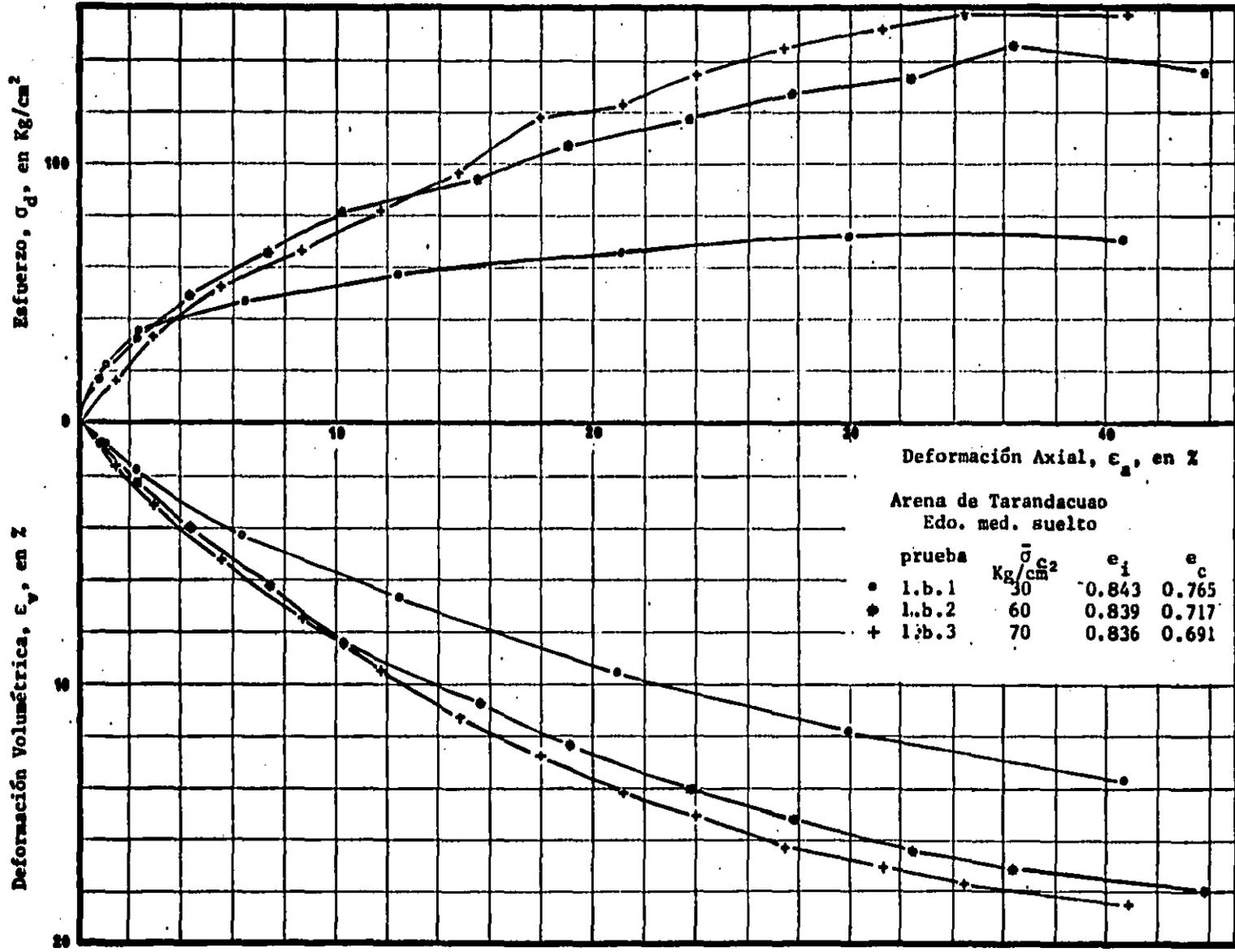


Fig.48. Curva Esfuerzo Desviador, Deformación Volumétrica vs Deformación Axial

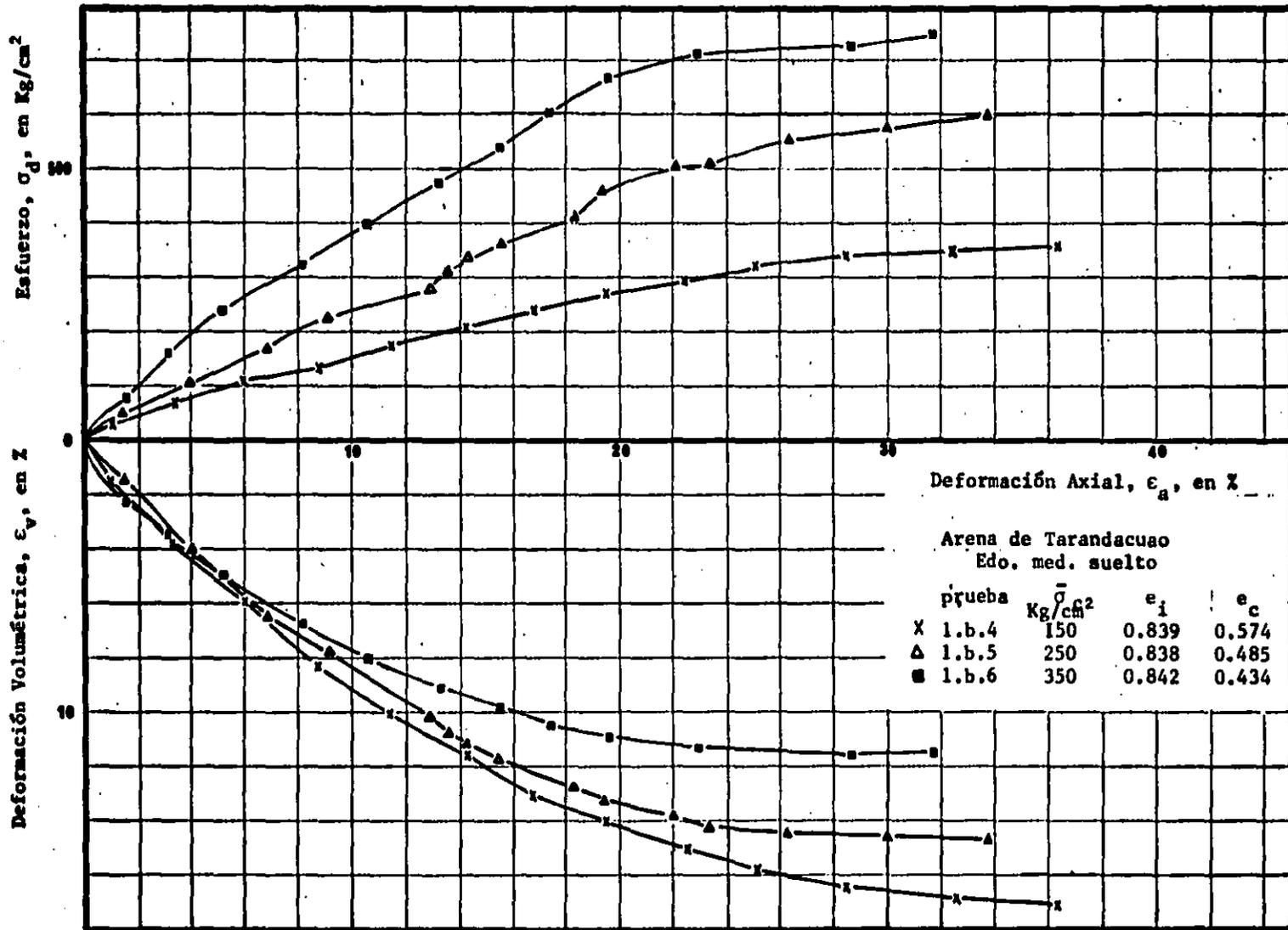


Fig. 49. Curva Esfuerzo Desviador, Deformación Volumétrica vs Deformación Axial

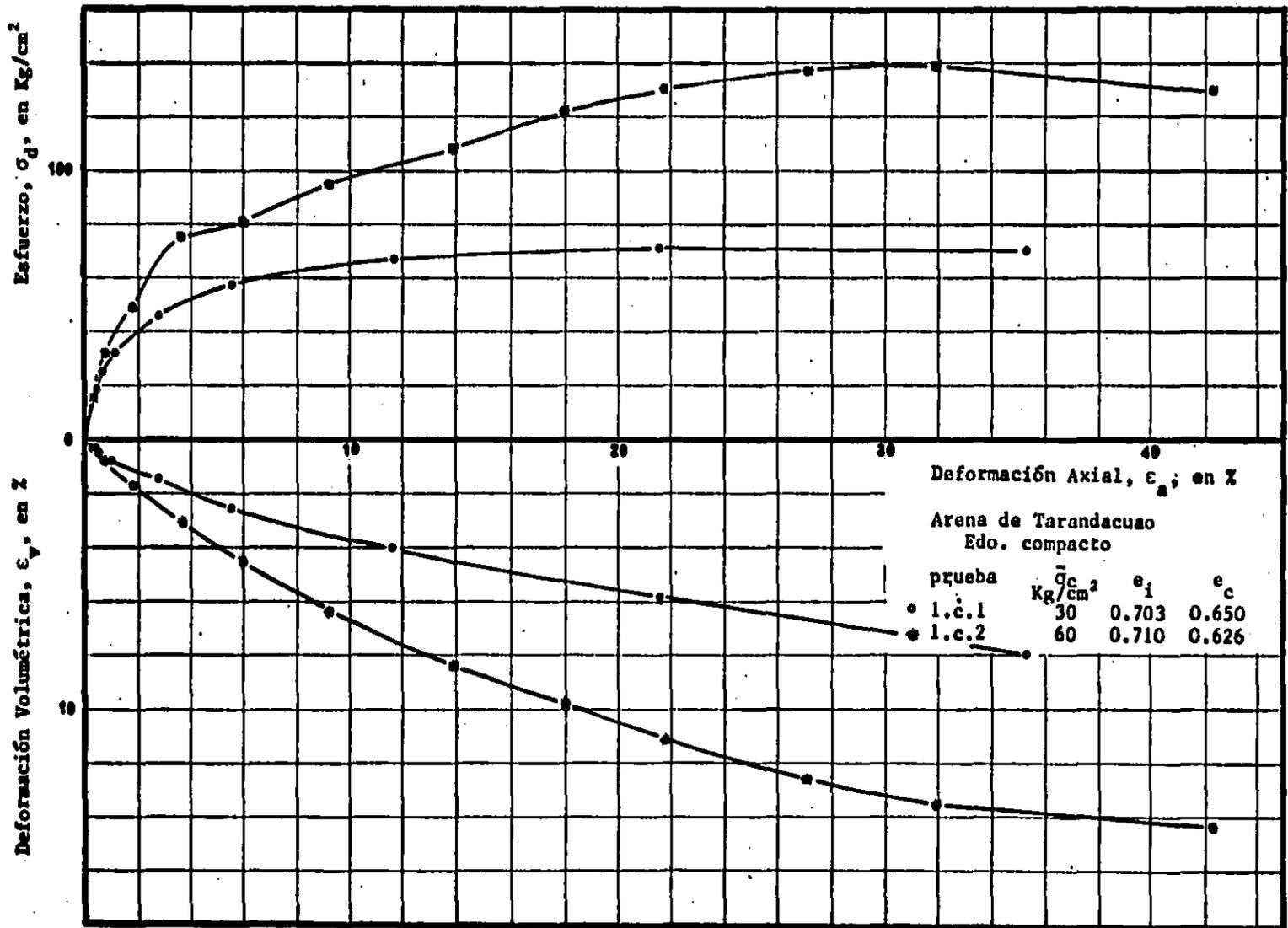


Fig. 50. Curva Esfuerzo Desviador ; Deformación Volumétrica vs Deformación Axial

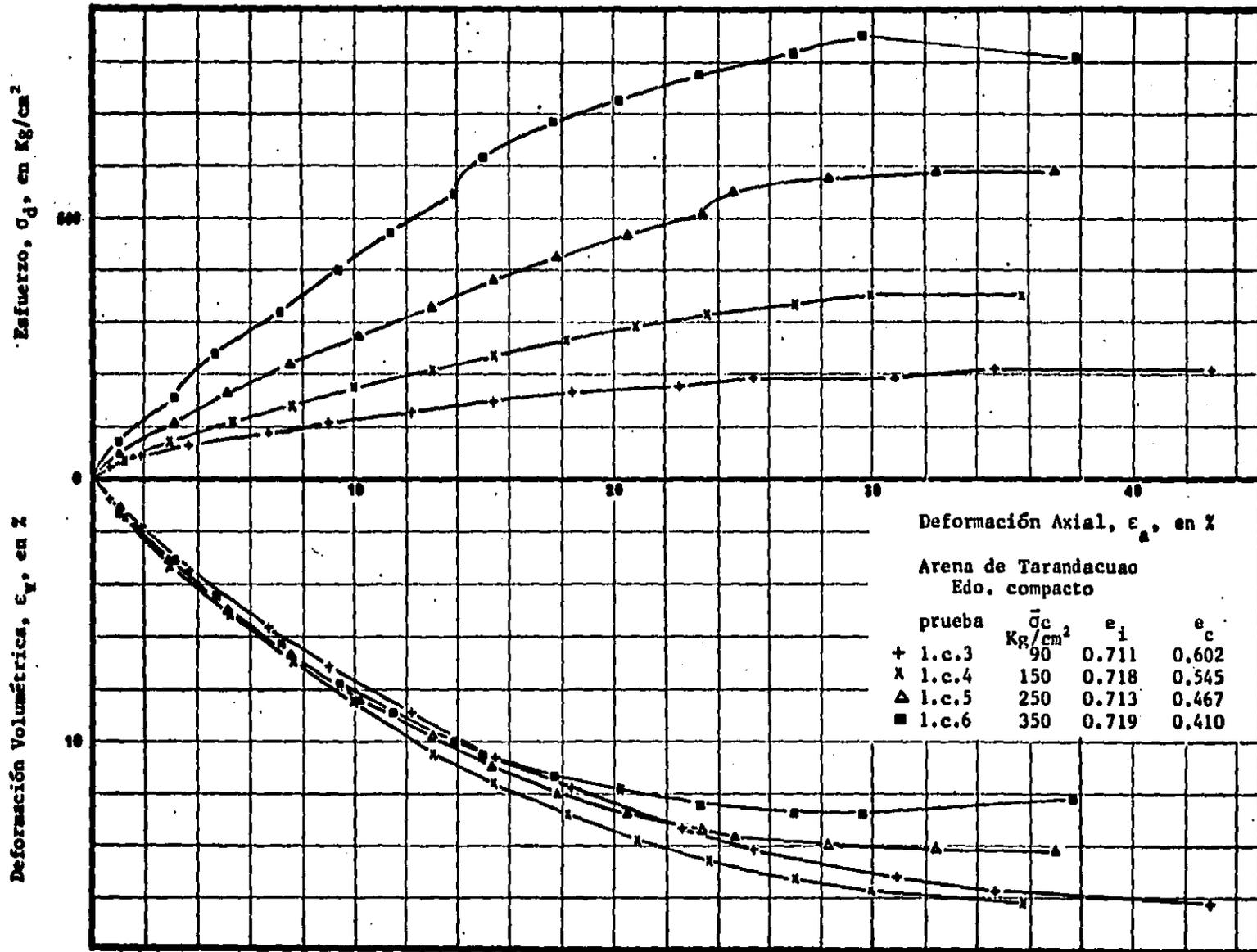


Fig. 51. Curva Esfuerzo Desviador, Deformación Volumétrica vs Deformación Axial

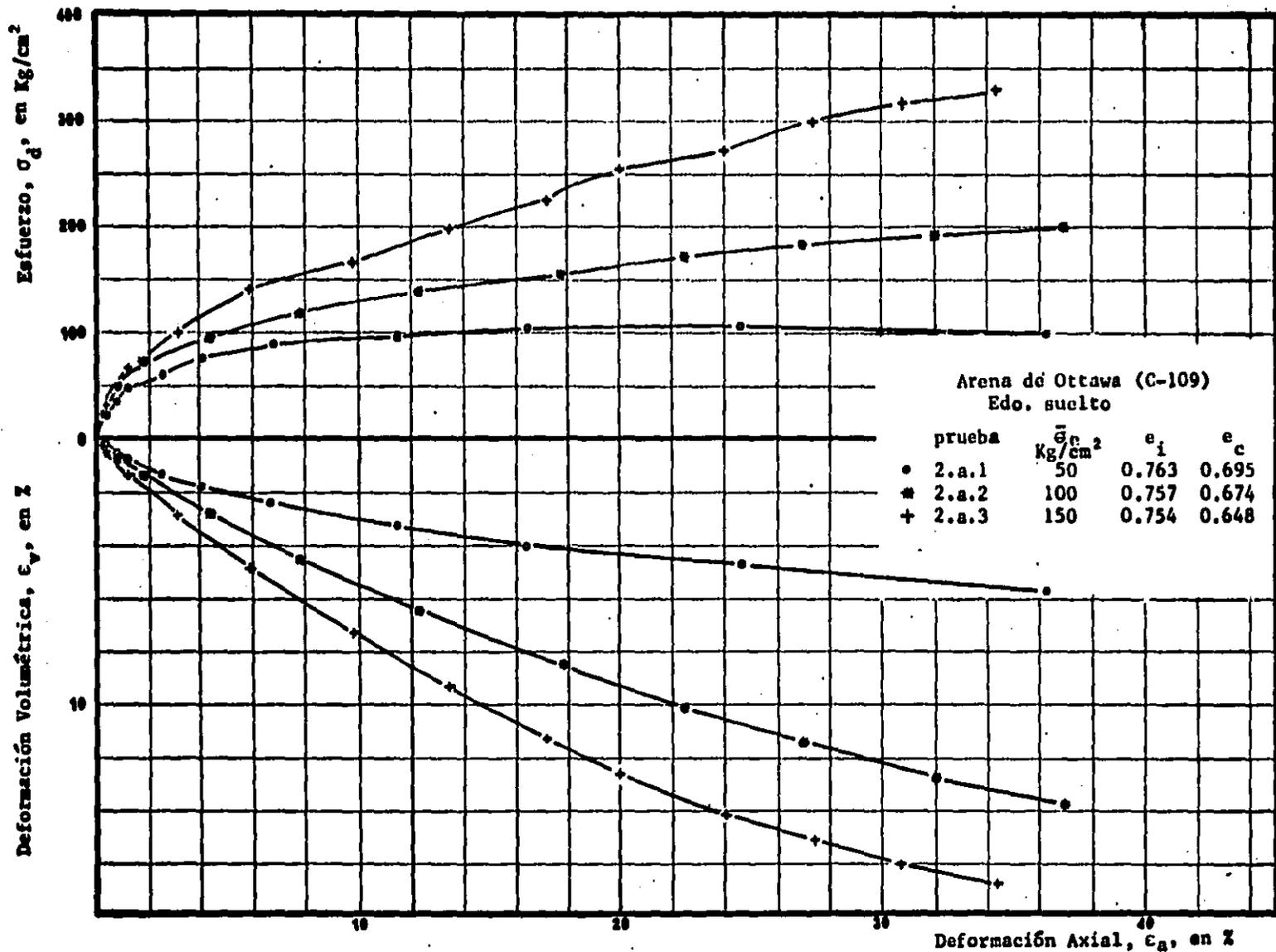


Fig. 52. Curva Esfuerzo Desviador, Deformación Volumétrica vs Deformación Axial

Esfuerzo,  $\sigma_d$ , en Kg/cm<sup>2</sup>

Deformación Volumétrica,  $\epsilon_v$ , en %

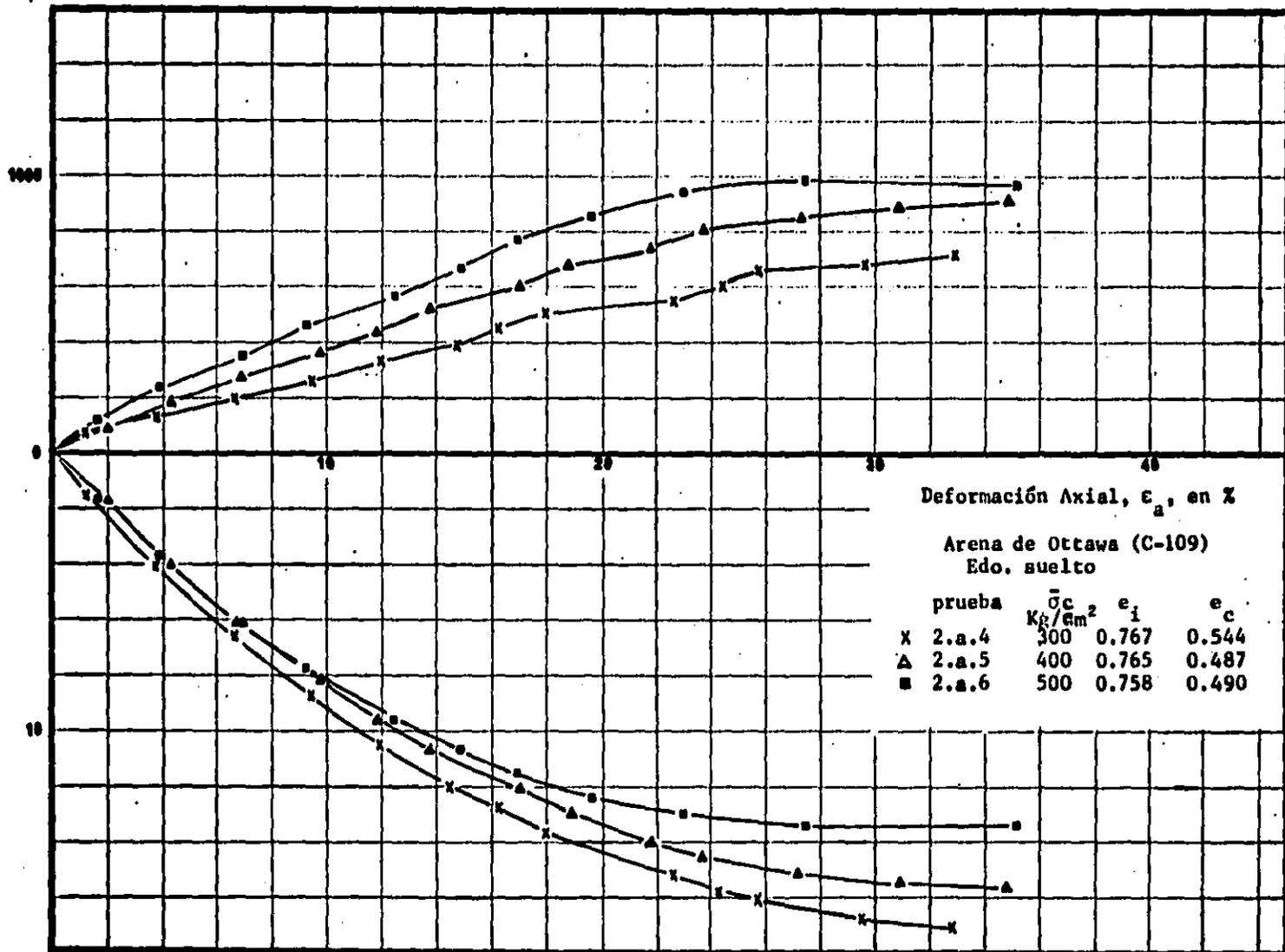


Fig. 53. Curva Esfuerzo Desviador, Deformación Volumétrica vs Deformación Axial

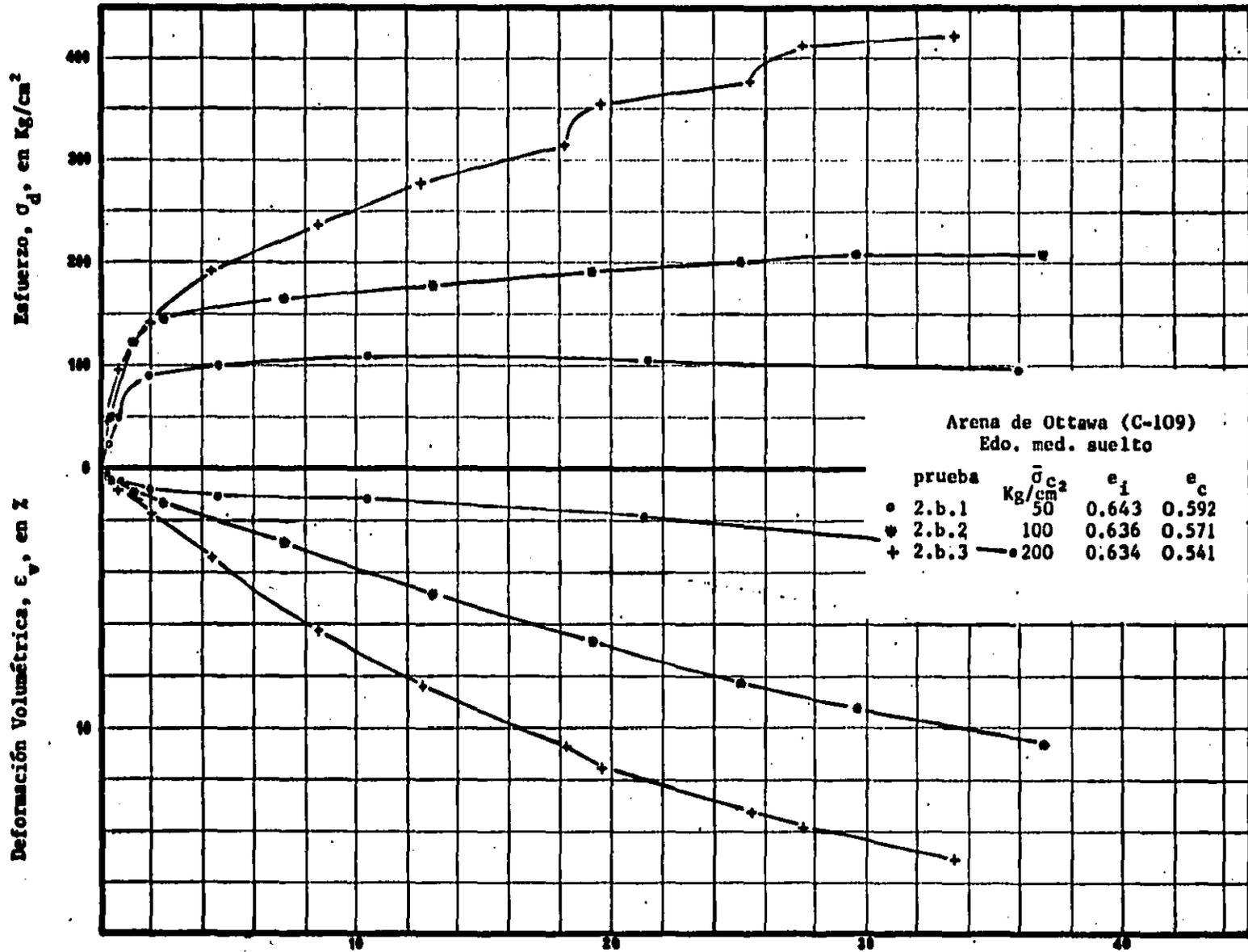


Fig. 54. Curva Esfuerzo Desviador, Deformación Volumétrica vs Deformación Axial  $\epsilon_a$ , en %

Esfuerzo,  $\sigma_d$ , en Kg/cm<sup>2</sup>

Deformación Volumétrica,  $\epsilon_v$ , en %

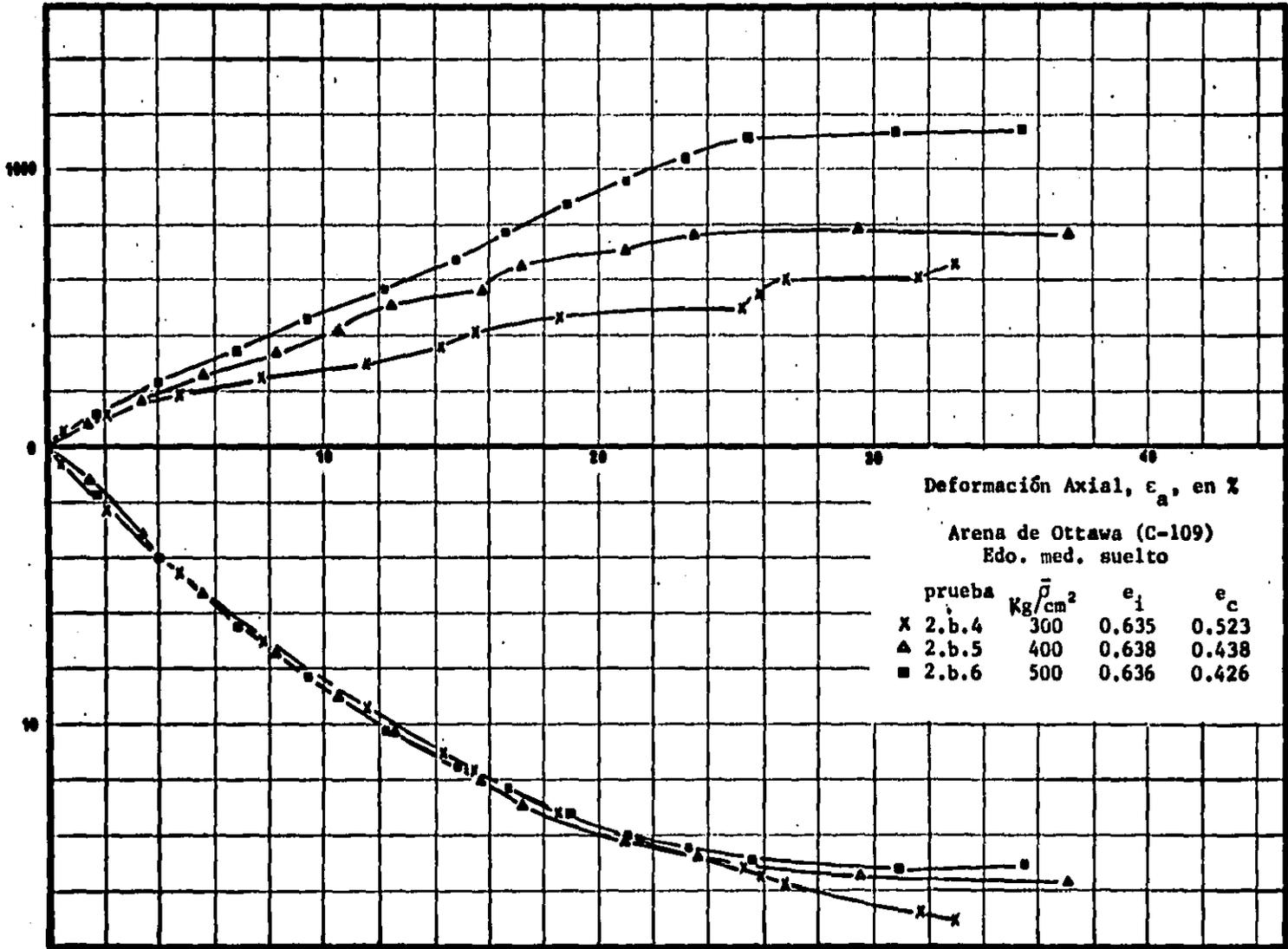


Fig. 55. Curva Esfuerzo Desviador, Deformación Volumétrica vs Deformación Axial

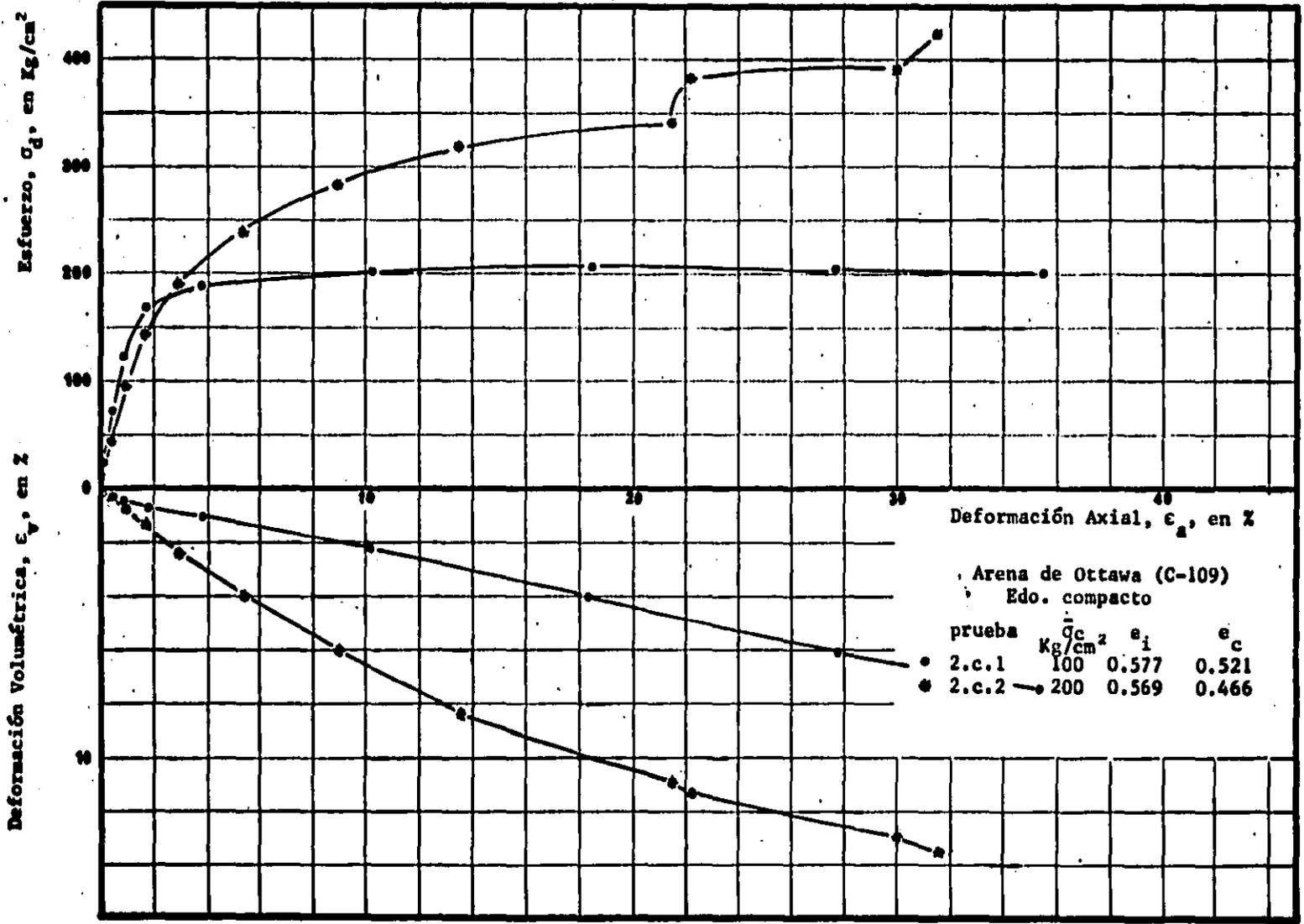


Fig. 56. Curva Esfuerzo Desviador, Deformación Volumétrica vs Deformación Axial

Esfuerzo,  $\sigma_d$ , en Kg/cm<sup>2</sup>

Deformación Volumétrica,  $\epsilon_v$ , en %

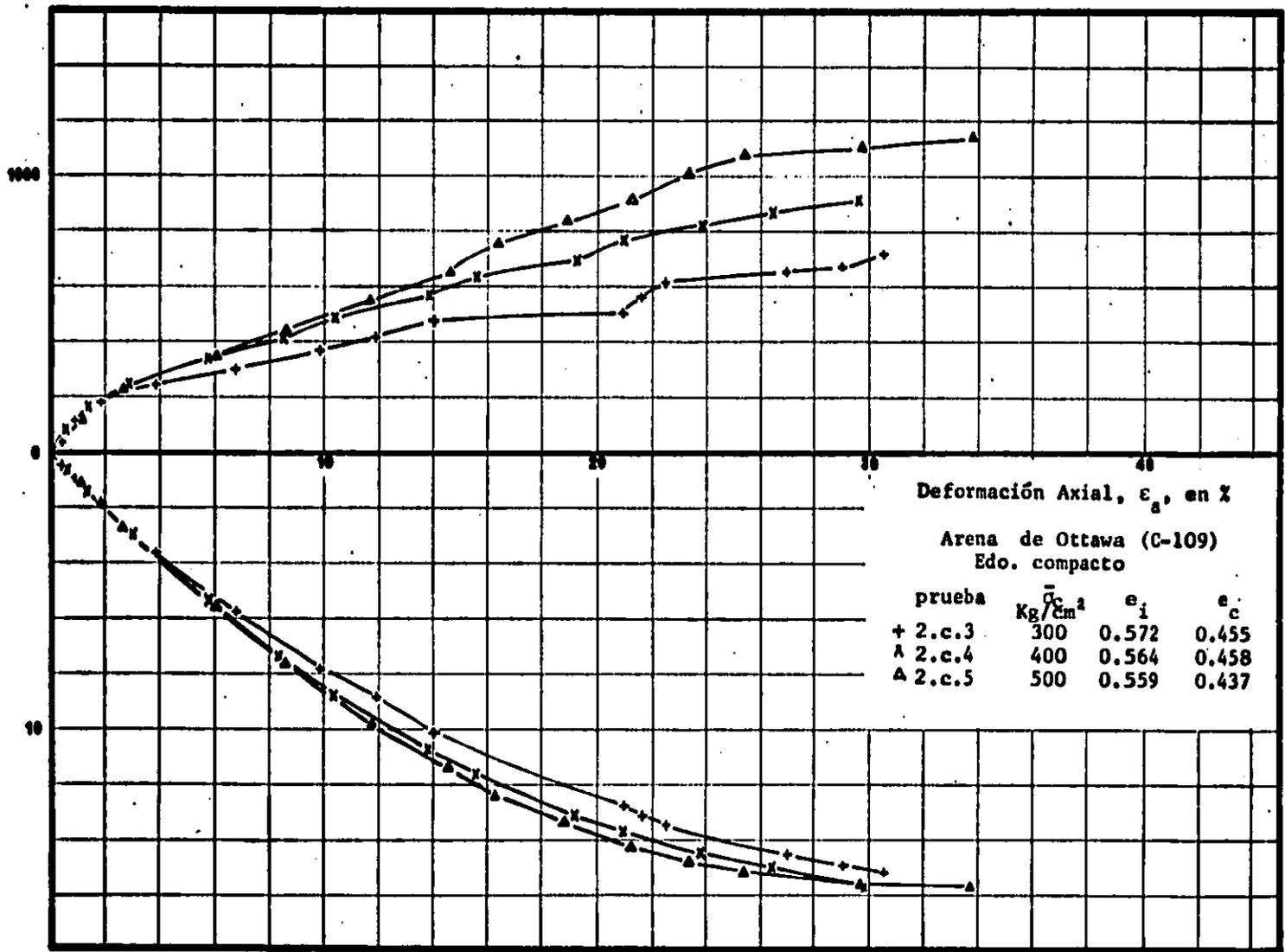


Fig. 57. Curva Esfuerzo Desviador, Deformación Volumétrica vs Deformación Axial

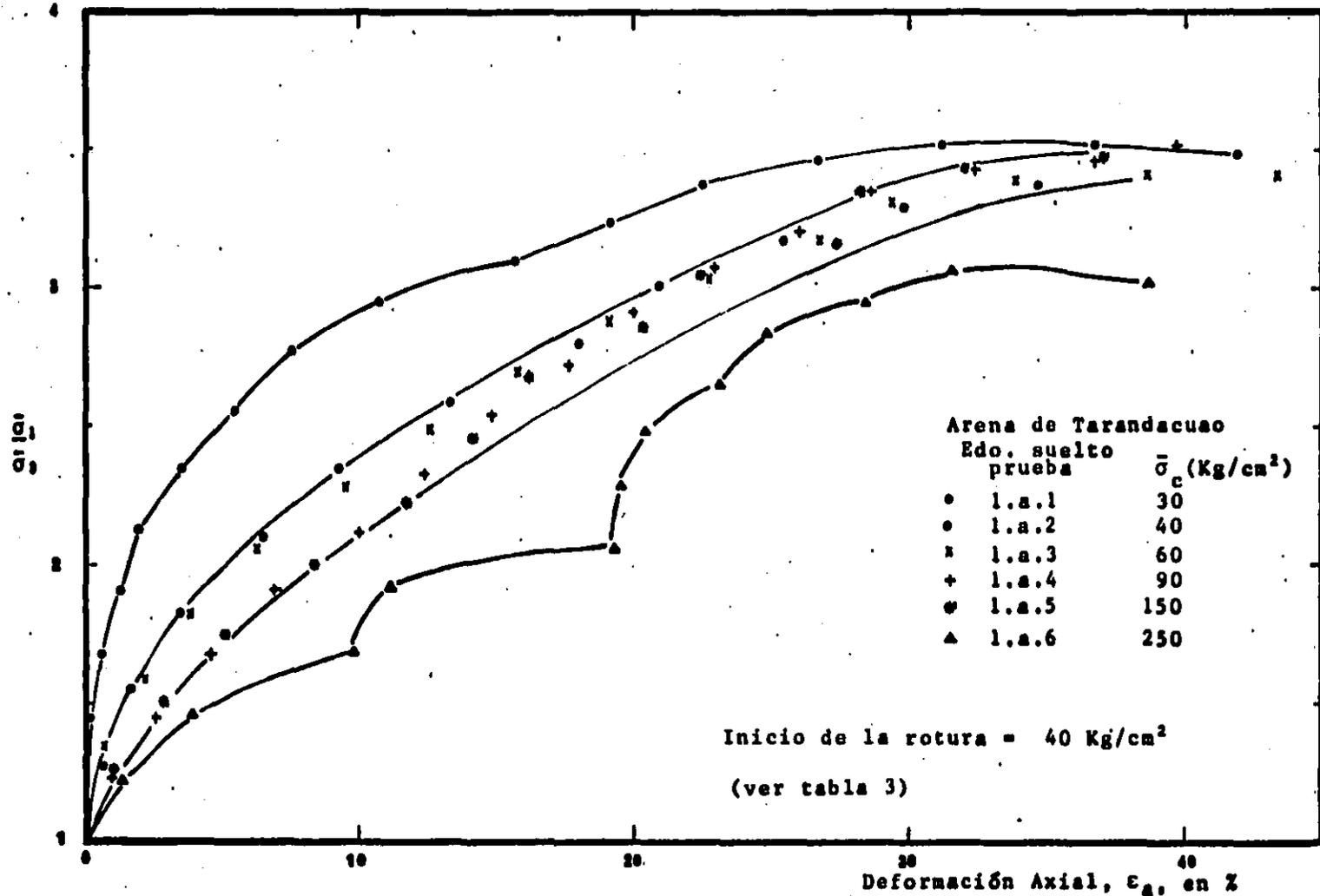


Fig 58. Curvas  $\bar{\sigma}_1/\bar{\sigma}_c$  vs Deformación Axial

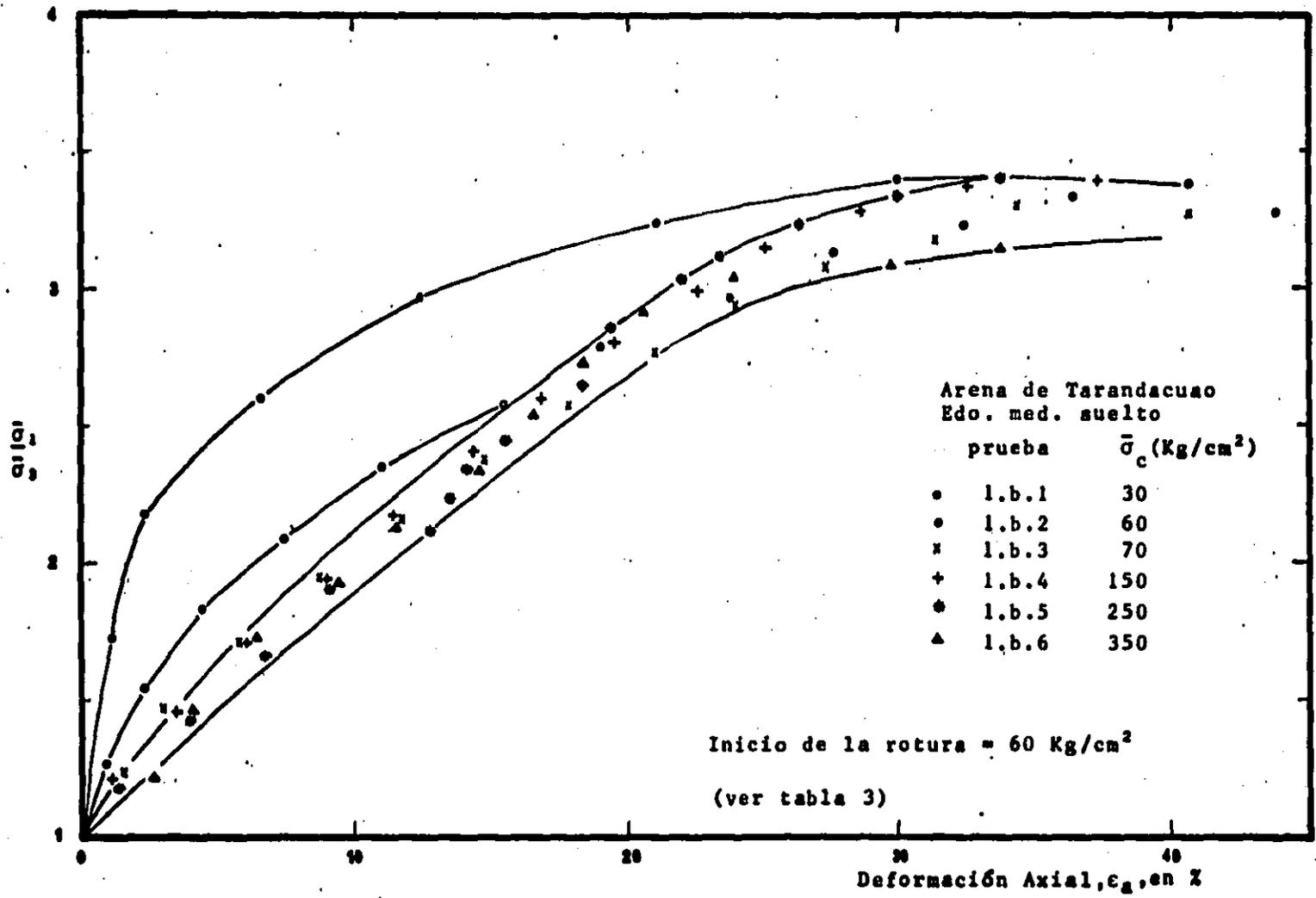


Fig 59. Curvas  $\sigma_1/\bar{\sigma}_c$  vs Deformación Axial

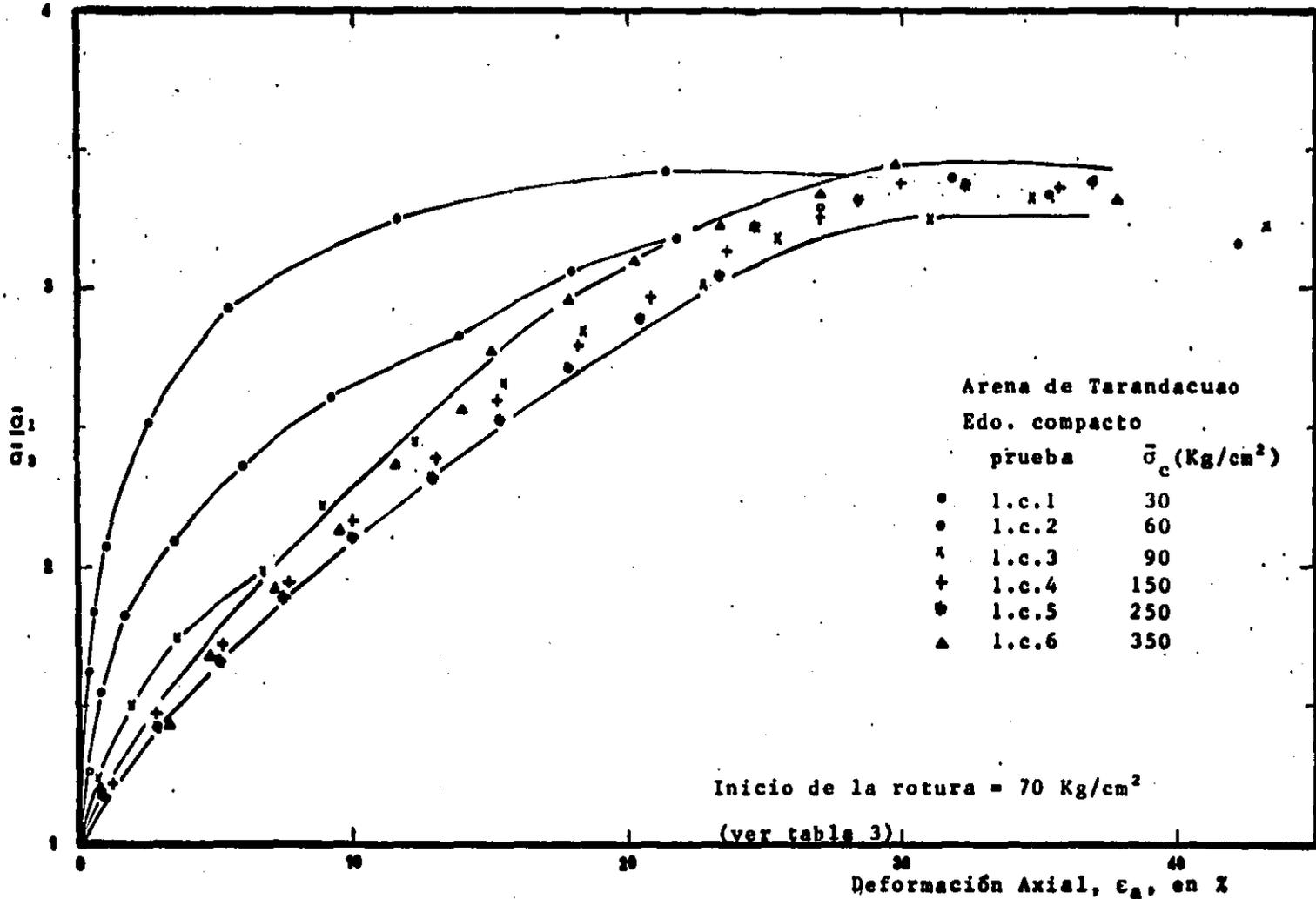


Fig 60. Curvas  $\bar{\sigma}_1/\bar{\sigma}$ , vs Deformación Axial

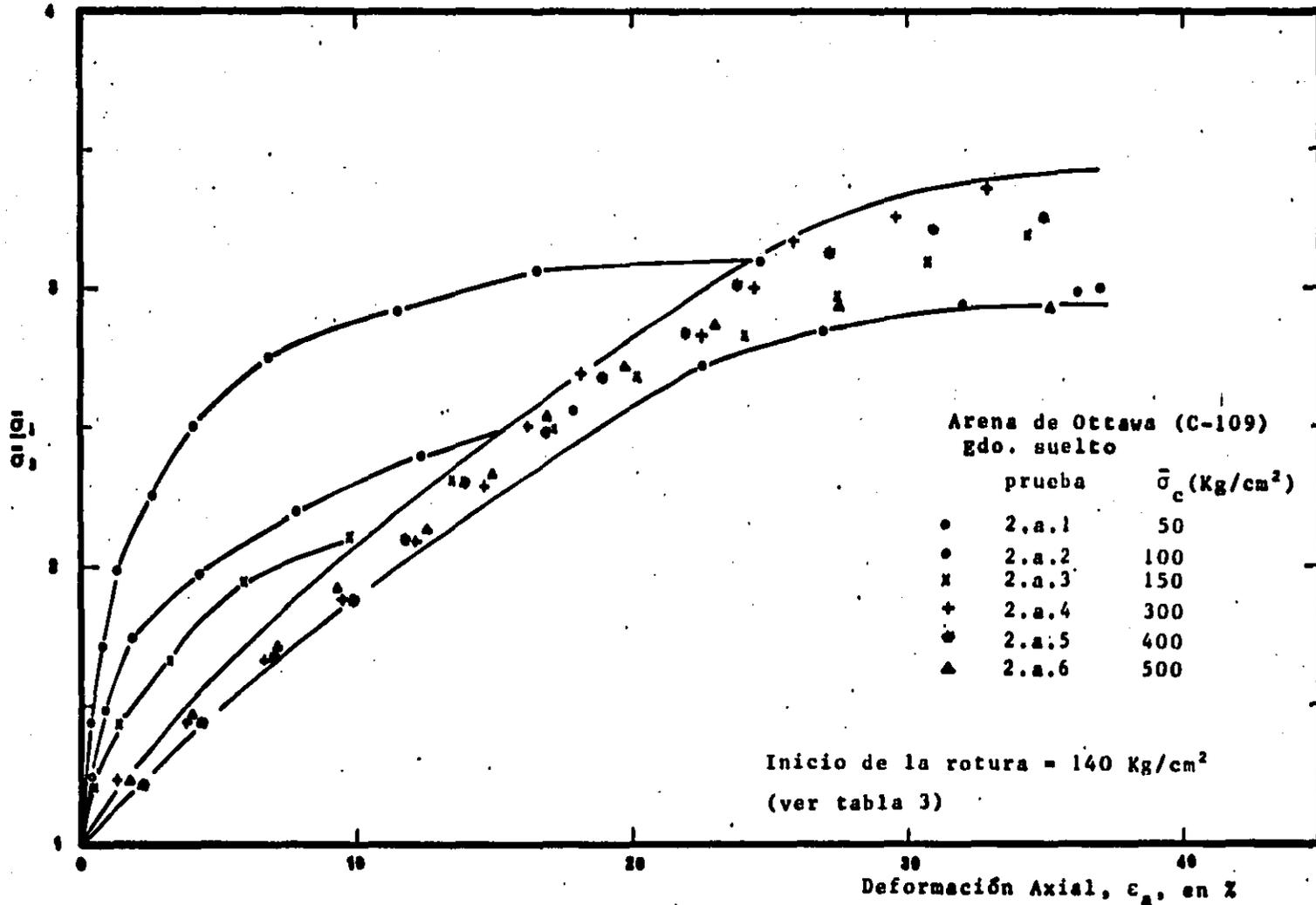


Fig 61. Curvas  $\bar{\sigma}_1/\bar{\sigma}_3$  vs Deformación Axial

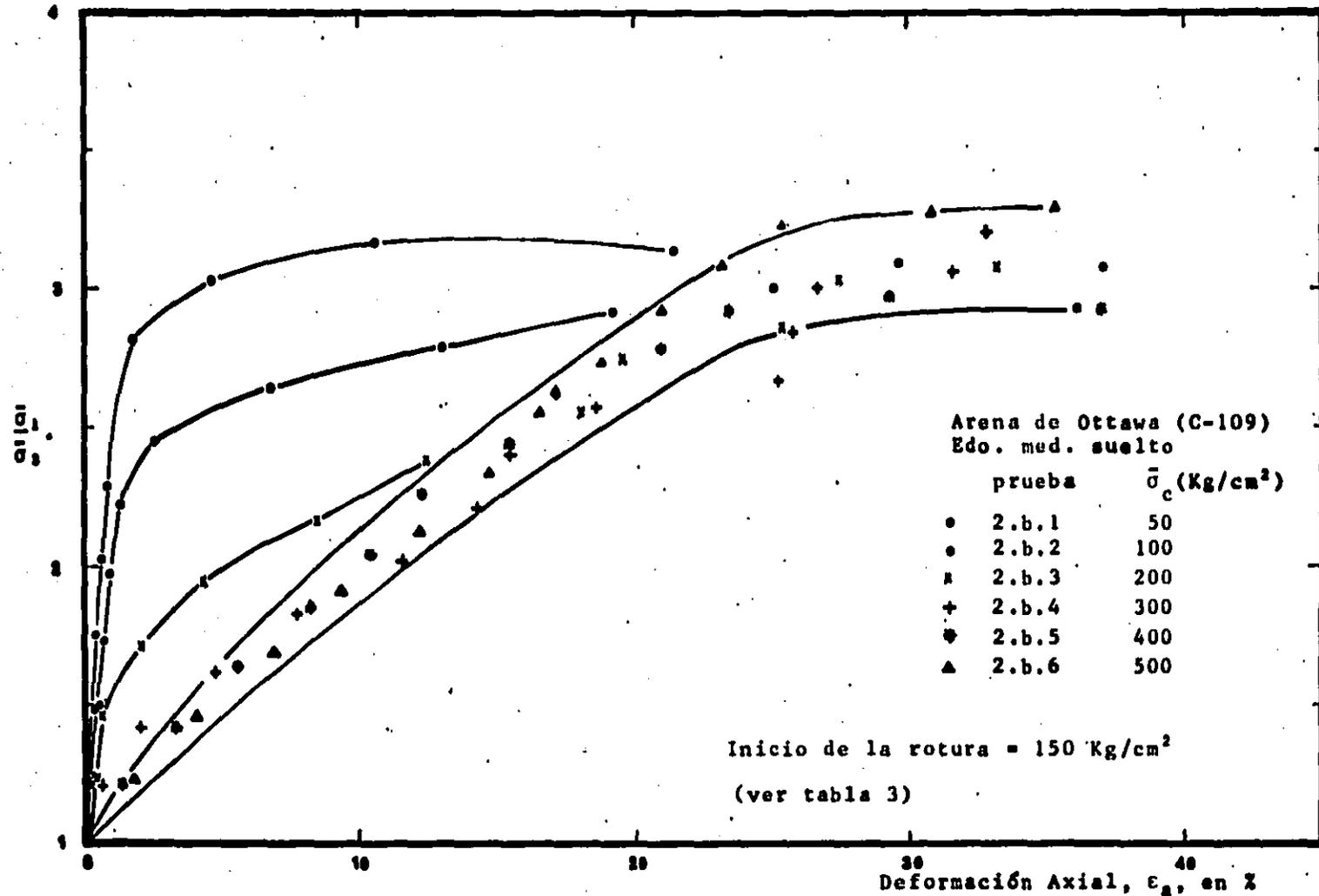


Fig 62. Curvas  $\bar{\sigma}_1/\bar{\sigma}_3$  vs Deformación Axial

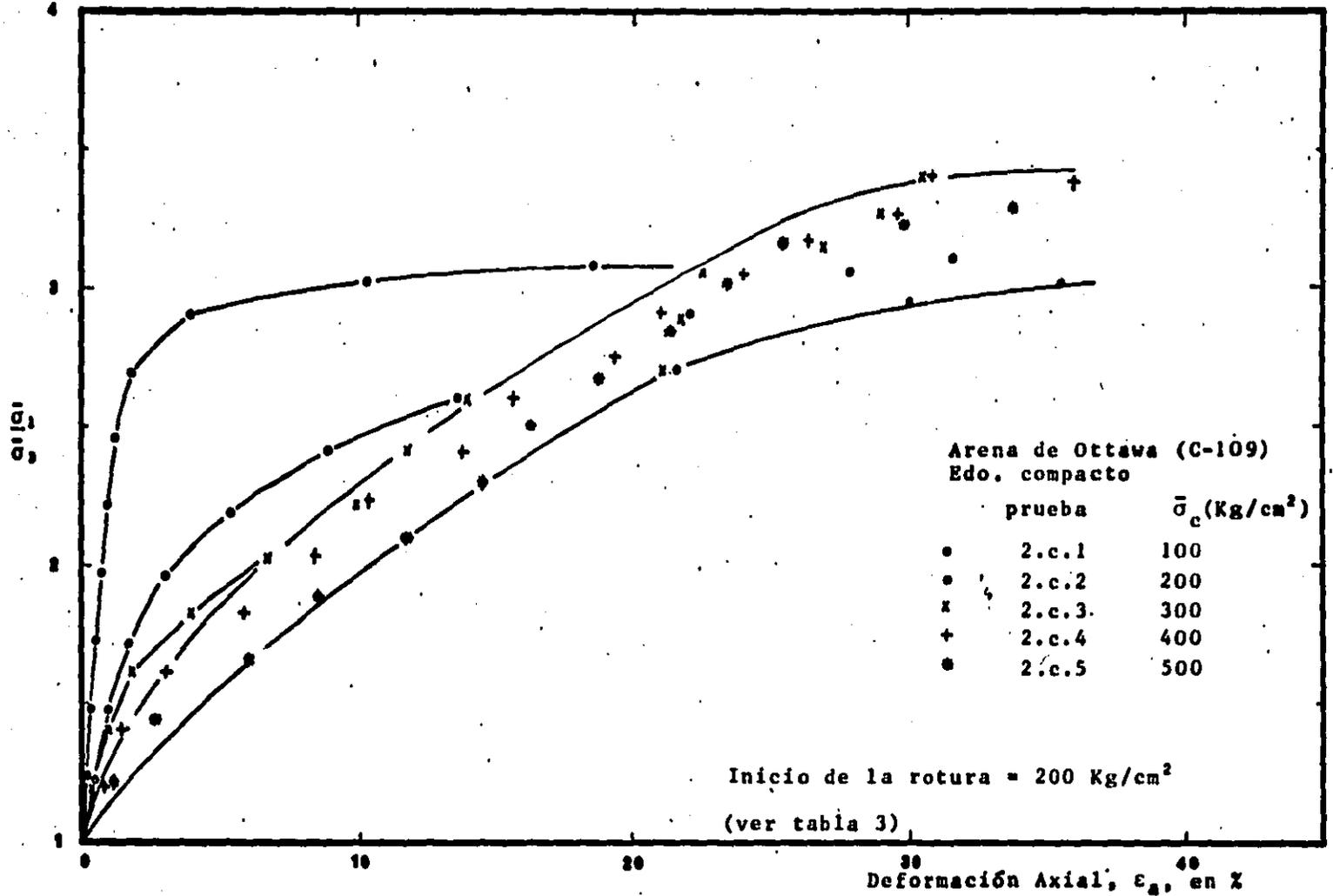


Fig 63. Curvas  $\bar{\sigma}_1/\bar{\sigma}_3$  vs Deformación Axial

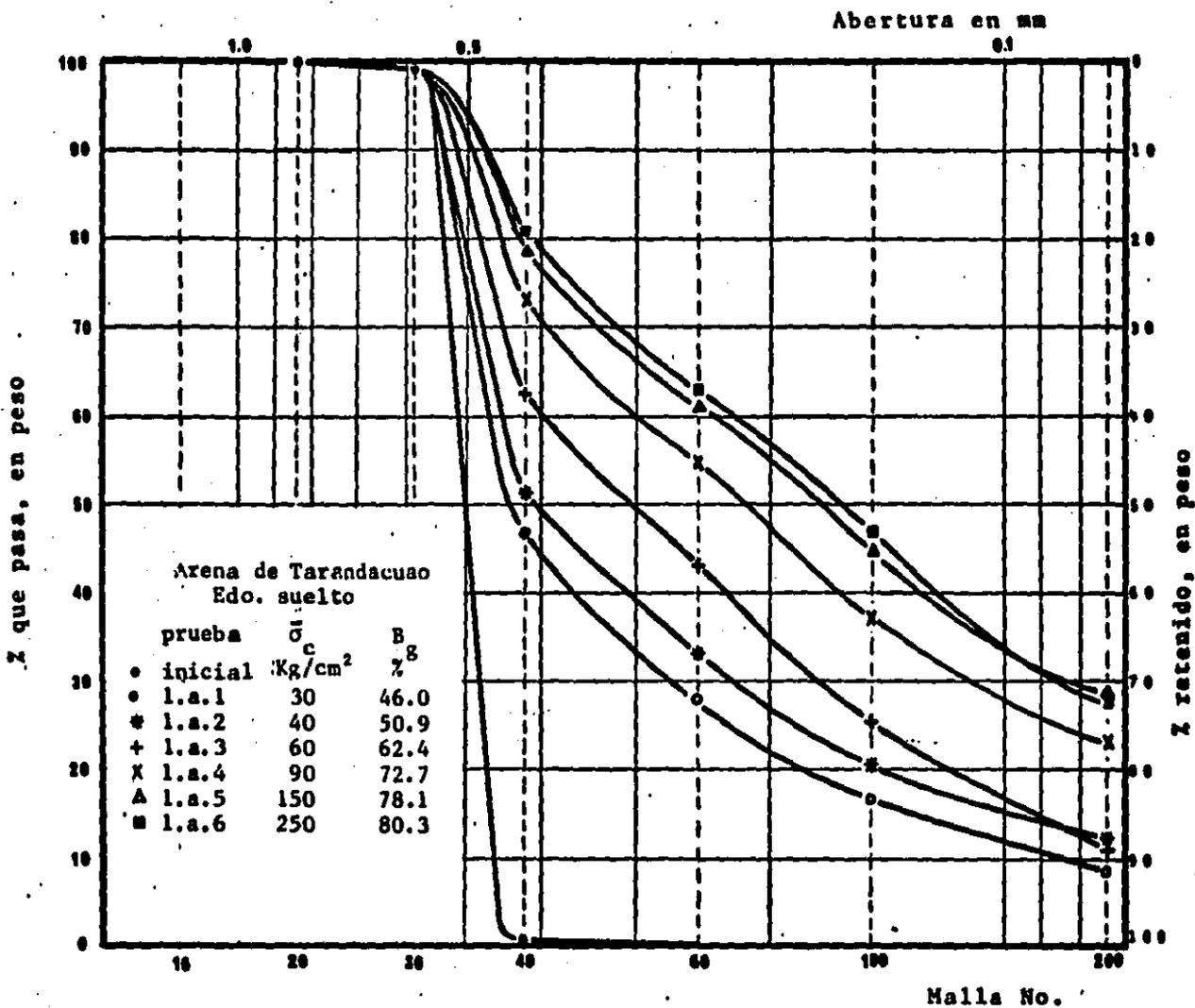


Fig. 64. Granulometría inicial y final

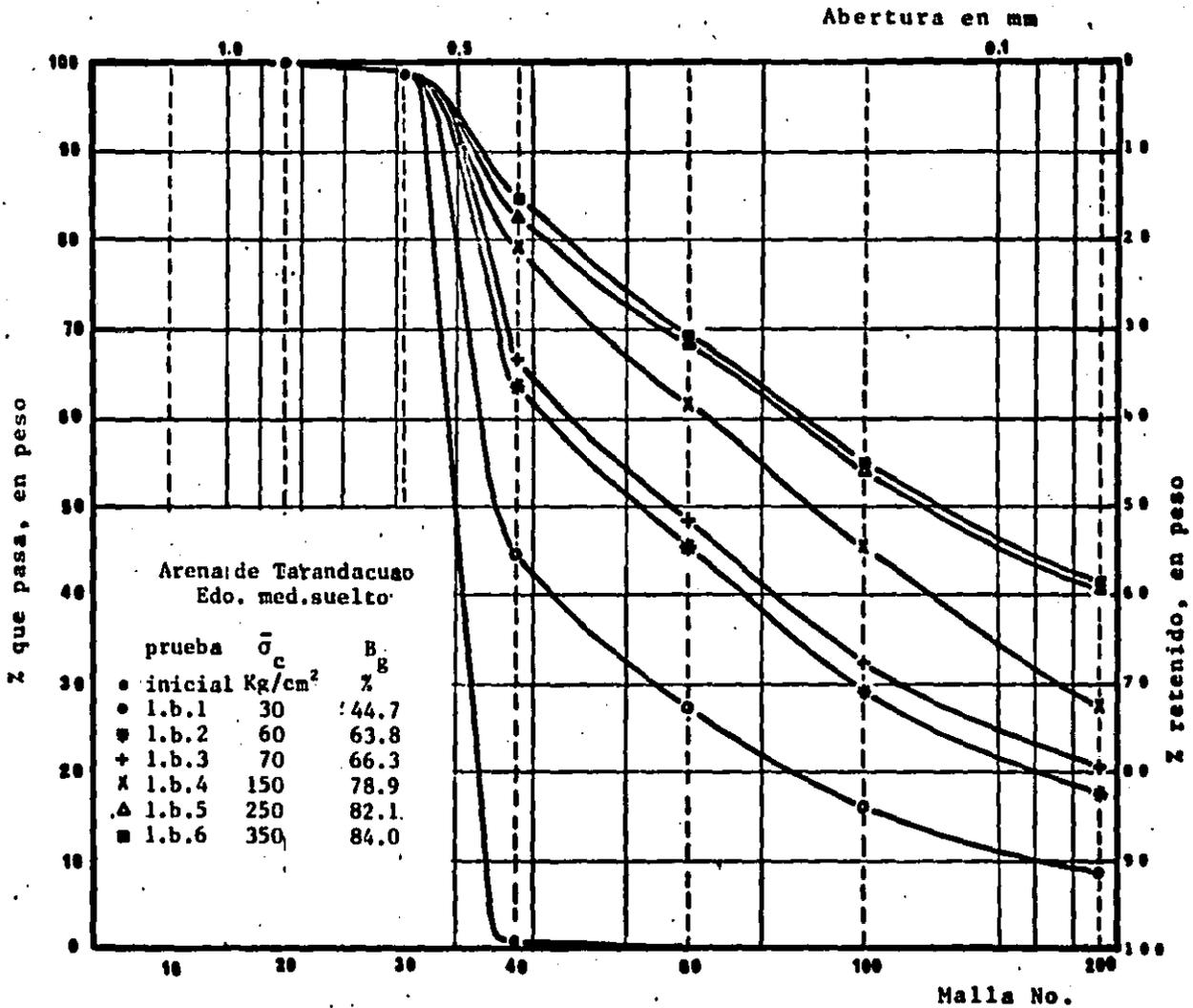


Fig. 65. Granulometría inicial y final

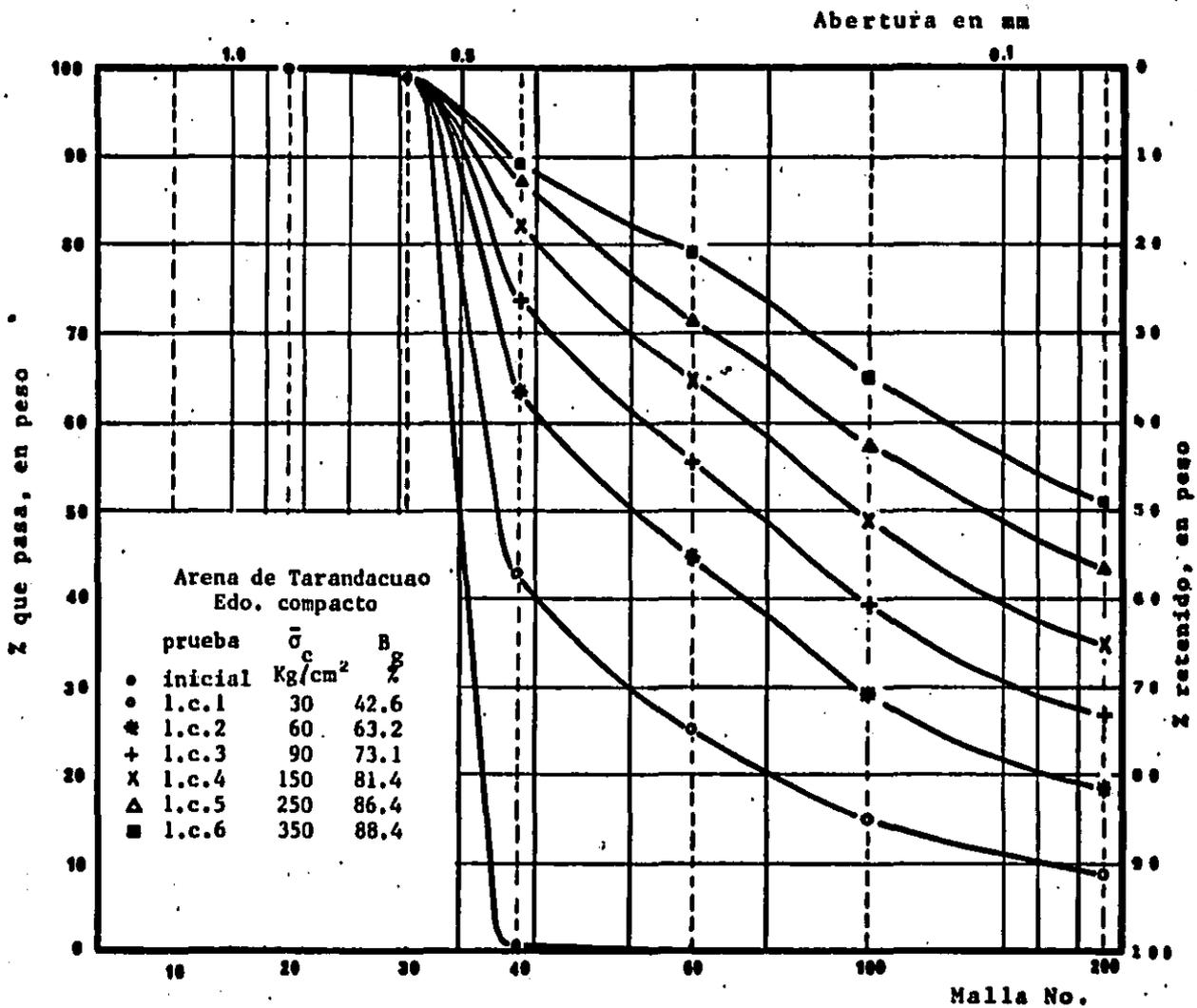


Fig. 66. Granulometría inicial y final

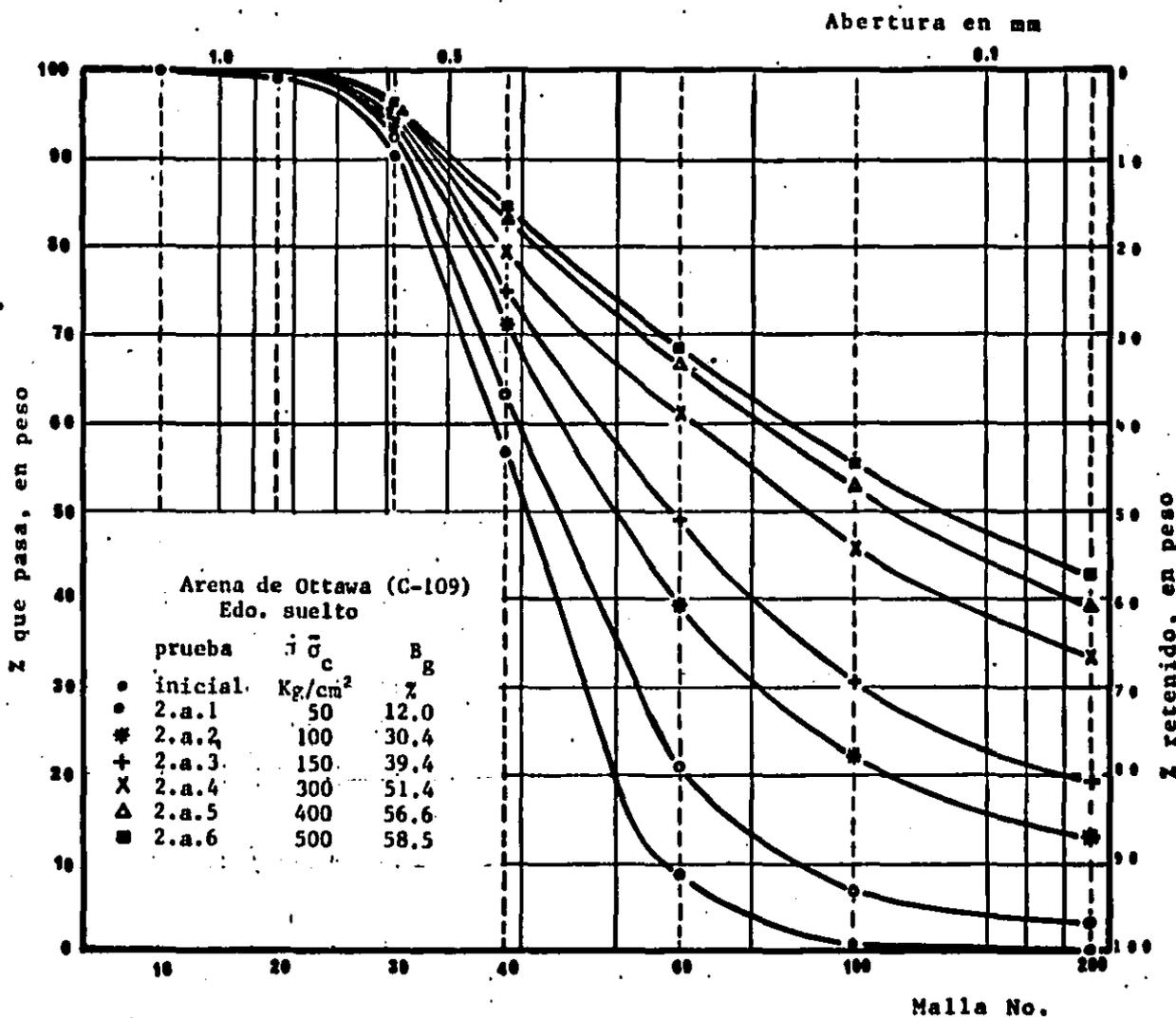


Fig. 67. Granulometría inicial y final

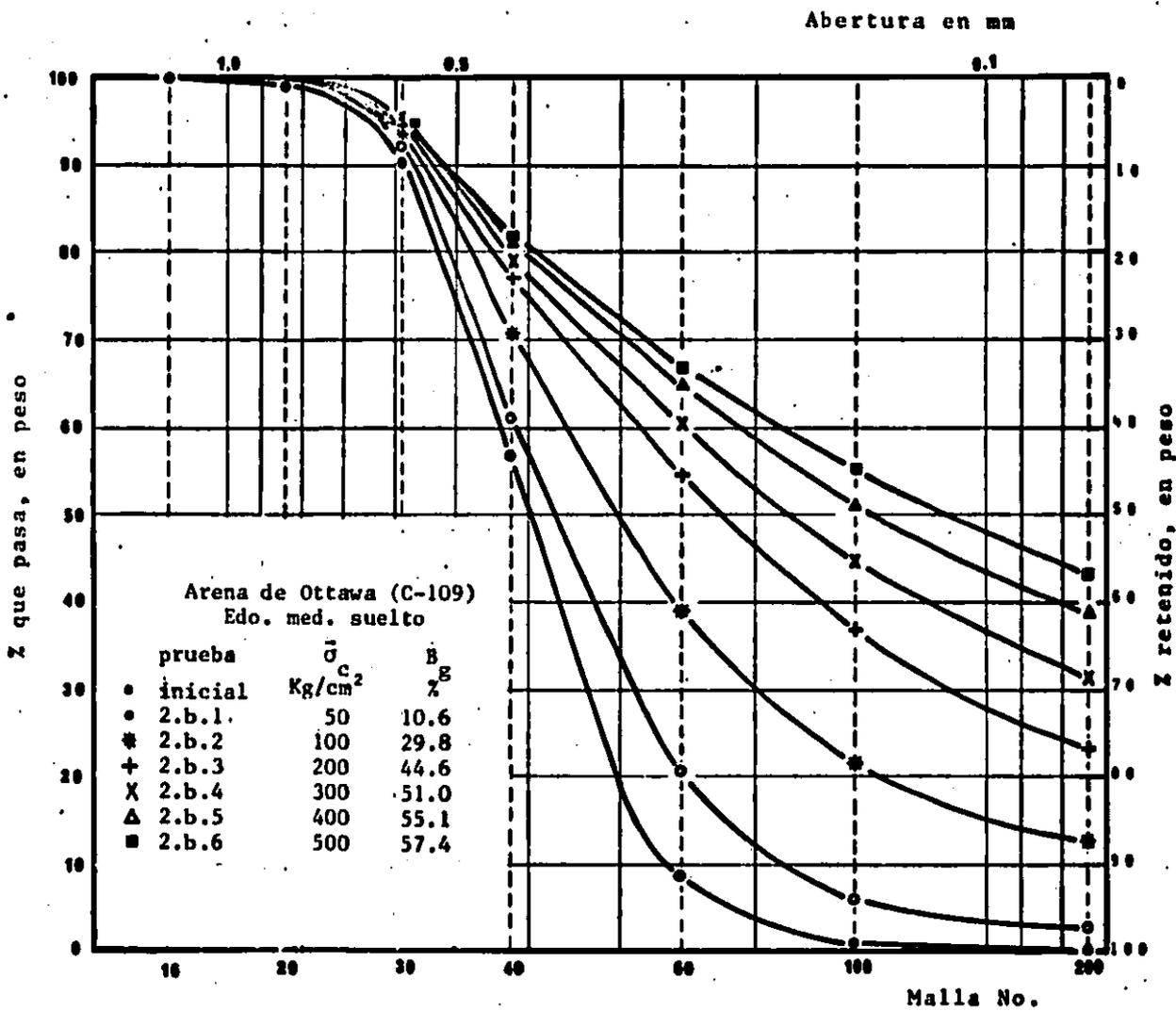


Fig.68. Granulometría inicial y final

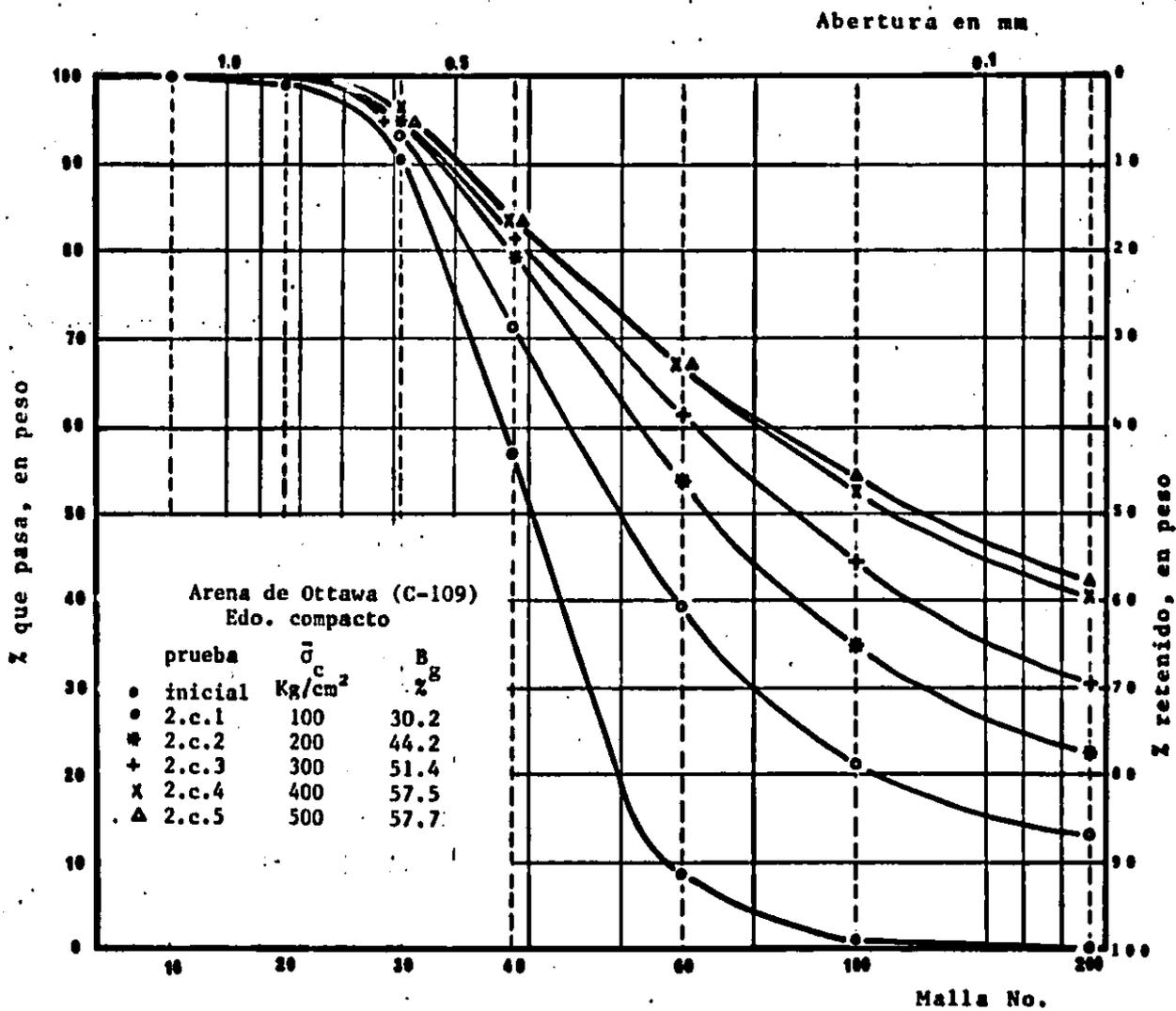


Fig. 69. Granulometría inicial y final

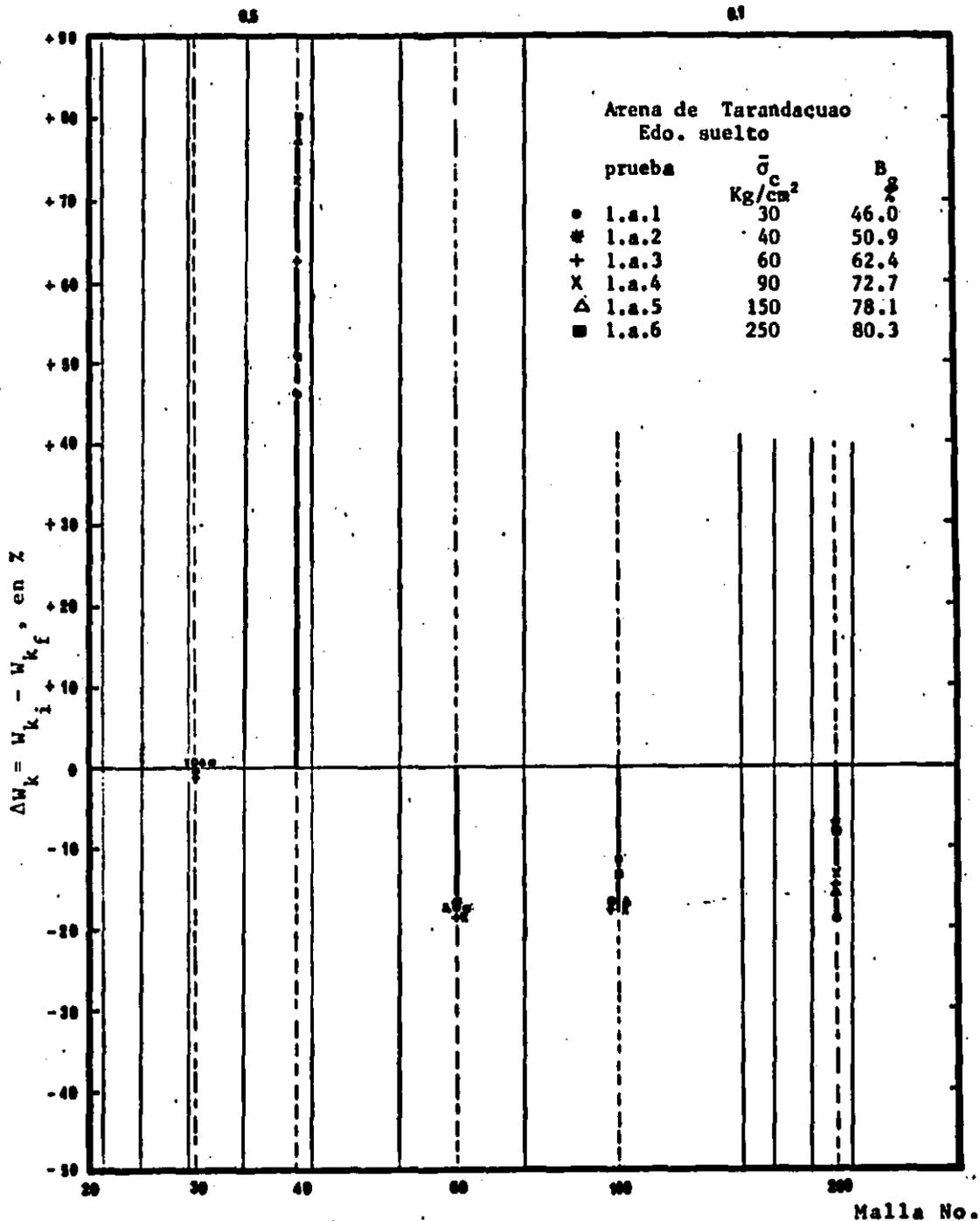
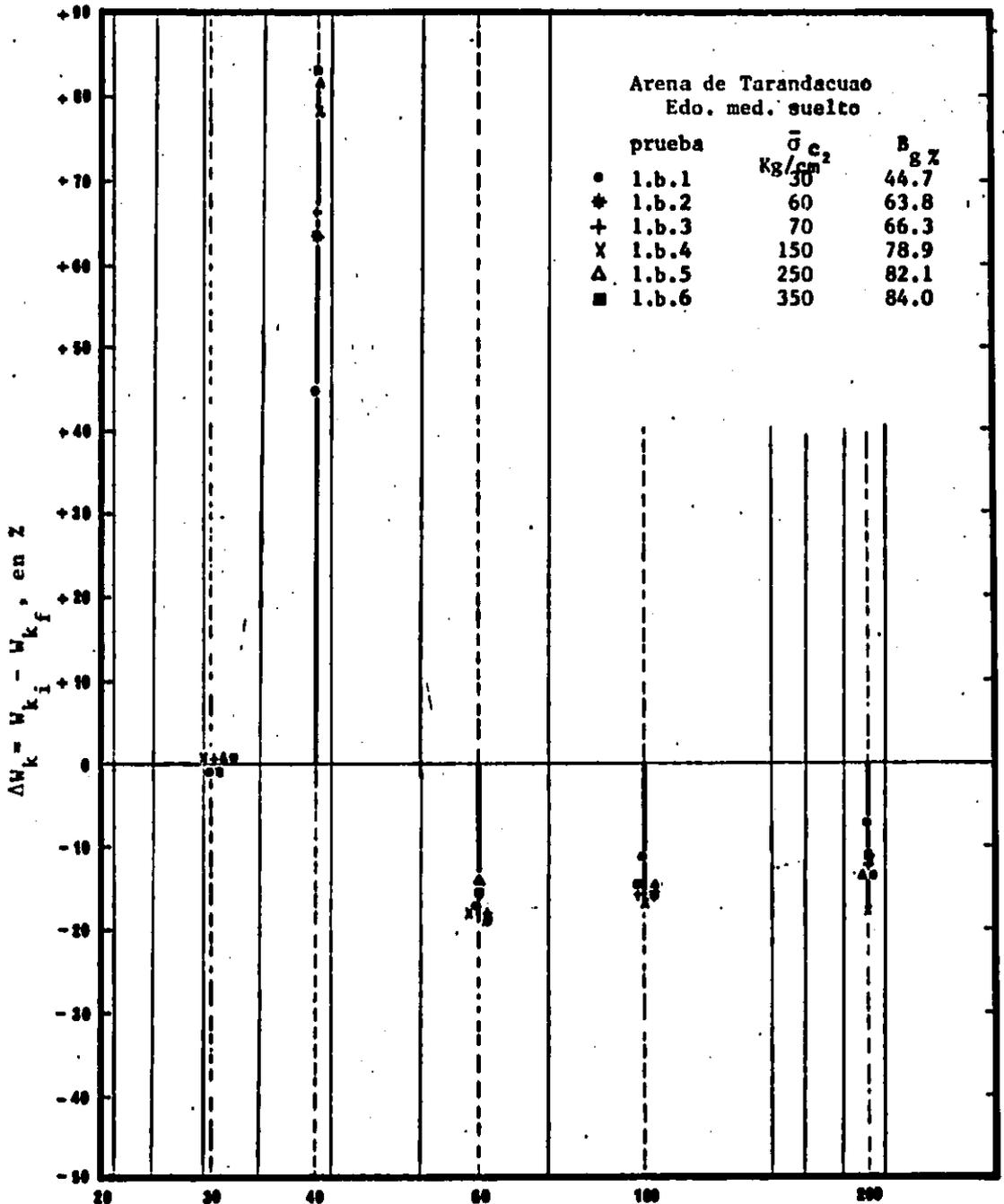


Fig. 70. Diagramas de  $\Delta W_k$



Malla No.

Fig.71. Diagramas de  $\Delta W_k$

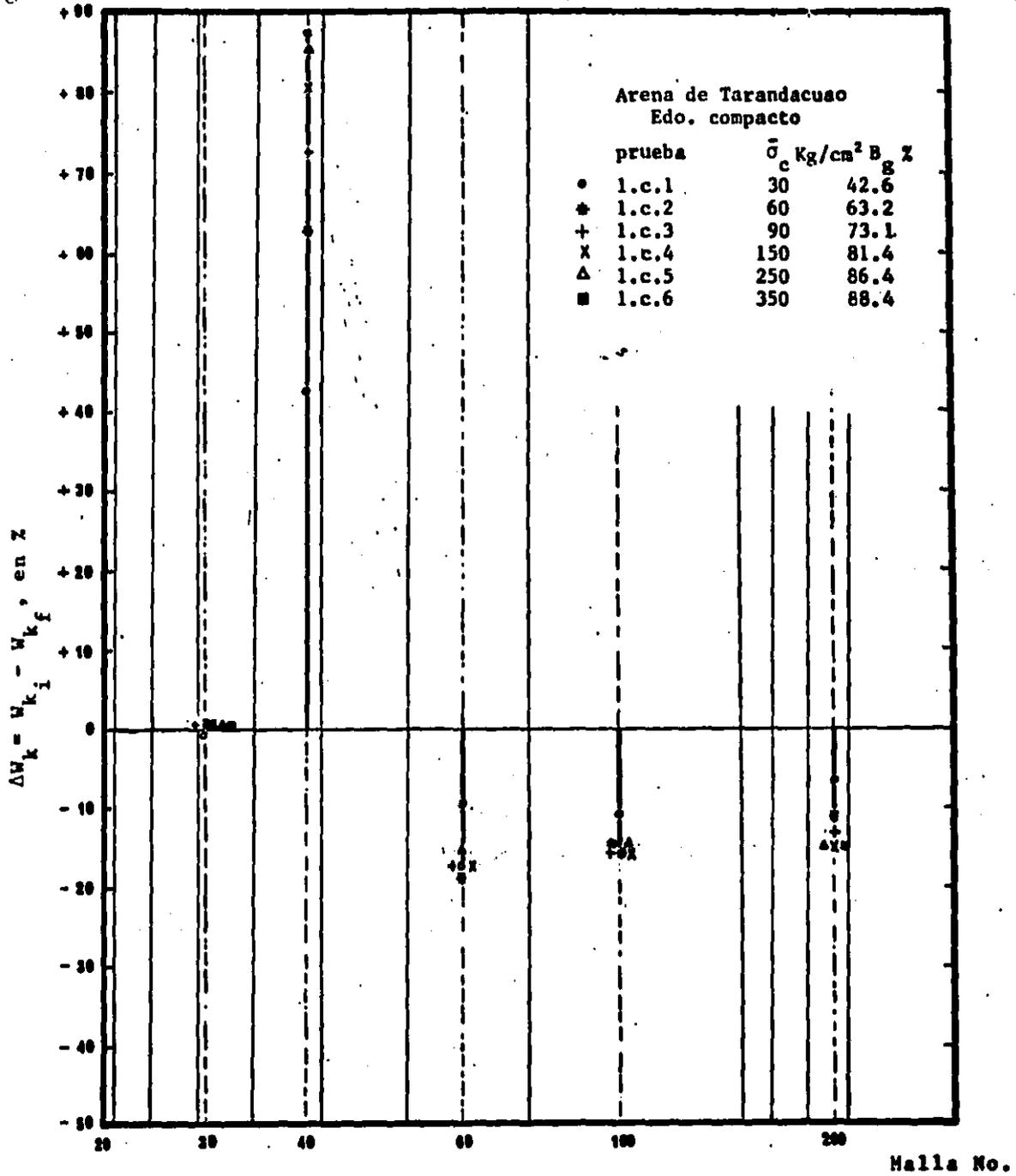
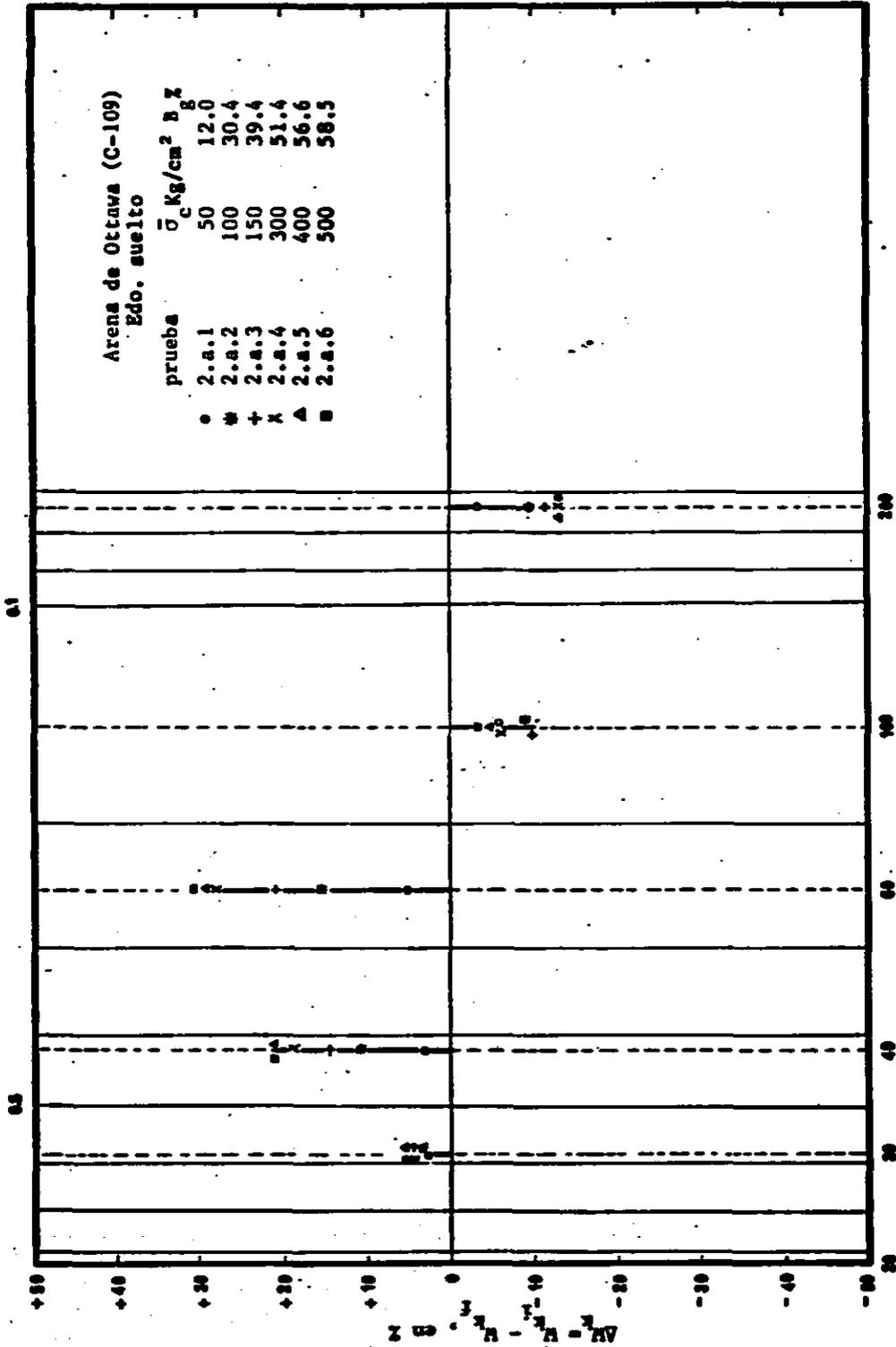


Fig.72. Diagramas de  $\Delta W_k$

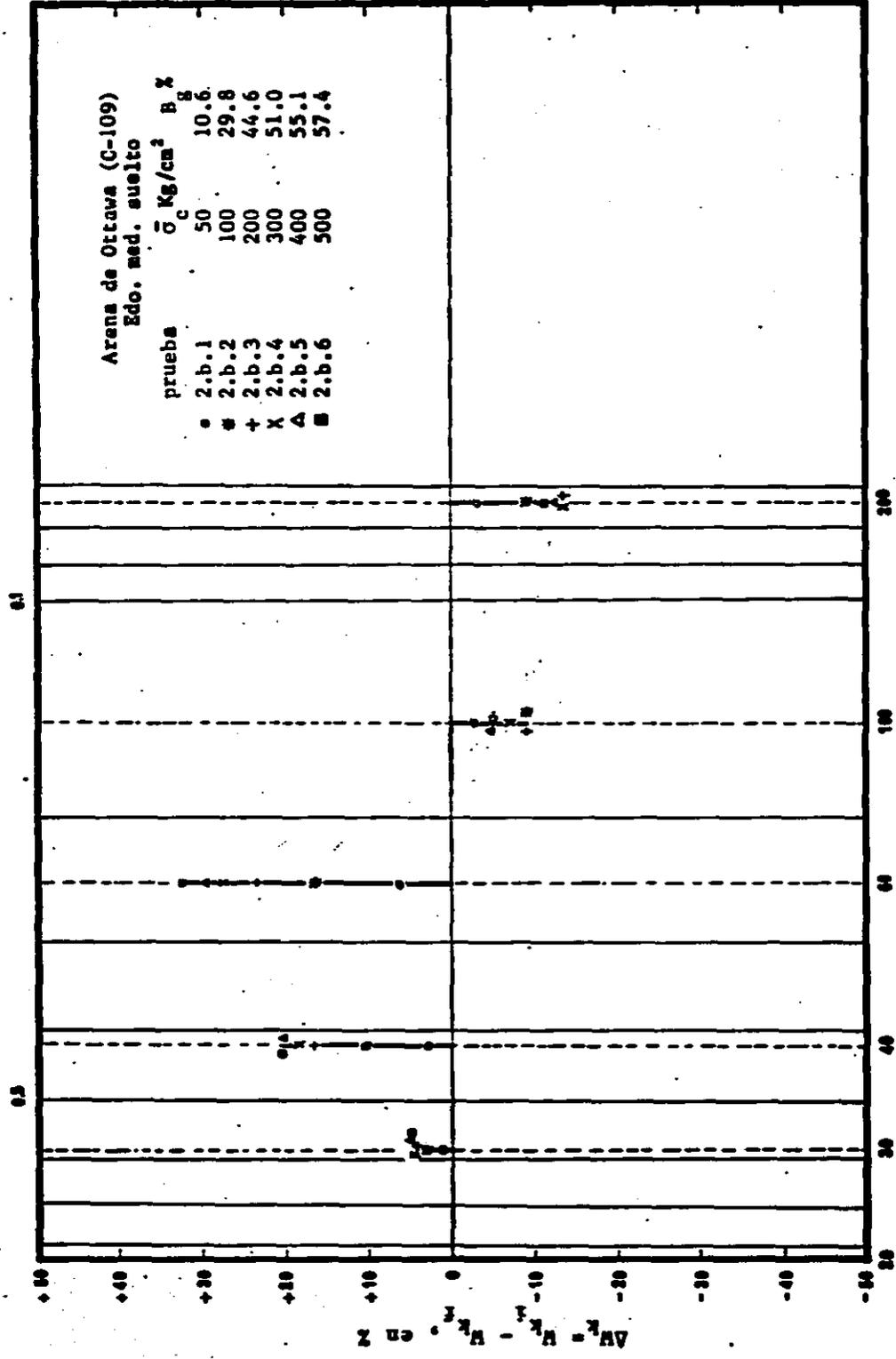
tamaño de partículas en mm



Malla No.

Fig. 73. Diagramas de  $\Delta W_k$

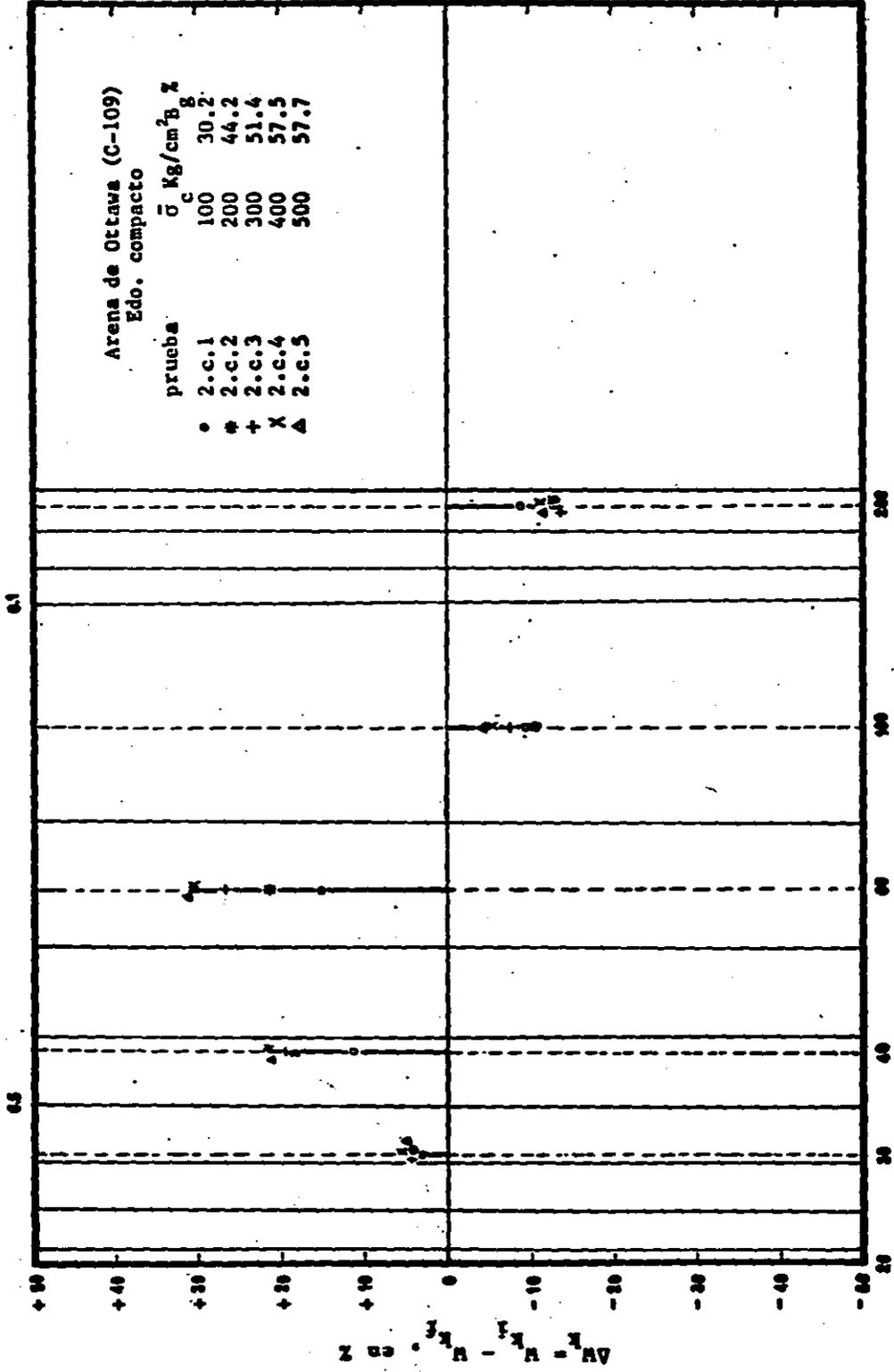
tamaño de partículas en mm



Malla No.

Fig. 74. Diagramas de  $\Delta V_k$

tamaño de partículas en mm



Malla No.

Fig. 75. Diagramas de  $\Delta W_k$

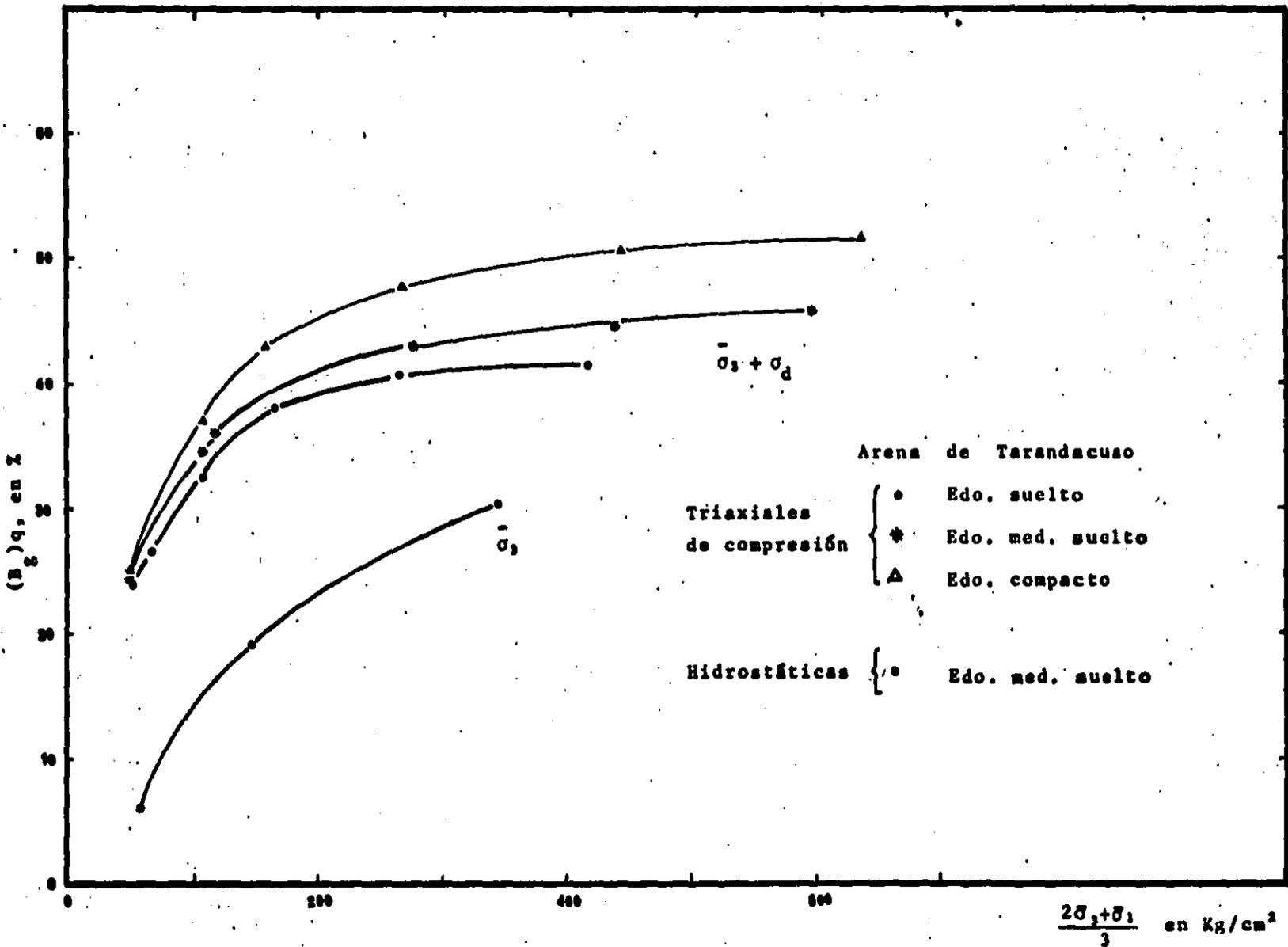


Fig 76. Curvas  $(B_g)_q$  vs. Esfuerzo Octaédrico

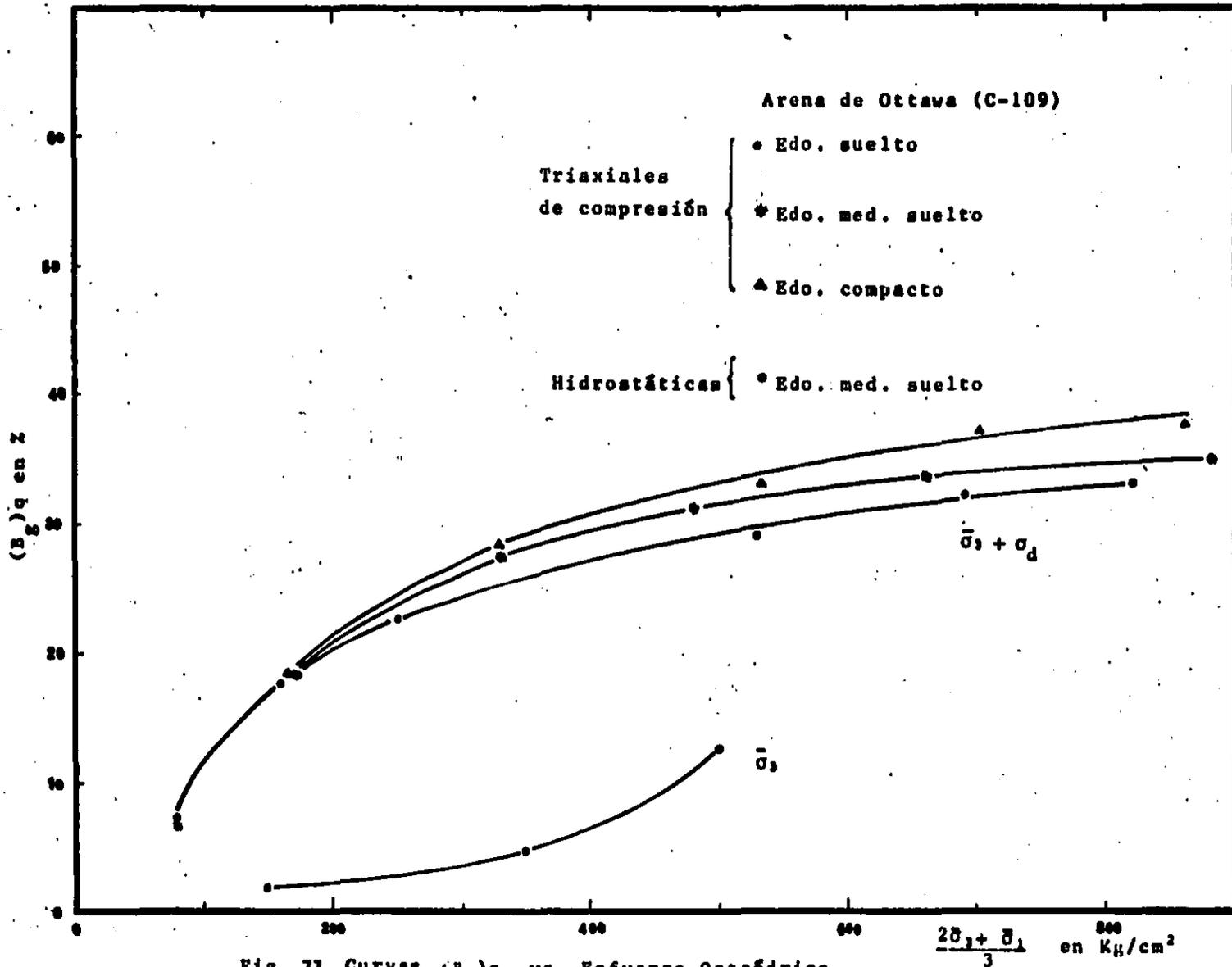


Fig. 77. Curvas  $(B_g)q$  vs Esfuerzo Octaédrico

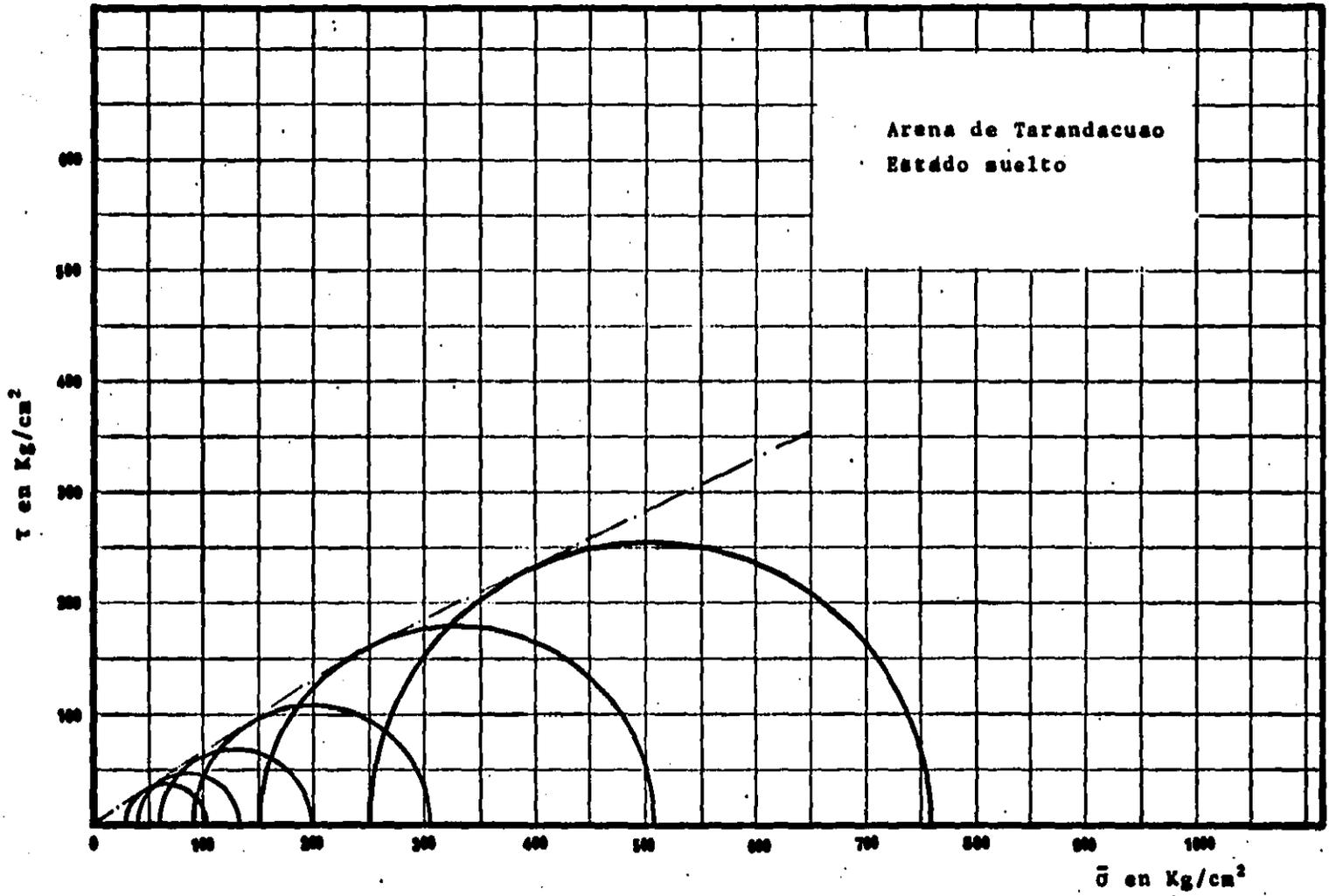


Fig. 78. Envolvente de Falla

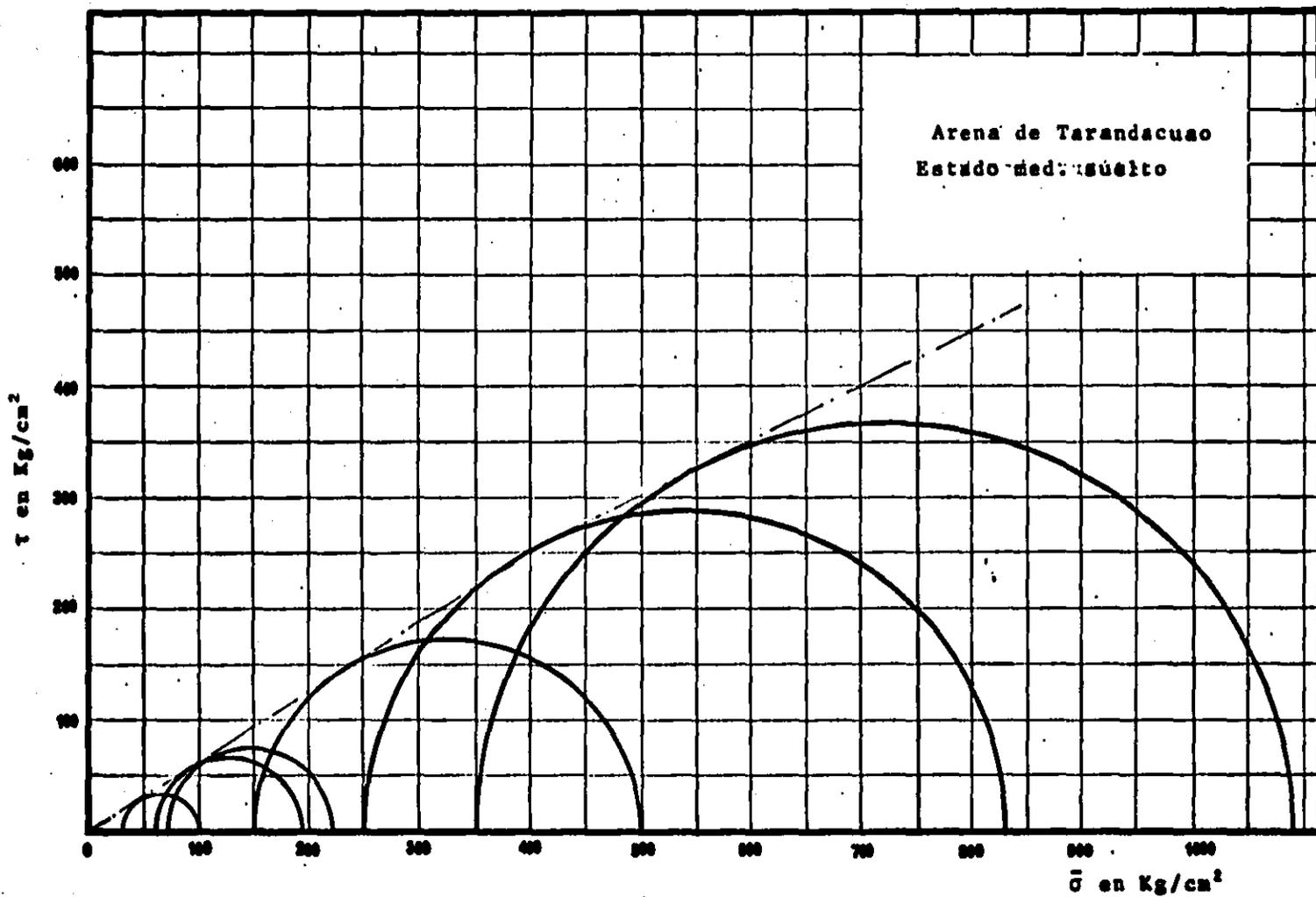


Fig. 79. Envolvente de Falla

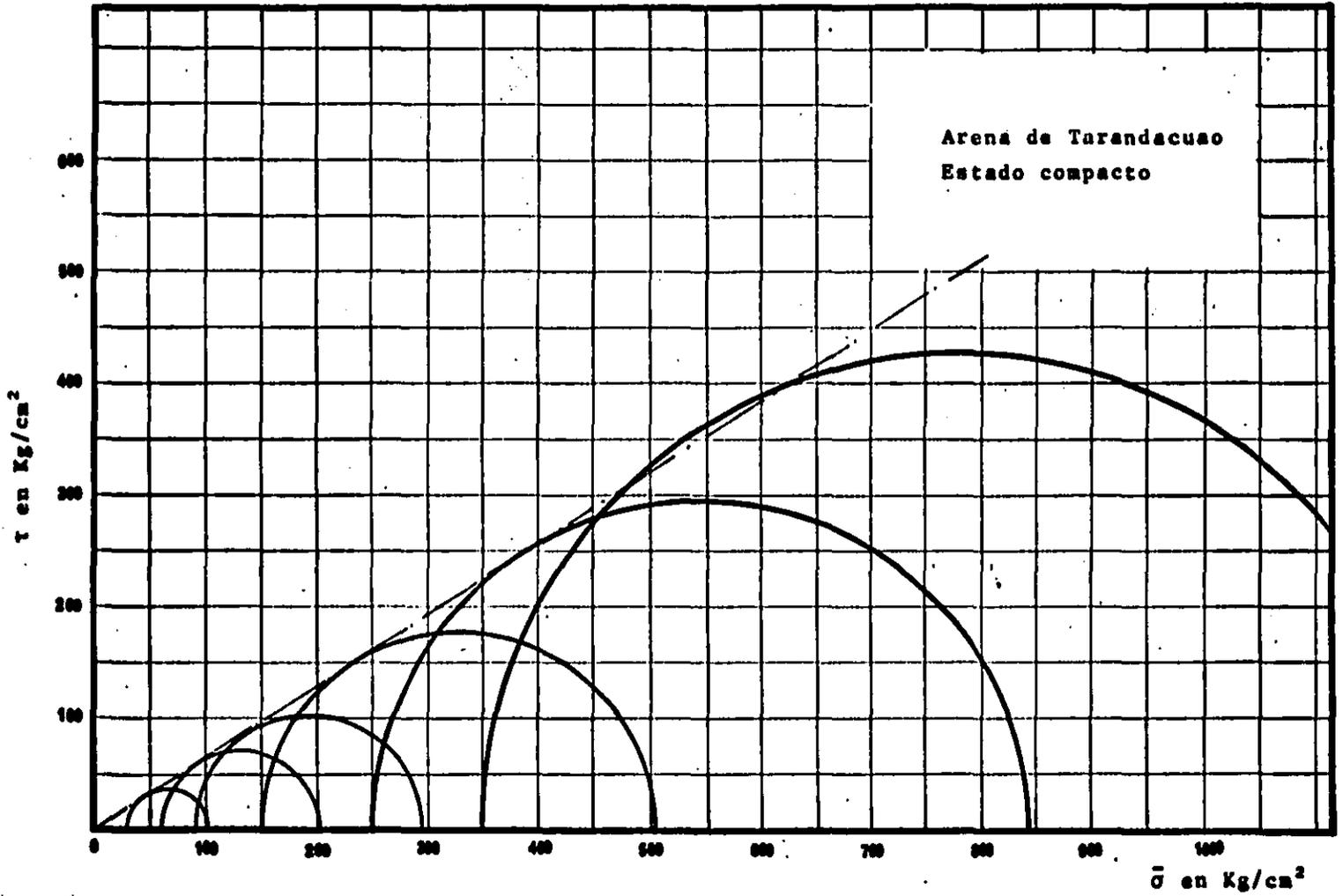


Fig.80. Envolvente de Falla

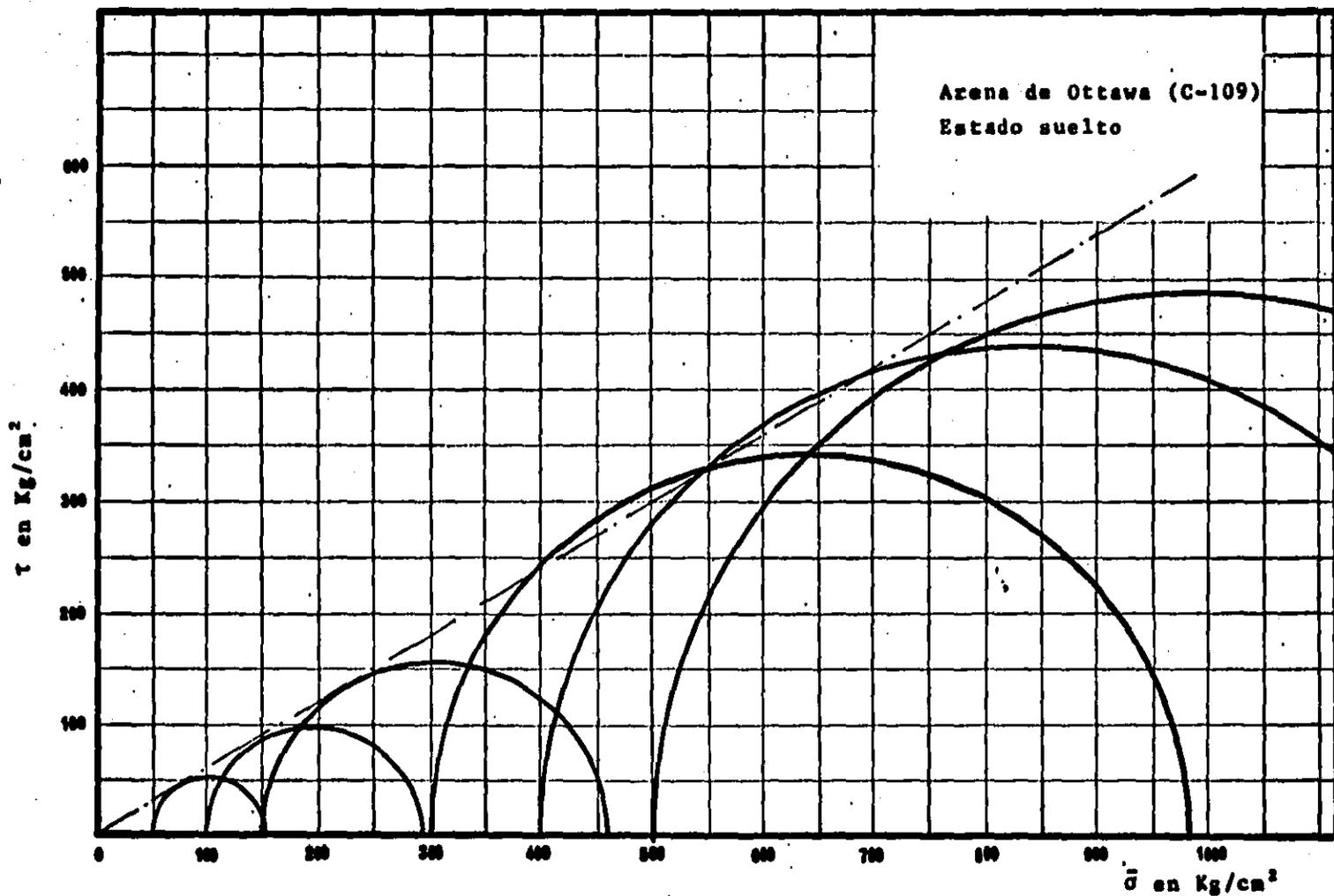


Fig. 81. Envolvente de Falla

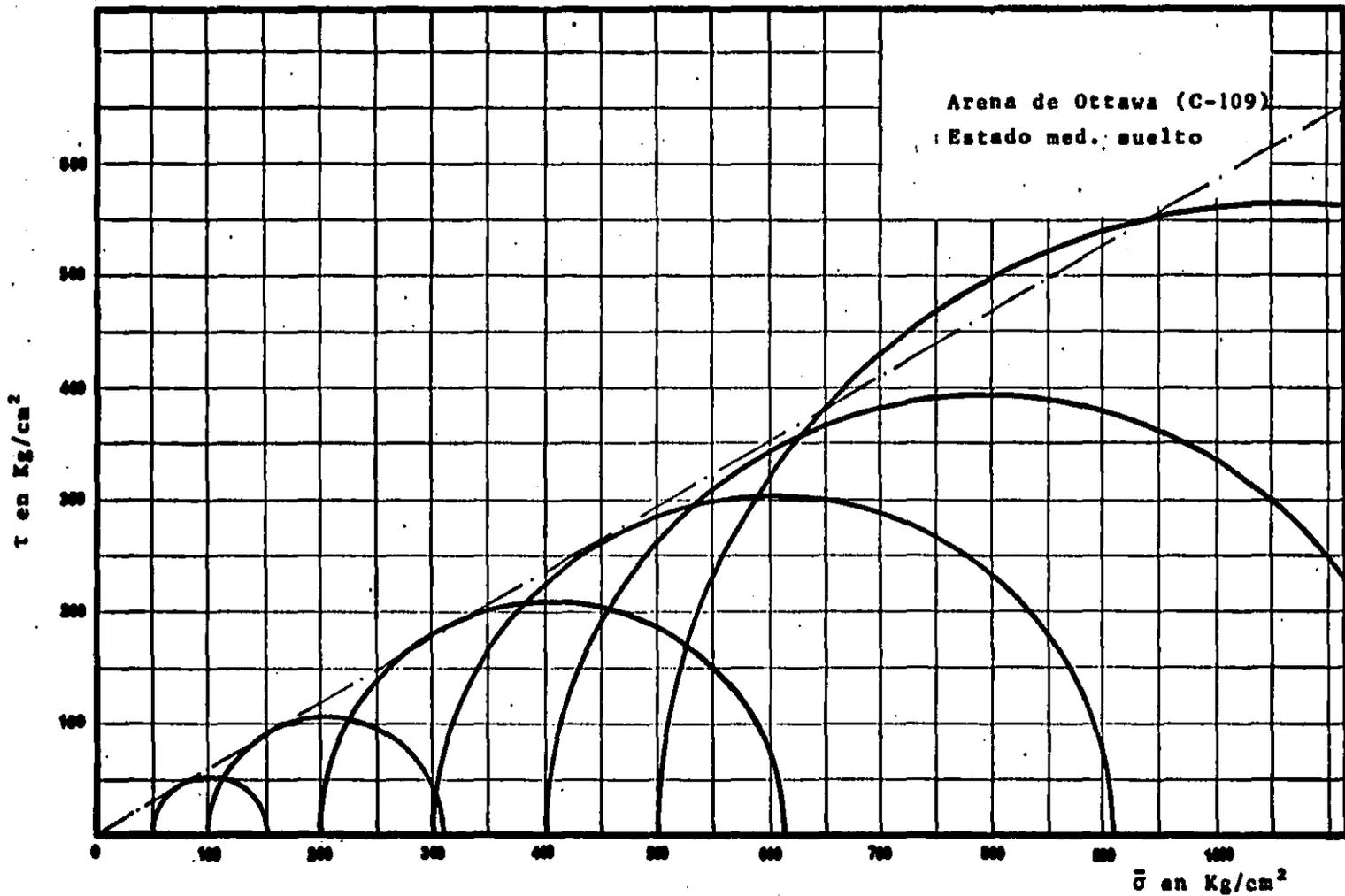


Fig. 82. Envolvente de Falla

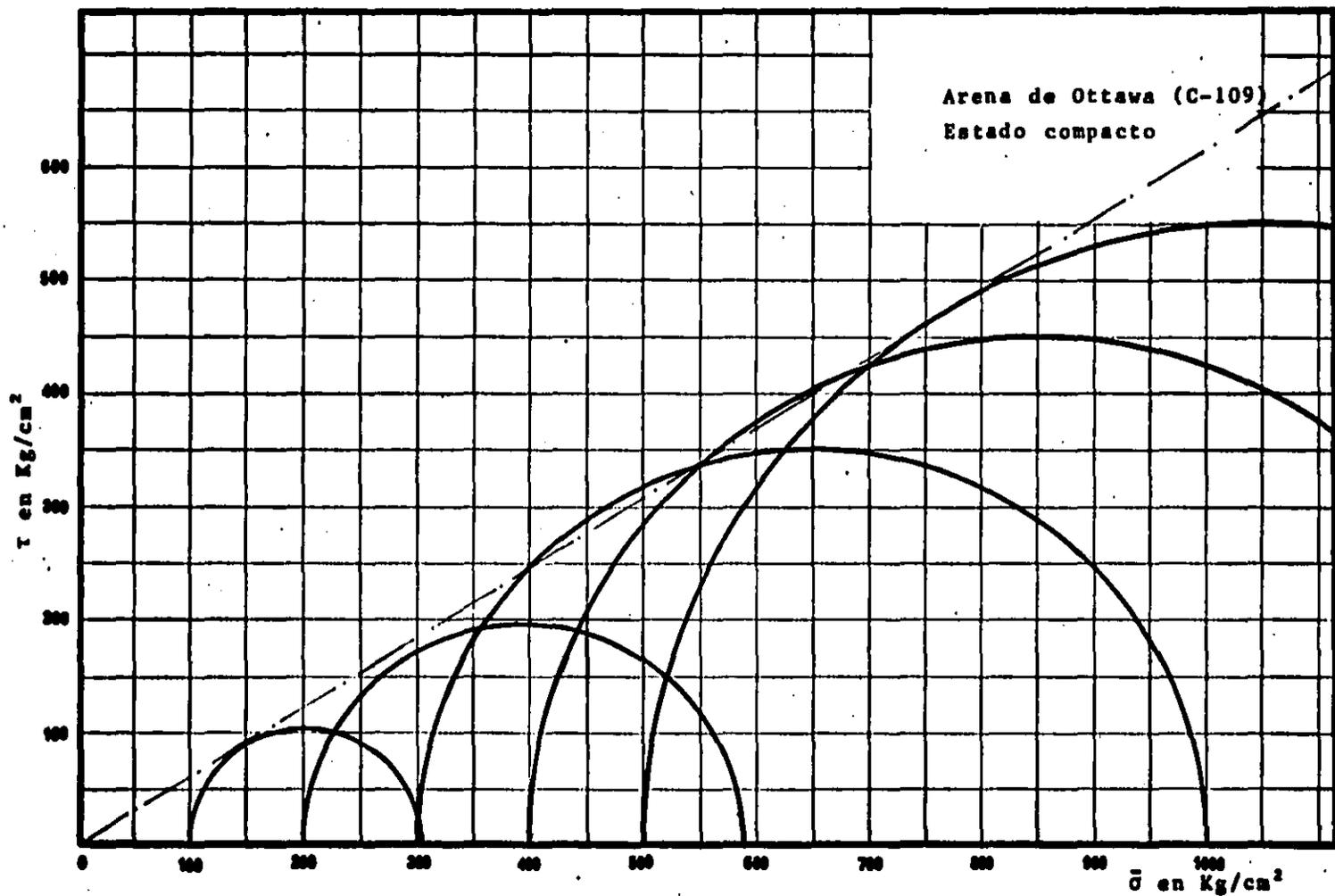


Fig. 83. Envolvente de Falla

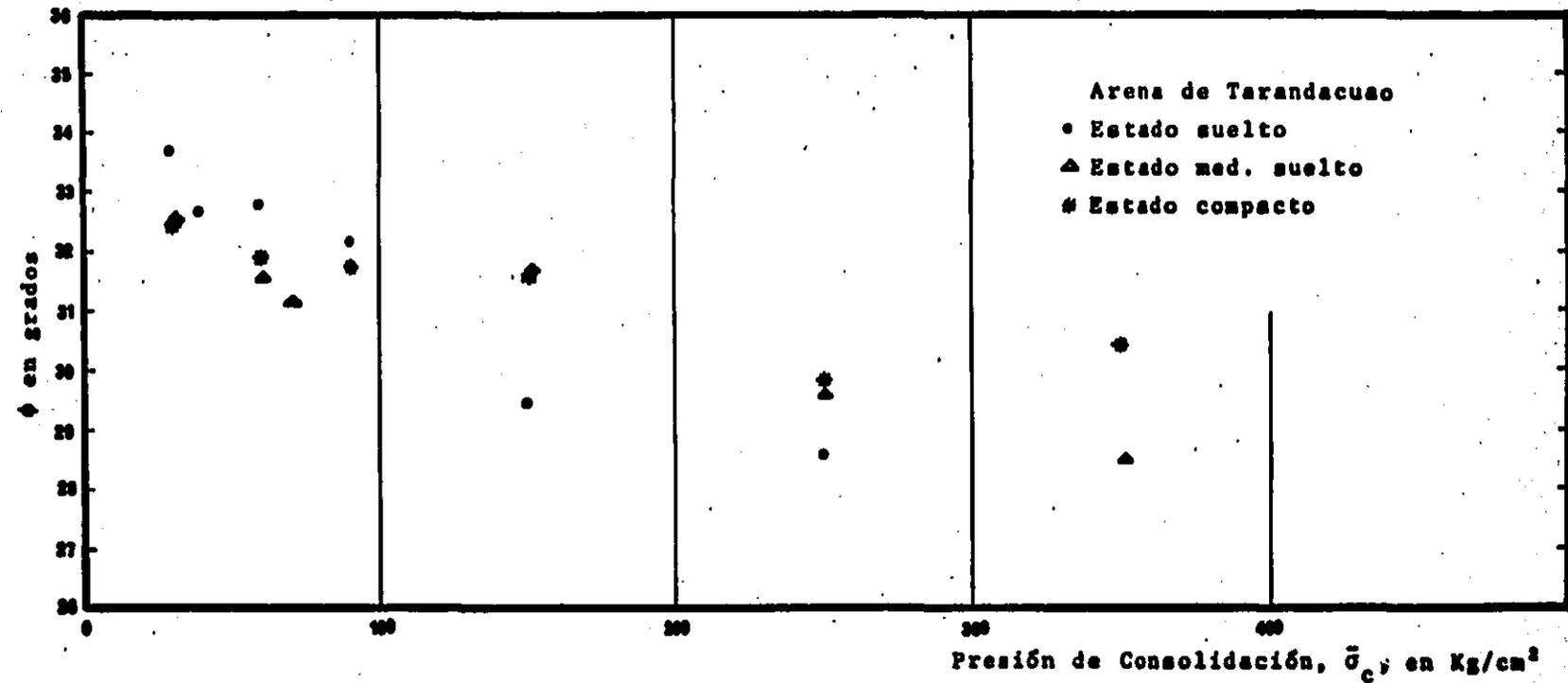


Fig. 84. Gráfica Ángulo  $\phi$  vs Presión de Consolidación

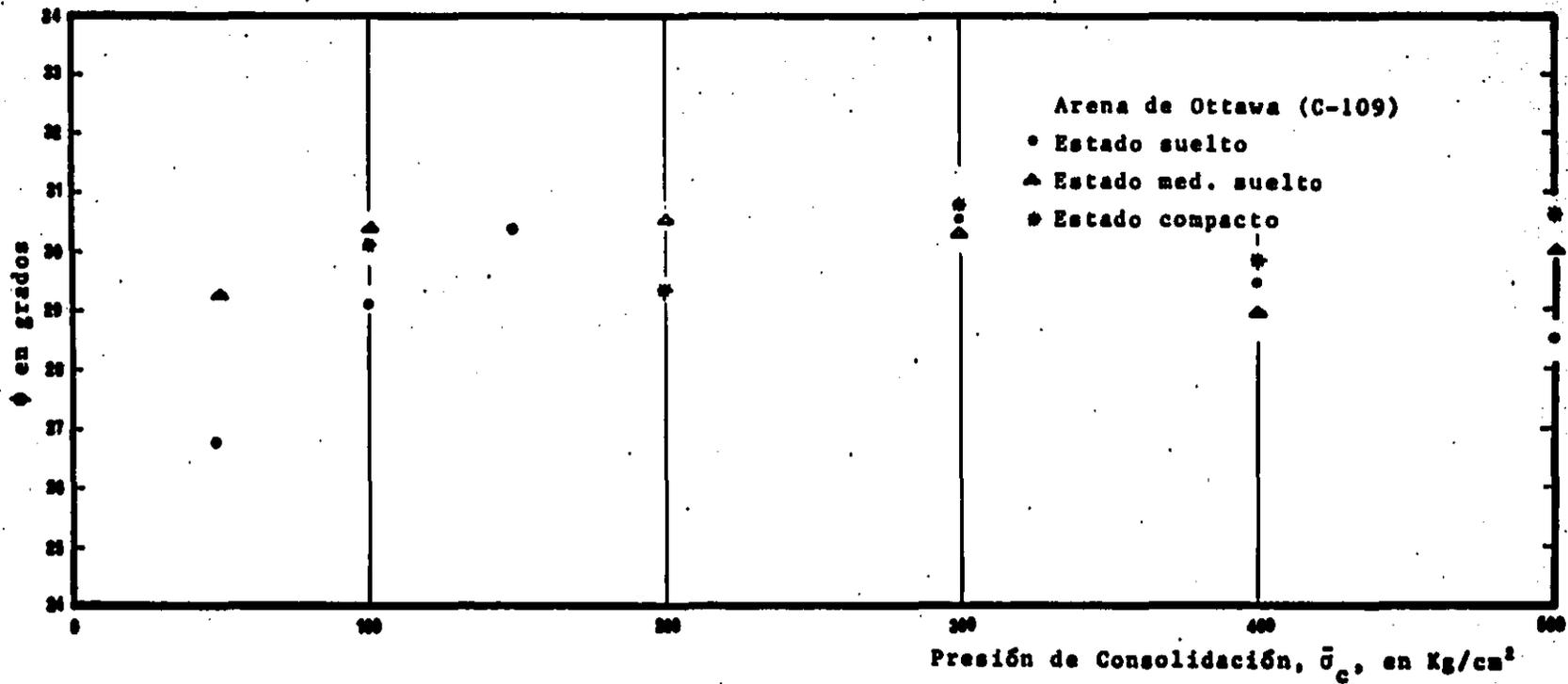


Fig. 85. Gráfica Angulo  $\phi$  vs Presión de Consolidación

Arena de Ottawa (Argüello)

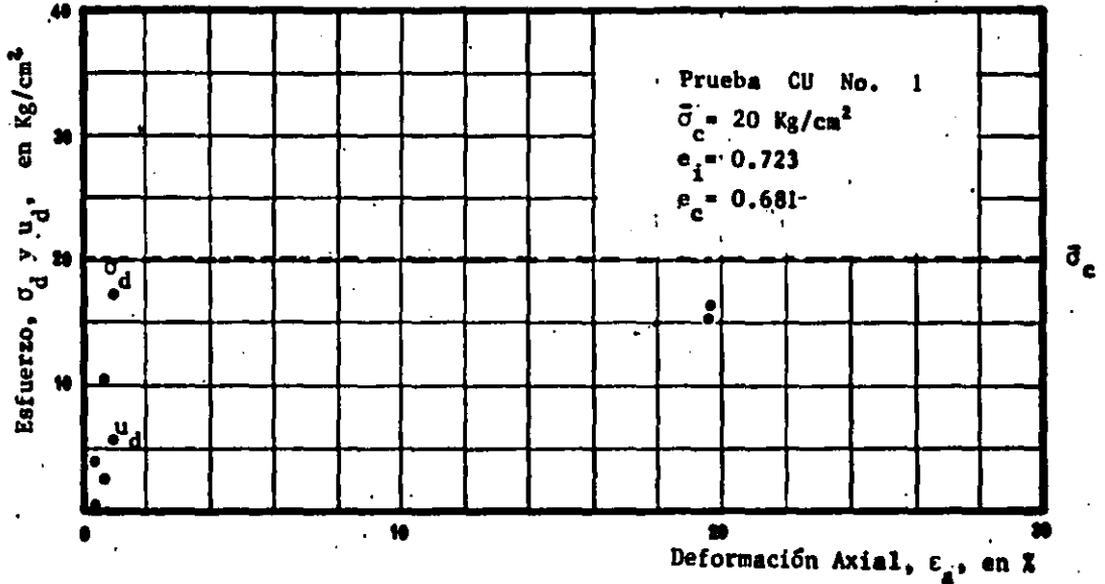


Fig. 86. Curva Esfuerzo Desviador y presión de poro vs Deformación Axial

Arena de Ottawa (Argüello)

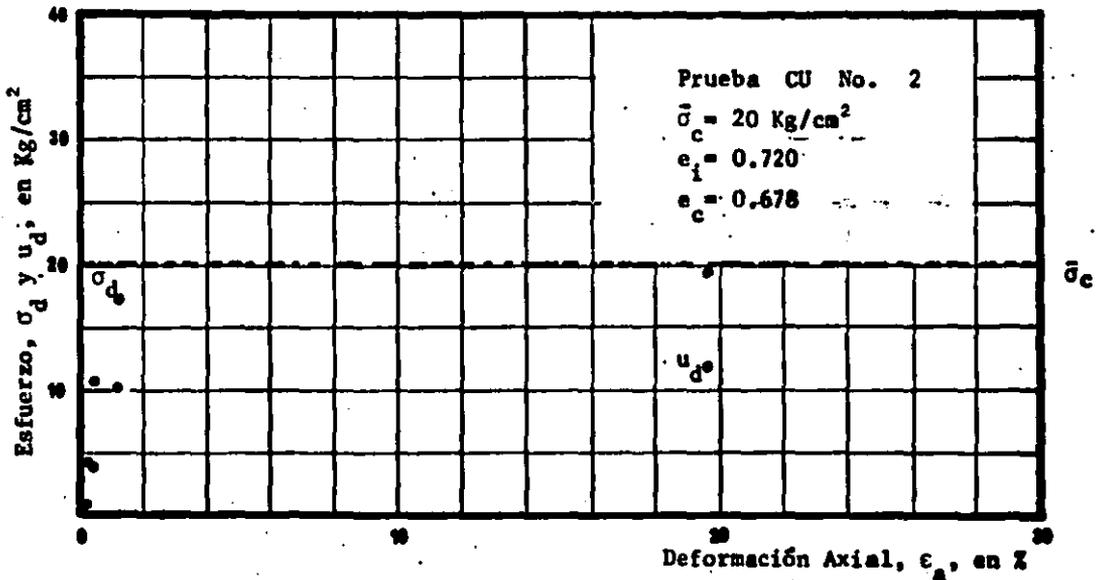


Fig. 87 Curva Esfuerzo Desviador y presión de poro vs Deformación Axial

Arena de Ottawa (Argüello)

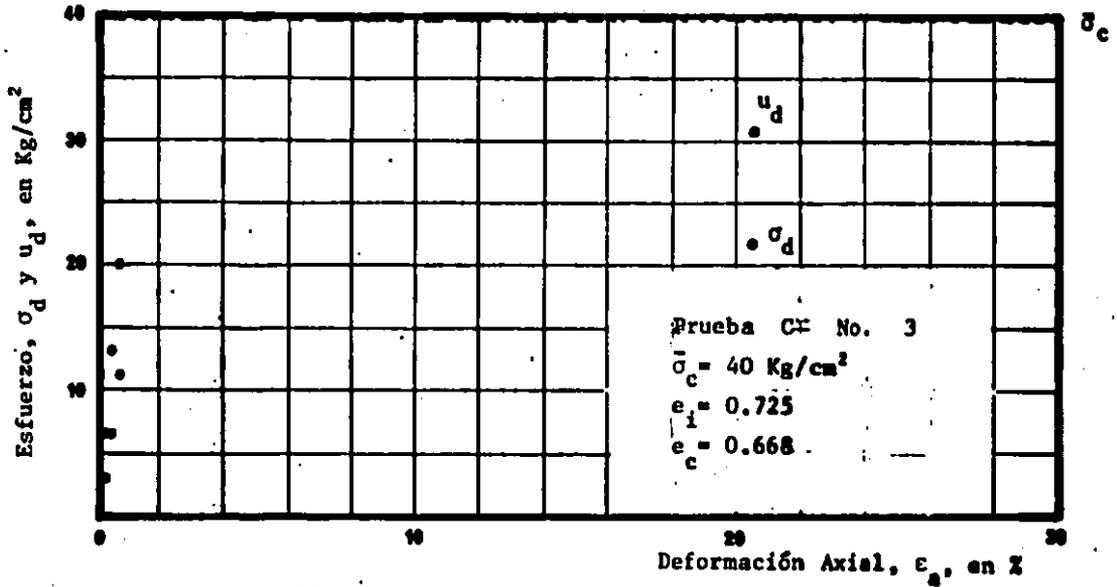


Fig. 88. Curva Esfuerzo Desviador y presión de poro vs Deformación Axial

Arena de Ottawa (Argüello)

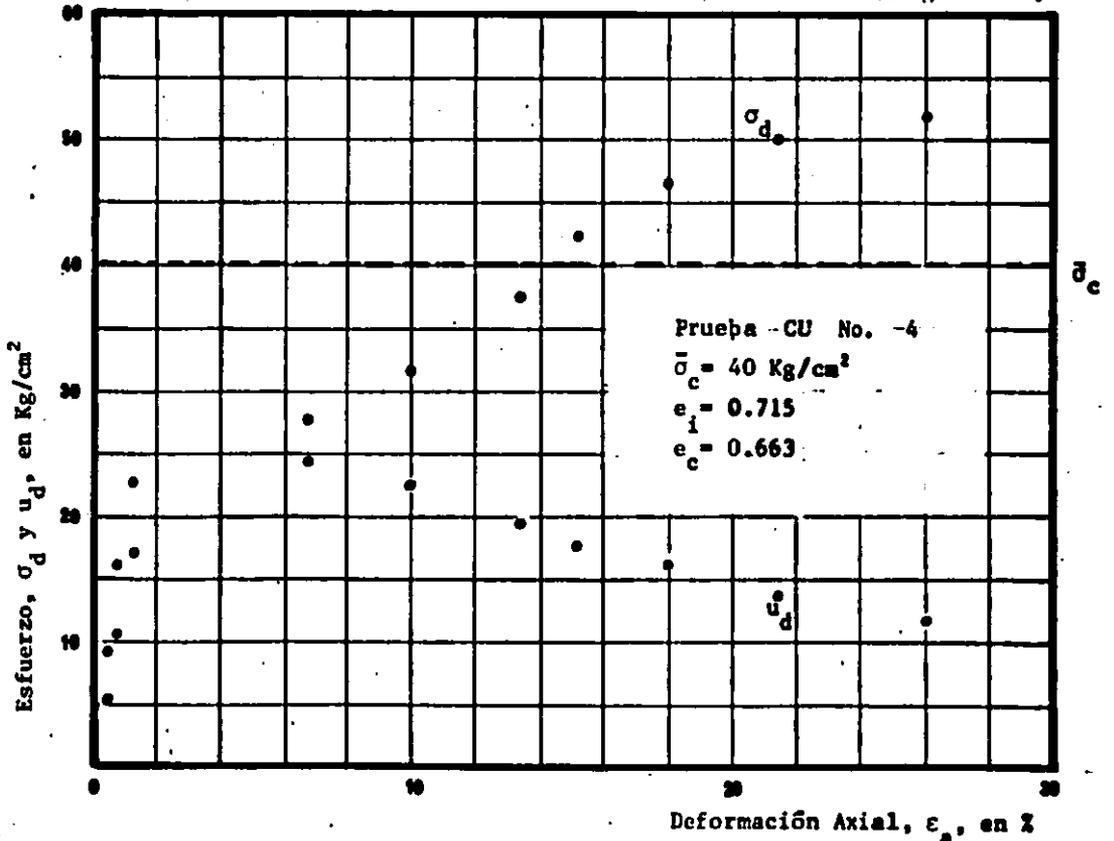


Fig. 89. Curva Esfuerzo Desviador y presión de poro vs Deformación Axial

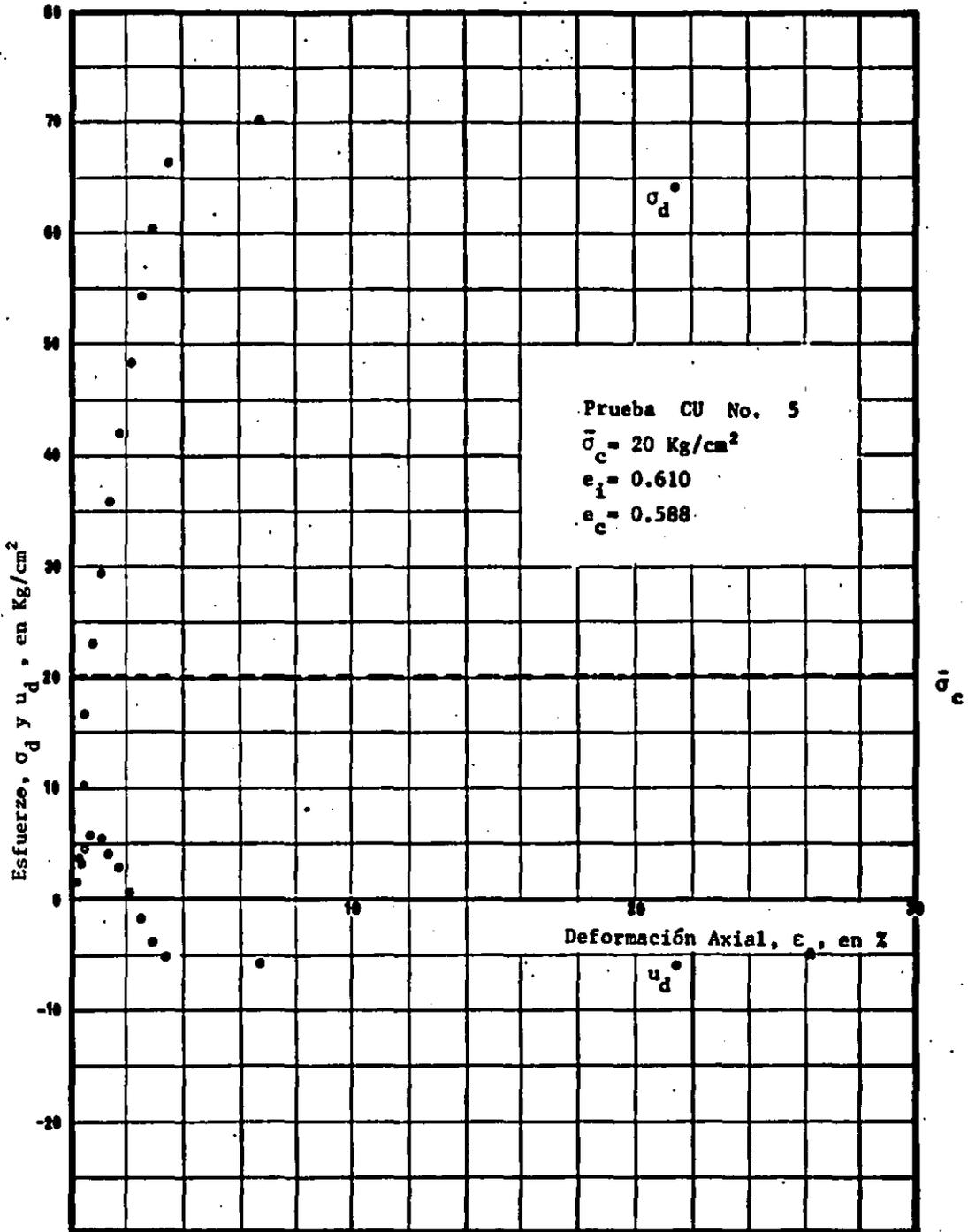


Fig. 90. Curva Esfuerzo Desviador y presión de poro vs Deformación Axial

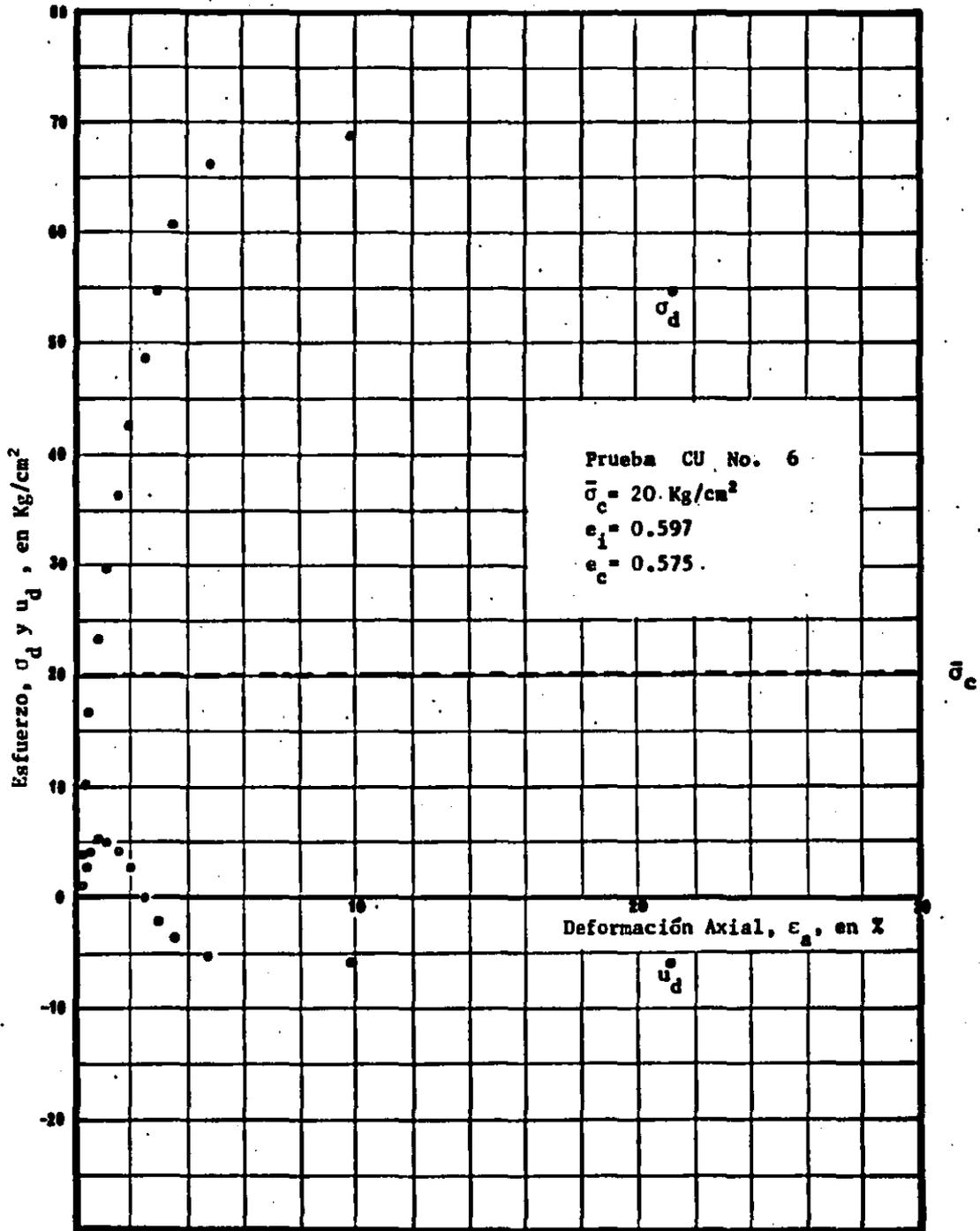


Fig. 91. Curva Esfuerzo Desviador y presión de poro vs Deformación Axial

Arena de Ottawa (Argüello)

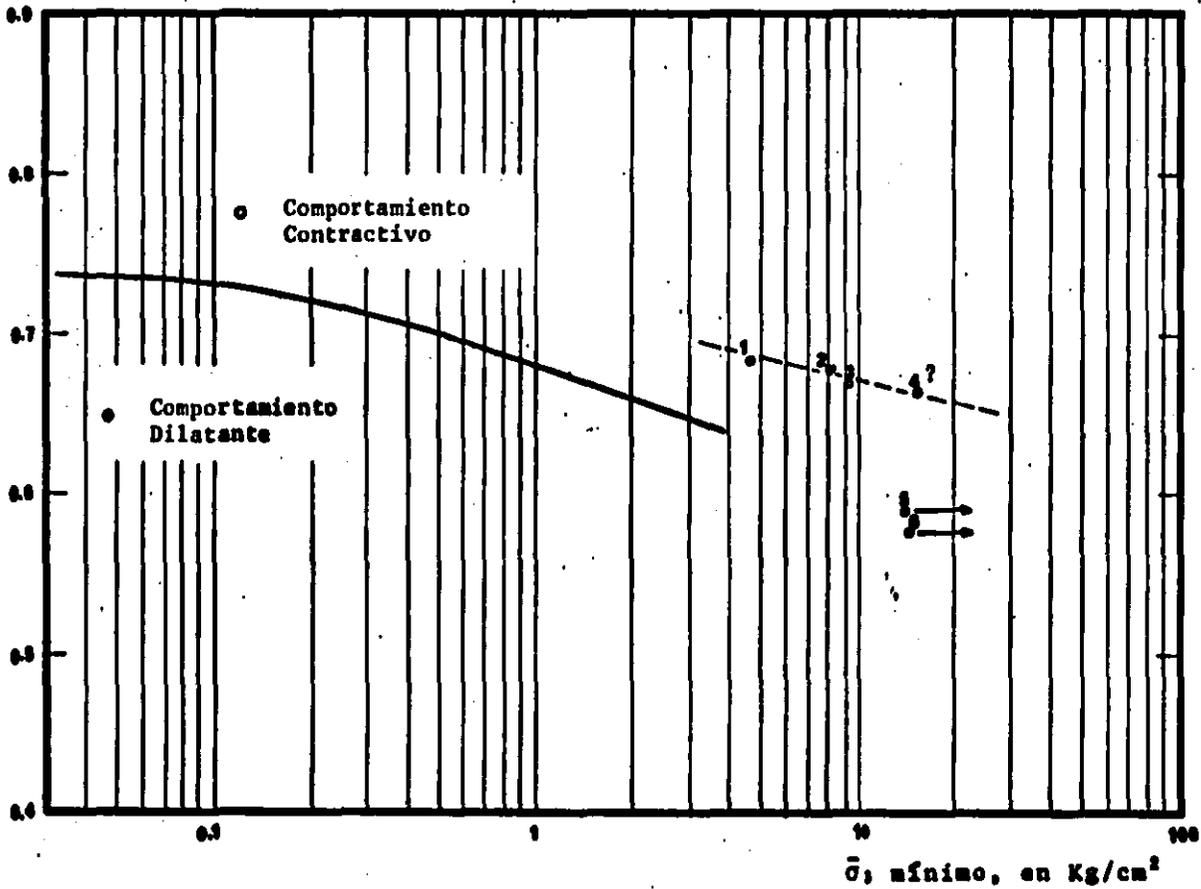


Fig.92. Ubicación de las Pruebas CU, respecto a la Línea  $e_{FDC}$  obtenida por Argüello

## APENDICE A OBTENCION DE LA RELACION DE VACIOS MAXIMA Y MINIMA

### a) Relación de vacíos máxima

El equipo utilizado para esta determinación es:

- Molde cilíndrico metálico de 3.60 cm de diámetro interior y 8.50 cm de altura con collarín de extensión de 3.20 de longitud.

- Embudo de 140 cm<sup>3</sup> de capacidad, con tapa circular de cartón a la salida, la cual pende del tramo recto con hilos quedando a 0.5 cm de la boca inferior.

Se procede colocando el embudo dentro del molde apoyándolo sobre la base del mismo. Se vacían en el embudo 150 gr del material seco y se inicia levantando el embudo con velocidad constante, describiendo un movimiento en espiral, tratando de que la tapa circular de cartón no toque al material ya depositado. El material al salir del embudo choca contra la tapa de cartón perdiendo toda la energía de caída y se esparce en el interior del molde, manteniéndose la superficie de la arena a un solo nivel durante la prueba. (fig A1-1)

Habiendo colocado toda el material, se retira el collarín y se

enrasa cuidadosamente la superficie del molde. Finalmente se pesa el molde con el material contenido; la repetición de esta prueba se hace necesaria hasta obtenerse resultados consistentes en las pesadas, el promedio de estos valores es el valor adoptado.

b) Relación de vacíos mínima

El equipo utilizado para esta determinación es:

- Molde cilíndrico metálico de 3.60 cm de diámetro interior y 8.50 cm de altura con collarín de extensión de 3.20 cm de longitud.
- Vibrador eléctrico manual, marca Burgess.
- Sobrepeso de 440 gr., con 3.40 cm de diámetro y 7.0 cm de altura.

Para esta determinación se dividen 150 gr de material seco en tres cantidades iguales. Se vacian dentro del molde los primeros 50 gr, se coloca el sobrepeso (fig A1-2) y se procede a excitar con el vibrador eléctrico manual tanto el molde como el sobrepeso, hasta lograr que el material no se compacte más. En las dos capas restantes se sigue el mismo procedimiento descrito anteriormente; se retira el collarín y se enrasa cuidadosamente la superficie del molde, para después pesar el molde con el material contenido. Como en el caso anterior, se efectúa varias veces la prueba hasta obtener resultados consistentes en las pesadas.

c) Cálculo

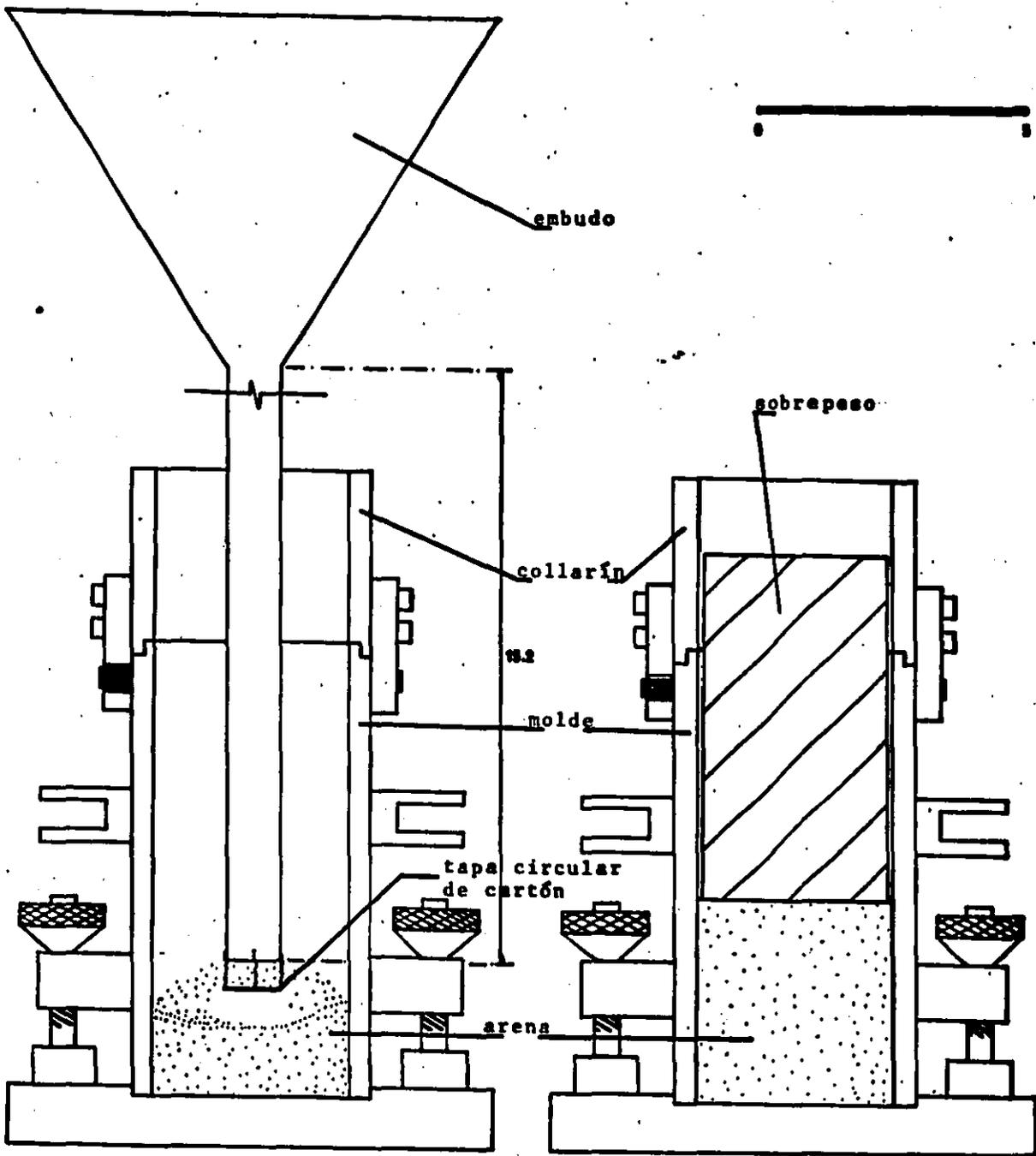
La relación de vacíos ( $e$ ), para ambos casos se calcula utilizando la siguiente expresión.

$$e = \frac{S_s \cdot V_m}{W_s} - 1$$

donde  $S_s$  gravedad específica de los granos

$V_m$  volumen del molde

$W_s$  peso del suelo contenido en el molde



( 1 )

( 2 )

Fig. Al. Dispositivo Experimental para obtener la Relación de Vacíos máxima ( 1 ) y mínima ( 2 )

## APENDICE B ROTURA INDIVIDUAL DE PARTICULAS

Con el propósito de conocer en forma estadística la resistencia individual de las partículas de la arena de Tarandacuao y de la arena de Ottawa (C-109), se escogieron al azar 400 partículas de cada material, de tamaños que van desde los retenidos en la malla No 30 (0.59 mm) hasta los de la malla No 100 (0.149 mm).

De cada partícula se obtuvieron sus dimensiones principales, mayor y menor, con ayuda de un microscopio marca Zeiss de objetivo 4X y dos oculares 8X con rejilla calibrada de 200 micras por cuadro. La altura de las partículas se midió haciendo variar la distancia focal del microscopio, obteniéndose esta de la resta de las lecturas efectuadas con un micrómetro integrado al microscopio, al hacer coincidir el foco con la cima de la partícula y con la superficie del portaobjetos donde descansaba la misma.

A continuación se rompieron las partículas individualmente empleando un aparato de compresión simple adaptado para este propósito. La partícula se coloca entre dos cristales de cuarzo para evitar cualquier indentación y se procede a aplicar lenta

mente la carga hasta que falla.

En la fig B1 se graficaron en papel doblemente logarítmico los valores promedio calculados, tanto para la carga de rotura como para el diámetro medio de la partícula, obteniéndose aproximadamente una línea recta que puede expresarse de acuerdo con Marsal (1), en la siguiente forma  $P = \eta d^\lambda$ ; donde "P" es la carga de rotura de la partícula, " $\eta$ " y " $\lambda$ " son parámetros característicos de cada material y "d" es la mínima dimensión dada de la partícula.

Los valores obtenidos para la arena de Tarandacua son  $\lambda=1.45$ ,  $\eta=93.3$  y para la arena de Ottawa (C-109) son  $\lambda=1.82$ ,  $\eta=501$ .

Nótese una marcada diferencia entre los valores de " $\eta$ ", atribuible a la resistencia y a la forma de los granos de estas arenas.

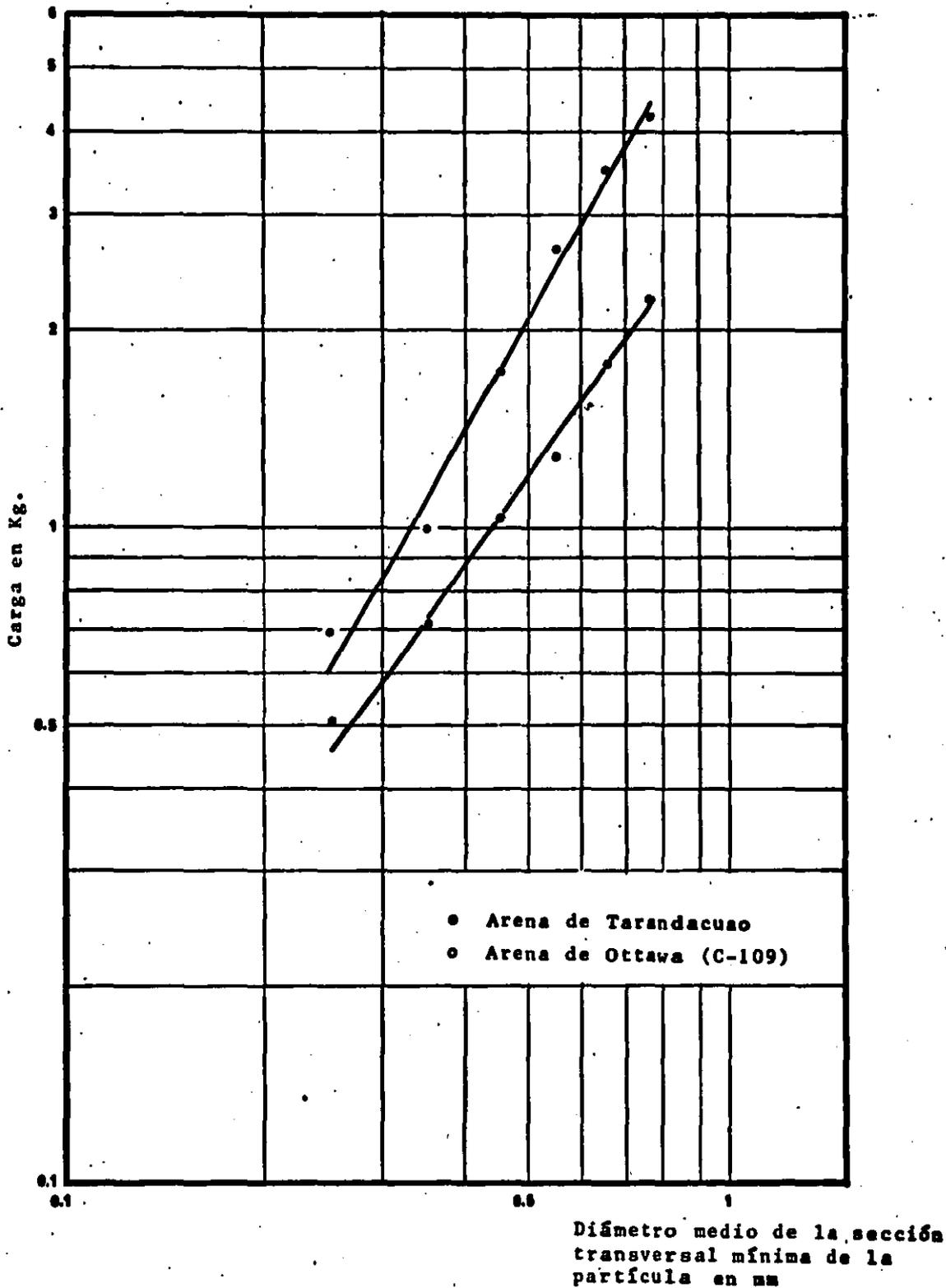


Fig. B1. Carga vs Diámetro medio de la partícula