

T-172  
M  
DES

92

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DIVISION DEL DOCTORADO



PRUEBAS DE VELETA EN UNA  
ARCILLA REMOLDEADA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN INGENIERIA (MECANICA DE SUELOS)

P R E S E N T A

Andrés Moreno Fernández

México, D. F.

1964

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.

# TESIS CON FALLA DE ORIGEN

---

**PAGINACION**  
**DISCONTINUA**

---

A la memoria de mi padre.

A mi madre.

A mis hermanos.

## AGRADECIMIENTOS.

A la Fundación Ingeniería A.C., al Instituto de Ingeniería, a la Comisión Federal de Electricidad y al Instituto de Física de la U.N.A.M.

Al Ing. Daniel Reséndiz bajo cuya dirección y atinados consejos, se elaboró esta tesis.

A los ingenieros:

J. Schmitter  
G. Springall  
L. Manfrez  
N. Rodríguez  
A. Fonseca  
A. Olivares  
H. Rodríguez.

Al personal del Laboratorio de Mecánica de Suelos, del Taller Mecánico, de la Carpintería y del de Electrónica del Instituto de Ingeniería, así como también a todas aquellas personas que directa o indirectamente colaboraron con el desarrollo de este trabajo.

BIBLIOTECA DE LAS DIVISIONES  
DE INVESTIGACIÓN Y DEL DOCTORADO DE INGENIERÍA.

I N D I C E.

	Pág.
1. Objeto de la investigación . . . . .	1
2. Antecedentes . . . . .	1
3. Propiedades índice y análisis del material usado . . . . .	6
4. Descripción de la veleta y de sus accesorios . . .	8
5. Procedimiento de prueba . . . . .	11
6. Consideraciones teóricas . . . . .	13
7. Resultados de las pruebas . . . . .	18
8. Conclusiones y recomendaciones . . . . .	24
9. Referencias . . . . .	27

## 1. OBJETO.

El objeto de esta investigación fué el estudio experimental de la resistencia al esfuerzo cortante de un material arcilloso remoldado, en función del contenido de humedad y de la velocidad de deformación. Se usó para tal fin una veleta modificada del Laboratorio de Mecánica de Suelos del Instituto de Ingeniería.

También se trató de correlacionar la resistencia al esfuerzo cortante con el grado de orientación de las partículas sólidas del suelo y con su separación media.

## 2. ANTECEDENTES.

2.1 Los investigadores suecos L. Vadling y S. Odénstad, hicieron pruebas en el campo y en el laboratorio usando una veleta diseñada por el primero de ellos (Ref. 1). Estudiaron los siguientes conceptos:

Forma de la superficie de falla. Para determinar la forma de la superficie de ruptura se hicieron pruebas de veleta en el laboratorio en arcilla y en arena. Se encontró en ambos casos que la falla ocurre en un cilindro circular cuyas dimensiones son las mismas de la veleta.

Falla progresiva. En los dispositivos de pruebas de cortante se procura aplicar los esfuerzos de manera que su distribución sea lo más uniforme posible, para evitar falla progresiva en la muestra. Al principio de una prueba de veleta, se puede esperar una falla progresiva frente al filo de cada una de las aspas, que se extenderá gradualmente a lo largo de toda la superficie de ruptura.

Con el objeto de formarse una idea del proceso de ruptura se estudiaron las deformaciones a diferentes ángulos de rotación de la veleta. Generalmente la deformación ironto a cada aspa parece ser un poco mayor que la de detrás de ella. Sin embargo en ocasiones se encontró lo contrario. Lo obstante la deformación parece ser comparativamente uniforme a lo largo de toda la superficie de ruptura. Por lo tanto, se puede concluir que el carácter progresivo de la falla es ligero y que no produce efectos apreciables en los resultados de las pruebas.

Velocidad de rotación. Se hicieron pruebas con diferentes velocidades de rotación. La dispersión de las observaciones es importante, especialmente a grandes profundidades, pero la tendencia a disminuir la resistencia al decrecer la velocidad es evidente. Esta tendencia no fué observada cuando los ensayos fueron hechos en arcillas sensitivas.

En el intervalo de velocidades investigado (0.1 - 1.0 grados/seg.) la resistencia disminuye al disminuir la velocidad de deformación. Para velocidades pequeñas (menores que 0.1 grados/seg.) no se ve que la resistencia disminuya apreciablemente, antes bién, parece ser que la resistencia se incrementa como un resultado de la consolidación local de la arcilla. Sin embargo esto es verdadero sólo para velocidades muy pequeñas. Las pruebas concuerdan con los resultados de otras pruebas de laboratorio.

Número de espas. Si la veleta está equipada con un número pequeño de espas, la distribución de los esfuerzos en la superficie de ruptura puede no ser uniforme, así también como en el caso de que la veleta tenga un gran número

de aspas.

Una distribución de esfuerzos no uniforme puede favorecer una falla progresiva, que se traduce en una disminución del momento torsor máximo y por ende en la resistencia máxima. Por otro lado, si la veleta tiene un gran número de aspas se aumenta la alteración, que causa también una disminución en la resistencia máxima.

Se compararon las veletas de dos y de cuatro aspas. Los valores de la resistencia obtenidos con la veleta de <sup>\*</sup>dos aspas. A pesar de las pocas pruebas realizadas, parece ser que la veleta de cuatro aspas da mejores resultados que la de dos. Además, la veleta de cuatro aspas es fuerte y adecuada para fines prácticos y está considerada como estándar.

El error introducido por el uso de una veleta de cuatro aspas en lugar de una con el número ideal, prácticamente no tiene importancia.

Dimensiones de la veleta. En el momento de la ruptura la distribución de los esfuerzos en la arcilla, a lo largo de la superficie lateral de ruptura es conocida, pero la distribución de los esfuerzos en las bases es incierta. Si se supone que la distribución de esfuerzos en las bases es uniforme, se introduce un error del lado de la seguridad, sin embargo, deberá ser conservado lo más pequeño posible. Esto puede lograrse usando veletas con una altura mayor que el diámetro. Si la distribución real de los esfuerzos en las bases del cilindro se supone triangular, el error (la diferencia entre los momentos correspondientes a una distribución uniforme y una triangular) se puede estimar, como se muestra en la Tabla 1.

\*... cuatro aspas fueron un poco mayores que las obtenidas con la veleta de...

H/D	1	2	3
Error	6.3%	3.6%	2.5%

TABLA 1

2.2 R. Karlsson hizo pruebas de veleta en el laboratorio en suelos remoldeados (Ref. 2).

Los suelos probados fueron los siguientes: bentonita (LL = 320%), arcilla (LL = 70%), "lodo" (LL = 275%), caolín (LL = 45%), caolín (LL = 52.5%) y limo grueso (LL = 30%).

Se usaron veletas con diámetros de 1.5, 3.0 y 4.5 cm. con una relación H/D = 2. El molde que contiene la muestra es un cilindro con un diámetro de 5.5 cm. y una altura de 17 cm.

Cada muestra fué estudiada a diferentes contenidos de humedad, arriba y abajo de LL. Para un cierto contenido de humedad se hizo una serie de pruebas con distintas velocidades de rotación. La mayoría de las pruebas se hicieron con velocidades de rotación entre 60 y 30 000 grados/min.

Las muestras se remoldearon de dos maneras: a) remoldeo rotatorio: una vez hincada la veleta se dan 50 revoluciones al molde. b) remoldeo normal: se hace con espátula.

Las pruebas hechas en bentonita, arcilla y limo grueso remoldeados normalmente, mostraron que el esfuerzo cortante ( $\tau$ ) disminuye después de alcanzar un valor máximo sólomente cuando el contenido de humedad es menor que el LL. Como se ve en la Fig. 1. Esta disminución en la resistencia al cortante parece ser debida a la viscosidad estructural y a la tixotropía. Las mismas muestras se remoldearon

rotatoriamente y se encontró que para contenidos de humedad menores que el LL, el esfuerzo cortante prácticamente se conserva constante en toda la prueba, excepto en el caolín.

Se dibujaron gráficas resistencia máxima vs. velocidad de rotación, las cuales mostraron que  $S_{m\acute{a}x}$  tiene un valor mínimo para las velocidades de rotación comprendidas entre 100 y 200 grados/min.

Para velocidades altas, el valor de  $S_{m\acute{a}x}$ , se encuentra localizado a lo largo de una línea recta. Para velocidades más grandes que las dibujadas (Fig. 2) los valores son erráticos.

2.3 D. Reséndiz N. hizo determinaciones de la resistencia al esfuerzo cortante en un material arcilloso con distintos contenidos de humedad, empleando una veleta miniatura con un diámetro de 1.8 cm. y una altura de 2.6 cm. El material se alojó en un molde de 5.5 cm. de diámetro y una altura de 7.8 cm. (Ref. 3).

La veleta se operó controlando la velocidad de carga. El procedimiento de operación no permitió controlar la velocidad de deformación; sin embargo al repetir algunos ensayos con igual contenido de humedad y con diferentes velocidades de carga, no se obtuvieron variaciones importantes en las curvas esfuerzo-deformación, ni en la resistencia máxima, excepto para contenidos de humedad superiores al LL, en donde se observaron variaciones importantes, probablemente debidas a fenómenos viscosos, razón por la cual la curva  $w$ -log  $S_{max}$  está menos definida en esta zona como se ve en la Fig. 3.

Para contenidos de humedad comprendidos entre el LL y el LP, la curva  $w\text{-log } S_{\text{max}}$ , resulta en cambio bien definida.

Comparando la curva  $w\text{-log } S_{\text{max}}$  con la curva de fluidéz extrapolada (llevando sobre el eje  $S_{\text{max}}$ , el número de golpes en lugar de  $\text{gr/cm}^2$ ) puede verse que ambas se cortan para un contenido de humedad que coincide aproximadamente con el LL, siendo el tramo recto de la curva  $w\text{-log } S_{\text{max}}$ , prácticamente paralelo a la extrapolación de la curva de fluidéz.

Puede concluirse que al menos para el material ensayado (arcilla remoldada con un LL = 89.1% y LP = 37.0%), no es válida la correspondencia entre el número de golpes de la copa de Casagrande y la resistencia al esfuerzo cortante en  $\text{gr/cm}^2$ . Para el LI la resistencia al esfuerzo cortante resultó aproximadamente de 28  $\text{gr/cm}^2$ .

### 3. PROPIEDADES LÍQUIDAS Y ANÁLISIS DEL MATERIAL SUAVADO.

3.1 Preparación de la muestra del suelo. El material se extrajo del terraplén de la autopista Querétaro-apaseo, en la estación 3 + 020, a una elevación de 0.85 m., el 10 de agosto de 1960.

El peso de la muestra extraída fué de 40 g. aproximadamente, debido al tiempo transcurrido la muestra perdió humedad lo que ocasionó que se formaran grandes grumos. El material fué disgregado con un pisón de madera, usado de tal modo de no raspar los grumos del suelo. Una vez que las partículas de los grumos estuvieron disgregadas el material se pasó por la malla 200 por medio de lavado. La suspensión

resultante se vació en un tanque en cuya superficie interior contenía un filtro de arena de 3 cm. aproximadamente, cubierto con un papel filtro para evitar la pérdida de partículas sólidas de la suspensión. Esto se hizo con el objeto de acelerar la pérdida de agua. Cuando el material tuvo una consistencia aceptable, se guardó en frascos de vidrio.

### 3.2 Propiedades índice.

Granulometría por hidrómetro. La curva granulométrica (Fig. 4) muestra que el material está bien graduado. Se encontró que la fracción arcillosa ( $< 2\mu$ ) es el 56% del total de la muestra.

De acuerdo con Skempton (Ref. 4), según su actividad  $\left( A = \frac{I_p}{\% < 2\mu} \right)$ , las arcillas se clasifican en arcillas inactivas ( $A = 0 - 0.75$ ), arcillas normales ( $A = 0.75 - 1.25$ ) y arcillas activas ( $A > 1.25$ ).

Para la arcilla en cuestión la actividad resultó de 0.95, por lo tanto es una arcilla normal.

Peso específico relativo de la fase sólida:  $S_s = 2.506$ .

Límites de consistencia:  $LL = 85.1\%$ ,  $IP = 32.1\%$ ,  $I_p = 53.0\%$

Clasificación S.U.C.S.: OH.

Límite de contracción. Se hicieron determinaciones para diferentes contenidos de humedad de preparación y se encontró una gran dispersión de los resultados, como puede verse en la Fig. 5. Se concluye que el IC, depende notablemente, del método de preparación de la pastilla y no sólo es función del contenido de humedad de preparación, sino también de otros factores como el esfuerzo aplicado al compactar la pastilla.

La obtención del LC del material en estudio fué bastante difícil, puesto que si se dejaba la pastilla secar al aire, se agrietaba completamente haciendo imposible la obtención de dicho límite. Para evitar este fenómeno, las pastillas se secaron lentamente dentro de un cuarto húmedo durante 3 a 6 semanas y posteriormente se continuó el secado al aire y en horno.

3.3. Análisis fisicoquímico. Se hicieron dos análisis espectrográficos por Rayos X, uno en el Instituto de Física de la U.N.A.M. y otro en la Comisión Federal de Electricidad, en los cuales se obtuvieron los siguientes resultados:

	FLUORESCENCIA	DIFRACCION
INSTITUTO DE FISICA:	Hierro, estroncio y rubidio	material amorfo
C. F. E.	: Hierro, manganeso y estroncio	material amorfo

El material analizado es entonces para fines de ingeniería una arcilla inorgánica de alta plasticidad (CH) y desde el punto de vista mineralógico el material es amorfo o sea no tiene estructura cristalina y por lo tanto no es una arcilla.

#### 4. DESCRIPCION DE LA VALETA Y DE SUS ACCESORIOS.

La valeta usada en esta investigación se encuentra en el laboratorio de Mecánica de Suelos del Instituto de Ingeniería. Fué diseñada por el Ing. Raúl J. Garza. Dicha valeta consta esencialmente de las siguientes partes:

4.1 Veleta propiamente dicha. Está compuesta de una barra de acero inoxidable, con un diámetro de 12.7 mm. (1/2") y una longitud de 30 cm. Uno de sus extremos está roscado en una longitud de 14 cm. aproximadamente, por lo que tiene cuatro ranuras axiales de 3.5 mm. de profundidad, según la dirección de dos planos perpendiculares entre sí. El objeto de estas ranuras es alojar a las cuatro aspas que formarán la veleta. Estas aspas están hechas en lámina de acero de 1/16" de espesor. Se tienen dos juegos de aspas con las cuales se forman veletas con las siguientes dimensiones: H = 5 cm. y D = 5 cm.; H = 9 cm. y D = 5 cm.

Una vez que las aspas se encuentran alojadas en las ranuras, se ajustan y se fijan al vástago mediante una tuerca.

El otro extremo de la barra tiene una rosca para atornillarse al mecanismo medidor de momento torsor.

4.2 Mecanismo medidor de momento torsor. En esencia consiste de una pieza tubular de Duraluminio con un diámetro exterior de 27 mm. y un diámetro interior de 25 mm. y con una altura de 12.4 cm.; cabeceada de tal forma de poderse conectar rígidamente con la veleta propiamente dicha y con el mecanismo de velocidades. La resistencia máxima que puede medir esta pieza es de 2.5 kg./cm.<sup>2</sup>

En la superficie exterior de la pieza tiene pegadas cuatro resistencias SR-4 del tipo a - 7, inclinadas a 45° respecto al eje vertical; se encuentran utilizadas en los tercios y sus ejes son perpendiculares dos a dos. Al aplicarse la torsión, dos resistencias trabajan a tensión y dos a compresión.

La variación de la resistencia eléctrica se mide con un aparato Baldwin Strain Indicator, tipo N, Serie 651466.

Las determinaciones se calibraron para conocer el par aplicado al suelo. La calibración se hizo de la siguiente forma: a la pieza tubular se le aplica un momento torsor conocido y se registran las variaciones de la resistencias. Con los datos obtenidos se construye una gráfica momento torsor ~ lecturas del aparato Baldwin. (Fig. 6). Esta calibración se repitió cuando se notaba un corrimiento de la lectura inicial. Se hicieron calibraciones cada mes aproximadamente.

#### 4.3 Motor eléctrico con mecanismo reductor de velocidades.

El motor es de la marca Westinghouse, monofásico, con una potencia de 1/3 H.P. y proporciona 1425 R.P.M.

El mecanismo reductor de velocidades es de la marca Craftsman, proporciona 45 velocidades diferentes que varían entre 1 y 29.8 grados/min. Se escogieron las siguientes velocidades: A= 29.8, B=11.9, C=5.2, D=2.3 y E=1 grados/min. Se encontró que las velocidades no varían con la resistencia que opone el suelo al ser girada la veleta dentro de él.

#### 4.4 Moldes para alojar el material de prueba.

Se usaron dos moldes cilíndricos de fierro con las siguientes dimensiones: uno con un diámetro de 15.5 cm. y una altura de 7 cm. y el otro con un diámetro de 15.5 y una altura de 12 cm. Los dos moldes tienen ocho aspas fijas con una altura igual a la del molde y de una dimensión tal que dejen un cilindro interior de 7 cm. de diámetro. Esto tiene por objeto limitar la zona de suelo sujeta a cortante.

Los moldes tienen una tapa inferior de fierro con una perforación central de 1/2", para que salga el material que pueda empujar la veleta al ser hincada. La tapa superior es de madera y está cortada por la mitad para permitir su colocación una vez que la veleta sea hincada.

## 5. PROCEDIMIENTO DE PRUEBA.

5.1 Homogeneización de la muestra. Se colocó el material en una charola de lámina y se remoldeó con espátula y con las manos hasta desintegrar todos los pequeños grumos.

5.2 Llenado del molde. El molde se llenó por capas, las cuales fueron compactadas con un pisón de madera, sin tener un control de la energía de compactación ni del número de capas. Esta operación se hizo de manera de no dejar huecos en el material. A continuación el molde se enrasa y se pesa en una balanza de una capacidad de 20 lg. y una aproximación de 1 gr. Inmediatamente después se hace una perforación en el centro de la muestra usando una broca helicoidal de 7/16" de diámetro con el objeto de minimizar la alteración al hincar la veleta, siempre y cuando la consistencia del material lo permitiera.

5.3 Hincado de la veleta. Una vez que el molde estaba contrado perfectamente, se hincaba la veleta y nuevamente se enrasaba el molde ya que la veleta desaloja un volumen de suelo igual al de las espas. Por último se coloca la tapa de madera que impide los cambios volumétricos durante la prueba.

5.4 Realización de la prueba. Se arranca el motor y el cronómetro, tomándose lecturas en el aparato Baldwin a diferentes tiempos, obteniéndose así una curva tiempo vs. lecturas del aparato Baldwin. Después de haber alcanzado la máxima resistencia, se de ó que la muestra se siguiera deformando hasta que las lecturas del aparato más o menos se estabilizaran. La duración de las pruebas varió entre 7 y 57 min., dependiendo de la velocidad de deformación y de la consistencia del material. Cuando la deformación es suficiente para que la resistencia última se estabilice, se suspende la prueba y se extrae la veleta. A continuación se toma una muestra de la parte central de la zona de falla, para obtener el contenido de humedad.

5.5 Determinación del límite de contracción del material de la zona de falla. Un vidrio plano se cubre con una película de aceite y sobre él se coloca un anillo de bronce con un diámetro interior de 5.2 cm. y altura de 1 cm. La superficie interior del anillo se cubre con una película de goma de silicona para evitar que la pastilla se pegue y se rompa durante el proceso de secado. El anillo se llena con pequeñas capas de material, compactadas con los dedos. Terminado el llenado se cubre con una espátula e inmediatamente después se toma otra muestra del material, obteniéndose nuevamente el contenido de humedad.

Observaciones:

- a) En las operaciones 5.1 y 5.5 se usaron guantes de hule.
- b) En las últimas cinco pruebas que se efectuaron con la veleta de 5 x 3 se obtuvo la resistencia última,

por un procedimiento diferentes. Se dejó que el material se deformara hasta alcanzar la resistencia máxima (de 5 a 7 min.) a continuación se paró el motor y se desconectó el mecanismo reductor de velocidades. Con el auxilio de una manivela, rápidamente se dieron tres vueltas completas a la volante, acto seguido se conectó nuevamente el mecanismo reductor de velocidades y se arrancó el motor eléctrico haciendo una lectura con el aparato Baldwin que da el valor de la resistencia última.

## 6. CONSIDERACIONES TEÓRICAS.

6.1 Cálculo de la resistencia al esfuerzo cortante. Para determinar la resistencia al esfuerzo cortante es necesario establecer las siguientes hipótesis:

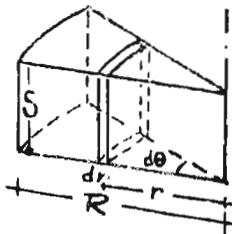
- a. La superficie de ruptura tiene la forma de un cilindro circular con altura y diámetros idénticos a los de la volante.
- b. La distribución de esfuerzos en la superficie lateral, en el momento de la falla es uniforme.
- c. La distribución de esfuerzos en los brazos de la superficie de ruptura, en el momento de la falla, se puede considerar uniforme o triangular, como se verá más adelante.
- d. El efecto del vértigo se desprecia.

Si llamamos  $S$  a la resistencia al esfuerzo cortante del

suelo, el momento máximo soportado por éste, está dado por:

$$M_{\max} = S \left[ \text{Área lateral} + 2M_{\text{base}} \right] = S \left[ \frac{\pi H D^2}{2} + \frac{2}{3} M_{\text{base}} \right]$$

Si se considera que la distribución de esfuerzos en las bases es uniforme entonces se tiene:



$$dM = r \, dV \quad dV = r \, d\theta \, dr \, S$$

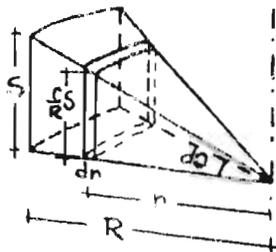
$$dM = r^2 \, d\theta \, dr \, S \quad \therefore M = \int_0^R \int_0^{2\pi} S r^2 \, dr \, d\theta$$

$$M = \frac{\pi D^3}{12} S \quad \therefore M_{\max} = S \left[ \frac{\pi H D^2}{2} + \frac{\pi D^3}{6} \right]$$

De donde se obtiene la resistencia la esfuerzo cortante.

$$S = \frac{M_{\max}}{\frac{\pi H D^2}{2} + \frac{\pi D^3}{6}} = \frac{M_{\max}}{C_1} \quad \dots \dots (1)$$

Si se considera que la distribución de esfuerzos en las bases, en el momento de la falla es triangular, entonces S se calcula así:



$$dM = r \, dV \quad dV = \frac{r}{R} \, r \, d\theta \, dr \, S$$

$$dM = S \frac{r^3}{R} \, d\theta \, dr$$

$$M = \int_0^R \int_0^{2\pi} S \frac{r^3}{R} \, d\theta \, dr = \frac{\pi D^3}{16} S$$

$$\therefore M_{\max} = S \left[ \frac{\pi H D^2}{2} + \frac{\pi D^3}{8} \right]$$

$$S = \frac{M_{\max}}{\frac{\pi H D^2}{2} + \frac{\pi D^3}{8}} = \frac{M_{\max}}{C_2} \dots (2)$$

En el presente trabajo se utilizará la fórmula (1), que considera que la distribución de esfuerzos es uniforme en toda la superficie de ruptura

**6.2 Deformación angular y módulo de rigidez.** Para la determinación de los estados de esfuerzos y de deformaciones en la prueba de la voleta modificada, D. Reséndiz N. (Ref. 5) introduce las siguientes hipótesis:

- a. Proceso de carga estrictamente creciente y cuasiestático.
- b. El suelo es un cuerpo elastoplástico no lineal. La relación esfuerzo-deformación angular antes de la falla pueda expresarse sin perder generalidad en la forma  $\tau = G(\gamma)$
- c. Las porciones de suelo comprendidas entre las aspas móviles (voleta) y las hojas fijas (molde) se comportan como cilindros rígidos a los cuales se adhiera el material encerrado dentro de la zona de falla.
- d. La concentración de deformaciones es despreciable.
- e. La consolidación es muy lenta (despreciable, excepto para velocidades muy bajas).
- f. Las condiciones de deformación del material sometido a corte son perfectamente simétricas con respecto al eje de rotación de la voleta.

Con base en las hipótesis anteriores se llega a:

$$\gamma_0 = \frac{2 \theta_0}{1 - \left(\frac{r_0}{r_1}\right)^2}$$

..... (3) Deformación angular en el cilindro interior de la zona de falla.

$$G(\tau_0) = \frac{\tau_0 \left[1 - \left(\frac{r_0}{r_1}\right)^2\right]}{2 \theta_0}$$

..... (4) Módulo de rigidez, en gr/cm<sup>2</sup>.

Donde:  $\theta_0$  = ángulo de giro, en radianes  
 $r_0$  = radio de la veleta, en cm  
 $r_1$  = distancia del eje de la veleta a las aspues fijas, en cm  
 $\tau_0$  = esfuerzo cortante en la zona de falla, en gr/cm<sup>2</sup>.

6.3 Estructura completamente floculada y estructura completamente dispersa. De acuerdo con las ideas de Lambe (Ref. 6) y de Seed, Mitchell y Chan (Ref. 7), durante la compactación de una arcilla, la magnitud de las fuerzas interparticulares conjuntamente con la cantidad y naturaleza de la energía de compactación, determinarán el tipo de la estructura de la arcilla, que puede variar entre dos condiciones límites.

Estructura completamente floculada. Es aquella donde las partículas que la forman están orientadas al azar.

Estructura completamente dispersa. Aquella en donde las partículas están orientadas paralelamente.

Para una relación de vacíos dada, entre más orientadas estén las partículas (estructura dispersa) más débil será la estructura del suelo. Ahora bien, una estructura flocculada puede ser orientada mediante el aumento del contenido de humedad (en determinadas condiciones) o mediante deformaciones producidas por cortante.

#### 6.4 Grado de orientación y distancia media entre partículas.

D. Reséndiz (Ref. 8) ha introducido los siguientes conceptos:

Grado de orientación de las partículas. Se supone que las partículas de arcilla tienen formas de placa o de aguja. Si todas las partículas son mutuamente paralelas se dice que el grado de orientación es de 100% (estructura completamente dispersa). Al arreglo de partículas completamente al azar se le asigna un grado de orientación de cero (estructura completamente flocculada). Se supone que en cualquier caso intermedio una medida aproximada del grado de orientación de las partículas es:

$$G_o = \left( \frac{1 - \gamma_{s \min}' / \gamma_s}{1 - \gamma_{s \min}' / \gamma_s \delta_o} \right)_{LC} \dots (5)$$

Donde:  $\gamma_s$  = peso específico seco en el límite de contracción, obtenido mediante un secado lento y en condiciones de preparación dadas, en  $gr/cm^3$ .

$\gamma_{s \min}'$  = peso específico seco mínimo, en el límite de contracción en  $gr/cm^3$ . En un principio se trató de obtenerlo por un proceso de

deshidratación por sublimación, pero surgieron dificultades que no pudieron ser superadas. En vista de lo cual se obtuvo, llenando un anillo, con suelo seco, que se compactó por vibración; resultó igual a 1.202 gr/cm<sup>3</sup>.

$S_s$  = peso específico relativo de la fase sólida.

$\gamma_o$  = peso específico del agua destilada a 40°C de temperatura y a una presión correspondiente al nivel del mar.

Distancia media entre partículas.

$$d = \frac{e - e_{LC}}{S_u S_s \gamma_o} = \frac{w/G_w - LC}{S_u \gamma_o} = \frac{w/G_w - (\frac{1}{\gamma_{smin}} - \frac{1}{S_s})(1 - G_o)}{S_u \gamma_o} \dots (6)$$

Donde:  $2d$  = distancia media entre partículas, en cm.

$S_u$  = superficie específica del mineral de arcilla en cm<sup>2</sup>/gr.

La superficie específica es una constante para un suelo dado, siempre y cuando las partículas sólidas del suelo no se rompan; en vista de la dificultad que hay para determinarla se usará como variable independiente el producto  $dS_u$ , (cm<sup>3</sup>/gr) obtenido de la ecuación (6)

$$dS_u = \frac{1}{\gamma_o} \left( \frac{w}{G_w} - LC \right) \dots (7)$$

7. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS.

En la Tabla 2 aparecen los resultados obtenidos en los 38 ensayos realizados. A continuación se analizarán deta-

lladamente las relaciones entre los conceptos investigados.

7.1 Curva de compactación. Todas las determinaciones se encuentran en la rama húmeda de la curva de compactación. Los grados de saturación están comprendidos entre 95 y 100%, como puede verse en la Fig. 7.

Como es sabido el valor de la energía de compactación tiene poca influencia en la forma de la curva  $w - \gamma_s$  cuando el material tiene un contenido de humedad mayor que el óptimo.

7.2 Curvas esfuerzo-deformación angular. En las Figs. 8, 9, 10 y 11, se presentan las curvas esfuerzo-deformación angular para las 38 pruebas realizadas.

En ellas se encontró que para contenidos de humedad cercanos o superiores al LL, el esfuerzo  $\bar{\sigma}$  crece hasta alcanzar un valor máximo que prácticamente se conserva constante hasta el fin de la prueba. Esto se observa claramente por ejemplo en las curvas 2 y 34 de la Fig. 9.

A medida que el contenido de humedad disminuye, el material tiende a presentar fallo frágil, efecto que es notorio en las pruebas 30 y 32 (Fig. 11), en donde el material alcanza una resistencia máxima que luego decrece rápidamente hasta un valor bastante menor, para grandes deformaciones angulares.

En las pruebas efectuadas con una veleta de 5 x 9 cm., se midió la resistencia última, siguiendo el procedimiento de prueba descrito anteriormente. Al considerar la relación entre la resistencia máxima y la resistencia última, esta relación mide la sensibilidad de la estructura.

se encontró que dicha relación aumenta a medida que el contenido de humedad disminuye. Las sensibilidades obtenidas variaron entre 1.17 y 2.23.

De acuerdo con los conceptos definidos en las Refs. 6, 7 y 8 el aumento de la sensibilidad al disminuir el contenido de humedad puede interpretarse de la siguiente manera. Al disminuir el contenido de humedad el grado de orientación de las partículas debe disminuir, lo que se transforma en un aumento en la resistencia. Ahora bien, al iniciarse la prueba se inducen deformaciones por cortante que van orientando las partículas de la zona de falla, hasta llegar a la orientación completa en el momento de ruptura. La diferencia entre la resistencia máxima y la última va creciendo al disminuir el contenido de humedad de preparación, pues la diferencia entre la estructura inicialmente floculada y la estructura final orientada se hace mayor.

El efecto de la humedad de preparación y del grado de orientación de las partículas sobre la sensibilidad de la estructura, puede verse cuantitativamente en las gráficas de las Figs. 12 y 13, obtenidas usando la expresión 5.

7.3 Relación entre el contenido de humedad y la deformación angular en la falla. Como se ve en la Fig. 14, existe una gran dispersión en los datos. No obstante parece ser que hay una ligera tendencia a aumentar la deformación angular en la falla al aumentar el contenido de humedad.

Debe esperarse que exista una relación entre el contenido de humedad y  $\chi$  falla; sin embargo esta relación probablemente no sea sencilla pues la  $\chi$  falla debe depender

también de la orientación relativa de la superficie de falla con respecto a las partículas.

**7.4 Relación entre el contenido de humedad y el módulo de rigidez.** Se encontró una correlación entre el contenido de humedad y el módulo de rigidez como se muestra en la Fig. 15, sin embargo las dispersiones son grandes para contenidos de humedad menores de 70%.

El módulo de rigidez disminuye asintóticamente para contenidos mayores que el LL y para contenidos de humedad menores que el LL crece rápidamente.

**7.5 Relación entre el contenido de humedad y la resistencia máxima.** Los datos se dibujaron en papel aritmético como se muestra en la Fig. 16, la forma de la curva obtenida es semejante a la  $W - G$ . Para contenidos de humedad menores que el LL, se tienen variaciones de los datos respecto a la envolvente, esto se debe a la influencia de la velocidad de deformación. Dicha influencia se nota claramente si los datos se dibujan en papel semilogarítmico ( $w$  vs.  $\log S_{max}$ ), se obtienen tres curvas bastante bien definidas (Fig. 17), sin grandes dispersiones, correspondientes a las velocidades de rotación A, B y C. Estas curvas tienen un tramo prácticamente recto para contenidos de humedad menores que el LL; para contenidos de humedad cercanos al LL, las curvas aumentan rápidamente de pendiente.

Las resistencias máximas obtenidas para las tres velocidades, en el LL son:  $S_A = 32.2$ ,  $S_B = 22.6$  y  $S_C = 26.0$  gr/cm<sup>2</sup>. El aumento en la resistencia al pasar de la velocidad B (11.9 grados/min) a la velocidad C (5.2 grados/min) se debe probablemente a la consolidación de la arcilla

en la zona de falla.

Las mediciones correspondientes a las velocidades D y E no definen ninguna curva digna de confianza, pues el número de pruebas es muy pequeño, tres y cuatro respectivamente.

7.6 Efecto de la velocidad de rotación sobre la resistencia máxima. De la gráfica anterior ( $w - \log S_{max}$ ) se obtuvieron las resistencias máximas  $S_a$ ,  $S_b$  y  $S_c$  para contenidos de humedad dados. Con estos datos se construyó una gráfica  $S_{max} -$  velocidad de rotación (Fig. 18), que muestra que el efecto de la velocidad sobre la resistencia máxima, aumenta a medida que el contenido de humedad disminuye. Para contenidos de humedad mayores que el LL, este efecto es despreciable, en cambio, por ejemplo, para un contenido de humedad de 50%, la resistencia obtenida con una velocidad de rotación A es 20% mayor que la obtenida con una velocidad B.

7.7 Relación entre el módulo de rigidez y la resistencia máxima. Parece ser que existe una ley lineal entre estos dos conceptos, como se muestra en la Fig. 19. Se encontró dispersión en los datos, principalmente para resistencia mayores de 140 gr/cm<sup>2</sup>.

Si verdaderamente existiera una relación lineal entre estos dos conceptos sería muy útil por una parte investigar con mayor detalle, ya que puede preverse su gran utilidad en ensayos no destructivos (principalmente en el campo) y por otra, su importancia en el estudio del mecanismo de resistencia de los suelos.

7.8 Relación entre el grado de orientación de las partículas y el contenido de humedad. Para el intervalo de humedades ensayado, el grado de orientación de las partículas varió entre límites muy reducidos (66 a 70%). Parece ser que existe una tendencia a aumentar el grado de orientación al aumentar el contenido de humedad, pero a medida que los contenidos de humedad se acercan al LL, dicha orientación varía muy poco, como puede verse en la Fig. 20. Esto concuerda cualitativamente con los resultados obtenidos por Mitchell (Ref. 7), quién determinó el grado de orientación de las partículas por medios ópticos.

7.9 Relación entre el grado de orientación de las partículas y la deformación angular en la falla. Se obtuvo una gráfica semejante a la anterior ( $w - G_0$ ), aunque la dispersión de las observaciones aumentó (Fig. 21). Como se dijo antes, es de esperarse que la  $\delta$  falla dependa de la orientación relativa de la superficie de falla con respecto a las partículas, por lo tanto la relación entre el grado de orientación y la  $\delta$  falla no es sencilla.

7.10 Relación entre  $d_{Su}$  y el módulo de rigidez. Se encontró una correlación entre el  $d_{Su}$  y el módulo de rigidez como puede verse en la Fig. 22. Existe dispersión en los datos, sobre todo para  $d_{Su} < 0.500 \text{ cm}^3/\text{gr}$ . El módulo de rigidez disminuye asintóticamente a partir de  $d_{Su} > 0.750 \text{ cm}^3/\text{gr}$ . Al disminuir  $d_{Su}$ , el módulo de rigidez crece rápidamente.

Teniendo en cuenta la definición de  $d_{Su}$  (Ec. 8), se considera que da el valor de la separación entre partículas multiplicado por una constante. Por lo tanto, se puede

decir que al aumentar la separación entre partículas el módulo de rigidez disminuye y viceversa.

7.11 Relación entre  $d_{Su}$  y la resistencia máxima. Se construyó una gráfica  $d_{Su} - \log S_{m\acute{a}x}$ , como se muestra en la Fig. 23. Se encontraron tres rectas bastante bien definidas correspondientes a las tres velocidades de rotación A, B y C. Estas curvas tienen la particularidad de no sufrir ningún quiebre en las cercanías de LL, como ocurre en la gráfica  $w - \log S_{m\acute{a}x}$ .

Las envolventes correspondientes a las velocidades de rotación D y E, se trazaron con líneas discontinuas por no ser dignas de confianza debido al reducido número de ensayos.

Es notoria la disminución de la dispersión si se compara con la existente en la gráfica  $w - \log S_{m\acute{a}x}$ . Por lo tanto, se puede concluir que mediante los conceptos grado de orientación, distancia media entre partículas, definidas por las ecuaciones 5 y 6, se obtiene una correlación con la resistencia máxima, más consistente que cuando se trata de correlacionarla solamente con el contenido de humedad, lo que ya era de esperarse, puesto que  $d_{Su}$  toma en cuenta el contenido de humedad, el grado de saturación y el grado de orientación de las partículas.

## 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

8.1 En general el equipo usado dió buenos resultados, sin

embargo, los moldes para alojar el material deberán ser modificados reduciendo su volumen de manera que el llenado se haga con mayor facilidad y rapidez.

Las veletas deberán tener una relación altura-diámetro mayor de uno, para reducir al mínimo el efecto de las bases de la superficie de ruptura. También, se deberá tender al uso de veletas con dimensiones lo más grandes posible, aumentando así los momentos resistentes y de esta manera el aparato medidor de momento torsor sufre menores variaciones y se obtienen lecturas más consistentes.

8.2 La influencia de la velocidad de deformación en la resistencia es importante. Se encontró que para velocidades comprendidas entre 11.9 y 29.8 grados/min, al aumentar la velocidad la resistencia máxima aumenta. Para velocidades comprendidas entre 5.2 y 11.9 grados/min, al aumentar la velocidad la resistencia disminuye. Este efecto aumenta a medida que el contenido de humedad disminuye y es prácticamente despreciable para contenidos de humedad mayores que el LL.

8.3 Las curvas esfuerzo-deformación angular mostraron que a medida que el contenido de humedad disminuye el material tiende a presentar falla frágil. Para contenidos de humedad cercanos o mayores que el LL, la resistencia prácticamente se conserva constante a lo largo de toda la prueba.

8.4 No se encontró ninguna relación entre el contenido de humedad y la deformación angular en la falla ni entre ésta y el grado de orientación de las partículas. Sin embargo,

debe esperarse que exista una relación entre los conceptos anteriores, que probablemente no es sencilla ya que también dependerá de la posición relativa de la superficie de falla con respecto a la dirección predominante de orientación de las partículas.

8.5 Parece ser que existe una relación lineal entre el módulo de rigidez y la resistencia máxima al esfuerzo cortante. Deberá investigarse esta relación con más detalle ya que puede ser de gran importancia en el estudio del mecanismo de la resistencia de los suelos.

8.6 La expresión 5, usada para medir el grado de orientación de las partículas sólidas del suelo parece aceptable. Los resultados concuerdan cualitativamente con los obtenidos por Mitchell.

8.7 La distancia media entre partículas definida por la expresión 6, tiene una correlación biunívoca simple con el módulo de rigidez y con la resistencia máxima al esfuerzo cortante. La dispersión es menor que cuando la variable independiente es el contenido de humedad y se cree que es debida sólo a errores experimentales.

R E F E R E N C I A S

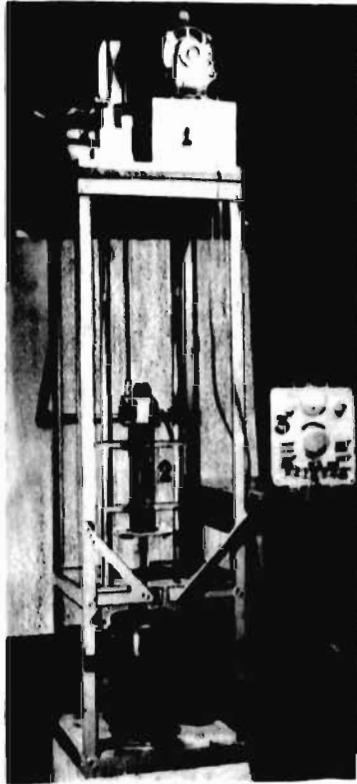
1. L. Cadling y S. Odenstad. The vane borer. An apparatus for determining the shear strength of clay soils directly in the ground. Royal Swedish Geotechnical Institute. Proceedings No. 2. 1950
2. R. Karlsson. Suggested Improvements in the liquid Limit Test, with reference to flow properties of remoulded clays Swedish Geotechnical Institute. Reprints and preliminary reports No. 4. 1961
3. D. Roséndiz K. Determinación de la resistencia al esfuerzo cortante por medio de la veleta de laboratorio. Trabajo no publicado.
4. A. L. Skempton. The colloidal activity of clays. Memorias de la 3a. Conferencia Internacional de Mecánica de Suelos y Cimentaciones. Suiza 1963. Vol 1, Pag. 57.
5. D. Roséndiz K. Teoría de la prueba de veleta modificada. Trabajo no publicado.
6. G. Lambe. Compacted Clay. A Symposium. Transactions A.S.C.E. Vol. 125. 1960
7. H. B. Seed, J. K. Mitchell y C. L. Chan. The strength of compacted cohesive soils. Research Conference on Shear Strength of cohesive soils. University of Colorado. 1960.
8. D. Roséndiz K. Trabajo no publicado.

TABLA 2.

Prueba #	Vel.	V <sub>g</sub>	G <sub>g</sub>	e	γ <sub>s</sub> gr/cm <sup>3</sup>	S <sub>máx</sub> gr/cm <sup>2</sup>	S <sub>mín</sub> gr/cm <sup>2</sup>
1	C	85.97	99.92	2.156	0.794	24.73	
2	B	84.55	98.68	2.148	0.796	25.01	
3	A	88.30	100.00	2.213	0.760	25.41	22.0+
4	B	81.46	97.53	2.094	0.810	29.68	
5	D	79.75	97.84	2.045	0.823	33.53	25.0+
6	C	80.40	97.56	2.064	0.818	35.18	
7	A	80.65	99.44	2.034	0.826	38.48	29.0+
8	A	77.58	98.53	1.973	0.843	42.05	
9	A	75.69	96.69	1.962	0.846	59.24	40.0+
10	A	74.32	98.94	1.880	0.870	77.23	50.0+
11	A	71.71	94.48	1.900	0.864	85.20	
12	A	68.74	96.07	1.794	0.897	94.27	67.5+
13	B	70.60	98.66	1.794	0.897	100.59	
14	A	67.23	96.15	1.751	0.911	103.34	68.0+
15	D	68.51	98.86	1.736	0.916	120.70	90.0+
16	E	66.61	99.04	1.686	0.933	139.06	
17	C	64.17	98.87	1.627	0.954	159.40	
18	E	63.01	98.36	1.605	0.962	167.37	
19	A	62.40	97.46	1.605	0.962	170.40	120.0+
20	B	60.07	96.51	1.560	0.979	175.34	
21	C	57.48	96.00	1.499	1.003	181.94	130.0+
22	A	61.48	97.00	1.500	0.968	183.59	
23	D	57.47	97.82	1.474	1.013	231.41	145.0+
24	C	59.54	99.13	1.503	1.001	231.68	160.0+
25	E	57.09	99.10	1.442	1.026	236.00	
26	B	54.76	99.05	1.387	1.050	307.53	170.0+
27	B	51.95	97.01	1.331	1.075	342.99	190.0+
28	C	54.66	100.00	1.357	1.063	347.39	
29	C	50.00	98.43	1.272	1.103	372.12	220.0+
30	E	50.76	100.00	1.268	1.105	414.99	260.0+
31	A	52.42	99.74	1.310	1.081	447.97	310.0+
32	D	50.23	100.00	1.252	1.113	497.44	
33	C	46.60	99.74	1.172	1.154	759.41	340.0+
34	B	97.22	100.00	2.414	0.734	10.56	9.04
35	B	54.12	97.00	1.398	1.405	281.94	171.37
36	E	52.81	96.94	1.364	1.060	339.51	212.95
37	B	53.27	98.66	1.353	1.065	366.79	212.10
38	B	49.79	99.42	1.256	1.111	583.47	302.71

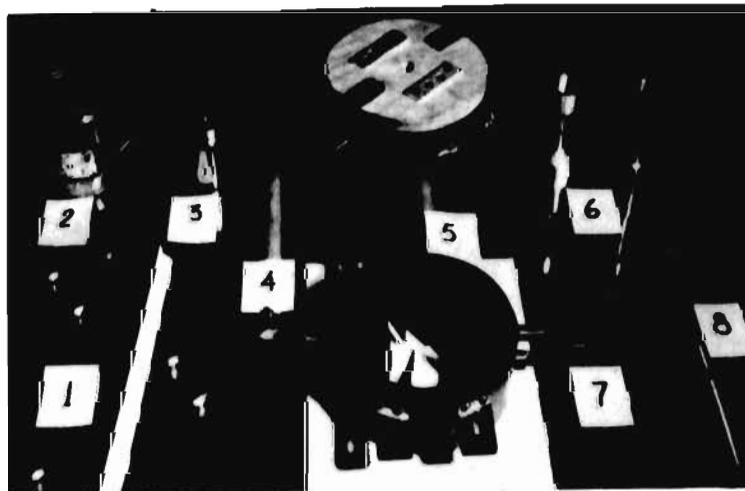
+ obtenida por extrapolación.

Prueba #	Vel.	G gr/cm <sup>2</sup>	δ falla	U.C. %	G <sub>0</sub> %	d <sub>50</sub> cm <sup>3</sup> /gr
1	C	80	1.101	13.8	68.1	0.722
2	D	113	0.560	13.2	69.6	0.725
3	A	82	1.052	14.0	67.7	0.743
4	B	102	1.258	13.5	63.7	0.699
5	D	121	0.648	13.8	63.1	0.677
6	C	162	1.101	13.6	63.3	0.695
7	A	126	0.879	13.5	61.3	0.675
8	A	133	0.879			
9	A	204	1.052			
10	A	248	1.052	13.5	69.0	0.616
11	A	331	0.879			
12	A	425	0.879	13.2	68.5	0.584
13	B	402	0.560	13.9	67.9	0.577
14	A	498	0.702	13.9	63.1	0.560
15	B	362	1.258	14.0	67.7	0.553
16	E	1114	1.058	13.6	68.7	0.537
17	C	954	1.468	13.8	65.3	0.511
18	E	599	1.200	13.7	68.3	0.504
19	A	728	0.702	13.7	68.5	0.503
20	B	699	0.488	14.0	67.7	0.482
21	C	708	0.827	13.9	68.1	0.459
22	A	763	1.052	13.8	68.3	0.496
23	D	1015	0.486	14.2	67.3	0.446
24	C	1031	1.101	13.8	68.3	0.463
25	E	965	0.353	14.1	67.5	0.435
26	E	946	0.419	13.5	68.1	0.414
27	B	1541	0.419	14.6	66.3	0.385
28	C	1004	0.734	13.3	69.2	0.414
29	C	1590	0.520	14.3	67.1	0.365
30	E	1531	0.494	14.0	67.9	0.368
31	A	1630	0.540	14.3	67.1	0.383
32	D	2076	0.486	13.8	68.2	0.364
33	C	2025	0.917	14.2	67.5	0.325
34	B	15	0.730	13.8	68.1	0.834
35	B	1116	0.439	14.1	67.5	0.417
36	B	1468	0.439	13.9	67.9	0.406
37	B	1494	0.439	14.3	66.9	0.397
38	B	1479	0.878	14.6	66.3	0.355



VISTA DE CONJUNTO.

1. Motor eléctrico y mecanismo reductor de velocidad
2. Dispositivo para medir el momento torsor.
3. Aparato Baldwin
4. Molde.



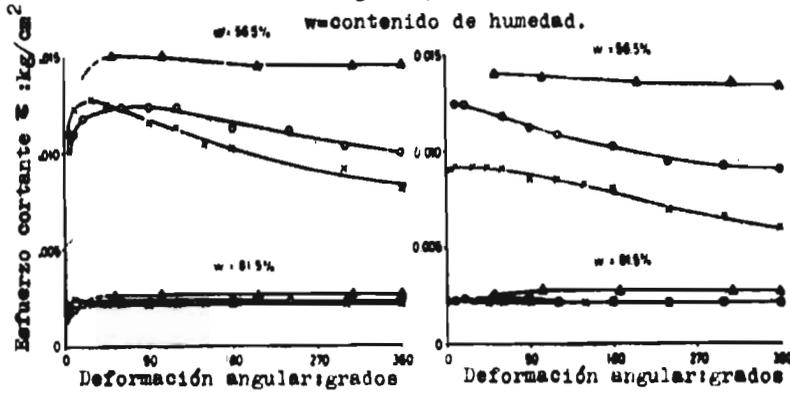
1. Anillos para determinar el LC
2. Grasa de silicón
3. Aceite
4. Pisón de madera
5. Moldes
6. Piezas tubulares para medir el momento torsor
7. Juego de aspas
8. Veleta.

CAOLIN

Velocidad angular Símbolo

Remoldeo normal 60 grados/min. x  
 120 grados/min. o Remoldeo rotatorio  
 617 grados/min. Δ

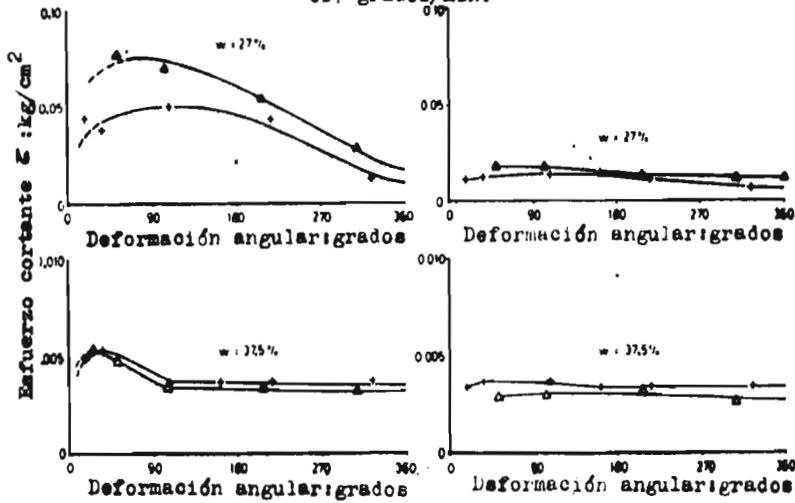
w = contenido de humedad.



LIMO GRUESO

Velocidad angular Símbolo

216 grados/min. +  
 617 grados/min. Δ



"IODO"

Velocidad angular Símbolo

120 grados/min. o  
 617 grados/min. Δ

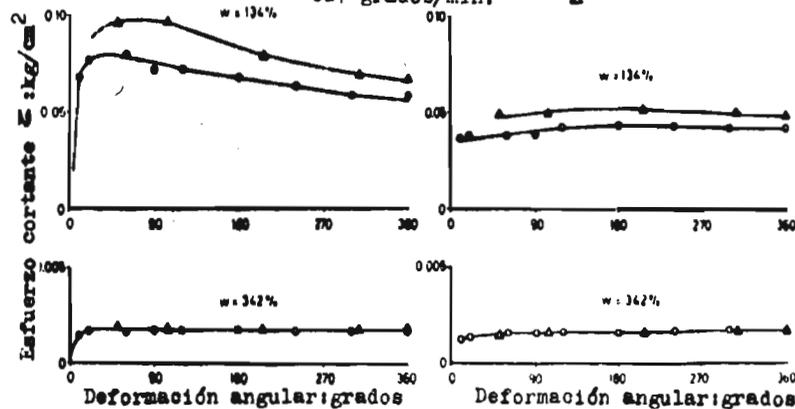


Fig. 1

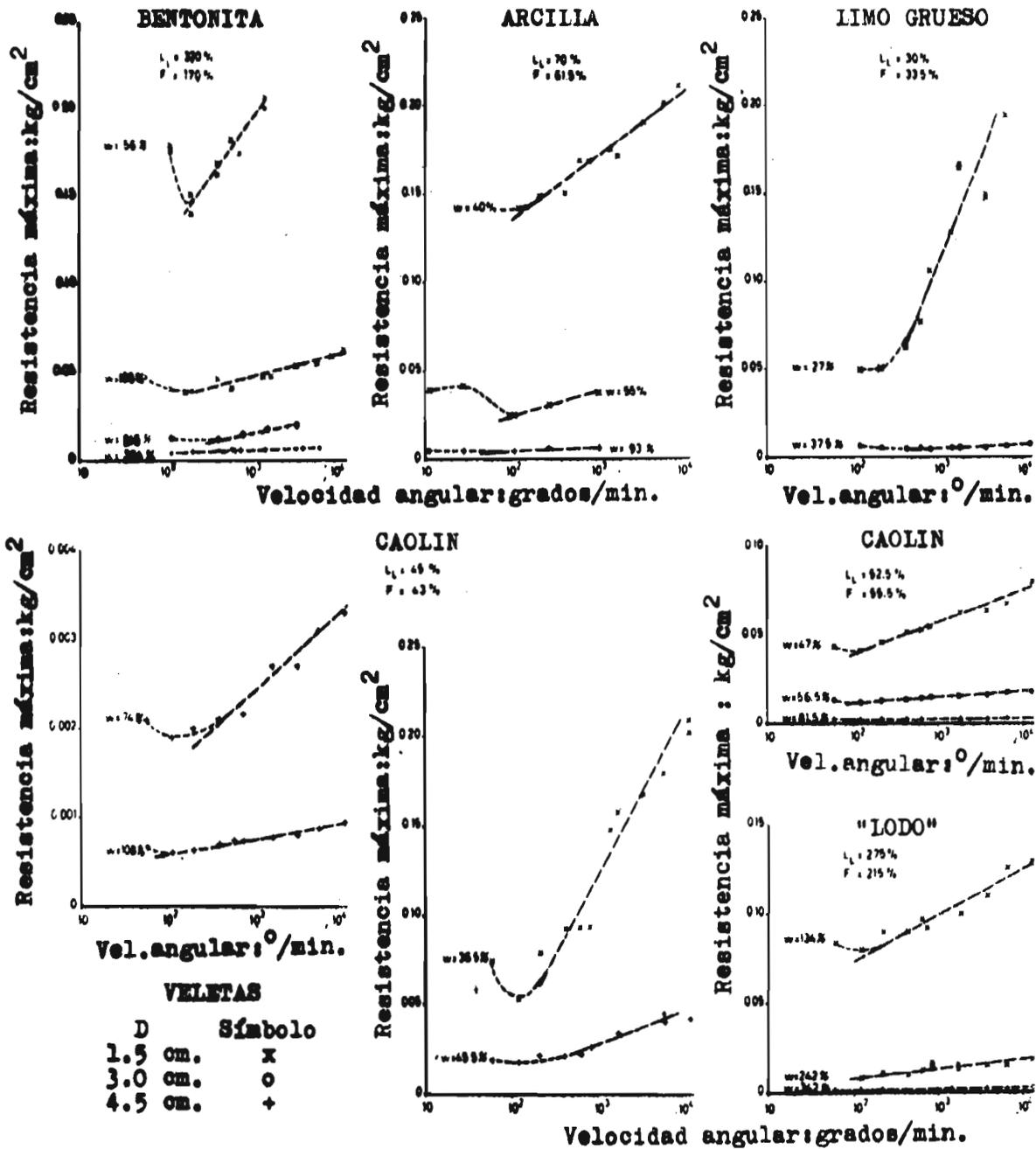
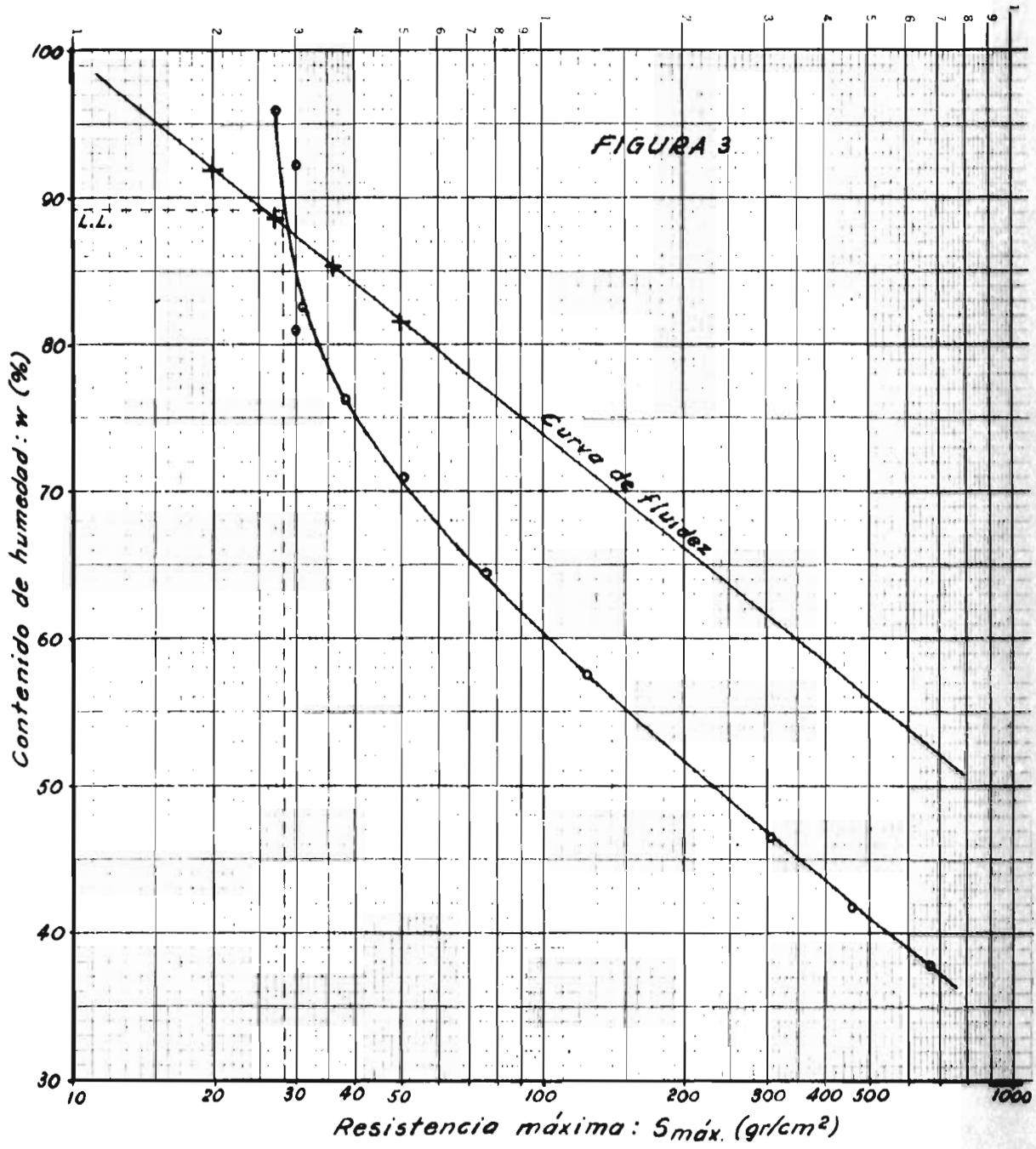


FIGURA 2r



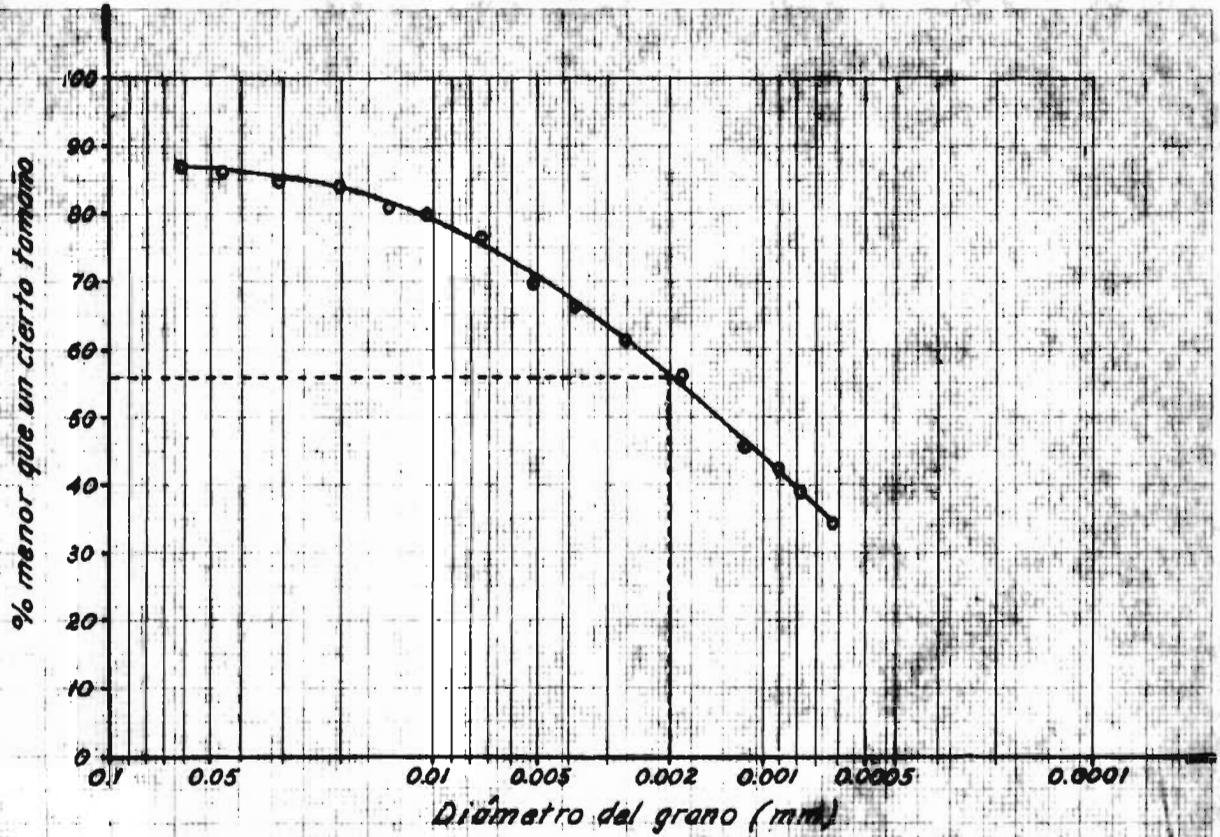


FIGURA 4

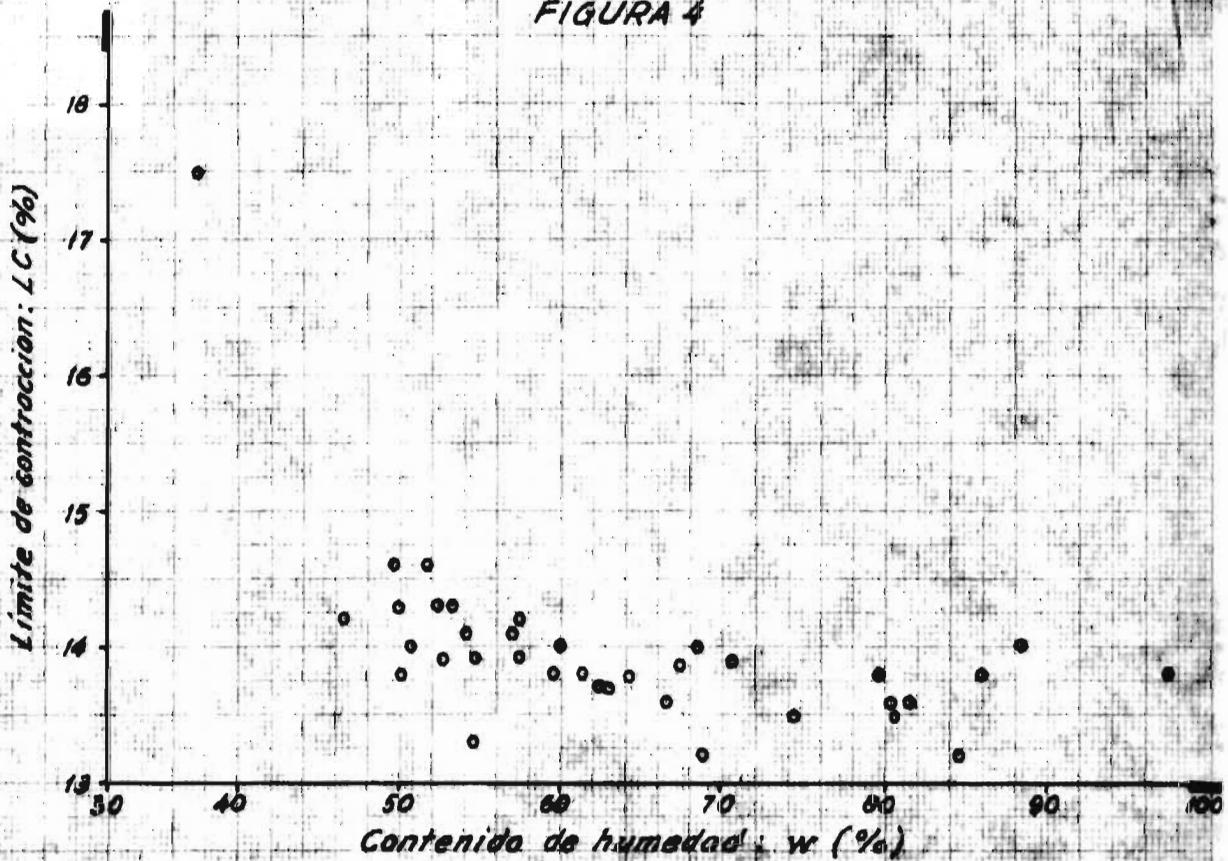


FIGURA 5

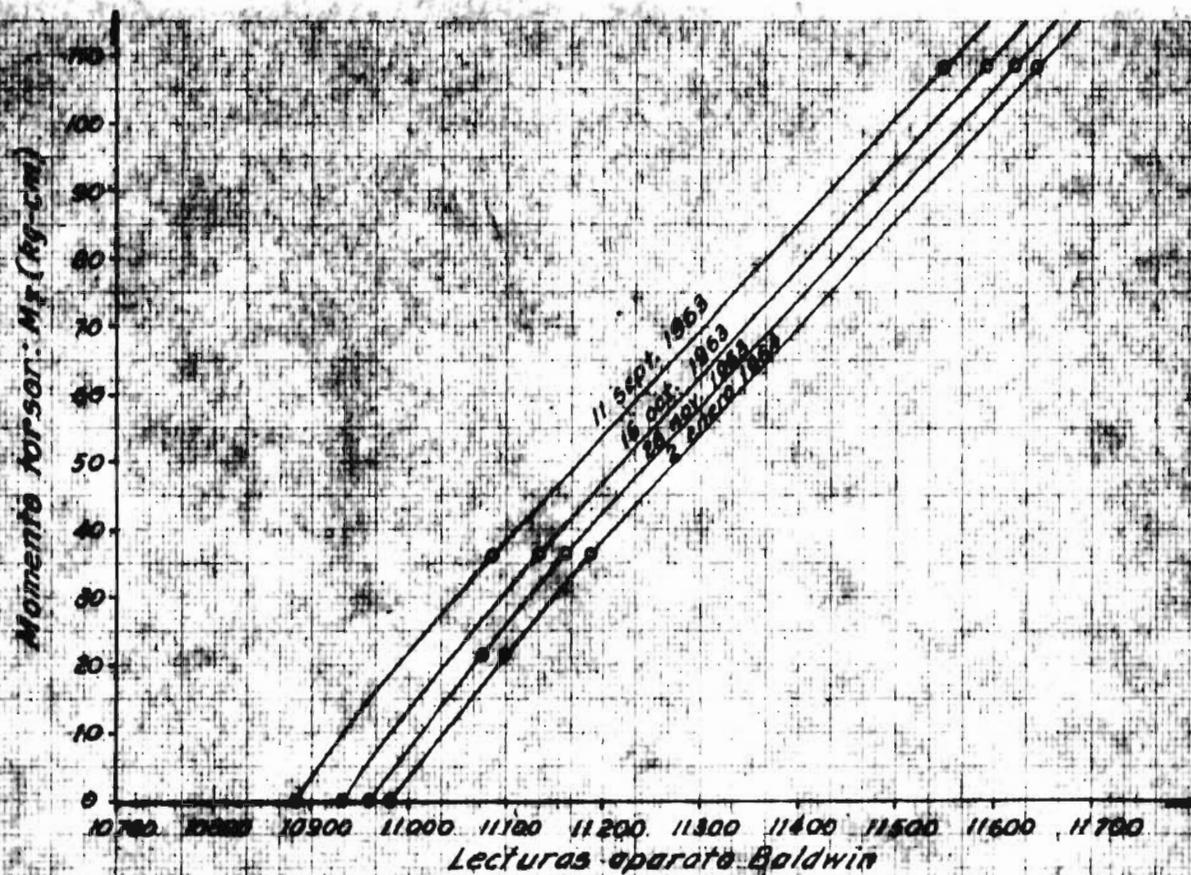


FIGURA 6

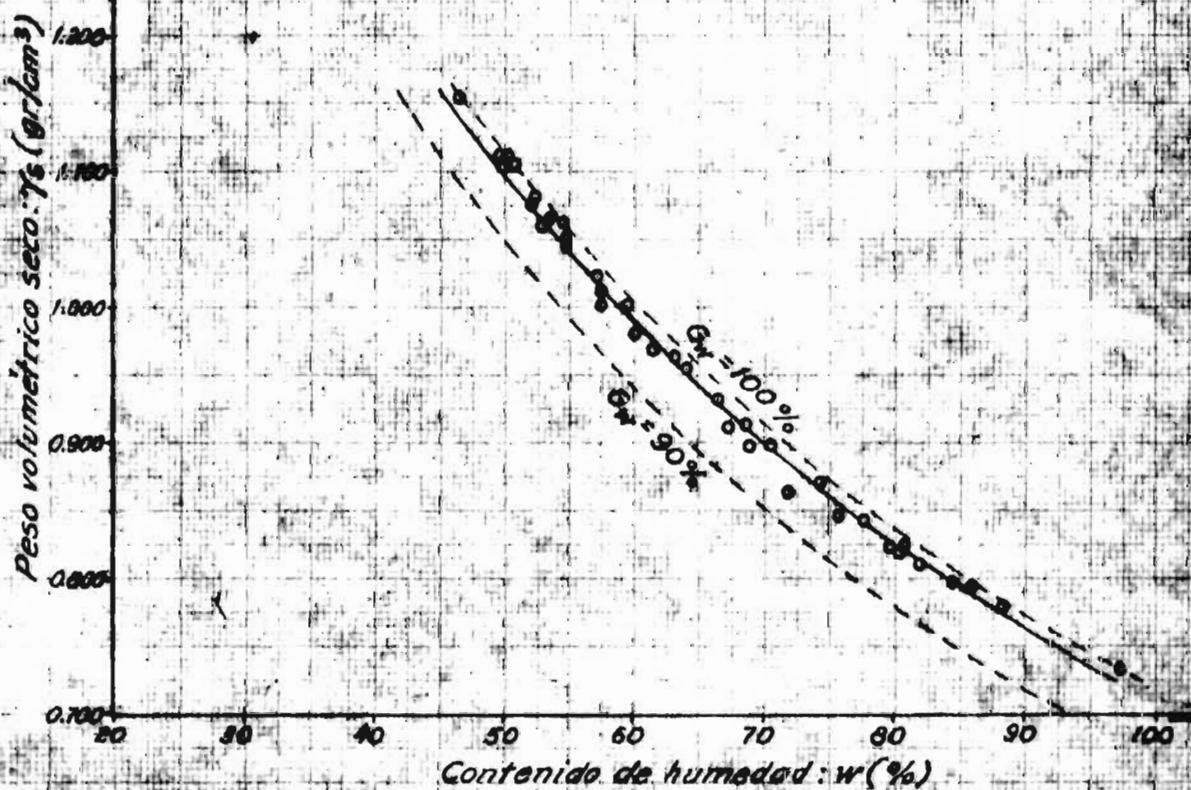


FIGURA 7

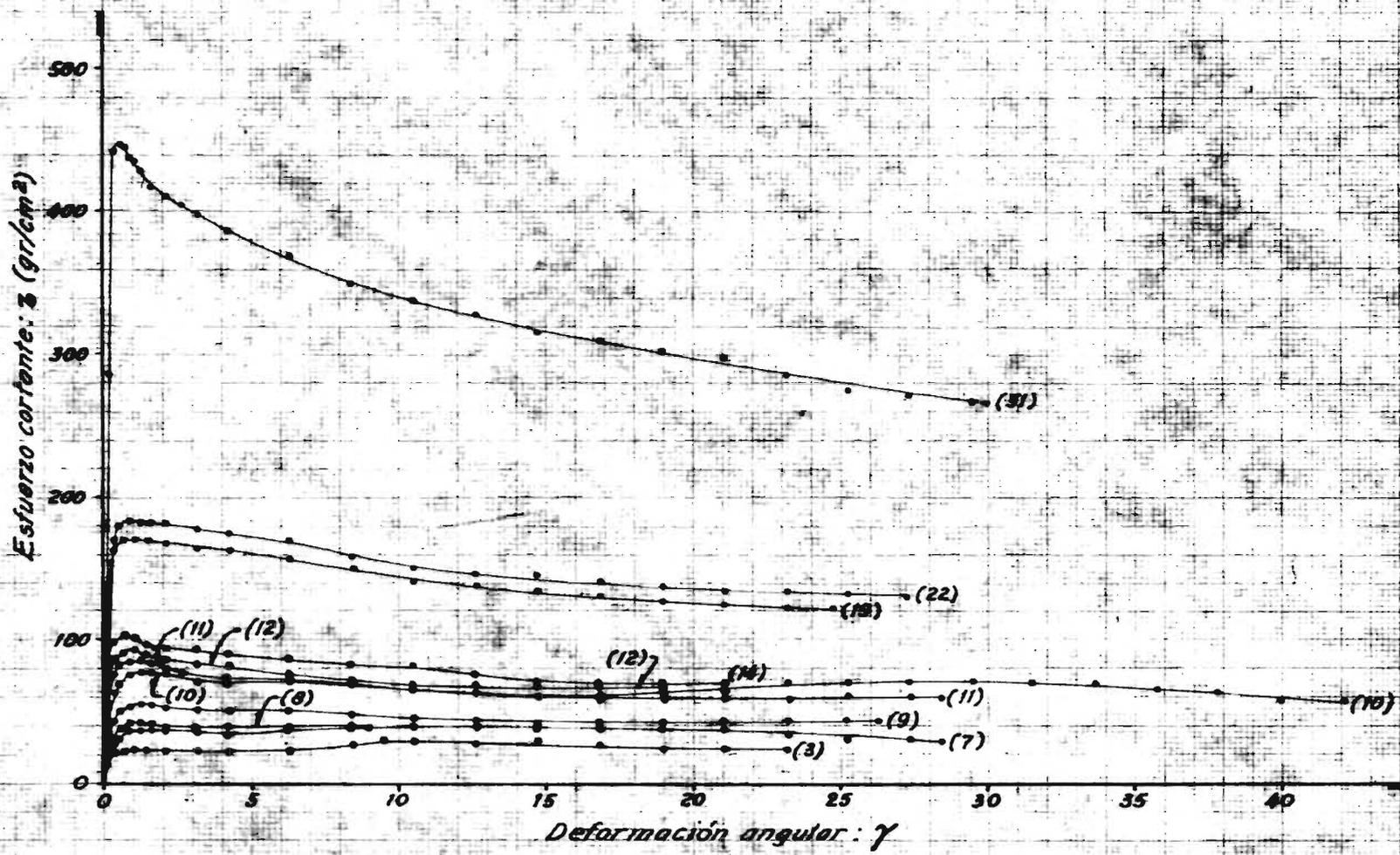


FIGURA 8

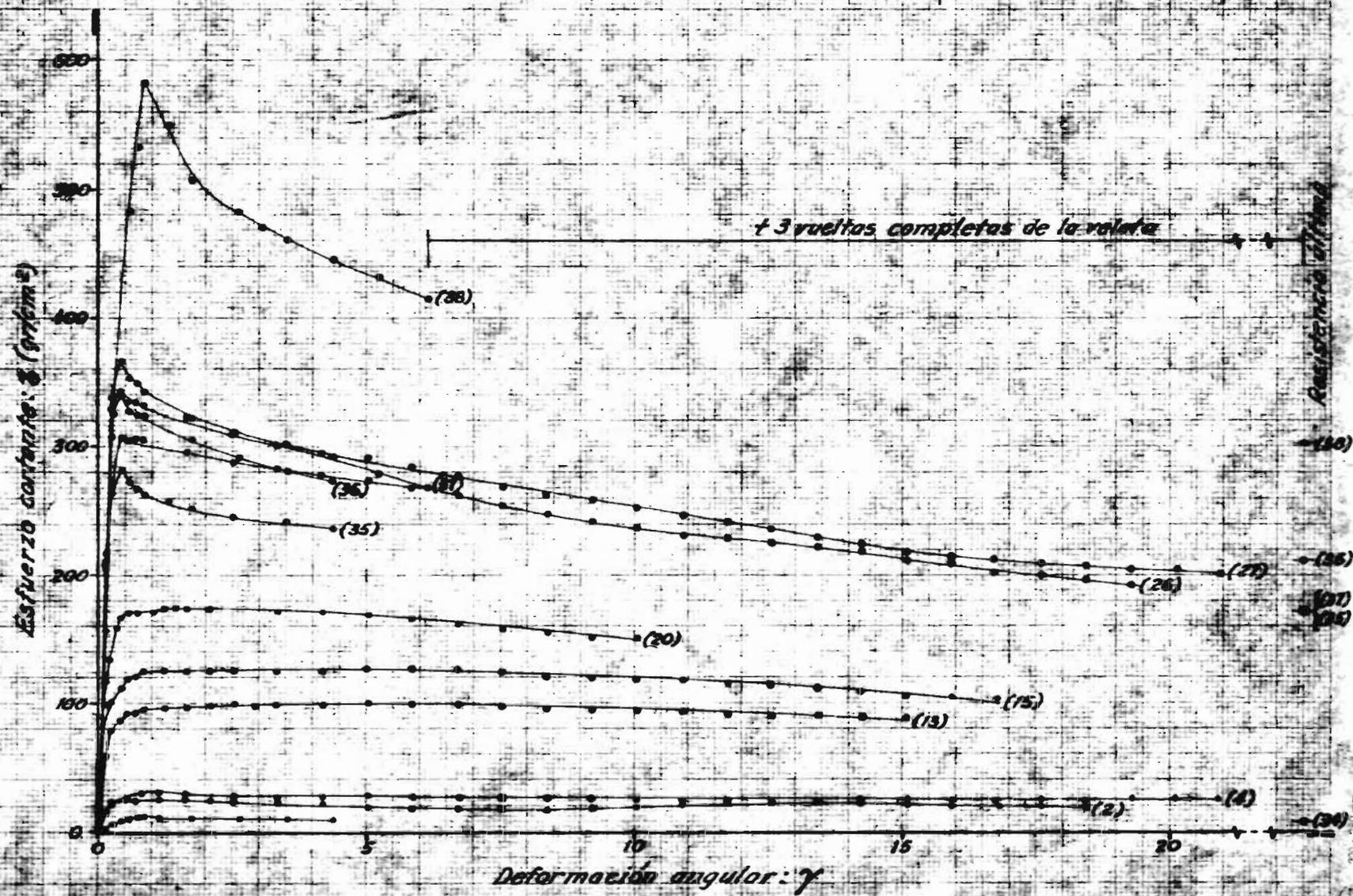
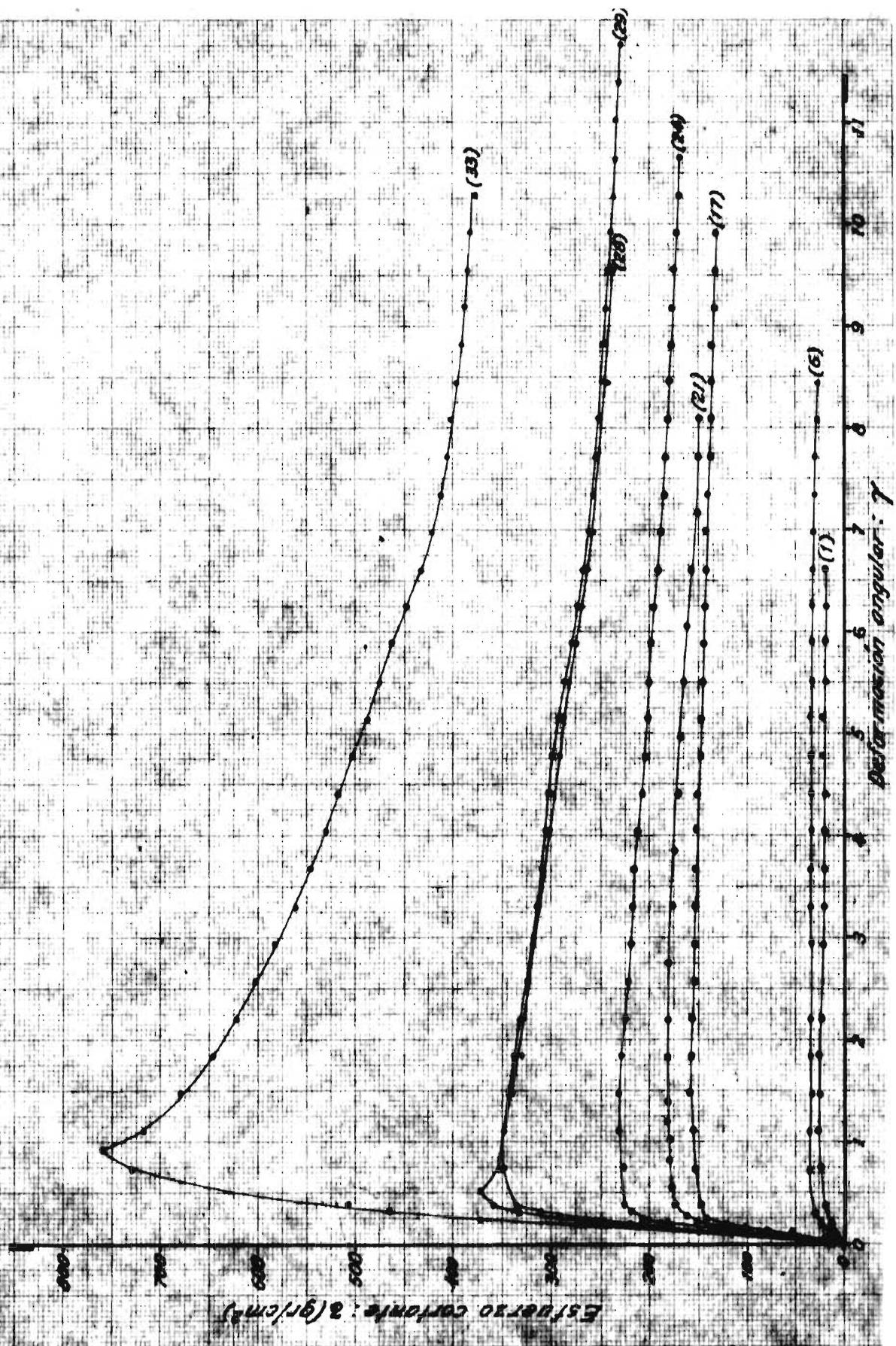
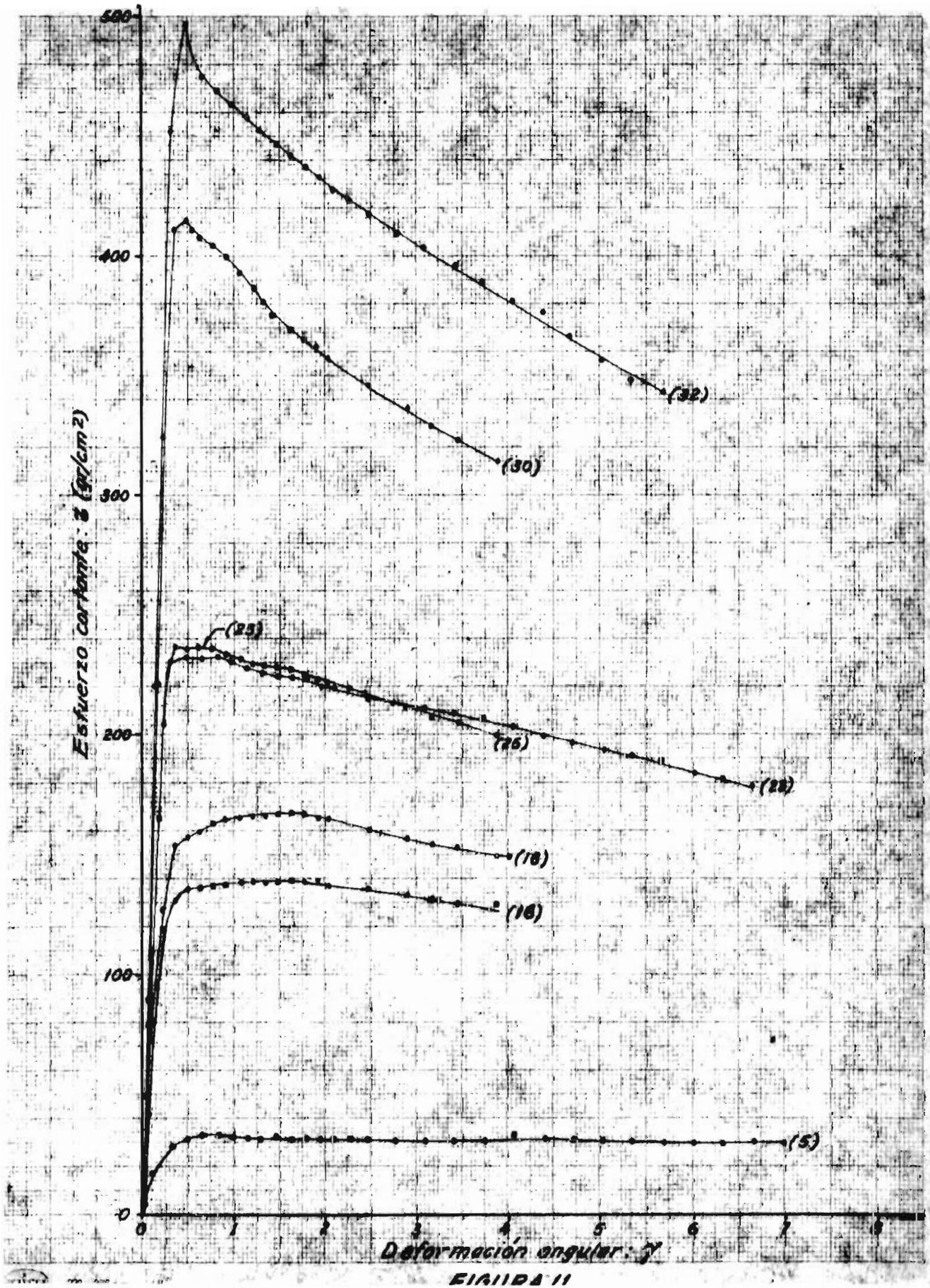


FIGURA 9





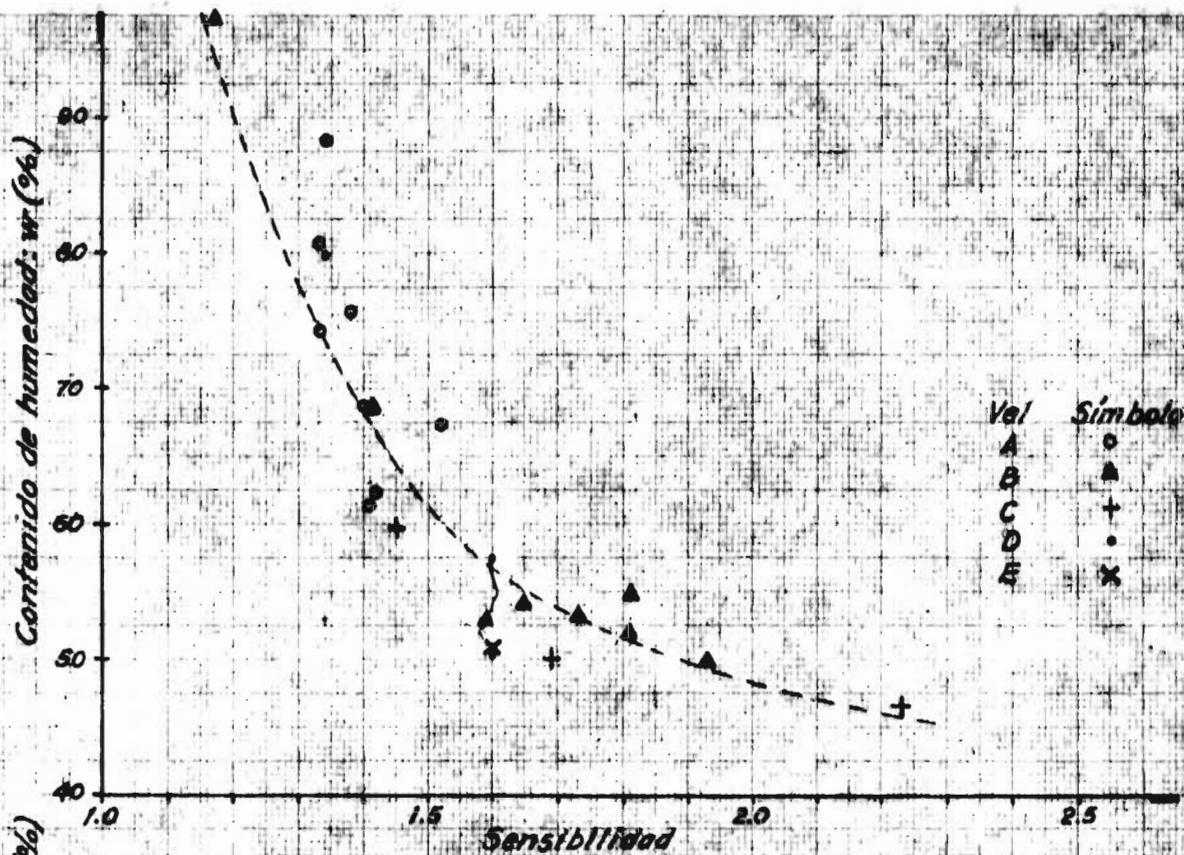


FIGURA 12

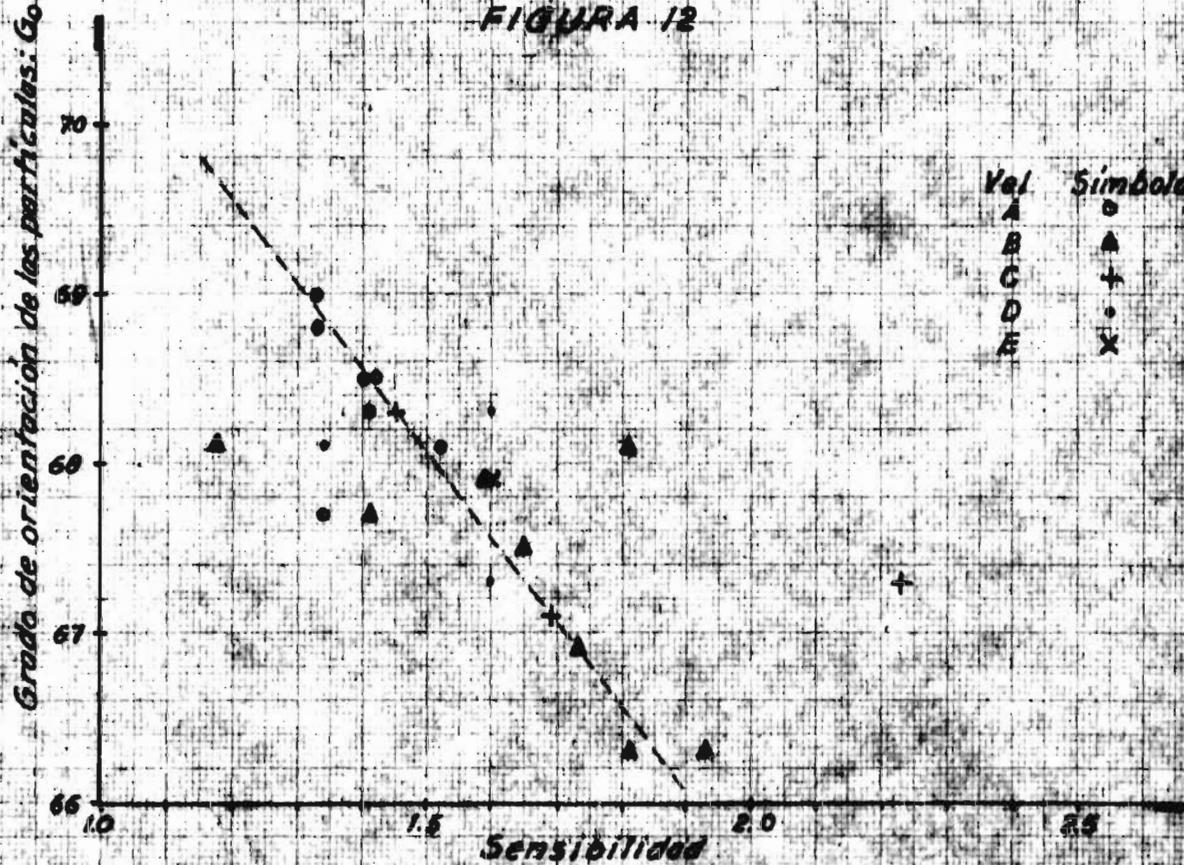


FIGURA 13

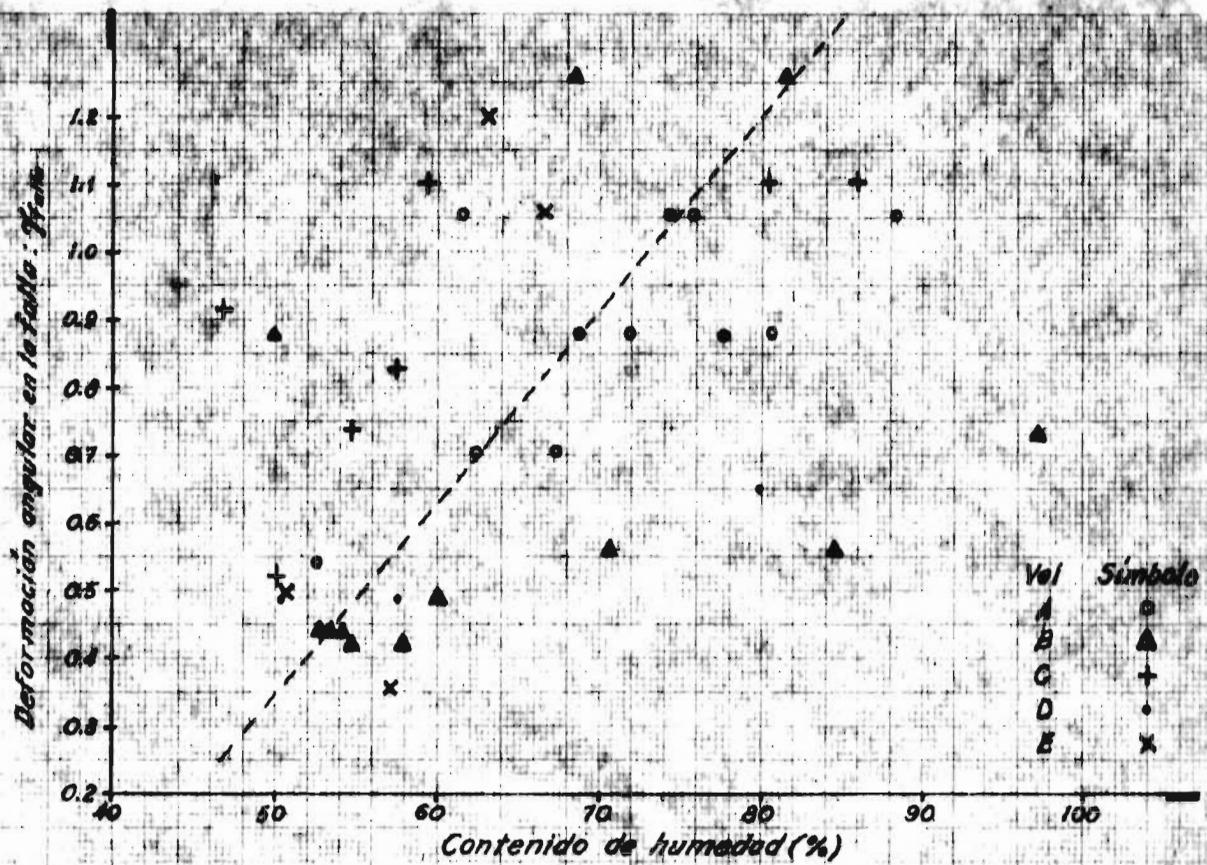


FIGURA 14

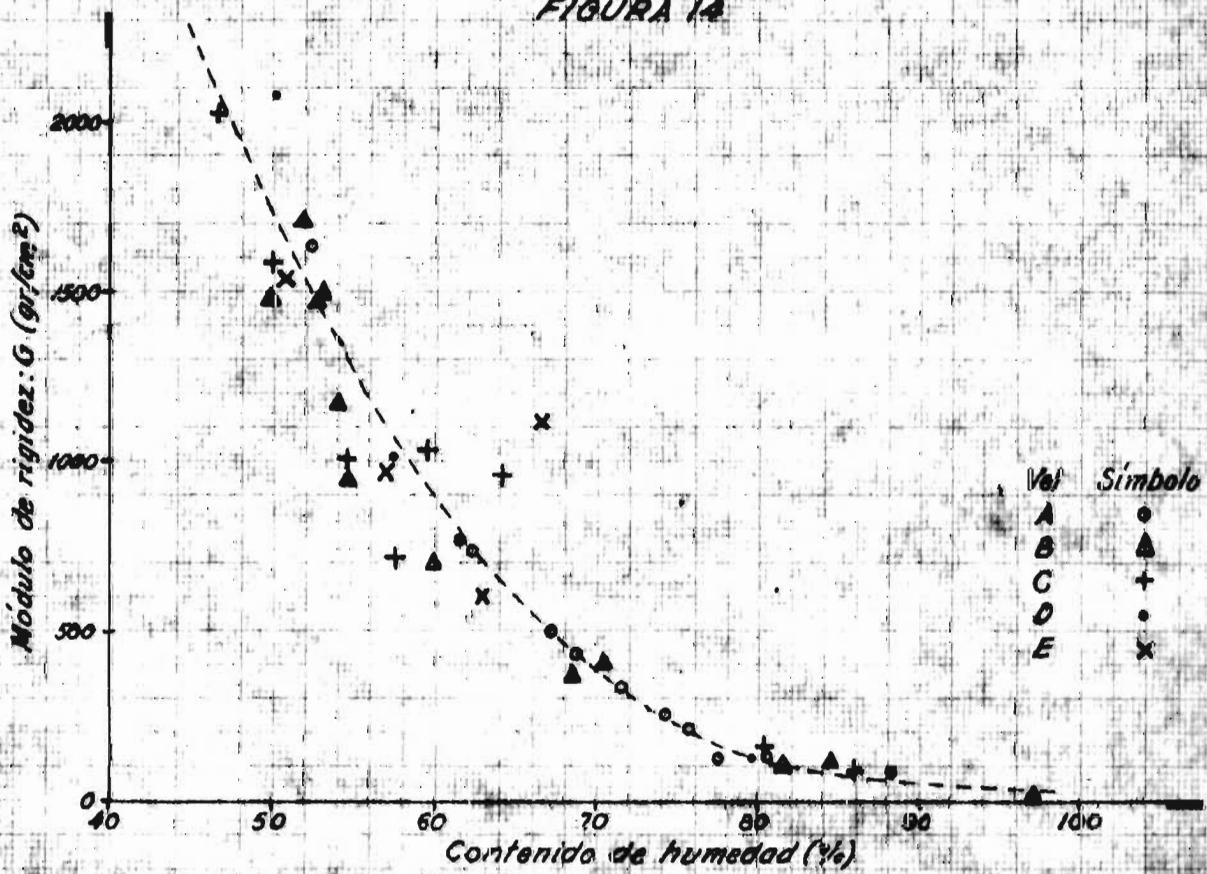


FIGURA 15

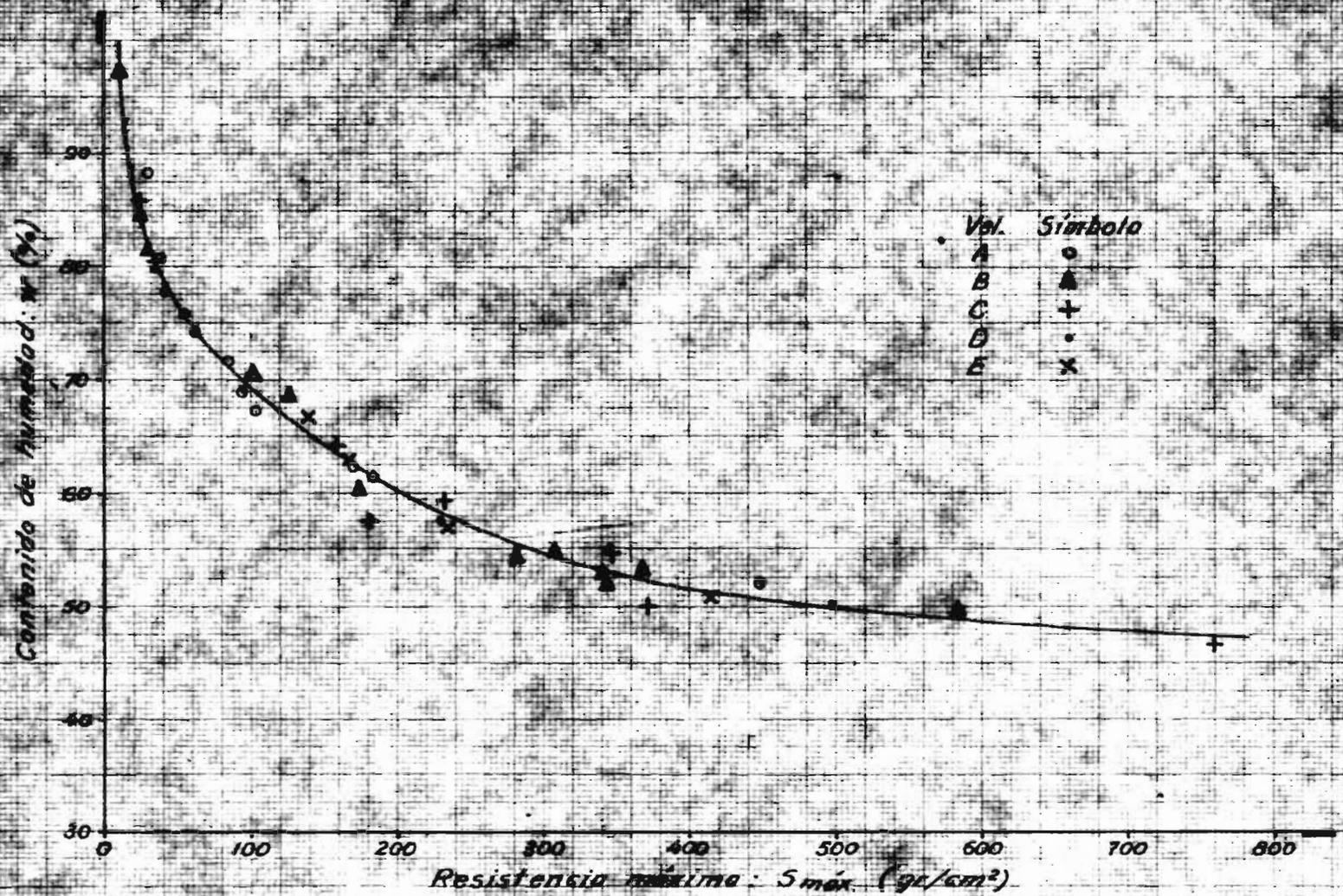
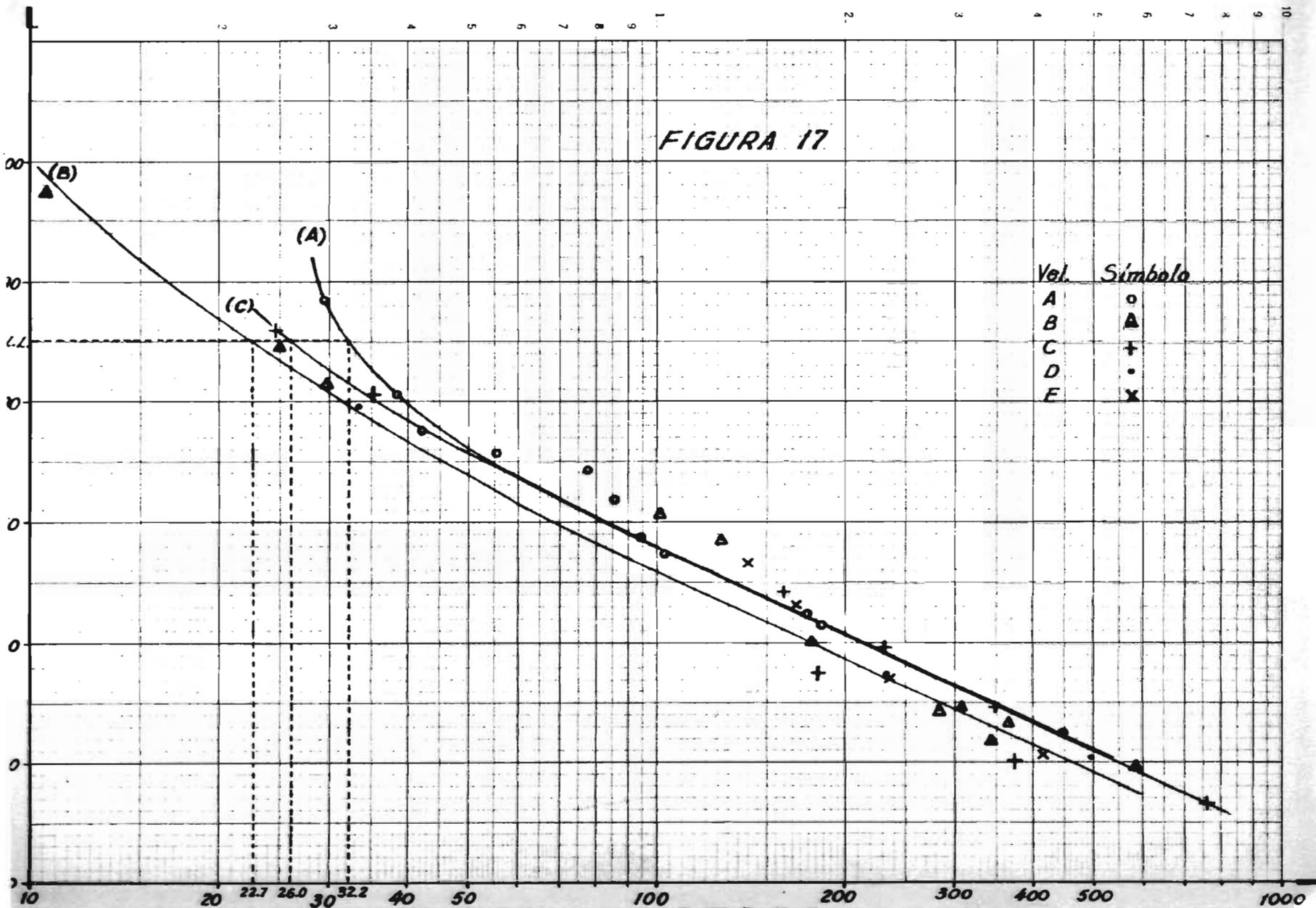


FIGURA 16

FIGURA 17



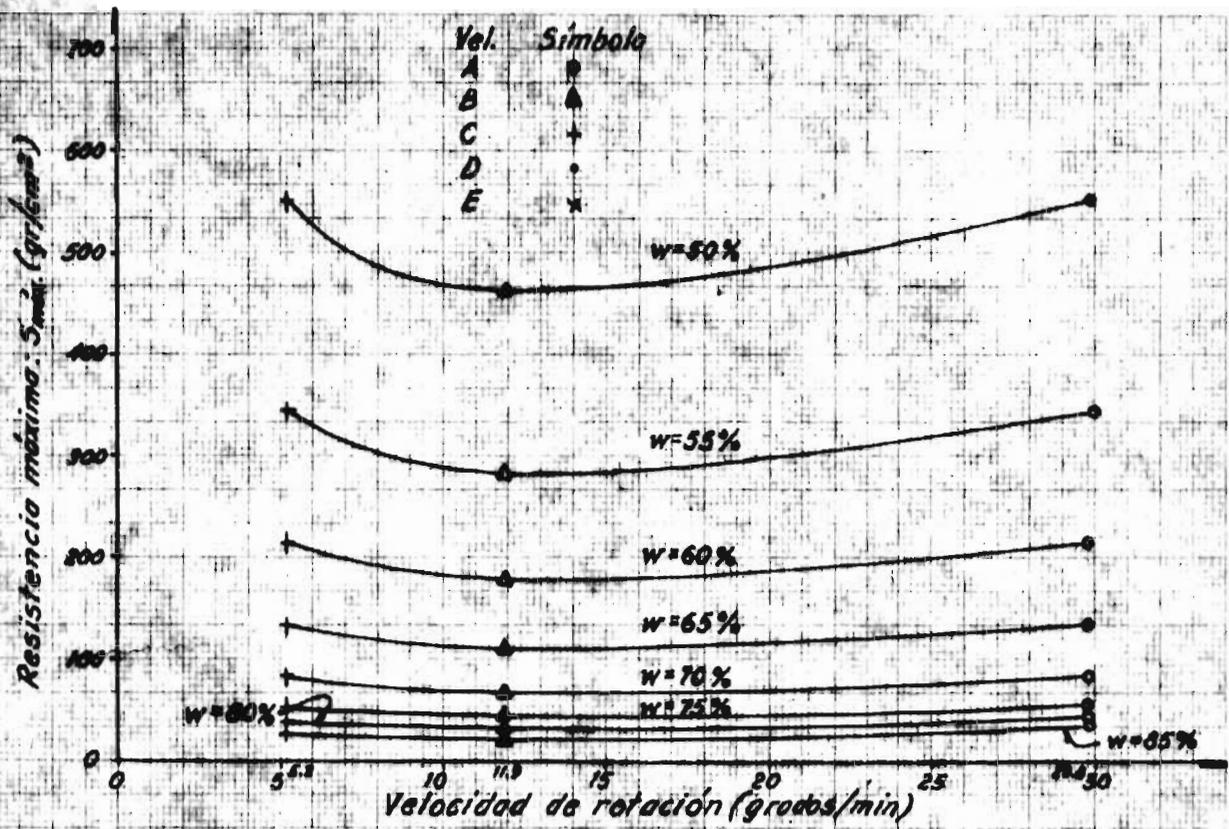


FIGURA 18

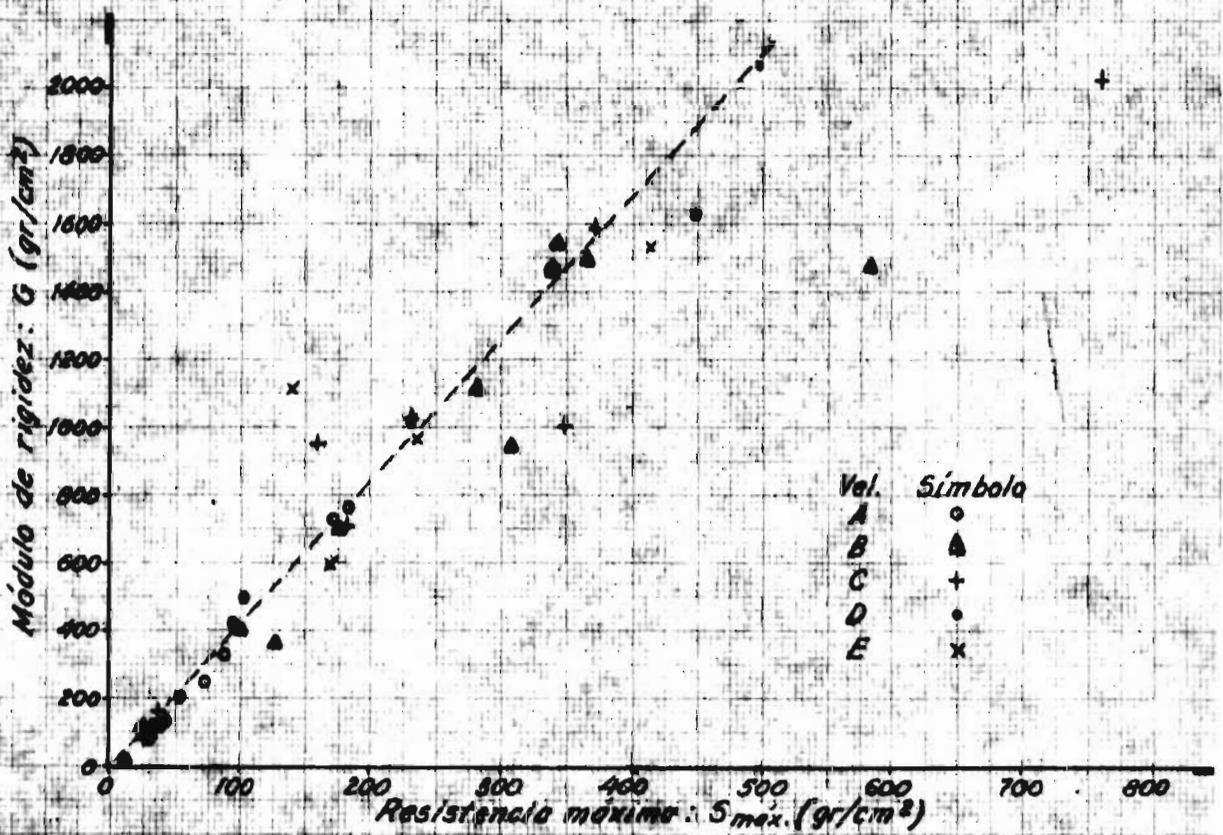


FIGURA 19

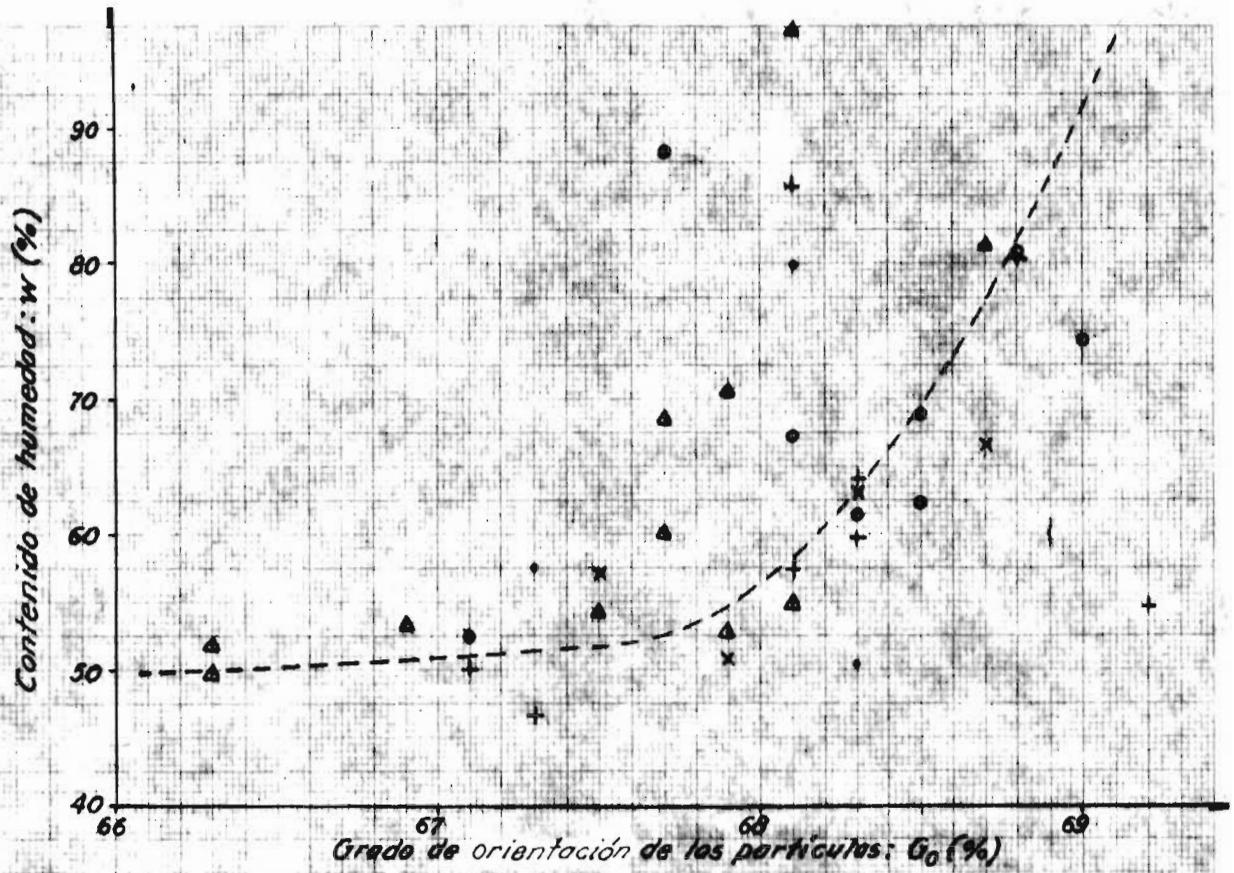


FIGURA 20

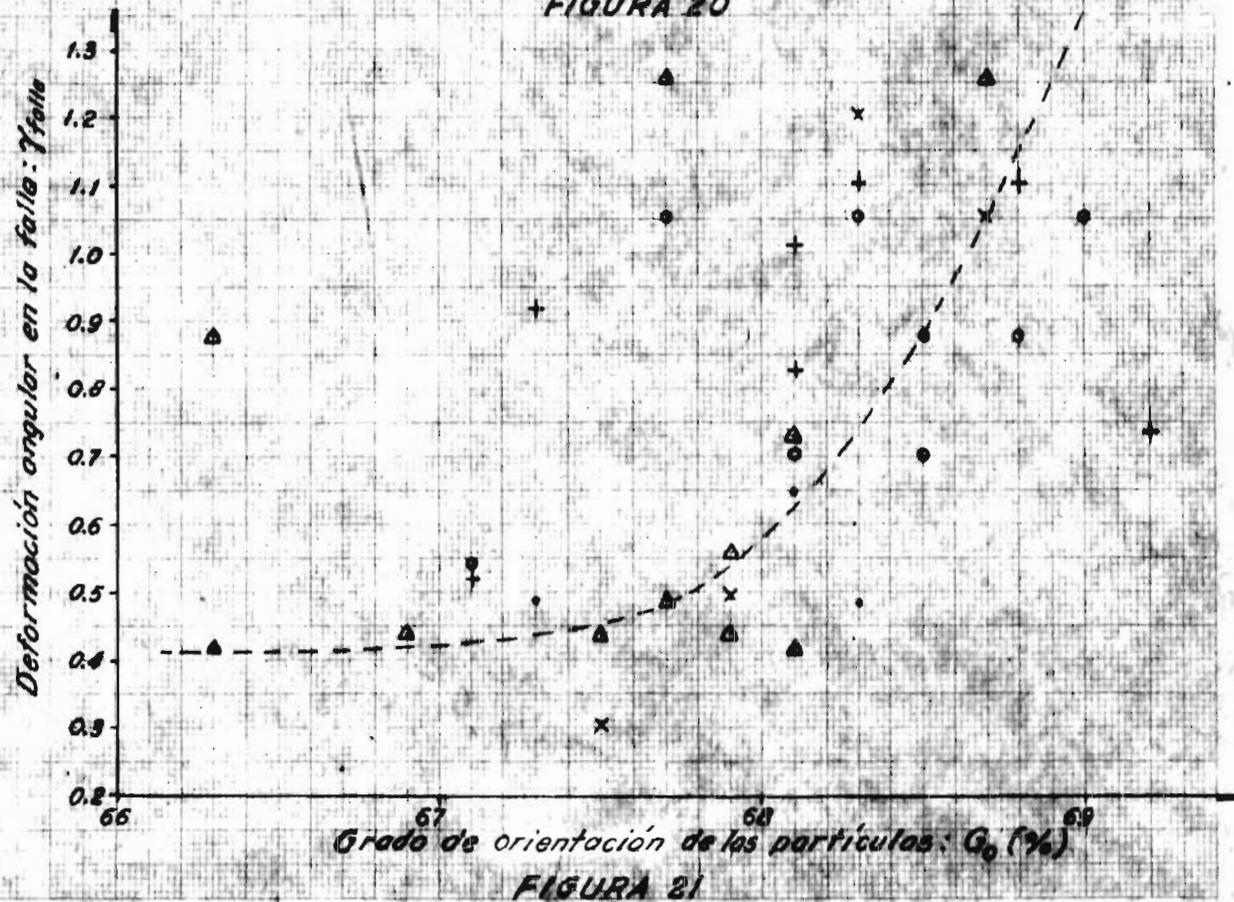


FIGURA 21

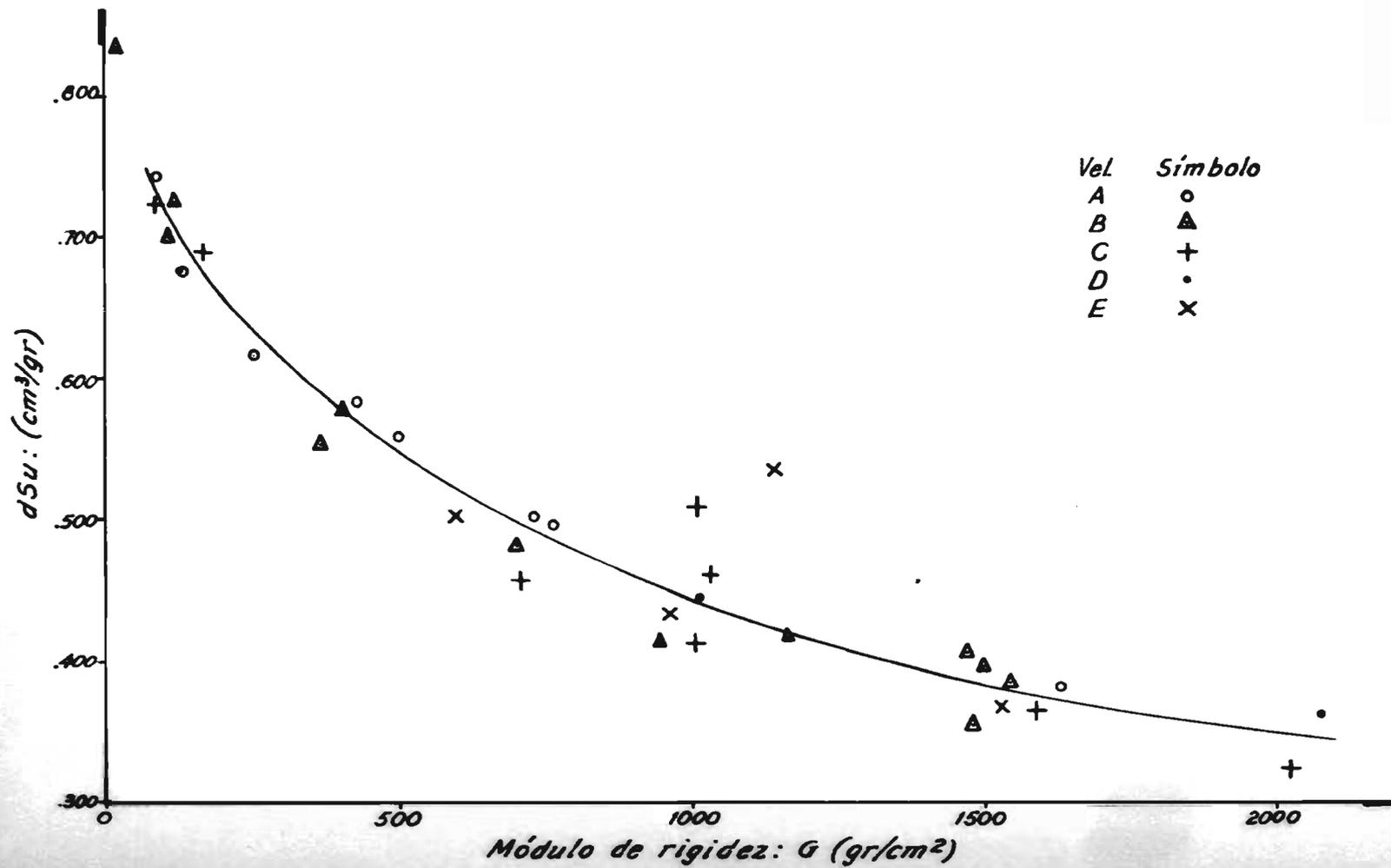


FIGURA 22

