



28  
9

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**Procedimiento para Producir Especímenes  
Mecanicamente Equivalentes de Arcilla-Agua y  
Arcilla-Polímero**

**P O R:**

**Felipe Amezcua Flores**

**LABORATORIO DE MICROMECAICA DE SOLIDOS  
INSTITUTO DE INGENIERIA, U. N. A. M.**

Mexico. D. F.

Abril, 1984



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.

# I N D I C E

## RESUMEN

## AGRADECIMIENTOS

CAPITULO I.	INTRODUCCION	1
1.1	Introducción	1
1.2	Trabajo realizado	2
1.3	El material y sus características físicoquímicas	3
1.4	Propiedades índice y clasificación de acuerdo al SUCS	4
CAPITULO II.	METODO DE COMPACTACION DE PROBETAS	8
11.1	Introducción	8
11.2	Preparación del material	9
11.2.1	Fluidos intersticiales utilizados	10
11.2.2	Preparación del caolín con agua	14
11.2.3	Preparación del caolín con polímero (peso molecular = 400)	14
11.3	Molde de compactación y compactador neumático	18
11.4	Uniformidad de los especímenes compactados	21
11.5	Observación de la estructura conforme al aumento del contenido de agua de compactación	25
CAPITULO III.	PRUEBAS DE COMPRESION SIMPLE PARA EVALUAR LA RESISTENCIA EN DIFERENTES PROBETAS	33
111.1	Introducción	33

III.2	<i>Tixotropía del caolín</i>	34
III.3	<i>Ensayes de compresión simple</i>	36
III.3.1	<i>Equipo experimental</i>	37
III.3.2	<i>Curvas <math>\gamma_{\partial} - W_{wc}</math> y <math>q_u - W_{wc}</math></i>	41
III.3.2	<i>Curvas <math>\gamma_{\partial} - W_{pc}</math> y <math>q_u - W_{pc}</math></i>	44
CAPITULO IV.	COMPARACION DE CURVAS ESFUERZO-DEFORMACION EN PROBETAS CON AGUA Y CON POLIMERO	46
IV.1	<i>Introducción</i>	46
IV.2	<i>Curvas esfuerzo-deformación</i>	46
IV.2.1	<i>Equipo experimental</i>	47
IV.2.2	<i>Curvas de caolín-agua</i>	51
IV.2.3	<i>Curvas de caolín-polímero</i>	51
IV.2.4	<i>Especímenes de comportamiento equivalente</i>	55
IV.3	<i>Comportamiento de fluencia lenta</i>	55
CAPITULO V.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	59
	APENDICE	61
	BIBLIOGRAFIA	73

## RESUMEN

Esta tesis trata acerca del proceso de elaboración del modelo físico de un suelo arcilloso, basado en la sustitución de la fase líquida por un polímero. Esta sustitución permite el estudio del comportamiento microestructural por medio del microscopio electrónico, que funciona en alto vacío.

Con base en un conjunto de pruebas de laboratorio, se ha determinado la equivalencia del comportamiento mecánico, tanto a compresión simple como en pruebas de fluencia lenta, del modelo arcilla-polímero con aquél de especímenes convencionales de arcilla-agua.

El modelo mantiene una estructura sólida similar al material original, según se establece con microscopía; sin embargo, puede someterse a pruebas de compresión simple durante la observación de la microestructura, mientras que el material original perdería la fase líquida ante el vacío del microscopio.

Se presentan los resultados de las pruebas y una discusión de los aspectos más relevantes, así como conclusiones y recomendaciones para continuar la investigación.

## AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su agradecimiento por la confianza, motivación, crítica y apoyo en la redacción para el desarrollo del presente trabajo al Dr. Ricardo Peralta y Fabi. De igual forma se agradece por la ayuda técnica y consejos manifestados a los Ingenieros Esaú Vicente Vivas y Juan de Dios Cueto.

Se agradece así mismo, al área de Mecánica de Suelos del Instituto de Ingeniería, UNAM, el apoyo en forma de beca y acceso a instalaciones.

Se otorga reconocimiento y gratitud a Orlando Palacios L., por la ayuda en el laboratorio y en microscopía electrónica. Igualmente a Oscar Weckmann por la revisión de la redacción.

## CAPITULO I. INTRODUCCION

### 1.1 *Introducción*

Las alternativas de investigación sobre el comportamiento de suelos cohesivos compactados son básicamente dos, ref 1. La primera consiste en ensayar especímenes, los cuales se tratan como una caja negra, es decir, por un lado se imponen ciertos estímulos (tipos de ensaye) y por otro se registran las reacciones del sistema (resultados), sin mayor análisis de lo que ocurre interiormente. La segunda es penetrar en el análisis de la caja negra para desentrañar los fenómenos que regulan el comportamiento del suelo, con el propósito de identificar los más importantes y construir un modelo, basado en parámetros estructurales, con el que se puedan predecir las respuestas del sistema a ciertos tipos de sollicitaciones de interés para obras de ingeniería.

Para el desarrollo de la presente investigación fue necesario utilizar, en la preparación de especímenes, dos fluidos intersticiales: el primero, agua, resultando especímenes convencionales en mecánica de suelos y el segundo, etilen glicol, que es un polímero soluble en agua, con peso molecular de 400, para posibilitar su estudio al microscopio electrónico de barrido (MEB). La finalidad inmediata es la preparación de especímenes de prueba que se puedan estudiar a dos escalas: en la microscópica se requiere que el material sea estable, es decir, que mantenga su fluido intersticial intacto en condiciones de alto vacío; en la escala mesoscópica, con la cual nos referimos a especímenes convencionales de laboratorio, se pretende producir un espécimen cuya evaluación de la respuesta mecánica se realizará por medio de interferometría holográfica.

## 1.2 Trabajo realizado

El objetivo central de este trabajo es la elaboración de dos especímenes que presenten comportamiento mecánico equivalente al ser ensayados a compresión simple, a pesar de contener fluidos intersticiales con diferentes propiedades fisicoquímicas.

Para este propósito se preparan ambos especímenes con iguales energías de compactación, difiriendo en el tipo del fluido intersticial, el peso del suelo y en algunos detalles de su preparación. Para caracterizar la equivalencia mecánica se someten ambos especímenes a pruebas de compresión simple para obtener curvas esfuerzo axial- deformación unitaria ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) y deformación-tiempo (fluencia lenta).

La finalidad del presente trabajo es cubrir parte de la primera alternativa mencionada, para con esto colaborar en el desarrollo de la segunda, cuyo objetivo es encontrar relaciones cuantitativas entre el comportamiento mecánico de un suelo arcilloso y la microestructura que lo compone; es decir, este trabajo forma parte de una investigación más amplia que se desarrolla en el Instituto de Ingeniería (I.I.), que tiene por objeto el incluir, en modelos mecánicos de los suelos arcillosos, la participación de la microestructura.

### 1.3 *El material y sus características fisicoquímicas*

Con el fin de esclarecer los mecanismos responsables del comportamiento esfuerzo-deformación-tiempo de las arcillas, es necesario considerar los factores que lo gobiernan. Algunos de los más importantes son: composición química del fluido intersticial, composición mineralógica, iones de intercambio, tensión superficial, viscosidad, peso específico del fluido, etc. Dado el grado de complejidad que puede alcanzar un suelo arcilloso por la combinación de dichos factores, se optó, para minimizar estos factores y facilitar el control de cada una de las variables experimentales, el uso de una arcilla del subgrupo de la caolinita, con base en sus características fisicoquímicas de baja actividad.

Antes de seleccionar el caolín utilizado en este trabajo, se estudiaron por medio de difracción y fluorescencia de rayos-X, 10 tipos de caolines comerciales, procedentes de cuatro compañías; además, fueron clasificados de acuerdo al sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS).

Los estudios se realizaron en la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Química, y para el caolín seleccionado se reportaron los siguientes resultados:

- En un estudio mineralógico por medio de difracción de rayos-X resultó ser una caolinita con poco cuarzo y poca cristobalita. Además, presentó un patrón de difracción mostrando un alto grado de cristalización.
- El estudio de fluorescencia de rayos-X, determinó la composición química de la arcilla y resultaron los siguientes elementos: Fe, Zn, Ba, Sn, Ti, Cu, Nb, Pb, Al, Si, Ca, K, S y P.

Es preciso señalar que tales resultados son de tipo cualitativo elemental y que en su mayoría son trazas normalmente encontradas en este material.

#### 1.4 Propiedades índice y clasificación de acuerdo al SUCS

El caolín seleccionado proviene de un depósito del Estado de México y no ha sufrido secado al horno ni molienda. Una vez adquiridos varios sacos del caolín elegido para la investigación, se procedió a mezclar el caolín con el fin de homogeneizarlo y permitir la pérdida de la mayor parte de la humedad natural (para su uso posterior con polímero); posteriormente se almacenó en bolsas de plástico selladas, con el fin de conservar la homogeneidad de la humedad inicial.

La determinación de sus propiedades índice y la clasificación del suelo, se efectuaron de acuerdo al manual de mecánica de suelos, ref 2; los resultados obtenidos se muestran en la fig 1, y se describen brevemente a continuación:

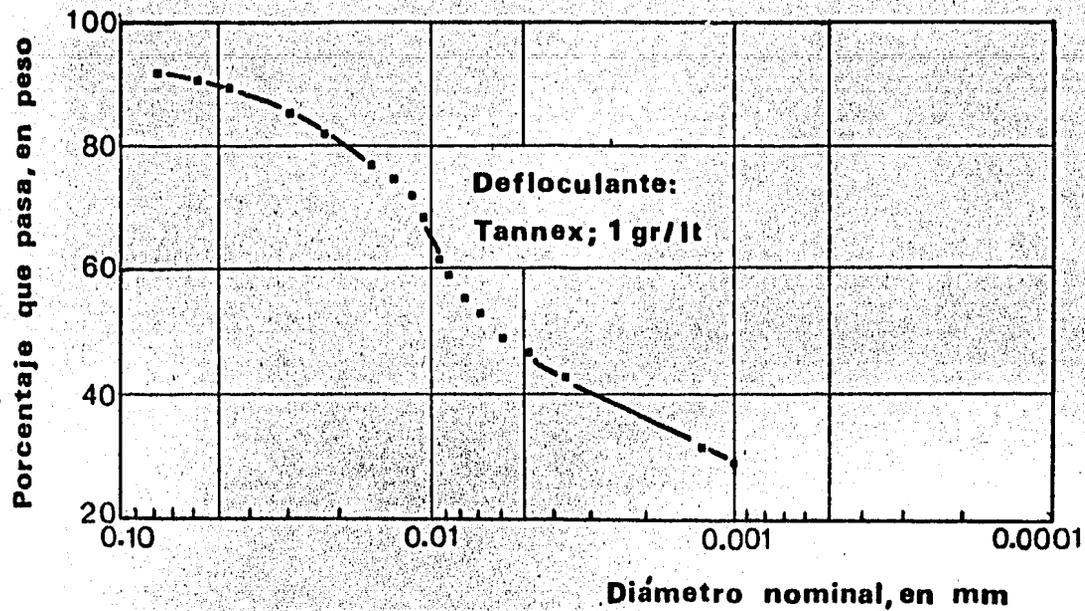
Granulometría: El análisis granulométrico se realizó por medio de hidrómetro, ya que prácticamente todo el material pasa la malla # 200 (0.074 mm). Para determinar con mayor precisión la cantidad y el tipo de defloculante adecuado para este caolín, se utilizaron varios defloculantes con diferentes concentraciones. De las pruebas realizadas, se observó que aún cuando el pirofosfato de sodio con una concentración de 0.01N deflocula adecuadamente, el tannex con una concentración de 1 gr/lt, deflocula más este tipo de suelo, por lo tanto se utilizó este último.

Densidad de sólidos ( $S_s$ ): Para determinar la  $S_s$  se utilizaron los dos procedimientos; para suelos no cohesivos (vía seca) y para suelos cohesivos (vía húmeda). Los resultados son el promedio de tres determinaciones:

Densidad de sólidos por vía seca: 2.68

Densidad de sólidos por vía húmeda: 2.69

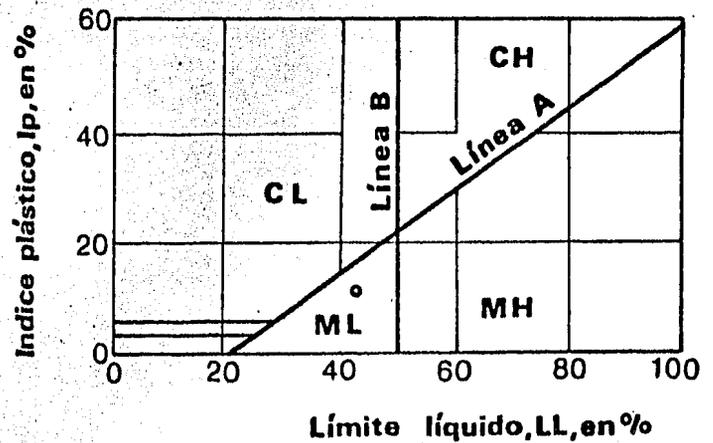
La pequeña diferencia en los resultados se explica de acuerdo al procedimiento seguido para su obtención; es decir, por vía húmeda el material se coloca en un mezclador mecánico, lo cual desintegra los paquetes de partículas y provoca que el volumen de sólidos calculados disminuya, y por lo tanto la  $S_s$  aumenta.



**Distribución granulométrica, obtenida con hidrómetro**

**Límites de Atterberg:**

Condición de ensaye	LL %	LP %	IP %
Secado al aire $W_w = .44\%$	42.0	32.0	10.0



**Densidad de sólidos ( $S_s$ ):  $S_s = 2.68$  (Vía seca) y  $S_s = 2.69$  (Vía húmeda)**

**Mineralogía de la muestra: Caolinita cristalizada, con poco cuarzo y poca cristobalita**

**Composición química elemental: Fe, Zr, Bo, Sr, Ti, Cu, Zn, Nb, Pb, Si, Ca, K, S, P <<<**

FIG. 1 Propiedades índice y características fisicoquímicas del caolín

Límites de consistencia: Aún cuando el secado del material puede alterar sensiblemente los valores de los límites, en este trabajo fué necesario sécarlo al aire, por las razones que se expondrán mas adelante. A excepción de esta recomendación, se siguieron las especificaciones del manual mencionado anteriormente, para determinar el límite liquido (LL), el límite plástico (LP) y el límite de contracción (LC). Se obtuvieron los siguientes resultados:

LL = 42.0%, LP = 32.0%, LC = 26.7% y el  $I_p = 10.0\%$ . De acuerdo al SUCS, este tipo de caolín es un limo de baja compresibilidad (ML). Es interesante señalar la contradicción de esta clasificación, usual en mecánica de suelos, con los datos procedentes de estudios mineralógicos, donde el material es clasificado como una arcilla caolinítica. En este trabajo se establecerá la diferencia entre arcilla mineralógica y la categoría de arcilla que, en mecánica de suelos, se utiliza para señalar materiales que pertenecen a las diferentes zonas de la carta de plasticidad. El material utilizado en este trabajo, aún cuando se conoce como una arcilla por pruebas de rayos-X, se clasifica como limo ML.

## CAPITULO II. METODO DE COMPACTACION DE PROBETAS

### II.1 *Introducción*

El procedimiento y la energía empleada en la compactación influyen apreciablemente en el arreglo de las partículas y en el comportamiento mecánico del espécimen, ref 3, y además, en la uniformidad de compactación a lo largo de los especímenes y en la repetitividad del peso volumétrico seco.

En este trabajo se utilizó el método de compactación por amasado, utilizando como referencia el peso volumétrico seco máximo ( $\gamma_{dm\acute{a}x}$ ) correspondiente al contenido de agua óptimo ( $w_{w\acute{o}pt}$ ) de la compactación próctor estándar (energía 6.04 kg-cm/cm<sup>3</sup>), para determinar las diferentes combinaciones de la carga aplicada por el pisón, número de capas y número de pisonadas por capa.

Al hacer el ajuste de las especificaciones de la compactación por amasado, se encontró que la mejor manera de obtener la curva de compactación es: fijando el número de capas en diez, el valor de la carga aplicada en cada pisonada en 10 kg y el número de pisonadas igual a treinta (diez pisonadas abarca el área de cada capa). De esta manera, las curvas de compactación por amasado se igualaron prácticamente en el  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  y el  $w_{\sigma p.t.}$  a las de la compactación próctor estándar, aunque la forma de las curvas no es igual, ref 4.

Con el objeto de observar algunas características de este método de compactación con una energía equivalente a la próctor estándar, se realizaron dos estudios complementarios; uno para determinar la uniformidad de la compactación a lo largo de los especímenes y el otro para determinar cómo varía el arreglo de las partículas conforme aumenta el contenido de agua de compactación ( $w_{wc}$ ). Los resultados obtenidos y sus comentarios se muestran en los incisos II.4 y II.5, respectivamente. En cuanto a la variación del peso volumétrico seco y los fluidos utilizados, se comentará en los incisos II.3 y II.2.1, respectivamente.

## II.2 Preparación del material

Puede afirmarse con base en varios estudios experimentales, refs 5 y 6, que los resultados de la compactación de los suelos dependen no solamente del método con que se compactan, sino también del modo como se preparan los materiales antes de iniciar la prueba.

Se conoce la influencia del tiempo de curado (lapso comprendido entre el momento en que se agrega agua o polímero al suelo y el de compactación) en las curvas de peso volumétrico seco ( $\gamma_d$ ) vs. contenido de agua de compactación ( $w_{wc}$ ). Durante el tiempo de curado se mantiene el material en reposo dentro de una bolsa de plástico sellada; por razones prácticas se ha determinado que el tiempo de curado debe ser igual a 24 hr.

En lo referente al proceso de añadir fluido al suelo, sin duda, cuanto más finas sean las gotas, más fácil y en menos tiempo se podrán distribuir en todo el material, sobre todo si éste contiene grumos.

### II.2.1 Fluidos intersticiales utilizados

En el presente trabajo se utilizaron tres fluidos: agua, y dos polímeros, con pesos moleculares (PM) de 400 y 62. A continuación se describen brevemente:

Agua.- En la preparación del material agua-suelo se utilizó agua destilada, aún cuando se sabe que la composición química del líquido en el suelo puede influir de modo apreciable en sus propiedades mecánicas.

Algunas de las propiedades del agua son: viscosidad dinámica a  $20^\circ\text{C} = 1.0 \text{ c.p.}$ , tensión superficial a  $20^\circ\text{C} = 72.7 \text{ dinas/cm}$ , peso específico a  $20^\circ\text{C} = 0.9982 \text{ gr/cm}^3$ .

Polímero con peso molecular de 400.- Como se mencionó en la introducción, para el desarrollo de la segunda alternativa de investigación, se requiere de un fluido que no se evapore en la cámara de vacío del MEB, es decir, que tenga una presión de vapor un poco mayor que la presión de operación del MEB, ref 7; esta característica del fluido tiene el inconveniente de que al preparar el material, el contenido de polímero de compactación ( $w_{pc}$ ) no se pueda obtener en una forma directa, ya que éste no se evapora en el horno a  $110^{\circ}\text{C}$ , por lo cual, se determinó el  $w_{pc}$  de una manera indirecta, haciendo la analogía con un polímero con peso molecular de 62 y además con agua, los cuales sí se evaporan.

Otro requisito del fluido es que debe ser soluble en agua, para lograr una liga apropiada entre la estructura del agua adsorbida y la del fluido libre. Esta característica tiene el inconveniente de que el fluido absorbe agua del ambiente, lo cual se discutirá en el inciso II.2.3.

Algunas de las propiedades de este fluido son: viscosidad dinámica a  $25^{\circ}\text{C}$  = 90.0 c.p., peso específico a  $23^{\circ}\text{C}$  =  $1.1230 \text{ gr/cm}^3$  (determinado en el laboratorio)

Polímero con peso molecular de 62.- Este polímero y el agua se utilizaron para obtener el contenido de polímero de compactación ( $w_{pc}$ ) en forma indirecta, es decir, se preparó material con diferentes contenidos de polímero y agua, de donde se obtiene el contenido de polímero y agua calculado ( $w_{pcal}$  y  $w_{wcal}$ ), con base en el

peso de fluido agregado y el contenido de polímero y de agua reales ( $w_{preal}$  y  $w_{wreal}$ ), con base en los pesos obtenidos después de secado al horno. En la fig 2, se observa que en general el  $w_{wcal}$  es mayor que el  $w_{wreal}$  y que su diferencia promedio de varias de terminaciones (cada determinación es el promedio de tres cálculos) es de 0.33%, lo cual se piensa que se debe a la diferencia de peso del recipiente de aluminio utilizado para preparar el suelo, la cual es provocada por la humedad que éste absorbe al preparar el suelo. Por su parte el  $w_{pcal}$  es mayor que el  $w_{preal}$  y su diferencia promedio es de 0.19%, lo cual se piensa que se debe a la misma causa que para el agua.

El material utilizado para determinar el  $w_{preal}$  y  $w_{wreal}$  tiene un tiempo de curado similar al de secado en el horno, de aproximadamente 24 hr. Además, por razones que se expondrán después, los fluidos utilizados fueron aplicados con un recipiente cuya tapa tiene perforaciones finas (aspersor).

Algunas de las propiedades de este polímero son: viscosidad dinámica a 20°C = 21.0 c.p., la tensión superficial a 20°C = 48.4 dinas/cm, el peso específico a 23°C = 1.1092 gr/cm<sup>3</sup> (determinado en el laboratorio) y su fórmula química es  $C_2H_6O_2$ .

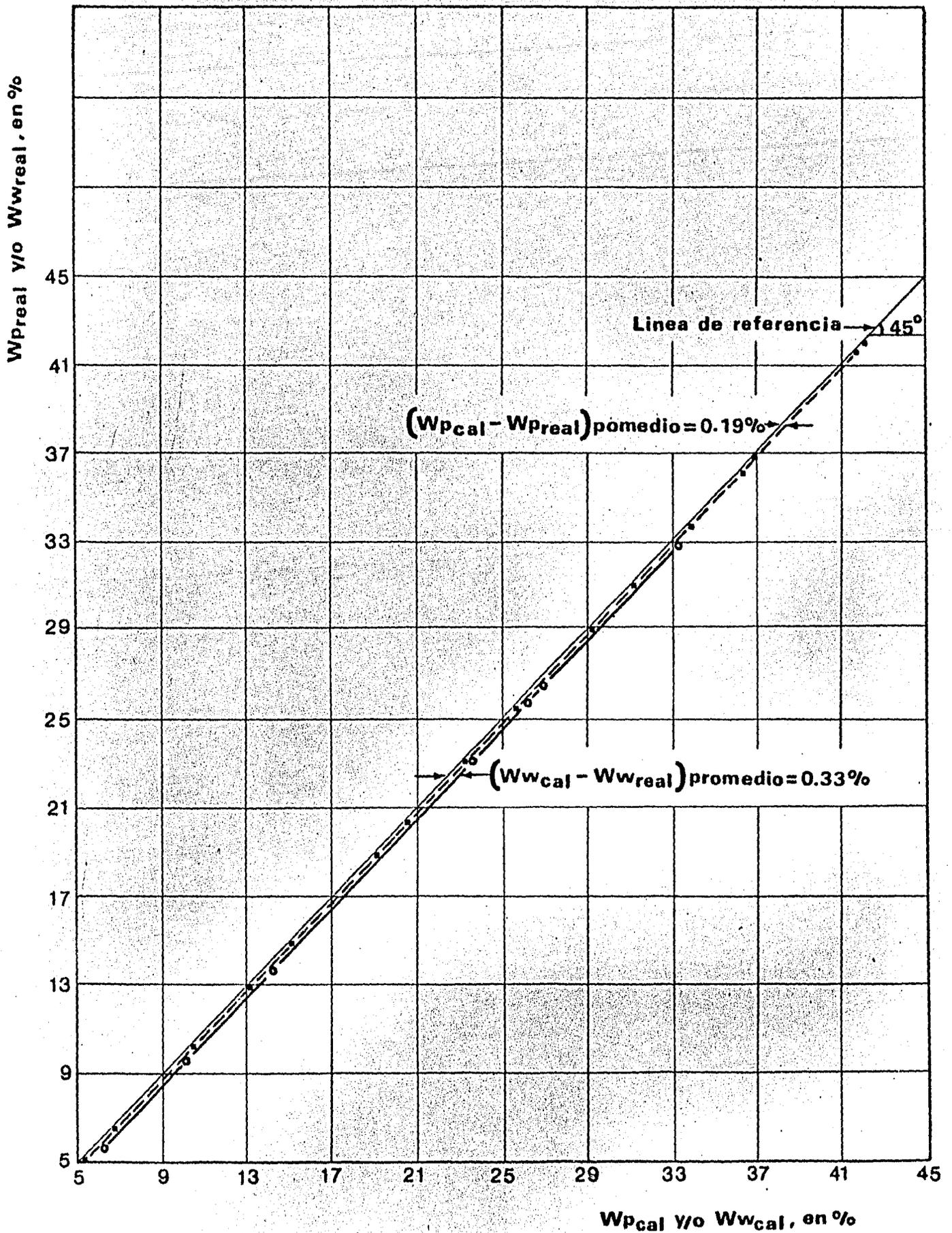


FIG. 2 Diferencias registradas entre el contenido de agua y/o de polímero calculados (PM =62,  $w_{wcal}$  y/o  $w_{pcal}$ ) y el contenido de agua y/o de polímero reales (PM =62,  $w_{wreal}$  y/o  $w_{preal}$ )

### II.2.2 Preparación del caolín con agua

En la preparación del caolín, se utilizó agua destilada y un atomizador de agua con aire a una presión hasta de  $1.5 \text{ kg/cm}^2$  aproximadamente. El caolín preparado en esta forma tiene un tiempo de curado idéntico al de secado en el horno, de 24 hr, antes de obtener su contenido de agua de compactación ( $w_{wc}$ ).

### II.2.3 Preparación del caolín con polímero (peso molecular = 400)

Este tipo de polímero ofrece básicamente dos ventajas y sus respectivas desventajas en el desarrollo de esta investigación; a continuación se mencionan:

#### Ventajas:

- no se evapora en la cámara de vacío del MEB
- es soluble en agua

#### Desventajas:

- no se puede obtener el contenido de agua de compactación directamente
- el polímero absorbe agua del ambiente

Con el objeto de solucionar las desventajas presentadas por este fluido en lo que respecta a la obtención del  $w_{pc}$ , se mencionó anteriormente que se usaría un método indirecto para su obtención, para lo cual se consideró la diferencia promedio obtenida en el polímero con peso molecular de 62, restando del contenido de

polímero calculado ( $w_{pcal}$ ), el contenido de polímero real ( $w_{preal}$ ), igual a 0.19%. Esta diferencia se resta del contenido de polímero calculado con peso molecular de 400, y se obtendrá el contenido de polímero real o de compactación de dicho fluido ( $w_{pc}$ ).

Respecto a la desventaja de que el polímero absorbe agua del ambiente, la necesidad de obtener probetas con la menor cantidad de agua posible (principalmente para su uso en la cámara de vacío del MEB y en interferometría holográfica) y para conocer dicha cantidad, se procedió en la siguiente forma: la primera necesidad fue conseguir que el material seleccionado tuviera el menor contenido de agua inicial ( $w_{wi}$ ) posible, por lo tanto, después de adquirir el material se homogeneizó y se dejó secar al aire, obteniendo así un

$$w_{wi} = 0.44\%$$

En la preparación del caolín con polímero, el tiempo de curado, y el de secado en el horno, fueron prácticamente iguales que para el agua, antes de obtener el contenido de polímero de compactación ( $w_{pc}$ ). Se presentó un problema al determinar la forma de agregar el fluido al material, ya que se necesita conocer la cantidad de agua que el suelo absorbe del ambiente, por lo cual fue desechado el método de preparación utilizando el atomizador de aire, ya que con éste, no se puede llevar un buen control de la cantidad de agua absorbida y se pensó en un aspersor, el cual sí permite un control de la cantidad de agua absorbida por diferencia de pesos, y además agregar el fluido rociado y uniformizarlo con una - -

espátula. Antes de decidir preparar el material utilizando el aspersor, se preparó suficiente suelo utilizando el atomizador de aire y se fabricaron varios especímenes, los cuales fueron fallados y comparados con otros especímenes fabricados en condiciones idénticas, pero preparado el material usando el aspersionador. Los resultados son prácticamente los mismos, aún cuando no se pudo determinar la cantidad de agua absorbida durante la preparación utilizando el atomizador de aire; se considera que es idéntica a la absorbida usando el aspersionador, ya que el tiempo de preparación y el  $w_{pc}$  son prácticamente iguales. Con base en los resultados mencionados anteriormente, se decidió utilizar el aspersionador para dichas preparaciones.

Con el objeto de cuantificar la variación del peso específico del polímero ( $\gamma_p$ ), durante la preparación del material con diferentes  $w_{pc}$  y considerando la humedad inicial del material, se adoptaron las precauciones y realizaron los cálculos necesarios. En la fig 3, se puede observar el intervalo de variación del  $\gamma_m$  ( $\gamma_{polímero+agua}$ ) en función del coeficiente del peso de agua contenida, dividido entre el peso de polímero requerido para la preparación del material. Aún cuando el intervalo de variación del peso de agua entre el peso de polímero es del 2% al 10% aproximadamente, el  $\gamma_m$  varía entre 1.1202 gr/cm<sup>3</sup> y 1.1102 gr/cm<sup>3</sup>. Debe tenerse en cuenta que en un principio únicamente se trabaja con un contenido de polímero, el cual resulta ser aproximadamente el promedio de las cantidades mencionadas (en el momento de preparar el suelo se obtiene exactamente).

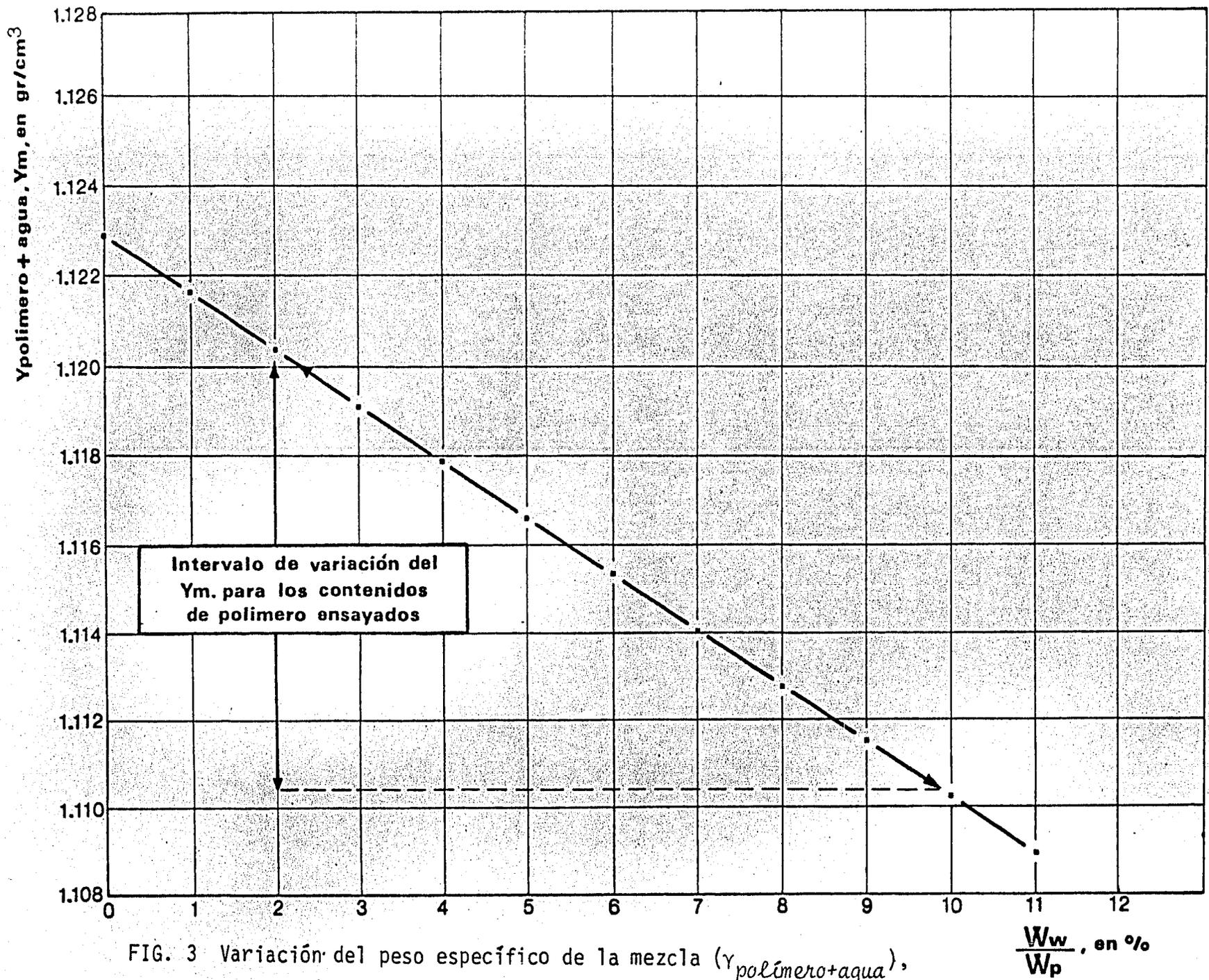


FIG. 3 Variación del peso específico de la mezcla ( $\gamma_{polimero+agua}$ ), en función del peso de agua ( $W_w$ ) disuelta en el peso de polimero ( $W_p$ ), por absorción durante la preparación y humedad inicial

$\frac{W_w}{W_p}$ , en %

En vista de los resultados obtenidos en la segunda alternativa de investigación, se tratará de determinar la influencia de este porcentaje de agua contenida; por el momento es suficiente conocer dicho porcentaje y el comportamiento del espécimen.

### II.3 Molde de compactación y compactador neumático

El molde de compactación, ref 4, se diseñó para producir muestras prismáticas de sección rectangular y su geometría se decidió con base en las características necesarias para poder aplicar la técnica de interferometría holográfica. En la fig 4, se muestra un esquema del molde utilizado y sus finalidades son:

- a) Producir muestras con superficies expuestas planas, con el fin de usar la experiencia existente en la evaluación del campo deformatorio por interferometría holográfica (el análisis de muestras cilíndricas se prevee como un desarrollo futuro).
- b) El área de la superficie expuesta debe ser de un tamaño tal que permita la aparición de un número determinado de franjas de interferencia bien definidas y faciliten su interpretación.
- c) La geometría de la sección debe ser compatible con el diámetro del pistón para formar traslapes entre las diferentes pistoñas y cumplir con la relación grosor/altura utilizada en pruebas de compresión simple convencionales.

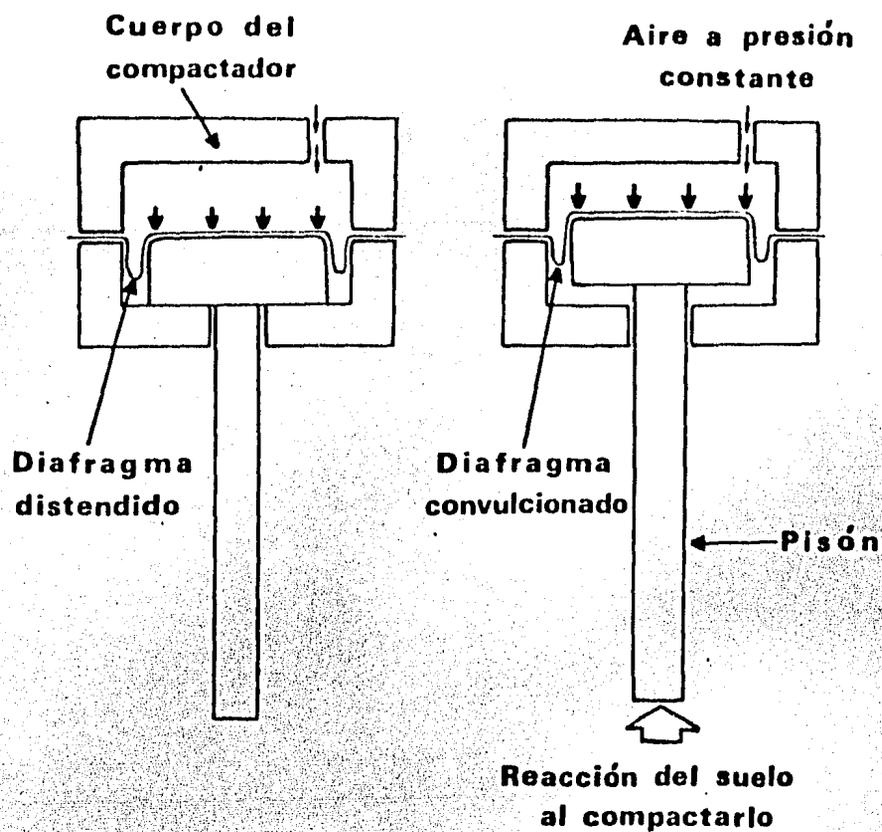


FIG. 4.A Esquema del principio de operación de los compactadores neumáticos

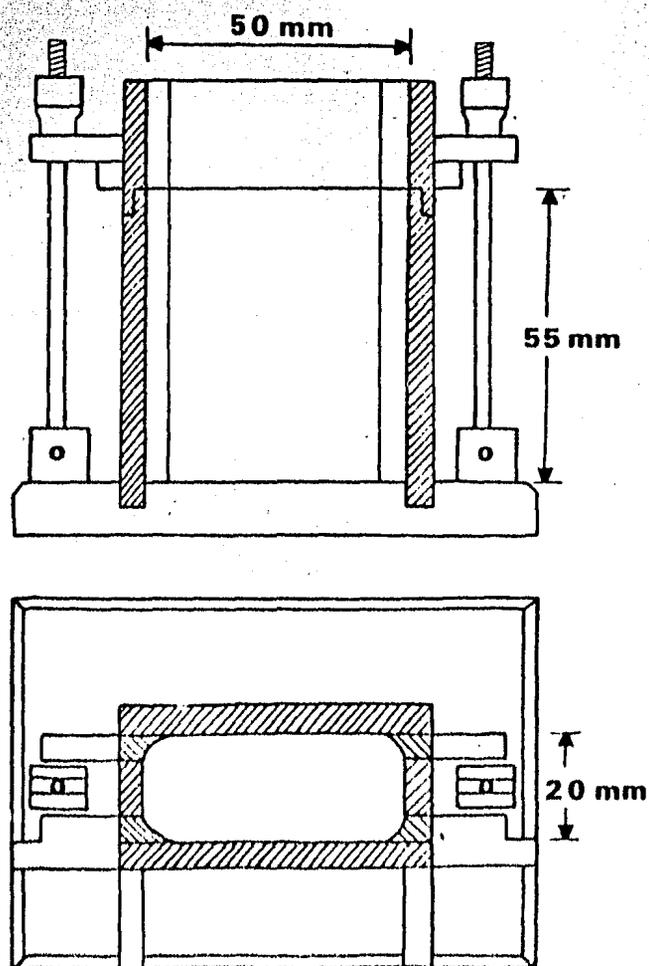


FIG. 4 Esquema del molde prismático

- d) Las aristas del prisma de la muestra tienen que ser redondeadas con un radio igual al diámetro del pisón, con el doble propósito de evitar concentraciones de esfuerzos en dichas aristas y permitir el acceso del pisón a toda la superficie de la muestra durante la compactación.
- e) Minimizar los esfuerzos aplicados al espécimen durante su extracción del molde, dada la alta precisión del método de medición y el interés por controlar la historia de esfuerzos de la muestra.

El molde está basado en un juego de placas deslizantes, protegidas por membranas de teflón que minimizan los daños a la muestra durante la extracción. El tamaño resultante de la muestra es: ancho = 5 cm, grueso = 2 cm, radios en las esquinas = 0.64 cm, altura = 5.5 cm, área de la sección =  $9.65 \text{ cm}^2$  y volumen =  $53.10 \text{ cm}^3$ .

El pisón utilizado para compactar es el llamado "harvard miniatura neumático", con diámetro de 1.27 cm, con el cual se agiliza la labor experimental y se obtienen especímenes con peso volumétrico seco muy similares (su diferencia es inferior al 1%), para contenidos de agua iguales; en la fig 4A, se muestra un esquema de dicho compactador.

La presión de aire se controla con un regulador (de 0 a  $7 \text{ kg/cm}^2$ ) que alimenta a un tanque metálico de 10 litros, el que a su vez está conectado a la tapa del compactador mediante una manguera

flexible de 1/4" de diámetro interior. El tanque y la manguera sirven como colchón a presión constante cuando la cabeza del pistón se despega de la base del compactador, lo cual es necesario, ya que el volumen de la recámara del compactador se reduce en el momento de compactar y existe una tendencia a aumentar la presión sobre la cabeza del pistón. La presión es medida con un manómetro de mercurio y la carga es comprobada en una báscula.

#### II.4 Uniformidad de los especímenes compactados

La energía aplicada en la prueba de compactación próctor estándar ( $6.04 \text{ kg-cm/cm}^3$ ) fue utilizada como referencia para ajustar las especificaciones de compactación por amasado. Una vez determinadas éstas, se realizó un estudio para observar la variación de algunas relaciones fundamentales en mecánica de suelos a lo largo de un mismo espécimen, tales como; la relación de vacíos ( $e$ ), el grado de saturación ( $S_r$ ), el contenido de agua ( $w_w$ ) y el peso volumétrico seco ( $\gamma_d$ ), con la finalidad de conocer la uniformidad de los especímenes compactados con este método de compactación y las especificaciones necesarias, es decir, 10 kilos, 10 capas y treinta pisonadas por capa (10-10-30)

Para determinar las relaciones mencionadas, se fabricaron especímenes con nueve capas únicamente (los especímenes normales son de 10 capas), sin aumentar el peso del material por capa, el número de pisonadas y la carga aplicada por el pistón; de esta manera,

cada espécimen compactado se recorta transversalmente en tres fragmentos, los cuales coinciden con las capas compactadas; sin embargo, las fracciones del espécimen muestran una superficie irregular, por lo que se utilizó el método de inmersión, para la obtención de su volumen. Para esto, previamente se recubren las muestras con una mezcla de parafina y brea (por su bajo límite de contracción). Terminada esta operación se obtuvo el contenido de agua ( $w_w$ ), cuyos resultados se muestran en las figs 5 y 5A. Se puede observar en estas figuras, la susceptibilidad de las relaciones estudiadas al contenido de agua de compactación; además, se puede ver que no existe una consistencia claramente definida, pero a la vez, se aprecia una tendencia a aumentar el peso volumétrico seco ( $\gamma_0$ ) al centro de la probeta. Esto nos indica que ahí se presentan con mayor facilidad las condiciones más eficaces de compactación para las especificaciones utilizadas. Entre las posibles explicaciones de esta variación, se puede referir el hecho de que fueron compactados los especímenes en el contenido de agua óptimo ( $w_{w\text{ópt}}$ ), provocando una redistribución de agua dentro del espécimen, lo que provocaría diferentes contenidos de agua en las secciones de la probeta. Por tal motivo, donde el contenido de agua es mayor, la energía de compactación se aprovecha menos, resultando así un  $\gamma_0$  sensiblemente menor en esas secciones.

Es conveniente mencionar que antes de obtener los resultados mostrados, se realizaron varios intentos para obtener la variación de estas relaciones fundamentales, usando una báscula con capacidad de 800 gr; sin embargo, nunca se obtuvieron resultados consistentes,

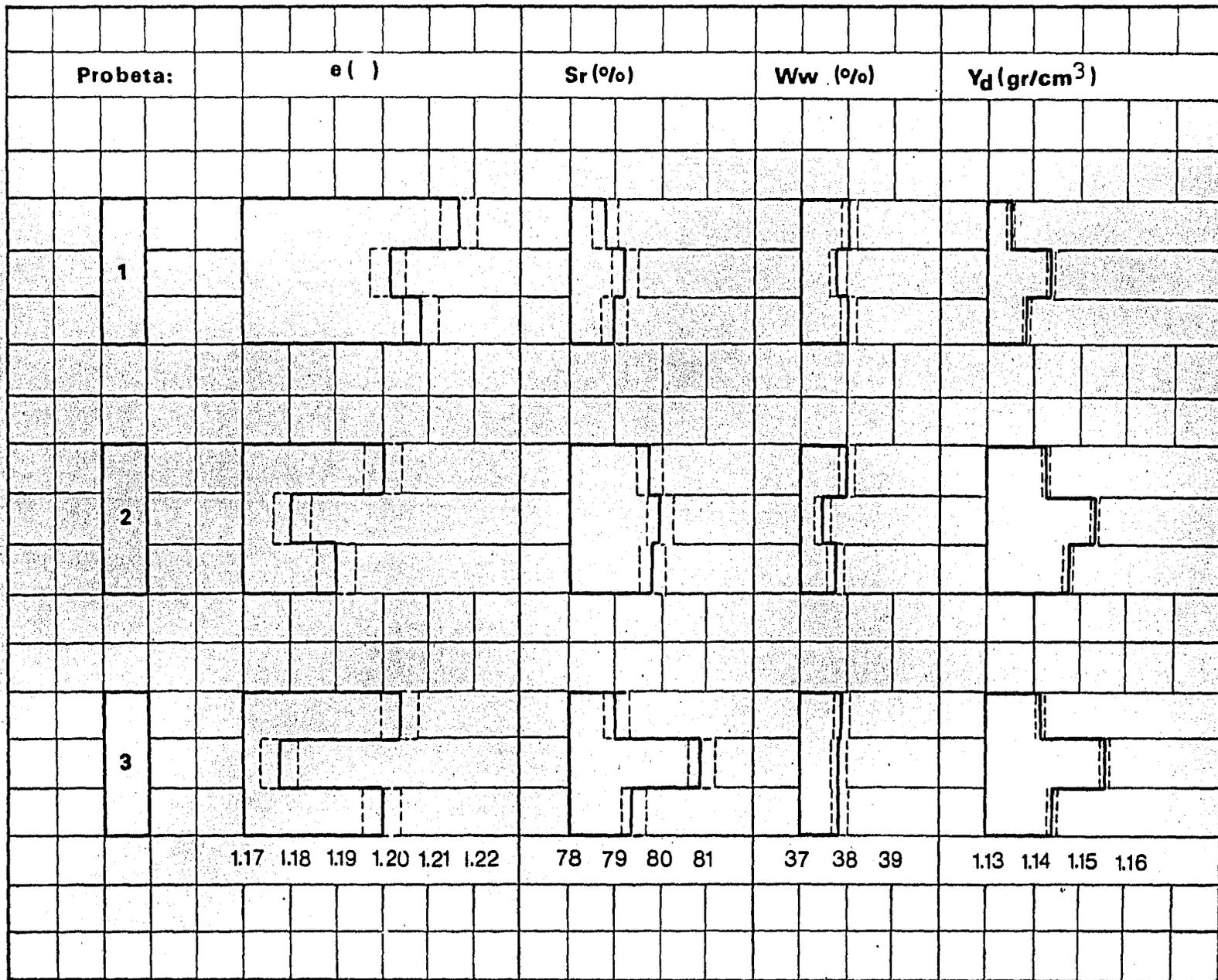


FIG. 5 Variación de la relación de vacíos ( $e$ ), grado de saturación ( $S_r$ ), contenido de agua ( $W_w$ ) y peso volumétrico seco ( $\gamma_d$ ) en tres secciones de tres probetas compactadas por amasado (10-9-30). La línea punteada indica la dispersión calculada considerando las pequeñas variables que se presentan durante el proceso

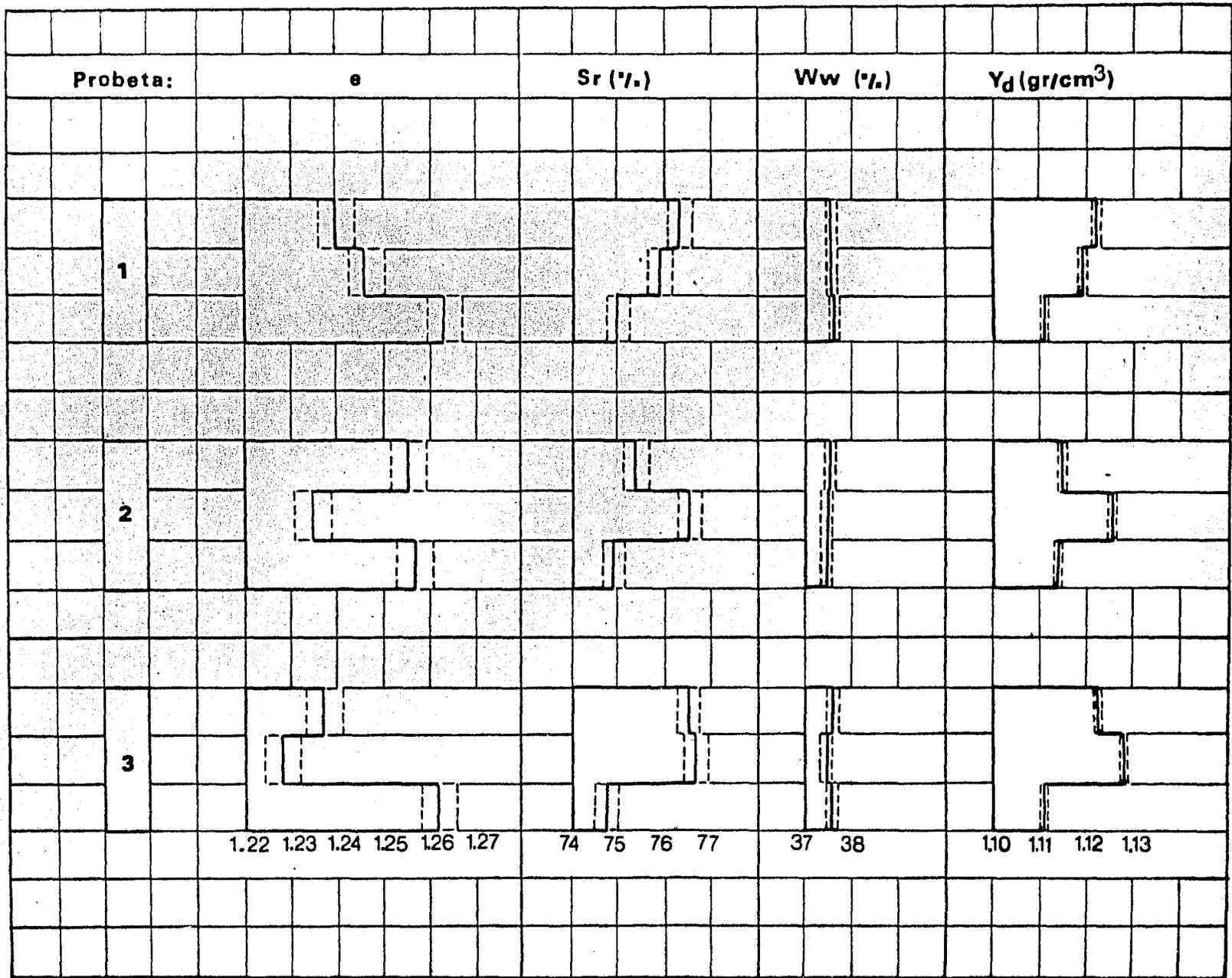


FIG. 5.A Variación de la relación de vacíos ( $e$ ), grado de saturación ( $S_r$ ), contenido de agua ( $W_w$ ) y peso volumétrico seco ( $\gamma_d$ ) en tres secciones de tres probetas compactadas por amasado (10-9-30). La línea punteada indica la dispersión calculada considerando las pequeñas variables que se presentan durante el proceso

por lo que con base en cálculos, se determinó que la precisión obtenida con esta báscula y la evaporación del agua contenida en el recipiente utilizado para obtener el volumen de la muestra, influyen significativamente en dichas variaciones; por lo tanto, se decidió utilizar una báscula con capacidad de 160 gr y con una precisión nominal de + 1 mg, con la cual se obtuvieron los resultados indicados.

Las variaciones mostradas en las figs, se deben principalmente a las siguientes variables fuera de nuestro control:

- Evaporación del agua contenida en el material durante el proceso de prueba
- Evaporación del agua contenida en el recipiente utilizado para obtener el volumen de la porción de muestra por el método de inmersión
- Diferentes contenidos de agua a lo largo de la probeta
- Variaciones de precisión en la obtención del volumen

Tratando de cuantificar la influencia de estas variables en las relaciones estudiadas, se realizó una estimación, y en las figuras mencionadas, se pueden observar las desviaciones del promedio calculadas, representadas éstas por las líneas punteadas.

### II.5 *Observación de la estructura conforme al aumento del contenido de agua de compactación*

Se realizó un estudio variando el  $w_{uc}$  y utilizando el método de compactación por amasado con una energía equivalente a la próctor estándar (10 kilos, 10 capas y 30 pisonadas por capa); ésto -

con el propósito de observar el arreglo de las partículas y los tres estados en que se encuentra un material cohesivo compactado (ocluido, abierto y seco) definidos por Marsal, ref 8, tal como se menciona a continuación:

Estado ocluido: Se caracteriza por tener el gas englobado por la fase líquida, en forma de burbujas a presión generalmente menor a la atmosférica, y además un grado de saturación ( $S_h$ ) próximo a 100 por ciento y contenido de agua mayor que el óptimo, en que el fenómeno osmótico es relevante.

Estado abierto: Corresponde al suelo con sus conductos ocupados por gas expuesto a la presión exterior (i.e.: atmosférica) y el agua intersticial ejerciendo esfuerzos capilares sobre el esqueleto sólido a través de la película contráctil y presión osmótica significativa; los valores de  $S_h$  suelen estar comprendidos en el intervalo: 30 a 80 por ciento.

Estado seco: Está sometido a esfuerzos de tal magnitud que ponen en juego la repulsión Born y la atracción electromagnética, pudiendo ocurrir también la precipitación de sales disueltas en el agua intersticial; los grados de saturación son menores de 30 por ciento.

Transición entre estados.- En general, el paso de un estado a otro no está bien definido; puede establecerse que la frontera entre los estados ocluido y abierto de un suelo compactado es el umbral de entrada de aire. Pero este no es una característica del suelo, pues depende del esqueleto sólido conformado al compactar y del

proceso a que se le ha sometido para alcanzar dicho umbral. En términos del contenido de agua corresponde aproximadamente a la humedad óptima, parámetro vinculado a la energía de compactación y al procedimiento usado (estático, impactos, amasado). Estos, por otra parte, influyen apreciablemente en el arreglo de las partículas. En consecuencia, la divisoria de los estados ocluido y abierto puede variar entre límites relativamente amplios; parece estar ligada al límite de contracción (LC) del suelo, tema que convendría investigar cuidadosamente por sus implicaciones obvias; además, en tal frontera la permeabilidad al aire es nula.

La divisoria entre los estados abierto y seco es imprecisa, pues debe situarse en función del contenido de agua ( $w_w$ ), a partir del cual se inicia la precipitación de sales o la creación de ligas de naturaleza química (no reversibles). De acuerdo con los conceptos en la ref 7, tales fenómenos están relacionados íntimamente con la composición iónica del agua intersticial, pero también influyen el arreglo geométrico de las partículas y el camino recorrido, después de compactar el suelo, para llegar al estado seco.

Es necesario investigar las fronteras que separan a los estados ocluido, abierto y seco, y sus relaciones con el contenido de agua óptimo y el límite de contracción de la matriz arcillosa, ambos vinculados al esqueleto sólido del suelo.

Del estudio realizado con microscopio electrónico sobre la microestructura del caolín, preparado con diferentes contenidos de agua de compactación, se pueden derivar algunas observaciones:

Existe una diferencia significativa entre la microestructura de los materiales compactados con una misma energía en la rama seca y la rama húmeda. En la fig 6A, que se preparó con un  $w_{wc}=31.0\%$  (1.07% arriba del óptimo) y con aumento de 50 veces, se observa la presencia de cavidades aisladas, a diferencia de la fig 6B, mostrada al mismo aumento y preparada con un  $w_{wc}=15.0\%$ , donde no existen dichas cavidades.

Con un aumento de 5000 veces, en donde son visibles los elementos microestructurales, se diferencian al exhibir una mayor relación de vacíos para un  $w_{wc}=15.0\%$  (fig 6D), mientras que en la fig 6C, se muestra una microestructura menos abierta para un  $w_{wc}=31.0\%$ .

Las figuras mencionadas apoyan parcialmente las observaciones de Lambe (1959), donde diferencia la estructura, señalando una floculenta para la rama seca y una dispersa para la rama húmeda.

La fig 6E muestra un acercamiento a 300 aumentos de una de las cavidades y la fig 6F muestra la estructura del material que forma la pared de dicha cavidad a 5000 aumentos; es interesante observar la diferencia entre esta estructura y la formada fuera de la cavidad con el mismo aumento (fig 6C). Nótese la diferencia entre la estructura dentro de la cavidad y la de afuera de ella.

En la pared de la cavidad, los cristales arcillosos se encuentran alineados, formando una capa de baja permeabilidad al aire, que, al ser atrapado probablemente resulta el efecto de "colchoneo o rebote" que se observa al compactar y enraizar una muestra con un

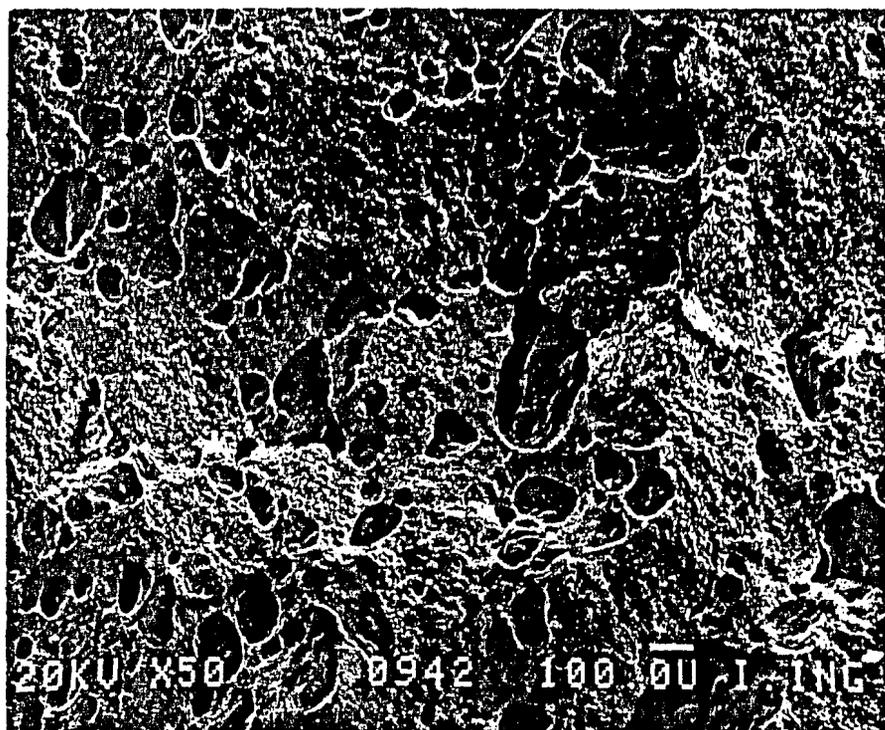


Fig 6A Micrografía de caolín preparado con un  $w_{wc} = 31.0\%$  (aproximadamente 1.0% arriba del óptimo). Se observa claramente la presencia de cavidades con forma y distribución aleatoria, formadas por aire atrapado en el estado ocluido.



Fig 6B Micrografía de caolín preparado en la rama seca ( $w_{wc} = 15.0\%$ ). No presenta cavidades como la fig 6A.



Fig 6C Micrografía de caolín mostrando cristales arcillosos en una formación relativamente compacta. Material preparado ligeramente arriba del óptimo ( $w_{wc} = 31.0\%$ ).

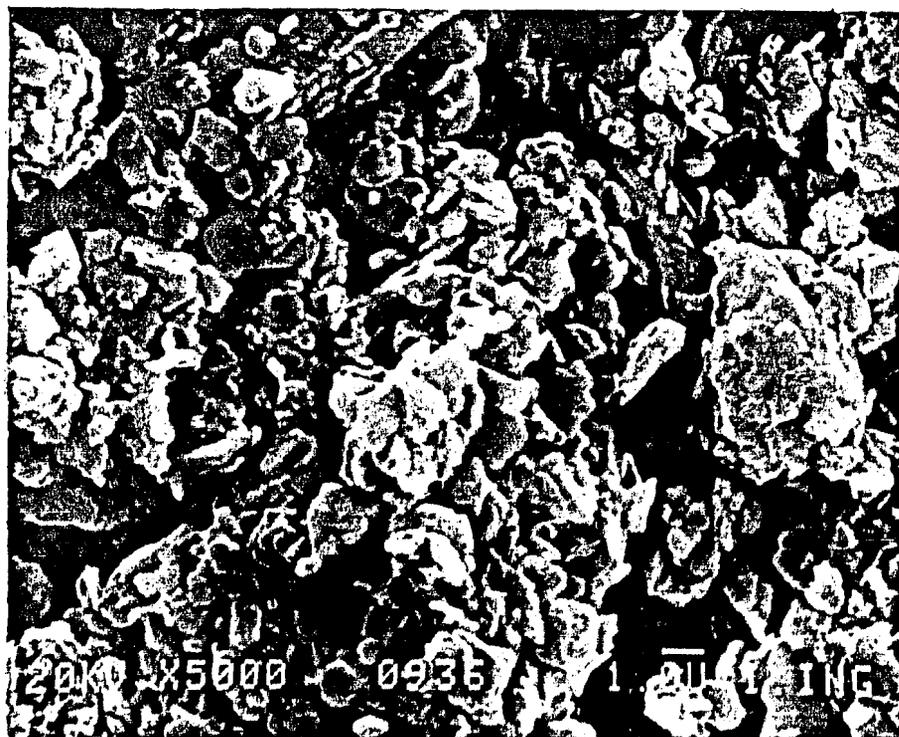


Fig 6D Micrografía de caolín mostrando agregados de partículas, en promedio mayores que los de la fig 6C y con mayor cantidad de poros interparticulares ( $w_{wc} = 15.0\%$ ).

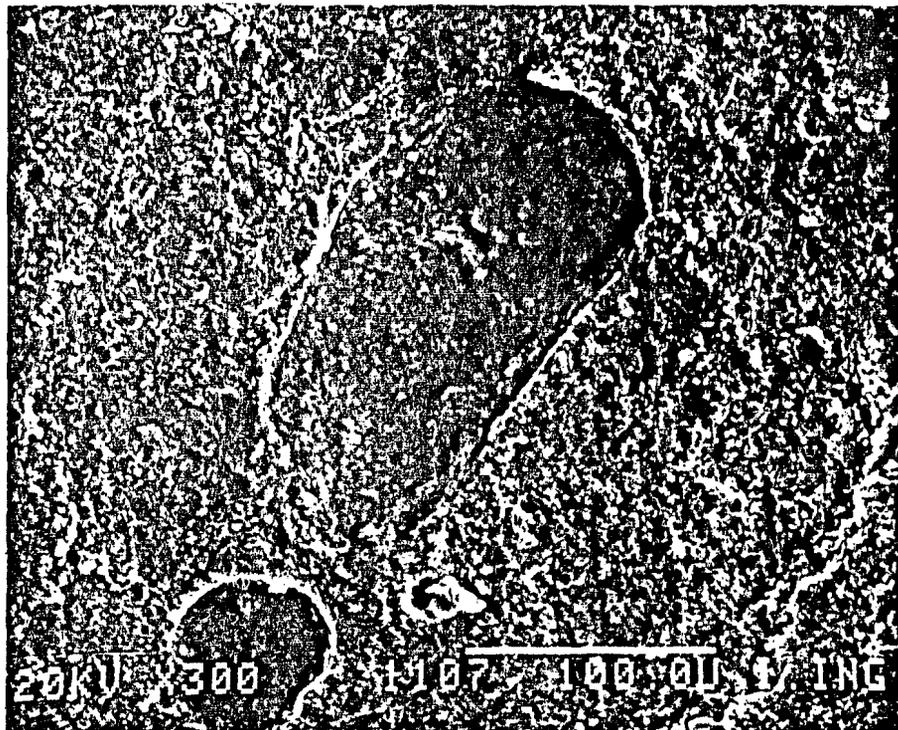


Fig 6E Acercamiento de una cavidad de la fig 6A, mostrando el tamaño promedio de 0.1 á 0.2 de mm.

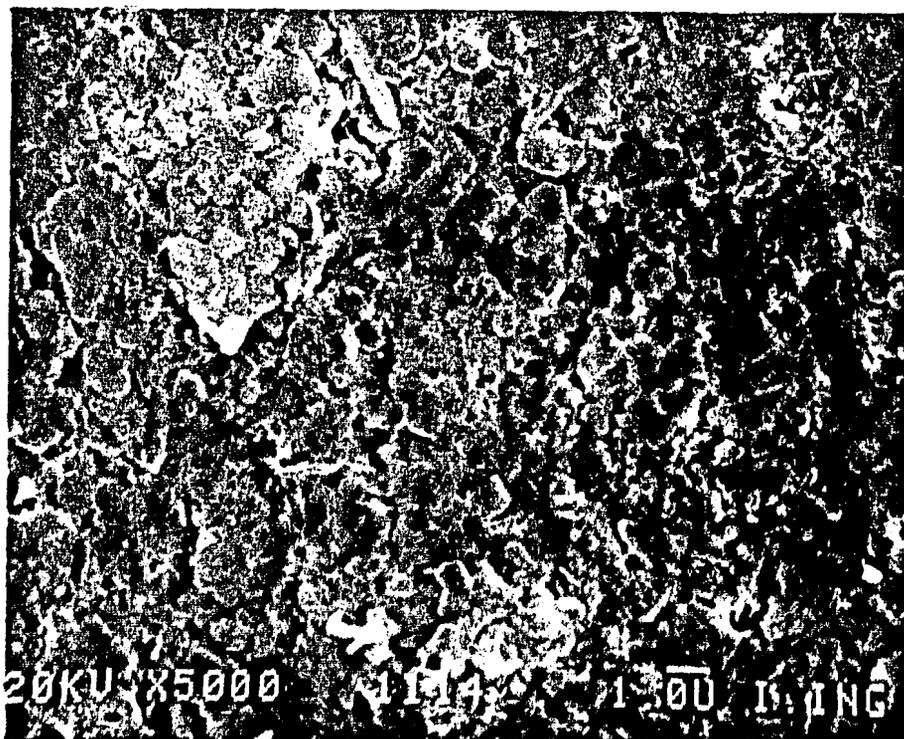


Fig 6F Detalle de la pared interna de una cavidad, mostrando alineamiento de las partículas de la pared, lo que provoca una capa de muy baja permeabilidad.

$w_{wc}$  superior al óptimo. Estos efectos, requieren de un estudio más amplio; sin embargo, su presencia es mencionada en esta tesis, por sugerir de manera directa, una explicación a este fenómeno.

### CAPITULO III. PRUEBAS DE COMPRESION SIMPLE PARA EVALUAR LA RESISTENCIA EN DIFERENTES PROBETAS

#### III.1 *Introducción*

Para la revisión de las características resistencia-deformación de los especímenes compactados, se seleccionó, por su sencillez, la prueba de compresión no confinada.

En la fabricación de los especímenes con agua destilada y polímero con peso molecular de 400, debe calcularse el material necesario para cada una de las 10 capas que forman una probeta, para obtener un promedio de la saliente que varíe aproximadamente de 0.3 a 0.4 cm y así, poder asegurar que se aplicó la misma energía de compactación (el peso por capa varía de acuerdo con el porcentaje y tipo de fluido).

### III.2 Tixotropía del caolín

Se ha dicho que entre las partículas arcillosas se ejercen fuerzas debidas a las ligaduras fisicoquímicas que se manifiestan en sus respectivas películas envolventes de agua y cationes adsorbidos. Un amasado enérgico de la arcilla puede romper esas ligaduras momentáneamente, lo cual se refleja macrofísicamente por una pérdida sensible de las propiedades de resistencia del material. Sin embargo, la mayoría de las arcillas vuelven más o menos lentamente a sus propiedades originales; este fenómeno fué llamado tixotropía por Peterfi. El fenómeno es consecuencia del restablecimiento de las partículas adsorbidas en su primitiva condición, ref 9.

Por otra parte, Mitchell, ref 10, considera que después de la compactación las fuerzas interparticulares no están en equilibrio, lo que favorece cambios en la estructura con el tiempo, y define el coeficiente tixotrópico como el cociente de resistencias de una probeta a compresión simple, en un determinado tiempo (horas, días, meses, etc, sin variar su contenido de agua original) entre la resistencia de una probeta recién elaborada. En la fig 7A, se observan los valores que presenta Mitchell del coeficiente tixotrópico vs. tiempo en días. Esta figura nos muestra la importancia que tienen los fenómenos fisicoquímicos en las propiedades de suelos cohesivos compactados, lo que se manifiesta en la variación del coeficiente tixotrópico en función del tiempo de espera (lapso transcurrido desde su compactación, hasta la realización del ensayo).

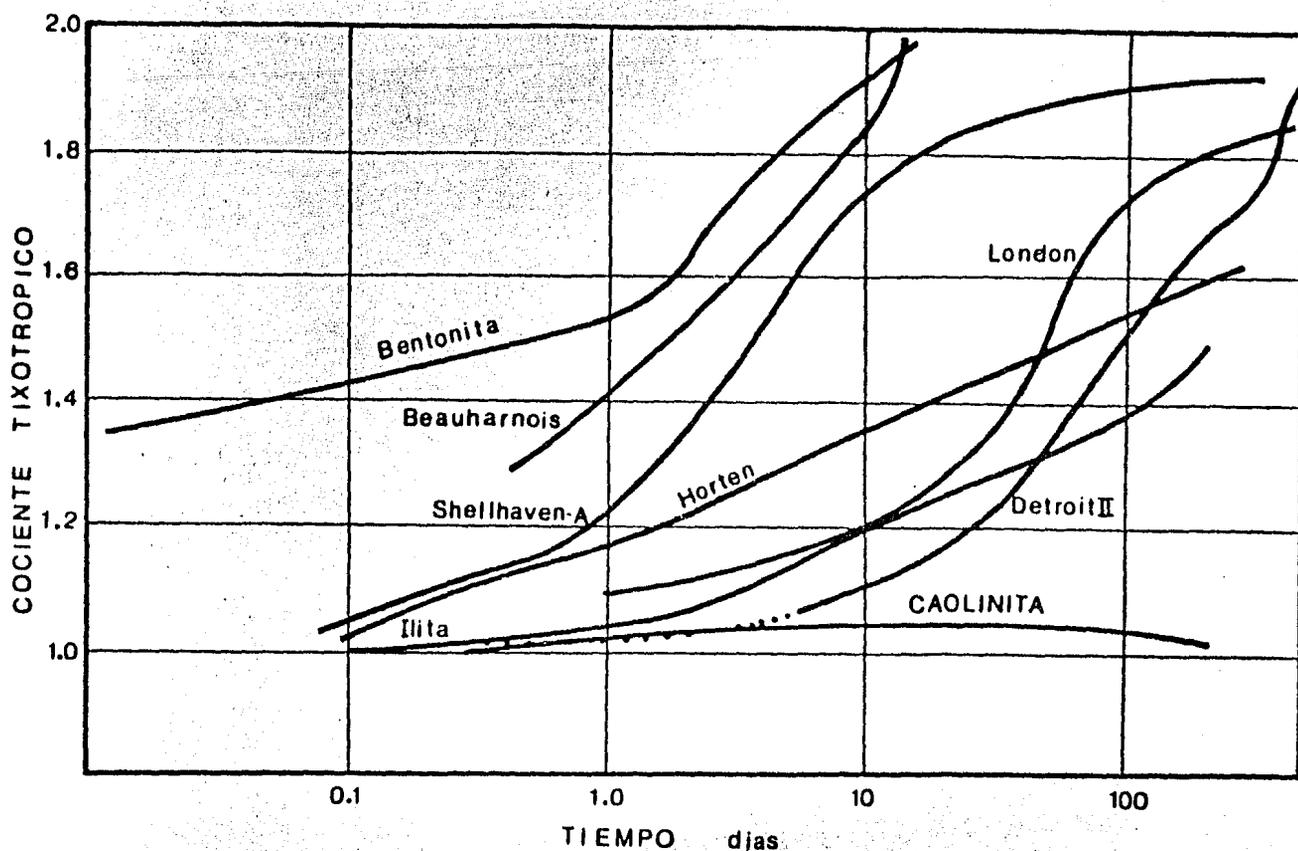


FIG. 7.A Tixotropía de varias arcillas en comparación con la caolinita (J.K. Mitchell)

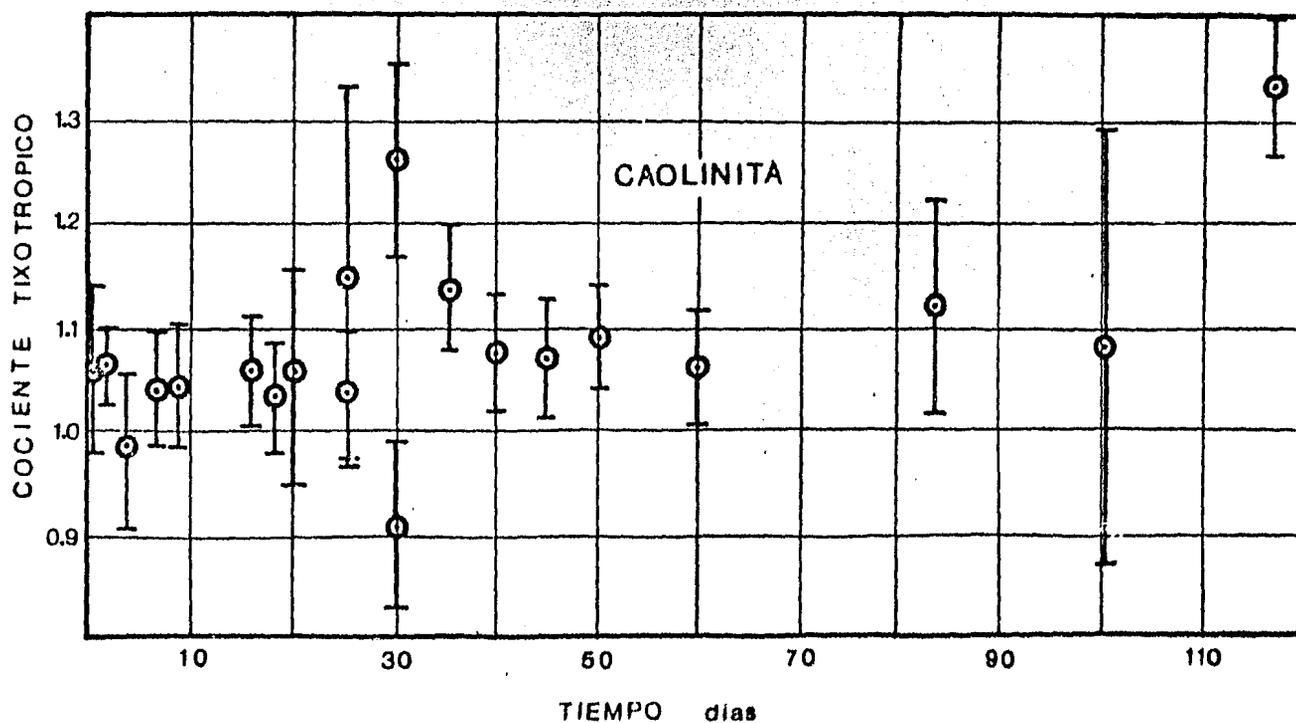


FIG. 7 Tixotropía de la caolinita utilizada

Como se mencionó anteriormente, para este trabajo se escogió una arcilla del subgrupo de la caolinita por sus características físicoquímicas de baja actividad, para tratar de minimizar la influencia de fenómenos tales como: composición mineralógica, iones de intercambio, etc, en el comportamiento mecánico. Sin embargo, se realizaron pruebas para cuantificar la participación del efecto tixotrópico en la respuesta mecánica de este material. En la fig 7, se muestran los resultados obtenidos, y como era de esperarse, el caolín *no* presenta efectos tixotrópicos importantes cuando se le compara con otros suelos arcillosos.

### III.3 Ensayes de compresión simple

Desde el momento en que se decidió utilizar, por un lado agua destilada, y por otro polímero, para fabricar los especímenes, se espaban diferencias apreciables en el comportamiento mecánico del suelo, porque como se mencionó anteriormente, algunos de los factores que lo determinan fueron alterados. Sin embargo, lo que se desea es cuantificar la magnitud de tales diferencias y obtener, con base en éstas, las curvas esfuerzo-deformación más similares para los dos fluidos intersticiales utilizados; es por esto que las curvas de resistencia a compresión simple vs. contenido de agua de compactación ( $q_u - w_{wc}$ ), y las curvas de resistencia a compresión simple vs. contenido de polímero de compactación ( $q_u - w_{pc}$ ), se determinaron con un número apreciable de puntos, para así tener mayor probabilidad de encontrar un  $w_{wc}$  y un  $w_{pc}$  que produzcan las curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  con mayor equivalencia, para su uso posterior en los experimentos de micromecánica.

### III.3.1 Equipo experimental

Las pruebas de compresión simple se llevan a cabo en un marco de carga diseñado especialmente para esta investigación; en la fig 8 se muestra un esquema detallado. Este marco de carga controla la velocidad de carga aplicada al espécimen y, además, está instrumentado en tal forma que puede observarse en un osciloscopio la señal de carga y su respectiva deformación en cualquier momento de la prueba, obteniéndose así, precisiones en la carga del orden de  $\pm 20$  gr, y en el desplazamiento, de  $\pm 2.0$  micras; la frecuencia de muestreo utilizada es de 100 ms. En la fig 9 se muestran las señales de carga y desplazamiento obtenidas al fallar un espécimen de caolín-polímero con sus respectivos valores en mV. Para convertir estos valores en kg y micras, se realizaron varias pruebas con los transductores de carga y desplazamiento, con la finalidad de obtener las constantes de conversión respectivas, obteniéndose así, para el transductor de desplazamiento  $1 \text{ mV} = 1.9231$  micras, y para el transductor de carga,  $1 \text{ mV} = 0.1974$  kg. Por su parte, el osciloscopio está conectado a un graficador, por medio del cual las curvas son graficadas en papel para su posterior uso en la obtención de las curvas  $\sigma$ - $\epsilon$ .

El sistema utilizado en los ensayos de compresión simple se muestra en la fig 10, por medio de un diagrama de bloques; dicho sistema ofrece varias ventajas, tales como:

- a) Una precisión en la carga de  $\pm 20$  gr, en el desplazamiento de  $\pm 2.0$  micras, y además, una relación exacta entre ellas, ya que

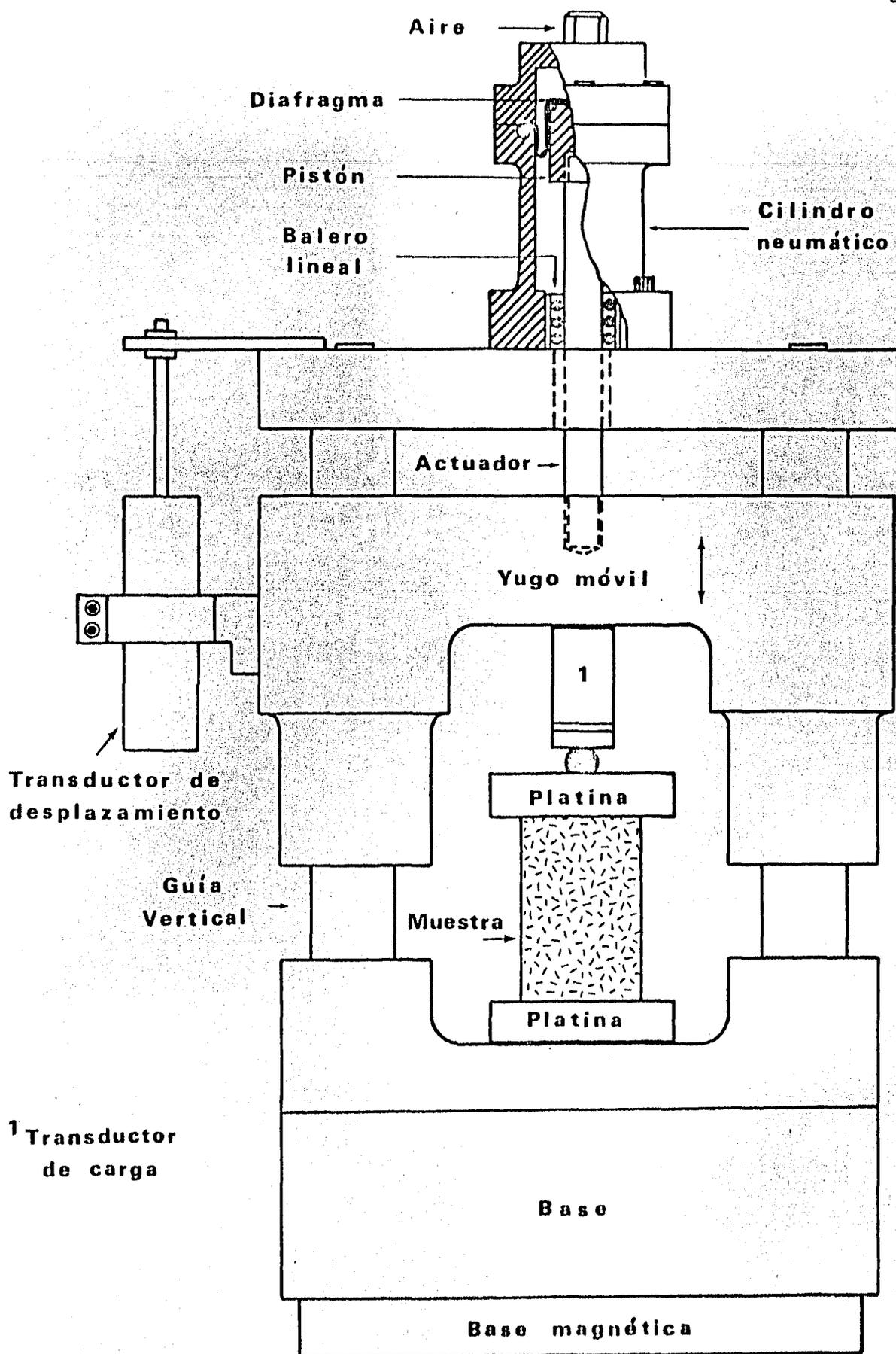


FIG. 8 Esquema del marco de carga utilizado

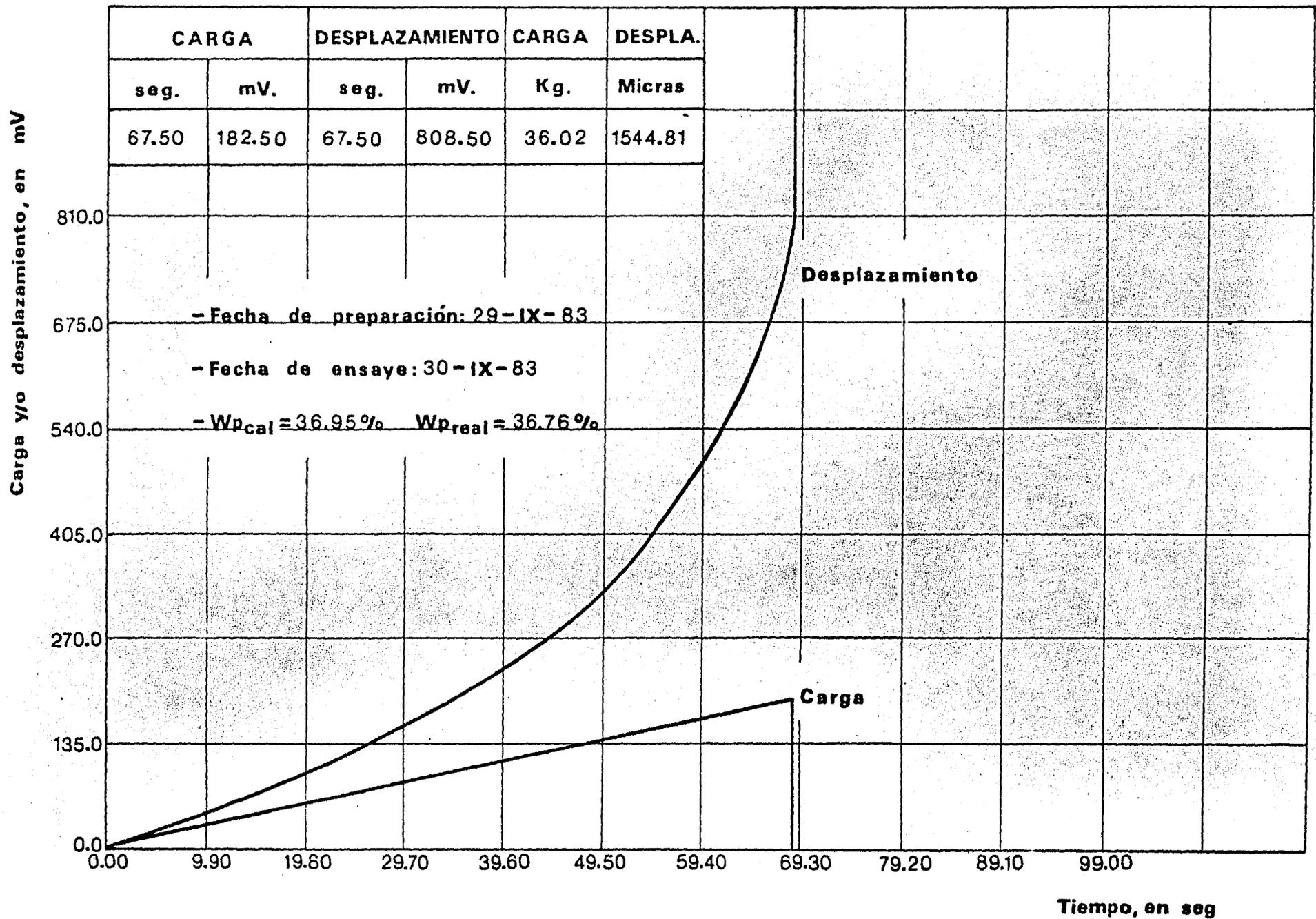


FIG. 9 Curvas de carga y desplazamiento vs. tiempo, obtenidas con el osciloscopio durante el ensaye de una probeta de caolín-polímero (velocidad de carga = 0.53 kg/seg)

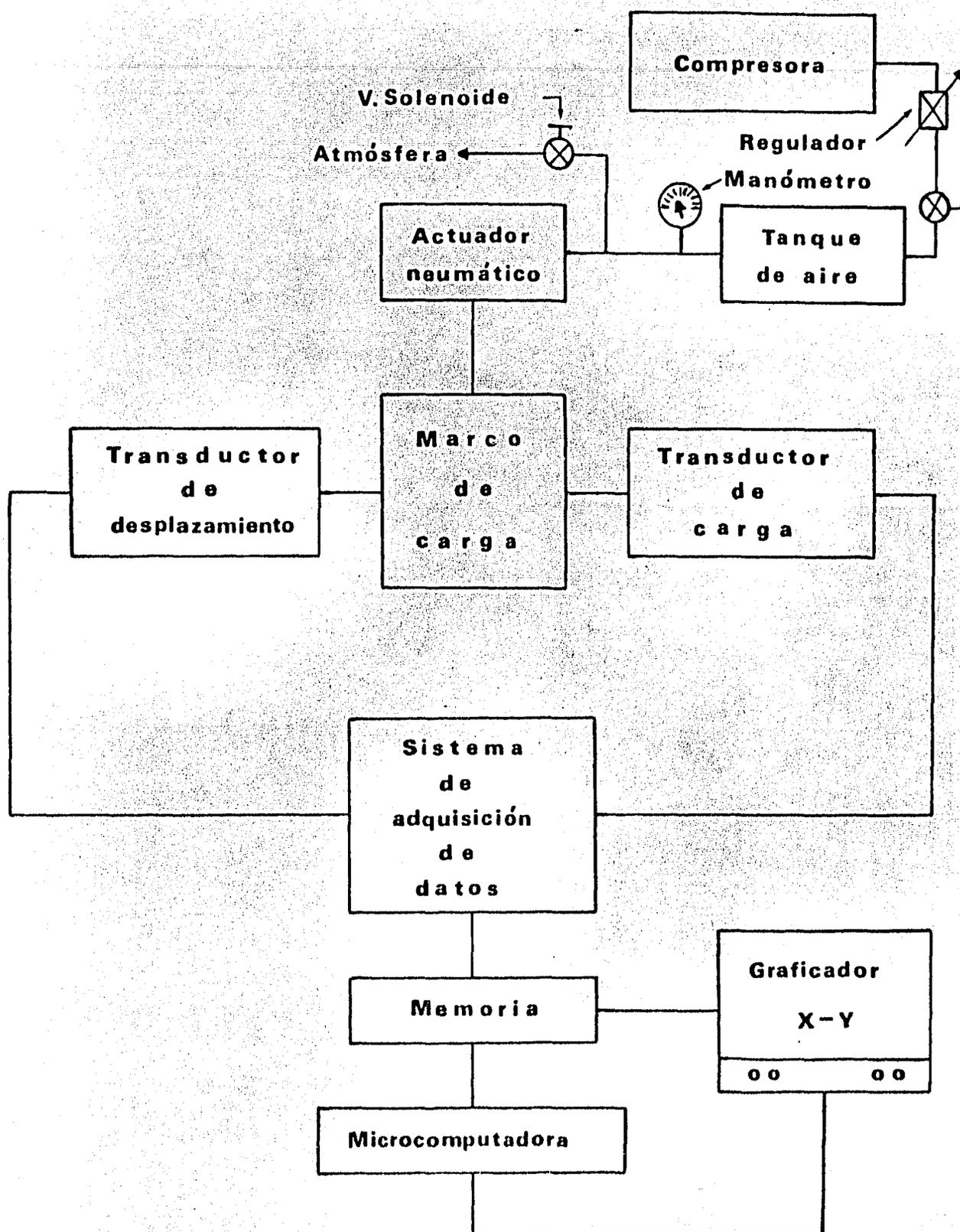


FIG. 10 Diagrama de bloques utilizado en el ensaye de probetas a compresión simple

se utilizan frecuencias de muestreo muy pequeñas en el osciloscopio.

- b) Variar la velocidad de aplicación de la carga en un intervalo considerable (en este trabajo se utilizó una velocidad de carga constante).
- c) Cargar y descargar la probeta en cualquier momento.
- d) Aplicar cualquier carga dentro de la capacidad del sistema (aproximadamente 100 kg) y mantenerla constante.
- e) Facilidad para la obtención de interferogramas.
- f) Almacenamiento de las curvas en la memoria del osciloscopio.
- g) Graficación de las curvas en papel.
- h) Comparar las lecturas del micrómetro con las obtenidas en el osciloscopio.

### III.3.2 Curvas $\gamma_D - W_{wc}$ y $q_u - W_{wc}$

Para la fabricación de especímenes utilizando como fluido intersticial el agua, se tiene una considerable precaución en la conservación del contenido de agua a lo largo del proceso, por lo cual, se utiliza una franela húmeda para proteger al material, y además, se procura minimizar el tiempo que están en contacto con el ambiente.

Con el objeto de observar la variación de la resistencia, deformación y peso volumétrico seco en especímenes de caolín-agua bajo

condiciones similares, se decidió obtener cada punto en las gráficas de peso volumétrico seco ( $\gamma_d$ ) vs. contenido de agua de compactación ( $w_{wc}$ ), y resistencia a compresión simple ( $q_u$ ) vs. contenido de agua de compactación ( $w_{wc}$ ), basándose en el promedio de tres especímenes. De la fig 11, puede decirse que la curva  $\gamma_d - w_{wc}$  no tiene variaciones de peso considerables (menores del 1.0%), ya que se tiene cuidado en la conservación del  $w_{wc}$  y además por la uniformidad con que aplica la carga el compactador neumático utilizado. Mientras su correspondiente curva  $q_u - w_{wc}$ , por un lado, presenta variaciones aleatorias, que dan una idea de la dispersión en la respuesta mecánica de los especímenes ensayados en condiciones idénticas, por otro lado, se observa en la curva una caída de la resistencia para un  $w_{wc}$  un poco mayor que el contenido de agua óptimo ( $w_{w\acute{o}pt}$ ). La caída de resistencia es probablemente debida al tipo de material utilizado, ya que para los dos fluidos intersticiales se presentó un tipo de falla frágil antes de dicha caída, y después de la caída el tipo de falla fue progresivamente dúctil, hasta llegar al abarrilamiento de la probeta con grietas y deformaciones considerables; en ese momento se consideró que la probeta falla (en las probetas con falla frágil, el tipo de falla fue similar en todas ellas).

Del estudio realizado para observar la estructura de los especímenes variando el  $w_{wc}$ , se encontró el estado ocluido para un  $w_{wc}$  ligeramente superior al óptimo; de lo anterior, se puede concluir que el tipo de falla está íntimamente relacionado con la estructura presentada por el espécimen, y por lo tanto, con el estado abierto y ocluido.

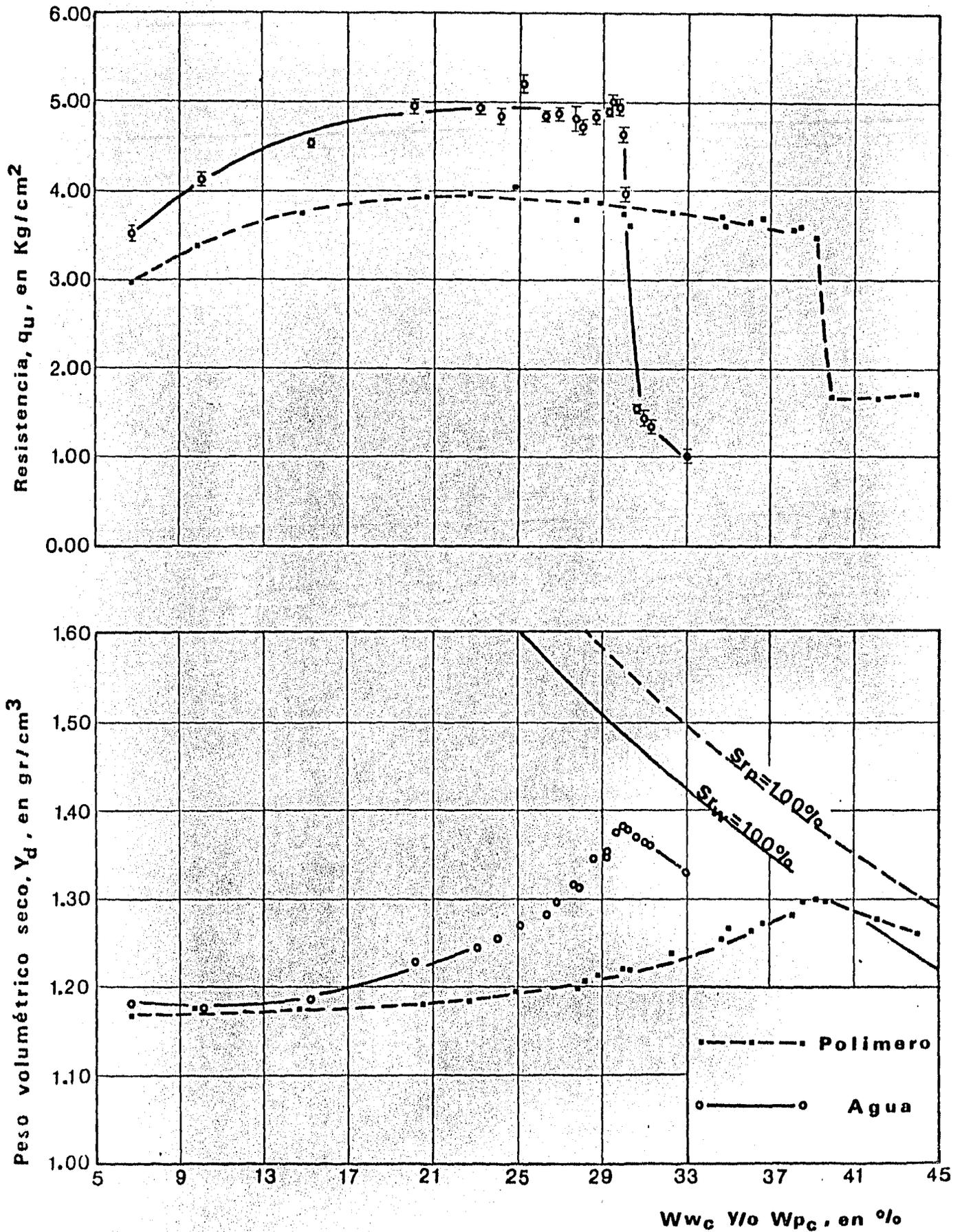


FIG. 11 Resistencia a compresión simple y peso volumétrico seco vs. contenido de agua de compactación ( $w_{wc}$ ) y/o contenido de polímero de compactación ( $w_{pc}$ )

Es conveniente mencionar que al término de fabricar cada espécimen, es pesado y colocado en un recipiente de plástico, al cual se le coloca un sello apropiado con el objeto de mantener constante el contenido de agua mientras son fabricados los 3 especímenes, que son fallados inmediatamente, y en el orden en que se fabrican, por lo cual, el tiempo de reposo (lapso que transcurre desde el momento en que se termina de fabricar la probeta y el momento en que se falla) es aproximadamente de 30 min. Por lo tanto, basándonos en el estudio realizado sobre el efecto tixotrópico de este suelo y en las despreciables pérdidas de su contenido de agua al estar almacenados, se puede decir que este tiempo de reposo tiene una influencia despreciable, ref 11.

### 111.3.3 Curvas $\gamma_{\partial} - W_{pc}$ y $q_u - W_{pc}$

En la fabricación de especímenes utilizando como fluido intersticial el polímero, se tiene considerable cuidado en procurar que el polímero absorba la menor cantidad de agua posible durante el proceso; para ello, se cubre el material con una franela seca, y se reduce al mínimo el tiempo que está en contacto con el ambiente. En el caso de los especímenes fabricados con caolín-polímero, las curvas  $\gamma_{\partial} - W_{pc}$  y  $q_u - W_{pc}$  se obtuvieron únicamente con un espécimen, debido principalmente al método elegido de preparación del material. Este consiste esencialmente en agregar, con un aspersor, el polímero al caolín colocado en un recipiente de aluminio y uniformizarlo con una espátula, lo cual puede llevarse un tiempo considerable para 3 especímenes y, además, porque basándonos en los resultados

obtenidos en los especímenes de caolín-agua y en los resultados que se obtengan con el polímero, se puede observar la dispersión que pueden presentar. Los resultados obtenidos se presentan, al igual que los del agua, en la fig 11.

Como se mencionó anteriormente, se esperaban diferencias apreciables en el comportamiento mecánico del suelo con polímero y con agua, debido principalmente a las características distintas de los fluidos utilizados que influyen en su comportamiento mecánico; también se mencionó que lo deseable era cuantificar la magnitud de las diferencias presentadas y obtener, con base en éstas, las curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  con mayor similitud, las cuales serán utilizadas posteriormente.

Aún cuando para el polímero la curva  $\gamma_D - W_{pc}$  fue calculada utilizando un espécimen únicamente para cada punto, se piensa que presenta las mismas variaciones de peso que las curvas con agua (menores del 1.0%), debido al compactador neumático utilizado y al cuidado que se tiene en procurar que el polímero absorba la menor cantidad de agua posible del ambiente. Para un mismo  $W_{pc}$  la absorción es la misma y el intervalo total se muestra en la fig 3 (sección 11.2.3). Por otra parte, la curva  $q_u - W_{pc}$  presenta la misma forma que la curva  $q_u - W_{wc}$ , y aunque los valores son diferentes, se piensa que la caída de la resistencia, se debe a lo mismo que para el agua, mencionado en el inciso anterior.

El tiempo de reposo de los especímenes elaborados utilizando polímero, es prácticamente despreciable, ya que una vez fabricado, únicamente se pesa e inmediatamente se falla.

## CAPITULO IV. COMPARACION DE CURVAS ESFUERZO-DEFORMACION EN PROBETAS CON AGUA Y CON POLIMERO

### IV.1 *Introducción*

Para observar el comportamiento mecánico de especímenes de caolín-agua y caolín-polímero ensayados a compresión simple, se obtuvieron sus respectivas curvas esfuerzo axial ( $\sigma$ ) vs. deformación unitaria ( $\epsilon$ ), las cuales nos permiten cumplir con el objetivo del presente trabajo.

### IV.2 *Curvas esfuerzo-deformación*

Para la obtención de las curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  se desarrolló un programa de computadora (ver el apéndice). Dicho programa requiere para su funcionamiento de las gráficas de carga y deformación vs. tiempo

obtenidas con el osciloscopio al fallar los especímenes a compresión simple y, además, de un equipo complementario descrito en el inciso IV.2.1.

Una vez obtenidas las curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  para agua y polímero, se procede a compararlas con el fin de elegir las dos curvas que presenten comportamiento mecánico equivalente, con el objeto de trabajar en los experimentos posteriores con el  $w_{wc}$  y el  $w_{pc}$  de las curvas seleccionadas.

Las curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  utilizando como fluido intersticial agua, tienen mayor resistencia que las de polímero, principalmente en la rama seca. Esto se debe en gran parte, a que la tensión desarrollada en el fluido intersticial del suelo compactado con humedad menor que la óptima, es parte importante del esfuerzo efectivo que actúa en la estructura formada por partículas sólidas, de la que a su vez depende la resistencia, ref 12. Aún cuando se sabe que influyen todos los factores mencionados en el inciso I.3, en este caso se considera que la tensión superficial y la viscosidad, son factores determinantes en el comportamiento mecánico (ver inciso II.2.1).

#### IV.2.1 Equipo experimental

A partir de las curvas provenientes del osciloscopio, en donde la abscisa corresponde al tiempo de la prueba y la ordenada puede -

corresponder tanto a valores de carga como de desplazamiento en mV, se pueden derivar las curvas  $\sigma$ - $\epsilon$ . Para obtener dichas curvas se hace uso de un programa desarrollado en el laboratorio, basado en el sistema microcomputarizado descrito esquemáticamente en la fig 12. A continuación se mencionan los pasos más relevantes para la obtención de las curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  a partir de los datos registrados durante el experimento. Este programa fue desarrollado para facilitar la generación de una gran cantidad de gráficas provenientes de dichas pruebas.

El programa de computadora consta esencialmente de dos partes: la primera se basa en una serie de opciones de atención al usuario, que ocurren en una secuencia lógica; la segunda, consta de las ecuaciones que traducen los valores de mV a datos de esfuerzo y deformación unitaria, según sea el caso.

El proceso de conversión de un tipo de curva a otro se realiza de la siguiente manera:

El programa de atención al usuario solicita la asignación de un nombre o código para cada gráfica a procesar; a continuación da instrucciones al usuario de colocar la gráfica frente a la cámara de T.V. y hacer coincidir los ejes cartesianos de ésta con unas líneas de referencia que aparecen en la pantalla; utilizando el equipo de cómputo se realiza una operación llamada digitación; este paso consta de la conversión de una señal estándar de T.V. (que se observa en la pantalla) a valores numéricos que asignan, para cada elemento de la imagen, un tono de gris entre 16 posibles

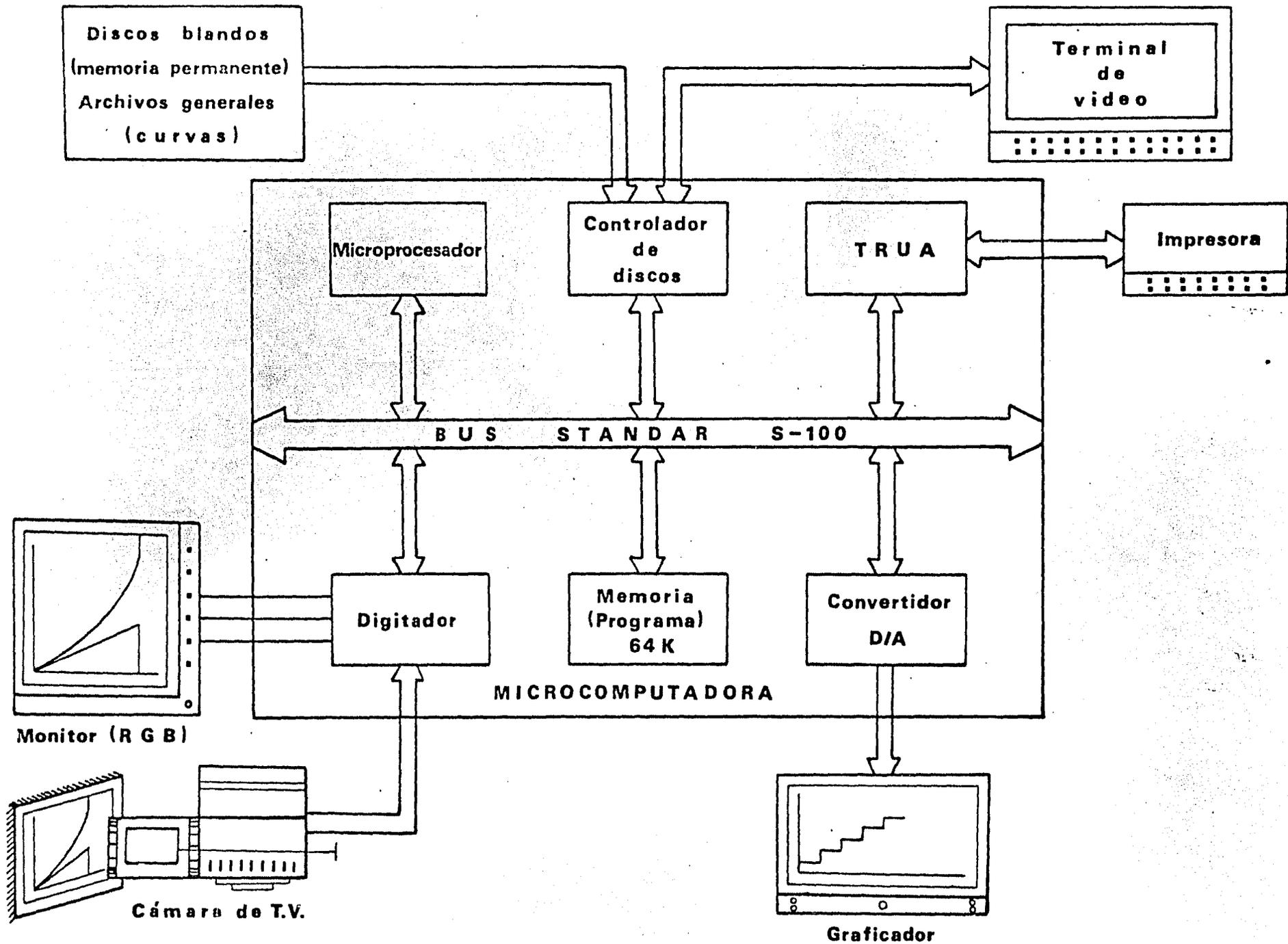


FIG. 12 Diagrama de bloques utilizado en la obtención de las curvas esfuerzo axial vs. deformación unitaria

valores. Con este proceso se puede manipular una imagen con equipo de cómputo digital, para extraer automáticamente una serie de datos con alta precisión. Subsecuentemente solicita del usuario la identificación de los valores en cada eje cartesiano; a partir de este registro el programa procede a dividir la abscisa en 10 intervalos iguales; previamente se debe colocar un cursor en el nivel máximo de desplazamiento, momento en el cual, se solicita el valor en mV de la ordenada para ese punto; el usuario coloca entonces el cursor sobre la línea de máxima carga y proporciona su respectivo valor en mV; automáticamente se recorre el cursor a la siguiente posición en la escala de tiempo y se repite esta operación hasta obtener 11 valores para cada curva. Posteriormente, el programa procede a un cálculo de los valores en micras y kilogramos, al que corresponden los mV respectivos; estos valores son guardados en un archivo para después obtenerlos mediante la impresora.

Finalmente, el programa gráfica las curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  directamente utilizables en la comparación del comportamiento mecánico para los especímenes de agua y polímero. Por medio de este proceso fue posible comparar rápidamente el resultado de un total aproximado de 90 experimentos, para seleccionar los especímenes preparados con agua y con polímero que presentaran la más cercana equivalencia de comportamiento mecánico  $\sigma$ - $\epsilon$  a compresión simple.

Conviene mencionar que únicamente se graficaron algunas curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  en la rama seca y solamente una en la rama húmeda, con la

finalidad de apreciar claramente el mayor número de las curvas graficadas, aunque se consideraron todas.

#### IV.2.2 Curvas de caolín-agua

Cada curva  $\sigma$ - $\epsilon$  utilizando como fluido intersticial el agua, representa el promedio de las curvas obtenidas en el osciloscopio al fallar tres especímenes a compresión simple.

En la fig 13, se puede observar que a medida que crece el  $w_{wc}$  aumenta la ductilidad del suelo, y que para un  $w_{wc} = 30.10\%$ , es decir, ligeramente mayor que el óptimo ( $w_{w\acute{o}pt} = 29.93\%$ ), pero antes de presentarse la caída de la resistencia observada en la curva  $q_u$ - $w_{wc}$ , la resistencia disminuye y la deformación aumenta apreciablemente. Las curvas obtenidas para mayores contenidos de agua que éste, no fueron gráficas por la razón mencionada anteriormente, pero se puede comentar que para una de ellas, con un  $w_{wc} = 31.0\%$  se obtuvo una deformación unitaria en la falla ( $\epsilon_f$ ) de 15% y un esfuerzo de 1.46 kg/cm<sup>2</sup>. De lo anterior puede inferirse que la resistencia, fragilidad y ductilidad del suelo está vinculada a las condiciones internas que prevalecen en los estados abierto y ocluido.

#### IV.2.3 Curvas de caolín-polímero

Para las curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  utilizando como fluido intersticial el polímero, se utilizaron las curvas obtenidas en el osciloscopio al fallar únicamente un espécimen a compresión simple, por las razones mencionadas en el inciso III.3.3.

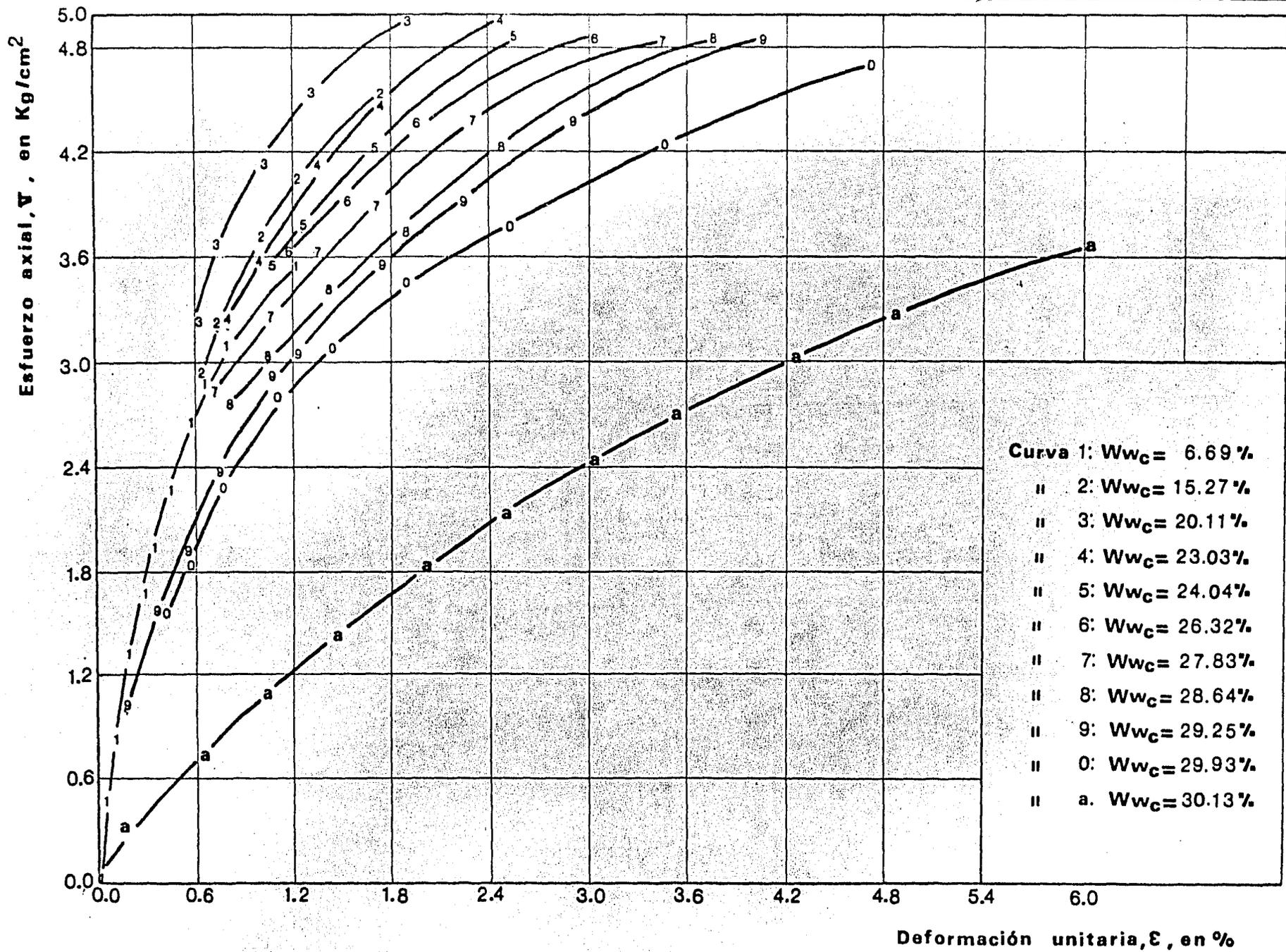


FIG. 13 Curvas esfuerzo axial vs. deformación unitaria, para especímenes de caolín-agua con diferentes contenidos de agua de compactación ( $w_{wc}$ )

En la fig 14, se puede observar que conforme crece el  $w_{pc}$ , aumenta la ductilidad del suelo, y que para un  $w_{pc} = 39.35\%$  ( $w_{p\acute{o}pt}$ ), la resistencia y la deformación no varían en forma apreciable comparándola con los resultados obtenidos para un  $w_{pc} = 42.0\%$ , cuya deformación unitaria en la falla ( $\epsilon_f$ ) es de 22.0% y el esfuerzo de 1.68 kg/cm<sup>2</sup>. También puede decirse que la  $\epsilon_f$  para un  $w_{pc} = 42.0\%$  es considerablemente mayor que para el  $w_{wc} = 31.0\%$ , pero debe tenerse en cuenta que este  $w_{pc}$  está más alejado del  $w_{p\acute{o}pt}$  que el mencionado para el agua, ya que el  $w_{w\acute{o}pt} = 29.93\%$ . En esta misma figura se observa que las curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  para un  $w_{pc} = 30.0\%$  difiere ligeramente de la curva con  $w_{pc} = 27.82\%$  y, sin embargo, para un  $w_{pc} = 32.33\%$  muestra una diferencia mayor; esto se explica al recordar que conforme aumenta el  $w_{pc}$ , la deformación crece progresivamente. Es decir, a pesar de que las diferencias hacia ambos lados de la curva son del mismo orden, el comportamiento muestra una variación considerable, según se exceden los valores hacia el lado húmedo de la curva de compactación. Esto nos indica la mayor probabilidad de controlar el comportamiento mecánico hacia el lado seco.

Lo anterior nos da un criterio para saber, con base en el  $w_{pc}$  obtenido, esperar dentro de este intervalo cierto comportamiento, dependiendo si nos encontramos hacia el lado seco o húmedo de la curva seleccionada.

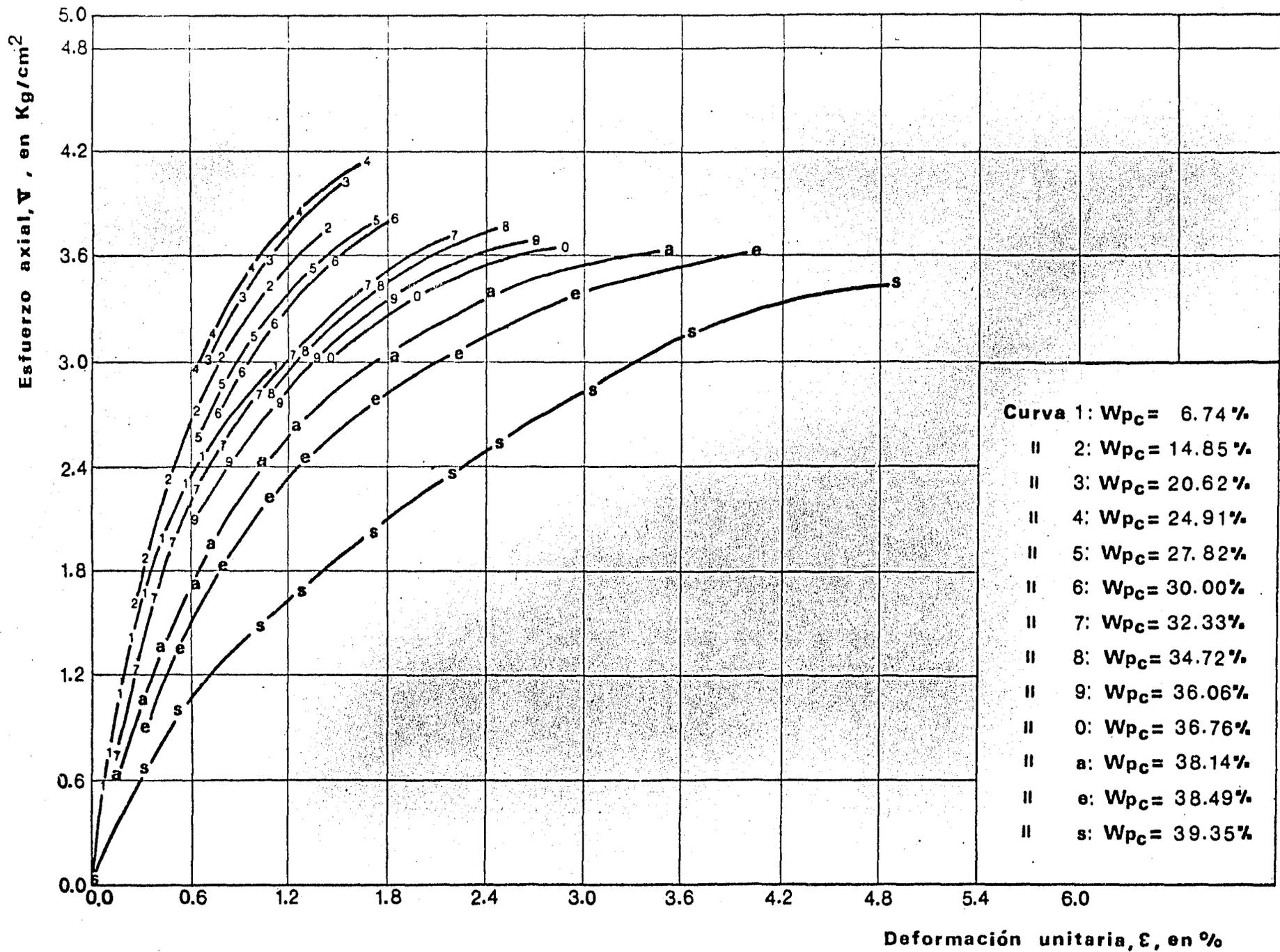


FIG. 14 Curvas esfuerzo axial vs. deformación unitaria, para especímenes de caolín-polímero con diferentes contenidos de polímero de compactación ( $w_{pc}$ )

#### IV.2.4 Especímenes de comportamiento equivalente

Con base en las pruebas descritas en las últimas secciones, así como en la comparación realizada del comportamiento mecánico, se seleccionaron los especímenes preparados con un  $w_{wc} = 28.64\%$  (curva #8) de la fig 13 y un  $w_{pc} = 30.0\%$  (curva #6) de la fig 14. Se elaboraron una serie de probetas con dichos contenidos para obtener las curvas de fluencia lenta. En la fig 15 se presentan las curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  correspondientes a los contenidos de fluido intersticial seleccionados. Es notoria la similitud entre el comportamiento de estos especímenes hasta valores de  $\epsilon = 1.8\%$ , por lo que las pruebas de fluencia lenta se limitan a valores menores que este último.

#### IV.3 Comportamiento de fluencia lenta

Para la obtención de las curvas de fluencia lenta (deformación unitaria-tiempo) de ambos especímenes se utilizó el equipo descrito en la sección III.3.1. La fluencia fue inducida con una carga constante equivalente al 80.0% de la carga de ruptura del espécimen de polímero seleccionado, y los resultados se encuentran graficados en la fig 16. En ésta se observan 6 curvas de fluencia para 3 especímenes con valores de contenido de fluido intersticial lo más cercano posible a los valores escogidos, es decir,  $w_{pc} = 30.25\%$  y un  $w_{wc} = 28.20\%$ . La dispersión que presentan los valores se considera aceptable al reconocer que los especímenes de estructura discreta, como es el caso de los suelos, tienden a comportarse dentro de envolventes determinadas, aún cuando se ob

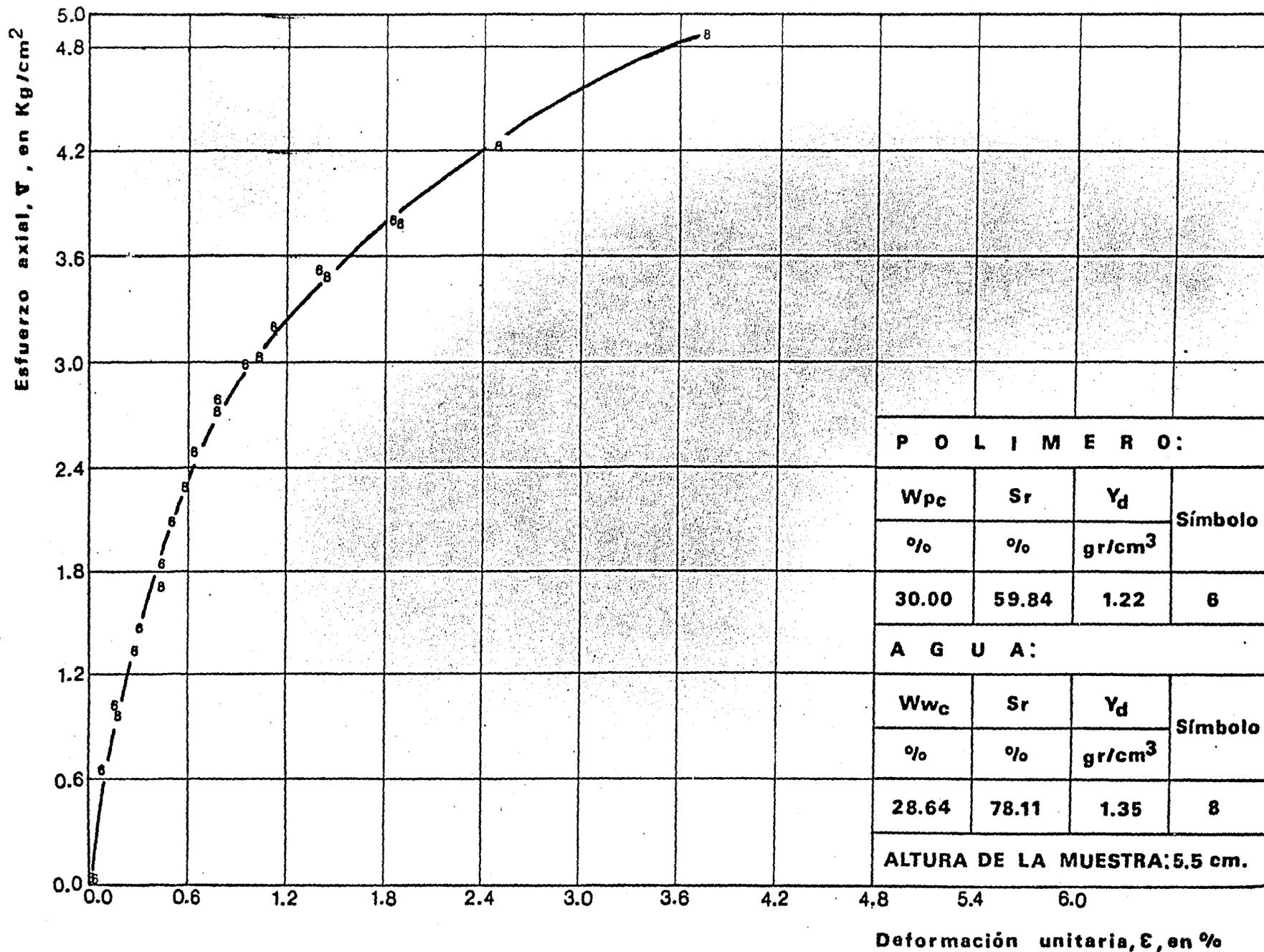


FIG. 15 Curvas esfuerzo axial vs. deformación unitaria, para especímenes de caolín-agua y caolín-polímero con comportamiento mecánico equivalente

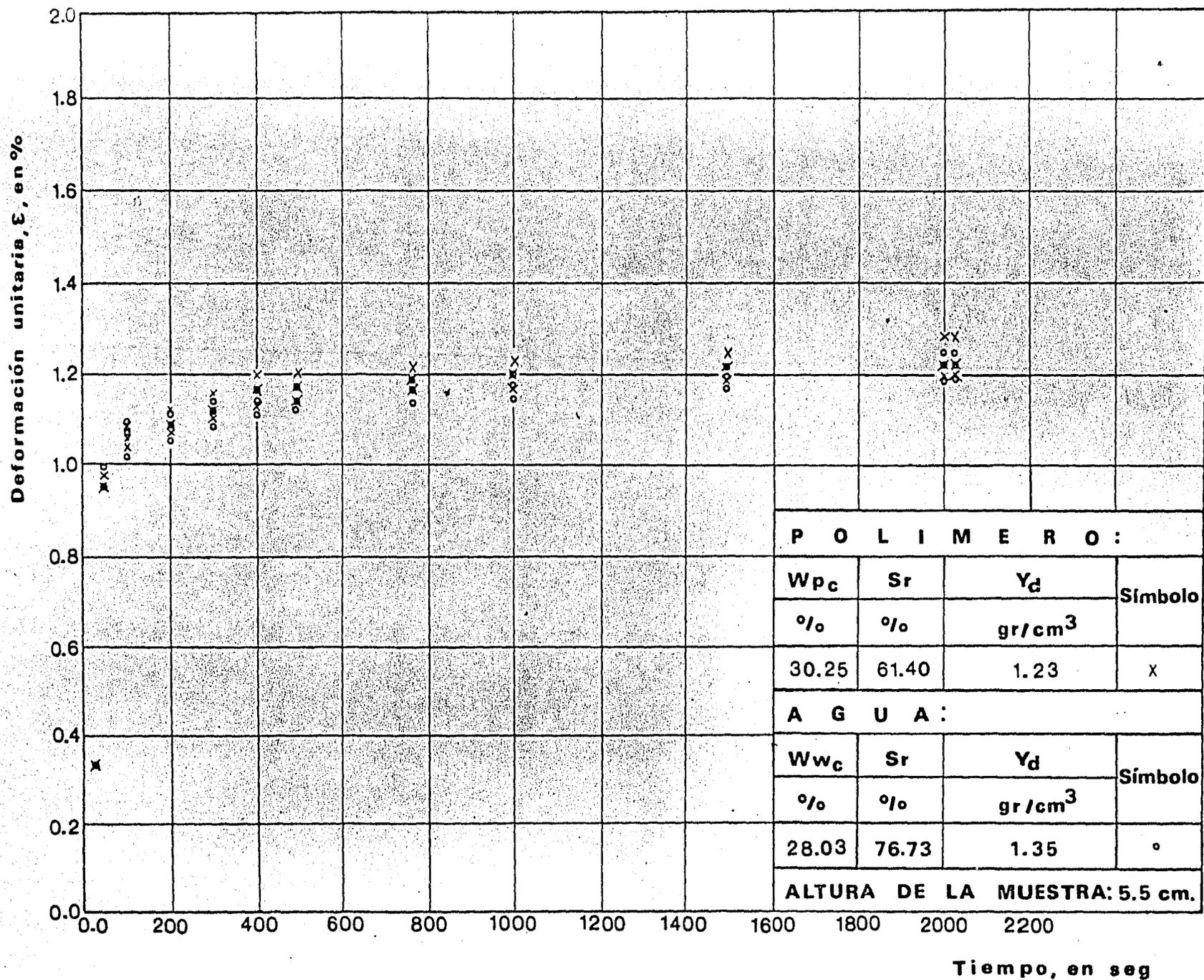


FIG. 16 Curvas de fluencia lenta de especímenes caolín-agua y caolín-polímero, con el 80.0% de la carga de ruptura de las probetas de caolín-polímero

serva que su comportamiento, sobre todo pasando 400 seg de fluencia, puede dar tendencias idénticas. Las pequeñas diferencias observadas se pueden deber a las siguientes causas: la primera, los contenidos de fluido no son exactamente los seleccionados, por la dificultad de repetir, aún en un ambiente de laboratorio, exactamente los mismos procedimientos de elaboración, y la segunda, la carga seleccionada del 80.0% tiene variaciones hasta de  $\pm 0.7\%$ . Sin embargo, todas las curvas presentan una fluencia equivalente durante la etapa de prueba, la cual se considera dentro de los límites aceptables para aplicar la técnica de interferometría holográfica. Las deformaciones unitarias menores del 1.0% mostradas en la fig 16, son provocadas al aplicar el 80.0% de la carga mencionada.

## CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con base en las pruebas realizadas para esta tesis, se pueden enumerar las siguientes conclusiones:

- 1) El método de compactación por amasado, usando el compactador "harvard miniatura neumático", produce especímenes uniformes en peso volumétrico seco ( $\gamma_D$ ), para las especificaciones utilizadas.
- 2) Se ha encontrado por primera vez, el estado ocluido, que se caracteriza por la presencia de cavidades herméticas, en donde se concentra la fase gaseosa del material.
- 3) Se puede obtener comportamiento esfuerzo axial vs. deformación unitaria ( $\sigma$  vs.  $\epsilon$ ) equivalente, para especímenes ensayados a compresión simple con diferentes fluidos intersticiales, con base en un estricto control del contenido de fluido.

- 4) Se puede despreciar el efecto tixotrópico en este tipo de material caolinitico.
- 5) Es posible anticipar el efecto por absorción de agua en el comportamiento mecánico a compresión simple de los especímenes de caolín-polímero, con base en las curvas  $\sigma$  vs.  $\epsilon$ .
- 6) Se han producido especímenes de caolín-agua y de caolín-polímero, ambos con comportamiento de fluencia lenta equivalente, posibilitando así el estudio micromecánico del caolín en el microscopio electrónico.
- 7) Se ha desarrollado un programa de computadora para derivar directamente curvas  $\sigma$  vs.  $\epsilon$  a partir de los datos originales del ensaye a compresión simple.

Con base en las conclusiones precedentes, el trabajo realizado se puede encaminar hacia los siguientes objetivos:

- 1) Evaluar la respuesta microestructural de especímenes arcillosos, con sustitución del agua por un polímero estable al vacío del microscopio electrónico y comparar estos resultados con pruebas de comportamiento mecánico mesoscópico ( ensayos de probetas de laboratorio ), obtenidos mediante interferometría holográfica.
- 2) Investigar para qué contenido de agua de la curva de compactación se presenta la formación de cavidades de aire ocluido para determinada energía de compactación.
- 3) Encontrar la relación entre el volumen de aire ocluido y el llamado " colchoneo o rebote " de un material compactado.

APENDICE



```
CALL OUT (Z'C4',0)
CALL OUT (Z'C3',0)
IF (CAMRA.EQ.1) GO TO 223
CALL OUT (Z'C2',0)
GO TO 224
223 CALL OUT (Z'C2',Z'40')
224 CALL OUT (Z'C1',Z'F5')
CALL OUT (Z'CO',Z'04')
C
TOPX = 20
TOPY = 200
220 FORMAT (3X, 'Camara de T.V. a usar: 1 = color, 2 = B.N :. ')
221 FORMAT(I1)
IF (CAMRA.EQ.1) GO TO 8811
C
C
C .....
C
C ejes de referencia.
C
C
DO 8118 J=1,9
DO 008 I=1,400,4
CALL OUTPT (15,TOPY,I)
008 CONTINUE
DO 009 I=1,400,9
CALL OUTPT (15,I,TOPX)
009 CONTINUE
8118 CONTINUE
8811 WRITE (3,010)
010 FORMAT(3X, 'TECLEE "ESC" PARA CONTINUAR',/)
CALL GETC
C
C
C .....
C
C
C digitizacion
C
IF (BYTETO.NE.ESC) GO TO 005
CALL OUT (Z'C4',0)
CALL OUT (Z'C3',0)
IF (CAMRA.EQ.1) GO TO 226
CALL OUT (Z'C2',0)
GO TO 227
226 CALL OUT (Z'C2',Z'40')
227 CALL OUT (Z'C1',Z'F4')
CALL OUT (Z'CO',Z'24')
IF (CAMRA.NE.1) GO TO 8129
WRITE (3,8130)
8130 FORMAT (3X, 'POSICIONE EL CURSOR EN ORIGEN DE CURVAS')
IX=30
IY=200
MARCA=2
CALL CURSOR(IX,IY)
```

```
CALL CRUZ(IX,IY)
TOPX =IX .
TOPY =IY

C
C
C se obtienen niveles maximos de desplaz. y carga.
C
8129 WRITE (3,9087)
9087 FORMAT(3X,////////////////////)
WRITE (3,9088)
9088 FORMAT(3X,////,15X,' los datos pedidos por el programa, debera
WRITE (3,9089)
9089 FORMAT(15X,' asignarlos con **PUNTO DECIMAL**',////)
C
C seleccion de marcador
C
WRITE (3,433)
433 FORMAT(3X,'Seleccione marcador:Punto [teclea 1],Estrella [2]')
READ (3,434) MARCA
434 FORMAT(I2)
WRITE (3,012)
012 FORMAT(3X,'COLOQUE EL CURSOR EN EL NIVEL MAXIMO',
1 IX,' DE DESPLAZAMIENTO',/)
C
C
C .....
C
C localizacion de niveles maxs. de carga y desplazamiento.
C
IXDES=128
IYDES=128
CALL CURSOR (IXDES,IYDES)
IF (MARCA.EQ.1) GO TO 435
CALL CRUZ (IXDES,IYDES)
GO TO 436
435 CALL PUNTO(IXDES,IYDES)
436 WRITE (3,013)
013 FORMAT(3X,'mVolts del punto ?:')
C
C leyendo el max.voltaje [mV] de la curva de desplazamiento.
C
READ(3,014)VDDES
014 FORMAT(F7.3)
C
WRITE (3,016)
016 FORMAT(3X,'COLOQUE EL CURSOR EN EL NIVEL MAXIMO DE CARGA',/)
IXCAR=IXDES
IYCAR=IYDES
CALL CURSOR (IXCAR,IYCAR)
IF (MARCA.EQ.1) GO TO 437
CALL CRUZ (IXCAR,IYCAR)
GO TO 438
437 CALL PUNTO (IXCAR,IYCAR)
438 WRITE (3,013)
C
C leyendo el max.voltaje [mV] de la curva de carga.
```

```

C
C      READ (3,018) VCAR
018   FORMAT(F7.3)
C
C      se obtuvieron niveles maximos asi como      ixdes,iydes
C                                                    ixcar,iycar
C
C.....
C
C      rngdzy = pixeles manejados en el eje "y"
C      vpixdz = mVolts por pixel de desplazamiento.
C
C      INCX=(IXDES-TOPX)/10
C      RNGDZY=(TOPY-IYDES)
C      VPIXDZ=(VDES/RNGDZY)
C      RNGCRY=(TOPY-IYCAR)
C      VPIXCR=(VCAR/RNGCRY)
C      WRITE (3,6215) RNGCRY,RNGDZY
6215  FORMAT (3X,'PIX. MAX.DE',3X,'carsa=',F7.3,3X,'dez=',F7.3)
C      WRITE (3,6216) VPIXDZ,VPIXCR
6216  FORMAT (3X,'mV/pix dz=',F7.3,'mV/pix CR=',F7.3)
C
C.....
C
C      WRITE (3,011)
011   FORMAT(3X,'TIEMPO DE PRUEBA?:')
C      READ (3,015) TIEMPO
015   FORMAT (F7.3)
C      CALL OPEN (6,IA,0)
C      WRITE (6,019,REC=1,ERR=011,END=011) TIEMPO
019   FORMAT(3X,F7.3)
C
C      VDES=(VDES*1.9231)
C      VCAR=(VCAR*0.19737)
C      DEFUNI=(VDES*0.0000182)
C      ACOREG=(9.654/(1-DEFUNI))
C      ESFZO=VCAR/ACOREG
C      FZOANT=ESFZO
C
C      se almacenaran valores anteriores de carsa y desplaz.
C
C      DESANT=VDES
C      CARANT=VCAR
C
C      WRITE (6,20,REC=2,ERR=22,END=22) VDES,VCAR
20    FORMAT(2X,F14.5,2X,F14.5)
9020  FORMAT(2X,F14.5,2X,F14.5,2X,F14.5)
C      WRITE (6,9020,REC=3,ERR=22,END=22) DEFUNI,ACOREG,ESFZO
C
C.....
C

```

```
C
C      almacenamiento de datos en forma iterada.
C
C
22     CONTINUE
      K=2
26     K=K+2
      WRITE (3,27)
C
C      .....desplazamiento
27     *   FORMAT(3X,////////////////////,
          *   2X,'POSICIONATE EN CURVA DE DESPLAZAMIENTO')
          IXDES=IXDES-INCX
          IX=IXDES
          IY=128
          CALL CURSOR (IX,IY)
          IF (MARCA.EQ.1) GO TO 5433
          CALL CRUZ (IX,IY)
          GO TO 5434
5433    CALL PUNTO(IX,IY)
5434    VDES=(TOPY-IY)
          IF (VDES.GT.RNGDZY) VDES=RNGDZY
          IF (VDES.LT.0) VDES=0
          VDES=VDES*VPIXDZ
          VDES=VDES*1.9231
          WRITE(3,28)
C
C      .....carga
28     *   FORMAT(3X,////////////////////,
          *   3X,'POSICIONATE EN CURVA DE CARGA',/)
          CALL CURSOR (IX,IY)
          IF (MARCA.EQ.1) GO TO 5435
          CALL CRUZ (IX,IY)
          GO TO 5436
5435    CALL PUNTO(IX,IY)
5436    VCAR=(TOPY-IY)
          WRITE (3,232) VCAR
232    *   FORMAT (3X,'PIXELES EN "Y" DE CARGA =',F7.3)
          IF (VCAR.GT.RNGCRY) VCAR=RNGCRY
          IF (VCAR.LT.0) VCAR=0
          VCAR=VCAR*VPIXCR
          VCAR=VCAR*0.19737
C
          WRITE (3,230) VCAR
230    *   FORMAT (3X,'VOLTS DE CARGA = ',F7.3)
C
C      .....
C
C      si datos obtenidos son mayores de los anteriores se
C      realiza un acoplamiento.
C
          IF (VDES.GT.DESANT) VDES=DESANT
          IF (VCAR.GT.CARANT) VCAR=CARANT
          DESANT=VDES
          CARANT=VCAR
C
```

```
C .....
C
C      obteniendo valores de carga [Ks], y desplazamiento [micras]
C      a partir de los milivolts obtenidos anteriormente.
C
C      WRITE (3,240) CARANT,VCAR
240     FORMAT (3X,'CARANT:',F7.3,3X,'VCAR:',F7.3)
C
C      WRITE (3,241) VCAR
241     FORMAT(3X,'VCAR ALMAC.:',F7.3)
C      obteniendo la deformacion unitaria y el area correspondida [cm cuac]
C
C      DEFUNI=(VDES*0.0000182)
C      ACOREG=(9.654/(1-DEFUNI))
C      ESFZO=VCAR/ACOREG
C      IF (ESFZO.GT.FZOANT) ESFZO=FZOANT
C      FZOANT=ESFZO
C
C      WRITE (6,20,REC=K,ERR=30,END=30) VDES,VCAR
C      K2=K+1
C      WRITE (6,9020,REC=K2,ERR=30,END=30) DEFUNI,ACOREG,ESFZO
30     CONTINUE
C      IF (K.EQ.22) GO TO 32
C      GO TO 26
32     WRITE (3,3964)
3964    FORMAT(3X,/,,' <*Fin de proceso* ',/)
C
C .....
C
C
C
C
3521    REWIND 6
C      JCON=11
C      I=3
1236    READ (6,9020,REC=I,ERR=1231,END=1231) DEFUNI,ACOREG,ESFZO
C
C      Normalizacion de Esfzo y Defundi (-128 a 128)
C      Esfzo max= 6 Kas/(cm cuad) Defuni max=0.3
C
1231    ESFZO=(ESFZO/6)*255
C      IF (ESFZO.LE.255) GO TO 1232
C      WRITE (3,1233)
1233    FORMAT(3X,'Esfzo obtenido rebasa los 6 Kas/(cm cuad)')
1232    ESFZO=ESFZO-128
C      DEFUNI=(DEFUNI/0.3)*255
C      IF (DEFUNI.LE.255) GO TO 1234
C      WRITE (3,1235)
1235    FORMAT(3X,'Defuni obtenida rebasa el 0.3 supuesto')
1234    DEFUNI=DEFUNI-128
C      PTDEFU(JCON)=DEFUNI
C      PTEFZO(JCON)=ESFZO
C      I=I+2
C      JCON=JCON-1
```







C  
C  
C  
C  
C  
C

```
SUBROUTINE PUNTO(IX,IY)
  IIX=IX
  IIY=IY
  CALL OUTPT( 0,IIY,IIX)
  RETURN
END
```

C  
C  
C  
C  
C  
C  
C  
C

SUBROUTINE EJES

```
  BYTE      START
  START = -127
  CALL      OUT (Z'1B',START)
  CALL      OUT (Z'1C',START)
  CALL      RETRA
```

C  
C  
C

VERTICAL.

```
DO 10 I=1,249
  START = START + 1
  CALL OUT (Z'1B',START)
  CALL OUT (Z'1C',-128)
  CALL RETRA
  CONTINUE
```

10  
C

```
DO 20 I=1,249
  START = START - 1
  CALL OUT (Z'1B',START)
  CALL OUT (Z'1C',-128)
  CALL RETRA
  CONTINUE
```

20  
C  
C  
C

HORIZONTAL.

```
START = -128
DO 30 I=1,255
  START = START + 1
  CALL OUT (Z'1C',START)
  CALL OUT (Z'1B',-127)
  CALL RETRA
  CONTINUE
```

30  
C

```
DO 40 I=1,255
```

```
START = SSTART - 1  
CALL OUT (Z'1C', START)  
CALL OUT (Z'1B', -127)  
CALL RETRA  
40 CONTINUE  
RETURN  
END
```

C  
C  
C  
C  
C  
C  
C  
C  
C  
C  
C

```
SUBROUTINE RETRA  
REAL A, B  
A = 1.3  
DO 10 I=1, 15  
    B = (A * I) - 1.8  
10 CONTINUE  
RETURN  
END
```

**BIBLIOGRAFIA**

## BIBLIOGRAFIA

- Alberro, J., Marsal, R.J., Mendoza, M. J. y Nader, F. Junio (1978), "Comportamiento de suelos compactados", I Informe del Instituto de Ingeniería, UNAM, a la Dirección General de Servicios Técnicos, SAHOP, México
- Alberro, J., Marsal, R. J., Mendoza, M. J. y Nader, F. Agosto (1979), "Comportamiento de suelos compactados", II Informe del Instituto de Ingeniería, UNAM, a la Dirección General de Servicios Técnicos, SAHOP, México
- Alberro, J., Hiriart, G., Marsal, R. J. y Mendoza, M. J. Abril (1980), "Comportamiento de suelos compactados", III Informe del Instituto de Ingeniería, UNAM a la Dirección General de Servicios Técnicos, SAHOP, México
- Alberro, J., Hiriart, G., Marsal, R. J. y Mendoza, M. J., Octubre (1982), "Comportamiento de suelos compactados", IV Informe del Instituto de Ingeniería, UNAM, a la Dirección General de Servicios Técnicos, SAHOP, México
- Marsal, R. J. (1979), "Análisis de fundamentos sobre suelos cohesivos compactados", Sexto Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones, Vol I, Lima, Perú
- Sotelo, G., Hidráulica General, Vol. I, Fundamentos, Editorial Limusa, S.A., México, D.F. (1980)

## REFERENCIAS

1. Reséndiz, N. D. (1978), "Compaction conditions, state variables and engineering properties of compacted clay", contribución al Seminario sobre Suelos Compactados, Instituto de Ingeniería, UNAM
2. Manual de Mecánica de Suelos, Secretaría de Recursos Hidráulicos 5a. Ed., México, 1970
3. Seed, H. B. y Chan, C. K. (1960), "Compacted clays: structure and strength characteristics, ASCE Transactions, Paper No. 3246, USA
4. Peralta, R., Turcott, E., Hernández, G., "2a. Etapa de la investigación teórico-experimental sobre la relación entre microestructura y comportamiento en suelos arcillosos", Informe 527, Instituto de Ingeniería, UNAM, agosto (1981)
5. Casagrande, A. and Hirschfeld, R. C. (1962), "Investigation of stress-deformation and strength characteristics of compacted clays", (Second Progress Report), Harvard Soil Mechanics Series, No. 65
6. Alberro, J., "Expansión y contracción volumétrica de arcillas compactadas", 5° Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones, Vol 1, Buenos Aires (1975)
7. Tovey, N. K. and Wong, K. Y., "The microfabric of deformed kaolin", Journal of Microscopy, Vol 120, December, 1980
8. Marsal, R. J. (1979), "Compactación de suelos y propiedades de suelos cohesivos", Informe del Instituto de Ingeniería, UNAM a SAHOP

9. Juárez Badillo, E. y Rico, A., "Mecánica de suelos", Tomo I, Fundamentos de la Mecánica de Suelos, Capítulo IV, Ed. Limusa, S.A., México, D.F. (1976)
10. Mitchell, J. K (1960), "Fundamental aspects of thixotropy in soils", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 86
11. Peralta, R. y Hernández, G., "Mediciones de microdeformaciones en suelos arcillosos por medio de interferometría holográfica y microscopía electrónica", Informe 1532, Instituto de Ingeniería, UNAM, Octubre (1982)
12. Alberro, J., Mendoza, M. J., Marsal, R. J. e Hiriart, G. enero (1982), "Comportamiento de suelos compactados", IV Informe del Instituto de Ingeniería, UNAM, a la Dirección General de Servicios Técnicos, SAHOP, México