

01163  
lej.  
2

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
FACULTAD DE INGENIERIA



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO

**INFLUENCIA DE GRUMOS Y GRANOS POROSOS EN LAS  
PROPIEDADES DE LOS SUELOS COHESIVOS COMPACTADOS**

**T E S I S**

*que presenta*

**SANTIAGO LOAIZA GONZALEZ**

*para obtener el grado de*

**MAESTRO EN INGENIERIA**

*(Mecánica de Suelos)*

**JURADO**

DR. RAUL J. MARSAL CORDOBA . . . . .

DR. EULALIO JUAREZ BADILLO . . . . .

DR. J. ABRAHAM DIAZ RODRIGUEZ . . . . .

ING. GUILLERMO SPRINGALL CARAM . . . . .

DR. LEONARDO ZEEVAERT WIECHERS . . . . .

*[Handwritten signatures of the jury members]*

EL COORDINADOR DE LA SECCION

*[Handwritten signature of Dr. J. Abraham Diaz Rodriguez]*

DR. J. ABRAHAM DIAZ RODRIGUEZ

LA SECRETARIA ACADEMICA

*[Handwritten signature of Gabriela Moeller de Jalife]*

En el día GABRIELA MOELLER DE JALIFE

RECIBIDO EN  
FALTA DE ORIGINAL



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## **CONTENIDO**

**LISTA DE TABLAS**

**LISTA DE FIGURAS**

**LISTA DE SIMBOLOS**

**1. RESUMEN**

**2. CONCLUSIONES**

**3. RECOMENDACIONES**

**APENDICE 1. Estudios previos**

**1.1. Consideraciones preliminares**

**1.2. Antecedentes**

**APENDICE 2. Descripción y propiedades de los materiales -  
utilizados**

- 2.1 SC-Chicoasén
- 2.2 SM-San Vicente
- 2.3 SC-Chicoasén-San Roque
- 2.4 CH-La Peña
- 2.5 MH-Necaxa

**APENDICE 3. Equipo utilizado**

- 3.1 Compactación
- 3.2 Compresión no confinada
- 3.3 Consolidación
- 3.4 Porosidad

**APENDICE 4. Trabajo experimental**

- 4.1 Pruebas Índice
  - 4.1.1 Granulometría
  - 4.1.2 Densidad de sólidos
  - 4.1.3 Límites de consistencia
- 4.2 Ensayes de compactación
  - 4.2.1 Método
  - 4.2.2 Especificaciones adicionales
- 4.3 Ensayes de compresión no confinada

4.4 Pruebas de consolidación

4.5 Determinaciones de porosidad

**APENDICE 5. Funcionamiento del porosímetro**

**AGRADECIMIENTOS**

**REFERENCIAS**

## LISTA DE TABLAS

- 2.1 Propiedades índice de los suelos ensayados.
- 4.1 Propiedades índice para diferentes fracciones.
- 4.2 Resultados de las determinaciones de porosidad.
- 5.1 Obtención del contenido de agua de los finos para los materiales ensayados en consolidación.

## LISTA DE FIGURAS

- 1.1 Tipos de granos clasificados como arena.
- 1.2 Granulometrías de partículas y de grumos, formados secando el material previamente al ambiente, disgregándolo y tamizándolo por la malla N° 4 .
- 1.3 Efecto de la granulometría de grumos del suelo secado al ambiente, sobre el peso volumétrico seco y la resistencia a la compresión no confinada. Compactación por impactos; MH-Necaxa. .
- 1.4 Efecto de la granulometría de grumos del suelo secado al ambiente, sobre el peso volumétrico seco y la resistencia a la compresión no confinada. (CH-La Peña; compactación por impactos).
- 1.5 Efecto de la granulometría de grumos del suelo se cado al ambiente, sobre el peso volumétrico seco y la resistencia a la compresión no confinada. (MH-Ne caxa; amasado 27-10-10).
- 1.6 Efecto de la granulometría de grumos del suelo se cado al ambiente, sobre el peso volumétrico seco y la resistencia a la compresión no confinada. (CH-La Peña; amasado 27-10-10).
  
- 2.1 Carta de Plasticidad.

- 3.1 Dimensiones del molde de compactación.
  - 3.2 Vista del compactador neumático manual y el molde de compactación.
  - 3.3 Curva de calibración del compactador neumático manual.
  - 3.4 Extractor de muestras.
  - 3.5 Compactador neumomecánico.
  - 3.6 Consolidómetro de anillo flotante.
  - 3.7 Esquema del porosímetro de vidrio.
- 
- 4.1 Distribución granulométrica para los diferentes porcentajes de finos. (SH-San Vicente).
  - 4.2 Distribución granulométrica para los diferentes porcentajes de finos. (SC-Chicoasén).
  - 4.3 Distribución granulométrica para los diferentes porcentajes de finos. (CH-La Peña).
  - 4.4 Distribución granulométrica para los diferentes porcentajes de finos. (MH-Necaxa).
  - 4.5 Espécimen compactado, prueba de compresión no confinada.
  - 4.6 Curvas resistencia a la compresión no confinada y peso volumétrico seco vs contenido de agua de compactación. (CH-La Peña; serie material integral,  $p_f=3.9\%$ , Amasado 27-10-10).



- 4.7 Curvas resistencia a la compresión no confinada y peso volumétrico seco vs contenido de agua de compactación. (CH-La Peña; serie  $p_f=0\%$ . Amasado 27-10-10).
- 4.8 Curvas resistencia a la compresión no confinada y peso volumétrico seco vs contenido de agua de compactación. (CH-La Peña; serie  $p_f=30\%$ . Amasado 27-10-10).
- 4.9 Curvas resistencia a la compresión no confinada y peso volumétrico seco vs contenido de agua de compactación. (CH-La Peña; serie  $p_f=50\%$ . Amasado 27-10-10)
- 4.10 Curvas resistencia a la compresión no confinada y peso volumétrico seco vs contenido de agua de compactación. (CH-La Peña; serie  $p_f=75\%$ . Amasado 27-10-10)
- 4.11 Curvas resistencia a la compresión no confinada y peso volumétrico seco vs contenido de agua de compactación. (CH-La Peña; serie  $p_f=100\%$ . Amasado 27-10-10).
- 4.12 Curvas resistencia a la compresión no confinada y peso volumétrico seco vs contenido de agua de compactación. (MH-Necaxa; serie material integral,  $p_f=2.5\%$  Amasado 27-10-10) .
- 4.13 Curvas resistencia a la compresión no confinada y peso volumétrico seco vs contenido de agua de compactación. (MH-Necaxa; serie  $p_f=0.0\%$ . Amasado 27-10-10)
- 4.14 Curvas resistencia a la compresión no confinada y peso volumétrico seco vs contenido de agua de compactación. (MH-Necaxa; serie  $p_f=30\%$ . Amasado 27-10-10) .

- 4.15 Curvas resistencia a la compresión no confinada y peso volumétrico seco vs contenido de agua de compactación. (MH-Necaxa; serie  $p_f=50\%$ . Amasado 27-10-10).
- 4.16 Curvas resistencia a la compresión no confinada y peso volumétrico seco vs contenido de agua de compactación. (MH-Necaxa; serie  $p_f=75\%$ . Amasado 27-10-10).
- 4.17 Curvas resistencia a la compresión no confinada y peso volumétrico seco vs contenido de agua de compactación. (MH-Necaxa; serie  $p_f=100\%$ . Amasado 27-10-10).
- 4.18 Curvas de compactación y resistencia en compresión no confinada, mezclas de finos y gruesos. (SM-San Vicente).
- 4.19 Curvas de compactación y resistencia en compresión no confinada, mezclas de finos y gruesos. (SC-Chicoasén).
- 4.20 Curvas de compactación y resistencia en compresión no confinada, mezcla de finos y gruesos. (SC-Chicoasén-San Roque).
- 4.21 Curvas de compactación y resistencia en compresión no confinada, mezclas de finos y gruesos. (CH-La Peña).
- 4.22 Curvas de compactación y resistencia en compresión no confinada, mezcla de finos y gruesos. (MH-Necaxa).

- 4.23 Curvas peso volumétrico seco y módulo tangente inicial vs contenido de agua, para diferentes porcentajes de finos. (SH-San Vicente; Amasado 27-10-10).
- 4.24 Curvas peso volumétrico seco y módulo tangente inicial vs contenido de agua, para diferentes porcentajes de finos. (SC-Chicoasén; Amasado 27-10-10).
- 4.25 Curvas peso volumétrico seco y módulo tangente inicial vs contenido de agua, para diferentes porcentajes de finos. (SC-Chicoasén-San Roque; Amasado 27-10-10).
- 4.26 Curvas peso volumétrico seco y módulo tangente inicial vs contenido de agua, para diferentes porcentajes de finos. (CH-La Peña; Amasado 27-10-10).
- 4.27 Curvas peso volumétrico seco y módulo tangente inicial vs contenido de agua, para diferentes porcentajes de finos. (MH-Necaxa; Amasado 27-10-10).
- 4.28 Curvas de compresibilidad para diferentes porcentajes de finos, escala semilog. (SC-Chicoasén-San Roque).
- 4.29 Curvas de compresibilidad para diferentes porcentajes de finos, escala aritmética. (SC-Chicoasén-San Roque).
- 4.30 Curvas de compresibilidad para diferentes porcentajes de finos, escala semilog. (SH-San Vicente).
- 4.31 Curvas de compresibilidad para diferentes porcentajes de finos, escala aritmética. (SH-San Vicente).
- 4.32 Curvas coeficiente de compresibilidad volumétrica unitaria vs esfuerzo normal efectivo, para diferentes porcentajes de finos. (SC-Chicoasén-San Roque).

- 4.33 Curvas coeficiente de compresibilidad volumétrica unitaria vs esfuerzo normal efectivo, para diferentes porcentajes de finos. (SM-San Vicente).
- 5.1 Curva humedad óptima de compactación vs porcentaje de finos. (SC-Chicoasén; Amasado 27-10-10).
- 5.2 Curva humedad óptima de compactación vs porcentaje de finos. (SM-San Vicente; Amasado 27-10-10).
- 5.3 Curva humedad óptima de compactación vs porcentaje de finos. (SC-Chicoasén-San Roque; Amasado 27-10-10).
- 5.4 Curva humedad óptima de compactación vs porcentaje de finos. (CH-La Peña; Amasado 27-10-10).
- 5.5 Curva humedad óptima de compactación vs porcentaje de finos. (MH-Necaxa; Amasado 27-10-10).
- 5.6 Funcionamiento del porosímetro.

## LISTA DE SIMBOLOS

- $D_m$  -Diámetro del molde de compactación, en cm.
- $D_p$  -Diámetro del plíson de compactación, en cm.
- $e$  -Relación de vacíos.
- $e_g$  -Relación de vacíos de granos.
- $G_s$  -Densidad de sólidos.
- $G_{sg}$  -Densidad de sólidos de granos.
- $I_p$  -Índice de plasticidad.
- LL -Límite líquido.
- LP -Límite plástico.
- MI -Material integral, suelo que conserva la granulometría del material obtenido en campo, secado al aire, desmenuzado y tamizado por la malla No.4.
- $m_v$  -Coeficiente de compresibilidad volumétrica, en  $\text{cm}^2/\text{Kg}$ .
- $M_o$  -Módulo tangente inicial, evaluado por el cociente entre el esfuerzo aplicado y la deformación unitaria para el tramo inicial de la curva esfuerzo-deformación.
- $n$  -Porosidad.
- $n_g$  -Porosidad de grumos y granos.
- $P_f$  -Porcentaje inicial de finos.
- $P_g$  -Porcentaje inicial de gruesos.
- $q_u$  -Resistencia en compresión no confinada, en  $\text{Kg}/\text{cm}^2$ .
- $q_{u\text{máx}}$  -Resistencia máxima en compresión no confinada, en  $\text{Kg}/\text{cm}^2$ .

- $S_r$  -Grado de saturación.
- $S_{rg}$  -Grado de saturación de los granos.
- $S_{rm}$  -Grado de saturación del material.
- $V_m$  -Volumen de la muestra compactada, igual al volumen del molde de compactación, en  $\text{cm}^3$ .
- $W_m$  -Peso del espécimen compactado, en gr.
- $w$  -Contenido de agua.
- $w_c$  -Contenido de agua de compactación.
- $w_f$  -Contenido de agua de los finos en conjunto.
- $w_g$  -Contenido de agua de los gruesos.
- $\gamma_d$  -Peso volumétrico seco del espécimen compactado, en  $\text{gr}/\text{cm}^3$ .
- $\gamma_{d\text{máx.}}$  -Peso volumétrico seco máximo para una serie de ensayos de compactación, en  $\text{gr}/\text{cm}^3$ .
- $\gamma_m$  -Peso volumétrico del suelo compactado, en  $\text{gr}/\text{cm}^3$ .
- $\sigma$  -Esfuerzo normal efectivo en una prueba de consolidación, en  $\text{Kg}/\text{cm}^2$ .

# INFLUENCIA DE GRUMOS Y GRANOS POROSOS EN LAS PROPIEDADES DE LOS SUELOS COHESIVOS COMPACTADOS

## 1. RESUMEN

*Definiciones preliminares:* para propósitos del presente trabajo se conocerá como *materia integral* (MI) aquél traído del campo, secado al ambiente, disgregado y tamizado por la malla N° 4 (4.76 mm). Este material se considera formado por dos fracciones bien definidas, la fracción gruesa, parte del material que pasa - la malla N° 4 y es retenida en la N° 200, y la fracción fina, aquélla que pasa a través de la malla N° 200. Los finos se consideran constituidos por polvo de roca, partículas \* de minerales arcillosos y asociaciones de estas partículas de tamaño menor que 0.074 mm. En los gruesos distinguiremos los granos, que pueden ser sólidos o contener huecos comunicados al exterior (*granos po*rosos) y las asociaciones de partículas limoarcillosas, con o sin granos de tamaño menor, que se conocerán con el nombre de *grumos*. En el inciso 1.1 del Apéndice 1 se presenta una clasificación de los diferentes tipos de gruesos.

*Objetivo:* el objetivo del presente trabajo es determinar cómo - influye la presencia de *grumos* y *granos porosos* en la determinación de las siguientes propiedades índice de un material: contenido de agua ( $w$ ), relación de vacíos ( $e$ ), porosidad ( $n$ ), densidad de sólidos ( $G_s$ ), grado de saturación ( $S_r$ ) y peso volumétrico seco ( $\gamma_d$ ), así como en la resistencia a la compresión simple sobre probetas compactadas por el método de amasado y una misma energía de compactación. También se estudió cómo influye la presencia de *granos porosos* en la determinación del coeficiente de compresibilidad volumétrica unitaria ( $m_v$ ) de un material, obtenido a partir de pruebas de consolidación unidimensional.

---

\* se llamará partícula, en general, a elementos del tamaño de - los minerales de arcilla.

**Materiales utilizados :** para estudiar la influencia sobre las propiedades índice y la resistencia a la compresión simple se utilizaron cuatro suelos: SC-Chicoasén, SM-San Vicente, CH-La Peña y MH-Necaxa, y un quinto material formado con la fracción fina del suelo SC-Chicoasén y la arena San Roque, la cual se ajustó a la granulometría de la fracción gruesa del suelo SC-Chicoasén (SC-Chicoasén-San Roque). A fin de investigar la influencia sobre la compresibilidad ( $m_v$ ), se utilizaron los materiales SM-San Vicente y SC-Chicoasén-San Roque. Una breve descripción de cada uno de estos materiales así como su caracterización mineralógica se presenta en el Apéndice 2.

**Nota :** las pruebas índice, ensayos de compactación y de compresión no confinada efectuados en los suelos SM-San Vicente, SC-Chicoasén y SC-Chicoasén-San Roque fueron realizados por la Ing. Mónica Santiago y constituyen la información antecedente de esta tesis.

**Procedimiento seguido:** con el fin de tener una base de comparación, se realizaron con el material integral las determinaciones de propiedades índice por los procedimientos normalmente aceptados.

**Límites de Atterberg:** se determinaron con la fracción que pasa a la malla N° 40 y aumentando el contenido de agua para determinar el límite líquido, LL. Para determinar el límite plástico, LP, parte del material una vez humedecido y amasado se dejó secar gradualmente hasta lograr la humedad correspondiente a dicho límite.

**Densidad de sólidos:** para determinar esta propiedad se utilizan dos procedimientos dependiendo del tipo de suelo (Ref. 14), el primero, se aplica en el caso de suelos granulares (arenas) y consiste en secar el material al horno, previamente a la determinación, para conocer así el peso de sólidos antes de medir el volumen de sólidos así: se vierte el material en un picnómetro cali-



brado que contenga agua destilada y desaireada, el conjunto agua más suelo se hierve y se somete a vacío hasta lograr remover todo el aire atrapado en el suelo (aproximadamente 10 minutos); - posteriormente se llena el picnómetro hasta la marca de aforo - con agua destilada y desaireada, se deja homogeneizar la temperatura de la mezcla agua-suelo, se registra la temperatura y se pesa el picnómetro con su contenido. El segundo procedimiento es el aceptado para suelos finos y consiste en lo siguiente: partiendo de la humedad natural del material, se le agrega agua y se amasa hasta obtener una pasta viscosa, la que es sometida a un agitado mecánico durante 15 minutos, procediendo después a la determinación del volumen de sólidos en un picnómetro, siguiendo el procedimiento ya mencionado para arenas, y determinando el peso de sólidos secando el material al horno.

En nuestro caso, por tratarse de materiales formados por dos - fracciones (gruesa y fina), en donde por granulometría la primera clasifica como arena, se realizó la determinación de la densidad de sólidos sobre una fracción representativa de cada material, por los dos procedimientos.

*Granulometría:* con el fin de conocer la granulometría del suelo tal como se utiliza para un ensayo de compactación y la granulometría del mismo tratando de eliminar los grumos de la fracción gruesa por lavado, se determinaron en cada suelo, granulometría por vía seca, secando el material al ambiente y tamizándolo, y granulometría por vía húmeda, lavando el material a través de los diferentes tamices.

Los resultados de las pruebas índice en el *material integral*, de terminadas como se mencionó anteriormente, se presentan en la *Tabla N° 2.1*, y la ubicación de la fracción menor que la malla - *N° 40* en la carta de plasticidad, en la *Fig. 2.1* del Apéndice 2.

Para estudiar la influencia de grumos y granos porosos en el peso volumétrico seco,  $\gamma_d$  y la resistencia a la compresión simple,  $q_u$ , se obtuvieron cantidades suficientes de las fracciones gruesa y fina de los materiales a ensayar: en SC-Chicoasén y SM-San Vicente, estas fracciones se obtuvieron por lavado del material a través de la malla N° 200, y en CH-La Peña y MH-Necaxa, en seco, por disgregación de grumos hasta pasar los gruesos por la malla N° 4, y los finos por la N° 200. Con el fin de lograr los objetivos del trabajo se realizaron cinco tipos de ensaye (pruebas índice, compactación, compresión no confinada, consolidación y porosidad); a continuación se describe brevemente la finalidad de cada tipo de ensaye, el equipo utilizado, el procedimiento seguido y los resultados obtenidos; posteriormente se analizan los resultados de las distintas pruebas y derivan algunas conclusiones.

#### *Pruebas Índice :*

*Límites de Atterberg:* con el fin de reconocer la existencia de grumos en la fracción gruesa de los suelos en estudio, se determinaron los límites con la fracción comprendida entre las mallas 40 y 200, y con la fracción fina de cada suelo. Los resultados se presentan en la Tabla N° 4.1 .

*Densidad de sólidos:* si la fracción gruesa de un suelo está formada por granos de arena (sólidos y no porosos), cualquiera sea el procedimiento seguido para determinar la densidad de sólidos dará como resultado el mismo valor. Con el fin de reconocer la presencia de grumos o granos porosos en la fracción gruesa (entre mallas 4 y 200) del suelo, clasificada por granulometría como arena, se determinaron densidades de sólidos por los dos procedimientos anteriormente mencionados, para las fracciones gruesa y fina por separado. Los resultados se presentan en la Tabla N° 4.1 .

*Compactación:* se realizaron estos ensayos para evaluar la influencia de grumos y granos porosos en: el contenido de agua de compactación ( $w_c$ ), la porosidad ( $n$ ), la relación de vacíos ( $e$ ), el peso

volumétrico seco ( $\gamma_d$ ) y el grado de saturación ( $S_r$ ) de los especímenes compactados. Las probetas se compactaron en el molde de 1 (Ref. 9) de 3.6 cm de diámetro y 8.5 cm de altura, con equipo neumático manual y un pisón de 1.27 cm de diámetro. Se utilizó el método de compactación por amasado con 27 pisonadas de 10 Kg en cada capa de las 10 con que se formó el espécimen; esta especificación de compactación se notará *amasado 27-10-10*, y su elección se debe a que con ella se reproducen razonablemente el contenido de agua óptimo y el peso volumétrico seco máximo obtenidos mediante la prueba próctor estándar (impactos). Con el fin de tener una base de comparación se compactaron especímenes con el *material integral* y luego se ensayaron con diferentes porcentajes de finos,  $P_f = 0, 30, 50, 75$  y  $100\%$ . En los materiales CH-La Peña y MH-Nacaxa, la composición granulométrica de grumos gruesos fue la misma que la granulometría de la fracción gruesa del *material integral*. Se controló la humedad de tal manera de tener igual humedad inicial en los finos y en los gruesos en el momento de mezclarlos. Especificaciones adicionales se presentan en el inciso 4.2.2 del Apéndice 4.

Con la compactación *amasado 27-10-10*, se obtuvieron las curvas de compactación  $\gamma_d$  vs  $w_c$  para dos de los suelos ensayados. La superposición de las curvas  $\gamma_d$  vs  $w_c$  para un mismo material, variando el porcentaje de finos, tiene la misma tendencia en los cinco suelos. En la Fig. 4.21 se presentan las correspondientes al material CH-La Peña y las curvas de los otros suelos se incluyen en el Apéndice 4.

*Compresión no confinada:* para evaluar la influencia de grumos y granos porosos en la resistencia a la compresión simple,  $q_u$ , después de compactar cada probeta, ésta se extrajo del molde y se ensayó en una balanza Toledo con dispositivo de carga regulable y a una velocidad de deformación controlada de 1 mm/min. Durante la etapa de carga se llevó registro de cargas aplicadas y de lecturas

de micrómetro. En el cálculo del esfuerzo aplicado se hizo la corrección del área por deformación axial. Las curvas de resistencia ( $q_u$  vs  $w_c$ ) para cada material, variando el porcentaje de finos, tienen la misma tendencia en los cinco suelos. En la Fig. 4.21 se presentan para el suelo CH-La Peña; en el Apéndice 4 se incluyen las gráficas para los otros materiales.

De las curvas esfuerzo-deformación para cada prueba, se obtuvo el módulo de deformabilidad tangente inicial,  $M_0$ , como la pendiente de la curva en el tramo recto inicial:  $M_0 = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \epsilon}$ . Las gráficas representando la variación de  $M_0$  con el contenido de agua de compactación, tienen aproximadamente la misma tendencia al variar  $p_f$ , en todos los materiales (Figs. 4.23 a 4.27 del Apéndice 4). En la Fig. 4.26 se presentan los resultados de CH-La Peña.

**Consolidación:** con estas pruebas se trata de investigar la influencia de la presencia de granos porosos en el coeficiente de compresibilidad volumétrica unitaria,  $m_v$ . Los especímenes se compactaron por amasado en un anillo de consolidación de 6.69 cm de diámetro y 1.91 cm de altura; además, se conservó el mismo esfuerzo de compactación de la especificación *amasado 27-10-10* correspondiente al molde I de I, y la misma relación diámetro del molde a diámetro del pisón,  $D_m/D_p = 2.83$ . Se formó la granulometría de gruesos para cada probeta y los distintos  $p_f$ , conservando la granulometría utilizada en los ensayos de compactación. Especificaciones adicionales se presentan en el inciso 4.4 del Apéndice 4.

La aplicación de la carga sobre el espécimen se realizó con el marco de carga de un consolidómetro tradicional. La secuencia de esfuerzos aplicados fue la siguiente: 0.14, 0.28, 0.56, 1.13, 2.25, 4.51, 6.76, 9.02, 11.27 y 13.53  $\text{Kg/cm}^2$  y cada incremento se dejó actuar hasta que la velocidad de deformación registrada era prácticamente nula. Los materiales mencionados se ensayaron con  $p_f = 30, 50, 75$  y 100%. En las Figs. 4.28 y 4.30 se superponen, en escala semilogarítmica, las curvas de compresibilidad de un mismo material con distintos  $p_f$ . La variación del coeficiente de compresibilidad volumétrica unitaria,  $m_v$ , con el nivel de esfuerzos se presenta en las Figs. 4.32 y 4.33. Para el cálculo de  $m_v$ ,

véase el inciso 4.4 del Apéndice 4.

*Determinaciones de porosidad:* se realizaron a fin de conocer la porosidad tanto de granos como de grumos constituyentes de las fracciones gruesas de los suelos en estudio, y además determinar la variación de este parámetro con el tamaño de los gruesos. Para estas pruebas se empleó un porosímetro de vidrio que funciona con mercurio. En este aparato se obtienen: 1) el volumen de sólidos de la muestra mediante la aplicación de la ley de Boyle (presión x volumen = constante a una misma temperatura), y 2) el volumen total cubriendo la muestra con mercurio. Una descripción detallada del equipo se presenta en el inciso 3.4 del Apéndice 3 y sobre su funcionamiento véase el Apéndice 5.

Los elementos ensayados en este equipo deben estar totalmente secos a fin de evitar la generación de presión de vapor durante la obtención del vacío necesario para las mediciones. El menor tamaño ensayado correspondió a la fracción retenida en la malla N° 16 (1.19 mm). En la Tabla N° 4.2 del Apéndice 4 se presentan los resultados obtenidos en los cinco materiales; la Tabla N° 1 reproduce los valores promedio.

#### *Análisis de resultados*

Los resultados se analizan considerando como factores determinantes del comportamiento del suelo la granulometría y el contenido de agua, y estudiando cada tipo de ensaye por separado (porosidad, pruebas índice, compactación, compresión no confinada y consolidación).

*Porosidad:* para un mismo material no se tuvo variación apreciable en las mediciones de porosidad de granos al disminuir el tamaño de los mismos. El hecho de que el material SM-San Vicente sea de origen volcánico justifica los elevados valores de porosidad determinados ( $n_g = 41\%$ ). En el suelo CH-La Peña se obtuvo una

ligera disminución de la porosidad de grumos,  $n_g$ , al disminuir su tamaño; al parecer, los grumos grandes poseen más discontinuidades como fisuras u oquedades. En MH-Necaxa no se aprecia variación significativa de  $n_g$  con el tamaño de los grumos y su valor es muy cercano al obtenido en una probeta compactada (amasado 27-10-10), con  $p_f = 100\%$  ( $50.0\% < n < 54.0\%$ ), indicando que la porosidad de los grumos en este material es comparable con la porosidad de la matriz fina, una vez compactada.

### *Pruebas Índice*

**Límites de Atterberg:** los resultados obtenidos revelan que la fracción comprendida entre las mallas 40 y 200 no exhibe plasticidad en el caso del suelo SM-San Vicente, mientras que en los otros materiales (SC-Chicoasén, CH-La Peña y MH-Necaxa), esta misma fracción exhibió un índice de plasticidad apreciable. La fracción fina (pasa malla N° 200) del suelo SM-San Vicente se clasifica como limo de baja plasticidad (ML), como corresponde al material *integral* (pasa malla N° 40). En los otros tres suelos se obtuvo la misma clasificación para las tres fracciones ensayadas. Llama la atención el hecho de que el suelo Necaxa se clasifique como limo de alta plasticidad (MH) y su caracterización mineralógica revele que está constituido por haloisita hidratada (mineral arcilloso de la familia de las caolinitas), inciso 2.5 del Apéndice 2; por lo cual era de esperarse una ubicación en la carta de plasticidad muy cerca o sobre la línea A. La explicación a esta discrepancia parece estar en su susceptibilidad a agrumarse, por lo cual en las determinaciones se tiene agua inactiva\* que es tomada en cuenta en la obtención del contenido de agua para los límites.

**Densidad de sólidos:** con excepción de los finos del suelo SM-San Vicente, en todas las fracciones ensayadas se obtuvieron diferen-

---

\* agua que está en el interior de poros de los granos o grumos.

cias entre los dos procedimientos utilizados, mostrando que la fracción gruesa de los suelos en estudio no está formada por granos de arena (sólidos y no porosos). De los resultados de densidad de sólidos y determinación de límites se concluye que la fracción gruesa (entre mallas 4 y 200) del suelo SM-San Vicente está formada por granos porosos, mientras que ésta misma fracción está formada en los otros tres materiales (SC-Chicoasén, CH-La Peña y MH-Necaxa) por grumos. Las determinaciones directas de porosidad sobre estos elementos confirman lo anterior.

**Compactación:** la presencia de grumos en la fracción gruesa de los suelos SM-San Vicente y SC-Chicoasén, los cuales durante la compactación son susceptibles de disgregarse originando finos, puede explicar el hecho de que la curva peso volumétrico seco,  $\gamma_d$ , versus contenido de agua de compactación,  $w_c$ , para la serie  $p_f = 0\%$ , se aproxime notablemente a la de la serie *material integral* ( $p_f = 25.3$  y  $26\%$ , respectivamente).

Al aumentar  $p_f$ , se reemplaza cierto peso de gruesos por el mismo peso de material fino, el cual por ser más uniforme, tendrá mayor porosidad que la fracción gruesa reemplazada, ocupando mayor volumen; a partir de cierto  $p_f$  (entre 25 y 30%), los espacios entre gruesos están totalmente ocupados por finos, y entonces, al seguir incrementando  $p_f$ , se tendrá para el mismo peso de material un aumento en el volumen. Esta disminución de  $\gamma_d$  es más fuerte cuanto menos porosos son los granos del componente grueso; por esta razón, la disminución de  $\gamma_d$  al incrementar  $p_f$  es más drástica en SC-Chicoasén-San Roque que en SC-Chicoasén, y muy ligera en SM-San Vicente (véanse Figs. 4.18, 4.19 y 4.20 del Apéndice 4). En CH-La Peña y MH-Necaxa ocurre el mismo fenómeno de disminución de  $\gamma_d$  al aumentar  $p_f$ , pero más atenuado, debido a la alta porosidad de grumos y al aumento de  $p_f$  por la disgregación de grumos durante la compactación.

En los materiales SC-Chicoasén, SM-San Vicente, SC-Chicoasén-San Roque y CH-La Peña, el desplazamiento de las curvas  $\gamma_d$  vs  $w_c$  hacia la izquierda (contenidos de agua menores) al disminuir  $p_f$ , se atribuye a la menor absorción de los elementos de la fracción gruesa, ya que, si disminuimos  $p_f$ , con menor humedad en el espécimen se logra que éste alcance el contenido de agua óptimo.

En MH-Necaxa se observa que las curvas  $\gamma_d$  vs  $w_c$  (Fig. 4.22 del Apéndice 4), se desplazan hacia valores mayores de  $\gamma_d$  al disminuir  $p_f$ , conservando aproximadamente la humedad óptima de compactación (Fig. 5.5), a diferencia de lo encontrado para los otros cuatro materiales (Figs. 5.1 a 5.4) en que la humedad óptima aumenta con  $p_f$ . Esto es debido probablemente a que en MH-Necaxa, con grumos de elevada porosidad, la absorción de la matriz fina y de los gruesos es prácticamente la misma; el pequeño desplazamiento de estas curvas se asigna a ligeras variaciones de granulometría.

*Compresión no confinada:* en los materiales SM-San Vicente, SC-Chicoasén y SC-Chicoasén-San Roque (Figs. 4.18, 4.19 y 4.20, Apéndice 4), se observa un desplazamiento de las curvas de resistencia ( $q_u$  vs  $w_c$ ), indicando que los materiales con alto  $p_f$  son los más resistentes. Podemos considerar que a partir de cierto  $p_f$  ( $\approx 30\%$ ), los espacios entre gruesos están ocupados por finos, y es la matriz fina la que condiciona el comportamiento esfuerzo-deformación-resistencia del material; la interacción entre granos como contribución a la resistencia puede ser despreciada. Los finos son asociaciones de partículas fuertemente ligadas por fuerzas fisicoquímicas y por el agua adsorbida (altamente viscosa), y por su tamaño poseen menos discontinuidades que los grumos grandes.

El hecho de que para un mismo  $p_f$  el suelo SC-Chicoasén posea mayor resistencia  $q_u$  que SC-Chicoasén-San Roque, se debe a la generación de finos durante la compactación en el primer material, pues la fracción gruesa de SC-Chicoasén está constituf-



da por grumos susceptibles de romperse o desintegrarse durante la compactación. Este fenómeno no se presenta en SC-Chicoasén-Sin Roque, ya que su fracción gruesa está formada por granos y éstos no pueden generar los finos.

En MH-Necaxa la generación de finos parece tener bastante importancia por la forma como se aproximan las curvas  $q_u$  vs  $w_c$  - (Fig. 4.22, Apéndice 4), sobre todo en cercanías de la humedad óptima de compactación, donde se aprecia bastante coincidencia entre las distintas series de  $p_f$ ; a pesar de ésto, la tendencia a aumentar  $q_u$  con  $p_f$ , dada una misma  $w_c$ , se define claramente para humedades en la rama seca de la curva de compactación. En CH-La Peña (Fig. 4.21) el aumento de  $q_u$  al crecer  $p_f$ , para cierto  $w_c$ , se presenta muy atenuado hasta  $p_f = 50\%$ ; a partir de este valor, el incremento de  $q_u$  con  $p_f$  es notable en prácticamente todo el intervalo de  $w_c$  ensayado.

El módulo de deformabilidad inicial,  $M_o$ , graficado en términos del contenido de agua de compactación,  $w_c$ , representa la deformabilidad de probetas compactadas por amasado y sometidas a ensayos de compresión simple. En SM-San Vicente, SC-Chicoasén y SC-Chicoasén-San Roque, se puede apreciar que para misma  $w_c$ ,  $M_o$  aumenta al incrementar  $p_f$ , tornándose así menos deformable el material, a pesar de registrarse valores menores del peso volu métrico seco,  $\gamma_d$ . Esto es explicable si consideramos que para un mismo  $w_c$ , el material con  $p_f$  mayor se encuentra más seco - (obsérvese el desplazamiento de las curvas de compactación en las Figs. 4.23 a 4.27, Apéndice 4).

En CH-La Peña y MH-Necaxa, la deformabilidad aumenta al disminuir  $p_f$ , para un mismo  $w_c$ , pero es menos pronunciada que en los materiales SM y SC anteriormente mencionados, debido a la disgregación de grumos durante la compactación; sin embargo, la tendencia a aumentar el módulo (disminuir la deformabilidad)

con la disminución de la cantidad de grumos, se define claramente en el material MH-Necaxa, cuando  $w_c$  corresponde a la rama seca de la curva de compactación. Las curvas  $q_u$  vs  $w_c$  y  $M_o$  vs  $w_c$ , correspondientes a distintos valores de  $p_f$ , "coinciden" a partir de  $w_c = 40\%$ ; no así las curvas  $\gamma_d$  vs  $w_c$ , lo cual revelaría la existencia de grumos en el material compactado con esa humedad o mayor, pero a la vez muestra que esos grumos son plásticos, debido a los altos valores de  $w_c$ .

**Consolidación :** los especímenes ensayados en consolidación se compactaron en la rama húmeda de la curva  $\gamma_d$  vs  $w_c$ , tratando de mantener el mismo grado de saturación inicial  $S_r$ , por lo cual la humedad inicial de compactación de la mezcla fue diferente en cada caso. Para el suelo SC-Chicoasén-San Roque, se observa un aumento en el coeficiente de compresibilidad volumétrica unitaria,  $m_v$ , al incrementar  $p_f$  (Fig. 4.32). Como no se conoce la distribución del agua entre las fracciones fina y gruesa de la mezcla, se calculó la humedad de la matriz fina en cada espécimen, suponiendo tres grados de saturación de gruesos,  $S_{rg} = 0, 50$  y  $100\%$ . Los resultados se presentan en la Tabla N° 5.1 y de allí se concluye que por la baja porosidad de los granos en este suelo, la humedad de la matriz fina es prácticamente la misma en los cuatro casos ensayados,  $p_f = 30, 50, 75$  y  $100\%$ ; la presencia de granos en la fracción gruesa del suelo es la causa de que disminuya la compresibilidad del material. En efecto, la incorporación de elementos rígidos (granos) en el suelo es equivalente a reducir el espesor de material compresible (finos) y por ende la compresibilidad de la mezcla. En el caso del suelo SH-San Vicente, los  $m_v$  son comparables en los cuatro casos ensayados y la revisión de las condiciones de la matriz fina para tres valores de  $S_{rg}$  (Tabla N° 5.1), muestra que para mismo  $S_{rg}$ , la humedad en los finos aumenta al disminuir  $p_f$ , por lo cual el resultado de las pruebas de consolidación, en cuanto a  $m_v$  se refiere, es consecuencia de una compensación entre dos tendencias opuestas:

- 1) Al aumentar la proporción de granos ( $p_g$ ) de la fracción gruesa, el material tiende a rigidizarse, por lo visto en SC-Chicoasén- San Roque.
- 2) Al aumentar  $p_g$ , se incrementa el contenido de agua de los finos (Tabla N° 5.1) y su compresibilidad volumétrica.

TABLA N° 1

VALORES PROMEDIO DE POROSIDAD DE GRUMOS Y GRANOS, PARA LOS CINCO SUELOS ENSAYADOS

Material	Porosidad de grumos o granos $n_g$ en %
Chicoasén	20.0
San Vicente	41.0
San Roque	10.0
La Peña	39.0
Necaxa	50.0

.TABLA No. 2.1

PROPIEDADES INDICE DE LOS SUELOS ENSAYADOS

Condiciones de Prueba y Material	SC-Chicoasén LL(%) LP(%) Ip	SM-San Vicente LL(%) LP(%) Ip	CH-La Peña LL(%) LP(%) Ip	NH-Mecana LL(%) LP(%) Ip				
Del material almacenado (secado al ambiente y pasado por la malla No. 4, aumentando humedad para determinar LL)								
Fracción del material integral que pase por la malla No. 40.	30.7 20.5 10.2	32.9 26.4 6.5	69.4 31.1 38.3	74.0 50.3 23.7				
Densidad de Sólidos Material Integral	Procedimiento A* B** 2.83 2.76	Procedimiento A* B** 2.71 2.64	Procedimiento A* B** 2.65 2.54	Procedimiento A* B** 2.94 2.84				
Malla No	Granulometría (en porcentaje que pasa)							
	Vfa Húmeda	Vfa Seca	Vfa Húmeda	Vfa Seca	Vfa Húmeda	Vfa Seca	Vfa Húmeda	Vfa Seca
4	100	100	100	100	100	100	100	100
10	74	60	91	88	100	65	100	72
20	44	24	76	73	100	41	100	43.5
40	32	12	57	53	99	23	100	19
60	29	8	46	41	98	14	100	9
100	27	6	36	30	95	7	100	6
200	26	4	25	17	90	4	98	2.5

\* procedimiento aceptado para suelos finos, Ref. 14.  
\*\* procedimiento aceptado para arenas, Ref. 14.

TABLA N° 4.1

PROPIEDADES INDICE PARA DIFERENTES FRACCIONES

Condiciones de Prueba y del material	SC-Chicoasón			SM-San Vicente			CM-La Peña			MH-Mecana		
	LL(%)	LP(%)	IP	LL(%)	LP(%)	IP	LL(%)	LP(%)	IP	LL(%)	LP(%)	IP
Del material almacenado (secado al ambiente y pasado por la malla N° 4, aumentando humedad para determinar LL)												
Fración que pasa la malla N° 40.	30.7	20.5	10.2	32.9	26.4	6.5	69.4	31.1	30.3	74.0	50.3	23.7
Fración comprendida entre las mallas N° 40 y N° 200.	29.8	20.2	9.6	31.1	30.5	0.6	65.5	29.5	36.0	76.7	51.6	25.1
Fración que pasa la malla N° 200.	37.4	23.4	14.0	43.9	34.0	9.9	81.0	37.0	44.0	73.6	45.5	28.1
Densidad de Sólidos	Procedimiento			Procedimiento			Procedimiento			Procedimiento		
	AA	BA*		AA	BA*		AA	BA*		AA	BA*	
Material Integral	2.83	2.76		2.71	2.64		2.65	2.54		2.94	2.84	
Fración pasa la malla N° 4 y es retenida en la N° 200.	2.82	2.76		2.74	2.65		2.66	2.55		2.90	2.81	
Fración que pasa la malla N° 200.	2.77	2.73		2.60	2.60		2.64	2.49		2.87	2.82	

\* procedimiento aceptado para suelos finos, Ref. 14.

\*\* procedimiento aceptado para arenas, Ref. 14.

TABLA N° 5.1

OBTENCIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA DE LOS FINOS PARA LOS  
MATERIALES ENSAYADOS EN CONSOLIDACIÓN

SC-CHICASEN-SAN ROQUE

Pf %	w <sub>c</sub> %	γ <sub>d</sub> gr/cm <sup>3</sup>	n <sub>g</sub> %	e <sub>g</sub>	s <sub>rm</sub> %	s <sub>rg1</sub> %	s <sub>rg2</sub> %	s <sub>rg3</sub> %	w <sub>g2</sub> %	w <sub>g3</sub> %	w <sub>f1</sub> %	w <sub>f2</sub> %	w <sub>f3</sub> %
30	9.4	2.161	10.0	0.11	91.2	0.0	50.0	100	2.0	3.9	31.3	26.7	22.2
50	13.4	1.969	10.0	0.11	90.5	0.0	50.0	100	2.0	3.9	26.8	24.8	22.9
75	17.5	1.799	10.0	0.11	89.6	0.0	50.0	100	2.0	3.9	23.3	22.7	22.0
100	23.2	1.628	0.0	0.0	92.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	23.2	23.2	23.2

SN-SAN VICENTE

Pf %	w <sub>c</sub> %	γ <sub>d</sub> gr/cm <sup>3</sup>	n <sub>g</sub> %	e <sub>g</sub>	s <sub>rm</sub> %	s <sub>rg1</sub> %	s <sub>rg2</sub> %	s <sub>rg3</sub> %	w <sub>g2</sub> %	w <sub>g3</sub> %	w <sub>f1</sub> %	w <sub>f2</sub> %	w <sub>f3</sub> %
30	29.4	1.399	41.0	0.69	87.4	0.0	50.0	100	12.6	25.2	98.0	68.6	39.2
50	31.3	1.365	41.0	0.69	88.6	0.0	50.0	100	12.6	25.2	62.6	50.0	37.4
75	33.5	1.297	41.0	0.69	85.7	0.0	50.0	100	12.6	25.2	44.7	40.5	36.3
100	36.1	1.282	0.0	0.0	90.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	36.1	36.1	36.1

Donde :

- Pf = porcentaje inicial de finos
- Pg = porcentaje inicial de gruesos
- w<sub>c</sub> = humedad de compactación de la mezcla
- γ<sub>d</sub> = peso volumétrico seco
- n<sub>g</sub> = porosidad de granos, de los datos experimentales reportados en la Tabla N° 4.2

$e_g$  = relación de vacíos de granos

$S_{rm}$  = grado de saturación del material

$S_{rg1}$  = grado de saturación de granos para la condición 1

$S_{rg2}$  = grado de saturación de granos para la condición 2

$S_{rg3}$  = grado de saturación de granos para la condición 3

$w_g$  = contenido de agua de los granos, calculado como

$$w_g = \frac{e_g \times S_{rg}}{G_{sg}}$$

$w_{g2}$  y  $w_{g3}$  = contenido de agua de los granos para las condiciones 2 y 3 respectivamente.

$w_f$  = contenido de agua de la matriz fina, calculada de

$$w_c = p_f \times w_f + p_g \times w_g$$

$w_{f1}$ ,  $w_{f2}$  y  $w_{f3}$  = contenido de agua de la matriz fina para las condiciones 1, 2 y 3 respectivamente.

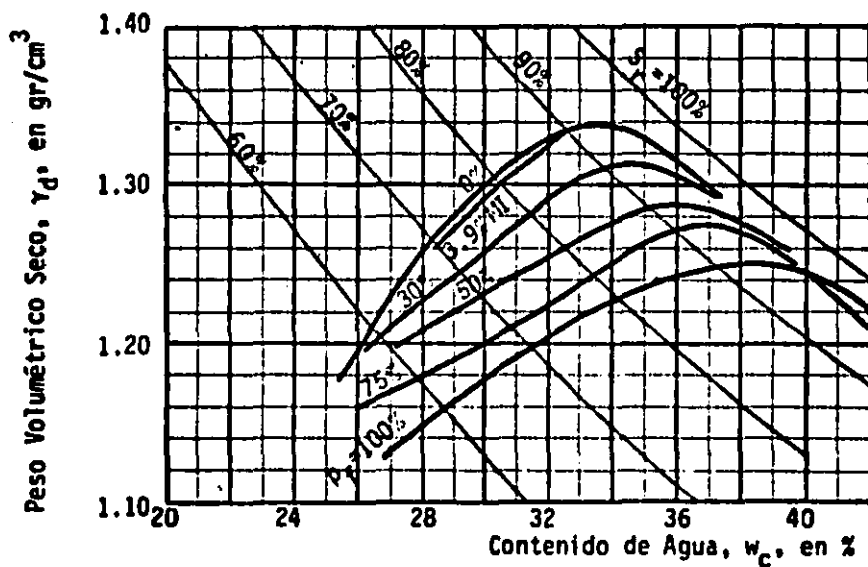
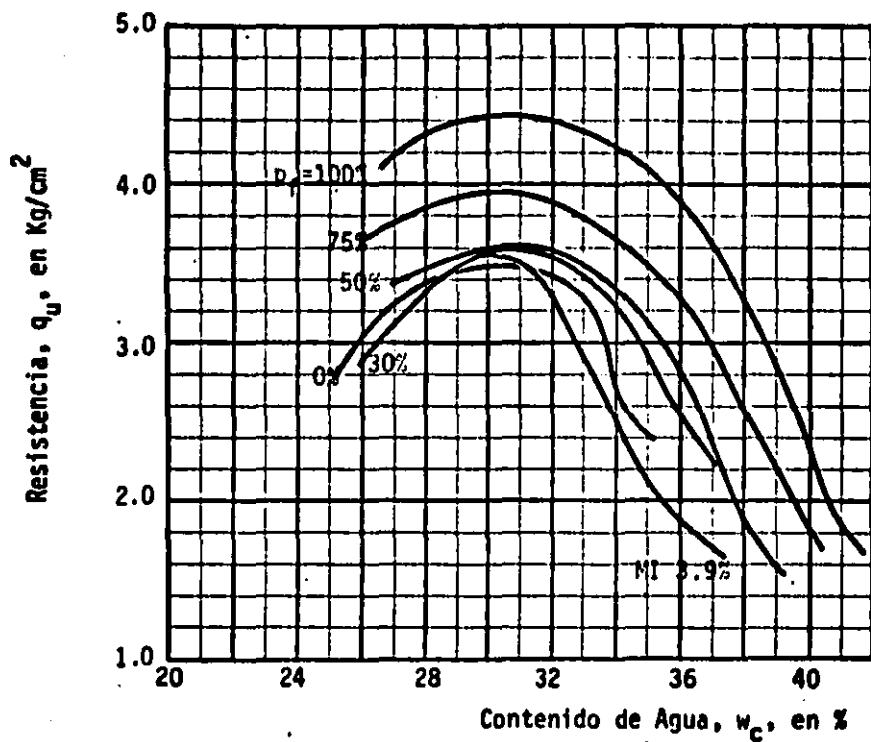


Fig. 4.21 Curvas de compactación y resistencia en compresión no confinada, mezclas de finos y gruesos. ( CH-La Peña )



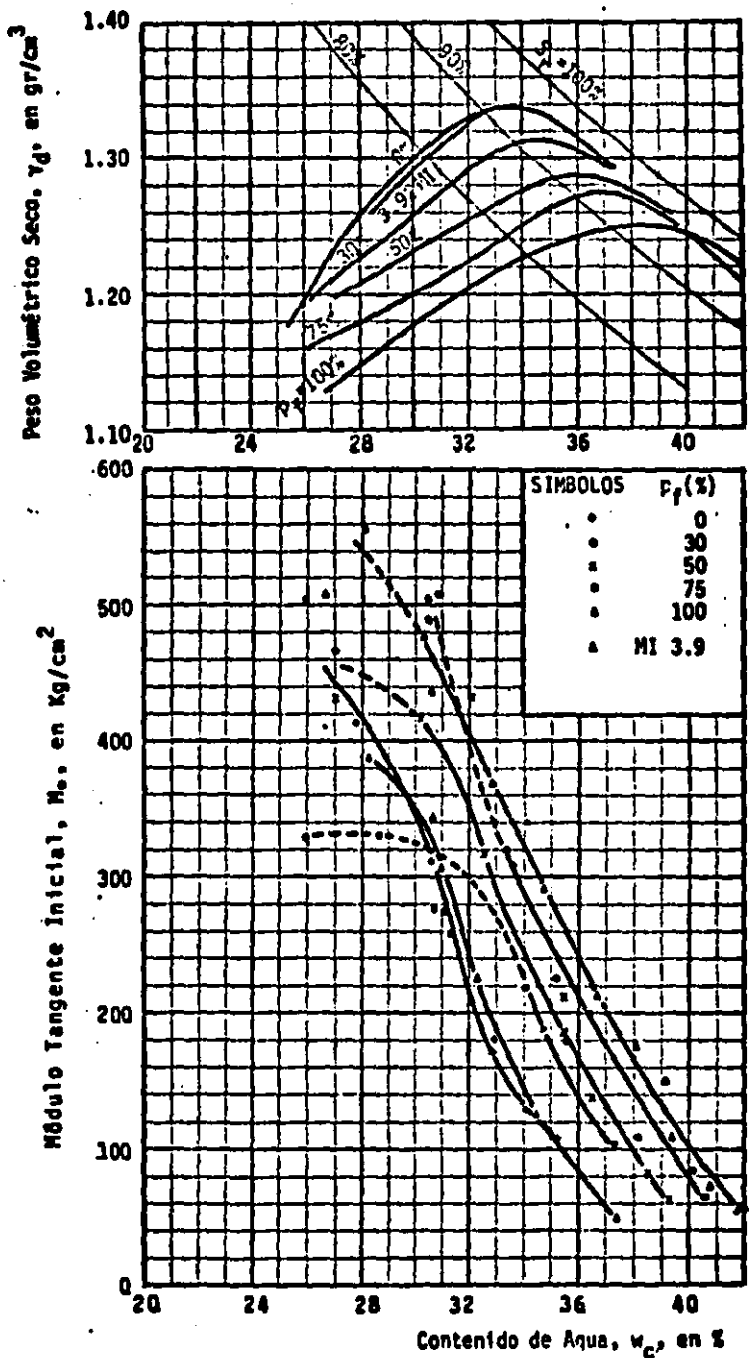


Fig. 4.26

Curvas Peso Volumétrico Seco y Módulo Tangente Inicial vs Contenido de Agua, para diferentes Porcentajes de Finos. (CH-La Peña; Amasado 27-10-10)

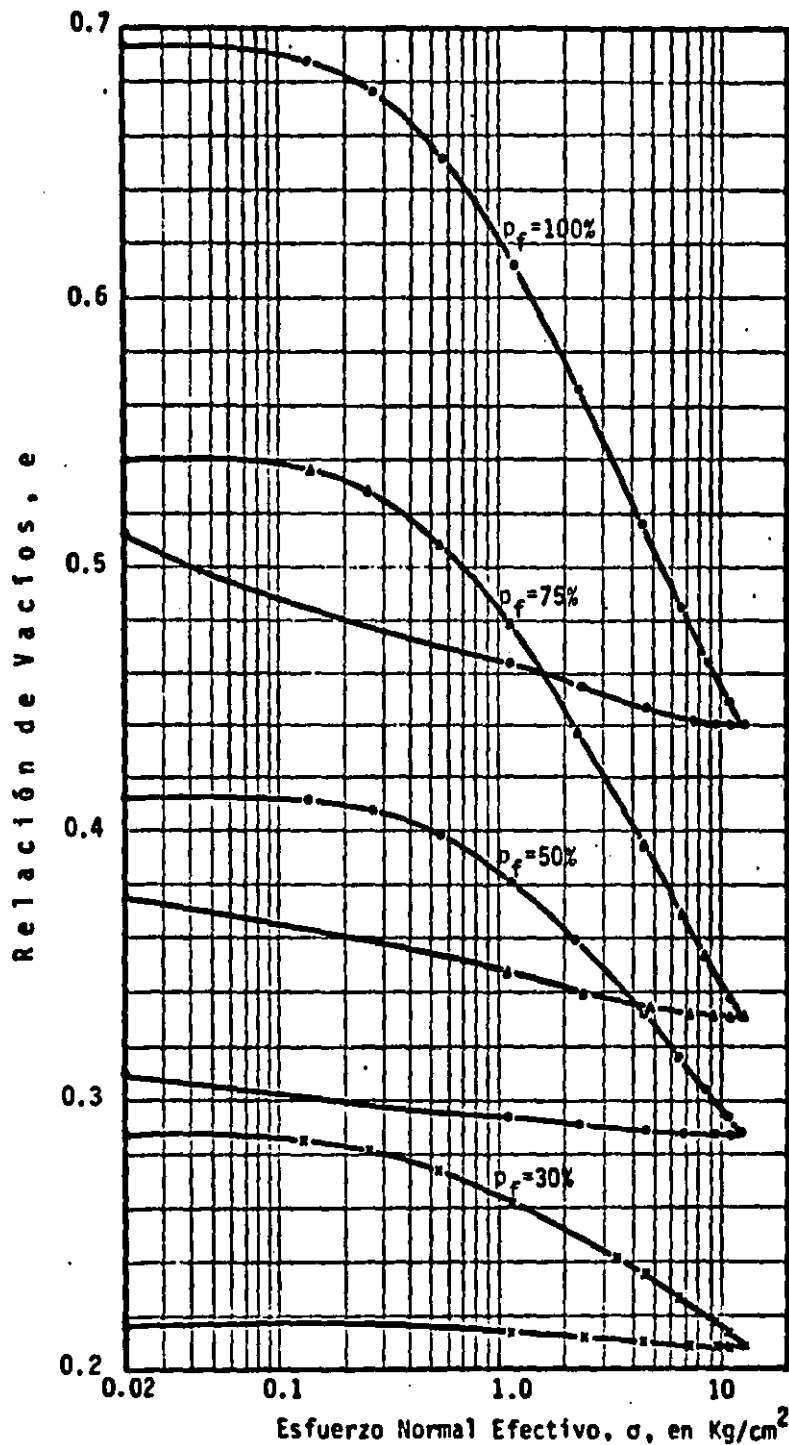


Fig. 4.28. Curvas de compresibilidad para diferentes porcentajes de finos, escala semilog. (SC-Chicoasén-San Roque).

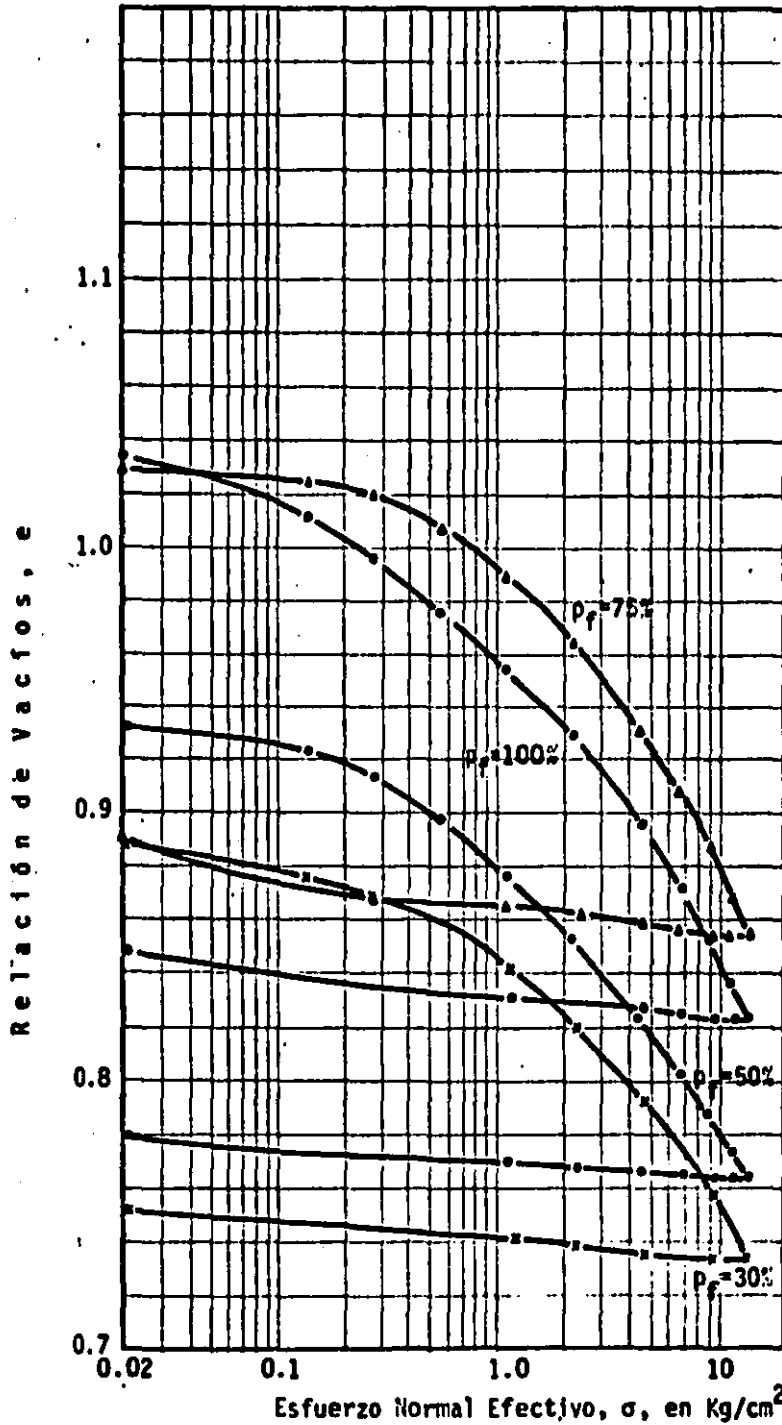


Fig. 4.30. Curvas de compresibilidad para diferentes porcentajes de finos, escala semilog. (SM-San Vicente).

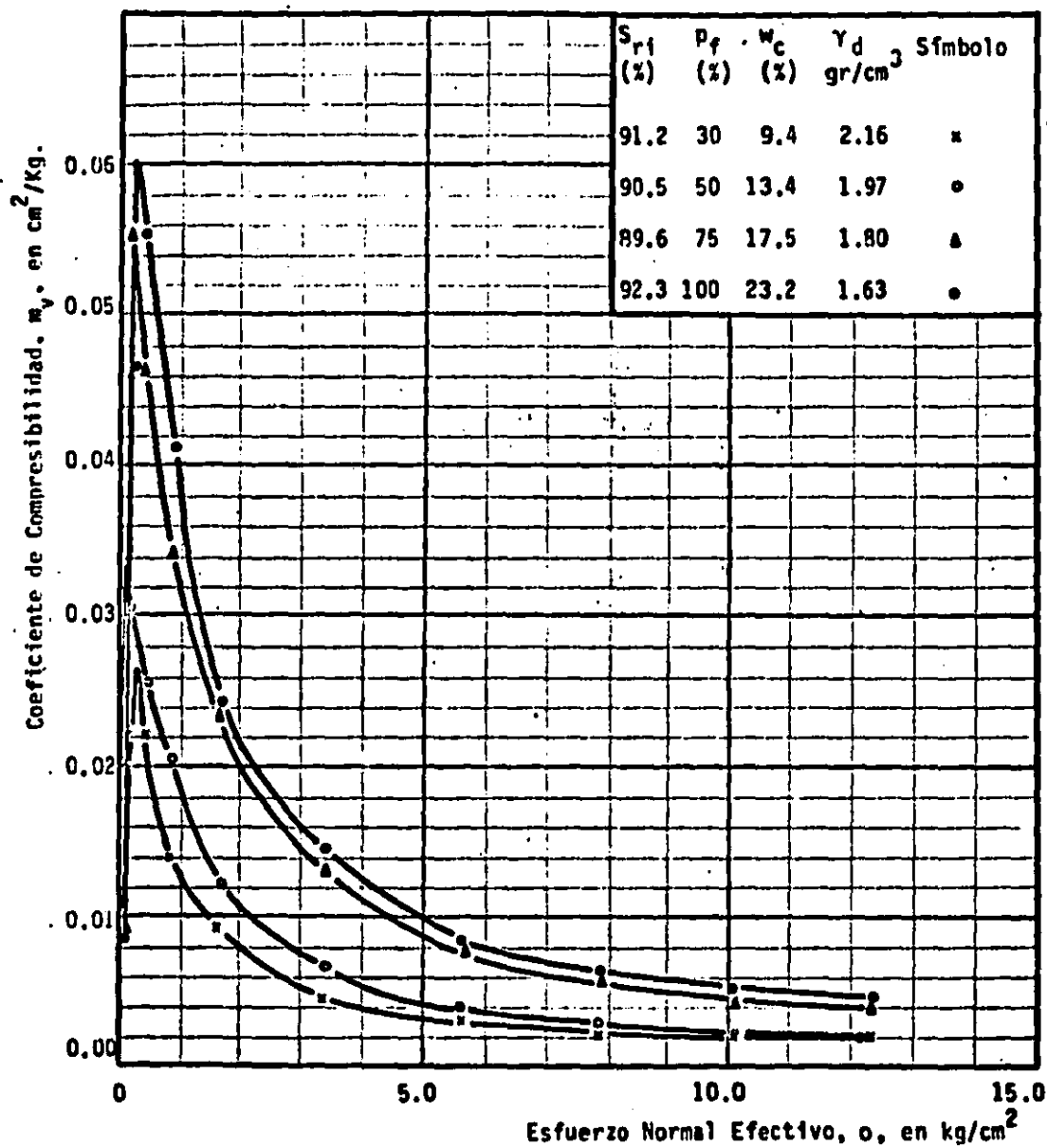


Fig. 4.32 Curvas coeficiente de compresibilidad volumétrica unitaria - vs esfuerzo normal efectivo, para diferentes porcentajes de finos (SC-Chicoasen-San Roque).

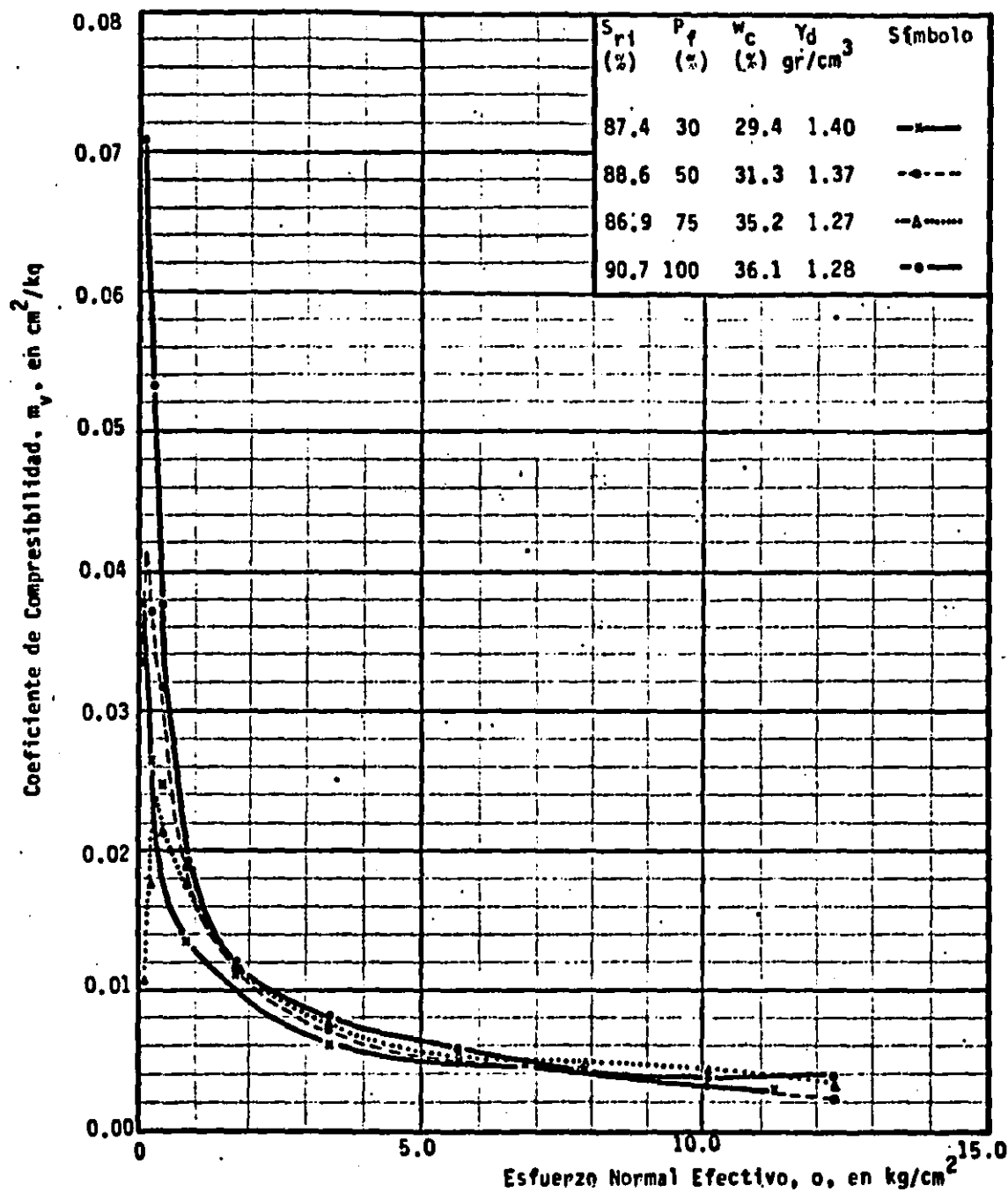


Fig.4.33 Curvas coeficiente de compresibilidad vs esfuerzo normal efectivo para diferentes porcentajes de finos (SM-San Vicente)

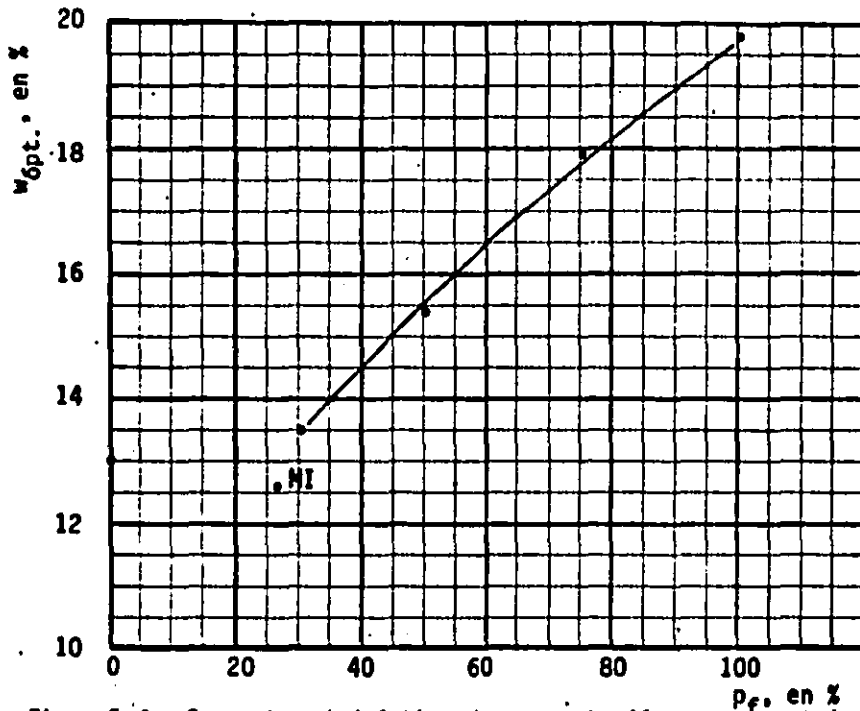


Fig. 5.1 Curva humedad óptima de compactación vs porcentaje de finos. (SC-Chicoasén; Amasado 27-10-10)

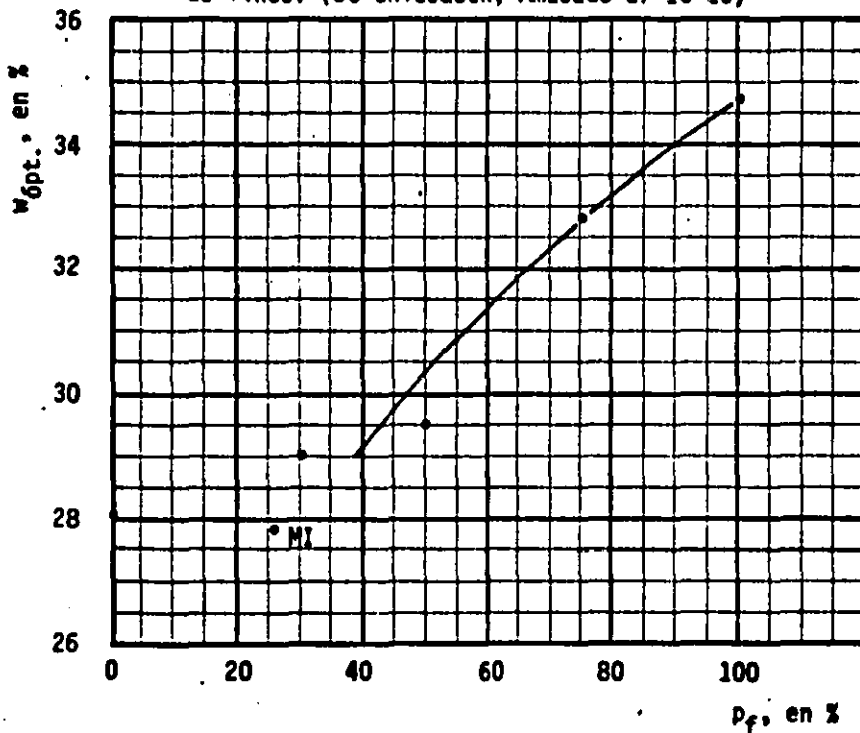


Fig. 5.2 Curva humedad óptima de compactación vs porcentaje de finos. (SM-San Vicente; Amasado 27-10-10)

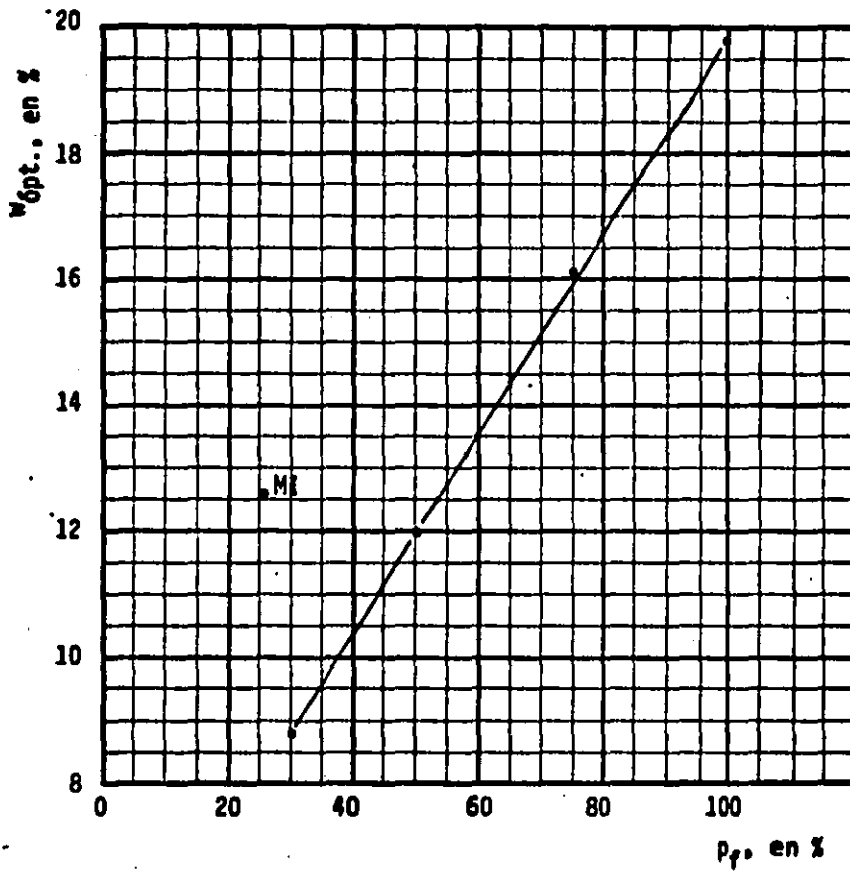


Fig. 5.3 Curva humedad óptima de compactación vs porcentaje de finos. (SC-Chicoasén-San Roque; Amasado 27-10-10)

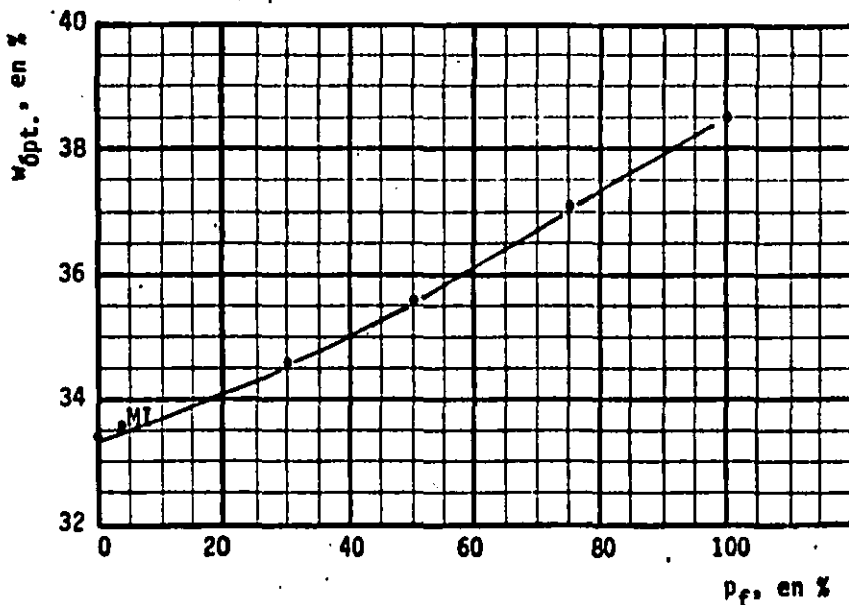


Fig. 5.4 Curva humedad óptima de compactación vs porcentaje de finos. (CH-La Peña; Amasado 27-10-10)

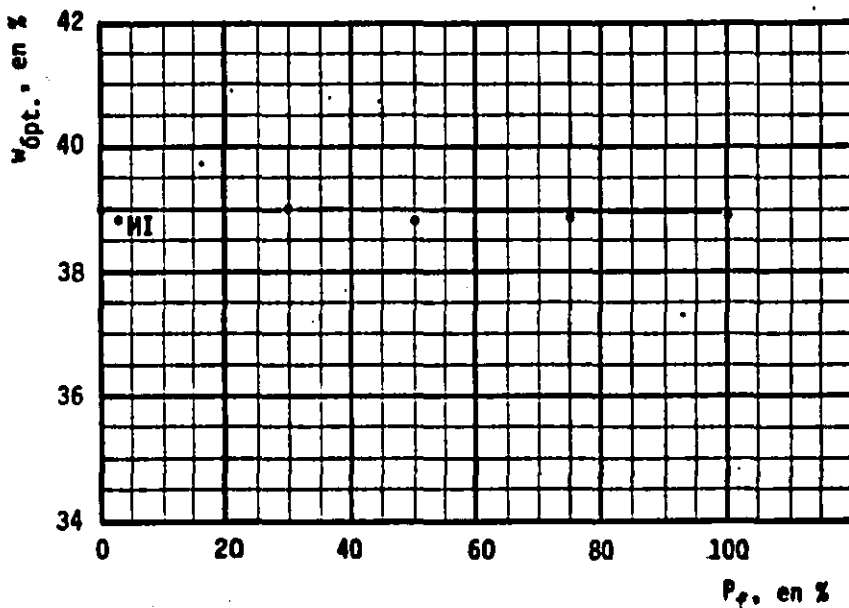


Fig. 5.5 Curva humedad óptima de compactación vs porcentaje de finos. (MH-Necaxa; Amasado 27-10-10)



## 2 CONCLUSIONES

- Debido a la importancia de saber si la fracción gruesa de un suelo (pasa malla N°4 y retiene malla N°200) está constituida por grumos o por granos, y de tener una idea de la porosidad de éstos últimos, se recomienda determinar los límites de Atterberg con el material que pasa la malla N°40 y es retenido en la N°200. Invariablemente se comprobará que los granos no son plásticos, mientras que los grumos exhibirán un índice de plasticidad apreciable, a su vez dependiente de la intensidad del amasado al preparar el material para la prueba.
- En la determinación del límite líquido, LL y del límite plástico, LP, se pueden tener asociaciones de partículas que almacenan agua; esto da origen a valores del LL no representativos del comportamiento de partículas arcillosas aisladas, mientras que en la obtención del -

índice de plasticidad,  $I_p$ , la influencia del agua almacenada puede anularse ya que esta determinación es la diferencia de dos contenidos de agua. Lo anterior conlleva a ubicar un material en la carta de plasticidad con mayor LL del real. Esta puede ser la explicación del porqué muchos suelos residuales y saprolitos (muy susceptibles de formar asociaciones) clasifican como limos, mientras que la caracterización mineralógica revela que están constituidos principalmente por minerales arcillosos. El suelo MH-Necaxa es uno de estos materiales.

- La determinación de la densidad de sólidos para la fracción gruesa de un suelo (entre mallas N° 4 y N° 200) por los dos procedimientos aceptados (para arenas y para suelos finos, Ref. 14), permite reconocer la presencia de grumos y de granos porosos en dicha fracción gruesa, si se registran diferencias entre las determinaciones.
- Se comprobó, para los materiales ensayados, que la porosidad de los granos en un mismo material no varía con el tamaño de éstos, en el intervalo probado (4.76 mm a 1.19 mm).
- La presencia de granos porosos en la fracción gruesa de un material (pasa malla N° 4 y retiene malla N° 200), para una misma energía de compactación, influye del siguiente modo:
  - 1) cuanto mayor es la cantidad de granos porosos, mayor  $\gamma_d$  y menor humedad óptima, y 2) cuanto mayor es la porosidad de los granos menor valor de  $\gamma_d$ .

La misma tendencia a aumentar  $\gamma_d$  y disminuir la humedad óptima se tiene para el caso de grumos en la fracción gruesa del material, pero más atenuada debido a la alta porosidad

de los grumos y a la disgregación de los mismos durante la compactación.

Se puede tener el caso de grumos de porosidad muy alta, - donde al aumentar su proporción en el material se obtiene mayor  $\gamma_d$  conservando aproximadamente la misma humedad óptima de compactación. En este caso, la porosidad de los grumos y de la matriz fina una vez compactada, son comparables. La presencia de grumos en la fracción gruesa (entre mallas N° 4 y N° 200) del material influye en el peso volumétrico seco, disminuyéndolo en la medida que éstos se disgreguen durante la compactación originando finos (pasa malla N° 200).

- Las normas ASTM recomiendan disgregar y tamizar un suelo a compactar por la malla N° 4 (4.76 mm), y el material retenido en dicha malla, que no es fácilmente disgregable, - reemplazarlo por el mismo peso de material que pase por la malla N° 4. Según las evidencias de este trabajo, este procedimiento ocasiona diferencias fuertes en los resultados experimentales.
- Para una misma humedad de compactación, a mayor porcentaje de gruesos (entre mallas 4 y 200) menor resistencia en compresión simple,  $q_u$ , a pesar de tenerse mayor peso volumétrico seco  $\gamma_d$ . Esto se debe a que a partir de cierto  $p_f$  (=30%) la resistencia es suministrada en su mayor parte - por los finos (pasan malla N° 200). En el caso de tener granos en la fracción gruesa del material (pasa malla N° 4 y retiene malla N° 200), la resistencia  $q_u$  dependerá de la humedad de los finos que los acompañan, y en esta humedad influye la porosidad de los granos. En el caso de tenerse grumos en la fracción gruesa del suelo, además de lo anterior, la presencia de éstos puede aumentar la resisten

cia  $q_u$  en la medida que esos grumos se disgreguen o rompan durante la compactación originando finos.

- En las pruebas de compresión simple, para una misma humedad de compactación  $w_c$ , a mayor porcentaje de gruesos menor módulo de deformación inicial,  $M_0$ , tornándose así más deformable el material, a pesar de tenerse mayor peso volumétrico seco,  $\gamma_d$ . Esto se explica ya que para misma  $w_c$ , el punto de referencia se ubica en la rama seca de la curva de compactación para el material con porcentaje de finos mayor, corriéndose hacia la rama húmeda al aumentar el porcentaje de gruesos; de ahí la importancia de la presencia de grumos o granos porosos en la distribución del agua en la mezcla.
- De mantener el contenido de agua de la matriz fina constante, el coeficiente de compresibilidad volumétrica unitaria,  $m_v$ , disminuye al incrementarse la proporción de granos de la fracción gruesa (pruebas con SC-Chicoasén-San Roque, Fig. 4.32 y Tabla N° 5.1).
- Al aumentar el contenido de agua de los finos, tiende a aumentar el coeficiente de compresibilidad volumétrica unitaria,  $m_v$ , (caso de SM-San Vicente, Fig. 4.33 y Tabla N° 5.1).
- Los resultados presentados en este trabajo, permiten asegurar que un manejo inadecuado del material a compactar, alterando su granulometría y originando finos, da lugar a cambios importantes en su comportamiento. Sin embargo, las especificaciones usuales reportadas en la literatura no toman en cuenta éste ni otros factores que influyen en los resultados experimentales.

### 3. RECOMENDACIONES

- 1) Los límites de Atterberg determinados en la fracción que pasa la malla N° 40 y es retenida en la N° 200, permiten reconocer la presencia de grumos o de granos porosos en la fracción gruesa de un suelo (entre mallas 4 y 200) así: los grumos exhibirán un índice de plasticidad apreciable, dependiendo del amasado durante la preparación del material para la prueba, mientras que los granos no exhibirán plasticidad.
- 2) La diferencia de resultados entre las determinaciones de densidad de sólidos en una "arena"\* siguiendo los dos procedimientos aceptados (para arenas y para suelos finos, Ref. 14), permite reconocer la presencia de grumos o granos porosos en ese material. La identificación de si son grumos o granos porosos se puede lograr mediante la recomendación 1).
- 3) Si se quiere determinar la densidad de sólidos de un material formado por granos porosos, es conveniente disgregar los granos en un mortero, dejarlos sumergidos en

---

\* Las comillas indican que la clasificación de arena se hace únicamente por granulometría.

agua durante 24 horas y someterlos a un agitado estando sumergidos, antes de proceder a medir el volumen de sólidos en un picnómetro, hirviendo y sometiendo a vacío la mezcla agua-suelo; determinando después el peso de sólidos, secando el material al horno.

- 4) Cuando se tenga un suelo a compactar en laboratorio, se debe obtener su granulometría y conservarla en todos los ensayos si se quieren comparar resultados, pues una variación en la granulometría origina diferencias fuertes en los resultados experimentales.
- 5) La granulometría de un suelo puede no ser representativa de la clasificación del mismo ya que, un material puede ser clasificado como arena y estar formado por grumos o granos porosos. Si éste es el caso, los procedimientos establecidos para determinar propiedades índice en arenas no son aplicables.
- 6) Es un hecho conocido que a partir de cierto porcentaje de finos (= entre 25 y 30%), la matriz fina condiciona el comportamiento del material. El comportamiento de la matriz fina depende de la humedad que posea y en esta humedad juega un papel importante la porosidad de los granos de la fracción gruesa del suelo (entre mallas 4 y 200). Se recomienda por tanto, investigar cómo es la distribución del agua de un material entre sus dos fracciones componentes (fina y gruesa). Así, conociendo la porosidad de los granos y la cantidad de agua que toman, tendremos la humedad de la matriz fina y podremos estimar mejor el comportamiento de la mezcla.

## APENDICE 1 Estudios previos

### 1.1 Consideraciones preliminares

En el presente trabajo se recopilan los resultados de los ensayos de compactación y compresión no confinada, realizados en tres suelos por la Ing. Mónica Santiago M., de la Universidad Católica de Río de Janeiro, durante su estancia en el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Ref. 1); se presentan además los resultados obtenidos ensayando otros dos suelos y se analiza la influencia de grumos y granos porosos. Determinaciones directas de la porosidad de grumos y granos, así como ensayos de consolidación realizados con dos materiales de los cinco empleados, complementan el estudio.

La observación al microscopio permite distinguir varios tipos de granos (Fig. 1.1) (Ref. 2):

Tipo 1: *Granos sólidos e impermeables*: éstos tienen porosidad nula y alta resistencia a la rotura; un ejemplo típico es la arena de Ottawa.

Tipo 2 : *Granos impermeables con huecos inter*  
*nos*: estos granos son característicos de arenas de origen  
volcánico, que incluyen en la masa de cada grano huecos no  
comunicados al exterior; la resistencia a la rotura de es  
tos granos es variable, pero en general menor que la de  
los granos de Tipo 1; un ejemplo típico es la arena de  
La Soledad, Estado de Puebla.

Tipo 3 : *Granos porosos y rígidos*: están for  
mados por elementos soldados o cementados entre sí, por  
lo que son rígidos, poco sensibles a cambios de humedad y  
muy porosos; tal es el caso de la arena San Vicente, Es  
tado de México.

Tipo 4: *Grumos* formados por la asociación -  
(paquetes) de partículas: se clasifican como granos por  
su tamaño, pero en realidad son agregados de partículas -  
limosas y arcillosas, son porosos y de resistencia a la  
compresión que depende de la humedad y de la concentra---  
ción de iones disueltos en el agua intersticial; ésta es  
la condición predominante en los suelos residuales y sa  
prolfticos.



La porosidad de granos es nula en los del Tipo 1 y 2; en cambio, es significativa en los clasificados como Tipos 3 y 4. Los granos Tipo 2 y 3 pueden fragmentarse al cambiar el nivel de esfuerzos; para esfuerzos muy altos, los granos del Tipo 1 también se rompen, mientras que los grumos son susceptibles de rotura cuando el contenido de agua es bajo. A partir de cierta humedad, que depende del suelo, las asociaciones de partículas limoarcillosas se reblandecen y sufren deformación notable por efecto de los esfuerzos aplicados (no hay rotura).

Para distinguir grumos de granos, sean estos últimos del Tipo 1, 2 ó 3, se sugiere realizar el procedimiento para determinar los límites de Atterberg, con la fracción comprendida entre las mallas N° 4 y 200. Invariablemente se comprobará que los granos no son plásticos, mientras que los grumos exhibirán un índice de plasticidad apreciable y que dependerá de la intensidad del amasado durante la preparación del material para la prueba. Mediante estas determinaciones es posible tener también una idea de la porosidad de los granos, si se observa el contenido de agua requerido para moldear el suelo, tanto mayor cuanto más alto sea el valor de la porosidad.

## 1.2 Antecedentes

Ya en 1956 Terzaghi hacía notar la importancia de los grumos o asociaciones de partículas (Clusters) en el comportamiento de los suelos cohesivos. En carta a Géotechnique (Ref. 3) con fecha de octubre de 1956, comentando la tesis doctoral de G.H. Bolt (Ref. 4), señaló que las partículas por sí mismas no son necesariamente las de terminantes de las propiedades del material, sino más bien las asociaciones de ellas formando agregados o paquetes ; fundamentó esta conclusión en las microfotografías tomadas por Hast (Ref. 5) .

El procedimiento normalmente seguido en la preparación de un suelo fino para realizar ensayos de compactación, consiste en dejar secar al aire el material, desmoronarlo y luego tamizarlo por la malla N° 4, partiendo así de una cierta granulometría inicial de grumos. Como consecuencia de las diferencias encontradas entre las curvas granulométricas, para un material residual (MH-Necaxa) y otro procedente de un depósito de arcilla plástica (CH-La Peña), obtenidas utilizando mallas y las determinadas para los mismos materiales mediante el método de hidrómetro, -

después de tratar el suelo con el defloculante adecuado - (Fig. 1.2), se pensó investigar la influencia del tamaño de los grumos, tanto en pruebas de compresión no confinada como en ensayos de compactación (Ref. 6).

Era usual suponer que la adición de agua y la compactación destruyen los grumos, y por tanto, a igualdad de otros factores, los especímenes compactados tenían la misma condición inicial. Para comprobarlo se hicieron pruebas de compresión no confinada en especímenes compactados, con igual especificación de compactación y los métodos de impactos y amasado, para tres granulometrías de grumos, a saber :

- 1 Granulometría integral\* de grumos (pasan malla N°4 ).
- 2 Grumos finos (pasan malla N° 100, en seco).
- 3 Grumos gruesos (pasan malla N° 4 y son retenidos en la malla N° 8, en seco).

Los resultados obtenidos fueron los siguientes, Figs. 1.3 a 1.6. Se aprecia una ligera diferencia en el peso volumétrico seco  $\gamma_d$ , al ensayar diferentes fracciones de grumos, sobre todo en la rama seca de la curva de compac

---

\* En lo sucesivo se designará con la sigla MI.

tación. Sin embargo, es en la resistencia  $q_u$  donde las diferencias son más notables. La resistencia es mayor para los grumos finos, intermedia en el caso de la granulometría integral y menor en los especímenes formados con grumos gruesos.

Las diferencias de  $Y_d$  y  $q_u$  para el mismo  $w_c$  fueron menores en la compactación por amasado\* que las registradas aplicando impactos. Los especímenes compactados por impactos resisten hasta vez y media más que los densificados por amasado.

En consecuencia, los agregados de partículas y granos no se desintegran totalmente por efecto del agua y la compactación, y tienen influencia más o menos importante en la resistencia a la compresión no confinada, según el método de compactación y el material ensayado. Microfotografías tomadas a los especímenes compactados parecen confirmar las observaciones anteriores (Ref. 12).

En la ya mencionada Ref. 1, se presentan los resultados experimentales de las pruebas tendientes a analizar la influencia de las fracciones fina y gruesa (véase

---

\* La especificación 27-10-10 corresponde aproximadamente a la energía de compactación por impactos de  $6 \text{ Kg-cm/cm}^3$  (Ref.13).

definiciones en el inciso 1.2) en las propiedades de un suelo. Los ensayos se realizaron con tres materiales: el suelo de origen coluvial derivado de la alteración de lutitas SC-Chicoasén (Clasificación SUCS); el material de origen volcánico SM-San Vicente, y un tercero, mezcla de los finos del material Chicoasén y la arena San Roque, proveniente de un depósito aluvial y cuya granulometría se ajustó a la curva de la fracción gruesa del suelo SC-Chicoasén. Se realizaron pruebas de compactación por amasado con igual energía de compactación, y de resistencia a la compresión no confinada. Los especímenes ensayados se formaron mezclando los componentes fino y grueso de cada suelo en diferentes proporciones ( $p_f=0, 30, 50, 75$  y  $100\%$ )\*; además, se hicieron determinaciones con los suelos SM-San Vicente y SC-Chicoasén en su condición original (*material integral*).

Las gráficas con los resultados obtenidos se incluyen en el cuerpo del presente trabajo, Figs. 4.18, 4.19 y 4.20, y de ellas se concluye lo siguiente (Ref. 7) :

- El peso volumétrico seco  $Y_d$  aumenta al disminuir el porcentaje de finos, manteniendo constante la energía de compactación.

---

\*  $p_f$  = porcentaje de finos

- Los materiales con alto porcentaje de finos son los más resistentes.

- La resistencia a la compresión no confinada  $q_u$ , casi constante en la rama seca, en tanto que los valores de  $q_u$  se reducen apreciablemente en las series MI y  $p_f=0\%$  para los suelos SC-Chicoasén y SM-San Vicente. En estos mismos suelos, coincidencia de las curvas de compactación  $Y_d$  vs  $w_c$  para las series MI y  $p_f=0\%$ , no obstante que la segunda su puestamente no contiene finos.

- La resistencia  $q_u$  se incrementa bruscamente al pasar del estado ocluido al abierto\* en la proximidad de la humedad óptima.

- La resistencia  $q_u$  en el material SC-Chicoasén-San Ro que es constante en la rama seca para la serie  $p_f=75\%$ , en tanto que los valores de  $q_u$  se reducen apreciablemente en las series  $p_f=30\%$  y  $50\%$ .

---

\* Estado ocluido: conductos cerrados al exterior por el agua intersticial.

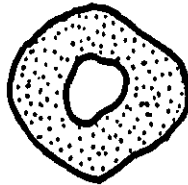
Estado abierto: conductos comunicados al exterior.

Granos Sólidos e  
Impermeables



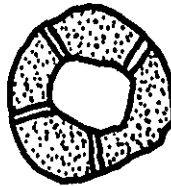
Arena de Ottawa  
 $n_g = 0$

Granos impermeables  
con huecos internos  
no comunicados al  
exterior.



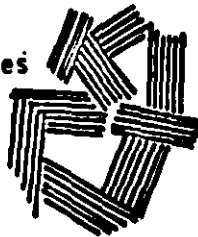
Arena La Soledad,  
Puebla.  
 $n_g = 0$

Granos Porosos



Arena San Vicente,  
Edo. de México.  
 $n_g > 0$

Grupos o asociaciones  
de partículas  
arcillosas.



Suelo residual de  
Necaxa, Puebla.  
 $n_g > 0$

Fig. 1.1 Tipos de granos clasificados como arena.

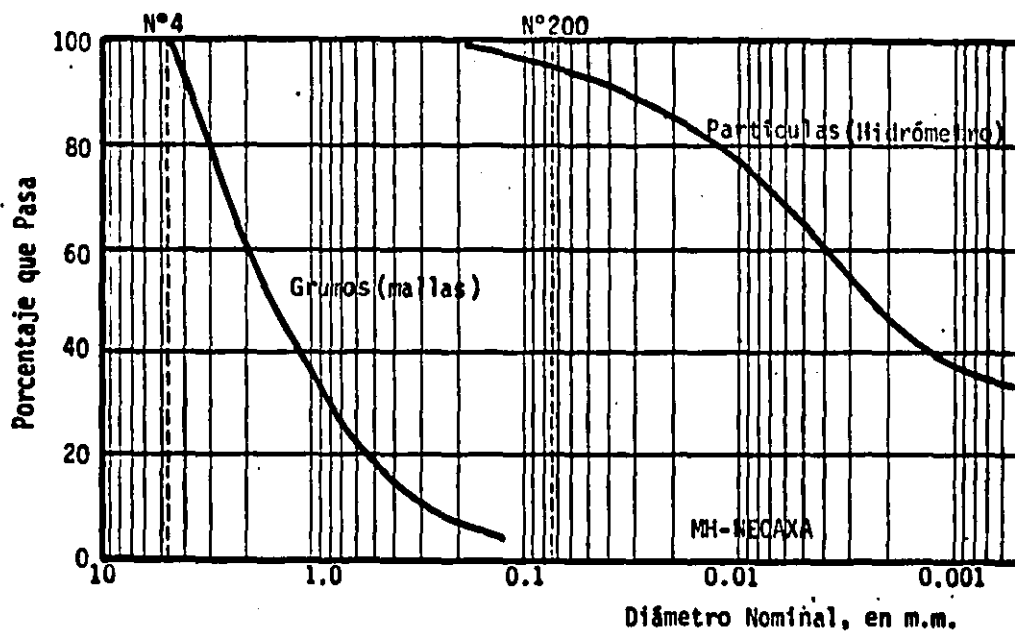
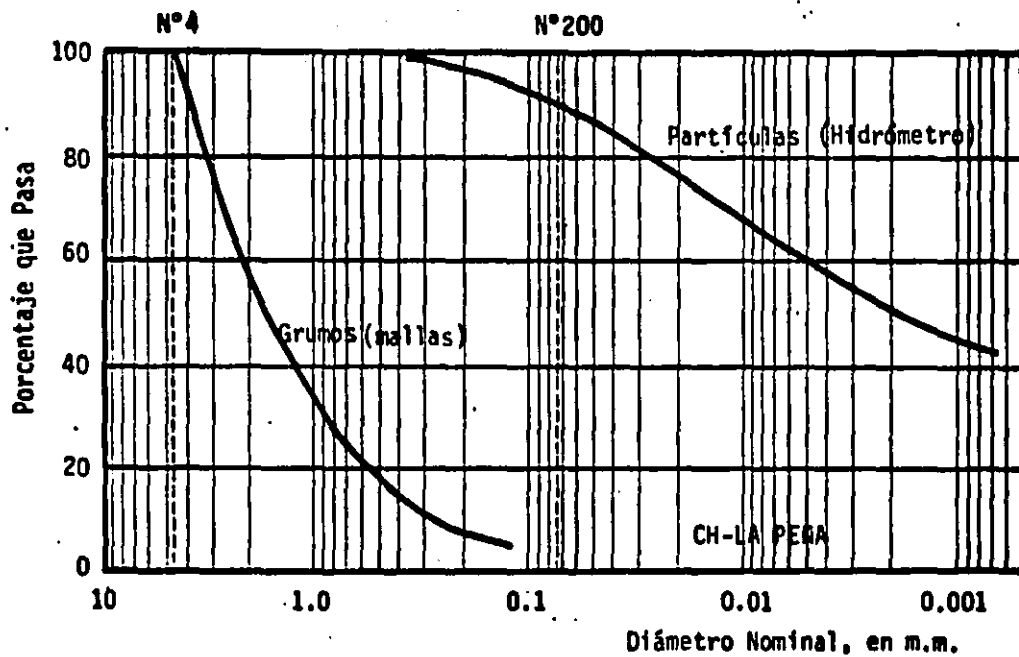


Fig. 1.2 Granulometrfas de *partículas* y de *grupos* formados secando el material previamente al ambiente, disgregándolo y tamizándolo por la malla N°4





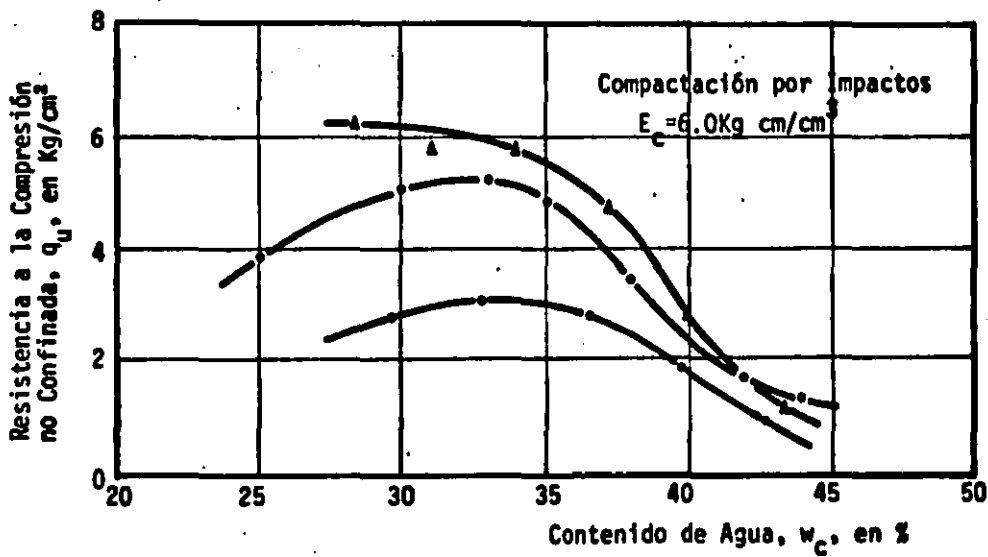
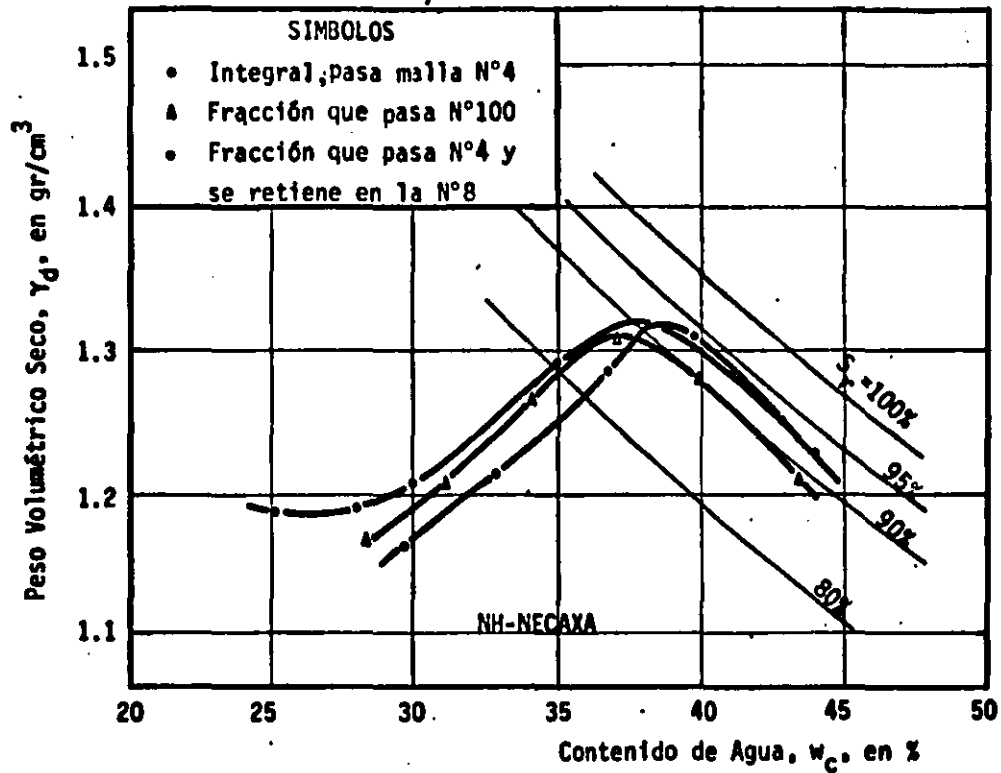


Fig. 1.3 Efecto de la granulometría de grumos del suelo secado al ambiente, sobre el peso volumétrico seco y la resistencia a la compresión no confinada. Compactación por impactos; MH-Necaxa.

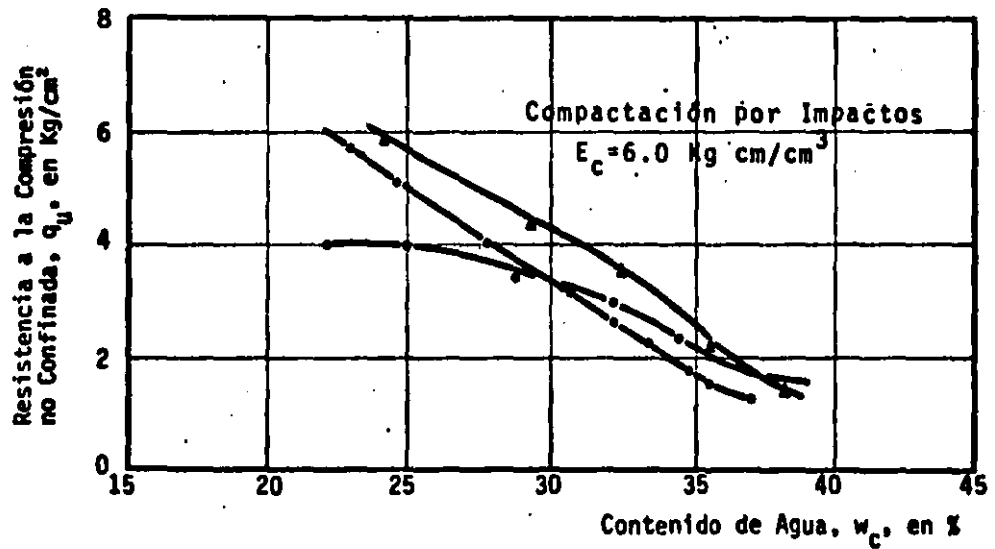
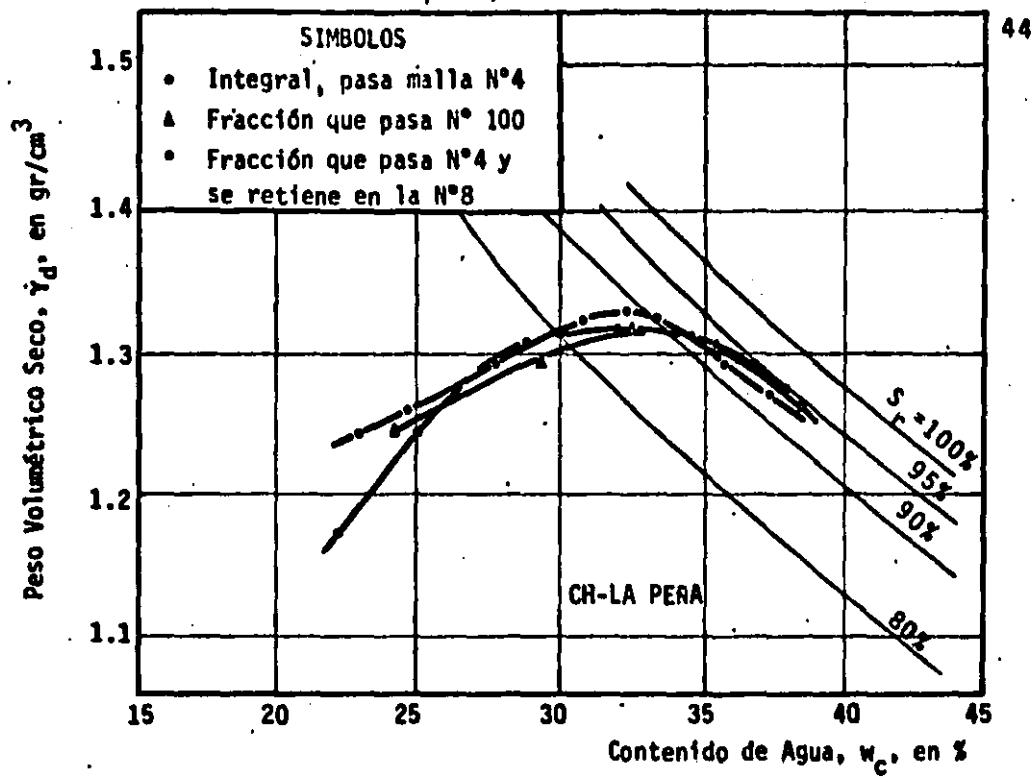


Fig. 1.4 Efecto de la granulometría de grumos del suelo secado al ambiente, sobre el peso volumétrico seco y la resistencia a la compresión no confinada. (CH-La Peña; Compactación por impactos)

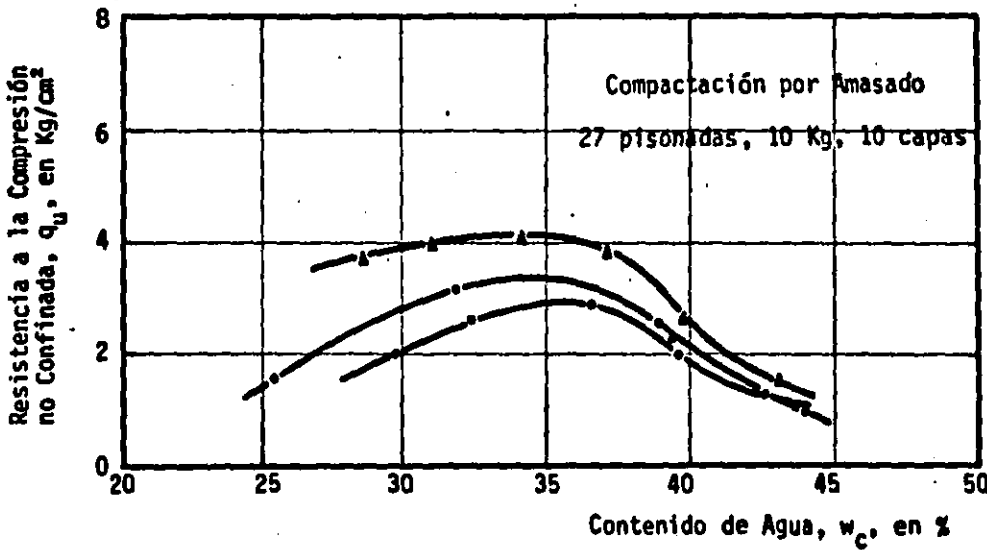
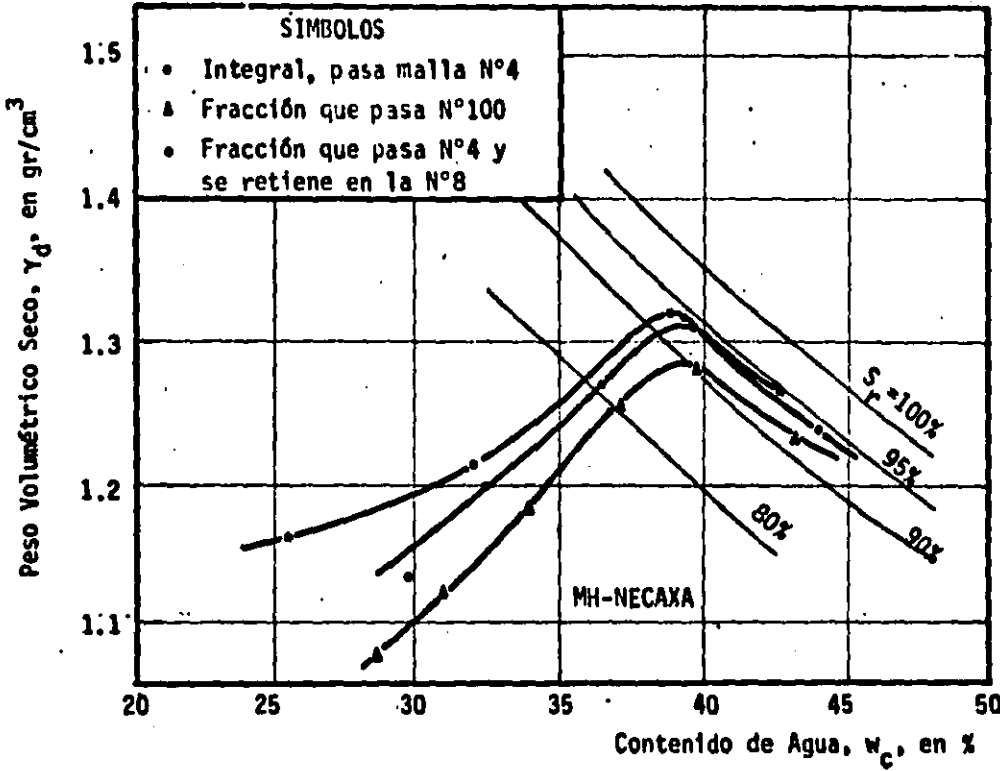


Fig. 1.5 Efecto de la granulometría de grumos del suelo secado al ambiente, sobre el peso volumétrico seco y la resistencia a la compresión no confinada. (MH-Necaxa; Amasado 27-10-10)

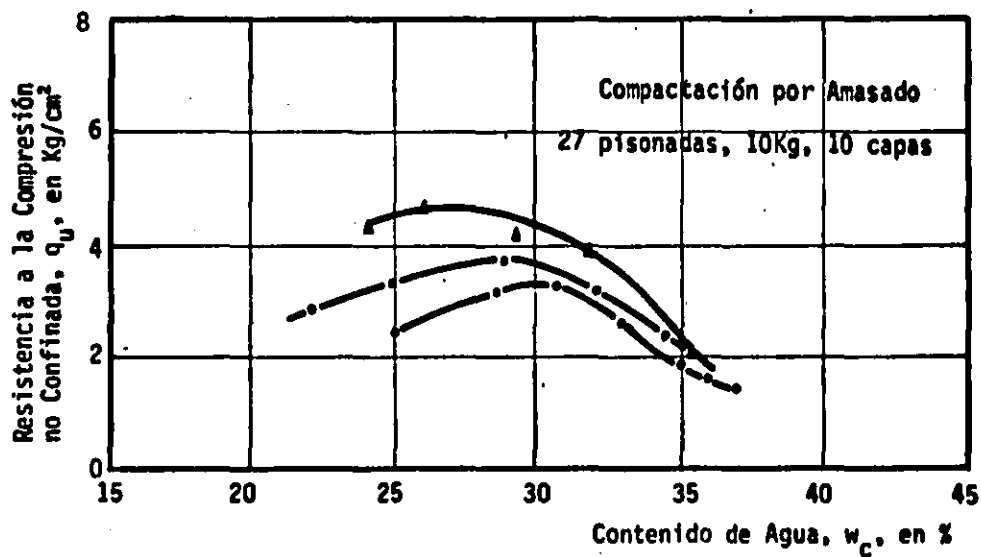
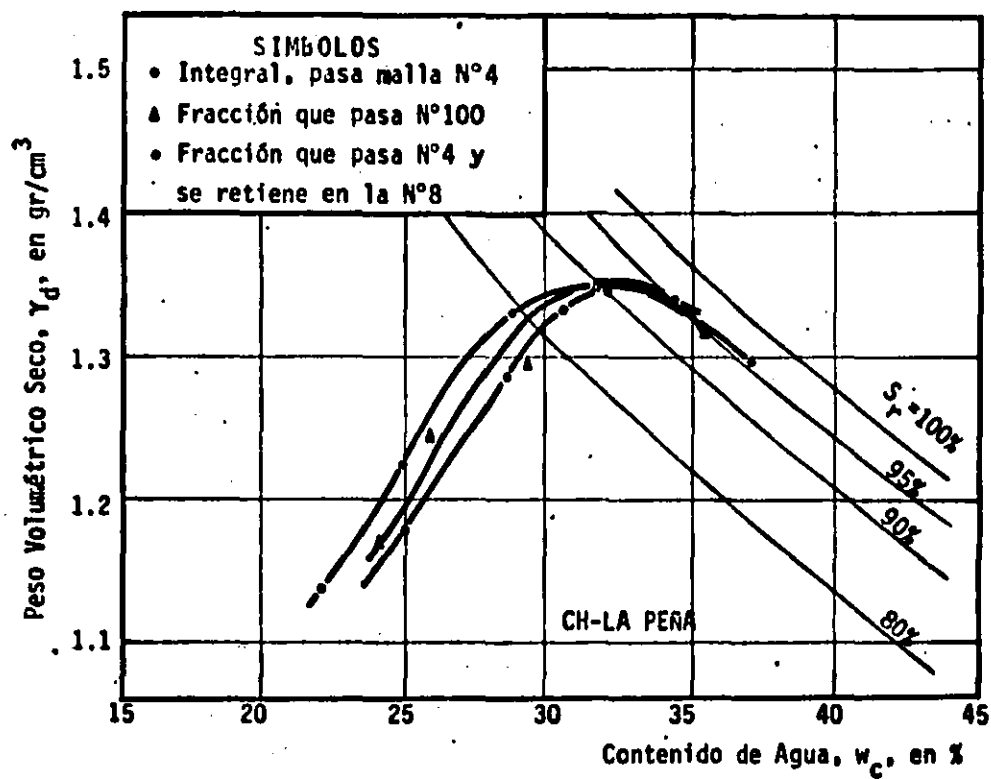


Fig. 1.6 Efecto de la granulometría de grumos del suelo secado al ambiente, sobre el peso volumétrico seco y la resistencia a la compresión no confinada. (CH-La Peña; Amasado 27-10-10)

**APENDICE 2 Descripción y propiedades de los materiales utilizados**

Los materiales utilizados fueron cinco suelos, en cuatro de los cuales la fracción menor que la malla N° 40 clasificó como: CL, CH, ML y MH, respectivamente, y el quinto material fue formado con la fracción fina del primero y la arena San Roque.

Una descripción detallada de la localización de los bancos de obtención de estos materiales, así como de todo el procedimiento ejecutado para la selección, extracción y posterior almacenamiento se encuentra en la Ref. 8.

## 2.1 SC-Chicoasén

Material areno-arcilloso proveniente del banco La Costilla, que se explotó para la construcción del corazón impermeable de la presa Chicoasén, Estado de Chiapas, México. Geológicamente el material es una lutita alterada y redepositada del Reciente, con espesores de más de 50 m. Las propiedades índice así como los resultados del análisis granulométrico y de las determinaciones de densidad de sólidos, se presentan en la Tabla N° 2.1. La posición de la fracción menor que la malla N° 40 en la Carta de Plasticidad se presenta en la Fig. 2.1. El contenido natural de agua fue de 10.0% y el del material almacenado de 4.2% .

El estudio mineralógico muestra que el cuarzo constituye el componente mayor; también posee clorita, que es un silicato hidratado de aluminio, magnesio y fierro, y en menor proporción, mica, feldespatos y calcita.

En lo sucesivo, utilizando la clasificación SUCS para el material menor que la malla N° 4, se usará la denominación SC-Chicoasén.

El procedimiento seguido para la obtención de las diferentes fracciones de este material fue el siguiente: se tomaron aproximadamente 80 Kg de material, los cuales se cuartearon para separar aproximadamente 8 Kg de *material integral*; a esta fracción se le determinaron sus propiedades índice y su granulometría. Al resto del material se le quitó la fracción que pasó la malla N° 200 por vía seca y se le sometió al procedimiento de lavado a través de los diferentes tamices. El material menor de la malla N° 200 se dejó secar para después ser molido y vuelto a tamizar por esta malla. La mezcla de este material con la misma fracción obtenida inicialmente por vía seca constituyó la fracción *fina* del suelo, aproximadamente 21 Kg. El material sobrante formado por las fracciones lavadas - que pasan la malla N° 4 y son retenidas en la N° 200 constituyó la fracción *gruesa*.

## 2.2 SM-San Vicente

El material areno-limoso fue obtenido de un banco situado a 500 m a la derecha del kilómetro 2 de la carretera México-Texcoco (Ref. 8). Las propiedades índice del mate

*rial integral* se muestran en la Tabla N° 2.1, y la posición de la fracción menor que la malla N° 40 en la Carta de Plasticidad se presenta en la Fig. 2.1. El contenido natural de agua fue de 30% y la humedad del material almacenado, después de haberlo secado al ambiente, de 14.2%.

El estudio mineralógico demostró que los feldespatos con montmorilonita y haloisita son los minerales más abundantes en este suelo; en menor proporción se encontraron cristobalita y anfíbola.

En lo que sigue, utilizando la clasificación SUCS para el material que pasa la malla N° 4, se identificará como SH-San Vicente. El procedimiento para obtener las distintas fracciones de este suelo fue el mismo que se siguió para el material SC-Chicoasén, siendo la cantidad de *finos* separada, 15 Kg aproximadamente.

### 2.3 SC-Chicoasén-San Roque

Se formó este material con la fracción *finos* del suelo SC-Chicoasén y la arena San Roque, conservando



la granulometría de gruesos del primero. La arena San Roque proviene de un depósito aluvial, es predominantemente cuarzosa y de granos angulosos. La densidad de sólidos obtenida para esta arena fue de 2.79, un poco por encima de lo esperado para una arena cuarzosa, indicando que posiblemente esté formada por otros componentes en proporciones significativas.

#### 2.4 CH-La Peña

La arcilla de alta plasticidad, CH, se obtuvo en el sitio de la presa La Peña, Estado de Hidalgo, México (Ref. 8). Las propiedades índice de este suelo se presentan en la Tabla N°2.1 y su ubicación en la Carta de Plasticidad en la Fig. 2.1. El contenido natural de agua fue de 21.6% y la humedad del material almacenado de 19.4%.

El estudio mineralógico revela que el mineral predominante es la montmorillonita, y en porcentaje menor, el suelo contiene feldespatos, cristobalita, anfíbola y cuarzo.

Por su granulometría y sus características de plasticidad; en lo sucesivo este material se denominará CH-La Peña. El procedimiento seguido para la obtención de las diferentes fracciones de este suelo fue el siguiente : aproximadamente 20 Kg del material fueron desprovistos de la fracción que pasó la malla N° 200; el resto se sometió a un proceso de disgregación mecánica, utilizando para esto la máquina de Los Angeles con solo 5 esferas de las 11 con que normalmente opera. Después de tratar el material con este procedimiento de disgregación, previo secado hasta una humedad tal que los grumos no se aplastaran por el impacto de las esferas, fue tamizado y desprovisto de la fracción que pasó la malla N° 200. El suelo retenido fue objeto de sucesivas disgregaciones, hasta lograr aproximadamente 14 Kg de *finos*. La fracción *gruesa* se obtuvo disgregando otros 20 Kg de material con ayuda de un rodillo, de modo que todo el material pasara a través de la malla N° 4. En estas circunstancias, el suelo se expuso a secado hasta alcanzar el mismo contenido de agua de los *finos*, y después se separó en diferentes tamaños de grumos con la ayuda de un juego de tamices, formando la granulometría de gruesos para cada probeta. El material así formado se almacenó en bolsas herméticas hasta el momento de realizar la mezcla con los *finos* para adicionarle agua.

## 2.5 MH-Necaxa

El limo de alta plasticidad, MH, se seleccionó de un suelo residual proveniente de las inmediaciones de la presa Necaxa, Estado de Puebla, México (Ref. 8). Este material es producto de la meteorización de rocas ígneas del Terciario que se encuentran sobre calizas cretácicas. El contenido natural de agua fue de 51.6% y la humedad del material almacenado y secado al aire de 7.2%. Las propiedades índice del *material integral* se presentan en la Tabla N° 2.1 y su ubicación en la Carta de Plasticidad en la Fig. 2.1.

La caracterización mineralógica de este suelo - mostró que está constituido fundamentalmente por haloisita hidratada, mineral arcilloso de la familia de las caolinitas; este mineral constituye aproximadamente el 70% del material en estado natural. En menor proporción contiene hematita y magnetita, ambos óxidos de fierro, cuarzo y una pequeña proporción de ilmenita.

Debido a sus características granulométricas y

de plasticidad, este material se designará MH-Necaxa. El procedimiento seguido para la obtención de las distintas - fracciones de este material fue el mismo que se utilizó - con el suelo CH-La Peña.

TABLA No. 2.1

PROPIEDADES INDICE DE LOS SUELOS ENSAYADOS

Condiciones de Prueba y Material	SC-Chicoasán LL(%) LP(%) Ip	SM-San Vicente LL(%) LP(%) Ip	CM-La Peña LL(%) LP(%) Ip	MH-Mecana LL(%) LP(%) Ip				
Del material almacenado (secado al ambiente y pasado por la malla No. 4, aumentando humedad para determinar LL)								
Fracción del material integral que pasa por la malla No. 40.	30.7 20.5 10.2	32.9 26.4 6.5	69.4 31.1 38.3	74.0 50.3 23.7				
Densidad de Sólidos	Procedimiento A* B**	Procedimiento A* B**	Procedimiento A* B**	Procedimiento A* B**				
Material Integral	2.83 2.76	2.71 2.64	2.65 2.54	2.94 2.84				
	Granulometría (en porcentaje que pasa)							
Malla No	Vfa Húmeda	Vfa Seca	Vfa Húmeda	Vfa Seca	Vfa Húmeda	Vfa Seca	Vfa Húmeda	Vfa Seca
4	100	100	100	100	100	100	100	100
10	74	60	91	88	100	65	100	72
20	44	24	76	73	100	41	100	43.5
40	32	12	57	53	99	23	100	19
60	29	8	46	41	98	14	100	9
100	27	6	36	30	95	7	100	6
200	26	4	25	17	90	4	98	2.5

\* procedimiento aceptado para suelos finos, Ref. 14.

\*\* procedimiento aceptado para arenas, Ref. 14.

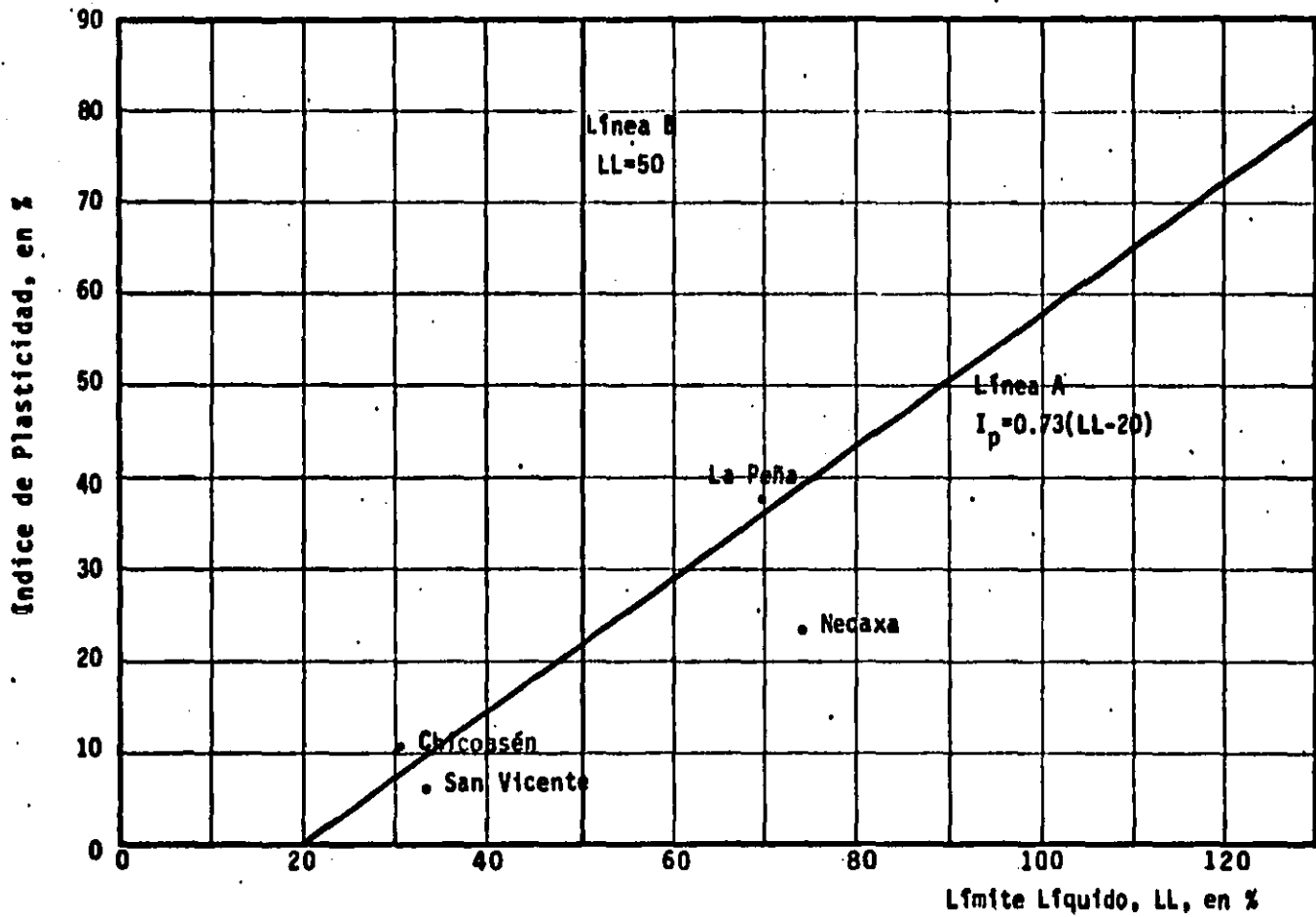


Fig. 2.1 Carta de Plasticidad.

## **APENDICE 3    Equipo utilizado**

### **3.1    Compactación**

Se utilizó el molde I de I (Ref. 9) de 3.6 cm de diámetro y 8.5 cm de altura (Fig. 3.1), para formar las probetas de los ensayos de compactación. El material se compactó utilizando equipo neumático manual (Fig. 3.2), con un pisón de 1.27 cm (1/2 pulg) de diámetro, que proporciona resultados más confiables que el compactador mecánico, debido a que reduce la influencia del operador

El compactador se calibró antes de iniciar el trabajo, con la ayuda de un manómetro de mercurio para registrar la presión, y fijando el compactador al marco de una balanza Toledo de  $750 \pm 0.5$  Kg, para registrar la carga. La gráfica resultado de la calibración se muestra en la figura 3.3. La relación diámetro del molde a diámetro del pisón es  $D_m/D_p = 2.83$ .

Los pesos del material por capa, probetas y contenidos de agua, se midieron en una balanza de 800 gr de capacidad y 0.1 gr de aproximación.

El horno para el secado de las muestras se mantuvo ajustado entre 105 y 110°C.

Para humedecer el material antes de compactar se empleó una pistola que atomiza el agua mediante aire a presión de  $1.0 \text{ Kg/cm}^2$ .

Las probetas se extrajeron del molde de compactación con el extractor de muestras presentado en la figura 3.4.



El material para las pruebas de consolidación - se compactó en un anillo de acero inoxidable de 6.69 cm de diámetro interior, 1.91 cm de altura y 4 mm de espesor; en este caso se utilizó un compactador neumomecánico (Fig. 3.5), accionado con aire a presión sobre un diafragma ahulado (bellofram), siguiendo el mismo principio de operación del compactador neumático manual; la diferencia estriba en que va montado en una prensa de cremallera, lo que permite ejercer fuerzas relativamente altas. El pisón utilizado - en este caso fue de 2.36 cm de diámetro, conservando así la relación diámetro molde a diámetro pisón,  $D_m/D_p=2.83$ .

### 3.2 Compresión no confinada

Para realizar estas pruebas se utilizó una balanza Toledo con dispositivo de carga de velocidad regulable y capacidad de 750 Kg; la aproximación de esta balanza es de 0.5 Kg. La deformación de los especímenes se registró con micrómetro de 0.01 mm de aproximación.

### 3.3 Consolidación

La aplicación de la carga sobre el espécimen se

realizó con el marco de carga de un consolidómetro tradicional (Fig. 3.6), y a través de una rótula ubicada entre el marco de carga y la pieza de acero que alberga la piedra porosa colocada sobre el espécimen.

La carga fue suministrada mediante piezas de plomo colocadas en el portapesas del marco de consolidación.

La deformación del espécimen se registró con un micrómetro de 0.01 mm de aproximación.

### 3.4 Porosidad

Para las determinaciones de porosidad de grumos y granos, se utilizó un porosímetro de vidrio que funciona con mercurio (Fig. 3.7). Este aparato es una adaptación del diseñado por Bousaid (Ref. 10). El equipo consta esencialmente de tres ramas, A, B, C, y un depósito de mercurio conectado a las mismas. Este depósito está colocado en un soporte de altura regulable.

La rama A está formada por un tubo de aproximadamente 0.54 cm de diámetro interior, con un portamuestras

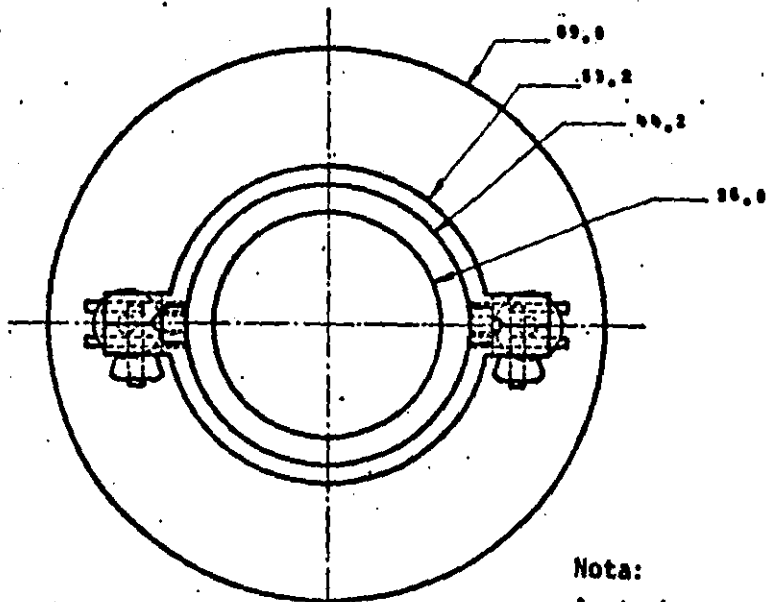
en la parte superior, provisto de una unión esmerilada entre base y tapa, y una válvula de dos pasos con el fin de poder generar el vacío necesario para las mediciones.

La rama B consta de un tubo de vidrio del mismo diámetro que el anterior, con dos bulbos en los extremos; puede ser aislada o comunicada a la rama A por una válvula de dos pasos.

La rama C es un tubo capilar de 2.9 mm de diámetro interior.

Todas las ramas descansan sobre escalas metálicas para poder registrar las diferentes elevaciones del mercurio. Los componentes del equipo están soportados en un tablero de madera.

En este porosímetro se obtiene el volumen de sólidos de la muestra mediante la aplicación de la Ley de Boyle (presión x volumen = constante, para una misma temperatura). Una descripción detallada del funcionamiento de este aparato se presenta en el Apéndice 5.



Nota:  
Acotaciones en m.m.

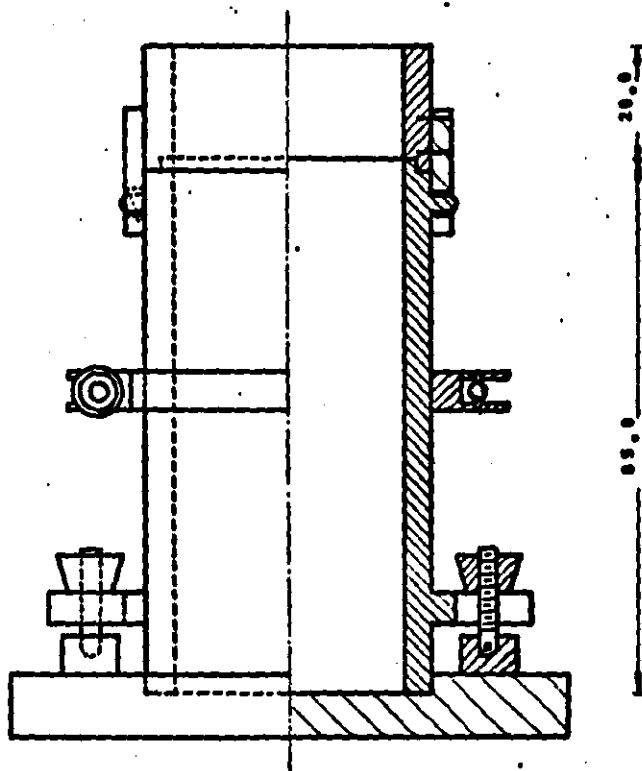
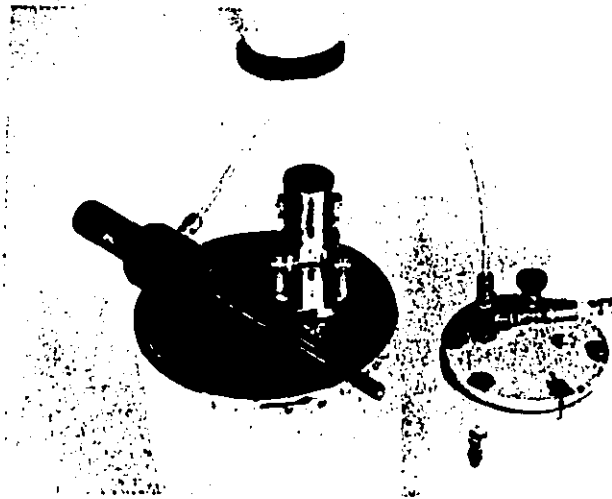


Fig. 3.1 Dimensiones del molde de compactación.



**Fig. 3.2 Vista del compactador neumático manual y el molde de compactación**

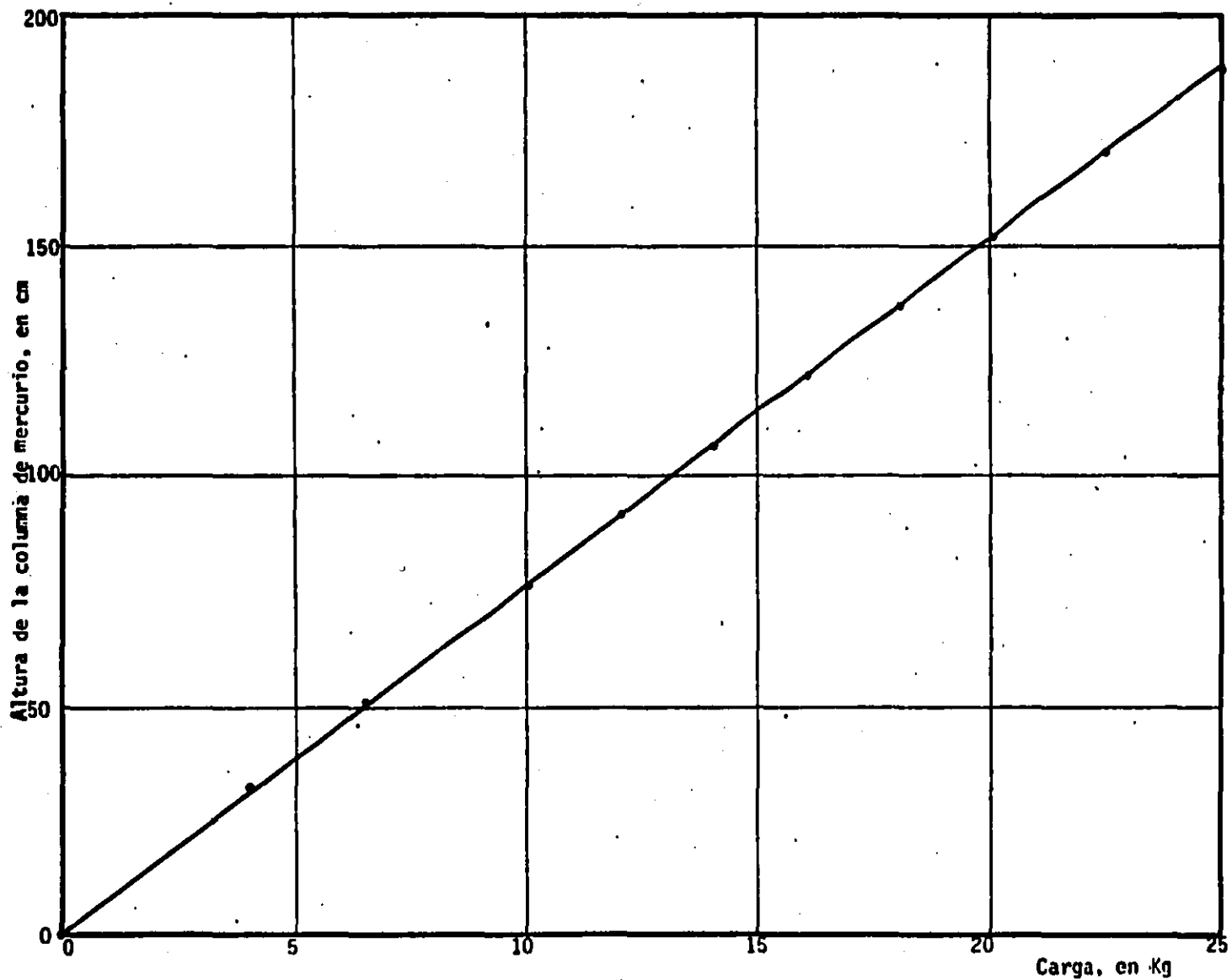


Fig. 3.3. Curva de calibración del compactador neumático manual.



Fig. 3.4 Extractor de muestras

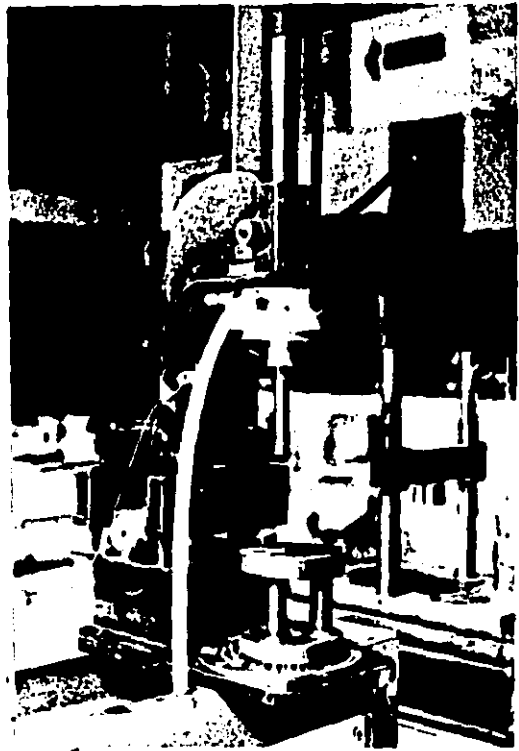
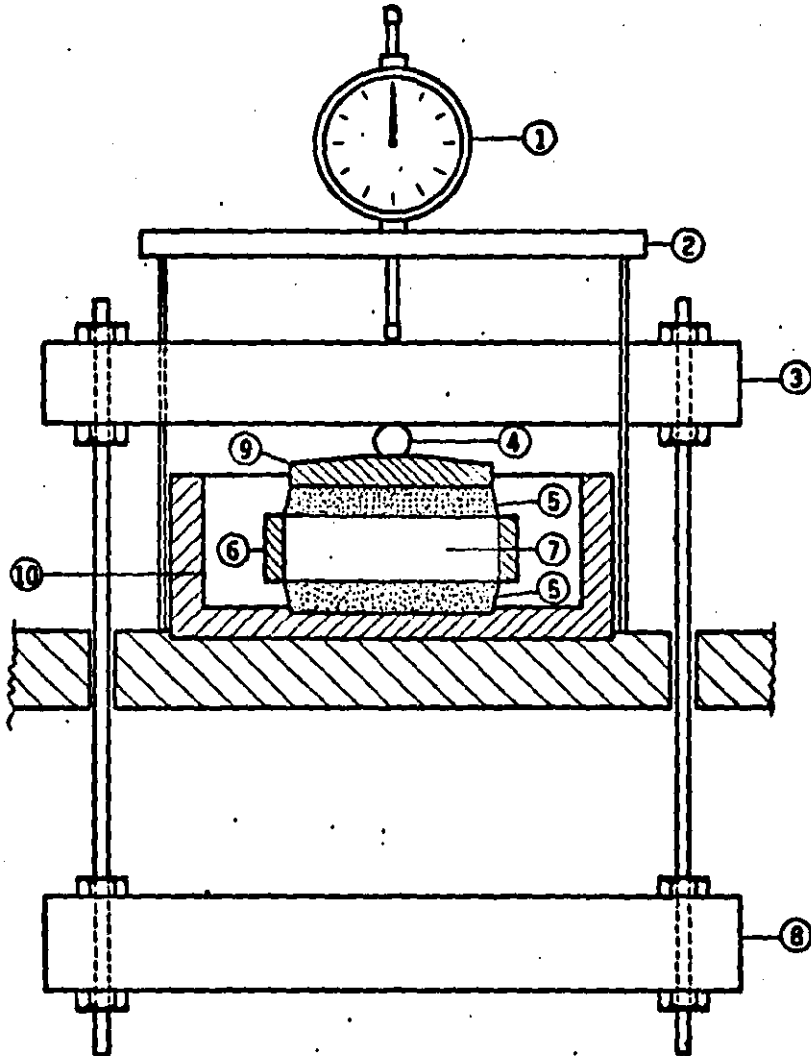


Fig. 3.5 Compactador neumomecánico



- |                  |                      |
|------------------|----------------------|
| 1 MICROMETRO     | 6 ANILLO RIGIDO      |
| 2 PUENTE FIJO    | 7 ESPECIMEN          |
| 3 MARCO DE CARGA | 8 BASE FIJA          |
| 4 ROTULA         | 9 PLACA DE CARGA     |
| 5 PIEDRA POROSA  | 10 CAZUELA DE LUCITA |

Fig. 3.6 Consolidómetro de anillo flotante.



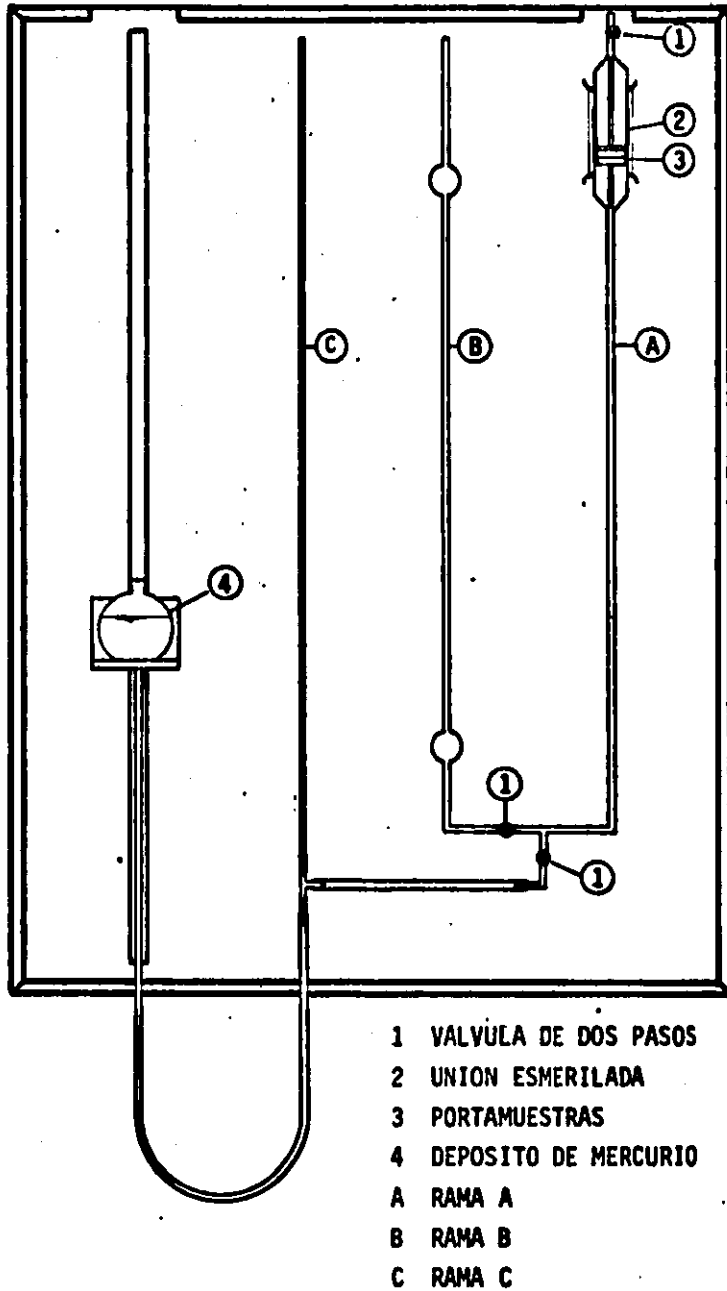


Fig. 3.7 Esquema del porosímetro de vidrio.

## **APENDICE 4 Trabajo experimental**

### **4.1 Pruebas índice**

Con todos los materiales descritos en el Apéndice 2 se efectuaron pruebas índice convencionales.

#### **4.1.1 Granulometría**

Se realizó en los cuatro materiales, tanto por vía húmeda (lavando el material a través de los diferentes tamices) como por vía seca (tamizando el suelo secado

al aire), véase Tabla N° 2.1. Las curvas correspondientes a las determinaciones por vía húmeda en SC-Chicoasén y SM-San Vicente, y por vía seca en CH-La Peña y MH-Necaxa, para mezclas con diferentes porcentajes de finos se muestran en las Figs. 4.1 a 4.4.

#### 4.1.2 Densidad de sólidos

Para cada material se determinó la densidad de sólidos de tres fracciones: *material integral* (MI), fracción que pasa la malla N° 4 y retiene malla N° 200 (*gruesos*) y fracción pasa malla N° 200 (*finos*); los ensayos se realizaron tanto por el procedimiento para arenas, como por el procedimiento aceptado para suelos finos, Ref. 14.

Las determinaciones siguiendo el procedimiento para arenas en los materiales La Peña y Necaxa, se efectuaron molliendo previamente las fracciones hasta que pasaran por la malla N° 40; las determinaciones siguiendo el procedimiento para suelos finos se realizaron dejando antes sumergido el material durante 24 horas, y posteriormente someténdolo a un agitado mecánico durante 15 minutos, para después pasar a la determinación propiamente dicha. La densidad de la arena San Roque se obtuvo tanto siguiendo el procedimiento aceptado para arenas como el aceptado para suelos finos, obteniéndose los valores 2.77 y 2.79, respectivamente. Los resultados se presentan en la Tabla N° 4.1.

#### 4.1.3 Límites de consistencia

Se determinaron en cada material para tres fracciones: fracción que pasa la malla N° 40, fracción que pasa la malla N° 40 y retiene la malla N° 200, y fracción que pasa la malla N° 200.

En todos los casos se partió del material seco al ambiente y aumentó el contenido de agua para determinar el límite líquido. La determinación se realizó en dos etapas: en la primera, el material fue humedecido y amasado hasta adquirir una consistencia tal que la ranura formada en la copa de Casagrande se cerrara con 40 golpes, más o menos; en este estado el material se dejó reposar 24 horas para realizar la segunda etapa o determinación del límite líquido propiamente dicho.

Para determinar el límite plástico se tomó parte del material después de reposar 24 horas y se fue secando gradualmente hasta lograr la humedad correspondiente a dicho límite.

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla N° 4.1 .

## 4.2 Ensayes de Compactación

### 4.2.1 Método

En todos los casos, los especímenes se compactaron por el método de amasado con 27 pisonadas de 10 Kg, - en cada capa de las 10 con que se formaron. En lo que sigue esta especificación de compactación se notará Amasado 27-10-10. La elección de esta norma se debe a que con ella se reproducen razonablemente el contenido de agua óptimo y el peso volumétrico seco máximo obtenidos en la prueba Proctor estándar (Impactos).

Las 27 pisonadas se distribuyeron uniformemente sobre cada capa y fueron aplicadas con el compactador neumático manual descrito en el inciso 3.1 .

El número de capas (diez) se tomó como norma - debido a que Casagrande y Hirschfeld consideraron diez capas en su estudio sobre compactación por amasado, como un número que asegura uniformidad de la energía de compactación aplicada en todo el volumen (Ref. 11) .

Se utilizó el molde I de I de 3.6 cm de diámetro y 8.5 cm de altura para compactar todos los especímenes (inciso 3.1 del Apéndice 3).

#### 4.2.2 Especificaciones adicionales.

- Granulometría inicial de la fracción gruesa. En los materiales CH-La Peña y MH-Necaxa la granulometría de grumos gruesos se formó para cada probeta, de modo que coincidiera con la del material integral. Esta especificación no se aplicó a los otros tres materiales, ya que la fracción gruesa para cada probeta se tomó por cuarteo del material integral, una vez lavado y desprovisto de los finos (pasa por la malla N° 200).

- Igual humedad inicial de las fracciones fina y gruesa de cada material en el momento de mezclarlas.

- En todos los casos el lapso entre la adición de agua al suelo y su compactación (tiempo de curado) fue de 24 horas. Durante este tiempo los materiales se mantuvieron en bolsas plásticas herméticas con el fin de evitar pérdidas de humedad.

- El peso del material por capa fue el mismo.
- El exceso de altura para el enrase se mantuvo entre 3.0 y 5.0 mm .
- El procedimiento de compactación fue el mismo en to dos los casos y se realizó como se describe a continua---  
ción :

Después de permanecer el material 24 horas en - una bolsa plástica hermética, se calculó el peso de mate---  
rial requerido por capa para lograr el peso volumétrico se co estimado. Haciendo uso de un manómetro de mercurio se ajustó la presión en el pistón para aplicar 10 Kg. Se pesó el molde de compactación y se colocó sobre su base apoyado en un disco de plástico. Se pesó el material de cada capa y - se protegió contra pérdidas de humedad cubriéndolo con una franela húmeda. Se dispuso el material de la primera capa y se aplicaron las 27 pisonadas; después se escarificó y ver tió el material de la segunda capa, repitiéndose el procedi---  
miento con las restantes. Una vez compactadas las diez ca pas, se midió la altura del espécimen, se enrasó y pesó el molde con la probeta compactada en su interior.

El peso volumétrico se obtuvo con la siguiente expresión:

$$\gamma_m = \frac{W_m}{V_m}$$

donde :  $\gamma_m$  = peso volumétrico del suelo compactado, en  $\text{gr/cm}^3$

$W_m$  = peso del espécimen compactado, en gr

$V_m$  = volumen de la muestra compactada, igual al volumen interior del molde, en  $\text{cm}^3$

El peso volumétrico seco se obtuvo mediante la siguiente expresión:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_m}{1+w_c}$$

donde :  $\gamma_d$  = peso volumétrico seco del suelo compactado, en  $\text{gr/cm}^3$

$w_c$  = contenido de agua de compactación.

Con la compactación Amasado 27-10-10, se obtuvieron las curvas de compactación  $\gamma_d$  vs  $w_c$  para los cinco suelos ensayados, con la granulometría del material integral y los integrados con los porcentajes de finos 0, 30 ,



50, 75 y 100%. En las Figs. 4.6 a 4.17 se muestran los resultados experimentales y las curvas definidas por éstos para CH-La Peña y MH-Necaxa; para los otros tres materiales véase Ref. 1. En las Figs. 4.18 a 4.22 se superponen las curvas  $\gamma_d$  vs  $w_c$  para un mismo material y diferentes porcentajes de finos.

### 4.3 Ensayes de Compresión no Confinada

Después de compactar cada probeta, ésta se extrajo del molde y se sometió a la prueba de compresión no confinada; todos los ensayos se realizaron con velocidad de deformación controlada (1 mm/min).

El espécimen fue colocado entre placas de acero, apoyado en discos de plástico de diámetro mayor que el de la probeta.

Durante la prueba el espécimen se protegió contra la pérdida de contenido de agua manteniendo húmedo el ambiente en la vecindad de las probetas como se muestra en la Fig. 4.5.

Durante la etapa de carga se llevó registro de cargas aplicadas y de lecturas del micrómetro. En el cálculo del esfuerzo aplicado se hizo la corrección del área transversal por deformación axial. Los resultados obtenidos de  $q_u$  vs.  $w_c$ , se presentan en las gráficas 4.6 a 4.17 para CH-La Peña y MH-Necaxa. El módulo tangente inicial  $M_0$  en  $\text{Kg/cm}^2$  calculado a partir de la curva esfuerzo deformación, se presenta en las Figs. 4.23 a 4.27 en función de  $w_c$ ; además, las Figs. 4.18 a 4.22 muestran superpuestas las curvas de resistencia para cada material variando el porcentaje de finos.

#### 4.4 Pruebas de Consolidación

Para realizar estas pruebas solamente se utilizaron los materiales SH-San Vicente y SC-Chicoasán-San Roque.

Los especímenes fueron compactados por el método de amasado, en el anillo de consolidación de 6.69 cm de

diámetro y 1.91 cm de altura, utilizando el compactador neumomecánico descrito en el inciso 3.1; además, se conservó el mismo esfuerzo de compactación de la especificación *Ama-sado 27-10-10* correspondiente al molde I de I y la misma relación diámetro del molde a diámetro del pisón,  $D_m/D_p$ , de acuerdo a las indicaciones que siguen :

Para compactar las probetas en el molde I de I se aplicaron pisonadas de 10 Kg sobre un área de pisón de  $1.267 \text{ cm}^2$ , lo cual corresponde a un esfuerzo para el pisón de  $7.89 \text{ Kg/cm}^2$ . Conservando este esfuerzo para el pisón de 2.36 cm de diámetro, es decir,  $4.374 \text{ cm}^2$  de área, se aplicó con el compactador neumomecánico una fuerza de 34.53 Kg, regulando la presión con la ayuda de un manómetro de mercurio. Se aplicaron 27 pisonadas en cada una de las dos capas con que se formó el espécimen. Además, para cada material se observaron las siguientes especificaciones :

- Granulometría inicial de gruesos. Se formó la granulometría de gruesos para cada probeta y los diferentes porcentajes de finos, conservando la granulometría utilizada en los ensayos de compactación.

- Humedad inicial de finos y gruesos en el momento de realizar la mezcla.
- Tiempo de curado del material igual a 24 horas.
- Peso de material por capa, constante.
- Esfuerzo de compactación, número de pisonadas y número de capas, constantes.
- Altura de enrase entre 3.0 y 6.0 mm.

El procedimiento de prueba fue el mismo en todos los casos y consistió en lo siguiente: después de dejar homogeneizar el material durante 24 horas, en una bolsa plástica hermética, se lubricó el anillo de consolidación y se pesó el material para las dos capas y protegió contra posibles pérdidas de humedad; el material sobrante se utilizó para contenido de agua. Se apoyó el anillo en un disco de plástico y se sujetó a un soporte durante la compactación. Se compactó la primera capa y se escarificó antes de verter y compactar la segunda. Una vez compactado el material, el anillo con éste en su interior fue removido del so

porte, para medir la altura del espécimen y enrasar. Después se pesó el anillo con el espécimen cubierto por ambas caras con placas de lucita y se montó el conjunto anillo más muestra en el consolidómetro, cubriendo las dos caras del espécimen con piedras porosas previamente saturadas.

La secuencia de esfuerzos aplicados sobre el espécimen fue la siguiente: 0.14, 0.28, 0.56, 1.13, 2.25, 4.51, 6.76, 9.02, 11.27 y 13.53 Kg/cm<sup>2</sup> y cada incremento se dejó actuar hasta que la velocidad de deformación registrada fue prácticamente nula.

Los materiales mencionados se ensayaron con porcentajes de finos de 30, 50, 75 y 100%. En las Figs. 4.28 a 4.31 se superponen las curvas de compresibilidad de un mismo material con distintos porcentajes de finos. La variación del coeficiente de compresibilidad volumétrica unitaria,  $m_v$ , con el nivel de esfuerzos correspondiente a los ensayos anteriores se calculó de la siguiente forma: de la curva de compresibilidad se obtuvo para cada incremento de esfuerzos ( $\Delta\sigma$ ), la pendiente  $a_v = \frac{\Delta e}{\Delta\sigma}$ , y a partir de este valor se calculó  $m_v$  para cada incremento de esfuerzo como  $m_v = \frac{a_v}{1 + e_1}$ , con el valor de  $a_v$  para ese incremento y con  $e_1$  como la relación de vacíos al inicio de la aplicación del incremento. La variación del coeficiente de compresibilidad volumétrica unitaria,  $m_v$ , con el nivel de esfuerzos se presenta en las Figs. 4.32 y 4.33.

#### 4.5 Determinaciones de Porosidad

Con el porosímetro de mercurio, cuyo funcionamiento se describe en el Apéndice 5 del presente trabajo, se realizaron determinaciones de porosidad con diferentes tamaños de gruesos, a fin de estudiar la variación de este parámetro con el tamaño de los mismos en estado seco (material secado al horno). El menor tamaño ensayado correspondió al material retenido en la malla N°16 (1.19 mm).

En los materiales CH-La Peña y MH-Necaxa se realizaron determinaciones con grumos grandes, dejándolos secar al aire, cubriéndolos con parafina y sumergiéndolos en agua para medir su volumen; este procedimiento también se empleó con grumos secados al horno.

Los resultados obtenidos para diferentes fracciones en los cinco materiales, se presentan en la Tabla N°4.2.

TABLA N° 4.1

PROPIEDADES INDICE PARA DIFERENTES FRACCIONES

Condiciones de Prueba y del material	SC-Chicoasén			SM-San Vicente			CM-La Peña			MH-Hocoma		
	LL(%)	LP(%)	Ip	LL(%)	LP(%)	Ip	LL(%)	LP(%)	Ip	LL(%)	LP(%)	Ip
Del material almacenado (secado al ambiente y pasado por la malla N° 4, aumentando humedad para determinar LL)												
Fración que pasa la malla N° 40.	30.7	20.5	10.2	32.9	26.4	6.5	69.4	31.1	38.3	74.0	50.3	23.7
Fración comprendida entre las mallas N° 40. y N° 200.	29.8	20.2	9.6	31.1	30.5	0.6	65.5	29.5	36.0	76.7	51.6	25.1
Fración que pasa la malla N° 200.	37.4	23.4	14.0	43.9	34.0	9.9	81.0	37.0	44.0	73.6	45.5	28.1
Densidad de Sólidos	Procedimiento A <sup>a</sup> B <sup>aa</sup>			Procedimiento A <sup>a</sup> B <sup>aa</sup>			Procedimiento A <sup>a</sup> B <sup>aa</sup>			Procedimiento A <sup>a</sup> B <sup>aa</sup>		
Material Integral	2.83	2.76		2.71	2.64		2.65	2.54		2.94	2.84	
Fración pasa la malla N° 4 y es retenida en la N° 200.	2.82	2.76		2.74	2.65		2.66	2.55		2.90	2.81	
Fración que pasa la malla N° 200.	2.77	2.73		2.60	2.60		2.64	2.49		2.87	2.82	

<sup>a</sup> procedimiento aceptado para suelos finos, Ref. 14.

<sup>aa</sup> procedimiento aceptado para arenas, Ref. 14.

TABLA N° 4.2

## RESULTADOS DE LAS DETERMINACIONES DE POROSIDAD

Material	T a m a ñ o		Peso de sólidos gr.	Porosidad ( $n_g$ ) en %	Observaciones
	Pasa malla	Retiene en malla			
San Roque	1/4 "	N° 4	20.0	10.0	Porosímetro
	1/4 "	N° 4	20.0	9.0	"
	1/4 "	N° 4	20.0	10.8	"
	N° 4	N° 8	20.0	9.6	"
	N° 4	N° 8	20.0	10.0	"
	N° 4	N° 8	20.0	10.6	"
	N° 8	N° 10	20.0	10.3	"
	N° 8	N° 10	20.0	9.6	"
	N° 8	N° 10	20.0	9.4	"
	N° 10	N° 16	20.0	13.9	"
	N° 10	N° 16	20.0	9.3	"
N° 10	N° 16	20.0	9.6	"	
Chicoasén	N° 4	N° 8	20.0	18.8	Porosímetro
	N° 4	N° 8	20.0	18.1	"
	N° 4	N° 8	20.0	20.4	"
	N° 8	N° 10	20.0	21.2	"
	N° 8	N° 10	15.0	19.8	"
	N° 8	N° 10	20.0	19.5	"
	N° 10	N° 16	15.0	20.2	"
	N° 10	N° 16	20.0	20.6	"
	N° 10	N° 16	14.4	21.7	"
San Vicente	1/4 "	N° 4	8.0	40.8	Porosímetro
	N° 4	N° 8	15.0	43.7	"
	N° 4	N° 8	12.0	41.0	"
	N° 4	N° 8	15.0	42.3	"
	N° 8	N° 10	12.0	41.2	"
	N° 8	N° 10	15.0	40.9	"
	N° 8	N° 10	15.0	41.7	"



TABLA N° 4.2  
(Continuación)

Material	Tamaño		Peso de sólidos gr.	Porosidad (n <sub>g</sub> ) en %	Observaciones
	Pasa malla	Retiene en malla			
San Vicente	N° 10	N° 16	15.0	40.0	Porosímetro
	N° 10	N° 16	15.0	42.6	"
	N° 10	N° 16	10.0	44.8	"
La Peña	1 1/2 "	1 "	40.0	39.8	Secado al aire y parafina
	1 1/2 "	1 "	18.4	43.2	Secado al aire y parafina
	1 1/2 "	1 "	21.4	43.5	Secado al aire y parafina
	1 "	3/4 "	7.0	41.1	Secado al horno y parafina
	1 "	3/4 "	9.4	40.4	Secado al horno y parafina
	1 "	3/4 "	8.5	41.1	Secado al horno y parafina
	1 "	3/4 "	11.8	38.0	Secado al horno y porosímetro
	3/4 "	1/2 "	3.3	39.8	Secado al aire y parafina
	3/4 "	1/2 "	3.1	40.4	Secado al aire y parafina
	3/4 "	1/2 "	2.2	40.0	Secado al aire y parafina
	3/4 "	1/2 "	11.8	39.7	Secado al horno y porosímetro
	3/4 "	1/2 "	12.8	39.0	Secado al horno y porosímetro
	1/2 "	1/4 "	1.6	36.1	Secado al aire y parafina
	1/2 "	1/4 "	1.6	40.8	Secado al aire y parafina
	1/2 "	1/4 "	1.4	37.8	Secado al aire y parafina

TABLA N° 4.2  
(Continuación)

Material	T a m a ñ o		Peso de sólidos gr.	Porosidad ( $n_g$ ) en %	Observaciones
	Pasa malla	Retiene en malla			
La Peña	1/2 "	1/4 "	9.3	39.4	Secado al horno y porosímetro
	1/2 "	1/4 "	10.7	38.4	Secado al horno y porosímetro
	1/2 "	3/8 "	13.3	38.6	Secado al horno y porosímetro
	3/8 "	1/4 "	12.8	38.5	Secado al horno y porosímetro
	1/4 "	N° 4	10.0	40.2	Secado al horno y porosímetro
	1/4 "	N° 4	15.0	37.6	Secado al horno y porosímetro
	N° 4	N° 8	15.0	36.9	Secado al horno y porosímetro
	N° 4	N° 8	13.0	36.8	Secado al horno y porosímetro
	N° 4	N° 8	12.5	37.8	Secado al horno y porosímetro
	N° 8	N° 10	15.0	36.6	Secado al horno y porosímetro
	N° 8	N° 10	10.0	35.6	Secado al horno y porosímetro
Nesaxa	1/2 "	3/8 "	1.7	50.4	Secado al horno y parafina
	1/2 "	3/8 "	2.1	49.3	Secado al horno y parafina
	1/2 "	3/8 "	2.8	53.9	Secado al horno y parafina
	1/2 "	3/8 "	1.8	52.7	Secado al aire y parafina
	1/2 "	3/8 "	2.2	55.4	Secado al aire y parafina
	1/2 "	3/8 "	1.1	52.6	Secado al aire y parafina

TABLA N° 4.2  
(Continuación)

Material	Tamaño		Peso de sólidos gr.	Porosidad ( $n_g$ ) en %	Observaciones
	Pasa malla	Retiene en malla			
Necaxa	1/2 "	3/8 "	10.4	52.6	Secado al horno y porosímetro
	1/2 "	1/4 "	10.0	52.2	Secado al horno y porosímetro
	3/8 "	1/4 "	0.7	44.0	Secado al aire y parafina
	3/8 "	1/4 "	0.7	43.2	Secado al aire y parafina
	3/8 "	1/4 "	0.7	45.6	Secado al aire y parafina
	3/8 "	1/4 "	0.7	47.7	Secado al aire y parafina
	3/8 "	1/4 "	0.7	48.0	Secado al aire y parafina
	3/8 "	1/4 "	0.7	50.0	Secado al aire y parafina
	3/8 "	1/4 "	14.1	50.7	Secado al horno y porosímetro
	3/8 "	1/4 "	10.1	49.6	Secado al horno y porosímetro
	1/4 "	N° 4	10.0	48.6	Secado al horno y porosímetro
	1/4 "	N° 4	15.0	49.7	Secado al horno y porosímetro.
	N° 4	N° 8	15.0	49.0	Secado al horno y porosímetro
	N° 4	N° 6	15.0	50.6	Secado al horno y porosímetro
	N° 4	N° 6	12.5	50.7	Secado al horno y porosímetro
N° 6	N° 8	12.9	50.3	Secado al horno y porosímetro	

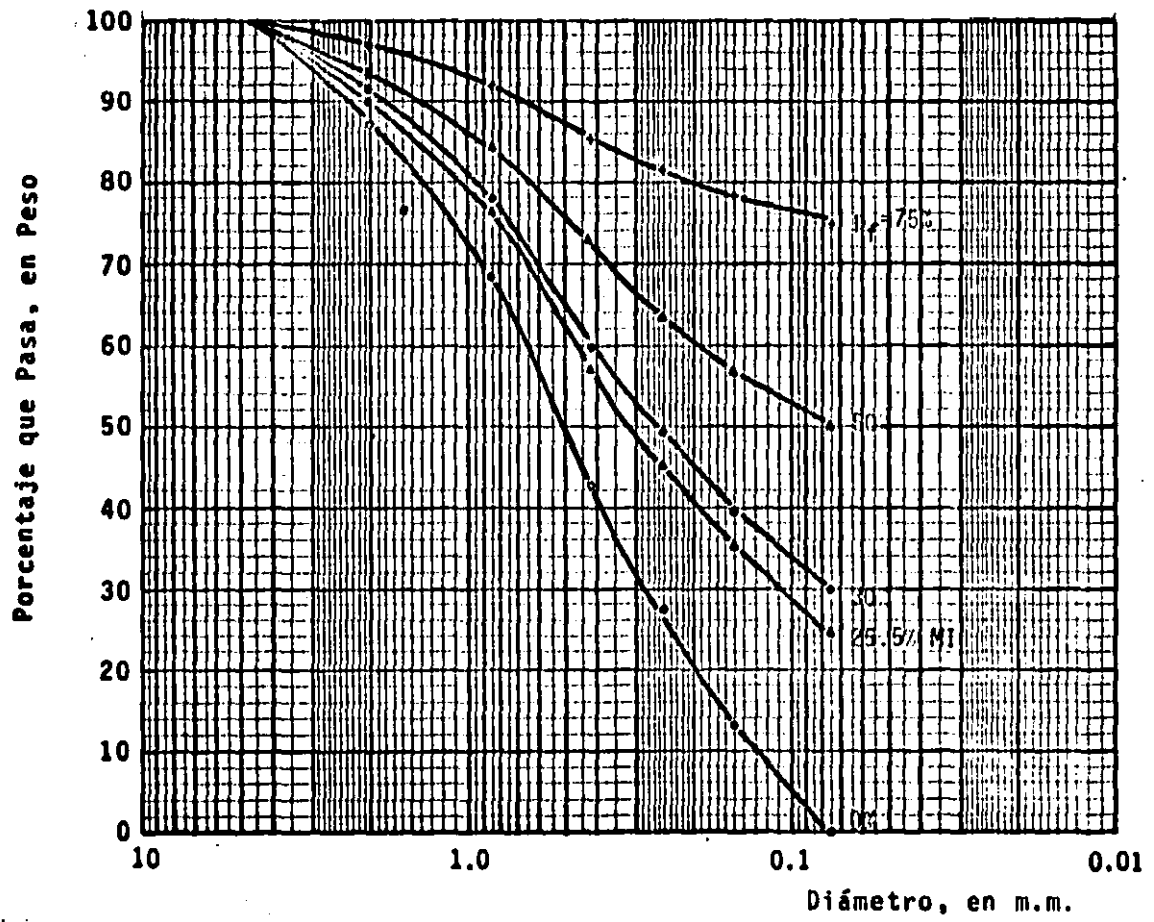


Fig. 4.1 Distribución granulométrica para los diferentes porcentajes de finos. (SM-San Vicente)

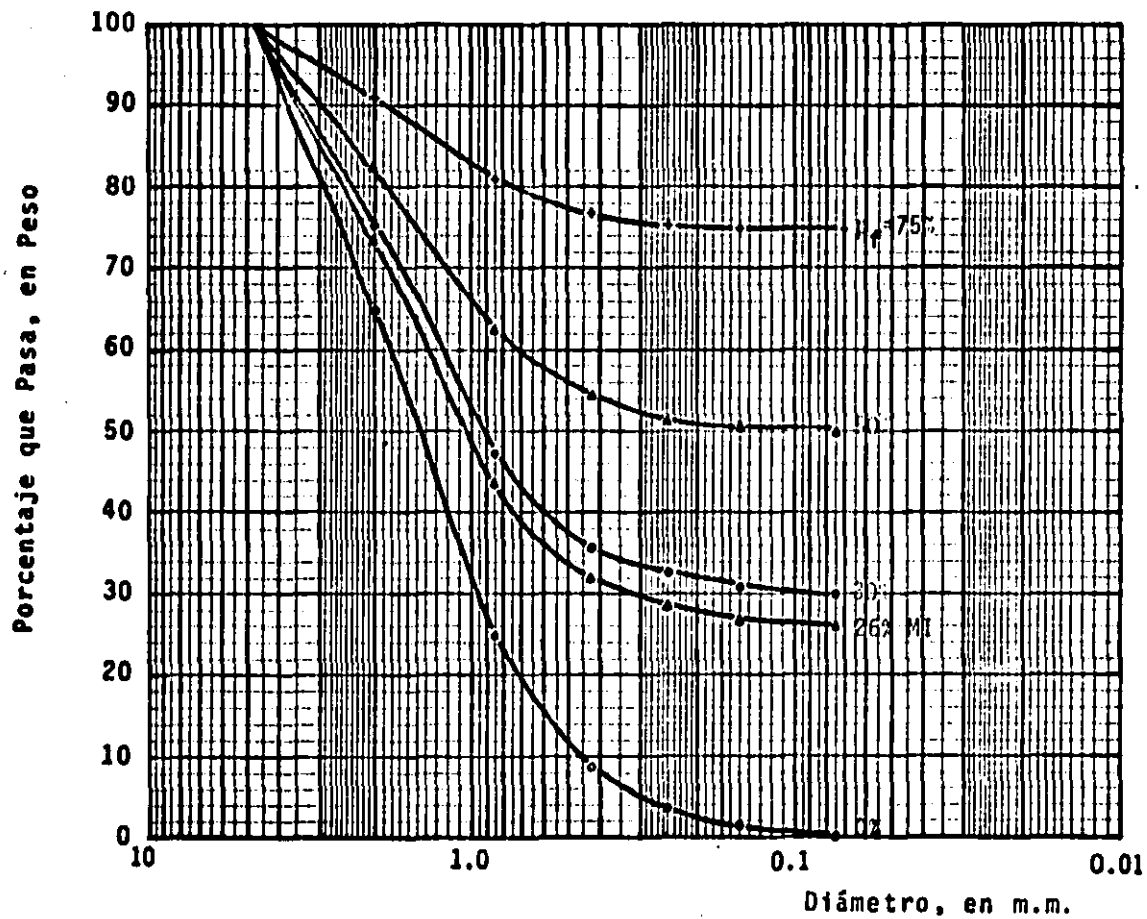


Fig. 4.2 Distribución granulométrica para los diferentes porcentajes de finos. (SC-Chicoasén)

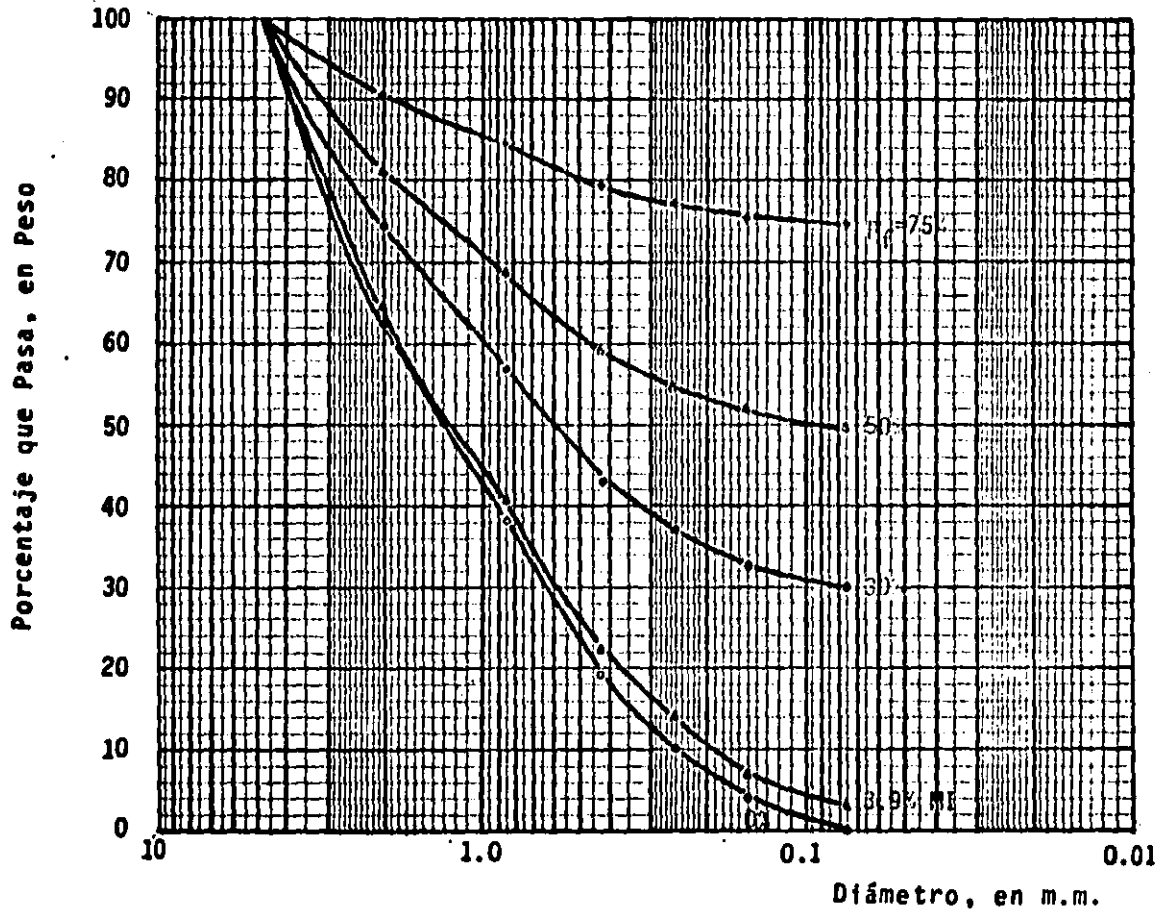


Fig. 4.3 Distribución granulométrica para los diferentes porcentajes de finos. (CH-La Peña)

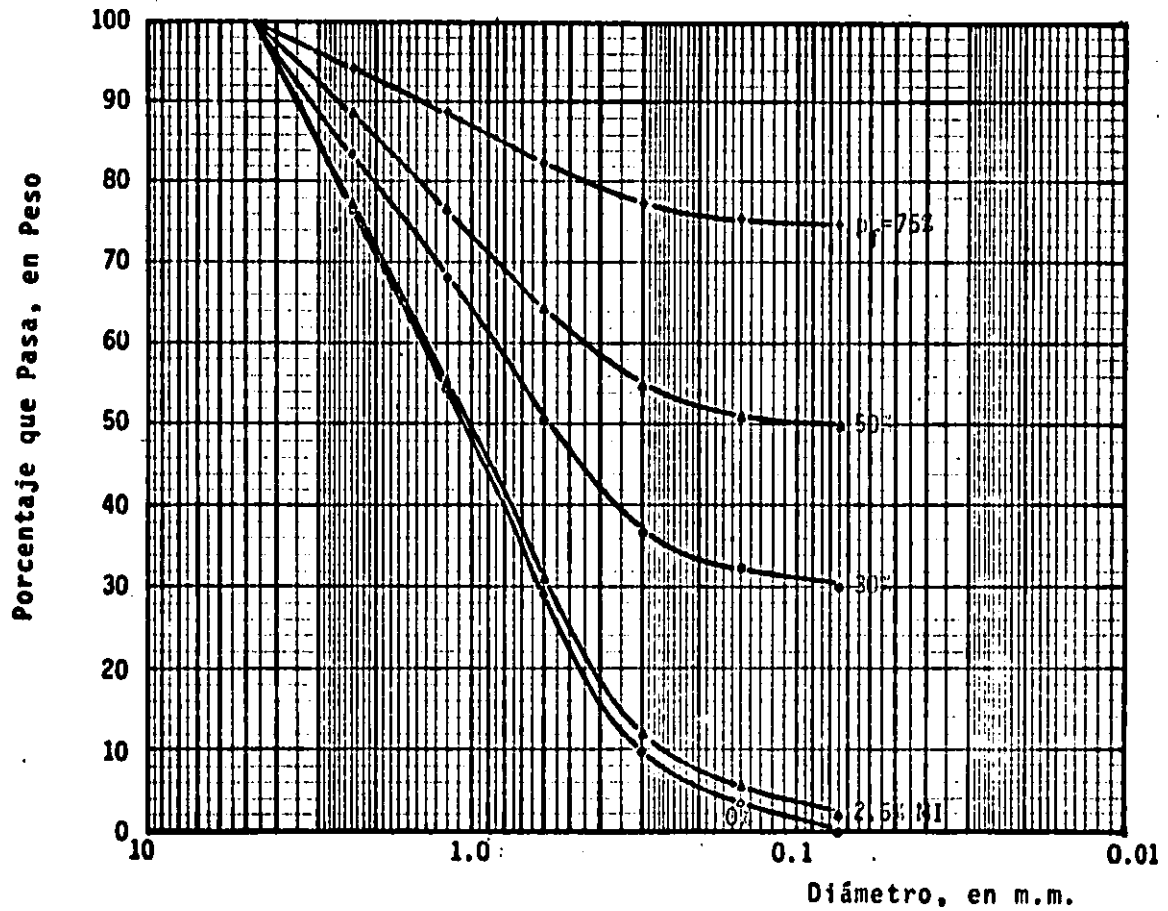
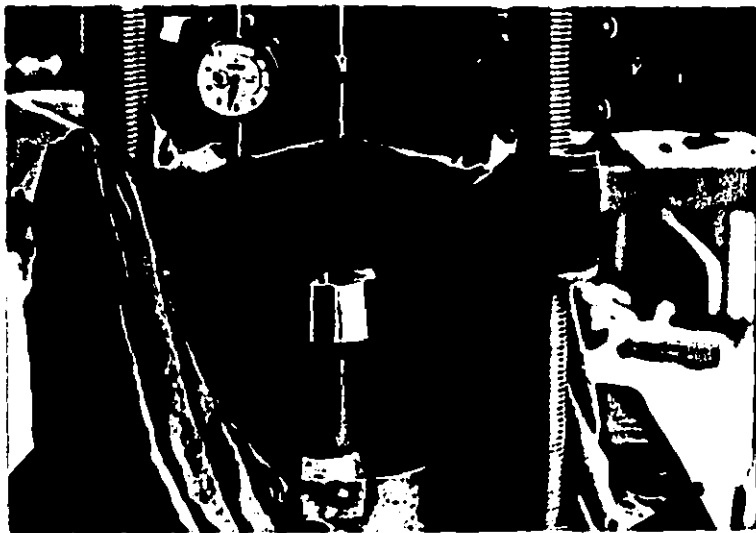


Fig. 4.4 Distribución granulométrica para los diferentes porcentajes de finos. (MH-Necaxa) 69



· Fig. 4.5 Espécimen compactado, prueba de compresión no confinada.



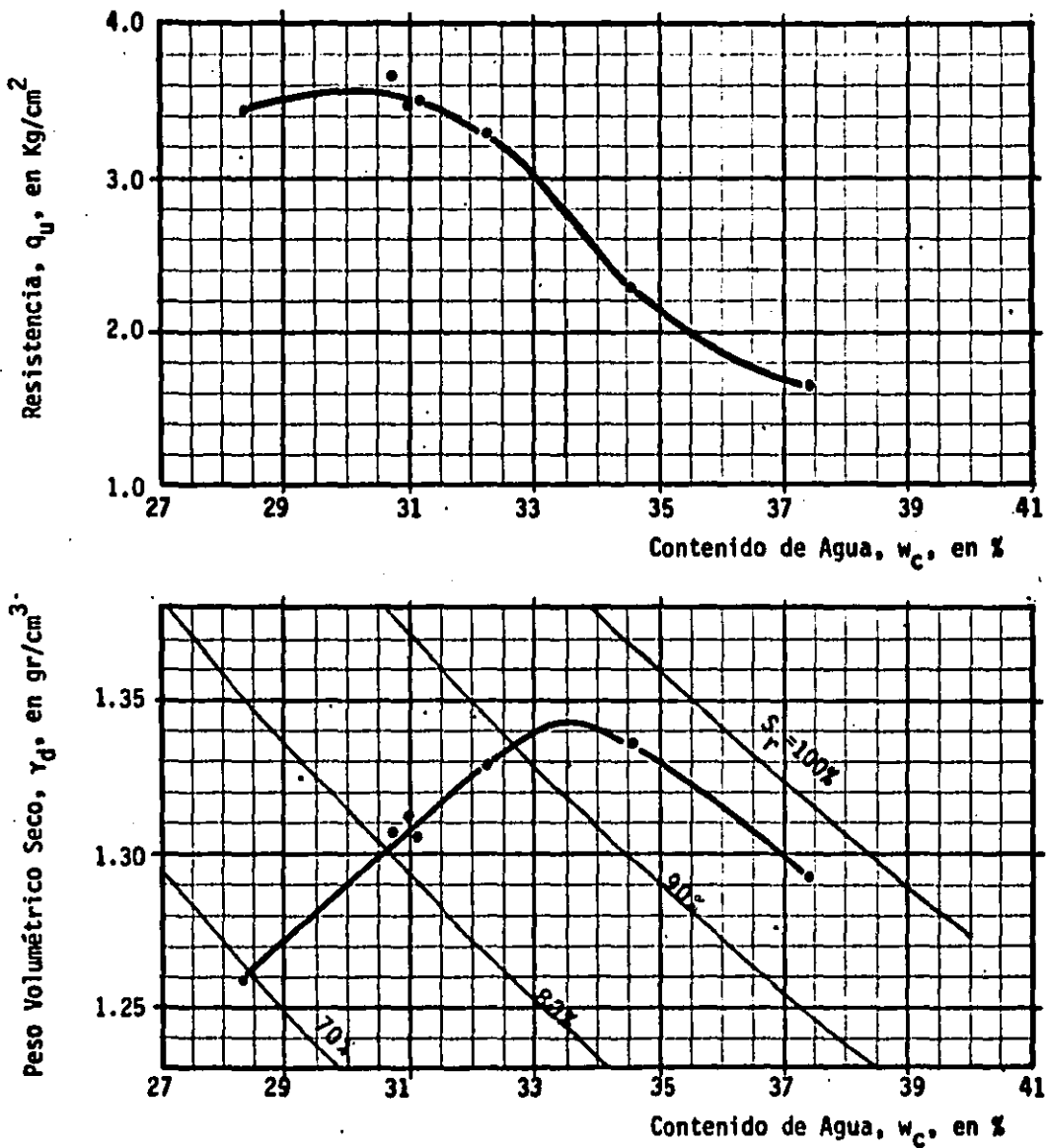


Fig. 4.6 Curvas resistencia a la compresión no confinada y peso volumétrico seco vs contenido de agua de compactación.  
 ( CH-La Peña; Serie Material Integral,  $p_f=3.9\%$ . Amasado 27-10-10 )

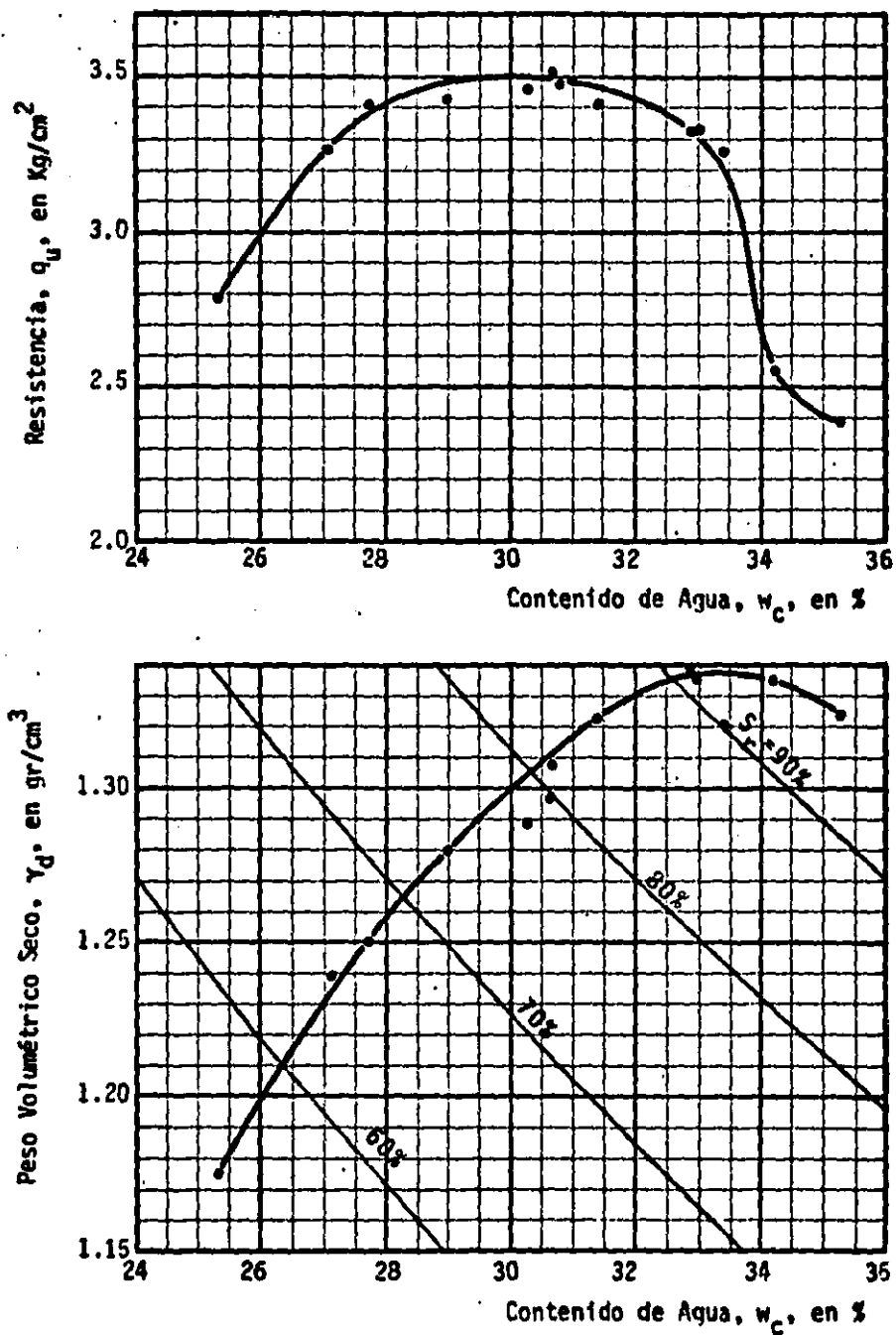


Fig. 4.7 Curvas resistencia a la compresión no confinada y peso volumétrico seco vs contenido de agua de compactación. (CH-La Peña; Serie  $p_f=0\%$ . Amasado 27-10-10)

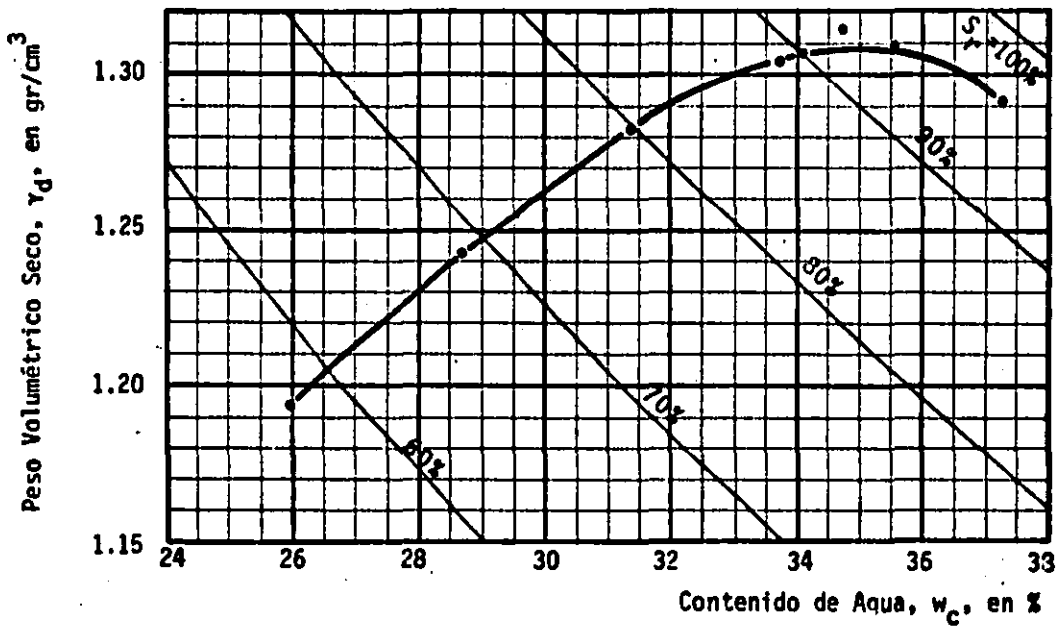
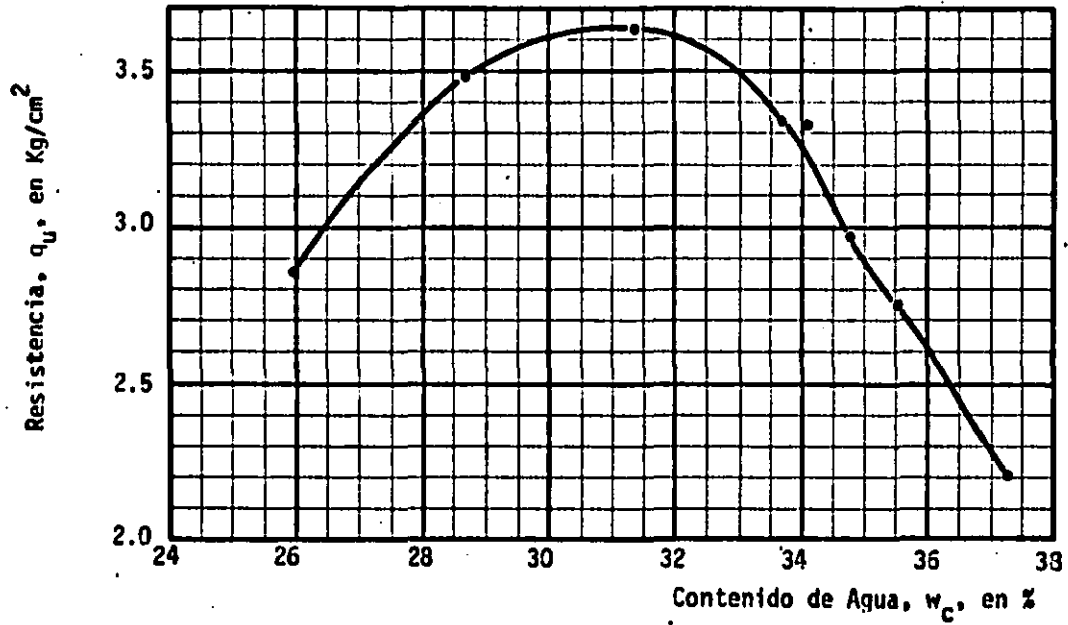


Fig. 4.8 Curvas resistencia a la compresión no confinada y peso volumétrico seco vs contenido de agua de compactación. ( CH-La Peña; Serie  $p_r=30\%$ . Amasado 27-10-10 )

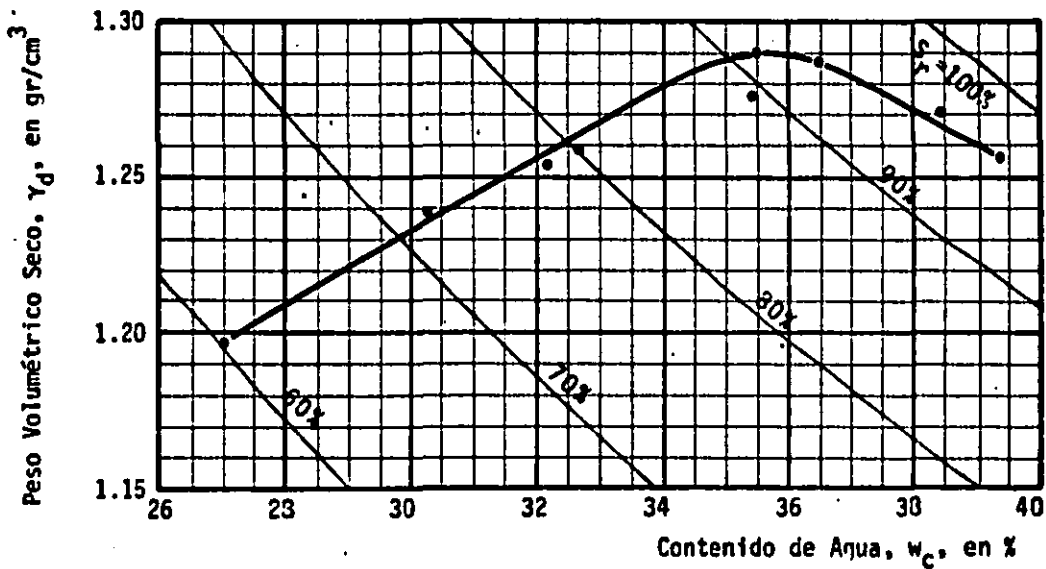
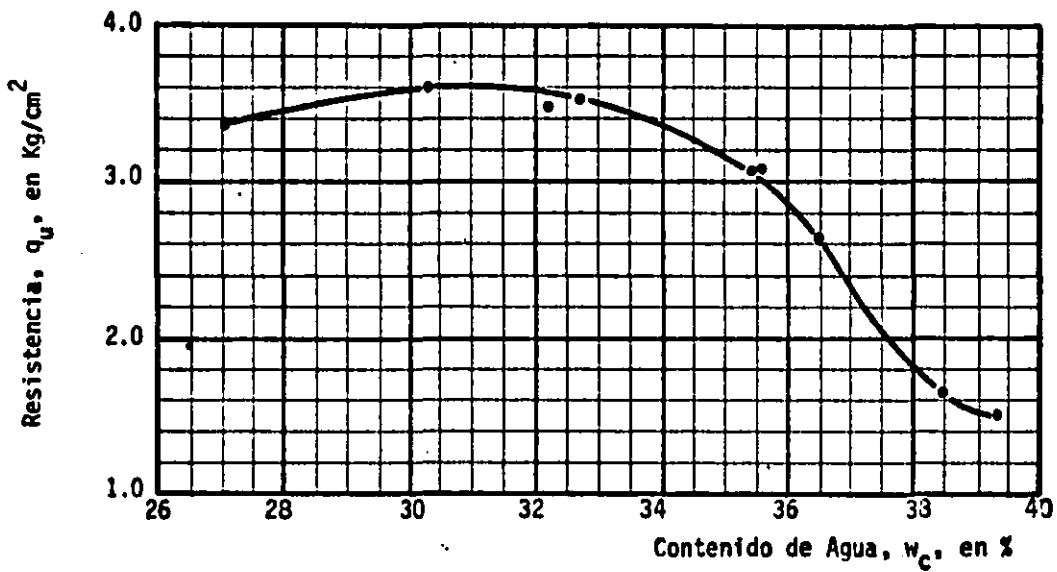


Fig. 4.9 Curvas resistencia a la compresión no confinada y peso volumétrico seco vs contenido de agua de compactación. ( CH-La Peña; Serie  $p_f=50\%$ . Amasado 27-10-10 )

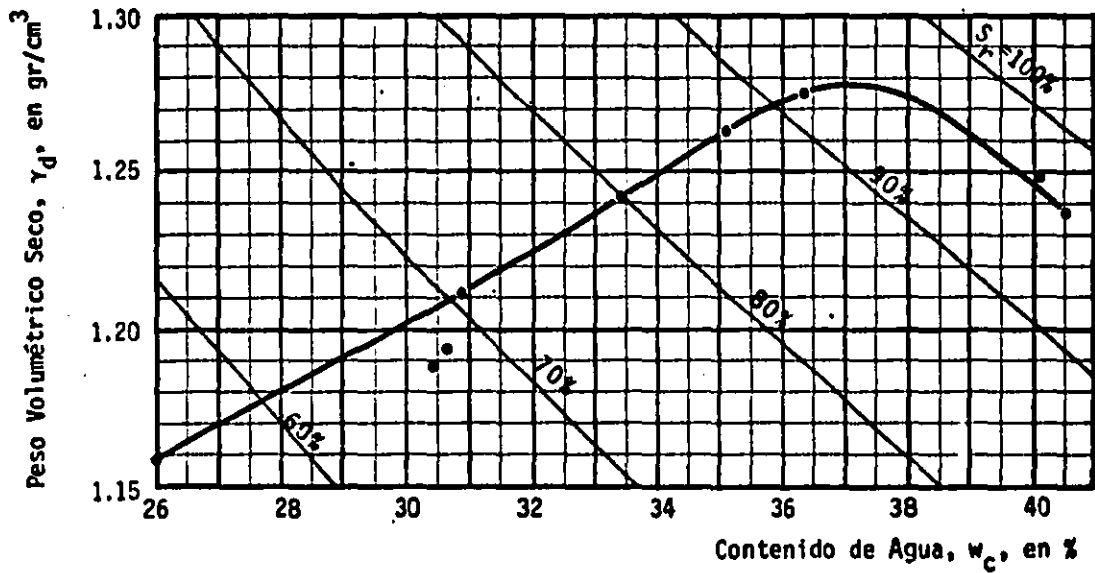
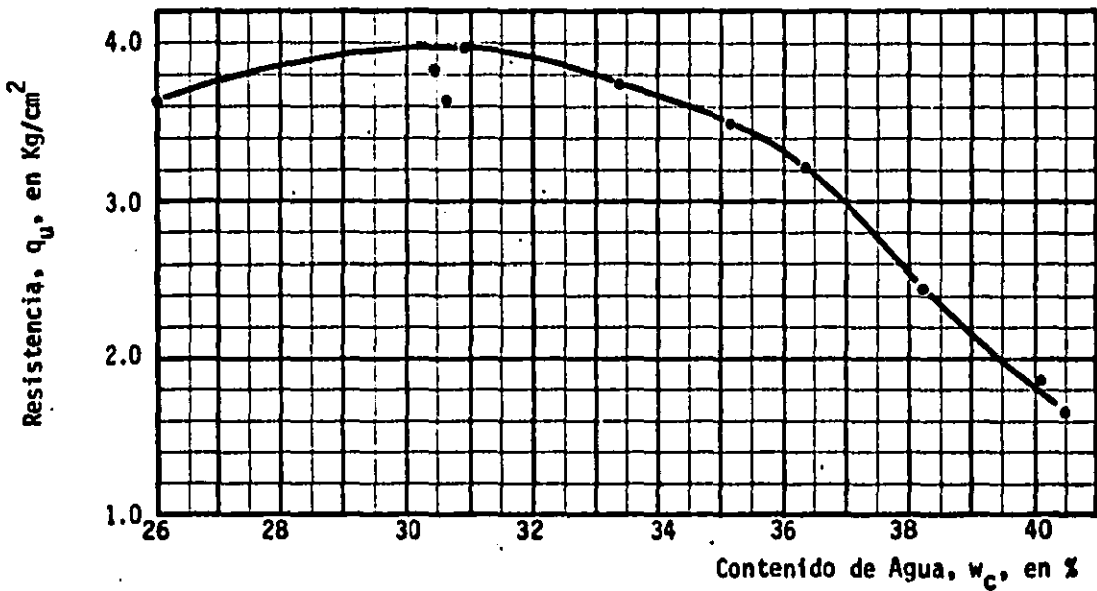


Fig. 4.10 Curvas resistencia a la compresión no confinada y peso volumétrico seco vs contenido de agua de compactación.  
( CH-La Peña; Serie  $p_f=75\%$ . Amasado 27-10-10 )

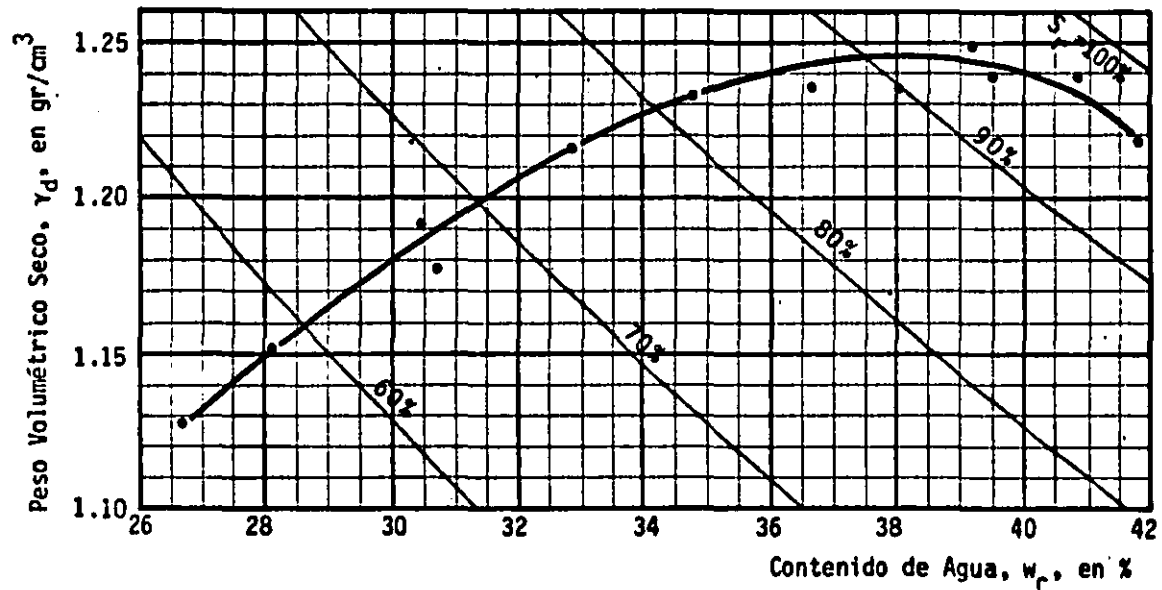
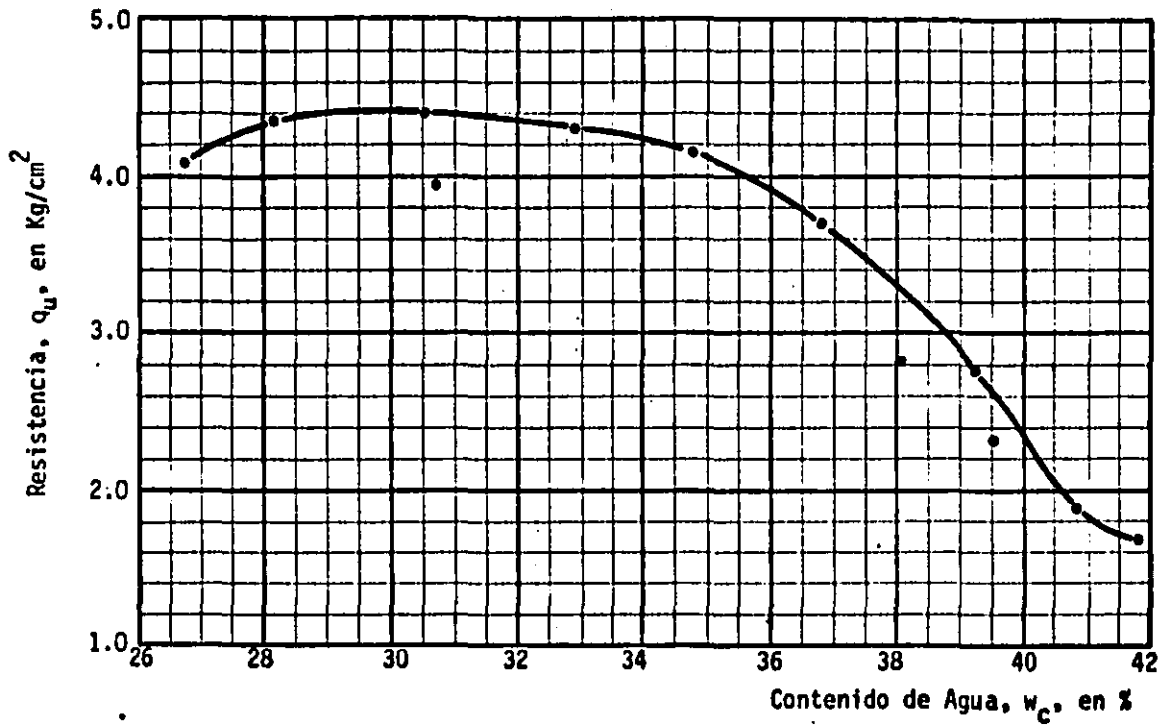


Fig. 4.11 Curvas resistencia a la compresión no confinada y peso volumétrico seco vs contenido de agua de compactación. ( CH-La Peña; Serie  $p_f=100\%$ . Amasado 27-10-10 )

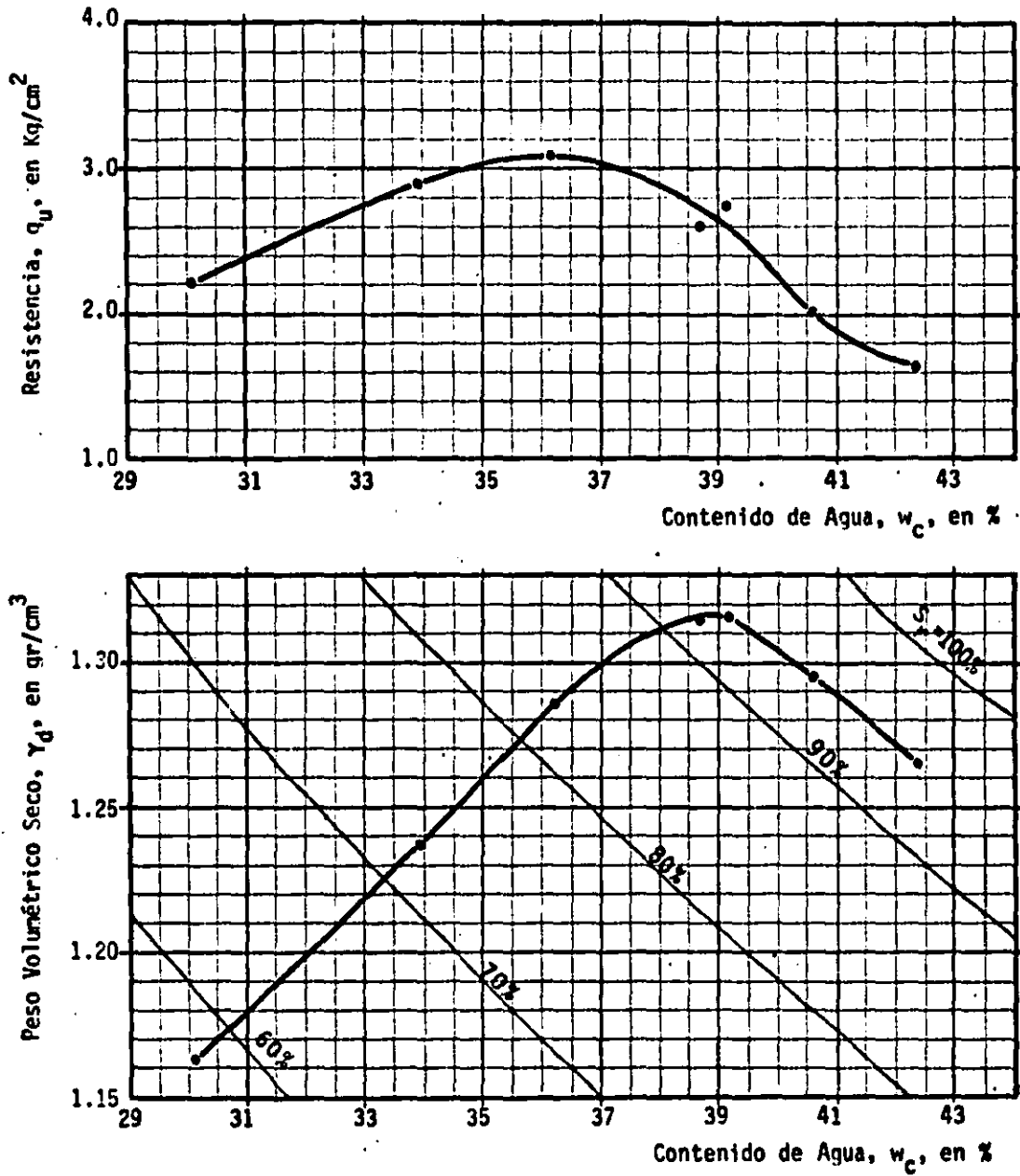


Fig. 4.12 Curvas resistencia a la compresión no confinada y peso volumétrico seco vs contenido de agua de compactación. ( MH-Necaxa; Serie Material Integral,  $p_f=2.5\%$ . Amasado 27-10-10 )

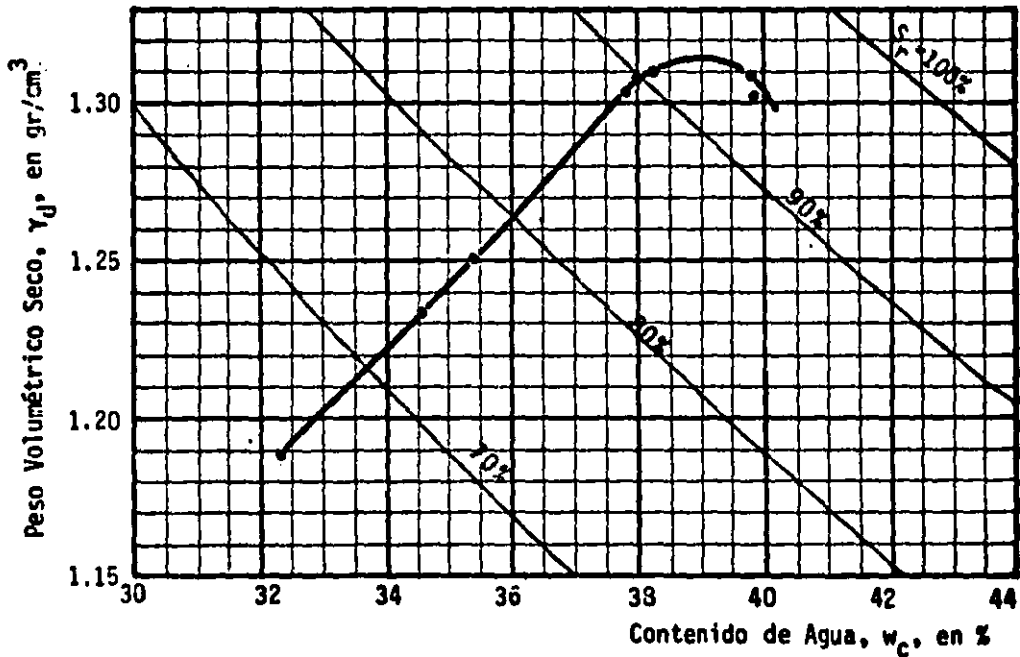
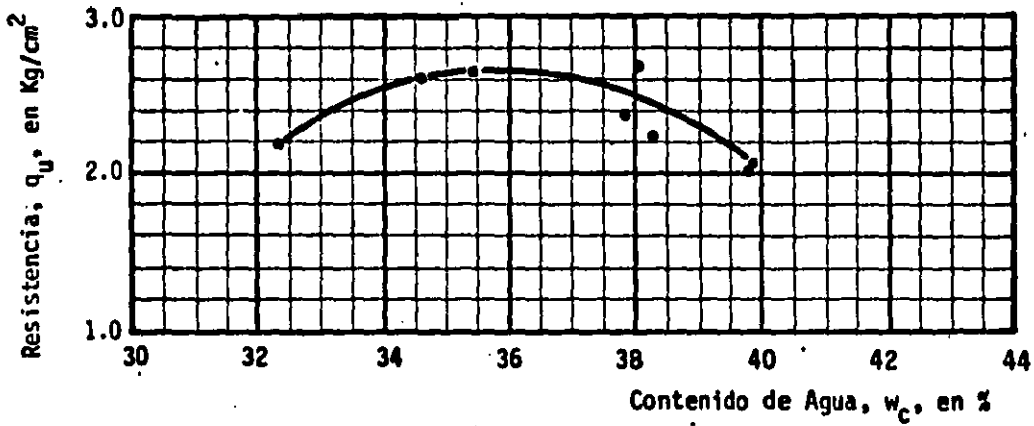


Fig. 4.13 Curvas resistencia a la compresión no confinada y peso volumétrico seco vs contenido de agua de compactación. (MH-Necaxa; Serie  $p_f=0.0\%$ . Amasado 27-10-10)



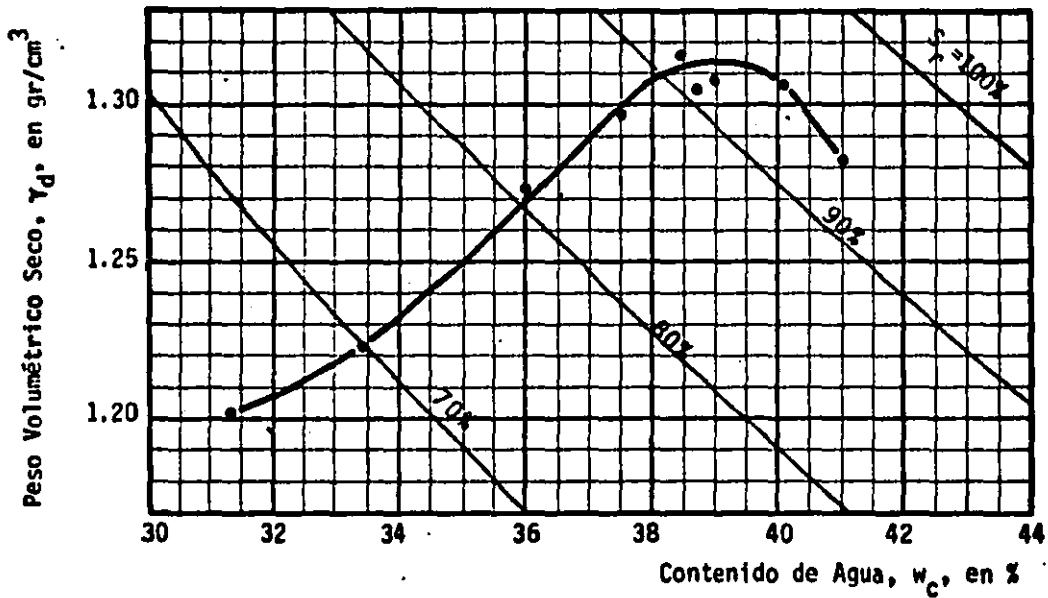
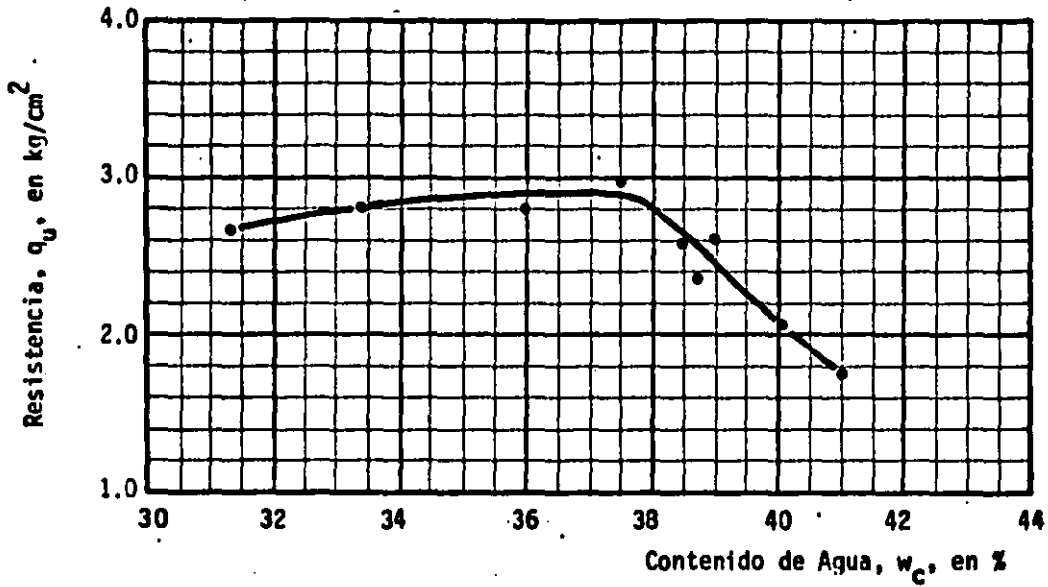


Fig. 4.14 Curvas resistencia a la compresión no confinada y peso volumétrico seco vs contenido de agua de compactación. (MH-Necaxa; Serie  $p_f=30\%$ . Amasado 27-10-10)

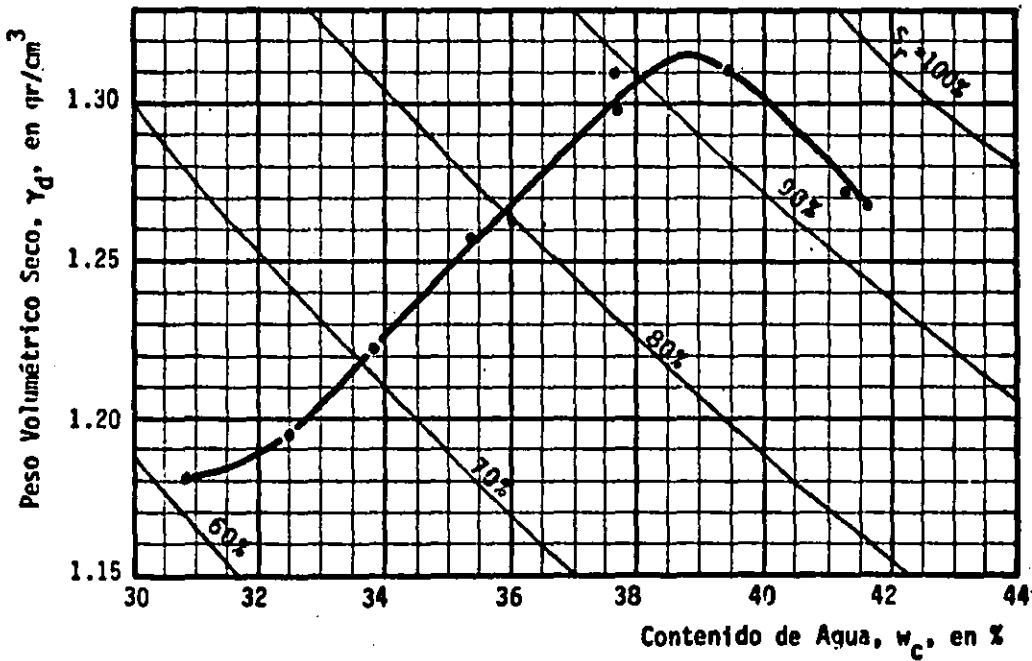
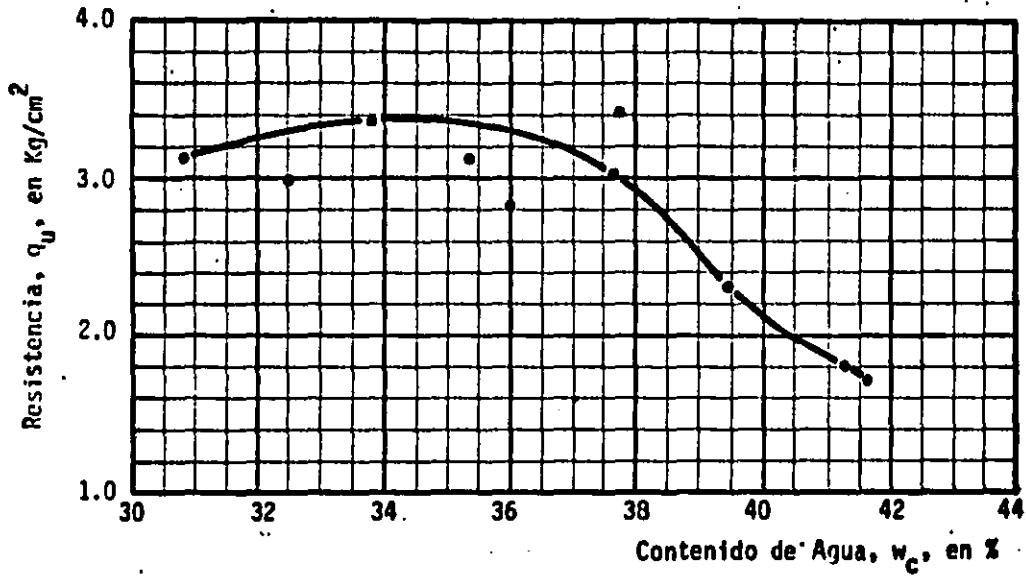


Fig. 4.15 Curvas resistencia a la compresión no confinada y peso volumétrico seco vs contenido de agua de compactación. (MH-Necaxa; Serie  $p_f=50\%$ . Amasado 27-10-10)

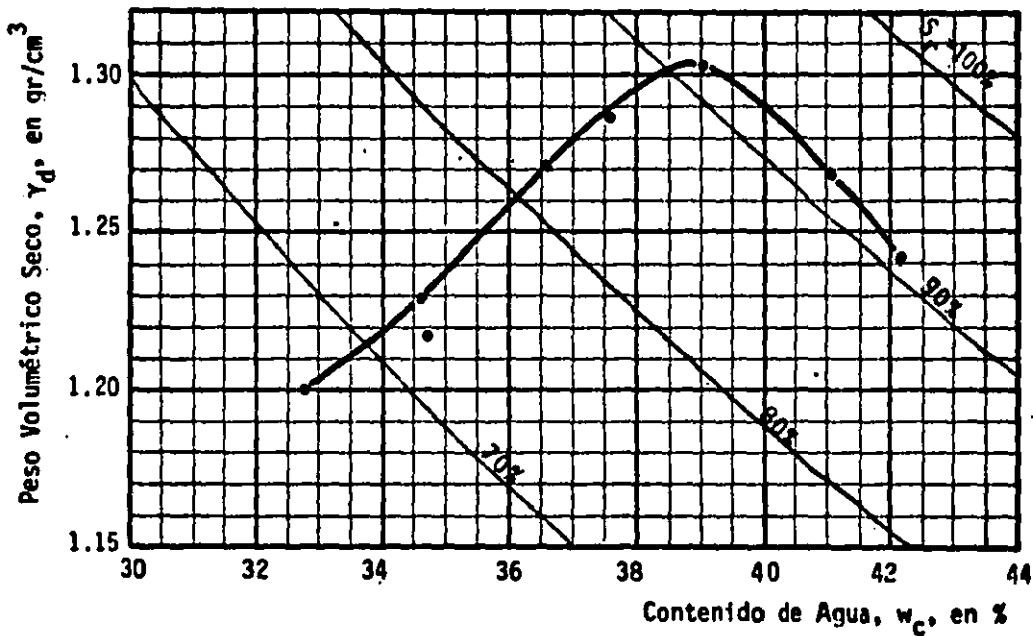
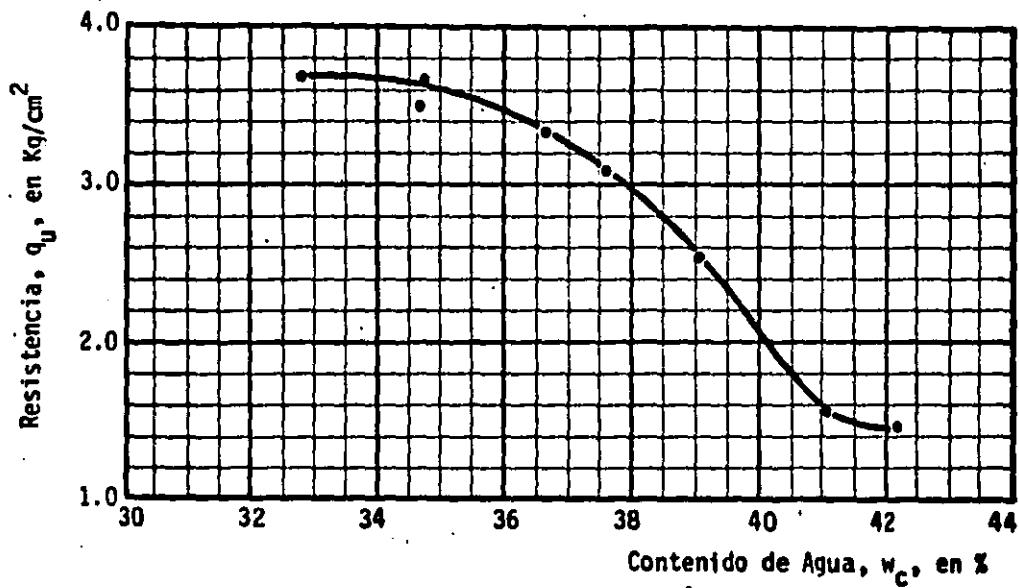


Fig. 4.16 Curvas resistencia a la compresión no confinada y peso volumétrico seco vs contenido de agua de compactación. (MH-Necaxa; Serie  $p_f=75\%$ . Amasado 27-10-10)

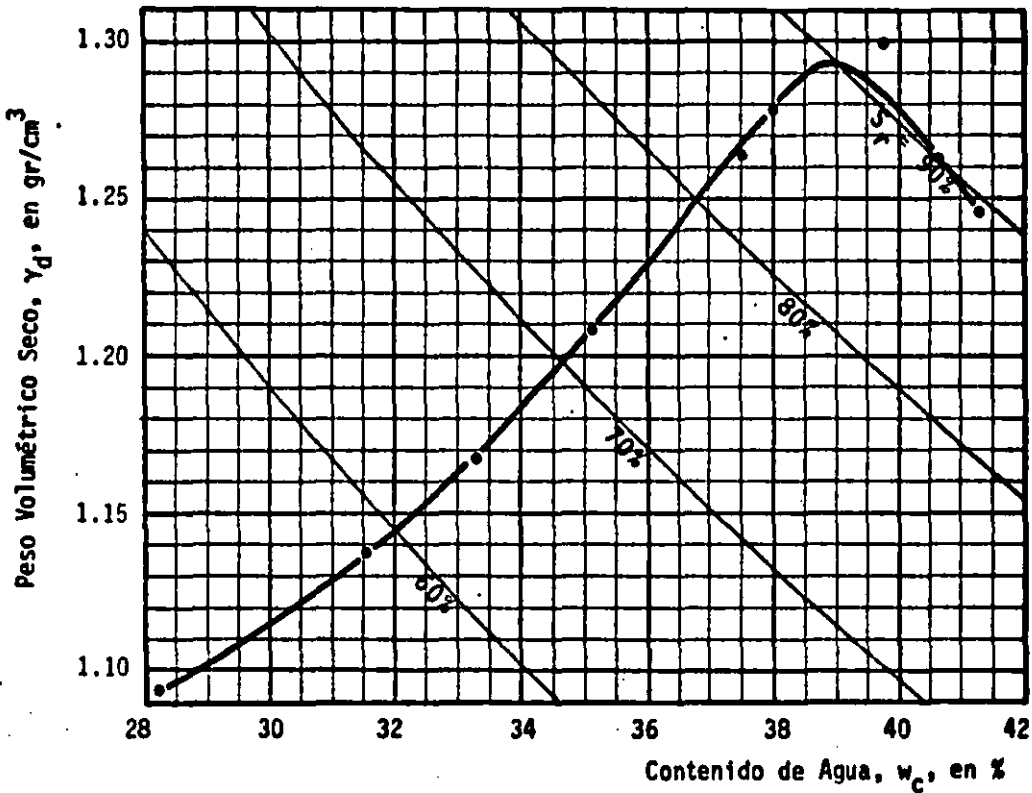
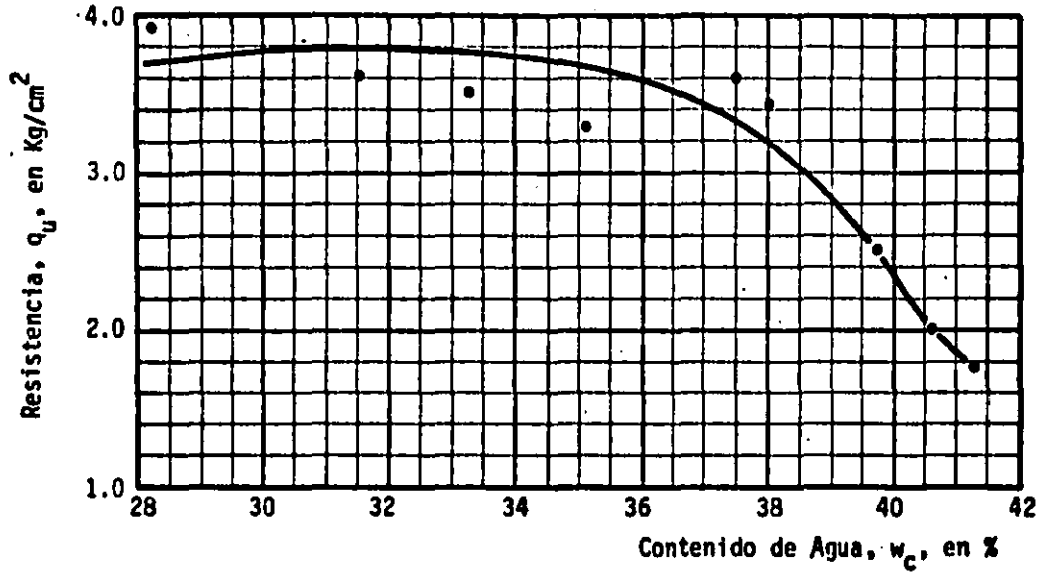


Fig. 4.17 Curvas resistencia a la compresión no confinada y peso volumétrico seco vs contenido de agua de compactación. (MH-Necaxa; Serie  $p_f=100\%$ . Amasado 27-10-10)

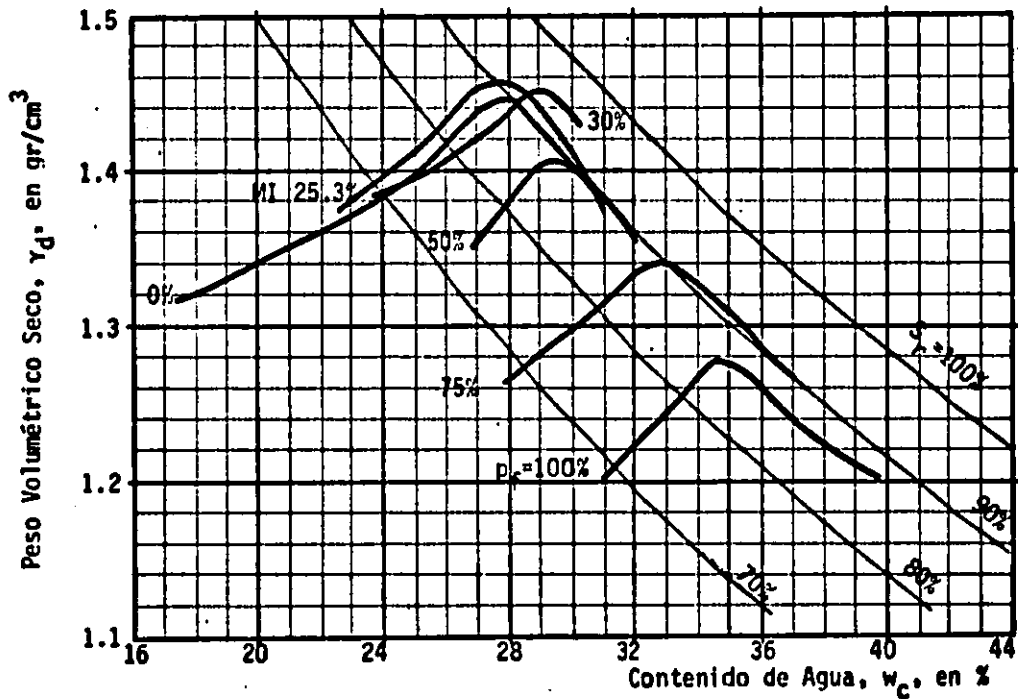
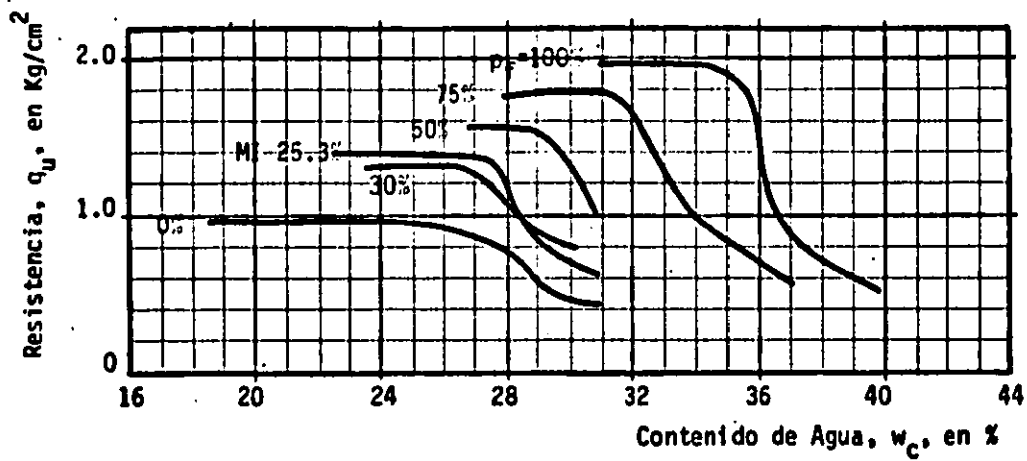


Fig. 4.18 Curvas de compactación y resistencia en compresión no confinada, Mezclas de finos y gruesos. ( SM-San Vicente)

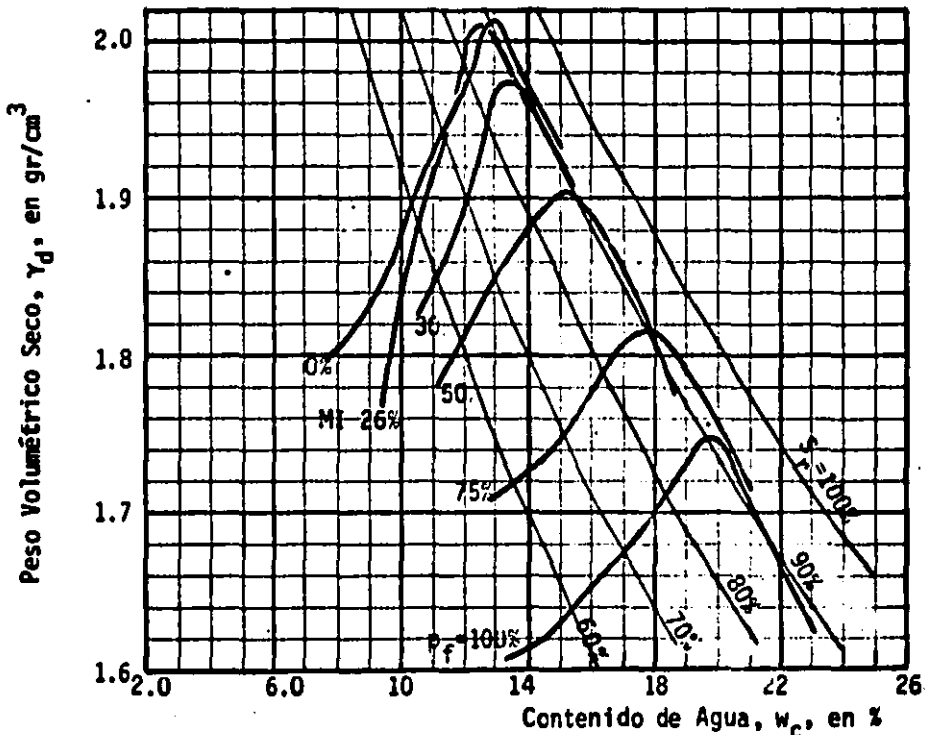
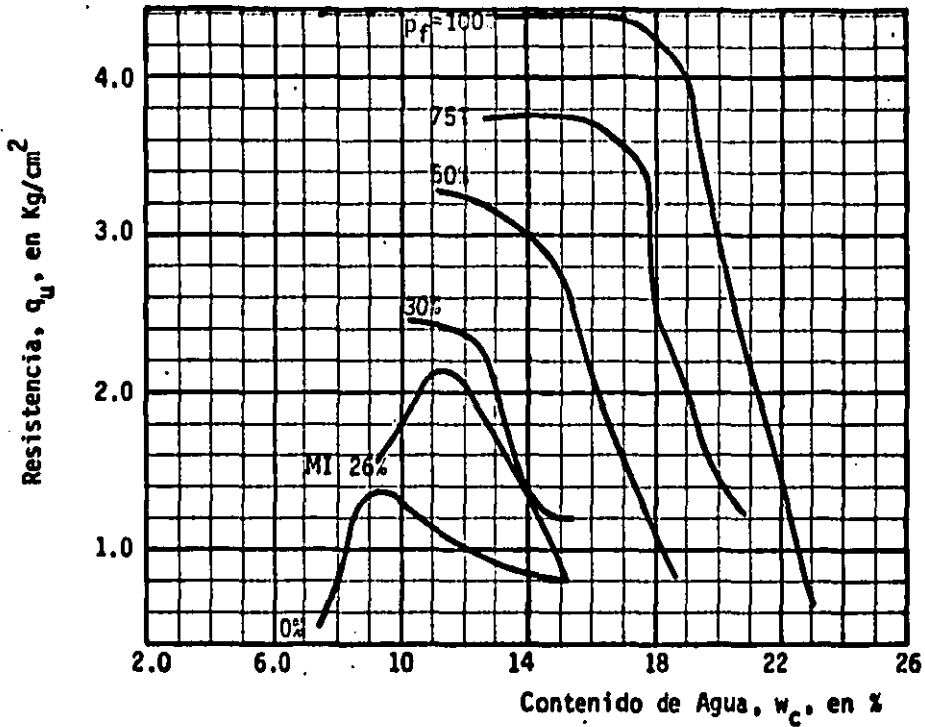


Fig. 4.19 Curvas de compactación y resistencia en compresión no confinada, Mezcla de finos y gruesos. ( SC-Chicoasén )

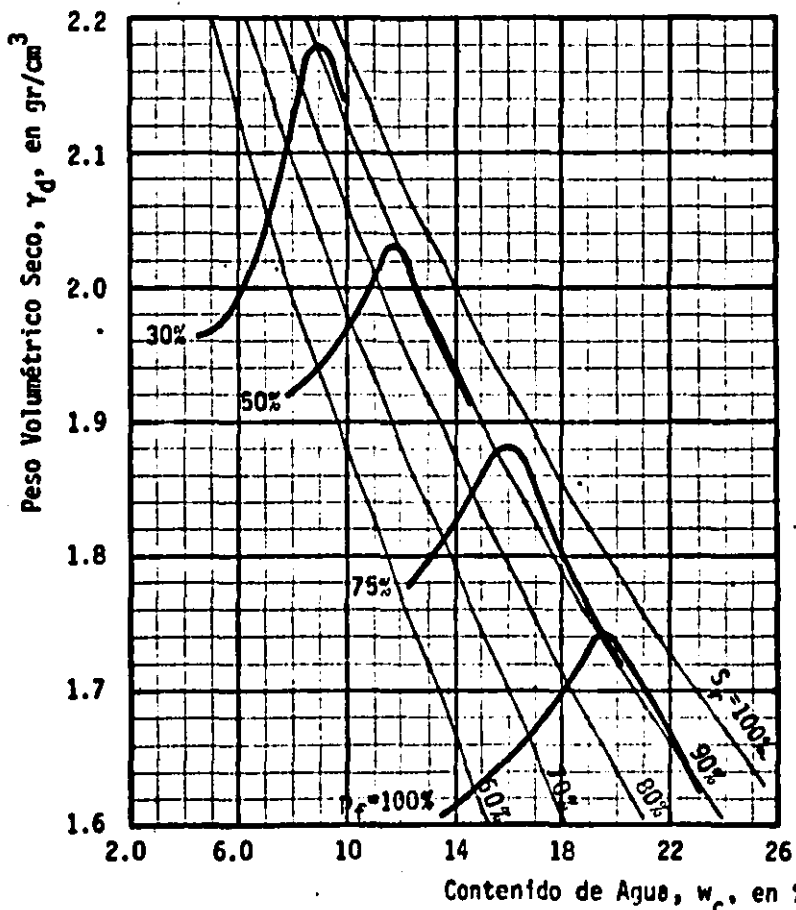
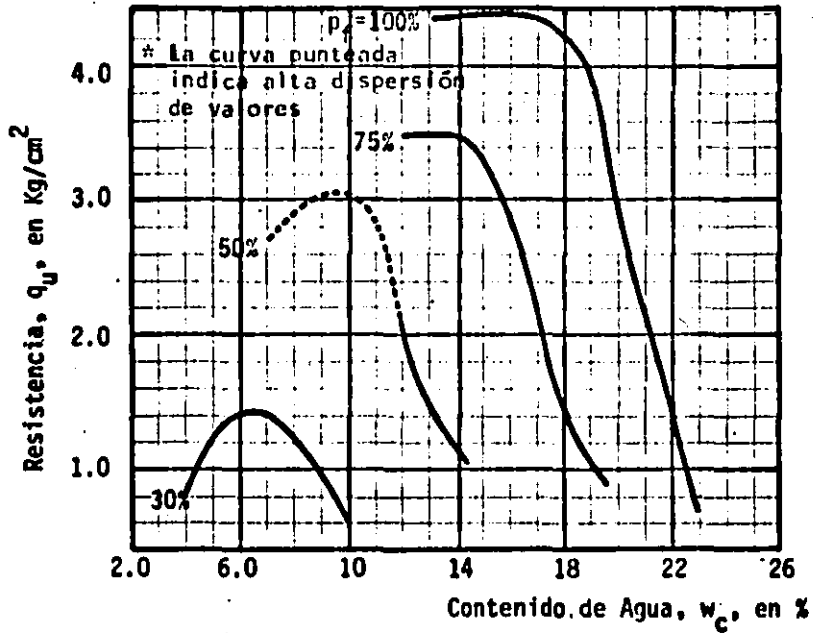


Fig. 4.20 Curvas de compactación y resistencia en compresión no confinada, Mezcla de finos y gruesos. (SC-Chicoasén-San Roque)

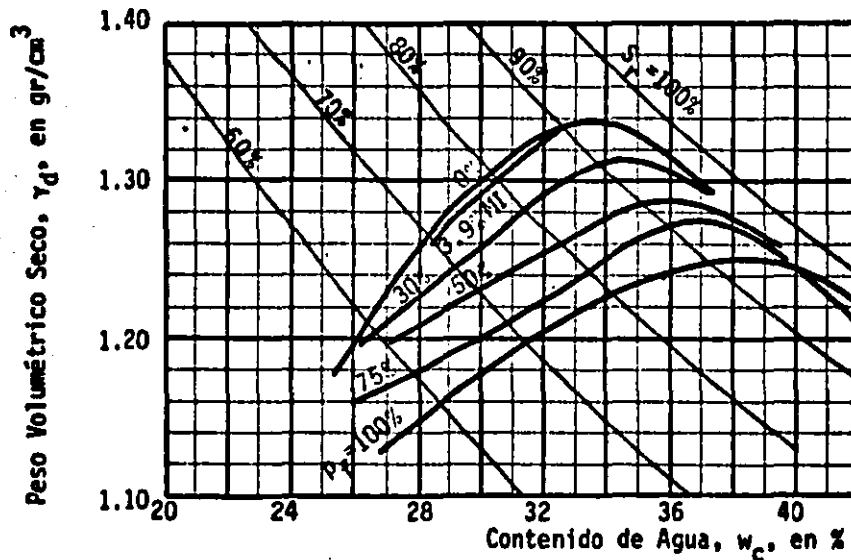
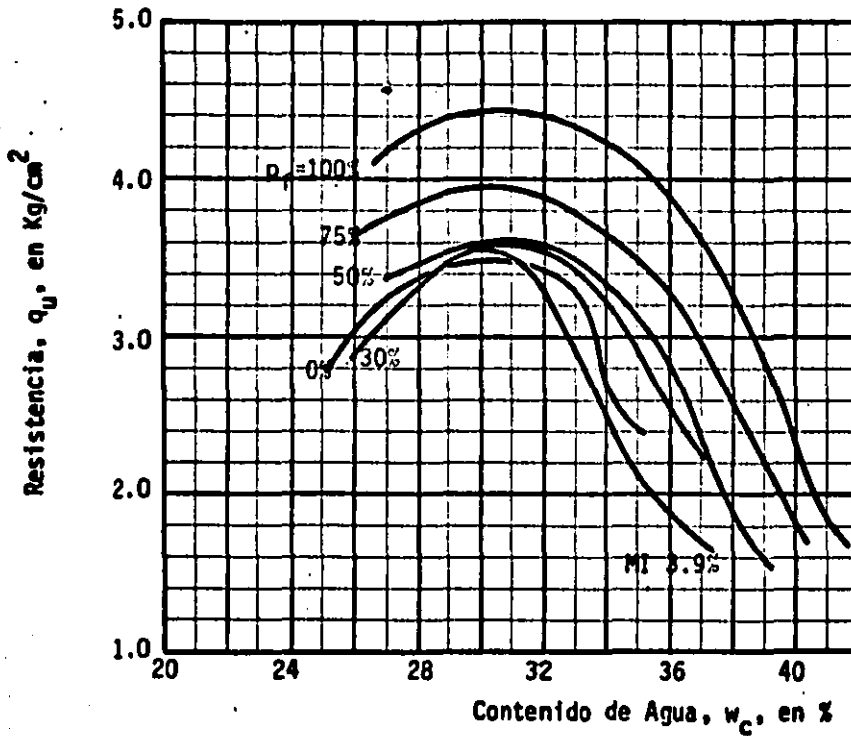


Fig. 4.21 Curvas de compactación y resistencia en compresión no confinada, Mezclas de finos y gruesos. ( CH-La Peña )



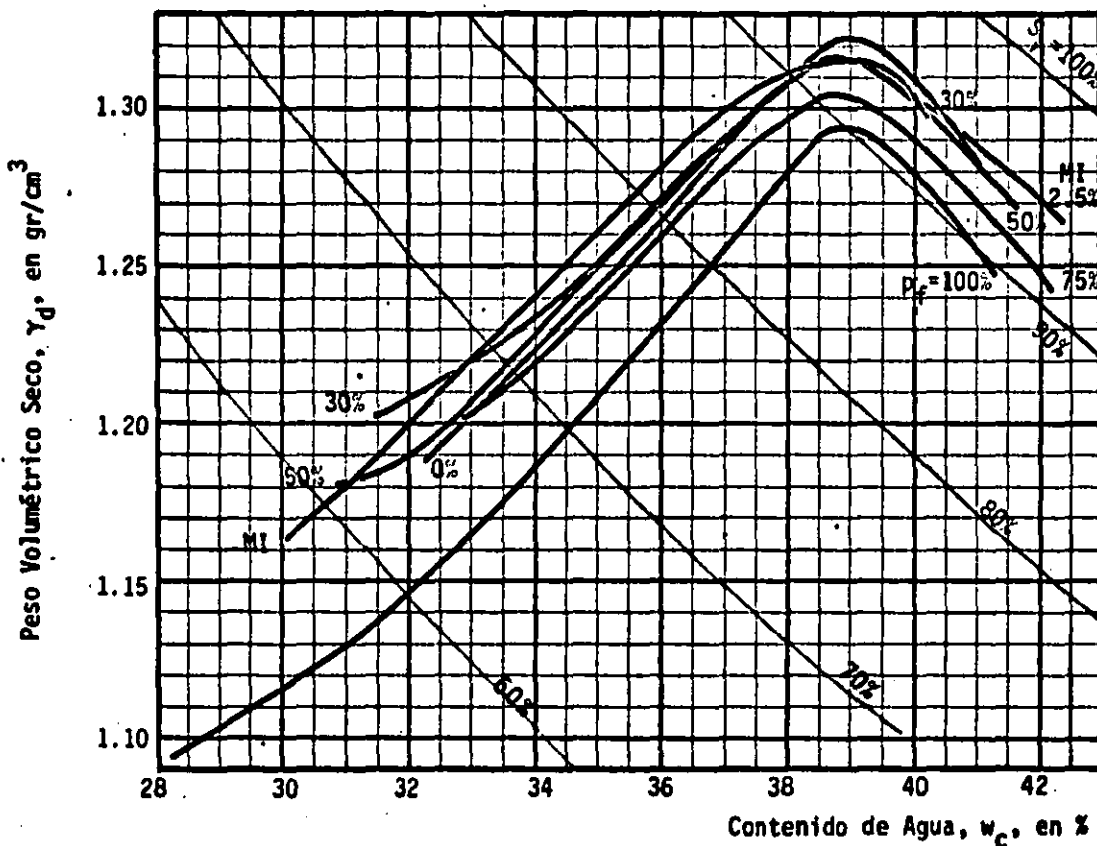
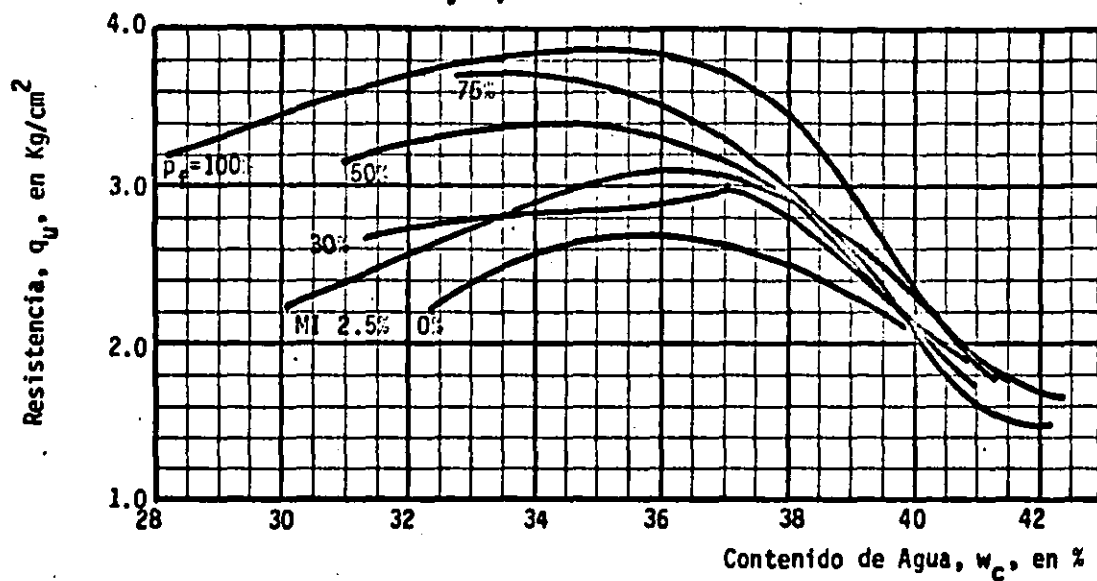


Fig. 4.22 Curvas de compactación y resistencia en compresión no confinada, Mezcla de finos y gruesos. (MH-Necaxa)

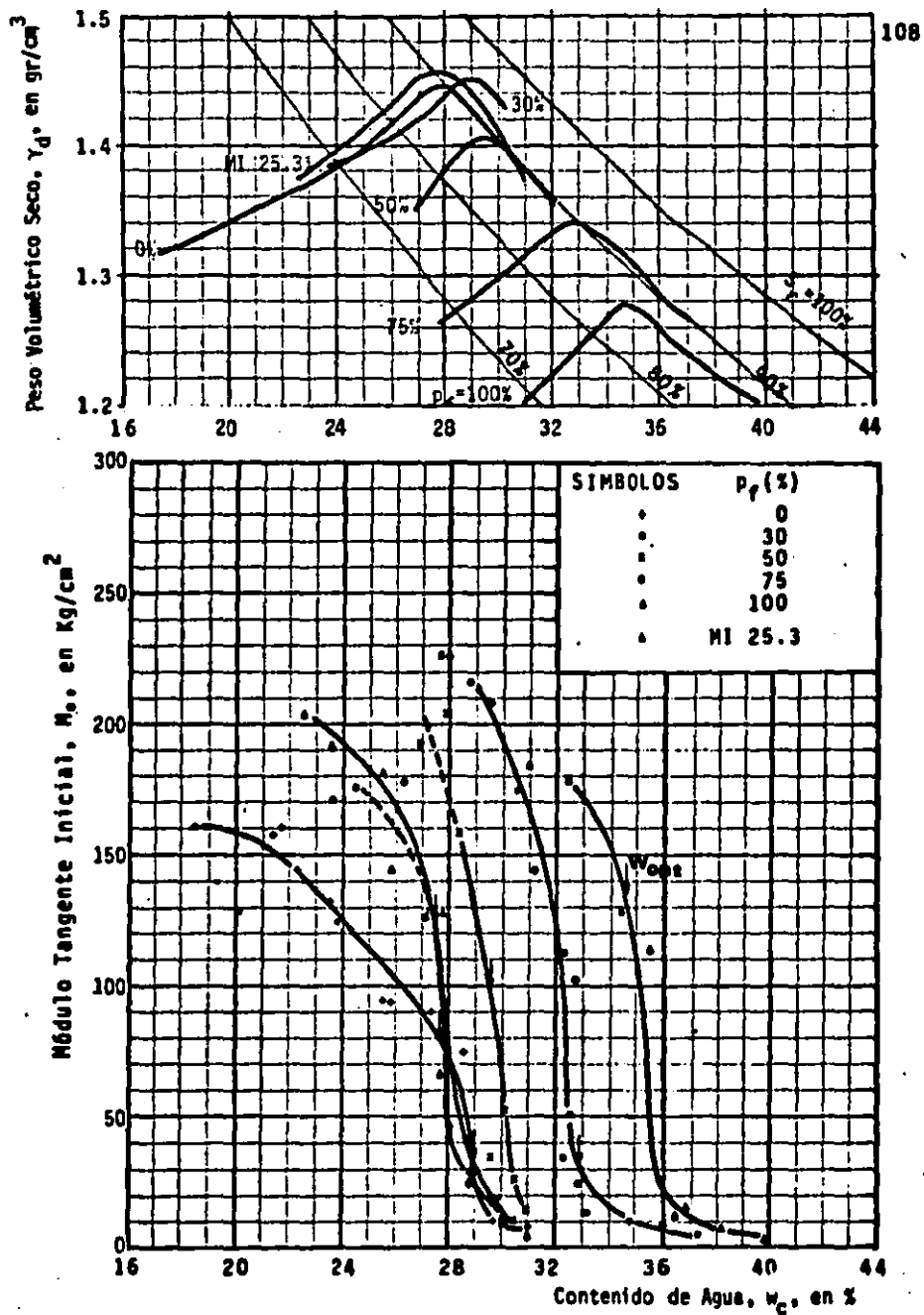


Fig. 4.23 Curvas peso volumétrico seco y módulo tangente inicial vs contenido de agua, para diferentes porcentajes de finos. (SM-San Vicente; Amasado 27-10-10)

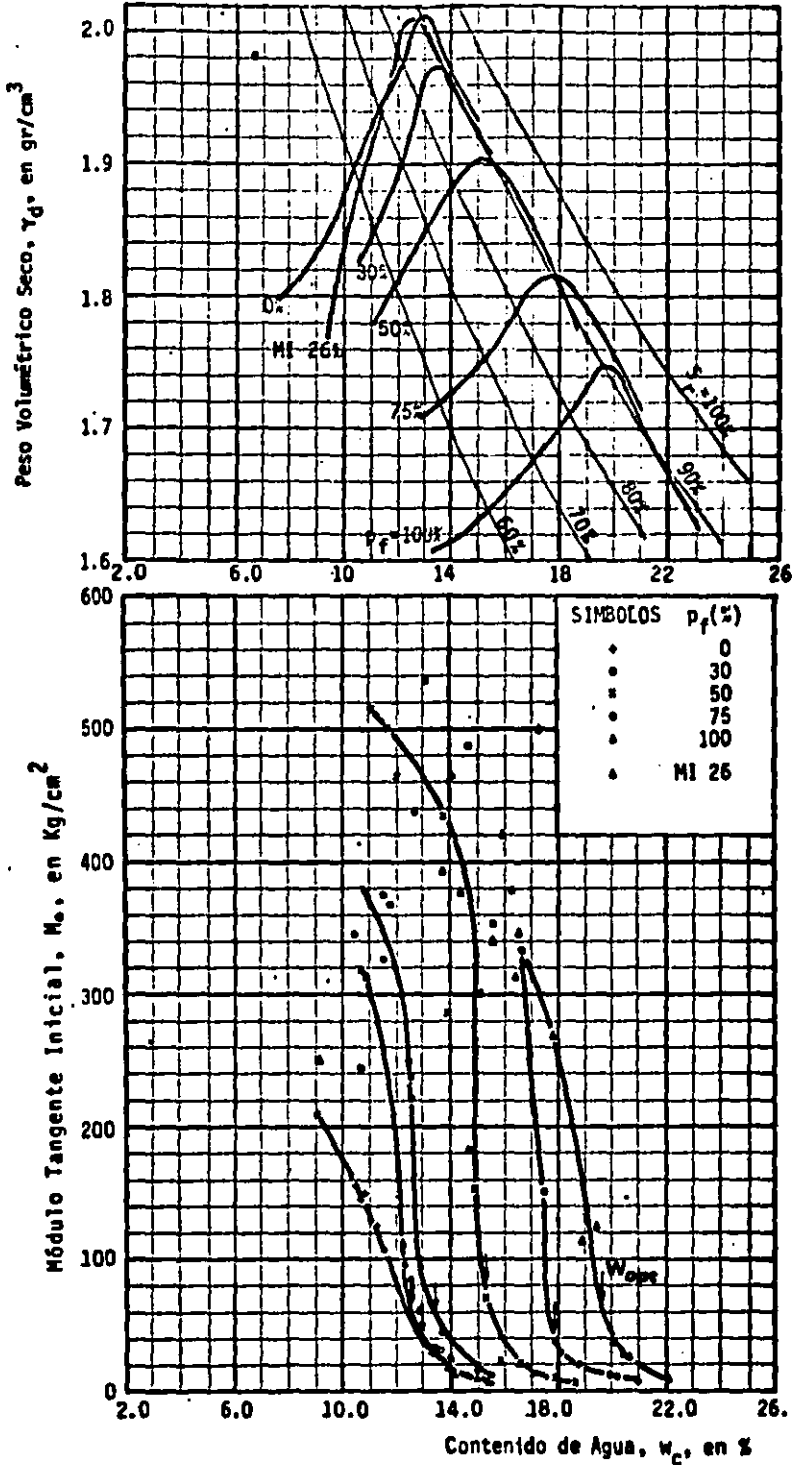


Fig. 4.24 Curvas peso volumétrico seco y módulo tangente inicial vs contenido de agua, para diferentes porcentajes de finos. (SC-Chicoasén; Anasado 27-10-10)

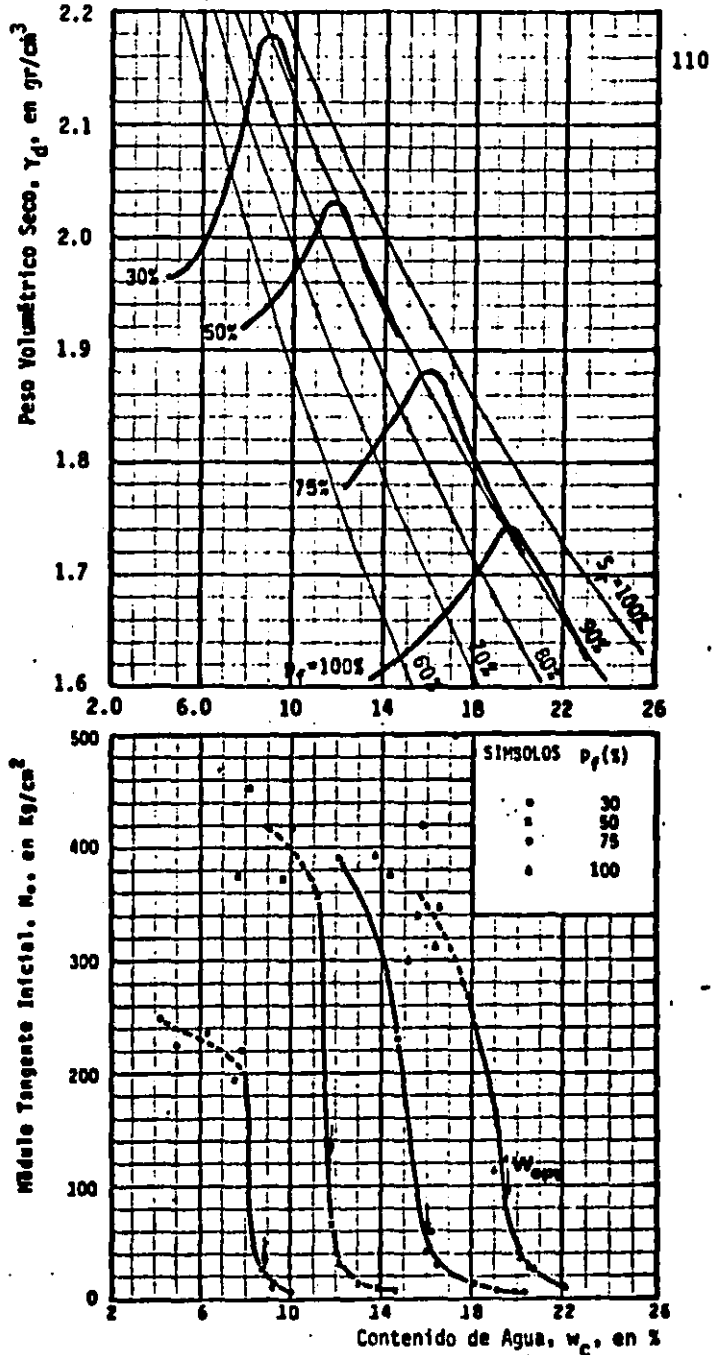


Fig. 4.25. Curvas peso volumétrico seco y módulo tangente inicial vs contenido de agua, para diferentes porcentajes de finos. (SC-Chicoasén-San Roque; Amasado 27-10-10)

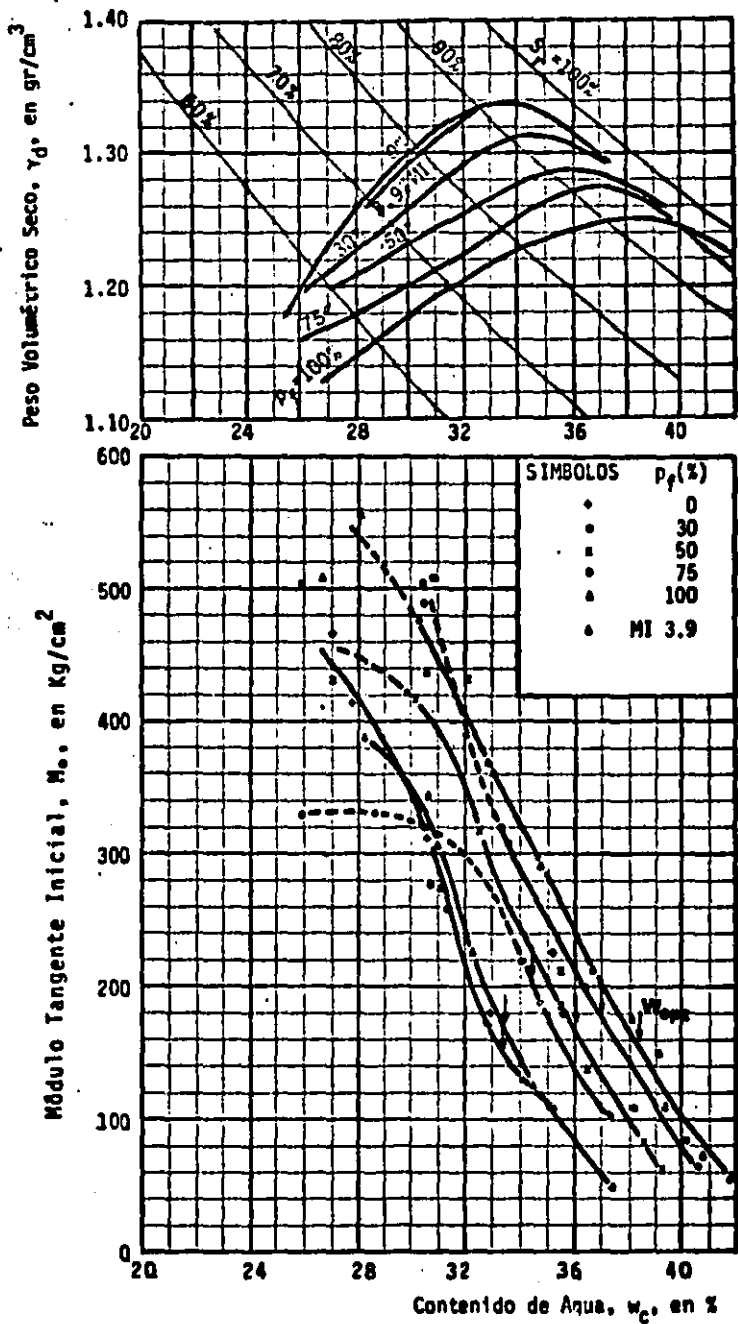


Fig. 4.26 Curvas peso volumétrico seco y módulo tangente inicial vs contenido de agua, para diferentes porcentajes de finos. (CH-La Peña; Amasado 27-10-10)

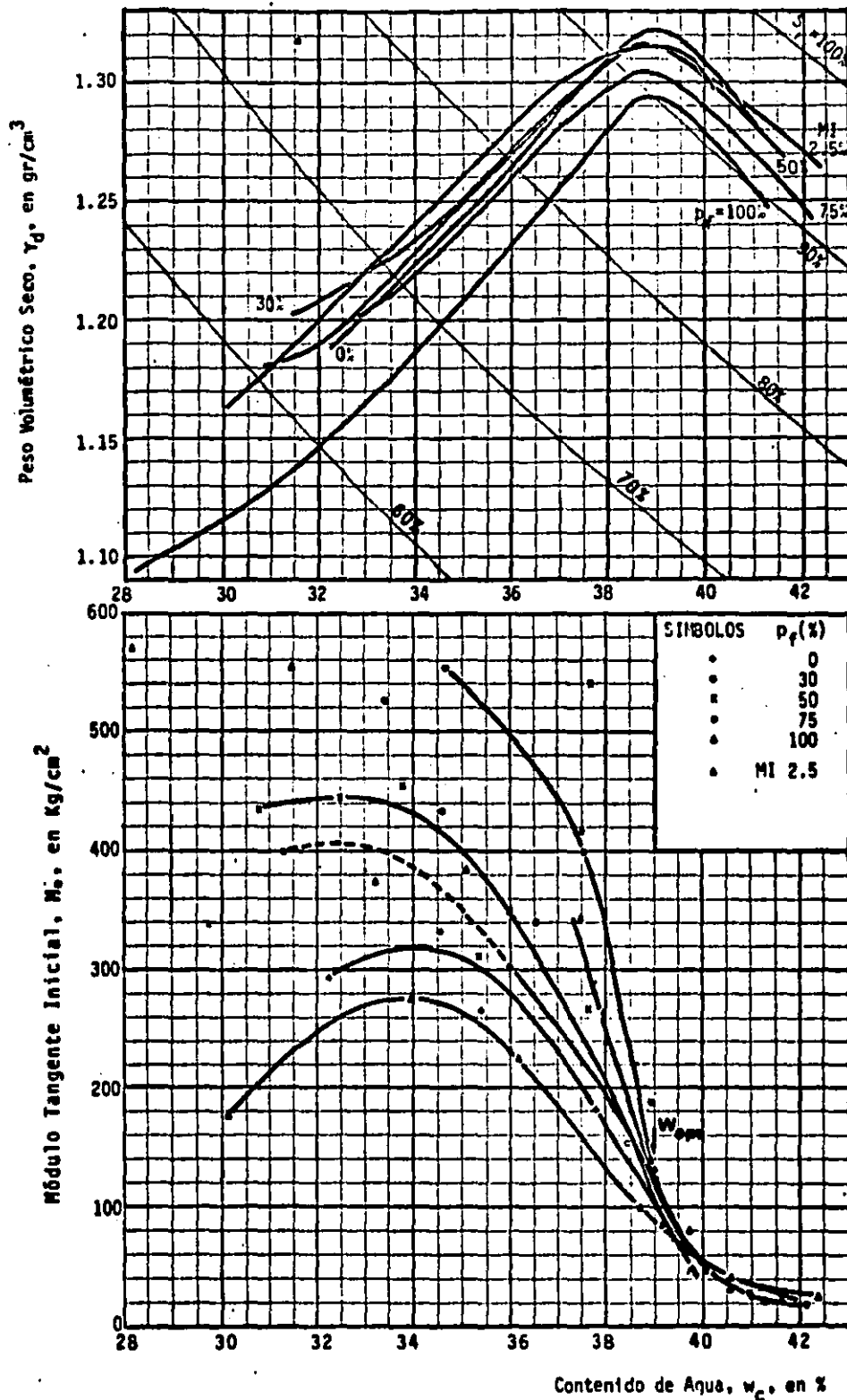


Fig. 4.27 Curvas peso volumétrico seco y módulo tangente inicial vs contenido de agua, para diferentes porcentajes de finos. (MH-Necaxa; Amasado 27-10-10)

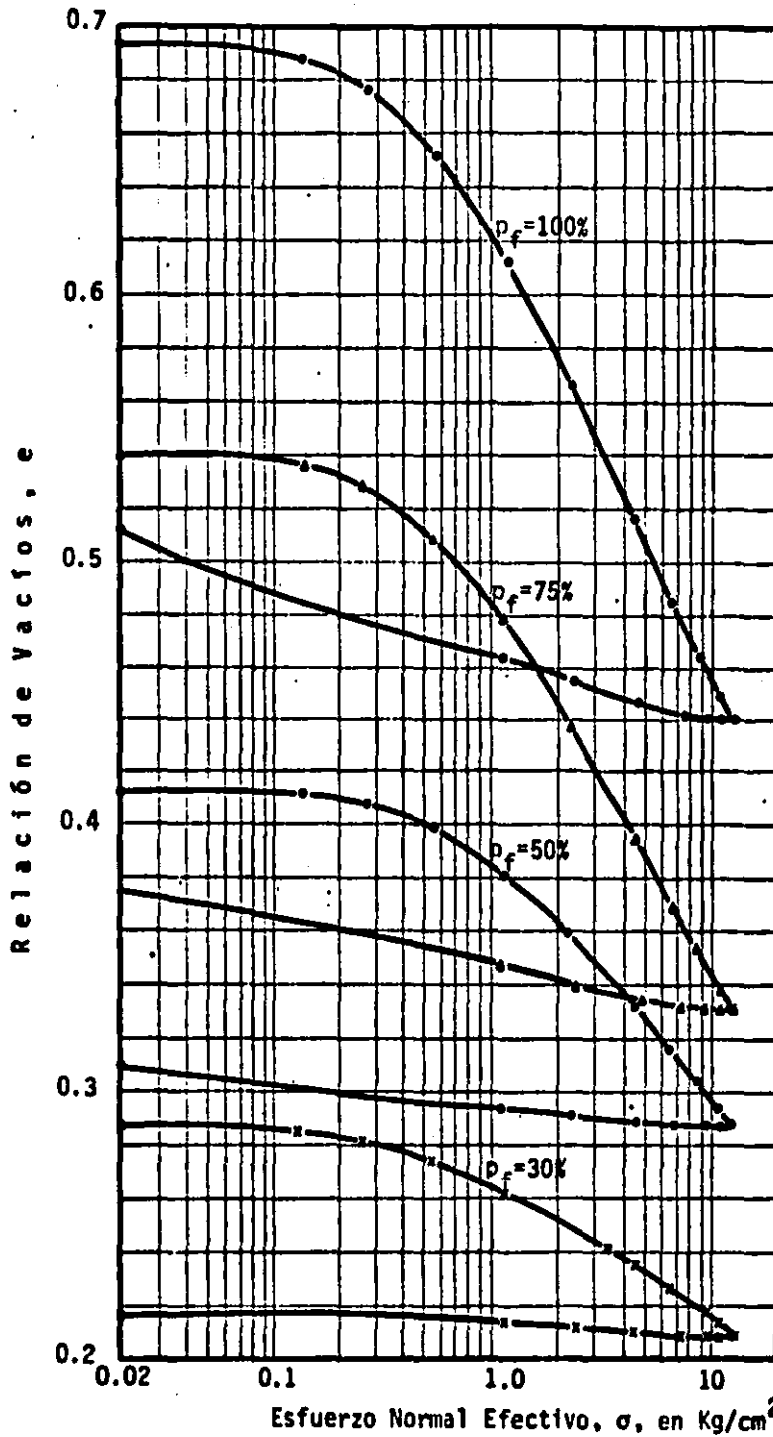


Fig. 4.28. Curvas de compresibilidad para diferentes porcentajes de finos, escala semilog. (SC-Chicoasén-San Roque).

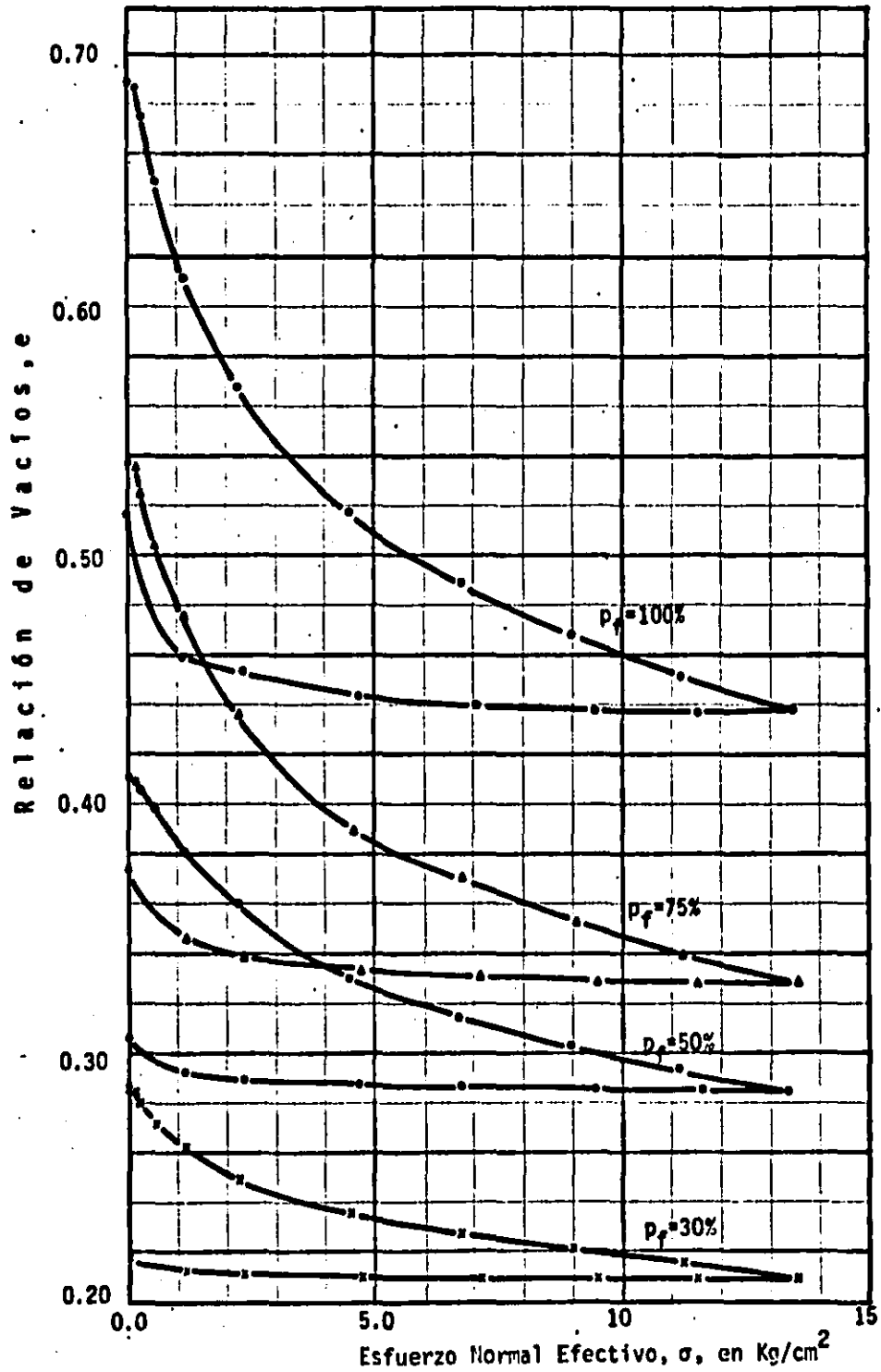


Fig. 4.29 Curvas de compresibilidad para diferentes porcentajes de finos, escala aritmética. (SC-Chicoasén-San Roque).



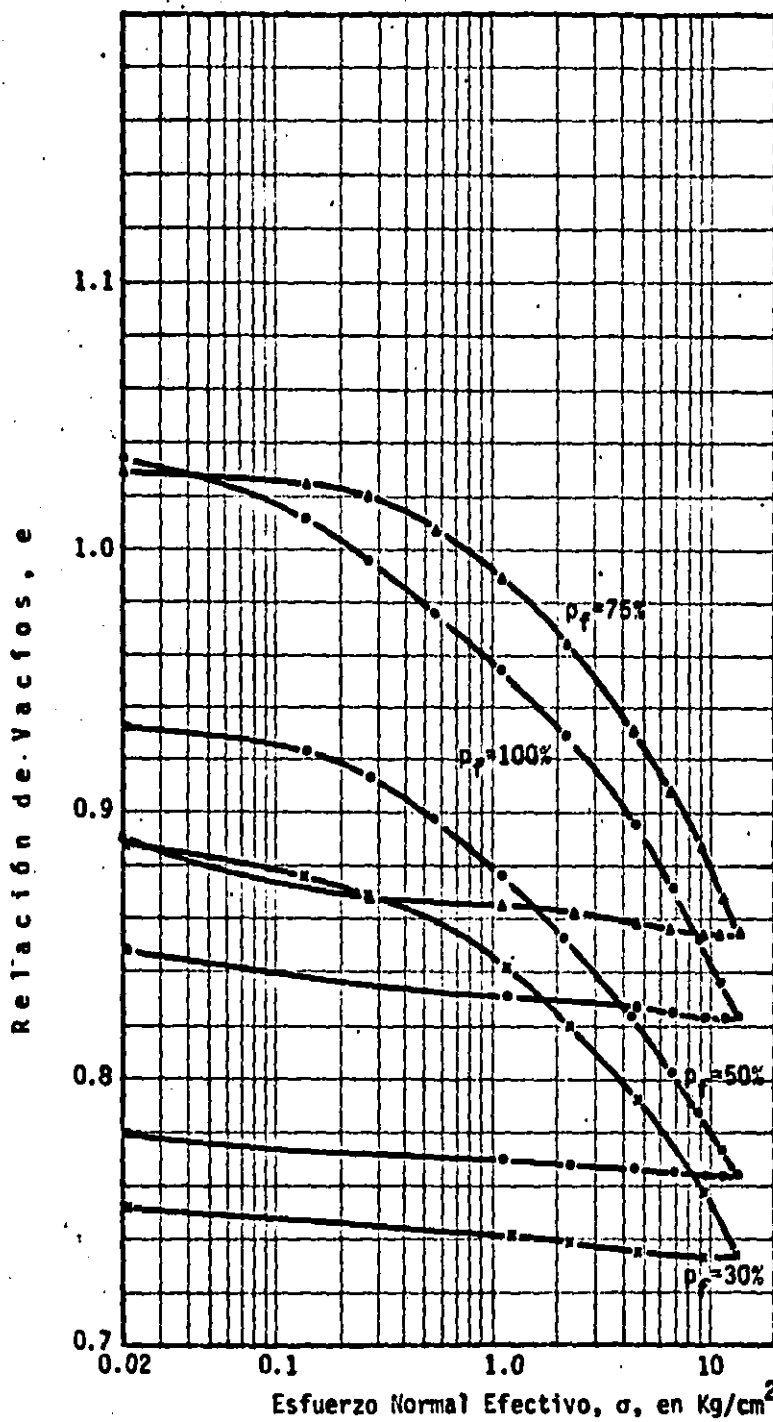


Fig. 4.30. Curvas de compresibilidad para diferentes porcentajes de finos, escala semilog. (SM-San Vicente).

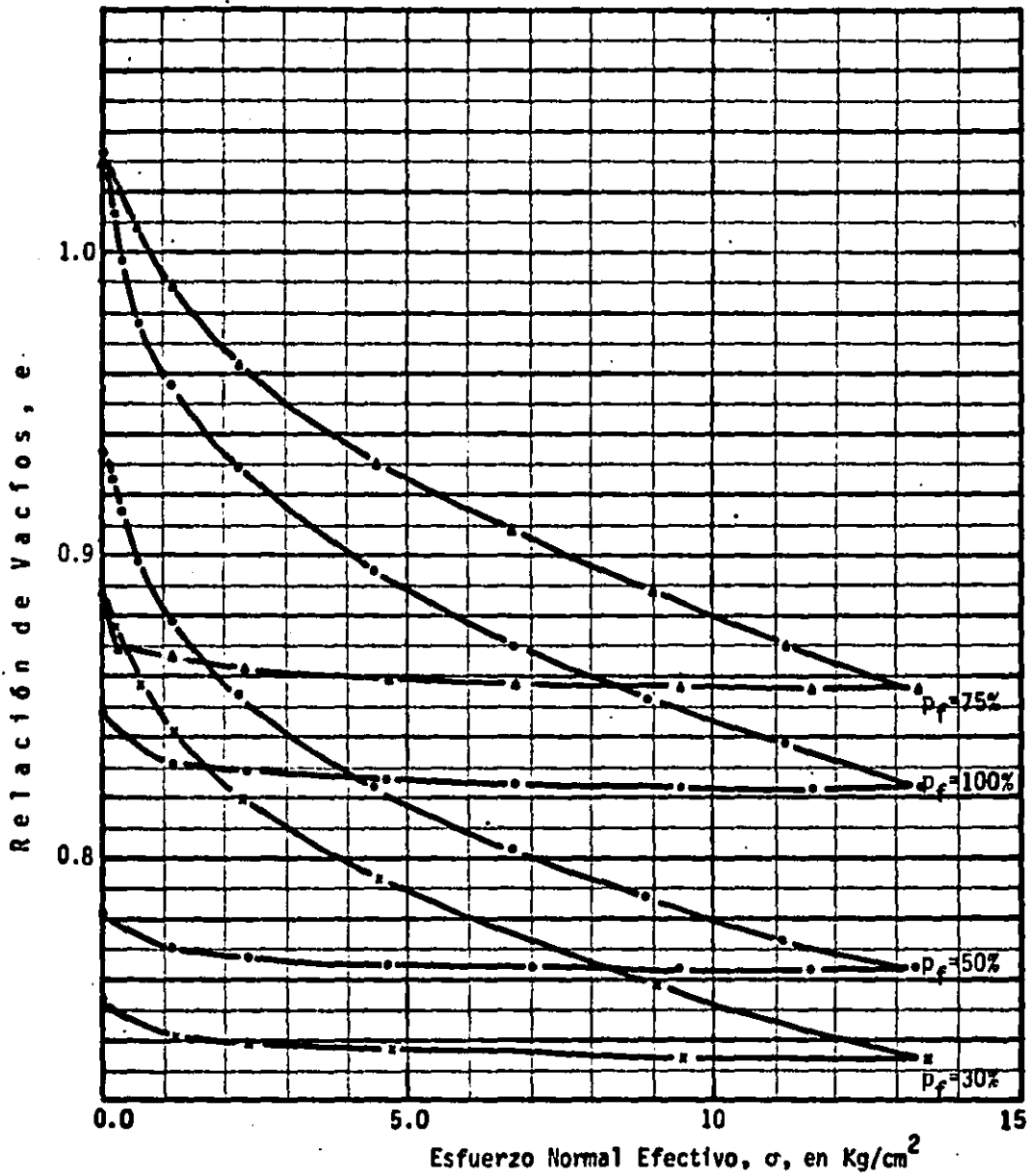


Fig. 4.31. Curvas de compresibilidad para diferentes porcentajes de finos, escala aritmética. (SM-San Vicente).

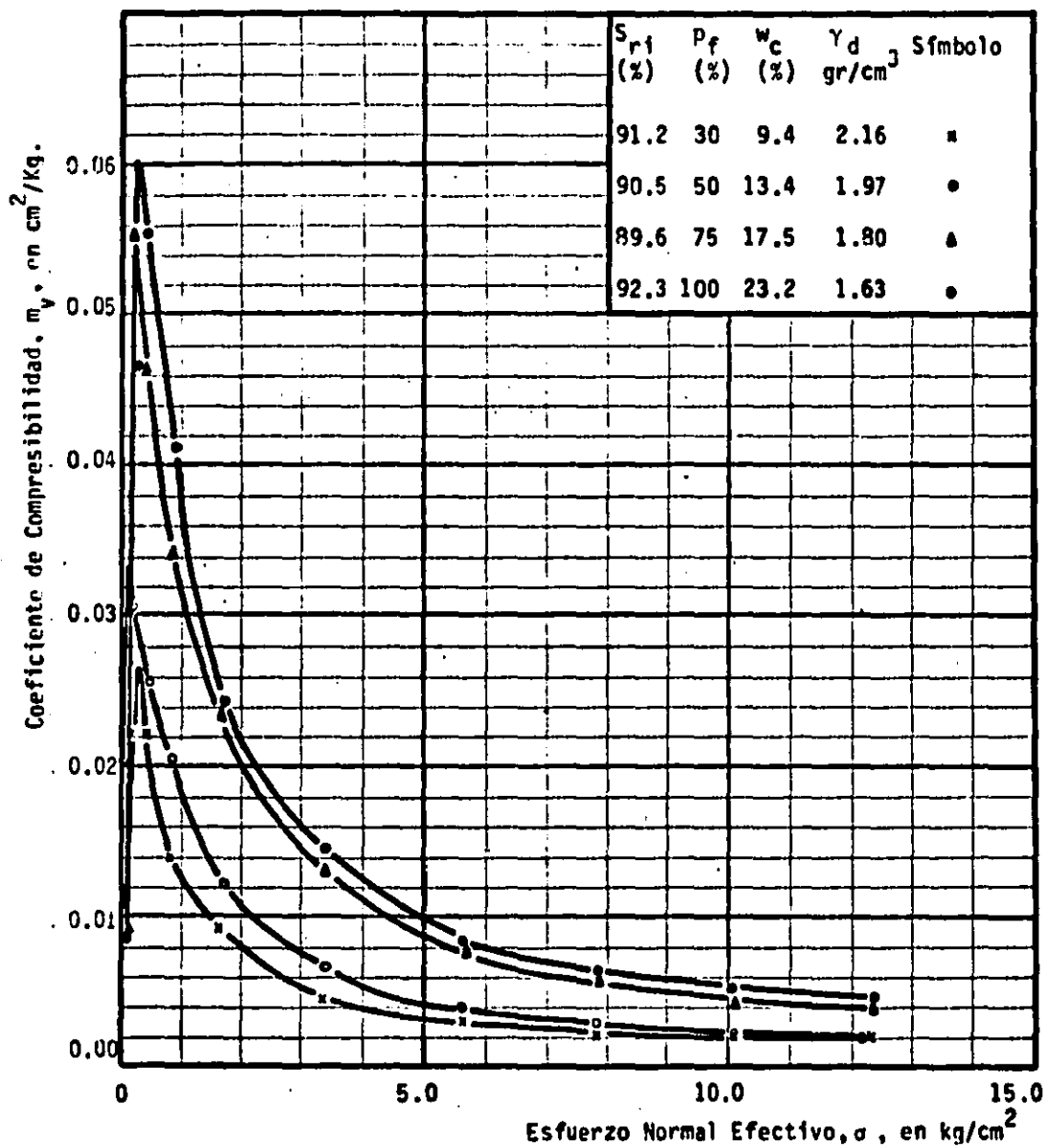


Fig. 4.32 Curvas coeficiente de compresibilidad volumétrica unitaria - vs esfuerzo normal efectivo, para diferentes porcentajes de finos (SC-Chicoasen-San Roque).

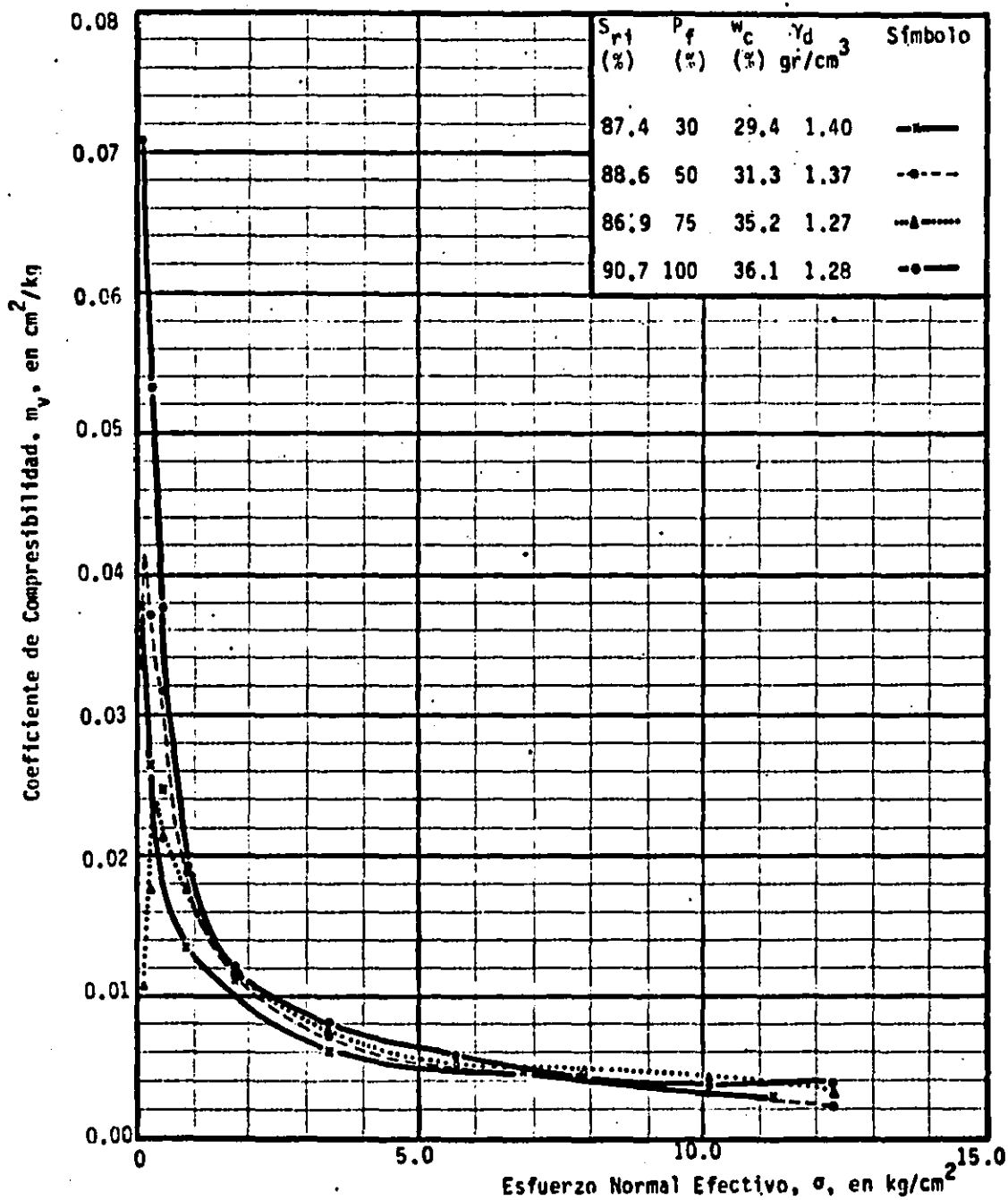


Fig.4.33 Curvas coeficiente de compresibilidad vs esfuerzo normal efectivo para diferentes porcentajes de finos (SM-San Vicente)

## APENDICE 5    Funcionamiento del Porosímetro

Este equipo permite obtener, tanto el volumen de sólidos de grumos y granos como el volumen total de los mismos.

- 1) Para obtener el volumen de sólidos de grumos o de granos se procede de la siguiente manera :
  - a) Determinación del volumen del portamuestras  $V_{c_1}$  : con las válvulas 1 y 3 abiertas y la 2 cerrada, Fig. 5.6 , se coloca el depósito de mercurio en la posición 1, se regis-

trán las lecturas iniciales  $h_0$  y  $L_0$ , se cierra la válvula 3 y se lleva el depósito a la posición 2, de tal forma que  $h_0 - h_1 = h_a$  (altura en cm. de mercurio de la presión atmosférica del lugar; en nuestro caso = 58.0 cm), se registran las lecturas finales  $h_1$  y  $L_1$ . Con las lecturas registradas aplicamos la Ley de Boyle así :

$$P_a \times V_c = P_v \times (V_c + \Delta V)$$

$$P_a \times V_c = (P_a - \gamma_{hg} \times h_1') \times (V_c + \Delta V)$$

$$\gamma_{hg} \times h_a \times V_c = (h_a \times \gamma_{hg} - \gamma_{hg} \times h_1') (V_c + \Delta V)$$

$$V_c \times h_a = V_c \times h_a + \Delta V \times h_a - V_c h_1' - \Delta V \times h_1'$$

$$\Rightarrow \Delta V (h_a - h_1') = V_c h_1'$$

$$\Rightarrow V_c = \left( \frac{h_a}{h_1'} - 1 \right) \times \Delta V \quad (1)$$

$$\text{con } \Delta V = A \times h$$

donde:

$P_a$  = presión atmosférica del lugar.

$V_c$  = volumen del portamuestras.

$P_v$  = presión atmosférica menos el vacío generado.

$h_1'$  = altura de mercurio correspondiente al vacío generado, igual a la diferencia  $L_1 - h_1$ .

$\Delta V$  = incremento del volumen de aire en el portamuestras debido a la disminución de presión.

$A$  = área interior del tubo de vidrio de la Rama B.

$h$  = descenso de la columna de mercurio en la rama del portamuestras. (Rama B).

- b) Se repite la operación con los grumos o granos dentro del portamuestras; obteniendo así la lectura  $L_1'$ . Con los nuevos valores se calcula un volumen de portamuestras  $V_{c_2}$ , empleando la ecuación (1).

La diferencia de valores  $V_{c_1} - V_{c_2}$  da el volumen de sólidos más el volumen de vacíos no comunicados al exterior,  $V_s$ .

## 2) Volumen total de grumos o de granos:

- a) Determinación del volumen del portamuestras hasta una cierta altura de referencia  $0 - 0$ : con válvulas 1 y 3 abiertas y válvula 2 ce-

rrada, se lleva el nivel de mercurio hasta la altura de referencia 0-0 (depósito en posición 3), se cierra la válvula 1 y lentamente se abre la válvula 2, comunicando las ramas A y B, el mercurio alcanza una altura de equilibrio  $Z_1$ ; se registra esta altura, se lleva el depósito de mercurio a un nivel por debajo de la válvula 1, y ésta se abre lentamente.

- b) Se repite el procedimiento con los grumos o granos dentro del portamuestras. La altura de referencia 0-0 debe ser la misma del paso a), y debe cumplirse que el mercurio al llegar a ella cubra completamente los grumos o granos. En esta segunda etapa se registra una altura de equilibrio para el mercurio,  $Z_2$ . La diferencia de lecturas  $(Z_1 - Z_2)$  multiplicada por el área interior de la rama B, más la misma diferencia  $(Z_1 - Z_2)$  multiplicada por el área interior de la rama A, da el volumen total de grumos o de granos,  $V_c$ . La diferencia entre el  $V_0$



lumen total ( $V_t$ ) y el volumen de sólidos más el volumen de vacíos no comunicados al exterior ( $V_s$ ), da el volumen de vacíos comunicados al exterior ( $V_v$ ):  $V_t - V_s = V_v$ .

El cociente entre el volumen de vacíos comunicados al exterior ( $V_v$ ) y el volumen total de grumos o de granos ( $V_t$ ), da la porosidad de los mismos ( $n_g$ ):  $n_g = \frac{V_v}{V_t}$ .

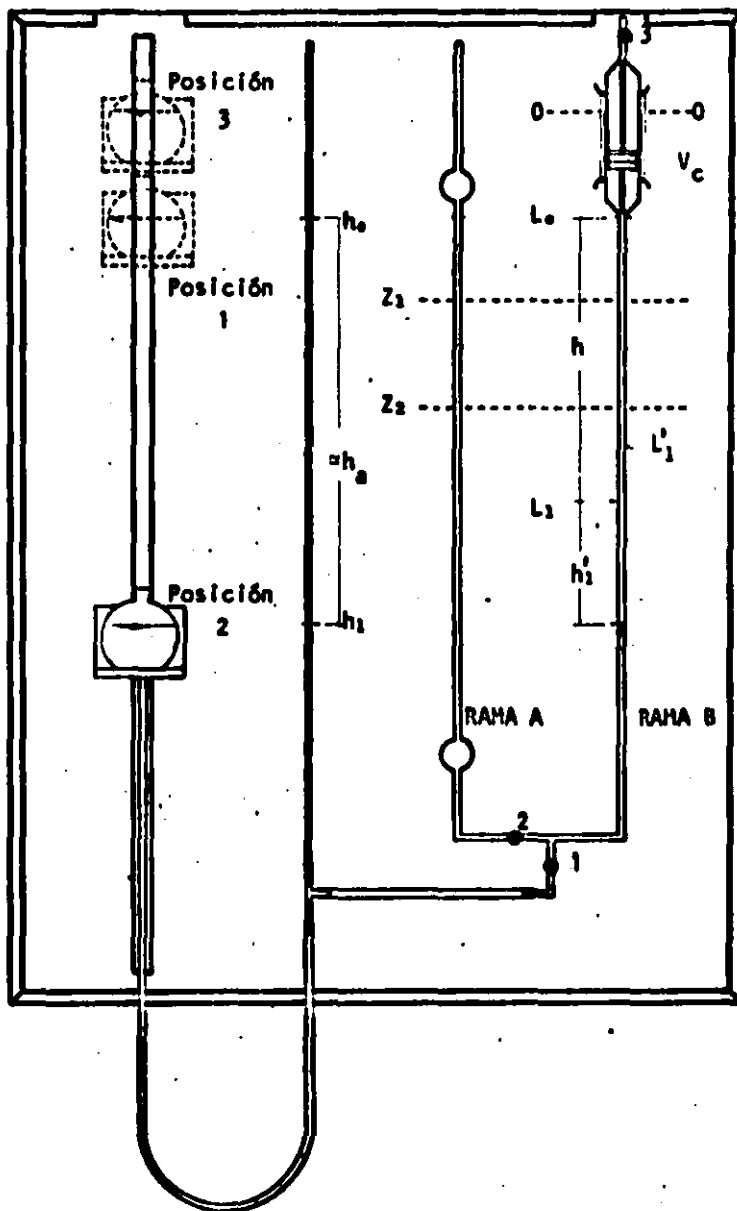


Fig. 5.6 Funcionamiento del porosímetro.

## AGRADECIMIENTOS

Un especial y muy sincero agradecimiento al profesor Raúl J. Marsal, director de esta tesis, por su generosa orientación y continuo estímulo.

Al profesor Jesús Alberro, quien con sus sugerencias y comentarios contribuyó al enriquecimiento del contenido de este trabajo.

Al Dr. Leonardo Zeevaert por sus valiosas críticas . .

Al distinguido grupo de sinodales por sus oportunas observaciones.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM por la beca otorgada para la realización de esta tesis; al Ing. Guillermo Hiriart y al Sr. Rodolfo Domínguez por su colaboración para la realización de algunos ensayos, y en general a todo el personal del I. de I. que de una u otra forma contribuyó para la realización de esta investigación.

A mi amigo Hernán Patiño por su sincero estímulo y sus sugerencias.

Al Dr. Fernando Walls, director del Instituto de Química, por la construcción del porosímetro de vidrio y, al Arq. Arturo Patiño y a la Srta. Leticia Rivas por su valiosa y generosa ayuda en la edición del escrito.

## REFERENCIAS

1. Santiago M, M (1982), *Relaciones entre propiedades de un suelo y las de sus fracciones fina y gruesa*, Informe interno del Instituto de Ingeniería, UNAM, México.
2. Alberro J., Hiriart G., Marsal R. J. y Mendoza M. (1982), *Comportamiento de Suelos Compactados*, V Informe del Instituto de Ingeniería, UNAM, a la Dirección General de Servicios Técnicos, SAHOP, México.
3. Terzaghi, K (1956), *Comentarios sobre el trabajo de G.H. Bolt* (Ref. 4), publicados en *Géotechnique* (Correspondence), Vol. VI, Inglaterra.

4. Bolt, G.H. (1956), *Physico-Chemical analysis of the compressibility of Pure Clays*, Géotechnique, Vol. VI-2, Inglaterra.

5. Hast, N. (1947), *Structure of Clay*, Nature, 159.

6. Alberro J., Mendoza M.J., Marsal R.J. e Hiriart G. (1982), *Comportamiento de Suelos Compactados*, IV Informe del Instituto de Ingeniería, UNAM, a la Dirección General de Servicios Técnicos, SAHOP, México.

7. Marsal, R.J. (1982), *Materiales para construir presas térrreas*, VII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Rio de Janeiro, Brasil.

8. Alberro, J.; Marsal, R.J.; Mendoza, M. y Náder, F (1978), *Comportamiento de Suelos Compactados*, Primer Informe del Instituto de Ingeniería, UNAM, a la Dirección General de Servicios Técnicos, SAHOP, México.

9. Alberro J., Marsal R.J., Mendoza M y Náder F. (1979), *Comportamiento de Suelos Compactados*, Segundo Informe del Instituto de Ingeniería, UNAM, a la Dirección General de Servicios Técnicos, SAHOP, México.

10. Bousaid, I (1963), *Simplified Gas Porosimeter*, -  
Journal Petroleum Technology, JPT Forum, April.
11. Casagrande, A y Hirschfeld, R.C. (1960), *First -  
Progress Report on Investigation of Stress-Deformation and  
Strenght Characteristics of Compacted Clays*, Harvard Soil -  
Mechanics Series No. 61. Harvard University, Cambridge, -  
Massachusetts.
12. Mendoza, M (1982), *Características esfuerzo-defor-  
mación de suelos cohesivos compactados: Efectos estructura-  
les*, Tesis de Maestría en Ingeniería, División de Estudios  
de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM.
13. Alberro, J.; Marsal, R.J.; Mendoza, M. y Náder, F.  
(1979), *Comportamiento de Suelos Compactados*, Segundo Infor-  
me del Instituto de Ingeniería, UNAM, a la Dirección General  
de Servicios Técnicos, SAHOP, México.
14. Lambe, T. William (1951), *Soil testing for engineers*,  
John Wiley and sons, New York.