

# DISPERSION DE RESULTADOS EN ENSAYOS DE MECANICA DE SUELOS

Oscar FERREL\*  
Pedro ORTIGOSA\*\*

## RESUMEN

*Se presentan resultados de ensayos de rutina efectuados por algunos laboratorios de Mecánica de Suelos del país. Para tal efecto, los laboratorios encuestados recibieron muestras perturbadas de arena y arcilla con propiedades repetitivas y un cuadro relativo a las condiciones particulares con que debían efectuarse los ensayos. Se analiza el grado de dispersión de los resultados.*

## INTRODUCCION

Los estudios y análisis de mecánica de suelos para la ingeniería civil requieren, entre otras cosas, conocer las propiedades mecánicas del suelo. Para tal efecto se recurre comúnmente a ensayos de laboratorio efectuados en muestras *representativas* de cada estrato y a ensayos de terreno complementarios. El presente trabajo pretende dar una visión general del grado de dispersión de los resultados de ensayos de rutina realizados por algunos laboratorios de nuestro país.

Cuando se establecen comentarios respecto a la importancia en la práctica de ingeniería de las dispersiones, éstos tienen un carácter muy general ya que, en última instancia, dicha importancia debe ser juzgada por el especialista dentro del marco particular del problema que se encuentre resolviendo. Por la misma razón, el espíritu de este trabajo es presentar resultados sin entrar a analizarlos en forma sistemática y detallada, ni tampoco establecer nuevas normas de ensayos o reco-

---

\* Alumno memorista, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso.

\*\* Ingeniero de IDIEM, Profesor de Mecánica de Suelos, Universidad de Chile, Santiago. Profesor de Mecánica de Suelos, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso.

mendar la eliminación de alguno de ellos por llevar asociado una alta potencialidad de dispersión. Más aun, debido a que en la mayoría de los ensayos participó menos de la mitad de los laboratorios existentes en el país, antes de emprender estudios de esa naturaleza, se considera necesario repetir esta experiencia con una participación masiva de dichos laboratorios.

La Fig. 1 ilustra, a marzo de 1974, un cuadro resumen con los ensayos que realizan los laboratorios que en ella se indican. Sobre su contenido caben los siguientes comentarios:

1. El número de laboratorios señalados en la figura cubre presumiblemente el 90% de los existentes en el país, en tanto no se consideren los laboratorios zonales de la Dirección de Vialidad del MOPT. La no inclusión del 10% restante se debe, ya sea a desconocimiento de los autores sobre la existencia de ciertos laboratorios, ya sea a que no se tuvo respuesta a la petición de información.
2. La fidelidad del contenido de la figura está limitada por la precisión de la información entregada por cada laboratorio.
3. En la ejecución de los ensayos solicitados para el análisis de sus grados de dispersión, en el mejor de los casos colaboró el 60% de los laboratorios indicados en la figura. La no participación del resto se debió a que no enviaron resultados o a omisiones involuntarias en el despacho de las muestras.

Laboratorio	GRA	w	PE	IP	PS	PM	CBR	CNC	DR	CU	T
U. de Chile - Valpso.	Si										
Sol - Explor - Stgo.	Si	Si		Si							
U. Técnica - Stgo.	Si	Si		Si	Si						
Skorin - Antofagasta	Si	Si	Si	Si	Si	Si					
CORMU - Stgo.	Si	Si	Si	Si	Si		Si				
U. Técnica - Valdivia	Si	Si	Si	Si	Si	Si		Si			
INCO - Stgo.	Si	Si	Si	Si	Si		Si	Si			
IDIEM - Arica	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si		Si		
Edafos - Stgo.	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si		
Vialidad - MOPT - Stgo.	Si	Si	Si	Si	Si		Si	Si	Si	Si	Si
Terra - Stgo.	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si			
Riego - MOPT - Stgo.	Si	Si	Si	Si	Si	Si		Si	Si	Si	Si
U. Católica - Valpso.	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	
Ingelab - Stgo.	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	
Solum - Stgo.	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	
ENDESA - Stgo.	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
E. Rowe - Stgo.	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
U. Santa María - Valpso.	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
U. Católica - Stgo.	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
IDIEM - Stgo	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si

SIMBOLOGIA: GRA = Granulometría; w = Contenido de humedad; PE = Peso específico de sólidos; IP = Índice plasticidad (Límites de Atterberg); PS = Proctor estándar; PM = Proctor modificado; CBR = Razón de soporte California; CNC = Compresión no confinada; DR = Densidad relativa; CU = Consolidación unidimensional; T = Triaxial.

Fig. 1. Capacidad entregada por los laboratorios de ejecución de ensayos de rutina a marzo de 1974.

ENSAYOS SOLICITADOS

Con el fin de analizar el grado de dispersión antes señalado se eligieron los ensayos de rutina indicados en la Tabla I. Para materializarlos, a cada laboratorio encuestado se le enviaron 50 kg de arcilla y 15 kg de arena indicándose las condiciones particulares con que debía realizarse cada ensayo. Se insistió que respondieran en forma anónima, que efectuaran sólo ensayos para los cuales contaban con equipo propio, que emplearan procedimientos seguidos comúnmente dentro de la rutina de trabajo y que utilizaran muestras vírgenes.

Uno de los problemas fundamentales fue la elección del suelo a emplear en los ensayos ya que, idealmente, los resultados debían reflejar aspectos inherentes a los equipos y metodologías de ensayo, errores humanos, etc. con exclusión total de variaciones introducidas por cambios de las características intrínsecas al suelo. Con dicho fin se decidió emplear arena proveniente del estero Marga-Marga (Viña del Mar) tamizada entre malla 10 y 40 ASTM y arcilla extraída de los terrenos de la refinería de petróleo de la ENAP (Concón).

Ambos tipos de suelo presentaban un grado de homogeneidad adecuado como para garantizar que todos los laboratorios recibieran muestras virtualmente idénticas. En la Fig. 2 se han graficado las curvas granulométricas correspondientes a la arena y a la arcilla enviadas a los laboratorios encuestados. Estas curvas se confeccionaron con los resultados de ensayos granulométricos efectuados por los laboratorios indicados en dicha figura, los cuales, a pesar de no haberse solicitado el ensayo, lo ejecutaron.

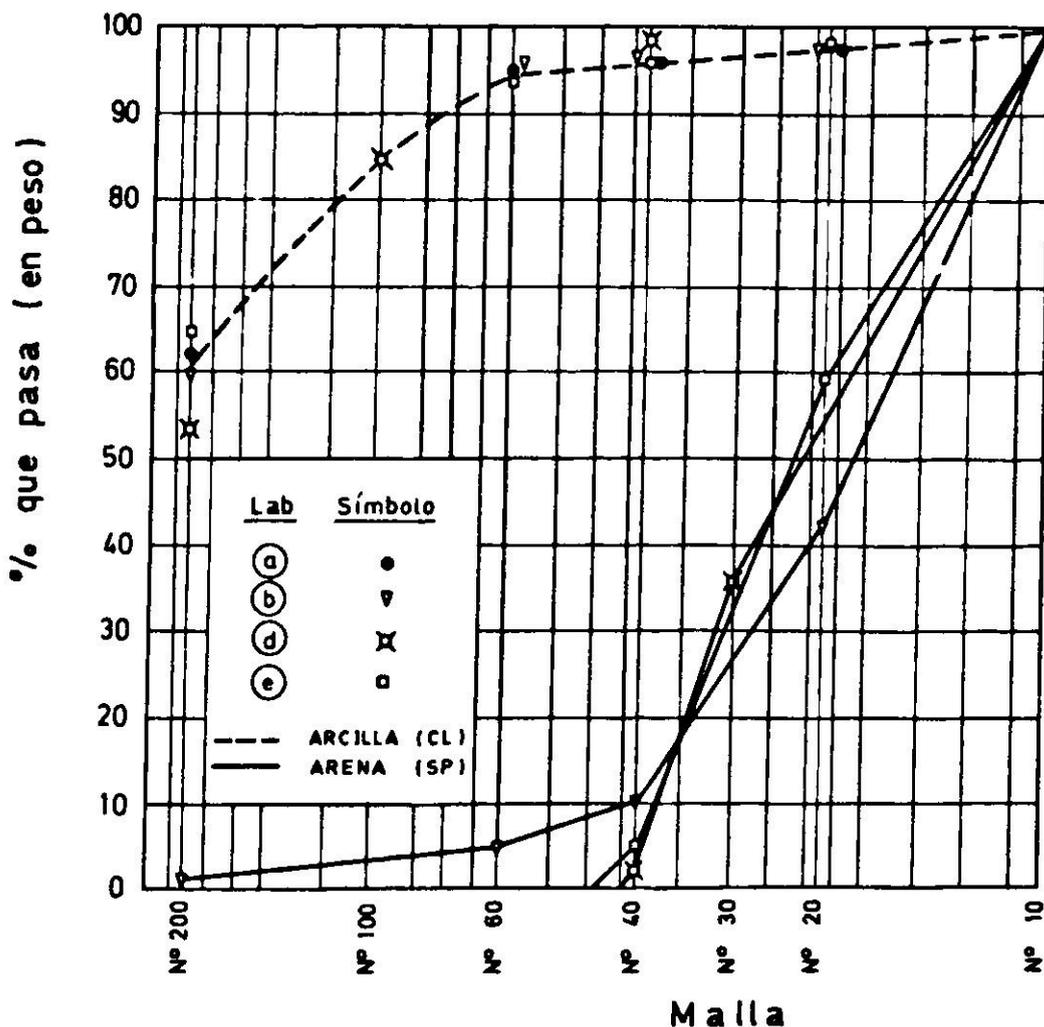


Fig. 2. Curvas granulométricas de la arena y arcilla entregadas a los laboratorios encuestados.

TABLA I  
CUADRO DE ENSAYOS SOLICITADOS A LOS LABORATORIOS ENCUESTADOS

I ARCILLA			
Tipo de ensayo	Carácter y condiciones en que se realizarán los ensayos	Resultados a entregar	n° de muestras vírgenes a ensayar
1) Límites de Atterberg		Límite líquido y límite plástico	
2) Proctor	Proctor estándar	Curva (o datos para confeccionarla) de humedad vs densidad seca.	5
3) C.B.R. (Razón de soporte California)		o/o de C.B.R.	
4) Triaxial	Triaxial no drenado del tipo CIU en muestra compactada y saturada. Se efectuará con medición de presión de poros (si el equipo no mide $u$ , el ensayo se efectuará sin medirla). Las fatigas de confinamiento a usar serán: $\bar{\sigma}_c = 0.2, 1.0, 2.0$ y $3.0 \text{ kgf/cm}^2$ . La probeta a utilizar (diámetro = 5 cm y altura = 10 cm) será compactada con el $w_{opt}$ y el $\gamma_{dm\acute{a}x}$ obtenidos del proctor estándar. Si no se ensayan probetas con las dimensiones indicadas, éstas se confeccionarán con el diámetro y altura más cercanos que se disponga (manteniendo la relación diámetro/altura = 1/2). El criterio anterior se hará extensivo, si procede, a las fatigas de confinamiento isotrópicas indicadas más arriba. La saturación se hará una vez compactada la probeta.	Curva (o datos para confeccionarla) de carga vs deformación y variación de la presión de poros para los distintos $\bar{\sigma}_c$ . Valores de $c$ y $\phi$ . Tamaño probeta y velocidad de aplicación de la carga. Método de saturación.	4
5) Consolidación Unidimensional	Se efectuará en una probeta compactada con el $w_{opt}$ y el $\gamma_{dm\acute{a}x}$ obtenidos del Proctor estándar, la que posteriormente se saturará. La saturación se hará en el consolidómetro ( $40 \text{ cm}^2$ de área o uno cuya área más se aproxime a la especificada) sin colocar sobrecarga. La carga se realizará hasta $8 \text{ kgf/cm}^2$ con descarga a 0 y recarga a $16 \text{ kgf/cm}^2$ . La saturación se hará una vez compactada la probeta.	Curva (o datos para confeccionarla) de $e$ vs $\log \bar{\sigma}_v$ . Asentamiento vs tiempo para los incrementos de carga realizados entre 0 y $8 \text{ kgf/cm}^2$ . La curva asentamiento vs tiempo podrá ser reemplazada por la de $u$ vs tiempo. Tamaño probeta. Método de saturación.	1
6) Compresión no confinada	Se efectuará empleando el mismo tipo de probeta utilizada para el triaxial, salvo que ésta no se saturará (ensayo con $w_{opt}$ ).	Curva (o datos para confeccionarla) de carga vs deformación. Valor de $q_u$ . Tamaño probeta y velocidad de aplicación de la carga.	1
II ARENA			
1) Determinación de densidades secas máximas y mínimas		Densidad seca máxima y mínima.	
2) Triaxial	Triaxial drenado del tipo CID. Se efectuará en una probeta compactada a un $DR = 65\%$ . Se utilizarán probetas secas y saturadas. El tamaño de la probeta y $\bar{\sigma}_c$ se ajustarán a lo especificado para triaxial en arcilla.	Curva (o datos para confeccionarla) de carga vs deformación para los distintos $\bar{\sigma}_c$ . Valores de $c$ y $\phi$ . Separar resultados de probetas secas y saturadas	8(4 secas + 4 saturadas)

SIMBOLOGIA:  $u$  = presión de poros;  $\bar{\sigma}_c$  = fatiga efectiva isotrópica de confinamiento;  $\bar{\sigma}_v$  = fatiga efectiva vertical;  $w_{opt}$  = peso unitario seco máximo (densidad seca máxima);  $e$  = razón de vacío (índice de huecos);  $c$  = cohesión;  $\phi$  = ángulo de fricción interna;  $DR$  = densidad relativa;  $CIU$  = ensayo triaxial consolidado isotrópicamente a  $\bar{\sigma}_c$  y con aplicación de carga no drenada;  $CID$  = ensayo triaxial consolidado isotrópicamente a  $\bar{\sigma}_c$  y con aplicación de carga drenada;  $q_u$  = resistencia a la compresión no confinada.

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS SOLICITADOS

Arcilla

Límites de Atterberg

Representan los contenidos de humedad con los cuales un suelo fino se encuentra entre los estados de consistencia semilíquida y plástica (límite líquido  $w_l$ ) y los estados de consistencia plástica y semisólida (límite plástico  $w_p$ ). Las determinaciones de esos contenidos de humedad están definidas en procedimientos de ensayo normalizados un tanto arbitrarios (*Norma ASTM D-423 y ASTM D-424*). Sin embargo, los límites de Atterberg permiten clasificar los suelos finos según el sistema U.S.C.S. (Unified Soil Classification System) a través de la carta de plasticidad de Casagrande y establecer correlaciones, por lo menos cualitativas, con sus propiedades mecánicas de uso en ingeniería.

En la Tabla II se presentan los valores de los límites líquido y plástico informados por 9 de los laboratorios encuestados y en la Fig. 3 la ubicación de dichos resultados en la carta de plasticidad de Casagrande.

TABLA II

LIMITE LIQUIDO. LIMITE PLASTICO E INDICE DE PLASTICIDAD DE LA ARCILLA INFORMADOS POR 9 LABORATORIOS

	Laboratorio									
	a <sup>5</sup>	b <sup>1</sup>	b <sup>2</sup>	c <sup>5</sup>	d <sup>3</sup>	e <sup>5</sup>	f <sup>5</sup>	g <sup>4</sup>	h <sup>5</sup>	i <sup>5</sup>
$w_l$ (°/o)	31	31	34	32	33	33.3	34.3	35.2	36	38
$w_p$ (°/o)	16	15	16	18	16	15.4	17.7	15.5	15	20
$IP = w_l - w_p$	15	16	18	14	17	17.9	16.6	19.7	21	18

1 = Muestra ensayada con humedad natural.

2 = Muestra bajo malla 40 ASTM dejándola con agua de amasado durante 24 horas antes de ensayarla.

3 = Secaron la muestra al horno.

4 = Muestra bajo malla 40 ASTM dejándola con agua de amasado durante 72 horas antes de ensayarla.

5 = No hacen indicaciones alusivas al procedimiento de ensaye.

Los resultados indican dispersiones máximas de  $\pm 3.5\%$ ,  $\pm 2.5\%$  y  $\pm 3.5$  para el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad respectivamente, las cuales, desde un punto de vista de la práctica en ingeniería, pueden considerarse aceptables.

Peso específico de sólidos  $G_s$

Se define como la razón entre el peso de las partículas de suelo dividido por el volumen ocupado por ellas y su determinación se efectúa de acuerdo a procedimientos normalizados (*Norma ASTM D-854*). Si bien este parámetro no fue solicitado, varios laboratorios lo informaron y, en especial, aquellos que efectuaron el ensayo de consolidación unidimensional<sup>6</sup>.

6 Es necesario en dicho ensayo conocer  $G_s$  para calcular la variación de la razón de vacíos  $e$  en función de la carga aplicada a la probeta.

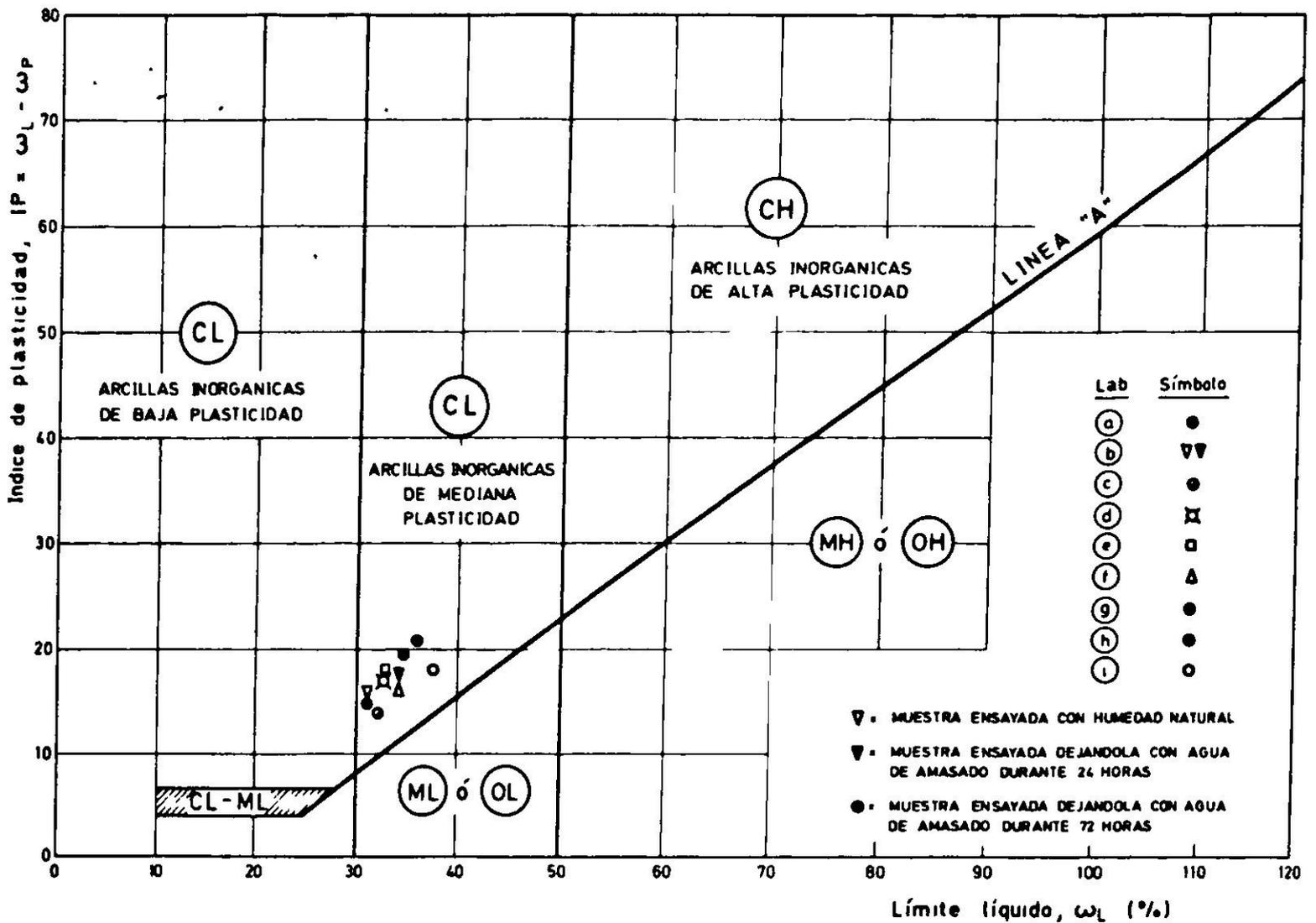


Fig. 3. Arcilla: ubicación de los resultados de 9 laboratorios en la carta de plasticidad de Casagrande.

Se ha considerado de interés presentar los valores de  $G_s$ , ya que pequeños errores en su determinación influyen apreciablemente en el cálculo de parámetros tales como la razón de vacíos  $e$  y el grado de saturación  $S$  del suelo. En la Tabla III se presentan los valores de los pesos específicos informados por 7 laboratorios y en las Figs. 4 y 5 la variación de la razón de vacíos  $e$  y del grado de saturación normalizado  $S/w$  para diferentes densidades secas de la arcilla. En ambas figuras la dispersión de valores se debe a las variaciones de  $G_s$ , pudiéndose detectar para la razón de vacíos una dispersión máxima  $\Delta e_{m \acute{a}x} \approx \pm 0.08$  lo que equivale a un porcentaje máximo de error, referido al valor medio, de aproximadamente  $\pm 12\%$ . Para el grado de saturación, si se considera una densidad seca

TABLA III  
PESO ESPECIFICO DE SOLIDOS INFORMADO  
POR 7 LABORATORIOS

	Laboratorio						
	a	b	d	e	g	h	i
$G_s$ (arena), $t/m^3$	—	—	2.68	2.66	—	—	—
$G_s$ (arcilla), $t/m^3$	2.94 <sup>7</sup>	2.87	2.72	2.78	2.78	2.79	2.66

7 = Determinación con picnómetro.

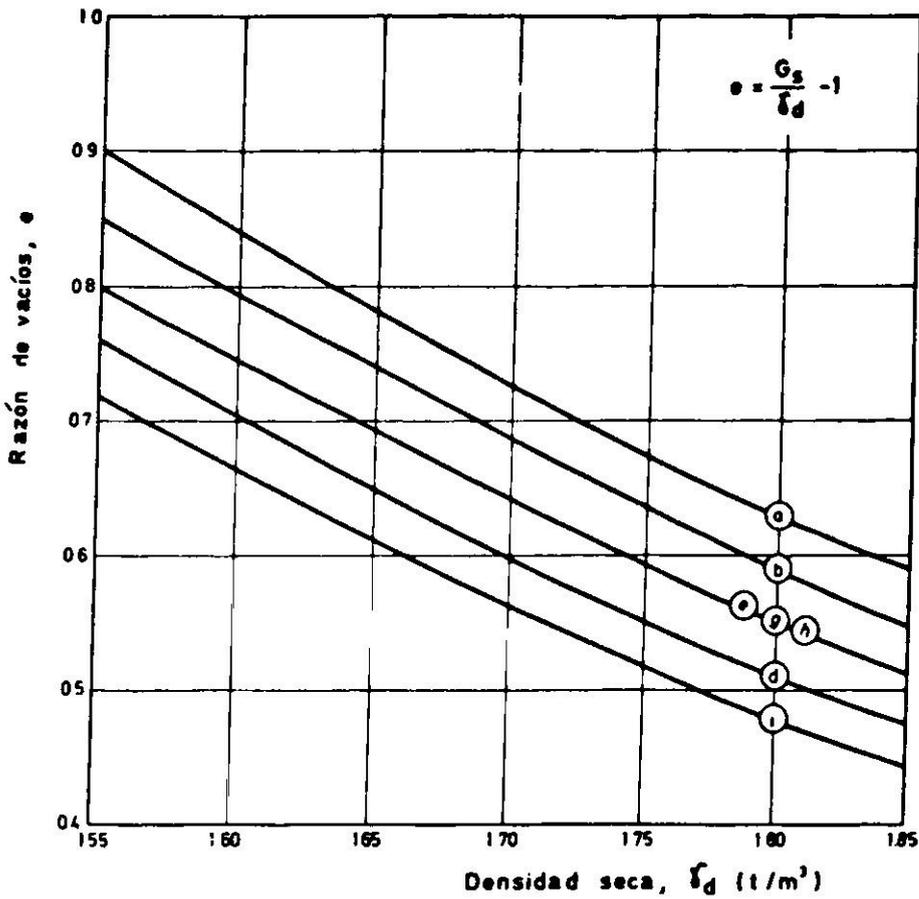


Fig. 4. Arcilla: Razón de vacíos vs densidad seca según 7 laboratorios.

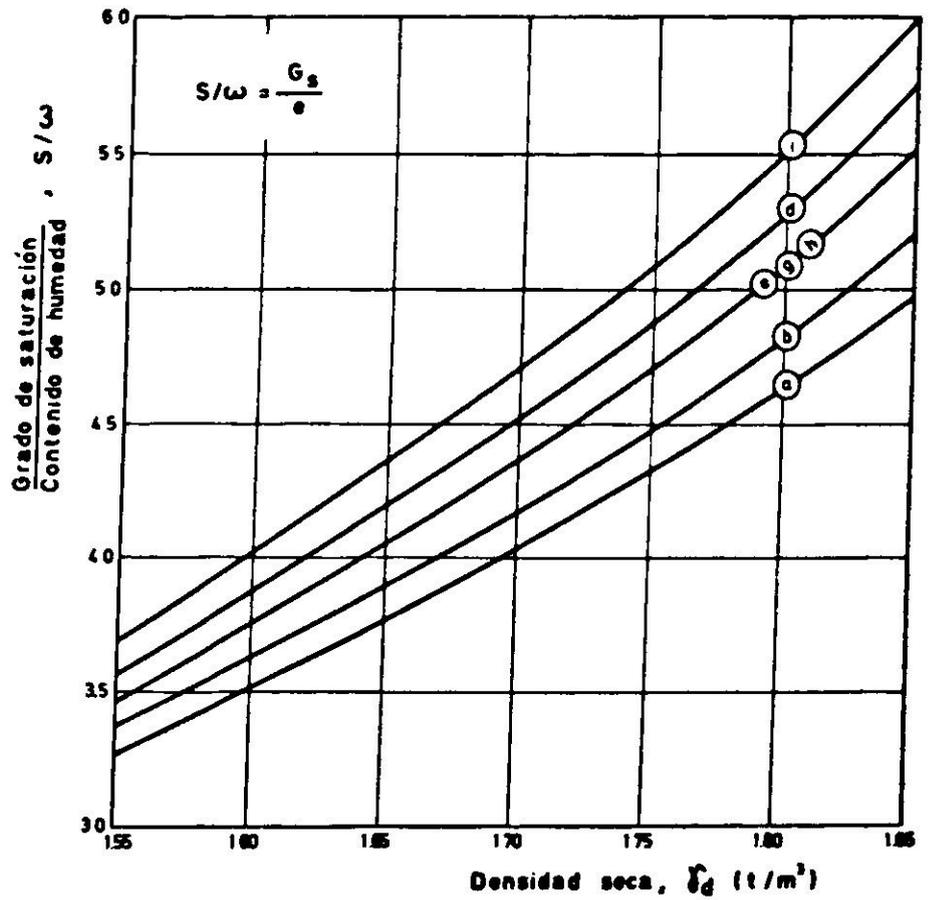


Fig. 5. Arcilla: Grado de saturación normalizado vs densidad seca según 7 laboratorios.

de  $1.70 \text{ t/m}^3$  (valor más o menos típico en arcillas) se obtiene  $S \approx \omega (4.4 \pm 0.35)$ , expresión que aparece tabulada para distintos contenidos de humedad  $\omega$  en la Tabla IV.

Los resultados anteriores indican que el grado de dispersión de  $G_s$  es relativamente alto y que éste podría considerarse más o menos adecuado en tanto no se incluyeran los valores informados por los laboratorios (a) e (i).

**Ensayo Proctor**

Ensayo que trata de reproducir en el laboratorio las condiciones de compactación de un suelo fino en el terreno. Consiste en determinar, para una energía de compactación dada, la densidad seca del suelo en función del contenido de humedad

TABLA IV

RANGO MAXIMO DE VARIACION DEL GRADO DE SATURACION DE LA ARCILLA CON CARGO A VARIACIONES DEL PESO ESPECIFICO DE SOLIDOS

$w$ (°/o)	$S \pm \Delta S$ , (°/o)	$\pm (\Delta S/S) \times 100$ , (°/o)
5	$22 \pm 1.8$	8
10	$44 \pm 3.5$	8
15	$66 \pm 5.3$	8
20	$88 \pm 7.0$	8
22.7	$100 \pm 8.0$	8

de compactación  $w_c$ . Dependiendo de la energía de compactación por unidad de volumen de suelo suministrada en el ensayo se distinguen dos tipos de Proctor: Proctor estándar (*Norma ASTM D-698* o *AASHO T-99*) y Proctor modificado (*Norma ASTM D-1557* o *AASHO T-180*).

En las Figs. 6A y 6B se ilustran los resultados del ensayo Proctor estándar informados por 8 laboratorios. En lo que respecta al contenido de humedad de compactación óptimo  $w_{opt}$ , éste presenta una dispersión máxima de  $\pm 1\%$  lo cual puede considerarse bastante aceptable para fines prácticos (excluye resultado del laboratorio (c)). El análisis para la dispersión de la densidad seca máxima  $\gamma_{dmax}$  se efectuó estableciendo la relación entre el porcentaje de compactación

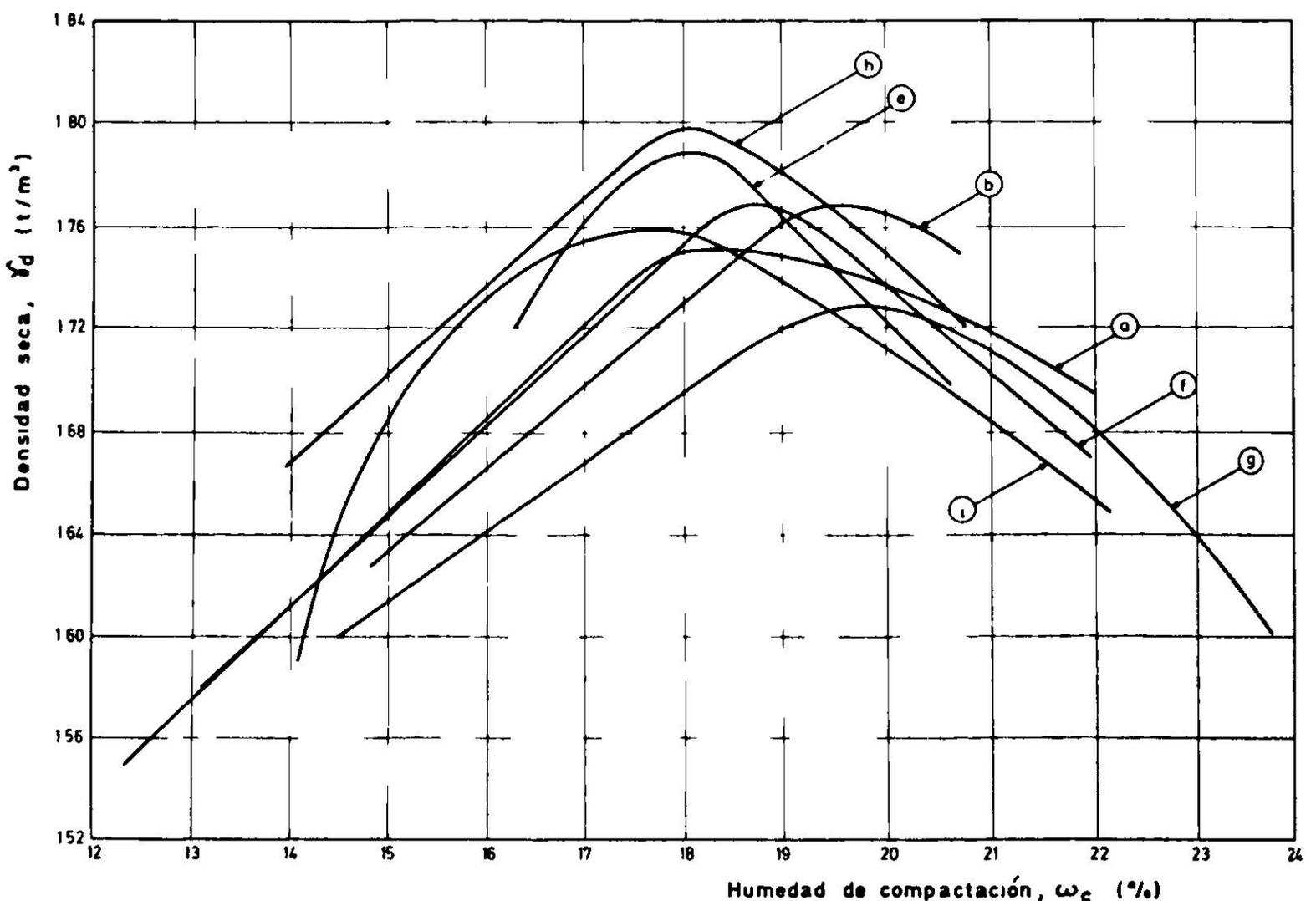


Fig. 6A. Proctor estándar arcilla: Curva densidad-humedad.

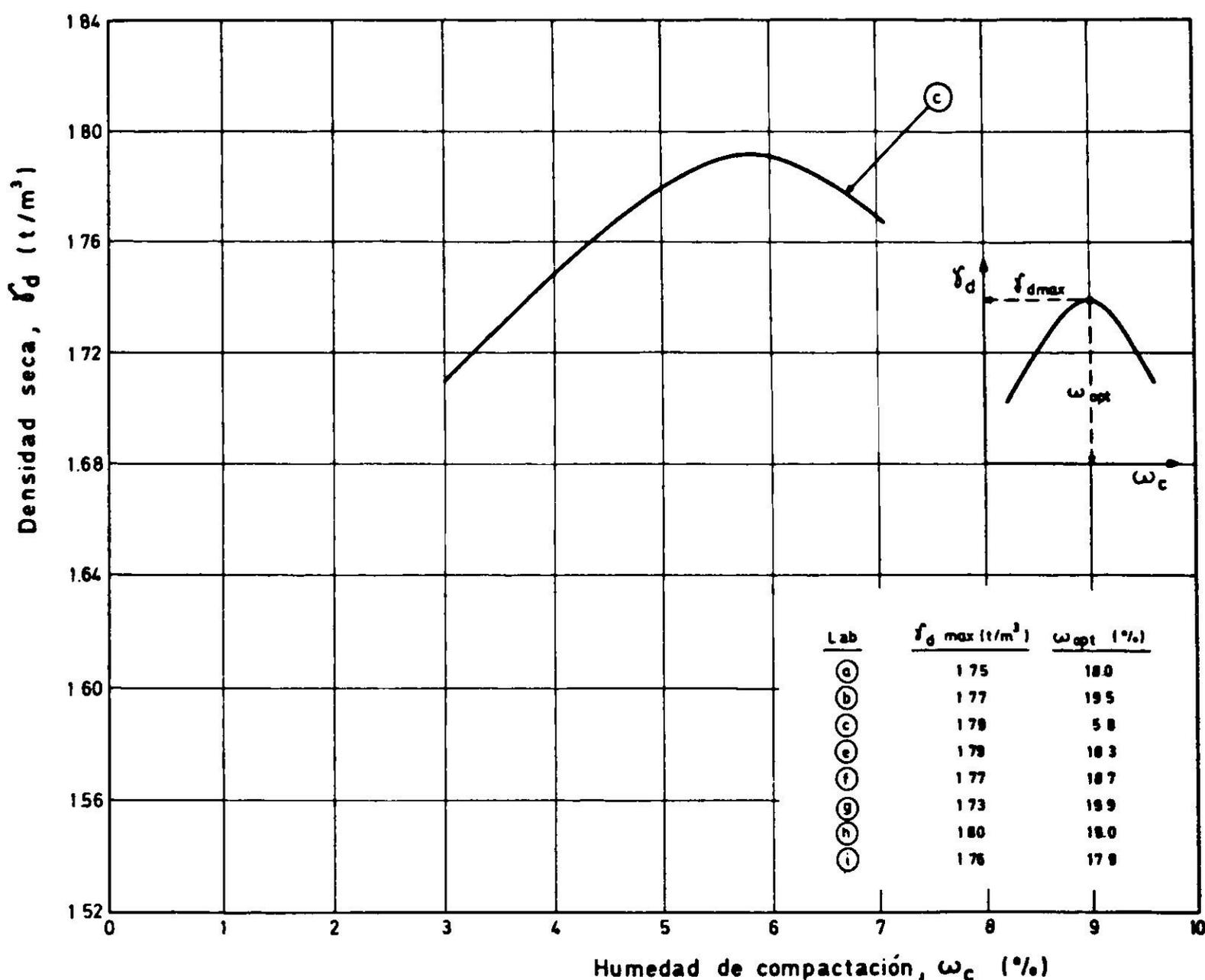


Fig. 6B. Proctor estándar arcilla: Curva densidad-humedad.

$\gamma_d/\gamma_{dmax}$  y la densidad seca  $\gamma_d$ , relación en la cual el valor de  $\gamma_{dmax}$  varía según el laboratorio que se considera. Se eligió este criterio de análisis ya que, en última instancia, lo que interesa en el control de compactación de un cierto relleno es conocer precisamente si el porcentaje de compactación es igual o superior a un cierto valor mínimo especificado en el proyecto. La relación  $\gamma_d$  vs  $\gamma_d/\gamma_{dmax}$  para cada uno de los 8 laboratorios aparece graficada en la Fig. 7, observándose que la dispersión máxima del porcentaje de compactación resulta igual a  $\pm 2\%$ . Esto significa que si un relleno confeccionado con la arcilla ensayada ha quedado compactado a una densidad seca,  $\gamma_d$ , igual a  $1.77 \text{ t/m}^3$ , su porcentaje de compactación, referido al proctor estándar, sería igual a  $100 \pm 2\%$  lo cual puede ser considerado aceptable para fines prácticos. Sin embargo, si se toma en cuenta que la dispersión típica en las determinaciones de la densidad seca *in situ*,  $\gamma_d$ , es de  $\pm 0.03 \text{ t/m}^3$ , la Fig. 7 indica que el grado de compactación del relleno sería igual a  $100 \pm 3.5\%$ .

Razón de soporte California (C.B.R.)

El C.B.R. es una medida de la capacidad de soporte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad seca determinadas, que se utiliza extensivamente en el

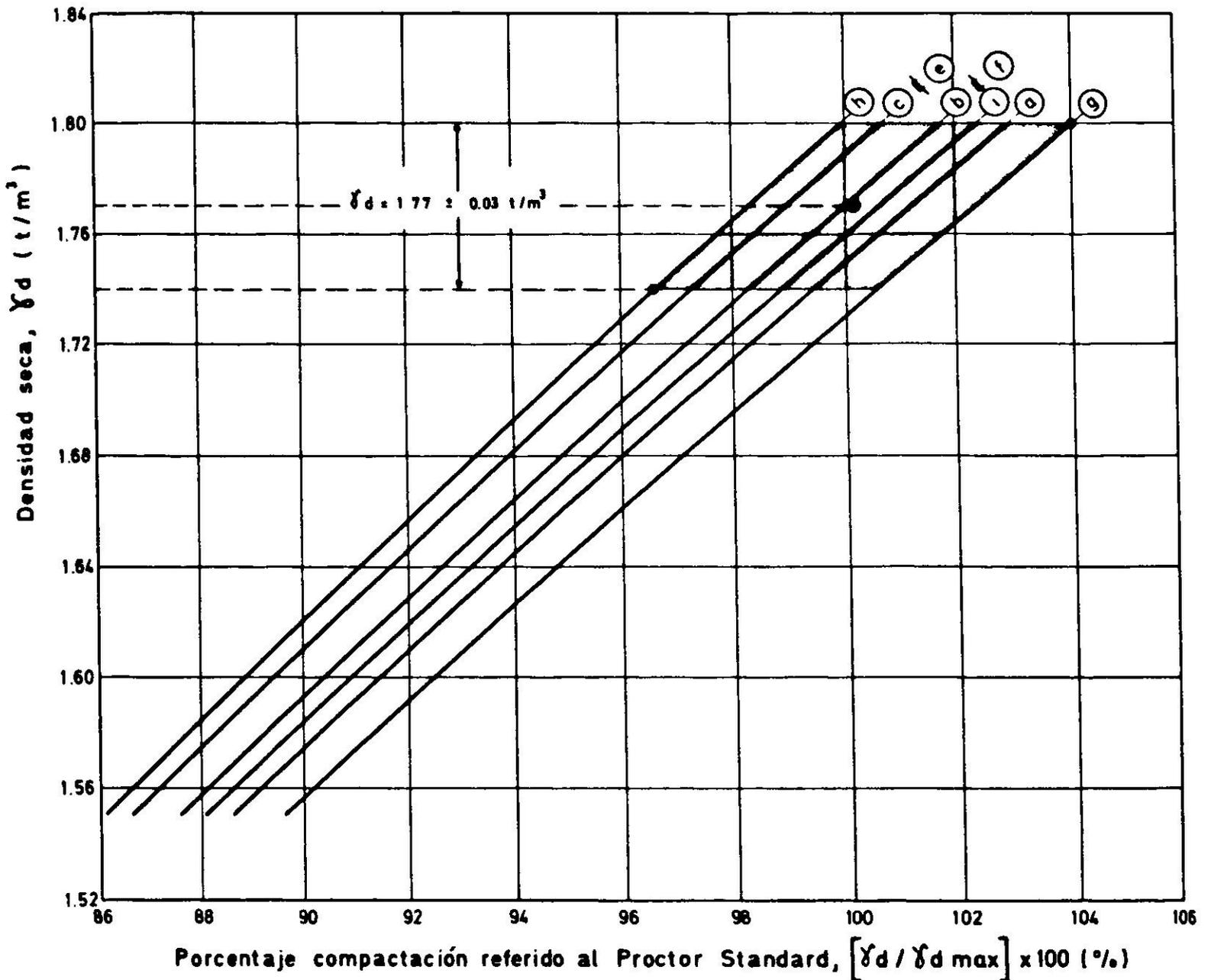


Fig. 7. Arcilla: Densidad seca según 8 laboratorios vs porcentaje de compactación referido al proctor estándar.

diseño de pavimentos. Se expresa en porcentaje como la razón entre la carga requerida para introducir 0.1" a 0.2" un pistón dentro del suelo y la carga requerida para introducir el mismo pistón en una muestra de chancado normalizado (muestra patrón). El ensayo se encuentra normalizado (*Norma ASTM D-1883*).

En la Tabla V se indican las condiciones de ensayo y el valor del C.B.R.

TABLA V  
RESULTADOS DEL ENSAYO C.B.R. EN ARCILLA  
SEGUN 5 LABORATORIOS

Laboratorio	$\gamma_d, (t/m^3)$	$w = w_{opt}, (\%)$	Saturación	Hinchamiento al saturar (%)	C.B.R. 0.2", (%)
a	1.81 (95% PM)	16	Si	—	6.0
b	1.79 (95% PM)	16.3	Si	3.5	5.0
c	1.70 (95% PS)	5.8	?	—	2.0
h	1.74 (95% PM)	16.7	Si	3 a 4	5.5
i	1.76 (100% PS)	17.5	No	—	6.2

correspondiente. Excluyendo al laboratorio (c) los resultados son bastante aceptables. Sin embargo es preciso hacer notar la falta de uniformidad en cuanto a las condiciones de ensayo.

### Compresión no confinada

Ensayo cuyos resultados dan un índice de la resistencia al corte y del grado de rigidez de un suelo fino. Consiste en cargar axialmente una probeta de forma cilíndrica la cual no tiene ningún tipo de confinamiento lateral. El procedimiento para efectuar el ensayo se encuentra normalizado (*Norma ASTM D-2166*).

En la Fig. 8 se presentan las curvas fatiga deformación obtenidas por 6 laboratorios conjuntamente con las condiciones de ensayo. Respecto a esto último, en la Tabla I se indicó que la probeta debía ensayarse con el  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  y el  $w_{opt}$  dados por el Proctor estándar (probeta parcialmente saturada) lo cual presentaba la ventaja de *normalizar* las condiciones de ensayo. Sin embargo, lo anterior involucraba una fuente de error parásita producto de las variaciones en los valores de  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  y  $w_{opt}$  obtenidos del ensayo Proctor. Esta situación obligó a procesar la información recibida graficando los resultados en función del contenido de humedad de la probeta ya que este parámetro juega un papel preponderante en el comportamiento de suelos parcialmente saturados<sup>8</sup>. En la Fig. 9 se presentan las curvas fatiga deformación para probetas con un  $\gamma_d$  más o menos constante, pero con contenidos de humedad variables. Estos resultados, a pesar de no haber sido solicitados, fueron informados por el laboratorio (a), hecho que sin quererlo fue de gran ayuda en la interpretación de los ensayos. En la Fig. 10 se presenta la variación de la resistencia a la compresión no confinada  $q_u$  en función del contenido de humedad de la probeta. Se observa que los resultados definen tendencias de variación bastante razonables, salvo el laboratorio (i) que parece subestimar el valor  $q_u$ . Aparentemente este laboratorio supuso que su probeta tenía un  $\gamma_d = \gamma_{dm\acute{a}x}$  y un  $w = w_{opt}$  sin efectuar la determinación de dichos parámetros en la probeta ensayada. En la Fig. 11 se presenta la variación de la rigidez de la probeta, definida a través de un módulo de deformación, en función de su contenido de humedad. Nuevamente se observa que los resultados establecen tendencias de variación bastante razonables con excepción de los laboratorios (b), (g) e (i) especialmente el primero de ellos, que subestima apreciablemente el grado de rigidez de la probeta ensayada.

### Triaxial CIU

Desafortunadamente sólo dos laboratorios informaron resultados; uno de estos laboratorios no midió la presión de poros desarrollada durante el ensayo. Por tal motivo no se dan los resultados ya que es imposible sacar conclusiones de su análisis

### Consolidación unidimensional

Este ensayo consiste en aplicar cargas verticales a una probeta de suelo confinada

8 Generalmente se acostumbra a trabajar con el grado de saturación en lugar del contenido de humedad. En el presente análisis se descartó el empleo del grado de saturación ya que éste lleva involucrados los errores inherentes a la determinación del peso específico de sólidos.

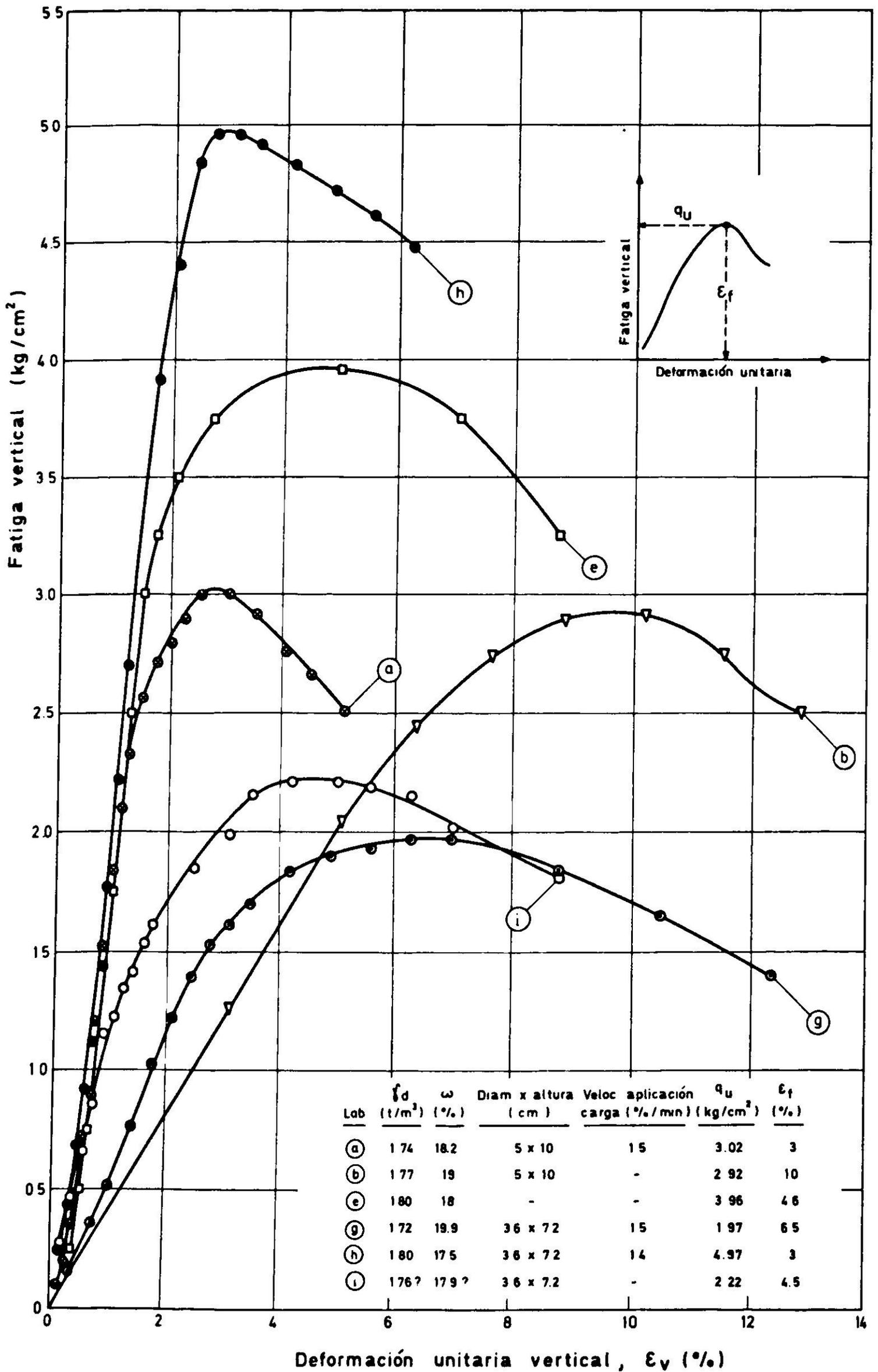


Fig. 8. Arcilla compactada en compresión no confinada: Curvas fatiga deformación según 6 laboratorios.

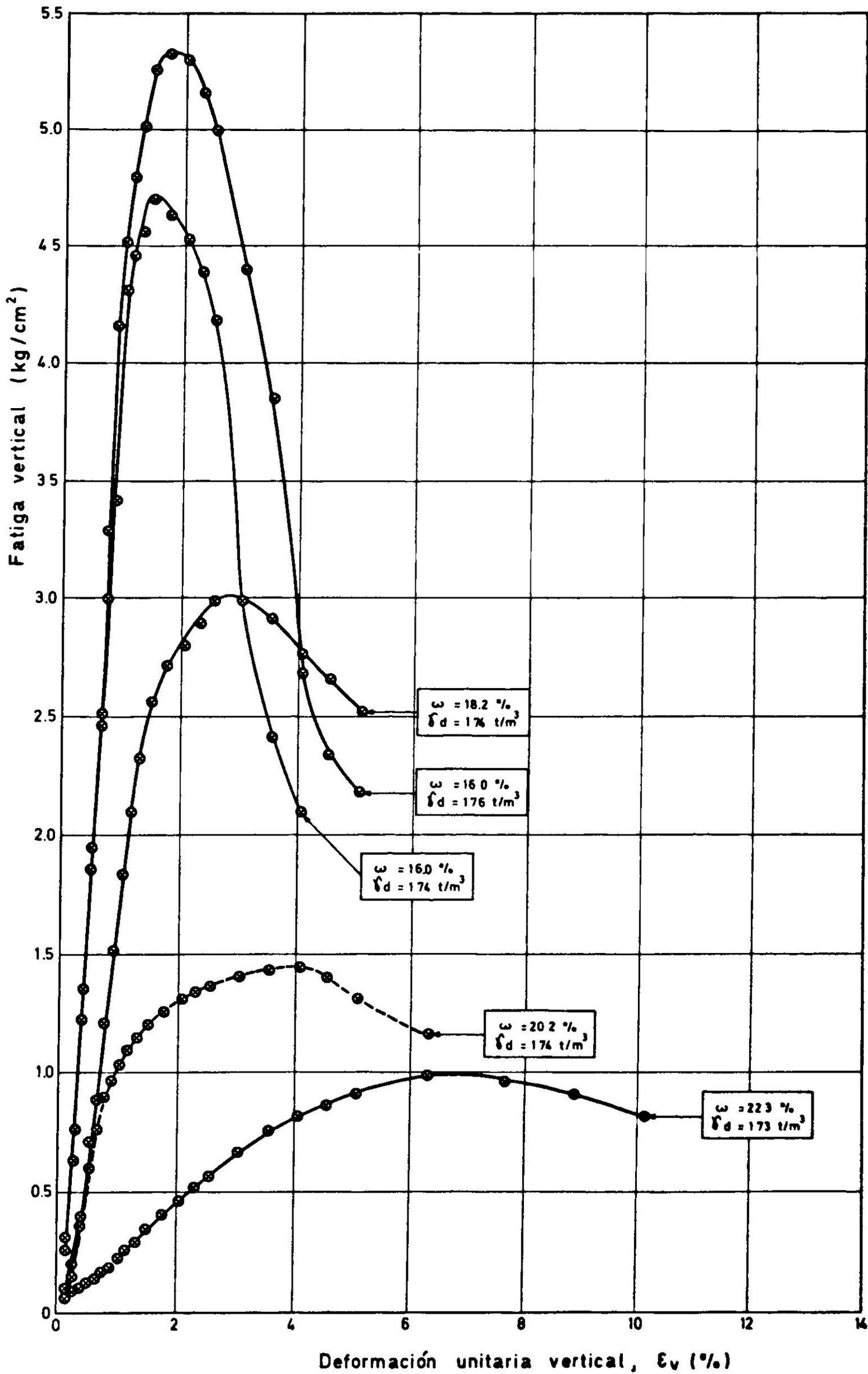


Fig. 9. Arcilla compactada en compresión no confinada: Curvas fatiga deformación según laboratorio (a).

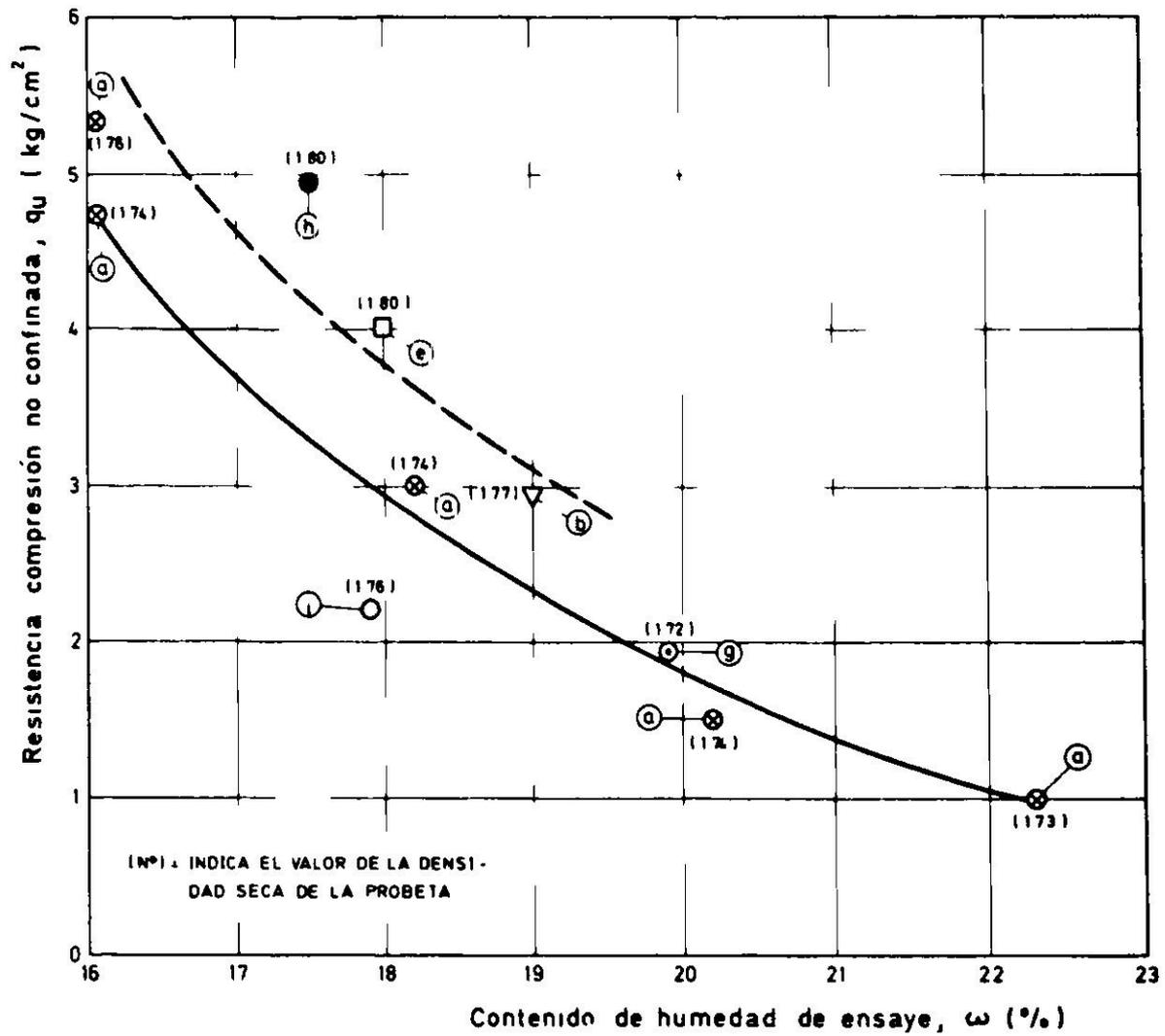


Fig. 10. Arcilla compactada en compresión no confinada: Variación de la resistencia a la compresión con el contenido de humedad según 6 laboratorios.

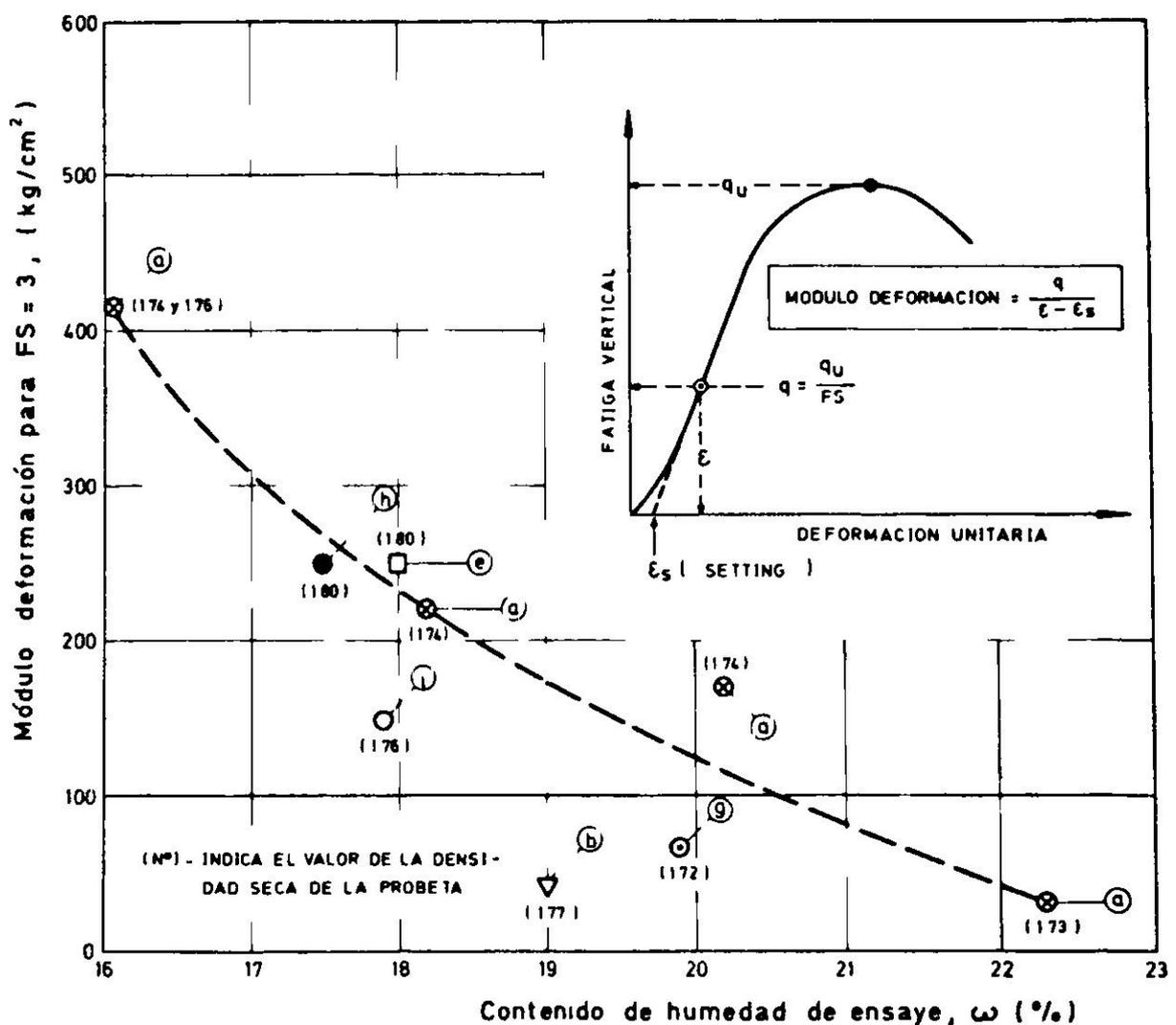


Fig. 11. Arcilla compactada en compresión no confinada: Variación del módulo de deformación con el contenido de humedad según 6 laboratorios.

lateralmente por un anillo metálico que le impide deformarse lateralmente (*Norma ASTM D-2435*). El ensayo es de particular importancia en la determinación de las características de compresibilidad de suelos finos, ya que permite establecer la relación de la carga aplicada con la magnitud y velocidad de los asentamientos provocados por ella.

En la Fig. 12 se presenta la variación de la razón de vacíos normalizada  $\Delta_e/(1 + e_o)$  vs  $\log \sigma_v$ , en que  $\Delta_e$  es la variación de la razón de vacíos,  $e_o$  es la razón de vacíos inicial de la probeta (antes de saturarla) y  $\sigma_v$  es la fatiga vertical aplicada sobre la probeta. Desafortunadamente, resulta difícil establecer el grado de dispersión de los ensayos ya que éstos quedaron influídos por el hinchamiento inicial de la probeta al saturarla (saturación sin sobrecarga). Este hinchamiento, como es lógico esperar, aumenta a medida que la humedad de confección de la probeta disminuye, según se aprecia en el gráfico inserto en el Fig. 12. En este gráfico se observa que sólo los laboratorios (b) y (g) utilizaron probetas con contenido de humedad cercanos al óptimo dado por el Proctor estándar (el laboratorio (i) aparentemente también cumplió esta condición de ensaye, pero no saturó la probeta antes de comenzar a aplicar las cargas). Los laboratorios (a) y (h) emplearon humedades de confección inferiores al  $w_{opt}$  amén de trabajar con densidades secas superiores al  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  obtenido en sus ensayos Proctor estándar.

En relación a la fatiga de preconsolidación,  $\sigma_{vm}$ , ésta se encuentra poco definida, ya que se trata de probetas remoldeadas y si a esto se agrega la influencia distorsionadora del hinchamiento, es prácticamente imposible establecer alguna conclusión respecto a la dispersión en su determinación.

Como único parámetro para medir la dispersión del ensayo se eligió el índice de compresión normalizado  $C_c/(1 + e_i)$  en que  $e_i$  es la razón de vacíos de la probeta después de la saturación, cuyos valores, aun cuando no resultan totalmente independientes del hinchamiento por saturación, por lo menos representan estados de la probeta relativamente alejados de dicho efecto. Para el laboratorio (i), que no saturó la probeta, ésta puede considerarse cercana a la saturación para los niveles de fatigas verticales en los cuales se define el valor de  $C_c$ . En la Tabla VI se

TABLA VI  
INDICES DE COMPRESION NORMALIZADO  
PARA LA ARCILLA EN ENSAYO DE  
COMPRESION UNIDIMENSIONAL

Laboratorio	$C_c/(1 + e_i)$	Probeta Diam/altura
a	0.104	2.4
b	0.102	2.4
g	0.090	1.7
h	0.069	3.3
i	0.102	2.5

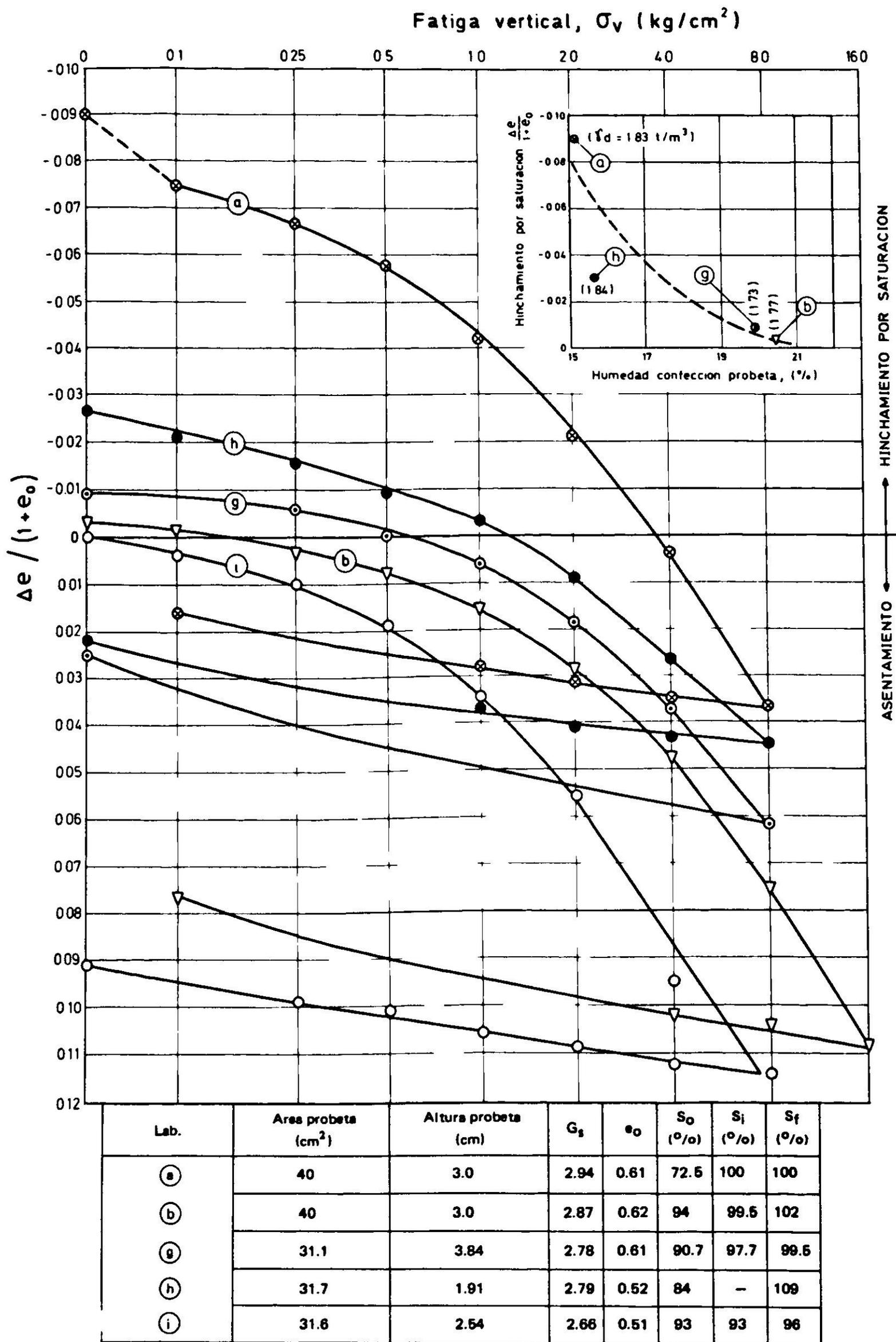


Fig. 12. Arcilla compactada: Curva e-log  $\bar{\sigma}_v$  de ensayos de consolidación unidimensional según 5 laboratorios.

presentan los índices de compresión normalizados conjuntamente con la geometría de la probeta empleada en el ensayo.

El porcentaje máximo de error referido al valor medio de  $C_c/(1 + e_i)$  resulta igual a  $\pm 20\%$  y  $\pm 7\%$  según se considera o no el resultado del laboratorio (h). Estos porcentajes deben tomarse con cautela ya que los ensayos se efectuaron en probetas con condiciones iniciales de humedad y densidad dispares.

Finalmente es preciso hacer notar dos aspectos adicionales relativos al ensayo: salvo el laboratorio (h), el resto emplea probetas con razones diámetro/altura inferiores a los límites recomendados para minimizar el efecto del roce con las paredes del anillo del consolidómetro ( $D/H = 3$  a  $4$ ) y que los grados de saturación informados después de saturar la probeta,  $S_i$ , y al término del ensayo,  $S_f$ , estarían reflejando errores en la determinación de  $G_s$  y/o defectos en el procedimiento de saturación. En relación a esto último no está claro si el laboratorio (a) realmente determinó  $S_i = S_f = 100\%$  o bien esto corresponde a un ajuste de resultados.

## Arena

Densidades secas máximas,  $\gamma_{dm\acute{a}x}$ , y mínima,  $\gamma_{dm\acute{i}n}$

Corresponden a densidades determinadas en el laboratorio que, junto con la densidad seca del suelo,  $\gamma_d$ , permiten determinar su densidad relativa,  $DR$ . El valor de la densidad relativa es un índice representativo del grado de compacidad del suelo y se define a través de la relación siguiente:

$$DR = \frac{\gamma_{dm\acute{a}x}}{\gamma_d} \frac{(\gamma_d - \gamma_{dm\acute{i}n})}{(\gamma_{dm\acute{a}x} - \gamma_{dm\acute{i}n})} \times 100, (\%)$$

Esta forma de definir el grado de compacidad sólo es aplicable a suelos granulares susceptibles de ser compactados por vibración. De hecho la densidad seca máxima se determina en el laboratorio por vibrado vertical de la muestra (Norma ASTM D-2049, válida también para la determinación de la densidad mínima). En la Fig. 13 se presentan tabulados los valores de las densidades seca máxima y mínima informados por los laboratorios observándose una dispersión máxima de  $\pm 0.055 \text{ t/m}^3$  para  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  y de  $\pm 0.025 \text{ t/m}^3$  para  $\gamma_{dm\acute{i}n}$ . El porcentaje máximo de error referido al valor medio de las densidades anteriores resulta igual a  $\pm 3.3\%$  y  $\pm 1.8\%$  para  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  y  $\gamma_{dm\acute{i}n}$  respectivamente.

La diferencia entre estos porcentajes sería atribuible a una falta de uniformidad en el procedimiento para la determinación de  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  lo cual no ocurre en la determinación de  $\gamma_{dm\acute{i}n}$  (si se eliminara del análisis el valor de  $\gamma_{dm\acute{i}n}$  informado por el laboratorio (c), la dispersión máxima sería sólo  $\pm 0.015 \text{ t/m}^3$  y el error máximo de  $\pm 1.0\%$ ). Desafortunadamente sólo algunos laboratorios indicaron el procedimiento seguido para la determinación de  $\gamma_{dm\acute{a}x}$ , pero en todo caso con dicho antecedente se podría pensar en una falta de uniformidad más o menos ge-

neralizada en dicho procedimiento según se observa en el cuadro que sigue:

Laboratorio	Procedimiento informado para determinar $\gamma_{dm\acute{x}}$
a	ASTM D - 2049 "Método seco" (9) "Método húmedo" sin la sobrecarga estipulada en Norma ASTM D-2049
c	
d	
g	

9 Informa que la cantidad de arena no alcanzó para efectuar la determinación ya que ésta la realizan mediante el ensayo Proctor.

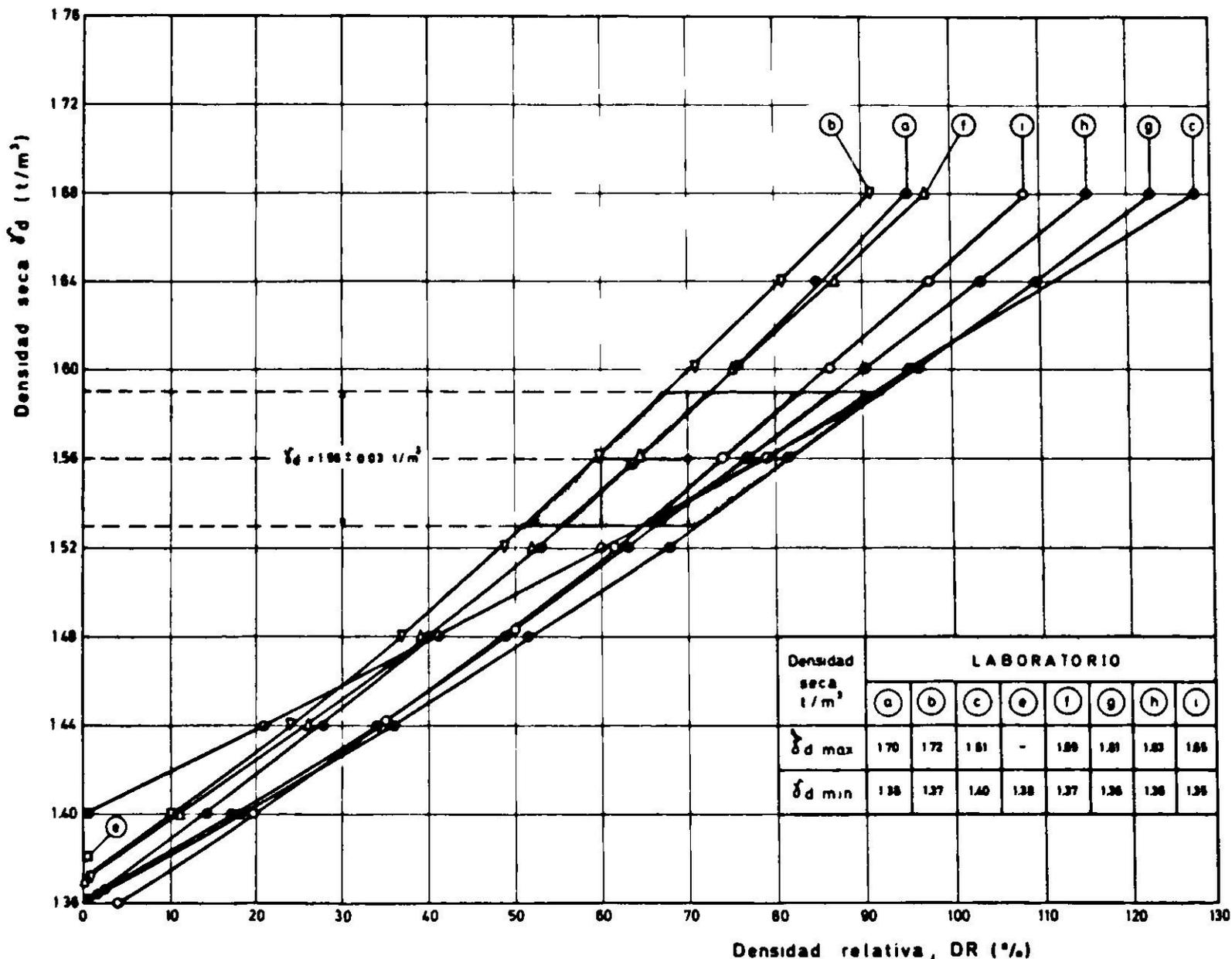


Fig. 13. Arena: Densidad relativa vs densidad seca según 8 laboratorios.

En la Fig. 13 aparece graficada la relación entre  $DR$  y  $\gamma_d$  obtenida con las densidades secas máximas y mínimas informadas por 7 laboratorios. Se observa que para densidades bajas (por ejemplo en arena con grados de compactación bajos) la dispersión máxima de su densidad relativa es  $\Delta DR_{m \acute{a}x} \approx \pm 7\%$ . Sin embargo, desde un punto de vista práctico, tiene más importancia conocer la dispersión para grados de compactación altos (por ej.  $DR \geq 70\%$ ). En este caso  $\Delta DR_{m \acute{a}x} \geq \pm 10\%$ . Las dispersiones anteriores son bastante superiores a las obtenidas para  $\gamma_{dm \acute{a}x}$  y  $\gamma_{dm \acute{i}n}$ , lo cual indica que para lograr una determinación adecuada de la densidad relativa (por ej.  $\Delta DR_{m \acute{a}x} \leq \pm 5\%$ ) es necesario mejorar los procedimientos empleados en el laboratorio, especialmente en lo relativo a la obtención de  $\gamma_{dm \acute{a}x}$ . Esto cobra mayor validez si se considera que en el análisis anterior no se ha tenido en cuenta la dispersión asociada a la determinación de la densidad seca *in situ*,  $\gamma_d$ . En efecto, si por ejemplo se considera  $\gamma_d = 1.56 \text{ t/m}^3$  y que la dispersión típica en su determinación es de  $\pm 0.03 \text{ t/m}^3$  se obtiene (ver Fig. 13)  $DR = 70 \pm 20\%$ , lo cual es francamente inaceptable.

### Triaxial

Este ensayo está destinado a la determinación de las características carga deformación del suelo y a la obtención de sus parámetros de resistencia al corte definidos por la cohesión  $c$  y el ángulo de fricción interna  $\phi$ . El tipo de ensayo comúnmente empleado en la práctica se realiza con una probeta cilíndrica sobre la cual se aplica una presión de confinamiento isotrópico,  $\bar{\sigma}_c$ , para posteriormente cargarla axialmente hasta alcanzar la falla. En este caso  $\bar{\sigma}_2 = \bar{\sigma}_3 = \bar{\sigma}_c$  constante durante el ensayo y  $\bar{\sigma}_1$  corresponde a la fatiga axial.

En la Fig. 14 se ilustran las curvas fatiga deformación según 2 laboratorios en probetas de arena compactadas a  $DR \approx 65\%$ , saturadas<sup>10</sup>, confinadas isotrópicamente y cargadas axialmente en forma drenada. En la Fig. 15 se han graficado las curvas cambio de volumen vs deformación axial de la probeta y en la Fig. 16 las envolventes de falla obtenidas. Estos resultados indican que no existen diferencias muy apreciables en las curvas fatiga deformación, que las mediciones de cambio de volumen informadas por el laboratorio (B) son deficientes y que la dispersión máxima, ( $2^\circ$ ), en la determinación de  $\phi$  está dentro de los márgenes aceptados para ensayos de rutina. Finalmente cabe agregar que con las densidades relativas de confección de probetas informadas por los dos laboratorios y los valores de  $\gamma_{dm \acute{a}x}$  y  $\gamma_{dm \acute{i}n}$  obtenidos por ellos, la densidad seca  $\gamma_d$  para las probetas del laboratorio (B) resulta inferior a la del laboratorio (A). En términos reales esto significa que el Laboratorio (B) trabajó en probetas con grados de compactación ligeramente inferiores a los del laboratorio (A), hecho que se contrapone a las tendencias mostradas en las Fig. 14 y 16: el laboratorio (B) predice un comportamiento más rígido y un ángulo de fricción interna mayor.

10 El ensayo se solicitó en probetas de arena seca y saturada compactadas a  $DR = 65\%$ . Los laboratorios informantes (dos) sólo entregaron los resultados en probetas saturadas.

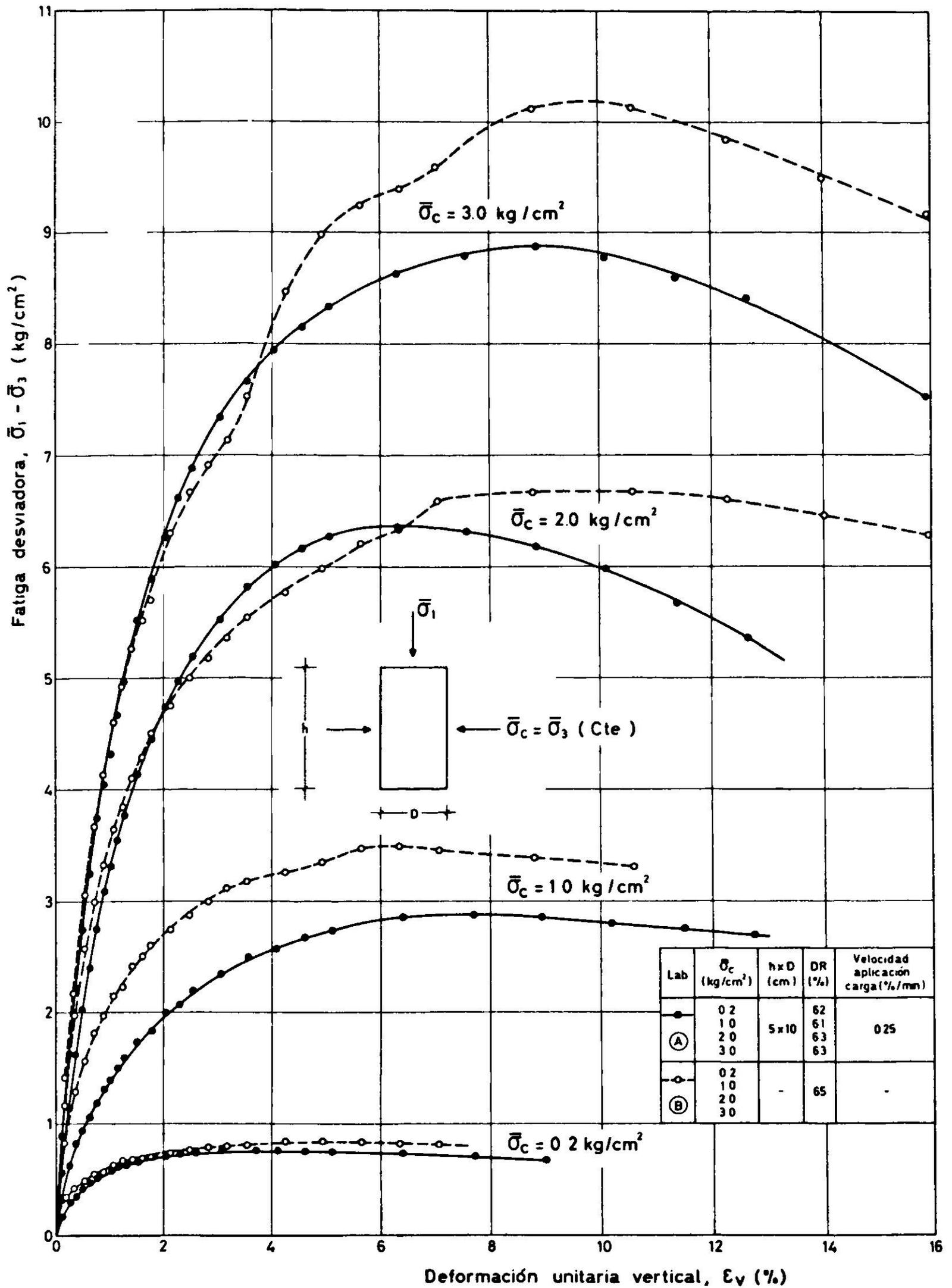


Fig. 14. Arena saturada compactada a DR  $\approx 65\%$  en triaxial: curvas carga deformación según 2 laboratorios.

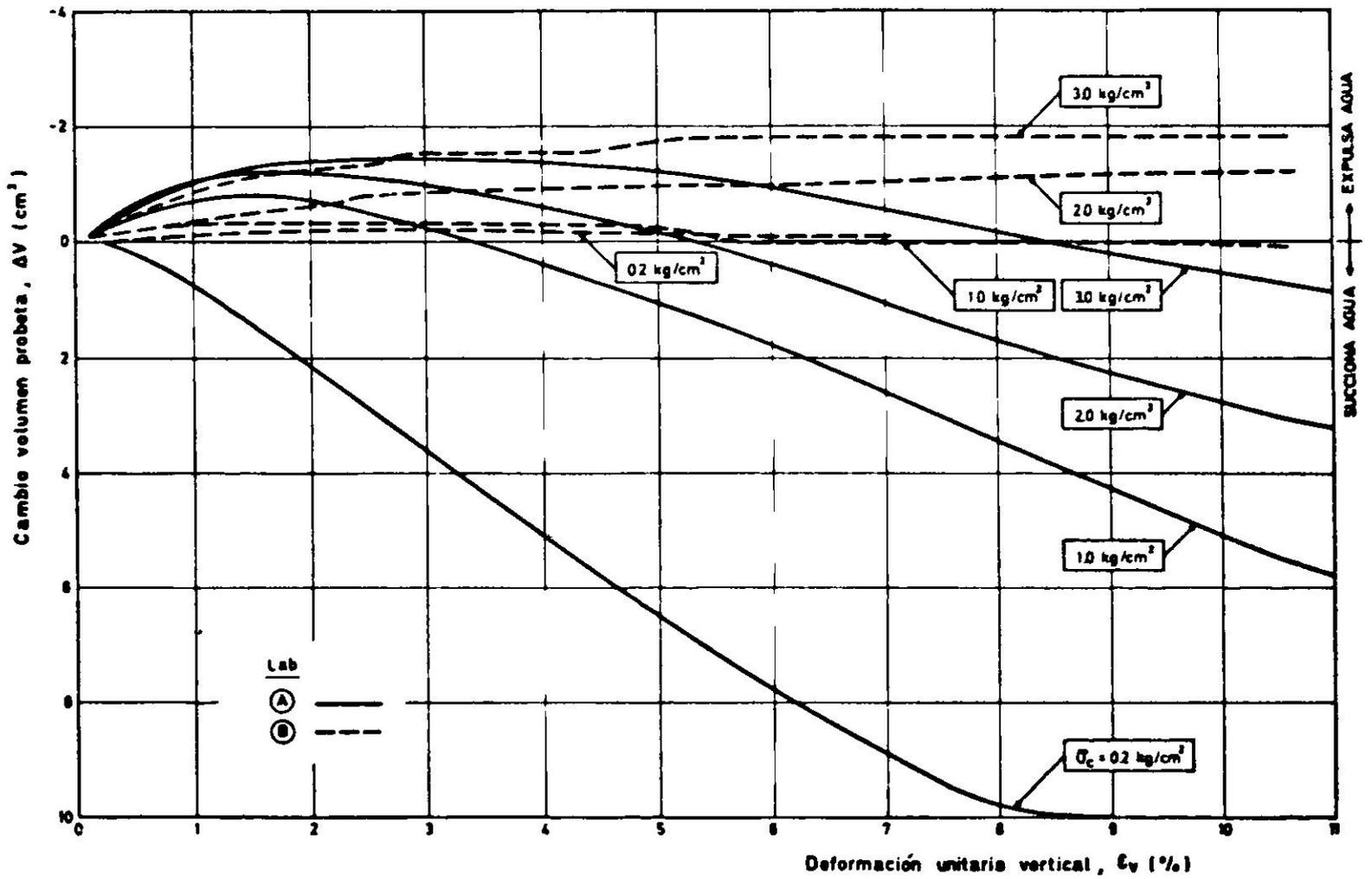


Fig. 15. Arena saturada compactada a DR  $\approx$  65% en triaxial: curvas cambio de volumen según 2 laboratorios.

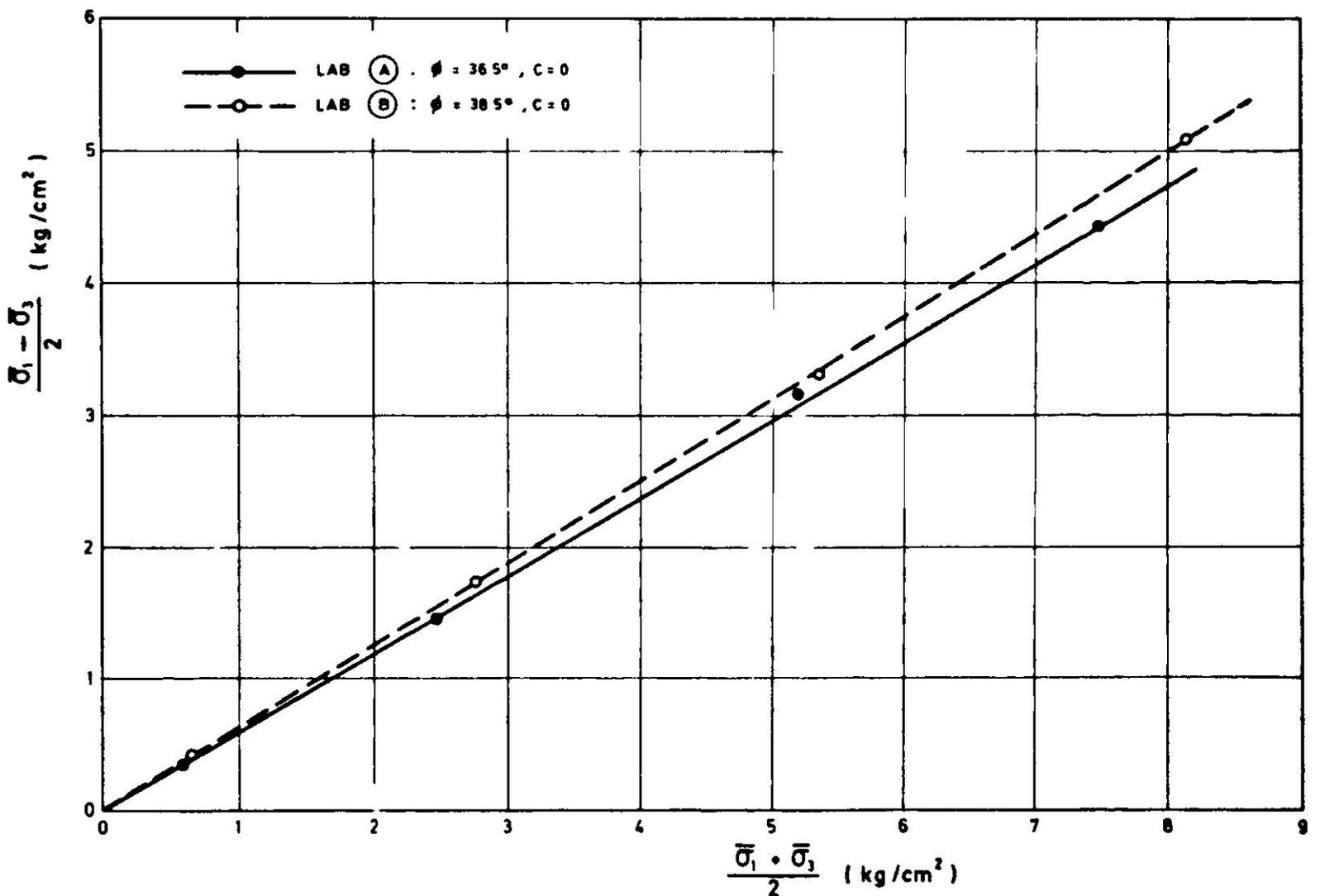


Fig. 16. Arena saturada compactada a DR  $\approx$  65% en triaxial: envolventes de falla según 2 laboratorios.

## RESUMEN DE RESULTADOS

En la Tabla VII se presenta un cuadro resumen con la dispersión y el error máximo en cada uno de los ensayos solicitados, así como también el número de laboratorios participantes y el número total de laboratorios que pudieron haberlo hecho. Sobre este último dato caben los comentarios ya estipulados en la introducción.

TABLA VII

CUADRO RESUMEN DE RESULTADOS EN LA ARCILLA Y ARENA UTILIZADA EN EL ESTUDIO

Ensayo	Dispersión máxima	Porcentaje máximo de error	Precisión ingenieril de los resultados	Observaciones	Labs. participantes	Labs. capacitados • (Fig. 1)
Límite líquido Límite plástico	$\pm 3.5\%$ $\pm 2.5\%$		Adecuada Adecuada		9 9	19 19
Peso específico: en razón de vacíos en grado saturación	$\pm 0.08$ Variable con contenido de humedad	$\pm 12$ $\pm 8$	Mediana Pobre a mediana		7 7	17 17
Proctor estándar: en $w_{opt}$ en $\gamma_d/\gamma_{dmax} \times 100$	$\pm 1\%$ $\pm 2\%$		Adecuada Adecuada si no se toma en cuenta error en determinación $\gamma_d$ .	Excluye lab. c	7 8	18 18
CBR	$\pm 0.6\%$	$\pm 10$	Adecuada	Excluye lab. c Faltó uniformidad en condiciones de compactación de las muestras.	4	14
Compresión no confinada				Resultados influenciados por contenido de humedad $w$ de las probetas. En todo caso indican tendencias aceptables con $w$ .	6	14
Consolidación Unidimensional: $C_c/(1 + e_1)$	$\pm 0.017 (\pm 0.007)$	$\pm 20 (\pm 7)$		Resultados influenciados por hinchamiento al saturar. Faltó uniformidad en condiciones de compactación de las probetas	5 (4)	10
Densidad seca máx.	$\pm 0.055 \text{ t/m}^3$	$\pm 3.3$	Mediana	Necesario normalizar metodología de ensayo en algunos laboratorios.	7	12
Densidad seca mín. Dens. relativa $\geq 70\%$	$\pm 0.025 \text{ t/m}^3$ $\geq \pm 10\%$	$\pm 1.8$	Adecuada Deficiente aun a pesar de no tomarse en cuenta error en determinación de $\gamma_d$	Puede mejorar si se normaliza en algunos laboratorios metodología de ensayo para determinar $\gamma_{dmax}$ .	8	12 mín
Triaxial: Curva fatiga-deformación Curva cambio volumen Angulo de fricción	Ver Fig. 14 Ver Fig. 15 $\pm 1^\circ$		Mediana Adecuada para lab. A Deficiente para lab. B Adecuada	Conclusiones limitadas por reducido número de laboratorios informantes	2	7

## CONCLUSIONES

Concientes del reducido número de laboratorios que participó es posible, sin embargo, establecer órdenes de magnitud para la *dispersión máxima* de los ensayos de laboratorio elegidos en el presente estudio (ensayos de rutina). De los resultados presentados en la Tabla VII es posible inferir las siguientes conclusiones generales:

Los resultados del ensayo de densidad máxima en la arena muestran dispersiones intolerables para los efectos de determinar su densidad relativa. Esta situación podría mejorarse si algunos laboratorios adoptaran el procedimiento establecido por la *Norma ASTM D-2049*.

La dispersión en el peso específico de sólidos para la arcilla resulta relativamente inadecuada para los efectos de determinar su grado de saturación.

En los ensayos de compresión no confinada, Proctor, capacidad de soporte California y límites de Atterberg realizados en la arcilla y en el ensayo para determinar la densidad mínima de la arena, los resultados muestran dispersiones adecuadas.

Los resultados de los ensayos de compresión unidimensional no permiten establecer conclusiones fidedignas, ya que fueron ejecutados en probetas de arcilla con condiciones iniciales de humedad y densidad dispares.

Pareciera existir falta de capacidad instalada para la ejecución de ensayos triaxiales.

Con el fin de establecer un cuadro más fidedigno del grado de dispersión de los ensayos resultaría muy saludable repetir la experiencia con la participación masiva de todos los laboratorios.

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo forma parte de una investigación sobre *Aspectos de la mecánica de suelos en Chile* la que ha sido posible realizar gracias al apoyo y patrocinio brindado por las autoridades de la Universidad Técnica Federico Santa María. En especial agradecemos al profesor Sr. Rodolfo Lemp de la Vice Rectoría Académica de la Universidad Santa María, al Decano de la Facultad de Ingeniería Civil, profesor Rodolfo Vergara y al Jefe del Laboratorio de Mecánica de Suelos, profesor José Veiga. Agradecemos también la desinteresada colaboración de los laboratoristas de la Sección Mecánica de Suelos del IDIEM Sres. Elías Guzmán, Rubén Herrera y Mario Quintana. Finalmente, nuestro reconocimiento al personal de todos los laboratorios participantes, sin cuya colaboración no habría sido posible realizar este trabajo.

**ANALYSIS OF DISPERSION OF MECHANIC OF SOIL  
TEST RESULTS**

**SUMMARY:**

*Result of routine tests performed by some chilean laboratories on two type of soils are presented. Homogenous and disturbed specimens of sand and clay and particular testing specifications were sent to the participating laboratories. The dispersion of results is commented upon.*