

9  
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DIVISION DEL DOCTORADO

CORRELACION ENTRE LAS PRUEBAS ESTATICAS  
Y DINAMICAS DE COMPACTACION DE SUELOS  
EN EL LABORATORIO

TESIS PRESENTADA POR EL ING.  
Luis Miguel Aguirre Menchaca.  
PARA LA OBTENCION DEL GRADO DE  
Maestro en Ingenieria  
(Mecánica de Suelos)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

g(2) 0879

MEXICO, D. F.

1964



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

## I N D I C E

	Pág.
Introducción .....	1
Objetivos del Estudio .....	2
Tipos de Suelos Empleados .....	3-4
Descripción de los Procedimientos de Ensayo .....	5
Presentación de Resultados .....	5-10
Comentarios Generales .....	10-13
Conclusiones .....	14-18
Apéndice .....	19
Referencias .....	19

## INTRODUCCION

Como es ampliamente sabido, la compactación de los suelos constituye uno de los medios más eficaces y económicos para mejorar sus características de resistencia y compresibilidad, siendo motivo de especial preocupación por parte del ingeniero, el establecer un adecuado control de este importante aspecto, con el fin de lograr que los materiales empleados en la construcción de terraplenes en general adquieran un comportamiento satisfactorio.

Históricamente se reconoce que la primera prueba de laboratorio desarrollada con fines de control de la compactación en el campo, se debió al Departamento de Carreteras de California (1929). Poco después (1933) Proctor dió a conocer, como resultado de sus investigaciones, la prueba que hoy en día conserva su nombre, la cual bajo ciertas modificaciones constituye en la actualidad la prueba que con mayor frecuencia se emplea tanto en el control de la compactación en la obra como en la elaboración de especímenes en el laboratorio para la investigación de sus propiedades mecánicas. Desde entonces a la fecha la investigación en este importante campo ha sido muy extensa, habiéndose desarrollado múltiples y variadas pruebas con análogos fines, las cuales pueden englobarse -- atendiendo a la forma en que los esfuerzos compactantes son aplicados, en los -- cuatro grupos siguientes:

- 1.- Pruebas dinámicas mediante la aplicación de impactos.
- 2.- Pruebas de compresión estática.
- 3.- Pruebas vibratorias.
- 4.- Pruebas mediante la acción de efectos de "amasado" (Kneading action)

No es mi intención en este trabajo, establecer una discusión entre las ventajas e inconvenientes de cada tipo de prueba, ni siquiera describir en forma sucinta las variantes introducidas en cada una de ellas, ya que ésto ha sido tema de varias publicaciones, en las cuales incluso se ha intentado establecer cierta correlación entre sus respectivos pesos volumétricos máximos y humedades óptimas, - así como la discusión de los diversos factores que afectan su resultado. Con lo anterior no pretendo señalar que todos estos aspectos estén suficientemente aclarados, por el contrario, la existencia en sí de tan diversas normas para la solución de un problema común, explica en parte el que las ideas en este campo sean aun bastante confusas o cuando menos motivo de frecuente controversia.

El desarrollo del trabajo que aquí presento, estuvo encaminado exclusivamente hacia el estudio de la posible correlación entre los resultados de las pruebas estáticas y dinámicas de compactación de suelos en el laboratorio, dentro de las limitaciones y alcances que mas adelante se precisan y sobre lo cual la información disponible de antemano era sumamente escasa y fragmentaria.

Cabe aclarar finalmente, que este trabajo fue auspiciado por la Secretaría de Obras Públicas quién lo consideró de interés, ya que en la actualidad dicho Organismo emplea ambos tipos de pruebas con un campo específico de aplicación, por lo que se espera que los resultados aquí obtenidos servirán de ayuda en la revisión de las normas de compactación que al respecto se está llevando a cabo.

## CORRELACION ENTRE LAS PRUEBAS ESTATICAS Y DINAMICAS DE COMPACTACION DE SUELOS EN EL LABORATORIO

OBJETIVOS DEL ESTUDIO  
TIPOS DE SUELOS EMPLEADOS  
DESCRIPCION DE LOS PROCEDIMIENTOS DE ENSAYE  
PRESENTACION DE RESULTADOS  
COMENTARIOS GENERALES  
CONCLUSIONES

### OBJETIVOS DEL ESTUDIO.-

Fundamentalmente el estudio se dirigió hacia la determinación de las relaciones que pueden existir entre los pesos volumétricos máximos y las respectivas humedades óptimas de los suelos compactados en el laboratorio mediante la aplicación de presiones estáticas e impactos, según las técnicas sugeridas por O. J. Porter y R. R. Proctor respectivamente.

Paralelamente con el objetivo anterior se verificó la influencia ejercida en los resultados de las pruebas dinámicas, al variar las dimensiones del molde y el tamaño máximo de las partículas del suelo. Asimismo se estudió la reproductividad de las pruebas con los datos obtenidos al quintuplicar cada tipo de ensaye.

Finalmente se determinó en los suelos comprendidos en la categoría de gravas, la alteración sufrida por los materiales en cuanto a su granulometría, debido a la acción de los esfuerzos compactantes.

##

## TIPOS DE SUELOS EMPLEADOS.-

En la tabla I se presenta una relación de los diecisiete suelos estudiados, mostrándose además una breve descripción de cada uno de ellos — así como los datos cuantitativos respecto a sus características granulométricas y de plasticidad.

La selección de los suelos se llevó a cabo teniendo en mente la idea de cubrir con un número mínimo la mayor gama posible de materiales. — Como podrá observarse al examinar la tabla de propiedades, los suelos varían en sus características comprendiendo desde las arenas finas uniformes con bajo contenido de finos, arenas medias bien graduadas y arenas gruesas angulosas, hasta el — caso de gravas con proporciones variables de finos y con sus partículas gruesas de formas angulosas y redondeadas, pasando por los tipos de arcillas de mediana y alta plasticidad.

Aunque hubiese sido deseable incluir un mayor número de suelos, se consideró que con los incluidos es posible obtener la indispensable in--formación para adquirir un juicio de carácter general respecto a los objetivos propuestos. Cabe hacer notar que aun cuando la mayor parte de los suelos que inter--vienen en la experimentación son representativos de los que se utilizan en la construcción de terracerías, también los materiales empleados en la construcción de — bases y sub-bases están representados, y aun cuando estos intervinieron en menor

proporción, existe la circunstancia de que en general las características de este tipo de materiales son más definidas.

#### DESCRIPCION DE LOS PROCEDIMIENTOS DE ENSAYE. -

Como anteriormente se indicó, todos los ensayos se hicieron por quintuplicado, en consecuencia desde un principio se advirtió la importancia de adoptar un procedimiento riguroso para lograr que las porciones de cada material empleadas para cada prueba, fueran lo más idénticas posibles. Para el caso de los materiales con partículas menores de la malla No. 4, (suelos 1 a 7) - esto se logró mediante un cuidadoso cuarteo, sin embargo, para los suelos que -- contenían partículas del tamaño de las gravas, el procedimiento aplicado para es te objeto fue más laborioso, lavándose primeramente el material hasta eliminar -- la totalidad de los finos y después de secarse se separó en fracciones limitadas -- por las mallas No. 200, No. 10, No. 4 y 3/8", haciéndose una dosificación en peso para reproducir la curva granulométrica proyectada. Los finos se adiciona-- ron en cada caso particular por separado en las proporciones y características fi jadas de antemano, originándose así los suelos comprendidos entre los números 8 y 16.

Para el primer grupo de suelos, las pruebas que se realiza-- ron fueron las siguientes: Proctor Estándar y Modificadas en moldes de 2 y 4 -- pulgadas de diámetro y pruebas Porter. Para el caso del segundo grupo de suelos

(Nos. 8 al 16) se realizaron los mismos ensayos antes mencionados con la excepción de que en lugar de usar el molde de 2 pulgadas de diámetro (molde miniatura) se emplearon moldes de 6 pulgadas de diámetro ya que en este caso los suelos contenían partículas hasta el tamaño de 3/4". En total se realizaron 425 pruebas de compactación.

Los procedimientos de ensaye que se siguieron para la ejecución de las pruebas Proctor fueron precisamente los que al respecto normalizó el A. A. S. H. O. bajo las designaciones siguientes: T 99-57\* y T 180-57\*. Cabe aclarar que aun cuando las pruebas Proctor realizadas con el molde miniatura no están previstas en las especificaciones del A. A. S. H. O. el procedimiento seguido en este caso fue esencialmente el mismo que el establecido por dicho Organismo para los moldes de 4 y 6 pulgadas, haciendo los ajustes indicados en el peso, altura de caída y geometría del pisón, de tal suerte que la energía específica de compactación fuera precisamente la misma que en los moldes de mayor diámetro.

Con respecto a la prueba de Porter, el procedimiento empleado fue el que se indica en el párrafo 108-11 de las Especificaciones de la S.O.P.\*

---

(\*) Una descripción condensada de estas pruebas se presenta en el apéndice "A".

Para el estudio de la alteración sufrida por los materiales en su granulometría, durante el proceso de compactación, se efectuaron las pruebas granulométricas por el método de lavado antes y después del ensaye.

#### PRESENTACION DE RESULTADOS. -

En las figuras Nos. 1 y 2 se representan gráficamente los resultados obtenidos en las pruebas de compactación correspondientes a las arenas y arcillas (suelos 1 al 7). Los resultados relativos a las gravas se muestran en las figuras Nos. 3, 4 y 5 con excepción de la arena arcillosa marcada con el número 17 que se incluyó en este grupo por considerarlo conveniente. Las tablas 2 a 7 -- muestran los valores máximo, mínimo, promedio, mediana y variancia correspondientes a cada serie de ensayes, las cuales permiten formular un juicio respecto a la reproductividad de las pruebas. En la tabla No. 8 se presenta un resumen de los valores del peso volumétrico máximo y humedad óptima de todos los suelos estudiados, la cual permite visualizar en forma rápida las diferencias observadas entre dichos valores de acuerdo con las variables involucradas. La alteración sufrida por los suelos en cuanto a su granulometría ("degradación") como consecuencia de los esfuerzos de compactación se muestran gráficamente en las figuras 6 a 8.

#### COMENTARIOS GENERALES. -

Al examinar las curvas de compactación correspondientes

##

a los suelos comprendidos en la categoría de las arenas (Fig. No. 1-a, b, c y Fig. No. 2-a) se observa que independientemente del tipo de prueba, los pesos volumétricos máximos alcanzados siguen una ley creciente, en el orden en que se menciona en las gráficas, no obstante que el peso específico relativo de los sólidos tienen valores similares en todos los suelos. Este hecho resulta lógico si se considera la influencia que al respecto ejerce la granulometría del material en cuanto a sus partículas gruesas, y el porcentaje de finos contenidos en el mismo. Ya que mientras mejor graduado esté el material granular mayor peso volumétrico alcanza bajo un procedimiento específico de compactación, asimismo para una granulometría dada de un suelo grueso, existe un porcentaje de finos óptimo bajo el cual se logra un mayor peso volumétrico. En nuestro caso tanto la granulometría de la fracción gruesa como el porcentaje de finos en los materiales señalados, difieren notoriamente entre sí, en consecuencia también sus respectivos pesos volumétricos.

Independientemente de lo anterior se observa en las curvas de compactación correspondientes a cada uno de los materiales en cuestión, que los pesos volumétricos máximos correspondientes a la prueba Porter, coinciden prácticamente con los valores de la prueba Proctor Modificada en el caso de las arenas finas, y en cambio en las arenas gruesas (angulosas) con bajo contenido de finos no

# #

plásticos se aproximan a los de la Proctor Estándar.

Esto último se explica por el hecho de que estando el material confinado por el molde y sometido a presiones verticales a través de una placa de un diámetro prácticamente igual al de éste (Prueba Porter) el incremento del peso volumétrico requiere que las partículas deslicen entre sí para lograr un mejor acomodo venciendo la fricción intergranular, lo cual se verifica en forma muy restringida debido a que las fuerzas que se oponen a dicho deslizamiento crecen simultáneamente con el aumento de la presión aplicada. (Esta circunstancia explica en esencia el hecho de que la vibración constituya un medio más efectivo para compactar los suelos friccionantes). En caso de existir una fracción fina plástica entre las partículas gruesas del suelo, la acción lubricante que ejerce el agua en combinación con dicha fracción, favorece notablemente el acomodo de éstas, incrementándose en consecuencia el peso volumétrico. Por lo que respecta a las humedades óptimas de compactación, se observa que las humedades de la prueba estática son intermedias entre las correspondientes a las de las Proctor Estándar y Modificadas.

En lo que se refiere a los suelos arcillosos, según se desprende de la Fig. No. 2-b, c y d, los pesos volumétricos máximos y humedades óptimas de la prueba Porter coinciden prácticamente con los de la Proctor Modificada, para el caso de la arcilla de mediana plasticidad (suelo 5) y en cambio los pesos --

##

volumétricos son notoriamente superiores (en 10% aproximadamente) y las humedades respectivas algo menores en las arcillas de alta plasticidad (suelos 6 y 7).

La comparación entre los resultados de las pruebas Proctor realizadas en moldes de 2" (miniatura) y 4" de diámetro respectivamente, muestra en general una coincidencia bastante aceptable, notándose sin embargo, que sistemáticamente se obtuvieron pesos volumétricos menores (a igualdad de energía específica de compactación) al emplear el molde miniatura, lo cual se hizo más notorio en los suelos de tipo arcilloso en donde se aprecian diferencias máximas de un 4%.

Estas discrepancias podrían atribuirse a que el material en el área perimetral del cilindro no es compactado adecuadamente por el pisón, lo cual tiene una mayor influencia en el molde de menor volumen, dichas discrepancias sin embargo, podrían reducirse, disminuyendo el espesor de la guía del pisón y procediendo con un mayor cuidado en la ejecución de la prueba al aplicar los impactos en el área perimetral del cilindro.

Por lo que se refiere a las gravas, se observa al inspeccionar las figuras 3 y 4, que los pesos volumétricos máximos Porter son prácticamente iguales que los correspondientes a los de las pruebas Proctor Estándar, cuando los finos que contiene el material son de naturaleza no plástica, independientemente de la forma de las partículas gruesas y de los distintos porcentajes de finos emplea

rios. Observándose asimismo que las curvas " $\gamma_d-w$ " tienden a ser prácticamente horizontales en la mayor parte de su longitud.

En cambio, cuando las gravas contienen finos plásticos, los valores de dichos pesos volumétricos se aproximaron a los de las pruebas Proctor Modificadas, siendo ligeramente inferiores cuando los finos eran de 5% y un poco mayores para el 10% de finos. Aparentemente, la forma de las partículas tampoco tuvo influencia en este aspecto. La interpretación de los resultados has ra de ser indicados en las gravas, coinciden con lo que al respecto se expresó al comentar el caso de las arenas. Cabe señalar adicionalmente que las dimensiones del molde (4 y 6 pulgadas de diámetro) en las pruebas Proctor, no influyeron en los resultados de los pesos volumétricos y humedades óptimas.

Las curvas mostradas en la Fig. No. 5 corresponden a ma teriales cuyas características son las de una arena arcillosa con 30% de gravas - (suelo 16) y una arena arcillosa con un elevado porcentaje de finos (suelo 17).

Se observa que el peso volumétrico seco máximo correspondiente a la prueba Proctor es igual prácticamente al de la prueba Proctor Modificada en la arena arcillosa con 30% de grava, este resultado concuerda con el de las gravas que contienen finos plásticos y con la arcilla de mediana plasticidad.

En las figuras 6; 7 y 8 se muestra la alteración sufrida por

los materiales en cuanto a su granulometría, por efecto de la compactación (suelos 0-13); pudiendo observarse que las pruebas Proctor Modificadas que emplean moldes de 4" y 6" de diámetro son las que producen las mayores variaciones de la curva granulométrica original y que las pruebas Proctor Estándar la afectan en un menor grado.

La prueba estática Porter adopta una posición intermedia entre las anteriores hasta llegar en ciertos casos a igualar sus efectos a los de la prueba Proctor Modificada. Sin embargo, si esta prueba se efectúa con un solo punto, como resulta aconsejable por su rapidez en el caso de materiales granulares con finos no plásticos (materiales típicos de bases) la alteración granulométrica se reduce considerablemente.

En resumen las gráficas antes mencionadas muestran que la alteración granulométrica producida por efectos de la compactación, no es en general despreciable y merece una debida consideración.

#### CONCLUSIONES.-

- 1.- Tomando como base los resultados obtenidos en este estudio, se hace evidente que las relaciones entre las pruebas de compactación Porter y Proctor varían con el tipo de suelo, pudiendo señalarse en términos generales que el peso volumétrico máximo correspondiente a la prueba indicada en primer tér

mino es comparable al del de la prueba Proctor Estándar cuando se trata de gravas y arenas gruesas cuyos finos son de naturaleza no plástica, y en cambio dicho valor se aproxima a los correspondientes a la Proctor Modificada cuando este tipo de suelos contiene finos plásticos. Para el caso de las arenas finas limosas o arcillosas, y las arcillas de mediana plasticidad, los pesos volumétricos correspondientes a la prueba Porter son del mismo orden que el de las pruebas Proctor Modificadas. En las arcillas de alta plasticidad los pesos volumétricos en la prueba Porter superan notablemente a los de la Proctor Modificada (en un 10% aproximadamente).

- 2.- En los suelos arcillosos en general se obtienen pesos volumétricos máximos en la prueba Porter que fluctúan entre los valores correspondientes a la prueba Proctor Modificada y un 10% mayores, aun cuando este tipo de suelos contengan un porcentaje de partículas retenidas en la malla No. 4 francamente superior al 10%.

En consecuencia, existe una incongruencia notoria en las normas de compactación de la Secretaría, ya que en la actualidad se especifica que independientemente del tipo de material, el grado de compactación que se refiere al peso volumétrico máximo obtenido de una prueba Porter si el retenido en la malla No. 4 es superior al 10%, o bien, al correspondiente a una prueba Proctor (S.O.P.)\* si dicho retenido es inferior.

(\*) La prueba Proctor S.O.P. tiene una energía específica de compactación aproximadamente 20% mayor que la de la Estándar A.A.S.H.O.

- 3.- Las pruebas Proctor realizadas sobre materiales con partículas finas de  $3/4"$ , muestran que los pesos volumétricos logrados para una misma energía específica de compactación, son prácticamente idénticos cuando se emplean moldes de 4 y 6 pulgadas de diámetro.

No se observó mayor dificultad para efectuar el ensayo de Proctor con este tipo de materiales ya que los huecos, que se presentaban al nivel de la superficie con una regla de acero, se rellenaron con el material mismo tal como lo prevén el método y las especificaciones del A.A.S.H.C.

- 4.- Se reconoce que en el caso particular de los suelos friccionantes y finos son de naturaleza no plástica la realización de la prueba Porter es mucho más expedita, sobre todo si se toma en cuenta que las curvas "W" que son casi horizontales en gran parte de su longitud, lo cual justifica que la prueba se realice para un contenido de agua único fijado por la experiencia del operador.
- 5.- El empleo del molde miniatura (2 pulgadas de diámetro) en la realización de pruebas Proctor en arenas y suelos finos es ampliamente ventajoso en comparación con el molde de 4" de diámetro, sin embargo, en este estudio se observó que los pesos volumétricos máximos fueron sistemáticamente algo menores que los obtenidos con el molde de diámetro mayor. Aunque dichas diferencias pueden alcanzar valores de cierta consideración (3 a 4 %) éstas sue-

den prácticamente anularse tomando las precauciones anotadas al discutir estos resultados.

- 6.- Del examen de las tablas 2 a 7 se desprende que los diversos tipos de pruebas tienen un grado de reproductividad muy aceptable desde el punto de vista práctico, ya que en general las diferencias entre la mediana y los valores máximos o mínimos, representan un porcentaje que está comprendido entre el 1 y el 3 % (tanto en el peso volumétrico como en el contenido de humedad óptima) habiendo tendencia a predominar un porcentaje próximo al límite inferior.
- 7.- La alteración sufrida por los suelos gruesos en su granulometría, como consecuencia de los efectos producidos por la compactación, es considerable, principalmente en el caso de la prueba Proctor Modificada ya que el porcentaje de finos llega a incrementarse en general hasta en un 8%, no obstante que los suelos estudiados contenían partículas gruesas relativamente duras; por lo que es de esperarse que en otro tipo de materiales este efecto sea aun mayor.

Los resultados anteriores sugieren la conveniencia de determinar en la obra los efectos producidos en este aspecto, por los equipos de compactación, principalmente en el caso de las capas que constituyen un pavimento flexible. Esta información puede conducir a modificar ciertas normas que en la actualidad se emplean para el control de la calidad de este tipo de materiales.

**TABLA 1**  
**RELACION DE SUELOS ESTUDIADOS**

SUELOS	DESCRIPCION	CLASIFICACION (S.U.C.S.)	LIMITES ATTERBERG		% QUE PASA LA MALLA			
			L.L.	I.P.	3/4"	No. 4	No. 40	No. 200
1	Arena fina uniforme	SP	22	INAP.	100	100	100	5
2	Arena media limosa bien graduada	SH-SM	25	INAP.	100	100	40	10
3	Arena gruesa angulosa	SW-SM	20	INAP.	100	100	30	12
4	Arena limo-arcillosa	SM-SC	21	7	100	100	55	25
5	Arcilla limosa	CL ML	34	12	100	100	70	45
6	Arcilla de alta plasticidad	CH	62	36	100	100	96	90
7	Arcilla de alta plasticidad	CH	71	35	100	100	96	92
8	Grava angulosa 9% finos no plásticos	GW-GM	21	6	100	49	21	9
9	Grava redondeada 9% finos no plásticos	GW-GM	21	6	100	47	21	9
10	Grava angulosa 18% finos no plásticos	GM	21	6	100	55	25	18
11	Grava redondeada 18% finos no plásticos	GM	21	6	100	55	25	18

##

**TABLA 1**  
**RELACION DE SUELOS ESTUDIADOS**  
**(Continuación)**

SUELOS	DESCRIPCION	CLASIFICACION (S.U.C.S.)	LIMITES ATTERBERG		% QUE PASA LA MALLA			
			L.L.	I.P.	3/4"	No. 4	No. 40	No. 200
12	Grava angulosa 9% finos plásticos	GW-GC	49	29	100	42	19	9
13	Grava redondeada 9% finos plásticos	GW-GC	49	29	100	42	19	9
14	Grava angulosa 18% finos plásticos	GC	49	29	100	54	28	18
15	Grava redondeada 18% finos plásticos	GC	49	29	100	54	28	18
16	Arena arcillosa 30% aprox. de gravas	SC	38	12	100	72	55	37
17	Arena arcillosa	SC	38	12	100	100	80	45

Fig. 1

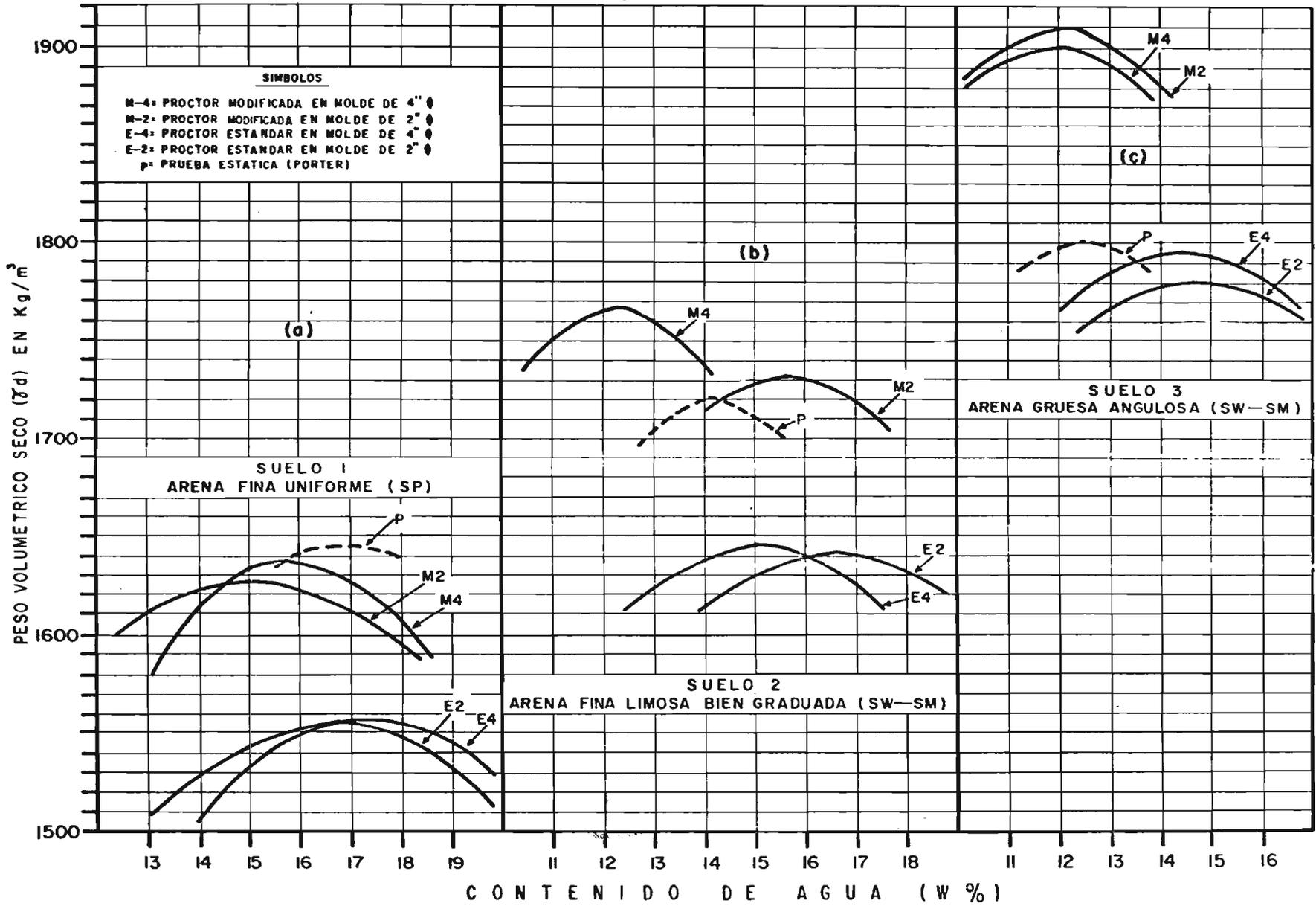
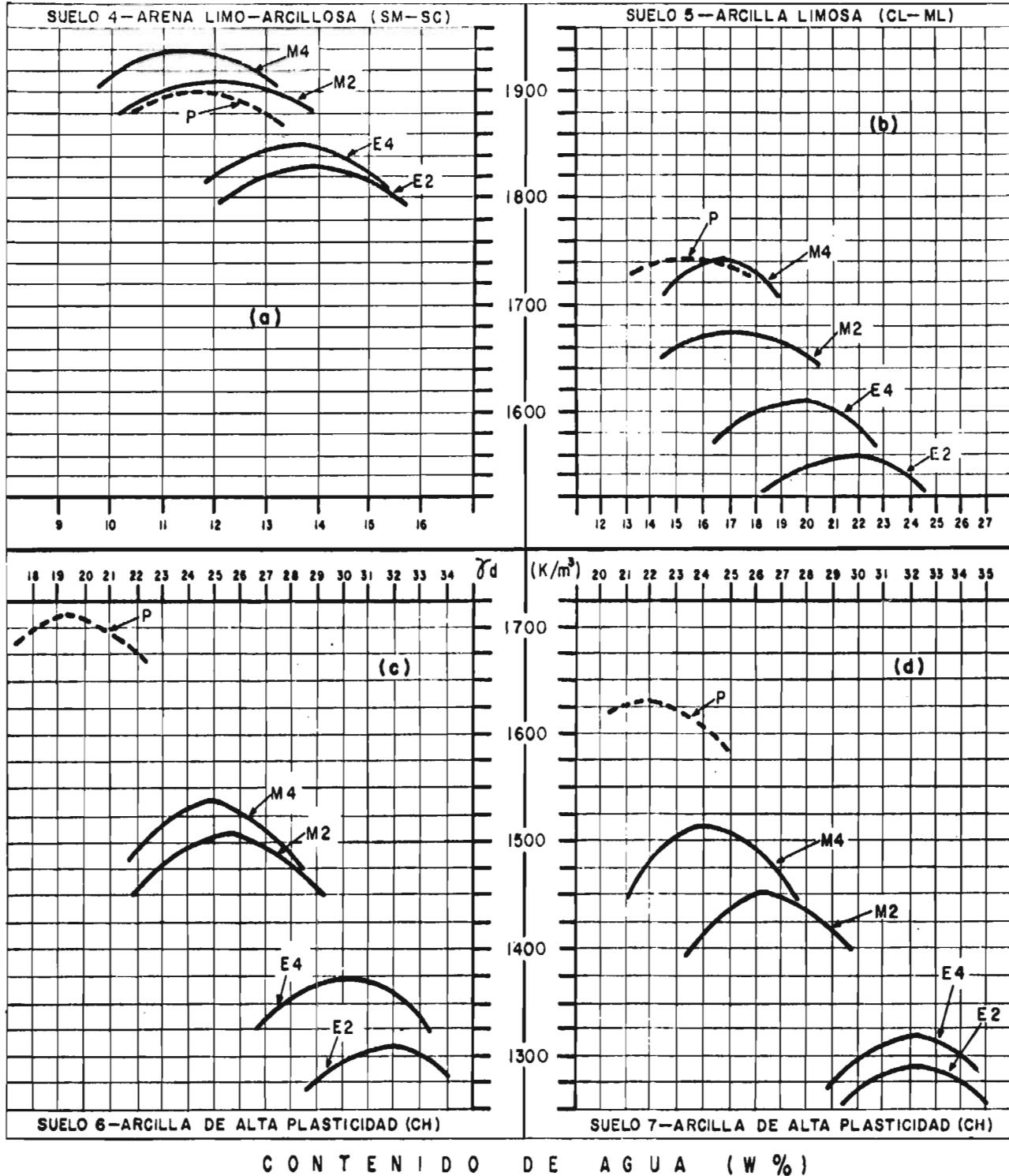


Fig. 2



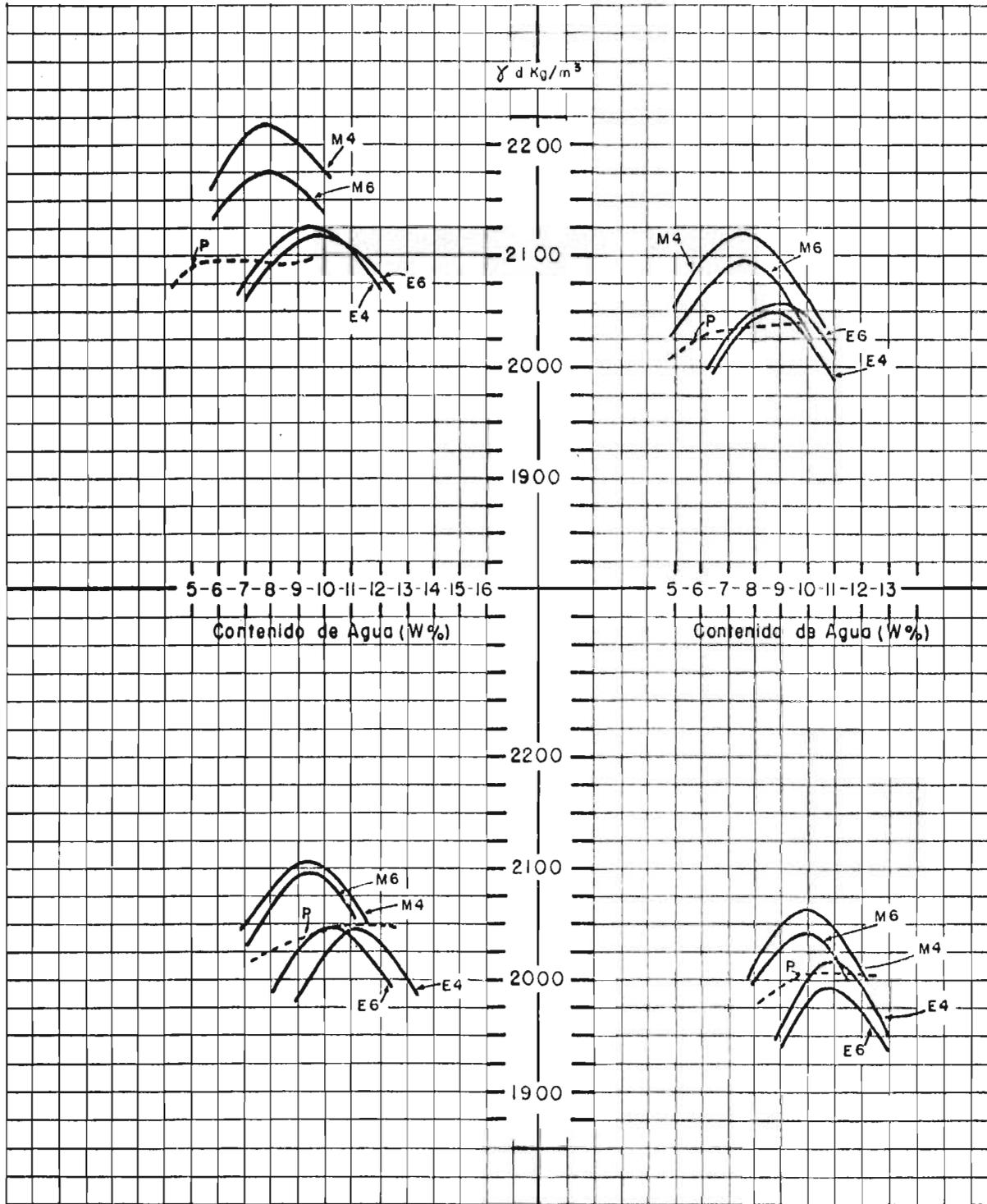
CONTENIDO DE AGUA (W%)

SÍMBOLOS

- M-4: PROCTOR MODIFICADA EN MOLDE DE 4"  $\phi$
- M-2: PROCTOR MODIFICADA EN MOLDE DE 2"  $\phi$
- E-4: PROCTOR ESTANDAR EN MOLDE DE 4"  $\phi$
- E-2: PROCTOR ESTANDAR EN MOLDE DE 2"  $\phi$
- P: PRUEBA ESTÁTICA (PORTER)

**MATERIAL ANGULOSO  
(GW-GM)  
SUELO 8**

**MATERIAL REDONDEADO  
(GW-GM)  
SUELO 9**



**SUELO 10  
MATERIAL ANGULOSO (GM)**

**SUELO 11  
MATERIAL REDONDEADO (GM)**

Fración < N° 40

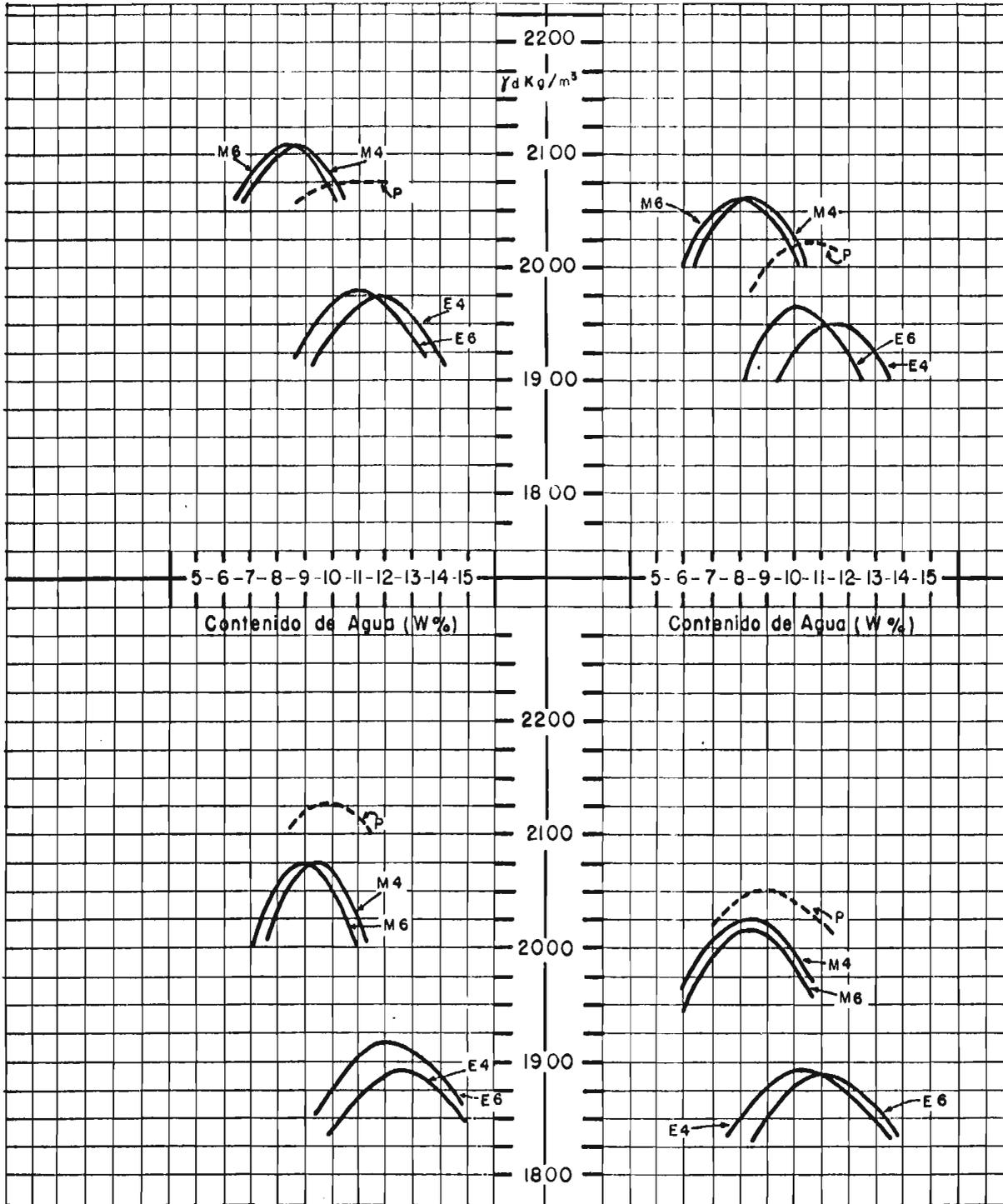
LL = 21  
LP = 15  
IP = 6

Símbolos: M-6 = Proctor Modificada en molde de 6"  $\phi$   
M-4 = Proctor Modificada en molde de 4"  $\phi$   
E-6 = Proctor Estándar en molde de 6"  $\phi$   
E-4 = Proctor Estándar en molde de 4"  $\phi$   
P = Prueba estática (Porter)

9% FINOS PLASTICOS

SUELO 12  
MATERIAL ANGULOSO (GW-GC)

SUELO 13  
MATERIAL REDONDEADO (GW-GC)



MATERIAL ANGULOSO (GC)  
SUELO 14

MATERIAL REDONDEADO (GC)  
SUELO 15

18% FINOS PLASTICOS

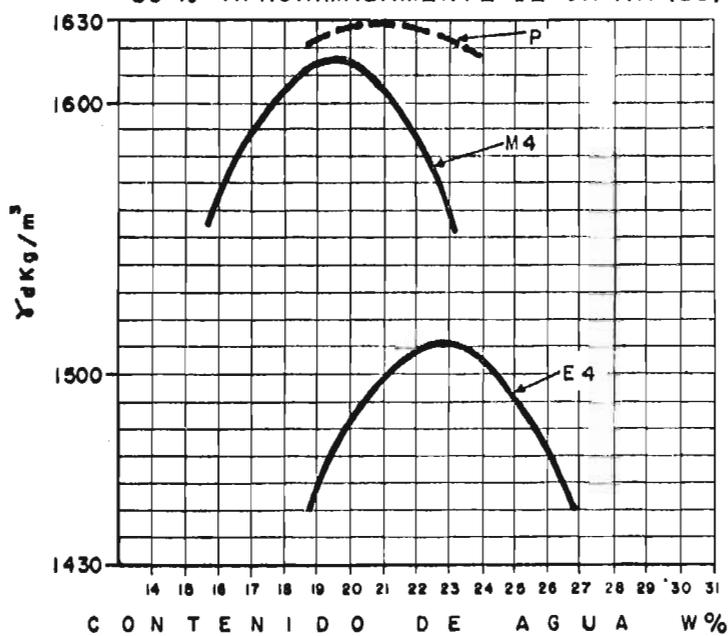
Fración < N°40

LL = 49  
LP = 20  
IP = 29

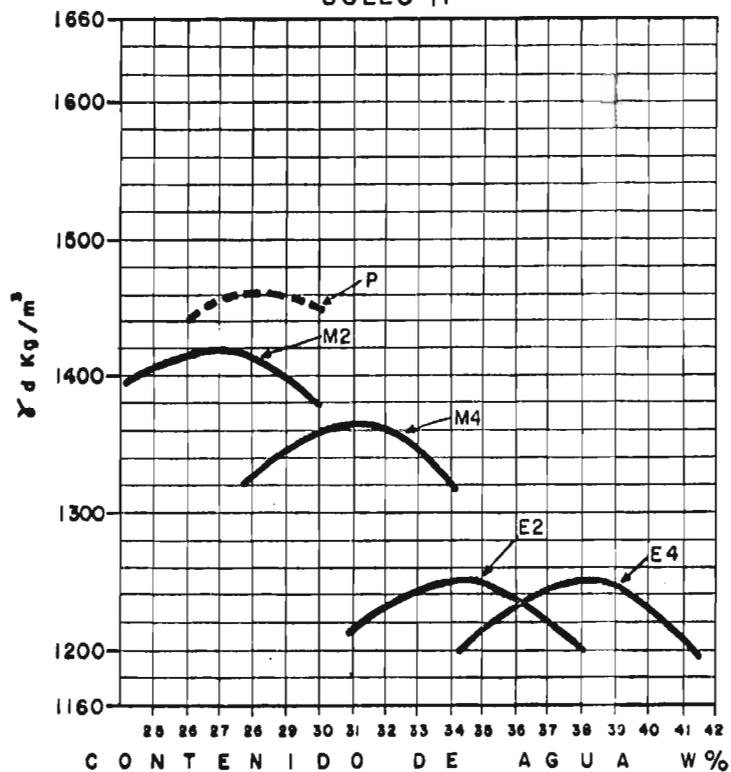
Símbolos: M-6 = Proctor Modificada en molde de 6"  $\phi$   
 M-4 = Proctor Modificada en molde de 4"  $\phi$   
 E-6 = Proctor Estándar en molde de 6"  $\phi$   
 E-4 = Proctor Estándar en molde de 4"  $\phi$   
 P = Prueba estática (Porter)

Fig. 5

SUELO 16  
 ARENA ARCILLOSA  
 30 % APROXIMADAMENTE DE GRAVA (SC)



ARENA ARCILLOSA (SC)  
 SUELO 17

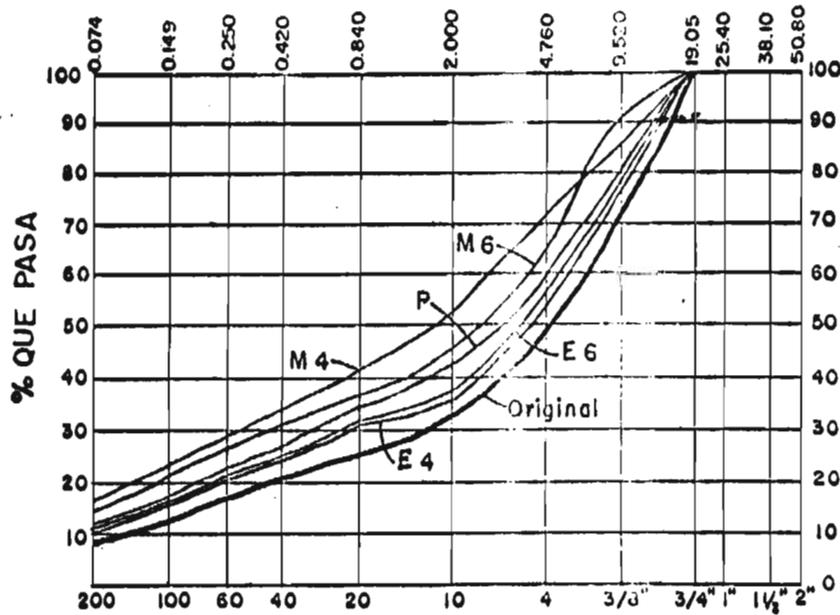


SIMBOLOS

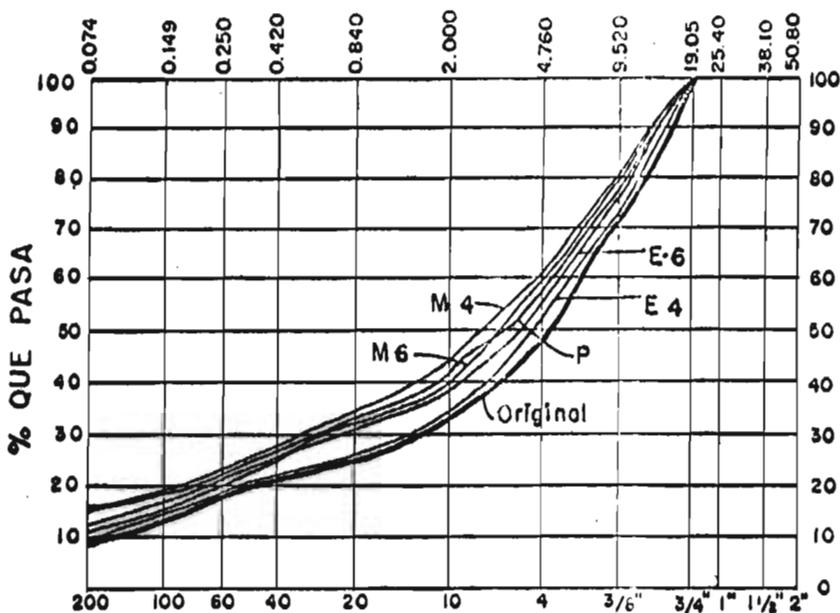
- M-4= PROCTOR MODIFICADA EN MOLDE DE 4"  $\phi$
- M-2= PROCTOR MODIFICADA EN MOLDE DE 2"  $\phi$
- E-4= PROCTOR ESTANDAR EN MOLDE DE 4"  $\phi$
- E-2= PROCTOR ESTANDAR EN MOLDE DE 2"  $\phi$
- P= PRUEBA ESTATICA (PORTER)

FIG. 6

VARIACION DE LA GRANULOMETRIA POR EFECTO DE LA COMPACTACION



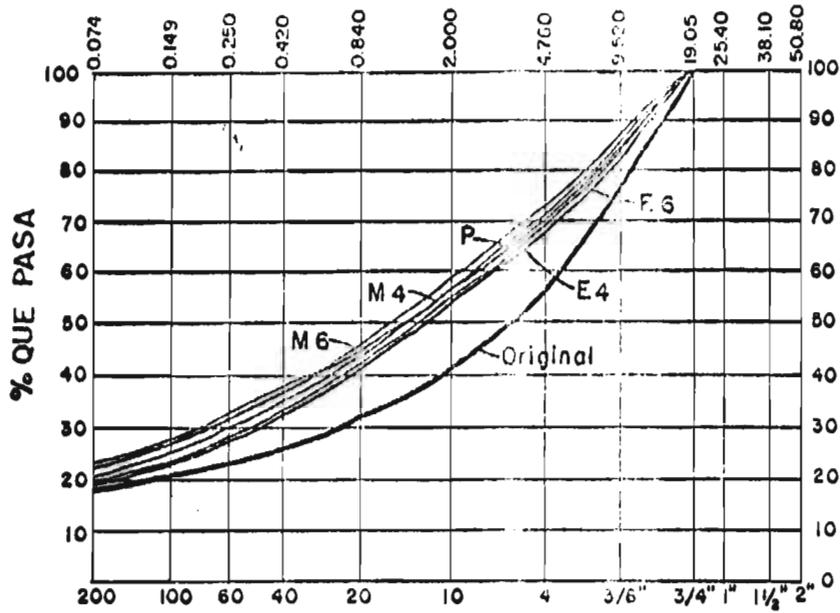
Suelo 8.- Grava angular 9% finos no plásticos



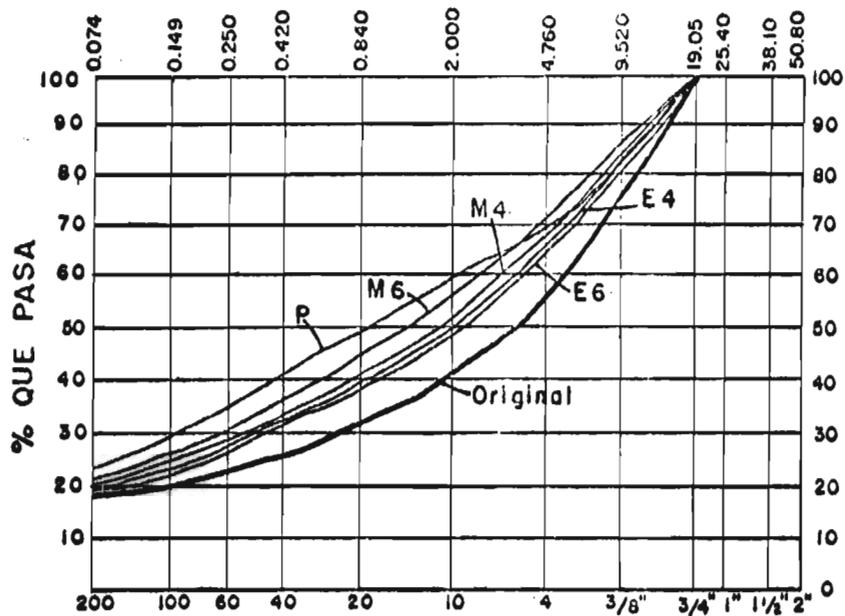
Suelo 9.- Grava redondeada 9% finos no plásticos

FIG. 7

VARIACION DE LA GRANULOMETRIA POR EFECTO DE LA COMPACTACION



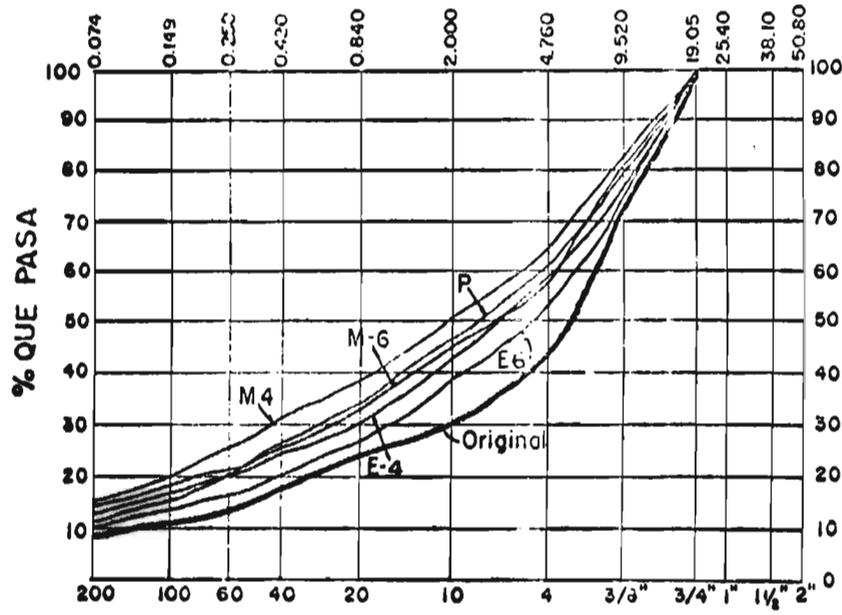
Suelo I.- Grava angular 18% finos no plásticos



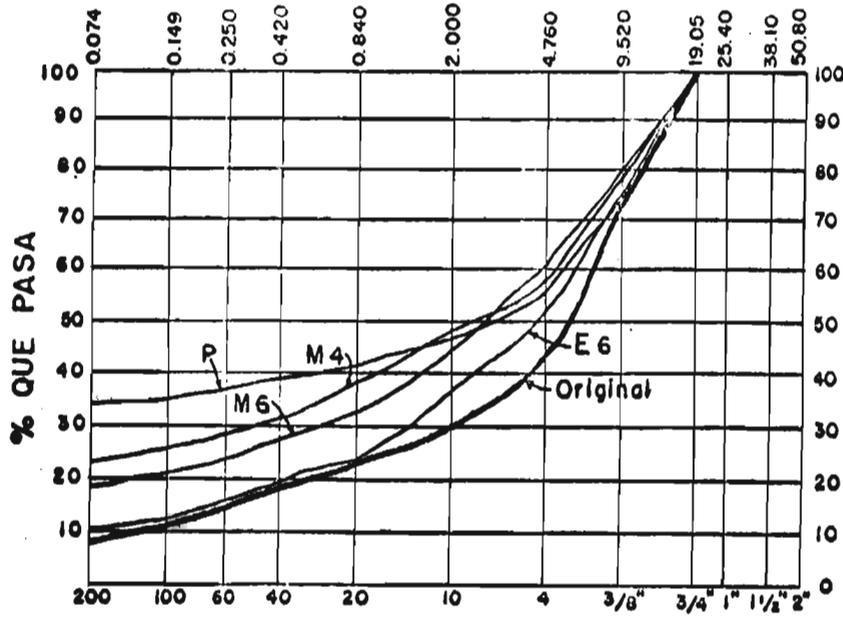
Suelo II.- Grava redondeada 18% finos no plásticos

FIG. 8

VARIACION DE LA GRANULOMETRIA POR  
EFECTO DE LA COMPACTACION



Suelo 12.- Grava angular 9% finos plásticos



Suelo 13.- Grava redondeada 9% finos plásticos

TABLA N° 2

S U E L O No. 1

PESO VOLUMETRICO SECO Kg./m<sup>3</sup>.

CONTENIDO DE AGUA (W %)

Ensaye	Máximo	Mínimo	Promedio	Mediana	Variación
M-4	1670	1620	1640	1645	± 25
M-2	1640	1616	1630	1630	± 12
E-4	1565	1547	1556	1555	± 9
E-2	1570	1520	1555	1560	± 25
P	1680	1610	1645	1650	± 35

Máximo	Mínimo	Promedio	Mediana	Variación
16.8	14.2	15.4	15.4	± 1.3
16.0	15.0	15.3	15.3	± 0.5
18.0	15.5	17.0	17.5	± 1.25
18.5	16.0	17.1	16.5	± 1.25
19.7	10.5	16.8	18.5	± 4.6

S U E L O No. 2

M-4	1832	1698	1769	1765	± 67
M-2	1780	1690	1730	1735	± 45
E-4	1670	1604	1645	1660	± 33
E-2	1655	1623	1640	1640	± 16
P	1736	1690	1720	1727	± 23

14.0	9.5	12.2	12.8	± 2.25
16.5	13.5	15.5	16.0	± 1.50
16.2	13.5	15.0	15.0	± 1.35
18.4	15.2	16.8	17.0	± 1.6
14.5	12.5	14.0	14.4	± 1.0

S U E L O No. 3

M-4	1950	1820	1900	1920	± 65
M-2	1950	1860	1910	1915	± 45
E-4	1800	1785	1792	1795	± 8
E-2	1790	1780	1785	1785	± 5
P	1820	1780	1800	1803	± 20

13.4	11.3	12.0	12.5	± 1.0
13.6	11.5	12.2	12.0	± 1.0
14.8	14.0	14.3	14.2	± 0.4
15.0	14.3	14.7	15.0	± 1.2
13.59	11.0	12.3	12.0	± 1.2

TABLA N° 3

S U E L O No. 4

PESO VOLUMETRICO SECO Kg./m<sup>3</sup>.

CONTENIDO DE AGUA (W %)

Ensaye	Máximo	Mínimo	Promedio	Mediana	Variación
M-4	1958	1925	1940	1950	<u>± 16</u>
M-2	1950	1880	1912	1918	<u>± 35</u>
E-4	1876	1820	1850	1858	<u>± 28</u>
E-2	1845	1800	1830	1828	<u>± 22</u>
P	1936	1860	1900	1908	<u>± 38</u>

Máximo	Mínimo	Promedio	Mediana	Variación
12.0	11.3	11.6	11.3	<u>± 0.35</u>
13.3	11.0	12.0	12.0	<u>± 1.15</u>
14.0	11.5	12.7	12.3	<u>± 0.5</u>
14.5	11.3	14.0	13.3	<u>± 0.75</u>
12.0	11.5	11.5	12.0	<u>± 0.75</u>

S U E L O No. 5

M-4	1785	1718	1740	1735	<u>± 33</u>
M-2	1695	1663	1675	1672	<u>± 16</u>
E-4	1662	1585	1610	1604	<u>± 38</u>
E-2	1595	1540	1558	1550	<u>± 27</u>
P	1790	1720	1742	1740	<u>± 35</u>

17.2	16.0	16.7	16.8	<u>± 0.6</u>
18.0	17.0	17.2	17.4	<u>± 0.5</u>
21.5	16.8	19.8	20.0	<u>± 2.5</u>
23.0	21.0	22.0	21.8	<u>± 1.0</u>
16.0	14.0	15.3	15.7	<u>± 1.0</u>

S U E L O No. 6

M-4	1575	1460	1540	1568	<u>± 57</u>
M-2	1520	1490	1510	1515	<u>± 15</u>
E-4	1410	1342	1380	1390	<u>± 34</u>
E-2	1330	1285	1312	1322	<u>± 22</u>
P	1730	1700	1713	1710	<u>± 15</u>

26.4	22.0	24.6	24.5	<u>± 2.2</u>
27.5	24.0	25.4	25.0	<u>± 1.7</u>
33.5	28.0	30.4	30.0	<u>± 2.7</u>
33.0	30.5	31.8	31.5	<u>± 1.2</u>
19.7	18.0	18.9	19.0	<u>± 0.9</u>

SUELO No. 7

PESO VOLUMETRICO SECO Kg./m<sup>3</sup>.

CONTENIDO DE AGUA (%)

Ensayo	Máximo	Mínimo	Promedio	Mediana	Variancia
M-4	1598	1485	1515	1490	± 56
M-2	1478	1425	1450	1450	± 26
E-4	1340	1310	1320	1320	± 15
E-2	1324	1270	1290	1280	± 27
F	1660	1610	1630	1632	± 25

Máximo	Mínimo	Promedio	Mediana	Variancia
25.8	19.3	23.8	25.0	± 3.25
28.3	24.0	26.1	25.5	± 2.1
33.3	31.0	32.4	32.0	± 0.9
34.5	31.0	32.8	32.3	± 2.2
22.7	20.7	21.8	22.0	± 1.0

SUELO No. 8

M-4	2230	2170	2213	2225	± 30
M-6	2135	2140	2175	2182	± 27
E-6	2130	2110	2117	2115	± 10
E-4	2150	2090	2124	2127	± 30
F	2120	2070	2095	2095	± 25

8.8	6.5	7.6	7.6	± 1.1
8.2	7.5	7.9	8.0	± 0.3
10	9	9.5	9.5	± 0.5
10.5	8.6	9.5	9.1	± 0.9
9	5.5	7.5	7.7	± 1.8

SUELO No. 9

M-4	2140	2100	2120	2120	± 20
M-6	2105	2085	2095	2095	± 10
E-6	2075	2040	2062	2067	± 17
E-4	2150	2025	2049	2055	± 17
F	2050	2020	2032	2030	± 15

8.2	7.0	7.7	7.7	± 0.6
8.5	7.3	8.0	8.1	± 0.6
9.7	8.5	9.1	9.1	± 0.6
9.2	8.5	8.8	8.7	± 0.3
10	6.5	8.1	8.0	± 1.7

TABLA Nº 5

S U E L O No. 10

PESO VOLUMETRICO SECO Kg./m<sup>3</sup>.

CONTENIDO DE AGUA (W %)

Ensaye	Máximo	Mínimo	Promedio	Mediana	Variación
M-4	2120	2090	2104	2104	± 15
M-6	2120	2085	2097	2092	± 17
E-6	2055	2045	2048	2045	± 5
E-4	2095	2000	2045	2042	± 47
P	2060	2040	2050	2050	± 10

Máximo	Mínimo	Promedio	Mediana	Variación
8.8	8.3	8.5	8.5	± 0.2
9.0	8.4	8.6	8.5	± 0.3
9.5	8.5	9.1	9.2	± 0.5
11.7	9.5	10.1	9.6	± 0.6
11.0	9.0	9.9	9.7	± 1.0

S U E L O No. 11

M-4	2075	2040	2057	2057	± 17
M-6	2055	2000	2037	2047	± 27
E-6	2005	1970	1991	1995	± 17
E-4	2030	1995	2015	2017	± 17
P	2030	2000	2012	2010	± 15

9.5	8.5	9.0	9.0	± 0.5
9.7	8.5	9.2	9.2	± 0.6
10	9.7	10	10.0	± 0.1
10.5	9.5	10	10.1	± 0.5
11.0	10.5	10.9	11	± 0.2

S U E L O No. 12

M-4	2140	2075	2112	2117	± 32
M-6	2120	2090	2107	2110	± 15
E-6	1990	1975	1980	1977	± 7
E-4	2000	1930	1971	1977	± 35
P	2110	2050	2077	2075	± 30

10.5	8.0	8.7	8.2	± 0.7
9.0	8.0	8.4	8.3	± 0.5
12.0	10.0	10.9	10.7	± 1.0
12.5	12.0	11.9	12.0	± 0.3
12.0	9.5	10.6	10.5	± 1.3

TABLA N° 6

S U E L O No. 13

PESO VOLUMETRICICO SECO Kg./m<sup>3</sup>.

CONTENIDO DE AGUA (W %)

Ensayo	Máximo	Mínimo	Promedio	Mediana	Variancia
M-4	2080	2045	2059	2055	± 17
M-6	2075	2045	2057	2055	± 15
E-6	1980	1930	1962	1970	± 25
E-4	1960	1940	1951	1952	+ 10
P	2040	1990	2021	2027	± 25

Máximo	Mínimo	Promedio	Mediana	Variancia
8.5	8.0	8.3	8.0	± 0.2
8.5	8.0	8.3	8.0	± 0.2
10.5	10	10.2	10.0	± 0.2
12	11	11.5	11.5	± 0.5
12	10	10.7	10.5	± 1.0

S U E L O No. 14

M-4	2090	2055	2077	2082	± 17
M-6	2080	2065	2072	2072	± 7
E-6	1925	1910	1916	1915	± 7
E-4	1905	1880	1892	1892	± 12
P	2150	1990	2098	2127	± 80

10	8.3	9.3	9.5	± 0.8
9.5	8.5	8.8	8.7	± 0.5
13	11	12	12.0	± 1.0
13.5	12	12.6	12.5	± 0.7
12	9.5	10.4	10.0	± 1.3

S U E L O No. 15

M-4	2035	2000	2020	2022	± 17
M-6	2025	2010	2018	2020	± 7
E-6	1920	1855	1887	1887	± 32
E-4	1940	1860	1895	1890	± 40
P	2060	2040	2052	2055	± 10

10	9	9.6	9.7	± 1.0
9.5	9	9.3	9.2	± 0.2
13	10.5	11.6	11.5	± 1.2
11.5	10.5	11	11.0	± 0.5
11	9.5	10.1	10.0	± 0.7

TABLA N° 7

S U E L O No. 16

PESO VOLUMETRICO SECO  $\text{Kg./m}^3$ .

CONTENIDO DE AGUA (W %)

Ensaye	Máximo	Mínimo	Promedio	Mediana	Variación
M-4	1625	1620	1622	1622	$\pm 2.5$
E-4	1525	1500	1514	1515	$\pm 12.5$
P	1640	1610	1628	1630	$\pm 15.0$

Máximo	Mínimo	Promedio	Mediana	Variación
20.5	18	19.4	19.5	$\pm 1.2$
23.5	22	22.9	23.0	$\pm 0.7$
22.5	20	21.4	21.5	$\pm 1.2$

S U E L O No. 17

M-4	1385	1350	1368	1367	$\pm 17.5$
E-4	1270	1210	1246	1252	$\pm 30.0$

31.5	30	30.8	30.9	$\pm 0.8$
41.0	34.5	38	38	$\pm 3.2$



TABLA 8

RESUMEN DE PESOS VOLUMETRICOS MAXIMOS Y HUMEDADES OPTIMAS

ARENAS Y SUELOS FINOS

SUELO	E - 2		E - 4		P		M - 2		M - 4	
	d	w	d	w	d	w	d	w	d	w
1 SP	1555	17.1	1556	17.0	1645	16.8	1630	15.3	1640	15.4
2 SW-SM	1640	16.8	1645	15.0	1720	14.0	1730	15.5	1765	12.2
3 SW-SM	1785	14.7	1792	14.3	1800	12.3	1910	12.2	1900	12.0
4 SM-SC	1830	14.0	1850	13.7	1900	11.5	1912	12.0	1940	11.6
5 CL-ML	1558	22.0	1610	19.8	1745	15.3	1675	17.3	1740	16.7
6 CH	1312	31.8	1380	30.4	1713	18.9	1510	25.4	1540	24.6
7 CH	1290	32.2	1320	32.4	1630	21.8	1450	26.1	1515	23.8

GRAVAS

	E - 4		E - 6		P		M - 4		M - 6	
8 GW-GM	2124	9.3	2117	9.5	2095	7.5	2213	7.6	2175	7.9
9 GW-GM	2049	8.8	2062	9.1	2032	8.1	2120	7.7	2095	8.0
10 GM	2045	10.1	2048	9.1	2050	9.9	2104	8.5	2097	8.6
11 GM	2015	10.0	1991	10.0	2012	10.9	2057	9.0	2037	9.2
12 GW-GC	1971	11.9	1980	10.9	2077	10.6	2112	8.7	2107	8.4
13 GW-GC	1951	11.5	1962	10.2	2021	10.7	2059	8.3	2057	8.3
14 GC	1892	12.6	1916	12.0	2098	10.4	2077	9.3	2072	8.8
15 GC	1895	11.0	1887	11.6	2052	10.1	2020	9.6	2018	9.3
16 SC	1514	22.9			1628	21.4	1622	19.4		
17 SC										

SIMBOLOS: E-2 Proctor Estándar en molde de 2" ø  
 E-4 Proctor Estándar en molde de 4" ø  
 E-6 Proctor Estándar en molde de 6" ø  
 M-2 Proctor Modificada en molde de 2" ø  
 M-4 Proctor Modificada en molde de 4" ø  
 M-6 Proctor Modificada en molde de 6" ø  
 P Prueba Estática (Porter) 6" ø

NOTA: Los valores anotados en las columnas correspondientes a pesos volumétricos máximos ( d ) y humedad óptima ( w ) representan el promedio de 5 ensayos.

APENDICE "A"PRUEBAS PROCTOR NORMALIZADAS POR EL  
A.A.S.H.O., CON LAS DESIGNACIONES  
T 99-57 Y T 180-57

## PRUEBA PROCTOR ESTANDAR (T 99-57)

## Resumen.

Esta prueba se emplea para determinar el peso volumétrico seco máximo y el contenido de humedad óptima al compactar un suelo en un molde cilíndrico, con un pisón de 5.5 lb. el cual se deja caer libremente a una altura de 12 pulgadas. Para efectuar esta prueba se tienen disponibles los cuatro métodos siguientes:

- Método A - Molde de 4" con material pasando la malla No. 4.
- Método B - Molde de 6" con material pasando la malla No. 4.
- Método C - Molde de 4" con material pasando la malla de 3/4".
- Método D - Molde de 6" con material pasando la malla de 3/4".

Método A.-

- a).- Si la muestra se encuentra húmeda, al recibirla del campo, se procede a su secado hasta que se pueda desmenuzar fácilmente. El secado puede efectuarse al aire libre o bien en el horno de manera que la temperatura no rebase los 60° C, luego se disgrega convenientemente hasta reducir el material a sus partículas individuales.

##

- b).- Se criba una cantidad adecuada del material representativo por la malla No. 4 y se desecha el que ha sido retenido en esta malla.
- c).- Selecciónese una muestra representativa con un peso aproximado de 3 Kg. del suelo tal y como ha sido preparado.

Procedimiento. -

- a).- Se mezcla completamente la muestra seleccionada y se le adiciona agua hasta llegar aproximadamente a un 4% debajo del contenido óptimo de humedad.
- b).- Se compacta el suelo en el molde de 4" en tres capas iguales para dar una altura compactada de 5". Cada capa se compacta por medio de 25 golpes uniformemente distribuidos con una altura de caída de 12". Durante la compactación el molde se debe apoyar en una base rígida con un peso no menor de 90 Kg. Se pesa el material con todo y molde.
- c).- Una vez compactado el suelo se saca éste del molde y se toma una muestra del centro y se le pesa inmediatamente, secándola en seguida en el horno a  $110^{\circ} \text{C} \pm 5$  durante un tiempo no menor de 12 horas. Esta muestra para determinar la humedad no deberá pesar menos de 100 gr.
- d).- El material restante se mezcla nuevamente hasta que se juzgue pase la malla No. 4. Se agrega agua en suficiente cantidad para aumentar el contenido de humedad en 1 ó 2%, repitiéndose en esta forma el procedimiento -

para cada incremento de agua añadido. Se continúan estas series hasta que el peso húmedo alcanzado disminuya o permanezca constante.

Método B.-

En este método la preparación de la muestra es idéntica que en el anterior y tan sólo puede observarse que el material se compacte en un molde de 6" en tres capas iguales, dándole 56 golpes a cada capa, debiendo tener la muestra seleccionada un peso aproximado de 7.5 Kg.

Método C.-

Se criba una cantidad adecuada de material representativo por la malla de 3/4" desechándose el retenido en ésta. Se escoge una muestra representativa que pese aproximadamente 5.5 Kg.

Método D.-

La cantidad del material seleccionado debe pesar aproximadamente 11 Kg.

El procedimiento de prueba consiste en compactar el material en un molde de 6" en tres capas iguales, siendo compactada cada capa con 56 golpes uniformemente distribuidos.

Prueba Proctor Modificada (T 100-57)

El objeto de la prueba Proctor Modificada es similar al de la Proctor Estándar y sólo difiere de ésta en que la energía específica de compactación

os superior, ya que debe emplearse un pisón de 10 lb. y una altura de caída de 18". Para efectuar el ensaye se preven las mismas cuatro variantes indicadas al respecto en la Proctor Estándar.

#### Prueba Porter S.O.P. 108-11

Esta prueba se aplica esencialmente a las porciones de suelo que pasan totalmente por la malla de 1" y su retenido en la malla No. 4 es mayor de 10%. También se aplica en determinados suelos finos tales como las arenas de río o de mina, arenas de trituración, y en general a todos aquellos suelos que carecen de cementación.

El procedimiento de prueba consiste en tomar una muestra cuyo peso aproximado sea de 16 Kg. la cual se seca y cuartea convenientemente y se divide en cuatro porciones después de haberse cribado por la malla de 1". Se le añade cierta cantidad de agua a cada porción hasta que se distribuya uniformemente y luego se le coloca en tres capas dentro del molde, proporcionándole al material una compactación inicial mediante una varilla de 3/4" con punta en forma de bala, aplicada 25 veces en cada capa. Al colocar la última capa se compacta el material aplicando carga uniforme lentamente hasta alcanzar la presión de 140.6 Kg/cm<sup>2</sup>. en un tiempo de 5 minutos, la que deberá mantenerse durante un minuto haciendo inmediatamente la descarga. A otra porción del material se --

##

agrega una cantidad de agua igual a la anterior más 30 cm<sup>3</sup>. y se repite el proceso descrito. Si al aplicar la carga máxima se observa que se humedece la base del molde, el material se encuentra con una humedad ligeramente mayor que la óptima de compactación. Para fines prácticos se considera que el espécimen se encuentra con su humedad óptima cuando se inicia el humedecimiento de la base del molde. En rigor la humedad óptima de compactación es el contenido de agua mínimo requerido por el suelo para alcanzar su peso volumétrico seco máximo.

Referencias:

"FACTORS INFLUENCING COMPACTION TEST RESULTS". Boletín  
319 Highway Research Board.

"ALGUNOS FACTORES QUE AFECTAN A LA PRUEBA DE COMPAC  
TACION DINAMICA". Ing. Enrique Tamez. Memorias de la Junta  
del A.S.T.M. y la S.M.M.S. 1957.

STANDARD SPECIFICATIONS FOR HIGHWAY MATERIALS A.A.S.  
H.O. Parte III.

ESPECIFICACIONES GENERALES DE CONSTRUCCION DE LA SE--  
CRETARIA DE OBRAS PUBLICAS. Parte IX, Libro lo.

Agradecimiento:

El autor expresa su agradecimiento al C. ING. FERNANDO  
ESPINOSA GUTIERREZ, Director de la Dirección General de Proyectos y Labo-  
ratorios de la SECRETARIA DE OBRAS PUBLICAS, por las facilidades otorgadas -  
para la realización de este trabajo.