

LIBRO: **MMP. MÉTODOS DE MUESTREO Y PRUEBA DE MATERIALES**

PARTE: **1. SUELOS Y MATERIALES PARA TERRACERÍAS**

TÍTULO: 09. Compactación AASHTO

A. CONTENIDO

Este Manual describe los procedimientos de prueba AASHTO estándar (AASHTO T 99-95) y AASHTO modificada (AASHTO T 180-95), para determinar mediante la curva de compactación, la masa volumétrica seca máxima y el contenido de agua óptimo de los materiales para terracerías a que se refieren las Normas N·CMT·1·01, *Materiales para Terraplén*, N·CMT·1·02, *Materiales para Subyacente* y N·CMT·1·03, *Materiales para Subrasante*.

B. OBJETIVO DE LAS PRUEBAS

Las pruebas permiten determinar la curva de compactación de los materiales para terracerías y a partir de ésta inferir su masa volumétrica seca máxima y su contenido de agua óptimo. Consisten en determinar las masas volumétricas secas de un material compactado con diferentes contenidos de agua, mediante la aplicación de una misma energía de compactación en prueba dinámica y, graficando los puntos correspondientes a cada determinación, trazar la curva de compactación del material.

C. REFERENCIAS

Este Manual se complementa con las siguientes:

NORMAS Y MANUALES		DESIGNACIÓN
Materiales para Terraplén		N·CMT·1·01
Materiales para Subyacente		N·CMT·1·02
Materiales para Subrasante		N·CMT·1·03
Muestreo de Materiales para Terracerías		M·MMP·1·01
Secado, Disgregado y Cuarteo de Muestras		M·MMP·1·03
Contenido de Agua		M·MMP·1·04
Densidades Relativas y Absorción		M·MMP·1·05
Granulometría de Materiales Compactables para Terracerías		M·MMP·1·06

D. EQUIPO Y MATERIALES

El equipo para la ejecución de las pruebas estará en condiciones de operación, calibrado, limpio y completo en todas sus partes. Todos los materiales por emplear serán de alta calidad.

D.1. MOLDES

Metálicos de forma cilíndrica, de volúmenes V y masas W_t conocidos, provistos de una placa de base metálica a la cual se asegura el cilindro y una extensión o collarín removible con diámetro interior igual al del cilindro, con la forma y dimensiones indicadas en la Figura 1, dependiendo de la variante de prueba, según lo indicado en la Tabla 1 de este Manual.

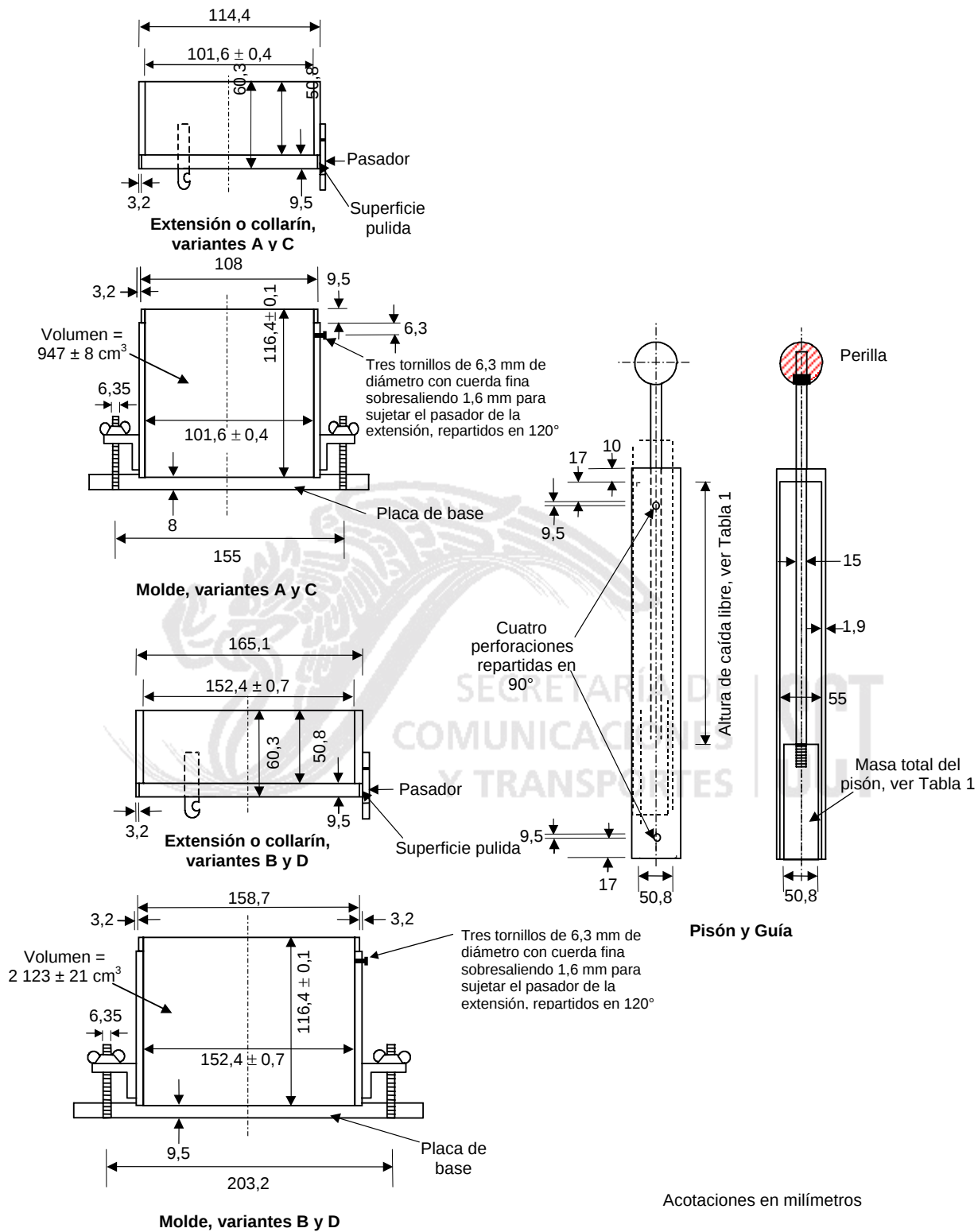


FIGURA 1.- Moldes cilíndricos y pisones para las pruebas de compactación AASHTO

D.2. PISONES

Metálicos, con cara inferior de apisonado circular, de 50,8 mm de diámetro, acoplados a una guía metálica tubular, como el mostrado en la Figura 1 y con las características indicadas en la Tabla 1 de este Manual, de acuerdo con el tipo de prueba de que se trate.

D.3. REGLA

Metálica, de arista cortante, de aproximadamente 25 cm de largo.

D.4. BALANZAS

Una con capacidad mínima de 15 kg y aproximación de 5 g; otra con capacidad mínima de 2 kg y aproximación de 0,1 g.

D.5. HORNO

Eléctrico o de gas, con capacidad suficiente para contener el material de prueba, con termostato capaz de mantener una temperatura de 105°C y aproximación de $\pm 5^\circ\text{C}$.

D.6. BASE CÚBICA

De concreto o de otro material de rigidez similar con dimensiones mínimas de 40 cm por lado.

D.7. PROBETAS

Una con capacidad de 500 cm³ y graduaciones a cada 10 cm³; otra con capacidad de 1 000 cm³ y graduaciones a cada 10 cm³.

D.8. MALLAS ¾" Y N°4

Fabricadas con alambres de bronce o de acero inoxidable, tejidos en forma de cuadrícula, con abertura nominal de 19 y 4,75 mm respectivamente, que cumplan con las tolerancias indicadas en la Tabla 1 del Manual M-MMP-1-06, *Granulometría de Materiales Compactables para Terracerías*. El tejido estará sostenido mediante un bastidor circular metálico, de lámina de bronce o latón, de 206 ± 2 mm de diámetro interior y 68 ± 2 mm de altura, sujetando la malla rígida y firmemente mediante un sistema de engargolado de metales, a una distancia de 50 mm del borde superior del bastidor.

D.9. CÁPSULAS

Metálicas, con tapa.

D.10. CHAROLAS

De lámina galvanizada, de forma rectangular de 40 × 70 × 10 cm.

D.11. CUCHARÓN

De 20 cm de largo, 11 cm de ancho y 10 cm de altura, formando un paralelepípedo rectangular con sólo cuatro caras, cuya cara menor lleva acoplado un mango metálico de sección circular de 13 cm de largo.

D.12. ACEITE

Para lubricar las paredes de los moldes.

E. VARIANTES DE LAS PRUEBAS

Las pruebas se pueden realizar con una de las siguientes cuatro variantes, según se muestra en la Tabla 1.

- E.1.** Variante A, que se aplica a materiales que pasan la malla N°4 (4,75 mm) y se compactan en el molde de 101,6 mm de diámetro interior.

TABLA 1.- Características de las variantes de las pruebas de compactación

Tipo de prueba	Estándar		Modificada	
Masa del pisón, kg	2,5 ± 0,01		4,54 ± 0,01	
Diámetro del pisón, mm	50,8		50,8	
Altura de caída del pisón, cm	30,5 ± 0,1		45,7 ± 0,1	
Número de capas	3		5	
Variantes	A y C	B y D	A y C	B y D
Tamaño máximo del material, mm	4,75 (N°4)	19,0 (¾")	4,75 (N°4)	19,0 (¾")
Diámetro int. del molde, mm	101,6 ± 0,4	152,4 ± 0,7	101,6 ± 0,4	152,4 ± 0,7
Número de golpes por capa	25	56	25	56
Tamaño de la muestra de prueba, kg	4,0	7,5	4,0	7,5

La variante a usarse debe indicarse en la especificación para el material que está siendo probado. Si ninguna variante está especificada se utilizará la variante A.

E.2. Variante B, que se aplica a materiales que pasan la malla N°4 (4,75 mm) y se compactan en el molde de 152,4 mm de diámetro interior.

E.3. Variante C, que se aplica a materiales que pasan la malla ¾" (19 mm) y se compactan en el molde de 101,6 mm de diámetro interior.

E.4. Variante D, que se aplica a materiales que pasan la malla ¾" (19 mm) y se compactan en molde 152,4 mm de diámetro interior.

F. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

La preparación de la muestra de materiales para terracerías, obtenida según se establece en el Manual M-MMP-1-01, *Muestreo de Materiales para Terracerías*, se hace de la siguiente manera:

F.1. De acuerdo con lo indicado en el Manual M-MMP-1-03, *Secado, Disgregado y Cuarteo de Muestras*, se separa por cuarteos una porción representativa de aproximadamente 4 kg para las variantes A y C, y de aproximadamente 7,5 kg, para las variantes B y D.

F.2. En el caso de las variantes A y B, el material se criba a través de la malla N°4 (4,75 mm), mientras que para las variantes C y D el material se criba a través de la malla ¾" (19 mm); en ambos casos se efectúa el cribado en forma manual, colocando la fracción que pasa en una charola y desechando el retenido.

F.3. Se homogeneiza perfectamente el material que constituye la porción de prueba.

G. PROCEDIMIENTO DE LAS PRUEBAS

G.1. A la porción preparada, se le agrega la cantidad de agua necesaria para que una vez homogeneizada, tenga un contenido de agua inferior en 4 a 6% respecto al óptimo estimado.

G.2. En el caso de que se hayan formado grumos durante la incorporación del agua, se revuelve el material hasta disgregarlo totalmente. Se mezcla cuidadosamente la porción para homogeneizarla y se divide en tres fracciones aproximadamente iguales, en el caso de la prueba estándar y en cinco porciones para la prueba modificada.

G.3. Se coloca una de las fracciones de material en el molde de prueba seleccionado de acuerdo con la variante de que se trate, con su respectiva extensión, el cual se apoya sobre el bloque de concreto para compactar el material con el pisón que corresponda, aplicando 25 golpes para el caso de las variantes A y C ó 56 golpes para las variantes B y D, repartiendo uniformemente los

golpes en la superficie de la capa, como se muestra en la Figura 2 de este Manual. Para el caso de la prueba estándar se utiliza el pisón de 2,5 kg, con una altura de caída libre de 30,5 cm y para el caso de la prueba modificada, la masa del pisón y la caída libre serán de 4,54 kg y 45,7 cm, respectivamente. Se escarifica ligeramente la superficie de la capa compactada y se repite el procedimiento descrito para las capas subsecuentes.

- G.4.** Terminada la compactación de todas las capas, se retira la extensión del molde y se verifica que el material no sobresalga del cilindro en un espesor promedio de 1,5 cm como máximo; de lo contrario la prueba se repetirá utilizando de preferencia una nueva porción de prueba con masa ligeramente menor que la inicial. En el caso de que no exceda dicho espesor, se enrasa cuidadosamente el espécimen con la regla metálica.



FIGURA 2.- Elaboración del espécimen de prueba

- G.5.** A continuación, se determina la masa del cilindro con el material de prueba y se registra como W_i , en g, anotándola en una hoja de registro, como la mostrada en la Figura 3 de este Manual.
- G.6.** Se saca el espécimen del cilindro, se corta longitudinalmente y de su parte central se obtiene una porción representativa para determinar su contenido de agua (ω), de acuerdo con el procedimiento indicado en el Manual M-MMP-1-04, Contenido de Agua; se registran los datos correspondientes a esta determinación en la misma hoja de registro como la mostrada la Figura 3 de este Manual.
- G.7.** Se incorporan las fracciones del espécimen al material que sobró al enrasarlo, en su caso, se disgregan los grumos, se agrega aproximadamente 2% de agua con respecto a la masa inicial de la porción de prueba y se repiten los pasos descritos en las Fracciones G.2. a G.6. de este Manual.
- G.8.** Con la misma porción de prueba se repite lo indicado en la Fracción G.7. de este Manual, incrementando sucesivamente su contenido de agua, hasta que dicho contenido sea tal que el último espécimen elaborado presente una disminución apreciable en su masa con respecto al anterior. Para definir convenientemente la variación de la masa volumétrica de los especímenes elaborados respecto a sus contenidos de agua, se requiere compactar cuatro o cinco especímenes, que en la segunda determinación la masa del cilindro con el espécimen húmedo, sea mayor que en la primera y que en la penúltima determinación sea mayor que en la última.

En materiales degradables es conveniente preparar muestras de prueba diferentes para cada determinación.

PRUEBA DE COMPACTACION DINAMICA

OBRA: Autopista: Querétaro - Irapuato	FECHA: 17 de Agosto de 2000.
LOCALIZACIÓN: Km 64+183	PRUEBA: 22-125
TRAMO: _____	OPERADOR: Ernesto Hernández
SUBTRAMO: _____	CALCULO: Gabina Marcial
ORIGEN: _____	_____
SONDEO No.: PCA-7	_____
MUESTRA No.: 5	_____
DESCRIPCIÓN: Arena arcillosa con 30% aproximadamente de grava (SC)	_____

METODO: **AASHTO Estándar**MOLDE: **R**MASA EN g: **2 750**VARIANTE: **A**No. DE GOLPES POR CAPA: **25**

Espécimen número		1	2	3	4	5	
Contenido de agua	Cápsula número	2	6	3	9	1	
	Masa cápsula + Suelo húmedo, (g)	193,8	204,2	198,1	172,4	187,9	
	Masa cápsula + Suelo seco, (g)	169,0	177,0	171,0	143,8	156,8	
	Masa del agua, (g)	24,8	27,2	27,1	28,6	31,1	
	Masa cápsula, (g)	38,0	47,2	52,3	28,9	41,5	
	Masa suelo seco W_s , (g)	131,0	129,8	118,7	114,9	115,3	
Masa volumétrica	Contenido de agua w , (%)	18,9	21,0	22,9	24,9	27,0	
	Masa del molde + Suelo húmedo W_i , (g)	6 449	6 619	6 711	6 741	6 743	
	Masa del molde W_t , (g)	2 750	2 750	2 750	2 750	2 750	
	Masa suelo húmedo W_m , (g)	3 699	3 869	3 961	3 991	3 993	
	Volumen del molde V , (cm ³)	2 133	2 133	2 133	2 133	2 133	
	Masa volumétrica húmeda γ_m , (kg/m ³)	1 734	1 814	1 857	1 871	1 872	
	Masa volumétrica seca γ_d , (kg/m ³)	1 458	1 499	1 511	1 498	1 474	

$$\text{Masa volumétrica seca} = \frac{\text{Masa volumétrica húmeda}}{100 + \text{contenido de agua (\%)}} \times 100$$

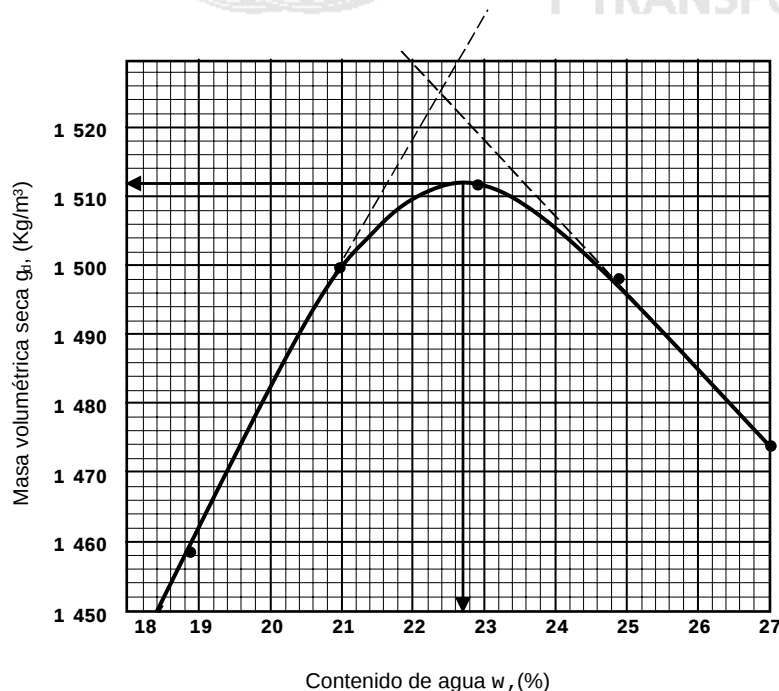
OBSERVACIONES: **Masa Volumétrica****Seca Máximo $\gamma_{dmax} = 1 512 \text{ kg/m}^3$** **Humedad óptima $w_o = 22,7\%$**

FIGURA 3.- Hoja de registro y curva de compactación para prueba dinámica AASHTO

H. CÁLCULOS Y RESULTADOS

- H.1.** En la hoja de registro como la mostrada en la Figura 3 de este Manual, se anota la masa volumétrica del material húmedo de cada espécimen; para calcularla se emplea la siguiente expresión:

$$\gamma_m = \frac{W_i - W_t}{V} \times 1000$$

Donde:

- γ_m = Masa volumétrica del material húmedo, (kg/m³)
 W_i = Masa del cilindro con el material húmedo compactado, (g)
 W_t = Masa del cilindro, (g)
 V = Volumen del cilindro, (cm³)

- H.2.** Se calcula y se registra en la hoja de registro como la mostrada en la Figura 3, la masa volumétrica seca de cada espécimen, empleando la siguiente expresión:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_m}{100 + \omega} \times 100$$

Donde:

- γ_d = Masa volumétrica seca del espécimen, (kg/m³)
 γ_m = Masa volumétrica del material húmedo, (kg/m³)
 ω = Contenido de agua del espécimen, (%)

- H.3.** En una gráfica como la incluida en la hoja de registro que se muestra en la Figura 3 de este Manual, en la que en el eje de las ordenadas se indican las masas volumétricas secas (γ_d) y en el de las abscisas los contenidos de agua (ω), se dibujan los puntos correspondientes a cada espécimen, los que se unen con una línea continua de forma aproximadamente parabólica denominada *curva de compactación*, la que determina la variación de la masa volumétrica seca del material para diferentes contenidos de agua y una misma energía de compactación, como la que se ilustra en la misma Figura.
- H.4.** Se determinan y reportan la masa volumétrica máxima seca del material, $\gamma_{dm\acute{a}x}$, en kg/m³ y su contenido de agua óptimo, ω_o , en %, que se obtienen en forma gráfica de la curva de compactación: La ordenada en el punto más alto de dicha curva representa la masa volumétrica seca máxima $\gamma_{dm\acute{a}x}$ y la abscisa de ese punto, el contenido de agua óptimo, ω_o .
- H.5.** En caso necesario, se determina la *curva de saturación teórica* del material, para lo que se calculan los contenidos de agua para las masas volumétricas secas, γ_d , con los que el material compactado quedaría saturado, γ_{dsat} . Este cálculo se realiza para 4 masas volumétricas secas diferentes, utilizando la siguiente expresión:

$$\omega_{sat} = \left(\frac{\gamma_o}{\gamma_d} - \frac{1}{S_s} \right) \times 100$$

Donde:

- ω_{sat} = Contenido de agua para el cual el material, en las condiciones de compactación, estaría saturado, (%)
 γ_d = Masa volumétrica seca del material compactado, (kg/m³)
 S_s = Densidad relativa de sólidos del material, determinada según corresponda al tamaño de sus partículas, como se indica en el Manual M-MMP-1-05, *Densidades Relativas y Absorción*
 γ_o = Masa volumétrica del agua destilada a 4°C, (kg/m³), considerada en la práctica como 1 000 kg/m³

- H.6.** En la misma gráfica que contiene la curva de compactación, se dibujan y unen con una línea continua, los puntos correspondientes a las masas volumétricas secas del material y los contenidos de agua para los cuales estaría teóricamente saturado, calculados como se indica en la Fracción anterior, obteniéndose la curva de saturación teórica; se verifica que la curva de compactación no corte la curva de saturación teórica. En la Figura 4 de este Manual, se muestran las curvas de 100 % de saturación teórica típicas correspondientes a materiales cuyas densidades relativas varían de 2,4 a 2,8. Es usual trazar también las curvas correspondientes a grados de saturación teórica de 90 y 95 %, las que si pueden ser cortadas por la curva de compactación. Para simplificar los cálculos que definen la curva de 100 % de saturación teórica, dependiendo de la densidad de sólidos del material, los datos pueden tomarse de la Figura 4.

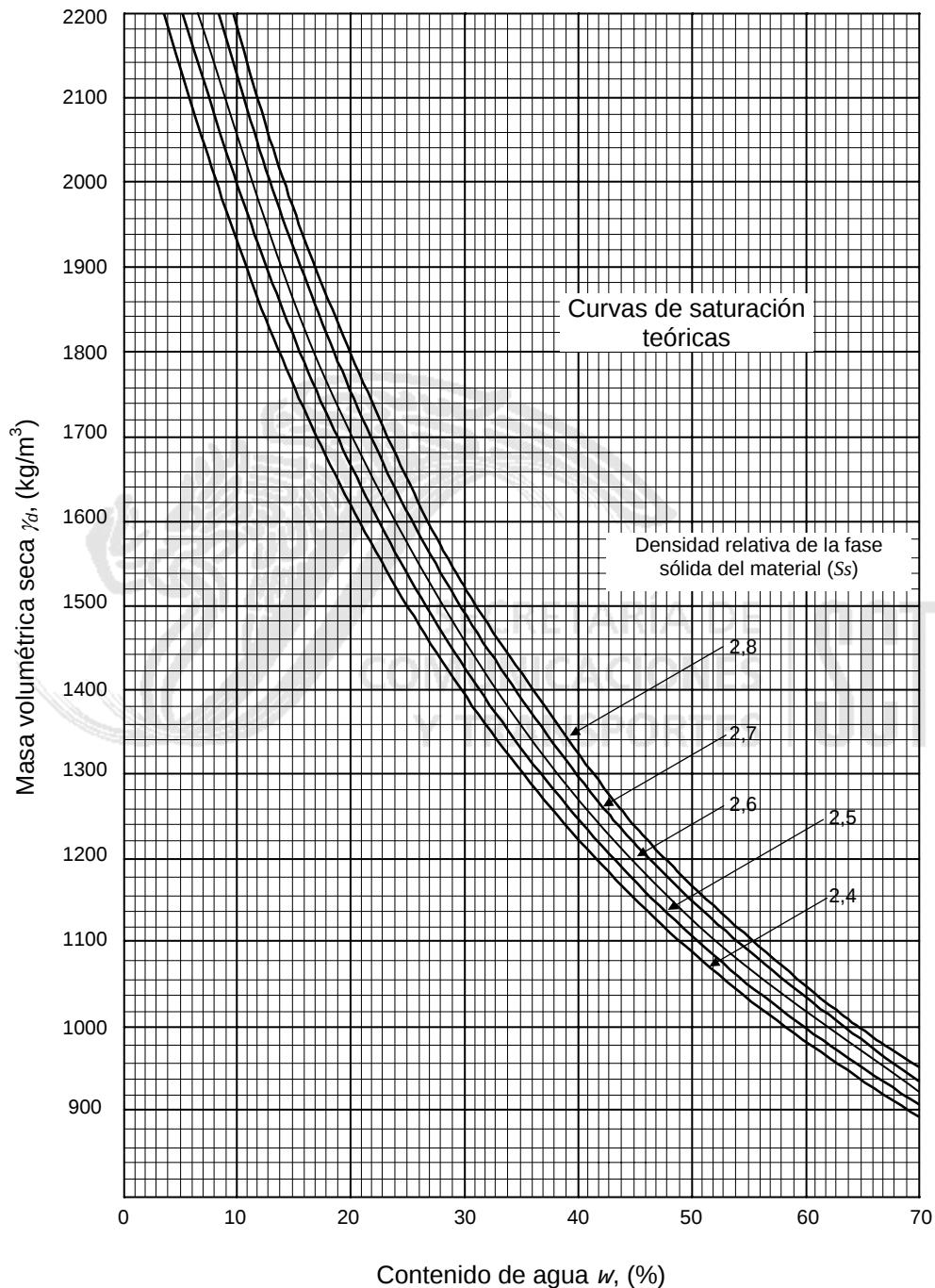


FIGURA 4.- Curvas típicas de saturación teórica

- H.7.** Todos los cálculos correspondientes a la curva de compactación a que se refiere esta Cláusula, se reportan en el formato mostrado en la Figura 3 de este Manual.

I. PRECAUCIONES

Para evitar errores durante la ejecución de las pruebas, se observan las siguientes precauciones:

- I.1. Que las pruebas se realicen en un lugar cerrado, con ventilación indirecta, limpio y libre de corrientes de aire y de partículas que provoquen la contaminación de las muestras de material.
- I.2. Que la muestra utilizada para la prueba de compactación, se seque solamente lo necesario para poder disgregarla.
- I.3. Que durante la compactación, los golpes del pisón se repartan uniformemente en toda la superficie del espécimen, aplicando los golpes sucesivos en puntos diametralmente opuestos, manteniendo la guía en posición vertical, cuidando que la caída del pisón sea libre y que la superficie del mismo se mantenga limpia.
- I.4. Que la curva de compactación se obtenga siempre con contenidos de agua crecientes y no secando la muestra durante la ejecución de la prueba.
- I.5. Que el contenido de agua del primer espécimen sea inferior al óptimo y que cada una de las ramas de la curva mencionada se defina como mínimo con dos puntos.

