

2.1. RELACIONES HUMEDAD-DENSIDAD (COMPACTACION).

Estos ensayos tienen por finalidad determinar la relación humedad-densidad de un suelo compactado en un molde normalizado mediante un pisón de masa normalizada, en caída libre y con una energía específica de compactación.

La compactación se define como el proceso mecánico mediante el cual se disminuye la cantidad de huecos en una masa de suelo, obligando a sus partículas a un contacto más íntimo entre sí, es decir, a un aumento de la densidad de un material determinado.

Las variables determinantes de la compactación que se pueda lograr en un determinado material, son la humedad que posee el suelo y el nivel de energía en la compactación.

En la década de los años 30, R.R. Proctor desarrolló un método estandarizado para determinar el contenido de humedad óptimo y la correspondiente DMCS. Hoy, la AASHTO ha estandarizado mucho más el método desarrollado por Proctor en el llamado ensayo Proctor estándar y además ha introducido el ensayo Proctor modificado, debido a una mayor envergadura de las estructuras proyectadas, que requieren una mayor capacidad de soporte del suelo, para soportar las cargas y limitar los asentamientos.

El ensayo consiste en compactar en un molde de volumen conocido muestras de un mismo suelo, pero con distintas humedades y con la misma energía de compactación. Se registran las densidades secas y el contenido de humedad de cada molde (ideal 5), graficando los resultados, donde el punto más alto de la curva representa la DMCS y su proyección en la abscisa la humedad óptima.

La aceptación de un nivel de energía trae consigo la existencia de un procedimiento de laboratorio asociado. En Chile, estos ensayos están normalizados a través del ensayo Proctor normal NCh 1534/I Of. 1979 y del ensayo Proctor modificado NCh 1534/II Of. 1979.

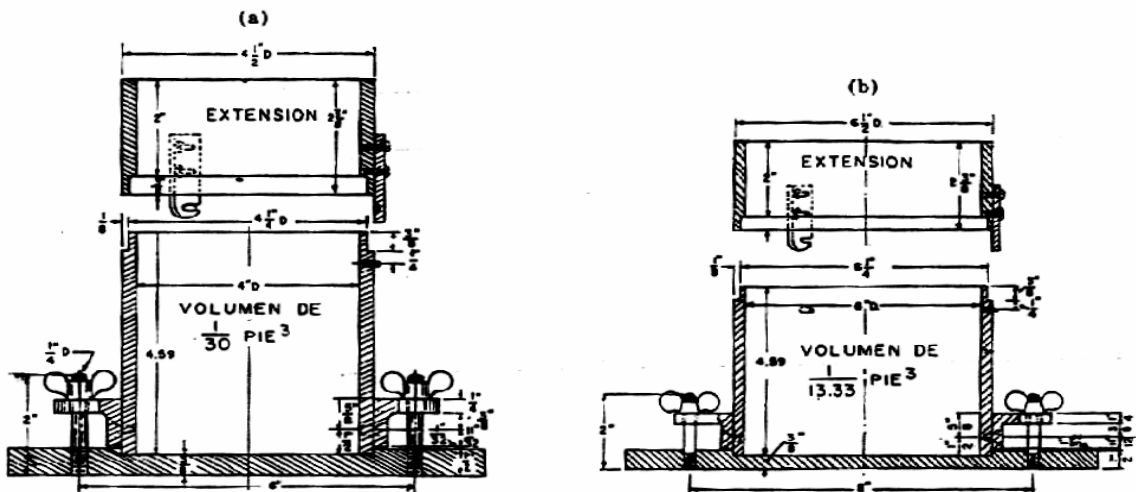
Este tipo de ensayos es aplicable a suelos con un porcentaje de finos menor que 0,074 mm. (tamiz N° 200 ASTM) igual o mayor que 12%. Para suelos con porcentaje menor, también es aplicable, siempre y cuando presenten una curva con un máximo bien definido. De no ser así, se recomienda determinar además la densidad máxima por el método de la densidad relativa e informar los resultados de ambos ensayos.

2.1.1. Método según NCh 1534/I Of. 1979 y NCh 1534/II Of. 1979.

- Equipo necesario.

- Moldes metálicos cilíndricos, con un collarín separable de aproximadamente 60 mm. de altura (figura 2.1.). El conjunto molde-collarín está construido de modo de poder ser ajustado a una placa base. Las dimensiones de los moldes son:
 - molde de 100 mm. de diámetro nominal, con una capacidad de $0,944 \pm 0,008$ lt. (V), diámetro interno de $101,6 \pm 0,4$ mm. y altura de $116,4 \pm 0,1$ mm.
 - molde de 150 mm. de diámetro nominal, con una capacidad de $2,124 \pm 0,021$ lt. (V), diámetro interno de $152,4 \pm 0,7$ mm. y altura de $116,4 \pm 0,1$ mm.

Figura 2.1. Moldes Proctor.



Fuente: Valle Rodas R., 1982.

- Regla de acero de 300 mm. de largo con canto biselado.
 - Pisón metálico para ensayo Proctor normal o estándar, de cara circular de $50 \pm 0,2$ mm. de diámetro y masa de 2500 ± 10 grs. Debe estar equipado con una guía tubular para controlar la altura de caída a 305 ± 2 mm.
 - Pisón metálico para ensayo Proctor modificado, de cara circular de $50 \pm 0,2$ mm. de diámetro y masa de 4500 ± 10 grs. Debe estar equipado con una guía tubular para controlar la altura de caída a 460 ± 2 mm.
 - Balanzas, una de 10 kgs. de capacidad y precisión de 5 grs.; la otra de 1 kg. y precisión de 0,1 gr.
 - Probetas graduadas, una de 500 ml. de capacidad graduada cada 5 cc.; la otra de 250 ml. graduada cada 2,5 cc.
 - Horno de secado con circulación de aire y temperatura regulable capaz de mantenerse en $110^\circ \pm 5^\circ$ C.
 - Tamices de abertura nominal de 50, 20 y 5 mm., tejidos de alambre y abertura cuadrada.
 - Herramientas y accesorios. Pala, paila o bandeja metálica de mezclado, cuchara, llana y espátula.
- Procedimiento. El total de la muestra recibida desde terreno, se seca al aire o en horno a una temperatura inferior a 60° C, hasta que se vuelva desmenuzable, disgregando los terrones evitando reducir el tamaño natural de las partículas.

Una vez establecido el nivel de energía (Proctor Normal o Proctor Modificado) y dependiendo de la composición granulométrica del suelo,

se establece el método a realizar de acuerdo a lo indicado en la tabla de la figura 2.2.

	Características	Proctor normal	Proctor modificado
	Masa del pisón	2,5 Kgs. (5,5 Lb.)	4,5 Kgs. (10 Lb.)
Método	Altura de caída pisón	305 mm. (12")	460 mm. (18")
	Material	Bajo 5 mm. (N° 4)	Bajo 5 mm. (N° 4)
A	Molde	100 mm. (4")	100 mm. (4")
	N° de capas	3	5
	N° de golpes por capa	25	25
	Material	Bajo 5 mm. (N° 4)	Bajo 5 mm. (N° 4)
B	Molde	150 mm. (6")	150 mm. (6")
	N° de capas	3	5
	N° de golpes por capa	56	56
	Material	Bajo 20 mm. (3/4")	Bajo 20 mm. (3/4")
C	Molde	100 mm. (4")	100 mm. (4")
	N° de capas	3	5
	N° de golpes por capa	25	25
	Material	Bajo 20 mm. (3/4")	Bajo 20 mm. (3/4")
D	Molde	150 mm. (6")	150 mm. (6")
	N° de capas	3	5
	N° de golpes por capa	56	56

Figura 2.2. Tabla de características de los ensayos Proctor.
Fuente: Geotecnia LNV., 1993.

Posteriormente tamizar la muestra por el tamiz de 5 mm. (malla N° 4 ASTM) para los métodos A y B y por el tamiz de 20 mm. (3/4" ASTM) para los métodos C y D. El material retenido debe descartarse. El tamaño de la muestra recomendada a ensayar para cada método, se indica en la tabla 2.3.

En el método D es conveniente mantener el porcentaje de material grueso del material original (que pasa por el tamiz de 50 mm. y queda retenido en 5 mm.), para esto se debe efectuar un reemplazo, donde se determina por tamizado el porcentaje de material que pasa por el tamiz de 50 mm. y queda retenido en el tamiz de 20 mm.

Luego, se reemplaza el material por una masa igual que pasa por el tamiz de 20 mm. y queda retenido en el tamiz de 5 mm., tomada de la porción de muestra no utilizada de suelo original.

Diámetro del molde (mm.)	Método	Masa mínima (grs.)	Masa aproximada de cada fracción (grs.)
100	A y C	15000	3000
150	B y D	30000	6000

Figura 2.3. Tabla de tamaño recomendado de la muestra a ensayar.
Fuente: NCh 1534 Of. 1979.

La muestra debe acondicionarse mezclando cada una de las 5 fracciones por separado, con una cantidad de agua suficiente, de manera que cada una de ellas tenga una humedad diferente que varíe en aproximadamente dos puntos porcentuales entre sí y se distribuyan alrededor de la humedad óptima, dejando curar la muestra de modo de obtener una distribución homogénea de humedad, ya que para suelos de alta plasticidad, el plazo mínimo es de 24 horas, en cambio para suelos de plasticidad media bastará con 3 horas y en los suelos de plasticidad nula bastarán sólo 30 minutos de curado. Luego, el molde debe pesarse sin collarín (Mm), aproximando a 1 gr.

La capacidad volumétrica del molde se determina llenando el molde con agua (esta no debe contener burbujas), el que deberá encontrarse sobre una base plana. Se registra la masa del agua y con la temperatura de ésta, se determina la densidad del agua de acuerdo a la tabla de la figura 2.4.

Elegido el molde, se le coloca el collarín y se deja el conjunto sobre una base plana y firme, llenándolo con una de las fracciones de la muestra, mediante la colocación de capas de 1/3 de la altura para Proctor normal o 1/5 para Proctor modificado. Se compacta la capa con 25 golpes de pisón uniformemente distribuidos en el molde de 100 mm. (métodos A y C), y 56 golpes en el molde de 150 mm. (métodos B y D).

Temperatura ° C	Densidad kgs/m ³ (gr/lt)
16	999,09
18	998,59
20	998,20
23	997,54
26	996,78
29	995,94

Figura 2.4. Tabla de densidad del agua según su temperatura.

Fuente: Nch 1534 Of. 1979.

Se repite esta operación 2 o 4 veces según el ensayo, escarificando ligeramente las superficies recién compactadas antes de agregar una nueva capa (figuras 2.5. y 2.6.). La última debe quedar con un exceso de material por sobre el borde del molde.

Concluida la compactación, se retira el collarín y se enrasa el molde con la regla metálica. Los agujeros superficiales que se produzcan como resultado de la remoción de las partículas gruesas, deben retaparse con el mismo tipo de material, pero más fino.

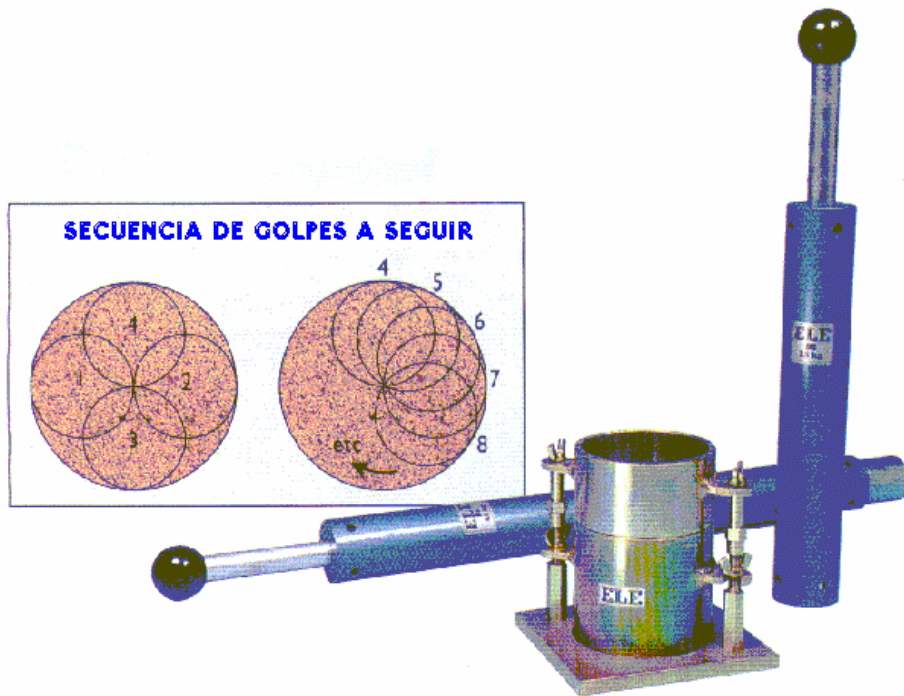


Figura 2.5. Forma de ejecutar la compactación y equipo necesario.
Fuente: ELE Internacional Ltda., 1993.



Figura 2.6.
compactar.
Fuente: ELE
1993.

Procediendo a
Internacional Ltda.,

Una vez que se haya pesado el molde con el suelo compactado (M_h), se retira el total de la muestra del molde y se extraen 2 muestras representativas para determinar el contenido de humedad (w).

Se repiten las operaciones anteriores con cada una de las fracciones restantes hasta que haya un decrecimiento en la densidad húmeda del suelo, realizando un mínimo de 5 determinaciones. El ensayo debe efectuarse desde la condición más seca a la más húmeda.

- Cálculos y gráficos.

- Calcular el volumen del molde, mediante la siguiente expresión:

$$V = W_w / \gamma_w \quad (\text{grs/cc})$$

donde:

W_w = masa del agua (grs.)

γ_w = densidad del agua a la temperatura requerida según lo indicado en la tabla de la figura 2.4.

- Calcular la densidad húmeda (γ_{hum}) del suelo compactado, mediante la siguiente expresión:

$$\gamma_{hum} = (M_h - M_m) / V \quad (\text{grs/cc})$$

donde:

M_m = peso del molde (grs.)

M_h = peso del molde más el suelo húmedo compactado (grs.)

- Calcular la densidad seca (γ_d) del suelo compactado para cada una de las determinaciones, mediante la siguiente expresión, aproximando a 10 grs/cm^3 :

$$\gamma_d = \gamma_{hum} / (1 + w / 100) \quad (\text{grs/cc})$$

donde:

w = humedad del suelo compactado (%)

- Construir un gráfico (figura 2.7.) con la densidad seca del suelo compactado (como ordenada) contra la humedad (como abscisa), como se describe a continuación:

- en el gráfico se marcan los puntos correspondientes a cada determinación y se traza una curva del tipo parabólica por ellos,
- el punto máximo o peak de la curva corresponde a la DMCS y su proyección en la abscisa a la humedad óptima (w_{opt})

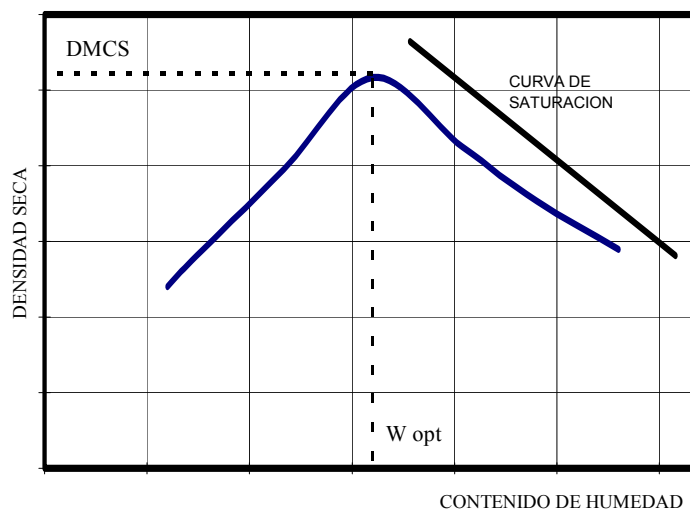


Figura 2.7.
Curva típica de ensayo Proctor.
Fuente: Bowles J., 1982.

- Incluir en el gráfico la curva paramétrica correspondiente al 100% de saturación para la densidad de las partículas sólidas del suelo ensayado (G_s).

- Calcular la energía de compactación (E_c) del ensayo, mediante la siguiente expresión:

$$E_c = (N * n * W * h) / V \quad (\text{kgf*cm/cc})$$

donde:

- N = número de golpes del pisón compactador por capa
- n = número de capas que se disponen hasta llenar el molde
- W = peso del pisón compactador (kgs.)
- h = altura de caída del pisón compactador (cm.)
- V = volumen del molde de compactación (cc.)

2.1.2. Método de compactación de suelos con tamaño de partículas superiores a 3/4" propuesto por el IDIEM. Cuando los suelos poseen porcentajes altos de partículas gruesas, los ensayos tradicionales no son representativos para poder obtener una relación humedad-densidad de carácter confiable, por ello se ha creado un procedimiento que permite determinar la relación humedad-densidad en suelos que posean una composición granulométrica con un tamaño máximo de 80 mm. en el cual menos del 80% de las partículas pasan por la malla N° 4 ASTM (5 mm.).

La energía de compactación utilizada es de 9,04 kg*cm/cm³, la cual se puede calcular utilizando la fórmula dada en el ensayo Proctor.

- Equipo necesario.

- Molde de compactación cilíndrico metálico de diámetro interior de 30,22 cm., altura de 28,11 cm. y una capacidad volumétrica de 20162 cm³, provisto de un collarín de igual diámetro y un plato base metálico removible.
- Pisón metálico de diámetro 100 mm. y peso de 15000 grs., con guía tubular que permita una altura de caída de 45 cm.
- Equipo de izar, consistente en un trípode articulado metálico con una roldana de 100 mm. de diámetro con soga 1/2".
- Dos balanzas, con capacidad mínima de 50 kgs. y de 5 kgs.
- Horno de secado con circulación de aire y temperatura regulable capaz de mantenerse en 110° ± 5° C.
- Regla enrasadora de 50 cm. de largo.
- Batea metálica de 90 lt. o carretilla.
- Herramientas y accesorios. Poruña, pala, espátula, pipeta graduada, martillo, cincel, escobilla, recipientes metálicos, llana y tamiz de 3" ASTM (80 mm.).

- Procedimiento. Si la muestra se encuentra húmeda, deberá secarse al aire o al horno a una temperatura inferior a 60° C, hasta que se vuelva desmenuzable, disgregando los terrones o granos evitando reducir el tamaño natural de las partículas. Por diferencia de pesadas, se determina el contenido de humedad natural y el material homogenizado, se separa en 5 fracciones, con un peso mínimo de 47 kgs. cada una.

Cada fracción de suelo se mezcla con una cantidad de agua diferente y suficiente para distribuir las humedades alrededor de la óptima, las variaciones deben ser de 1,5 a 2% por sobre y bajo la humedad óptima. Si es necesario, debe curarse cada una de las fracciones durante un período de tiempo suficiente para lograr una distribución homogénea de la humedad.

Se pesa el molde (Mm) y se coloca este con el plato base y el collarín sobre una superficie firme, plana y horizontal bajo el plomo del centro del trípode, el que debe poseer una roldana con soga amarrada al aro del pisón.

Se llena el molde con material hasta un 1/3 de su altura y se compacta la capa de suelo con 90 golpes de pisón, distribuidos uniformemente. Se repite el procedimiento para las capas restantes, escarificando la capa recién compactada y dejando la última con un exceso por sobre el borde del molde. Se saca el collarín y se enrasa el suelo, las concavidades se rellenan con material proveniente de la misma muestra pero de fracción más fina y se pesa el molde con el suelo compactado (Mh). Una vez que se extrae el total de la muestra del molde, se toman dos muestras representativas mínimo 5 kgs. cada una, para determinar el contenido de humedad de la muestra compactada. Se repiten las operaciones de compactación con las fracciones de suelo restantes, con un mínimo de 5 determinaciones, desde la condición más seca a la más húmeda. Cálculos idénticos a los de Proctor.

2.1.3. Método de compactación Harvard miniatura. Cuando se usan rodillos pata de cabra o neumáticos, la carga se pone en contacto con el suelo prácticamente sin impacto, la rotación del rodillo o neumático produce una acción de amasado, a medida que el rodillo se adapta a la superficie del suelo. Tomando en cuenta esta consideración, aparecieron métodos de laboratorio que fueran capaces de reproducir mejor las condiciones de terreno, siendo el equipo de laboratorio más popular el aparato Harvard miniatura (Wilson, 1950) el cual actúa mediante amasado a diferencia del ensayo de Proctor que produce la compactación mediante impacto (figura 2.8.).

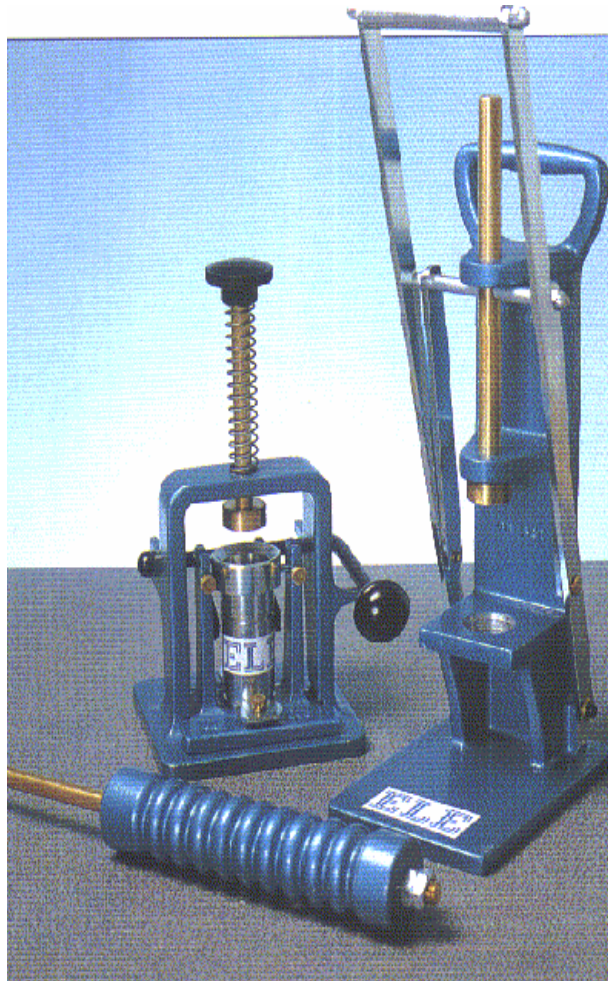


Figura 2.8. Equipo Harvard.
Fuente: ELE Ltda., 1993.

de compactación
Internacional

Las características del equipo usado (molde), serán de $1 \frac{5}{16}$ " de diámetro, 2,816" de altura y volumen de $62,4 \text{ cm}^3$. Existen otras dimensiones, cuyas probetas pueden ser usadas en ensayos triaxiales en cámaras de 1,5". Estas dimensiones serán de 1,5" de diámetro, 3" de altura y volumen de $86,9 \text{ cm}^3$ (figura 2.9.).

El pisón empleado tiene $\frac{1}{2}$ " de diámetro en el extremo y posee un mango ranurado que encierra un resorte precomprimido en su interior, el cual puede ajustarse con una tuerca situada en la parte posterior para producir la energía de compactación deseada.

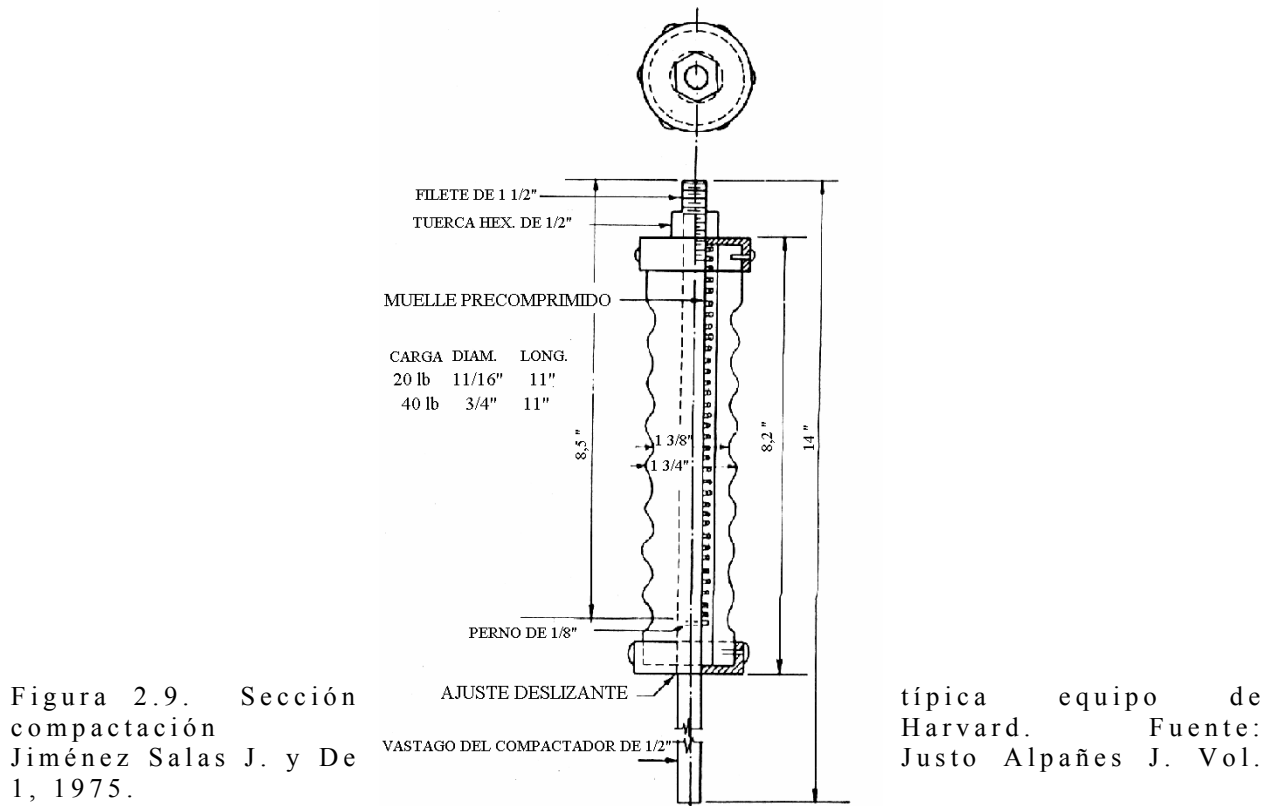


Figura 2.9. Sección compactación Jiménez Salas J. y De 1, 1975.

El aparato de Harvard no se ha normalizado aún, lo que puede hacerse adoptando un número determinado de golpes y de capas, en un molde de dimensiones adecuadas con la energía de compactación correspondiente. En la tabla de la figura 2.10. se indican los rangos usados generalmente para la compactación.

Grado de precompresión del resorte en el pisón	10 - 60 Lb
Número de golpes por capa	15 - 60
Número de capas	3 - 30

Figura 2.10. Tabla de rangos de compactación. Fuente: Jiménez Salas J. y De Justo Alpañes J., Vol. 1 1975.

- Procedimiento. El suelo a emplear debe pasar por el tamiz N° 10 ASTM (2,0 mm.), preparando por lo menos 6 fracciones de este suelo con un peso mínimo de 150 grs. cada una.

Se determina el peso del molde sin placa base y se ajusta el resorte con la tuerca para obtener la energía deseada que se va a dar con el pisón. Se introduce el suelo con la fuerza necesaria para vencer el resorte haciendo que se comprima ligeramente, a continuación se saca y se cambia a un nuevo punto. Se repite la operación el número de veces que se ha definido previamente distribuyendo los golpes uniformemente en cada capa.

La última capa debe sobrepasar el extremo del molde alcanzando una altura de 1/8" a 1/4" en el collar ajustable, el cual se retira una vez terminada la compactación, también se retira la placa base y se enrasan las dos caras del suelo. Aquí se registra el peso del molde más el suelo para finalmente sacar muestras para determinar la humedad del suelo una vez retirado del molde.

- Cálculos. Los cálculos para este ensayo son similares al ensayo de compactación Proctor, es decir, se debe calcular la densidad húmeda y con la humedad que posee el suelo es posible determinar su densidad seca. Al realizar varias determinaciones es posible obtener la curva de

compactación en la cual es recomendable incluir la curva de saturación máxima con el dato de la gravedad específica del suelo ensayado.

También es posible calcular la energía específica de compactación de acuerdo a la fórmula descrita en el ensayo de compactación Proctor.

- Observaciones.

- El uso de este aparato es ventajoso en suelos que no contengan grumos ya que el tiempo y el trabajo necesario para obtener una curva de compactación son muy inferiores al ensayo Proctor y nos entrega resultados satisfactorios.
- Pueden producirse errores en la determinación de la DMCS debido a la existencia de grumos en el suelo o a una mezcla incompleta de suelo-agua que provoca una mala distribución de la humedad.
- Las capas establecidas deben tener un espesor similar y los golpes dados por el pisón deben distribuirse uniformemente.
- No es conveniente usar el mismo suelo para determinaciones sucesivas, cada uno de los puntos que se determine debe realizarse con una fracción de suelo distinta.

UNIVERSIDAD CATOLICA DE VALPARAISO
 ESCUELA DE INGENIERIA EN CONSTRUCCION
 LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

RELACIONES HUMEDAD-DENSIDAD (PROCTOR)

Proyecto :
 Ubicación :
 Descripción del suelo :
 Tipo de ensayo : Estándar - Modificado
 Fecha de muestreo :
 Fecha de ensayo :

Características de la compactación	
Diámetro del molde (cm) : Altura del molde (cm) : Volumen del molde (cm ³) : Peso del pisón (kgs) : Altura de caída pisón (cm) :	Número de capas : Número de golpes por capa : Gravedad específica de la muestra :

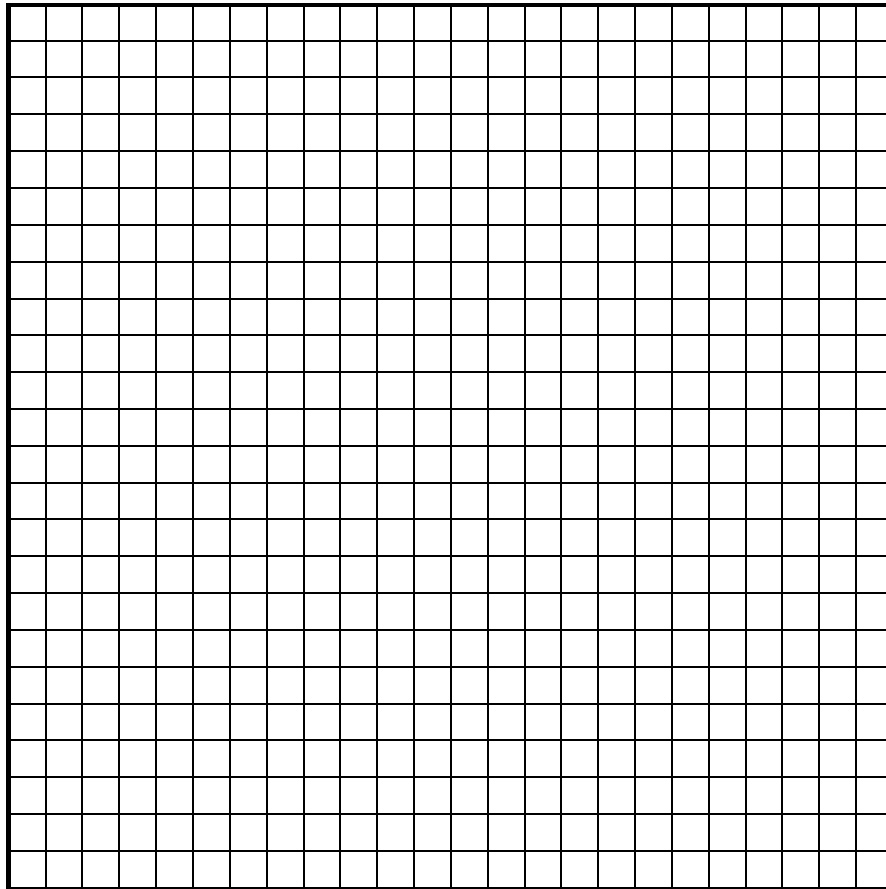
Acondicionamiento de la muestra					
Muestra N°	1	2	3	4	5
Peso					
Humedad inicial					
Humedad deseada					
Volumen de agua a agregar (cc)					

Determinación de la humedad										
Muestra N°	1a	1b	2a	2b	3a	3b	4a	4b	5a	5b
Peso recipiente + suelo húmedo										
Peso recipiente + suelo seco										
Peso recipiente										
Peso suelo seco										
Peso agua										
Contenido de humedad (%)										
Humedad promedio (%)										

Determinación de la densidad					
Muestra N°	1	2	3	4	5
Peso molde + suelo húmedo					
Peso molde					
Peso suelo húmedo					
Volumen del molde					
Densidad húmeda (grs / cm ³)					
Densidad seca (grs / cm ³)					

Gráfico relación humedad - densidad

Densidad seca
(grs / cm³)



Contenido de humedad (%)

Contenido de humedad óptimo = (%)
Densidad máxima compactada seca = (grs / cm³)

Observaciones :