

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	 <small>Sistema Integrado de Gestión</small>
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

GUÍA DE LABORATORIO PARA ENSAYO PESO UNITARIO SECO EN LOS SUELOS (ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN)

CONTENIDO

1.	RESUMEN.....	3
2.	MARCO TEÓRICO.....	3
3.	OBJETIVO.....	5
4.	PRECAUCIONES.....	5
5.	MÉTODOS	5
6.	EQUIPO.....	6
7.	MUESTRA DE ENSAYO.....	11
8.	PROCEDIMIENTO	11
8.1.	Preparación	11
8.1.1.	Preparación por vía húmeda:	11
8.1.2.	Preparación por vía seca:	12
8.2.	Compactación:.....	13
9.	CALCULOS	16
9.1.	Porcentaje de las fracciones:	16
9.1.1.	Masa seca de la fracción de ensayo (MsFE):.....	16
9.1.2.	Porcentaje de la fracción gruesa (P _{FG}):.....	16
9.1.3.	Porcentaje de la fracción de ensayo (P _{FE}):	17
9.2.	Humedades, densidades y pesos unitarios de las sub-muestras:.....	17
9.2.1.	Humedad de moldeo de cada probeta:	17
9.2.2.	Densidad húmeda de cada sub-muestra (ρ_H):	17
9.2.3.	Densidad seca de cada sub-muestra (ρ_d):.....	17
9.2.4.	Peso unitario seco de cada sub-muestra (γ_d):	18
9.3.	Curva de compactación:.....	18
9.4.	Curva de saturación:	19
10.	RECOMENDACIONES	20
11.	REFERENCIAS	20

IMÁGENES, ILUSTRACIONES Y TABLAS

Imagen 1. Molde de 101.6 mm (4"). Fuente: Propia.	7
Imagen 2. Molde de 152.4 mm (6"). Fuente: Propia.	7
Imagen 3. Martillo de operación manual. Fuente: Propia.	8

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	 <small>Sistema Integrado de Gestión</small>
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

Imagen 4. Martillo de operación mecánica. Fuente: Propia.....	8
Imagen 5. Extractor de muestras vertical. Fuente: Pinzuar.	9
Imagen 6. Balanzas de 11.6 kg (Derecha) y 1.0 kg (Izquierda). Fuente: Propia.....	9
Imagen 7. Horno para secado de muestras. Fuente: Propia.	10
Imagen 8. Regla metálica. Fuente: Leroy Merlin.	10
Imagen 9. Tamices. Fuente: Estudios Geotécnicos.....	10

Ilustración 1. Patrón de impactos para la compactación en el molde de 101.6 mm (4"). Fuente: INV 142-3.	14
Ilustración 2. Patrón de impactos para la compactación en el molde de 152.4 mm (6"). Fuente: INV 142-13.	15
Ilustración 3. Ejemplo de la curva de compactación. Fuente: INV 142-13	19

Tabla 1. Métodos para realizar el ensayo modificado de compactación. Fuente: INV 142-13. ...	6
Tabla 2. Tiempo requerido de curado para las sub-muestras húmedas. Fuente: INV 142 – 13.12	

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	 <small>Sistema Integrado de Gestión</small>
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

1. RESUMEN

Esta guía resume el procedimiento para realizar el ensayo modificado de compactación también llamado Proctor modificado, el cual sirve para determinar el porcentaje de compactación y la humedad óptima para que el suelo alcance dicha densidad y se obtenga el comportamiento requerido en términos de: resistencia al corte, compresibilidad y/o permeabilidad. Este ensayo solo aplica para suelos con 30% o menos de su masa con tamaño mayor a 19.0 mm y que no hayan sido compactados previamente y se puede aplicar mediante tres alternativas que dependen de la masa del material retenida en determinados tamices. Como resultado de este ensayo se obtiene una curva de compactación con un peso unitario seco máximo bien definido, cuando se ensayan suelos que no presentan drenaje libre.

2. MARCO TEÓRICO

Los suelos y mezclas de suelo-agregado usados como relleno en obras de ingeniería se compactan a cierto nivel, con el fin de lograr un comportamiento satisfactorio, además los suelos de fundación generalmente se compactan para mejorar sus propiedades ingenieriles; para lograr dicho comportamiento se realizan ensayos de compactación en el laboratorio los cuales suministran el porcentaje de compactación y la humedad de moldeo necesaria para cumplir las especificaciones técnicas y mecánicas que permitan cumplir con el comportamiento requerido.

Sin embargo, la obtención del máximo peso unitario seco resulta difícil en dos casos: en suelos que contienen partículas que se degradan durante la compactación y en suelos que contienen bastantes partículas grandes y pocas pequeñas. En el primer caso se observa que la degradación en el laboratorio es mayor que en el terreno derivando en que el peso unitario de laboratorio no será representativo de las condiciones de campo resultando imposible alcanzar en el terreno el máximo peso unitario seco; y en el segundo caso se presenta que al momento de compactar el material este contendrá más vacíos de lo usual afectando así la obtención de los pesos unitarios secos.

Se debe tener en cuenta que el peso máximo seco bien definido se hallará cuando se ensayan suelos que no presentan drenaje libre, en caso de presentarlo el peso unitario máximo no se podrá definir con precisión.

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	 <small>Sistema Integrado de Gestión</small>
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

Generalmente este ensayo es implementado para la construcción de carreteras ya que estas suelen exigir un grado de compactación del suelo en el terreno, expresado como un porcentaje del peso unitario seco máximo obtenido en este ensayo. Si llega a obtenerse un porcentaje muy bajo posiblemente será más conveniente especificarlo en relación con el peso unitario seco máximo obtenido en el ensayo normal de compactación. Este ensayo permite a un suelo compactado tener mayor peso unitario seco con menor humedad óptima, mayor resistencia al corte, mayor rigidez, menor permeabilidad y menor compresibilidad que el ensayo normal de compactación.

Para comprender aún más este ensayo se deben de tener en cuenta los siguientes términos:

Humedad de moldeo – Contenido de agua con el cual se prepara una muestra para someterla a compactación.

Energía del ensayo normal de compactación – 2700 kN·m/m³ (56000 lbf· pie/pie³), aplicada con el equipo y procedimiento descritos en la norma INVIAZ INV-E-142-13.

Peso unitario seco máximo del ensayo modificado de compactación (γ_d máx) – El máximo valor definido en la curva de compactación obtenida como resultado del ensayo realizado con la energía indicada en la definición anterior.

Humedad óptima del ensayo modificado de compactación (w_{opt}) – La humedad de moldeo con la cual el suelo alcanza el peso unitario seco máximo usando la energía normalizada.

Sobretamaños (fracción gruesa) (P_{FG}) – Porción de la muestra total que no se utiliza en la prueba de compactación. Es la retenida en el tamiz de 4.75 mm (No. 4) cuando se utiliza el Método A; la retenida en el tamiz de 9.5 mm (3/8") cuando se emplea el Método B, o la retenida en el tamiz de 19.0 mm (¾") cuando se emplea el Método C.

Fracción de ensayo (fracción fina) (P_{FE}) – Es la porción de la muestra total que se emplea en el ensayo de compactación. Corresponde al material que pasa el tamiz de 4.75 mm (No. 4) cuando se utiliza el Método A; al pasante por el tamiz de 9.5 mm (3/8") cuando se emplea el Método B, o al pasante por el tamiz de 19.0 mm (¾") cuando se emplea el Método C.

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	 <small>Sistema Integrado de Gestión</small>
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

3. OBJETIVO

- 3.1.** Determinar la relación entre la humedad y el peso unitario seco de los suelos.
- 3.2.** Generar a partir de las humedades y los pesos unitarios secos obtenidos una curva de compactación para determinar del vértice de dicha curva el peso unitario seco máximo y la humedad para obtener dicho peso.

4. PRECAUCIONES

- 4.1.** Al momento de realizar la compactación con el martillo en el molde se debe mantener una energía de compactación constante y distribuida permitiendo así una compactación óptima.
- 4.2.** No se pueden utilizar muestras de suelo previamente compactadas en el laboratorio. Ello daría como resultado valores mayores de peso unitario seco máximo.

5. MÉTODOS

El método por utilizar deberá ser el indicado en la especificación para el material por ensayar, si la especificación no indica un método, la elección se deberá realizar en función de la granulometría del material:

MÉTODO	A	B	C
DIAMETRO DEL MOLDE	101,6 mm (4")	101,6 mm (4")	152,4 mm (6")
MATERIAL	Pasa tamiz de 4,45 mm (# 4)	Pasa tamiz de 9,5 mm (3/8")	Pasa tamiz de 19,0 mm (3/4")
CAPAS	5	5	5
GOLPES/CAPA	25	25	56

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	 <small>Sistema Integrado de Gestión</small>
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

METODO	A	B	C
USO	<p>Si 25% o menos de la masa del material queda retenida en el tamiz de 4,75 mm (# 4). Sin embargo, si en este tamiz queda retenida entre el 5 y 25% de la masa, se puede utilizar el método A, pero se requerirá la corrección por Sobretamaños y en este caso, el uso del método A no tendrá ninguna ventaja.</p>	<p>Si 25% o menos de la masa del material queda retenida en el tamiz de 9,5 mm (3/8"). Sin embargo, si en este tamiz queda retenida entre el 5 y 25% de la masa, se puede utilizar el método B, pero se requerirá la corrección por Sobretamaños y en este caso la ventaja del uso del método B en lugar del método C, es que se necesita menos cantidad de muestra y el molde pequeño es fácil de usar.</p>	<p>Si 30% o menos de la masa del material queda retenida en el tamiz de 19,0 mm (3/4").</p>
OTRO USO	<p>Si no aplica por granulometría utilizar método B o C.</p>	<p>Si no aplica por granulometría utilizar método C.</p>	

Tabla 1. Métodos para realizar el ensayo modificado de compactación. Fuente: INV 142-13.

6. EQUIPO

Moldes: Deberán ser cilíndricos, de paredes sólidas, fabricados con metal. Además, deberán tener collares ajustables de aproximadamente 60.0 mm de altura. El molde junto con el collar deberá encajar firmemente en una placa de base hecha del mismo material, los tipos de molde son:

- Molde de 101.6 mm (4"): Con capacidad de $943 \pm 14 \text{ cm}^3$ con un diámetro interior de $101.6 \pm 0.4 \text{ mm}$ y una altura de $116.4 \pm 0.5 \text{ mm}$.

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	SIGUD <small>Sistema Integrado de Gestión</small>
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	



Imagen 1. Molde de 101.6 mm (4"). Fuente: Propia.

- Molde de 152.4 mm (6"): Con capacidad de $2124 \pm 25 \text{ cm}^3$ con un diámetro interior de $152.4 \pm 0.7 \text{ mm}$ y una altura de $116.4 \pm 0.5 \text{ mm}$.



Imagen 2. Molde de 152.4 mm (6"). Fuente: Propia.

Martillo metálico: Puede ser de operación manual o mecánica, con una masa de $2.495 \pm 0.023 \text{ Kg}$ ($5.5 \pm 0.02 \text{ lb}$) que tenga una cara plana circular de diámetro de $2.0 \pm 0.005"$. El martillo deberá estar provisto de una camisa guía apropiada para controlar la altura de la caída del golpe desde una altura libre de $12 \pm 0.05"$ por encima de la altura del suelo.

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	 <small>Sistema Integrado de Gestión</small>
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

Martillo de operación manual: Estará aprovisionado de una camisa guía apropiada la cual contará con al menos, 4 agujeros de ventilación en cada extremo (8 en total) espaciados aproximadamente a 90°.



Imagen 3. Martillo de operación manual. Fuente: Propia.

Martillo con cara circular de operación mecánica: Deberá operar proporcionando a la muestra un cubrimiento uniforme y completo con una luz libre de 2.5 ± 0.8 mm. Se puede usar con el molde de 152.4 mm (6") de diámetro. Su cara de compactación tiene la forma de un sector de un círculo de radio igual a 73.7 ± 0.5 mm. El martillo deberá operar con el vértice del sector circular posicionado en el centro de la muestra de ensayo.



Imagen 4. Martillo de operación mecánica. Fuente: Propia.

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS <hr/> Macroproceso: Gestión Académica <hr/> Proceso: Gestión de Docencia	Código: GD-PR-010-FR-008 <hr/> Versión: 02 <hr/> Fecha de Aprobación: 04/10/2017	 <small>Sistema Integrado de Gestión</small>
--	---	---	--

Extractor de muestras (opcional) – Un gato con marco u otro dispositivo adecuado para extraer las muestras compactadas de los moldes.



Imagen 5. Extractor de muestras vertical. Fuente: Pinzuar.

Balanzas – Una de 11.5 kg de capacidad y aproximación de lectura de 1 g, cuando se use para pesar moldes de 152.4 mm (6") con suelos húmedos compactados; cuando se emplee el molde de 101.6 mm (4") se puede usar una balanza de menor capacidad, si su aproximación de lectura es de 1 g. También, se requiere otra balanza de 1 kg de capacidad con legibilidad de 0.1 g para las determinaciones de humedad.



Imagen 6. Balanzas de 11.6 kg (Derecha) y 1.0 kg (Izquierda). Fuente: Propia.

Horno – Termostáticamente controlado, preferiblemente de tiro forzado, capaz de mantener una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ($230 + 9^{\circ}\text{F}$), para el secado de las muestras.

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	 <small>Sistema Integrado de Gestión</small>
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	



Imagen 7. Horno para secado de muestras. Fuente: Propia.

Regla metálica – De acero endurecido, de borde recto, al menos de 250 mm (10") de largo. El borde de corte y enrasado deberá ser biselado, si tiene más de 3 mm (1/8") de espesor. La regla no deberá ser tan flexible que cuando se enrase el suelo con el borde cortante, proporcione una superficie cóncava en la superficie de la muestra.



Imagen 8. Regla metálica. Fuente: Leroy Merlin.

Tamices – De 19.0, 9.5 y 4.75 mm (¾", 3/8" y No. 4).



Imagen 9. Tamices. Fuente: Propia.

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	 <small>Sistema Integrado de Gestión</small>
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

Herramientas misceláneas – Tales como cazuelas para mezclado, espátulas, etc., o un dispositivo mecánico adecuado para mezclar las muestras de suelo con diversas cantidades de agua.

Recipientes – Para determinar la humedad de las muestras, elaborados en metal u otro material adecuado, con cierres que ajusten herméticamente para evitar la pérdida de humedad durante el pesaje.

7. MUESTRA DE ENSAYO

La cantidad mínima de muestra para el ensayo empleando los métodos A o B es de unos 16 kg y para el método C de 29 kg. Si no se dispone de los datos de granulometría de la muestra se deben estimar las proporciones del material.

8. PROCEDIMIENTO

8.1. Preparación

8.1.1. Preparación por vía húmeda:

Se procesa la muestra sin secado previo en un tamiz # 4 o de 3/4 según el método utilizado, se registran las masas de los materiales pasante y retenido en ese tamiz (fracción de ensayo y fracción gruesa, respectivamente). Luego se seca y se determina la masa de la fracción gruesa, se deberá lavar si el 0.5 % de la masa total seca está adherida a la fracción gruesa y posteriormente se determina y registra su masa seca. Se determina y registra la humedad de la fracción del ensayo (fracción fina) además se determina la masa seca al horno de la misma. Con base a las anteriores masas secas descritas se determina el porcentaje de la fracción de sobretamaños P_{FG} y el porcentaje de la fracción de ensayo P^{FE} . Todo lo anterior se realiza si no se ha realizado el ensayo de granulometría.

De la fracción de ensayo se deben preparar 4 o 5 muestras con humedades que abarquen la humedad óptima estimada. Se prepara una submuestra con una humedad cercana a la que se cree que es óptima (en suelos cohesivos la humedad se dice que es óptima cuando se aprietan formando un terrón que no se separa cuando se deja de presionar pero que se rompe limpiamente en dos secciones cuando se dobla, en suelos sin cohesión el contenido óptimo es cercano a cero o al punto donde aflora agua a la superficie del terrón). Despues se eligen las humedades para las otras sub-muestras

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	 <small>Sistema Integrado de Gestión</small>
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

con variaciones de 2%, en donde dos de ellas son superiores a la óptima y las otras dos inferiores a ella, lo anterior para buscar que la curva de compactación esté definida correctamente. En algunos suelos la humedad optima es muy elevada o la curva de compactación demasiado plana para los anteriores suelos se deben preparar muestras con un incremento mayor de agua las cuales no deben exceder el 4%.

- La fracción de ensayo se mezcla completamente y se selecciona con una cuchara una porción representativa para constituir cada sub-muestra (Punto de compactación). Para los métodos A o B se selecciona por submuestra 2.3 kg y para el método C unos 5.9 kg.
- Para obtener las humedades de moldeo mencionadas anteriormente se añadirá agua atomizando durante el mezclado y/o removerá agua en donde se dejará que el suelo se seque a temperatura ambiente o con un aparato que no lleve la temperatura a más de 60 °C, se debe tener en cuenta que al mezclar el material en el secado permitirá que el agua se distribuya uniformemente.

En el momento en que cada sub-muestra tenga la humedad apropiada se coloca dentro de un recipiente con tapa en donde se someterá a un periodo de curado previo a la compactación de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 2. Tiempo requerido de curado para las sub-muestras húmedas. Fuente: INV 142 – 13.

CLASIFICACIÓN DEL SUELO	TIEMPO DE CURADO (h)
GW, GP, SW, SP	No requiere
SW, SP	3
Todos los demás suelos	16

8.1.2. Preparación por vía seca:

Si al momento de desmenuzar la muestra esta se encuentra muy húmeda, se debe reducir el contenido de agua secándola al aire hasta que se vuelva desmenuzable, también se puede secar con un aparato que no lleve la temperatura a más de 60 °C.

Se desintegrarán totalmente las agregaciones, sin romper las partículas individuales, luego se procesa el material sobre el tamiz apropiado de acuerdo al método de ensayo elegido.

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	 <small>Sistema Integrado de Gestión</small>
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

Cuando se prepare material que pasa por el tamiz 19.0 mm ($\frac{3}{4}$ ") para compactarlo en el molde de 6", las agregaciones se deben romper lo suficiente para que pasen el tamiz de 9.5 mm (3/8") con el fin de facilitar la distribución del agua durante el mezclado posterior. Para determinar el porcentaje de la fracción de sobretamaños P_{FG} y el porcentaje de la fracción de ensayo P_{FE} , se debe determinar el contenido de agua de la fracción de ensayo, así como todas las masas que se deben calcular de la misma forma que por la vía húmeda.

Al igual que por la vía húmeda se seleccionan y preparan al menos cuatro sub-muestras de la fracción de ensayo con la diferencia de que se debe usar un cuarteador mecánico o manual para obtener las submuestras donde generalmente siempre se requerirá añadir agua para preparar las submuestras para la compactación.

8.2. Compactación:

Luego del período de curado, si éste se requiere, cada submuestra (punto de compactación) se debe compactar como se indica a continuación:

- Registrar la masa del molde o molde más la placa de base (de ser necesario).
- Ensamblar y asegurar el collar de extensión al molde y el conjunto a la placa de base, se debe verificar que el molde y collar estén alineados internamente y si no se debe ajustar. El conjunto anteriormente descrito se debe apoyar sobre una fundación firme y rígida.
- Es favorable durante la compactación y no de estricto cumplimiento, determinar la humedad de cada submuestra lo que permitirá verificar la humedad de moldeo determinada previamente para cada punto de compactación. Si se decide hacer será necesario que la submuestra tenga una masa mayor a la citada con anterioridad.
- El suelo se debe compactar en cinco capas, procurando que tengan el mismo espesor. Antes de la compactación se coloca aproximadamente una quinta parte de la submuestra en estado suelto dentro del molde y se reparte uniformemente y oprimiendo con un martillo de operación manual o un cilindro de (2") de diámetro para que la superficie no presente un estado esponjoso o suelto.
- Al haber compactado las cuatro primeras capas, cualquier porción de suelo que no haya sido compactada debe ser cortada con un cuchillo u otro elemento adecuado. El suelo cortado será descartado y el total de suelo usado deberá ser

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	 <small>Sistema Integrado de Gestión</small>
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

tal que la tercera capa compactada sobrepase el borde del molde, quedando en dentro del collar de extensión, pero con una longitud que no exceda los 6.0 mm si es excedido descartará el punto de compactación. Para descartar el punto de compactación se debe tener en cuenta que al dar el último golpe del martillo en la tercera capa se obtendrá que el fondo del martillo llega más abajo del borde superior del molde de compactación, a menos de que el suelo sea suficientemente manejable, de manera que esta superficie pueda ser forzada más arriba del borde del molde de compactación durante el enrasado.

- Cada capa se compacta con 25 golpes en el molde de 101.6 mm (4"), cuando se utiliza el molde de 152.4 mm (6") serán 56 golpes por capa. Al realizar pruebas de referencia se deberá utilizar el martillo de operación manual.
- Al utilizar el martillo manual se debe evitar levantar la camisa guía durante la carrera ascendente del martillo, esta se debe mantener verticalmente con firmeza y los golpes se deben aplicar a una velocidad uniforme de 25 por minuto cubriendo toda la superficie de la capa.
- Cuando se use el molde de 101.6 mm (4") el martillo de operación manual se deberá seguir el patrón de impactos a y b, mostrados en la Ilustración 1, si se utiliza el martillo mecánico solo aplicará el patrón (a), empleando el martillo de cara circular:

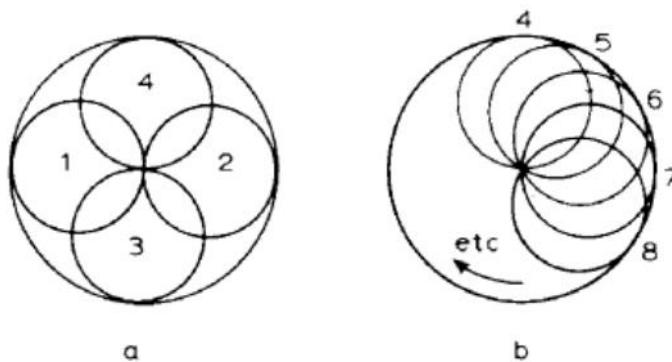


Ilustración 1. Patrón de impactos para la compactación en el molde de 101.6 mm (4").
Fuente: INV 142-3.

- Cuando se use el molde de 152.4 mm (6") con el martillo manual, se deberá seguir el patrón mostrado en la Ilustración 2, hasta aplicar el noveno golpe y luego constantemente alrededor del molde como se muestra en la Ilustración 1, b y en el medio. Si se utiliza el martillo mecánico se deberá emplear que tiene

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	 <small>Sistema Integrado de Gestión</small>
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

cara de sector circular, empleando el patrón de la Ilustración 1(b); si la superficie compactada es muy irregular se debe cambiar el patrón por el de la Ilustración 1(a) o el de la Ilustración 2, invalidando probablemente el uso del martillo mecánico en esos puntos de compactación.

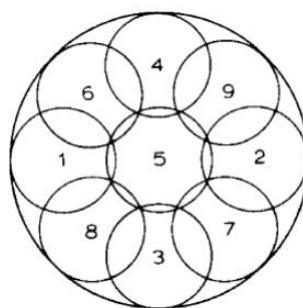


Ilustración 2. Patrón de impactos para la compactación en el molde de 152.4 mm (6").
Fuente: INV 142-13.

- Al momento de compactar muestras con humedad por encima de la óptima se pueden presentar desniveles que requieren que a juicio del laboratorista se defina la altura de la muestra y patrón de impactos con el martillo.
- Cuando se finaliza la compactación de la última capa se debe remover el collar y la base del molde, desbaratando el suelo que queda en el collar para poder zafarlo y para evitar la adherencia del suelo en el collar y la base estas deben ser retiradas rotando las mismas.
- Utilizando la regla metálica se enrasa el borde superior del molde y empleando un cuchillo se retira el exceso de suelo en la parte superior de la probeta. Se deberán llenar con suelo no usado o desbastado de la muestra con los dedos los orificios que queden en la superficie y se enrásará nuevamente las superficies. Se deben cortar o remover las partículas del tamaño de la grava reduciendo la alteración de la compactación y llenando como se sugirió anteriormente. Los procedimientos anteriormente descritos se repetirán las veces que sean necesarias en la parte inferior de la probeta. Es posible que al remover la placa de base en suelos muy secos o muy húmedos se pierda suelo o agua respectivamente por lo tanto se debe dejar la placa de base atornillada al molde, cuando se deje puesta se debe calibrar el volumen con ella puesta en lugar de utilizar una placa de vidrio o plástico.

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	 <small>Sistema Integrado de Gestión</small>
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

- Se registra la masa del molde con la probeta compactada. Cuando la placa de base se deja puesta con el molde se debe registrar su masa en conjunto.
- Se extrae la probeta compactada del molde y se obtiene una muestra de ella para determinar la humedad, sea tomando el total de la muestra (preferiblemente) la cual debe ser desmoronada o una porción de ella la cual será representativa de las tres capas y deberá estar regida por el método B de la norma INV E-122 así mismo el contenido de agua de moldeo.

Luego de haber compactado la última probeta se compararán los pesos unitarios húmedos de cada una para asegurar que haya datos a ambos lados de la humedad optima, los cuales permitirán la elaboración de la curva de compactación. Si al dibujar los puntos que representan el peso unitario húmedo de cada probeta con su respectiva humedad no presentan la tendencia esperada, será necesario compactar una o más probetas con otros contenidos de agua.

9. CALCULOS

9.1. Porcentaje de las fracciones:

Si no se disponen de los datos de granulometría de la muestra, la masa seca de la fracción de ensayo y las fracciones gruesa y de ensayo se determinan de la siguiente manera:

9.1.1. Masa seca de la fracción de ensayo (M_{SFE}):

$$M_{SFE} = \frac{M_{HFE}}{1 + \frac{W_{FE}}{100}}$$

Donde:

M_{HFE} = Masa húmeda de la fracción de ensayo.

W_{FE} = Humedad de la fracción de ensayo.

9.1.2. Porcentaje de la fracción gruesa (P_{FG}):

$$P_{FG} = \frac{M_{SFC}}{M_{SFC} + M_{SFE}}$$

Donde:

M_{SFC} = Masa seca de la fracción gruesa.

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	 <small>Sistema Integrado de Gestión</small>
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

9.1.3. Porcentaje de la fracción de ensayo (P_{FE}):

$$P_{FE} = 100 - P_{FG}$$

9.2. Humedades, densidades y pesos unitarios de las sub-muestras:

9.2.1. Humedad de moldeo de cada probeta:

Se calcula cada humedad de acuerdo con la norma INV E-122.

9.2.2. Densidad húmeda de cada sub-muestra (ρ_H):

$$\rho_H = K \times \frac{M_T - M_{MD}}{V}$$

Donde:

ρ_H = Densidad húmeda de la sub-muestra compactada (punto de compactación), con 4 dígitos significativos, g/cm³ o kg/m³.

M_T = Masa del suelo húmedo dentro del molde.

M_{MD} = Masa del molde de compactación.

V = Volumen del molde, cm³ o m³.

K = Constante de conversión que depende de las unidades de densidad y de volumen:

Usar 1 para g/cm³ y volumen en cm³.

Usar 1000 para g/cm³ y volumen en m³.

Usar 0.001 para kg/cm³ y volumen en m³.

Usar 1000 para kg/m³ y volumen en cm³.

9.2.3. Densidad seca de cada sub-muestra (ρ_d):

$$\rho_d = \frac{\rho_H}{1 + \frac{w}{100}}$$

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	 <small>Sistema Integrado de Gestión</small>
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

9.2.4. Peso unitario seco de cada sub-muestra (γ_d):

$$\gamma_d = K_1 \times \rho_d \left[\frac{kN}{m^3} \right]$$

$$\gamma_d = K_2 \times \rho_d \left[\frac{lb f}{pie^3} \right]$$

γ_d = Peso unitario seco.

K_1 = Constante de conversión (9.8066 para densidad en g/cm³; 0.0098066 para densidad en kg/m³).

K_2 = Constante de conversión (62.428 para densidad en g/cm³; 0.062428 para densidad en kg/m³).

9.3. Curva de compactación:

Con los valores de la humedad y de peso unitario de cada sub-muestra anteriormente calculadas, se dibuja la curva de compactación. El contenido de humedad que corresponda al vértice de la parábola se llamará “**humedad optima**” mientras que el peso unitario seco correspondiente al contenido óptimo de humedad se denomina “**peso unitario seco máximo**”. Si se llegó a remover más del 5% de la muestra de ensayo por causa de la existencia de fracción gruesa los valores de humedad optima y peso unitario seco máximo se deberán corregir de acuerdo con la norma INV E-143.

Las escalas al dibujar la curva de compactación se deben escoger de manera que el cambio de humedad de moldeo o peso unitario seco por división sea constante entre dibujos. Se debe tener en cuenta que el cambio de peso unitario seco por división es el doble que el de humedad de moldeo. Por lo tanto, el cambio que haya en la forma de la curva será consecuencia del ensayo de un material diferente y no de la escala de dibujo. Es de anotar que se debe usar una escala 1:1 cuando la curva de compactación es relativamente plana como es el caso de los suelos muy plásticos o muy permeables.

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	 <small>Sistema Integrado de Gestión</small>
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

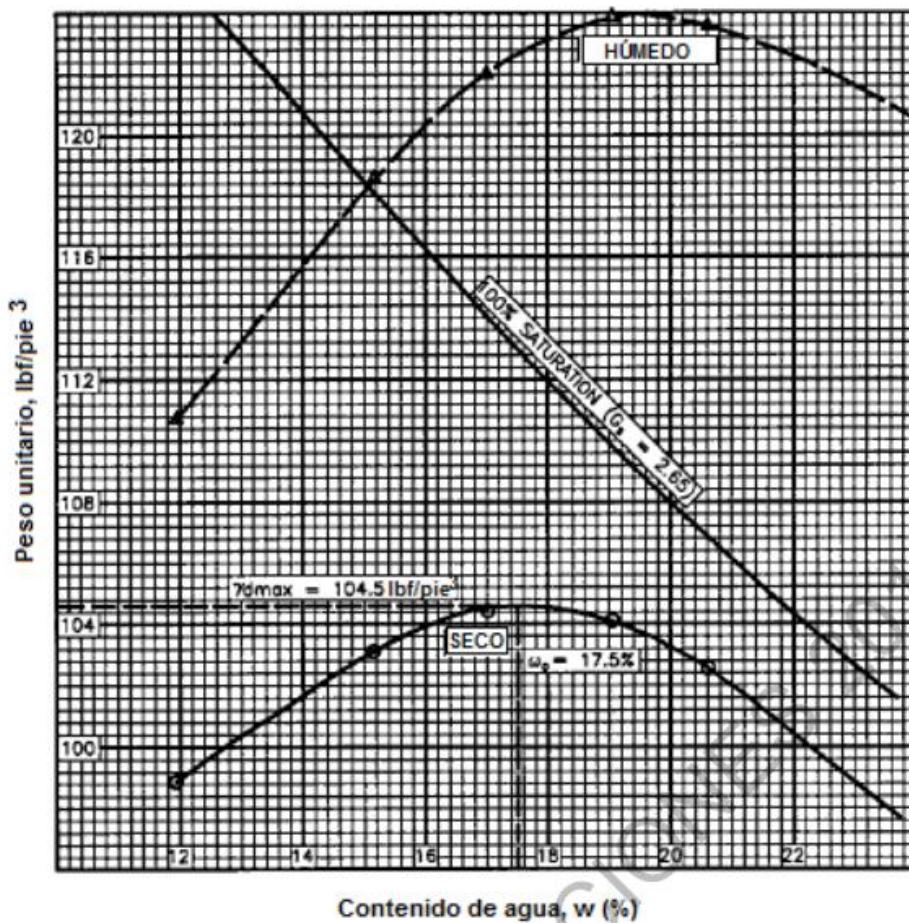


Ilustración 3. Ejemplo de la curva de compactación. Fuente: INV 142-13

En la parte donde la humedad de moldeo es mayor que la humedad optima la curva de compactación sigue la forma de la curva de saturación.

9.4. Curva de saturación:

Se dibuja la curva de saturación en donde el porcentaje de vacíos con aire es de cero y se hace a partir de la gravedad específica medida o estimada. Los puntos de la curva se consiguen eligiendo valores del peso unitario seco y calculando la respectiva humedad de saturación con la siguiente expresión:

$$w_{sat} = \frac{(\gamma_w)(G_s) - \gamma_d}{(\gamma_d)(G_s)} \times 100$$

γ_w = Peso unitario del agua a 20 °C (9.789 kN/m³ o 62.32 lbf/pie³).

γ_d = Peso unitario seco del suelo con tres dígitos significativos (kN/m³ o lbf/pie³).

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	 <small>Sistema Integrado de Gestión</small>
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

G_s = Gravedad específica del suelo.

Para suelos que contienen más de 10% de finos y que se molden con una humedad por encima de la óptima, la curva de compactación es más o menos paralela a la de saturación entre el 92 y el 95% de saturación. Teóricamente, la curva de compactación no puede cortar la de saturación, si lo hace hay un error en la gravedad específica, en las medidas, en los cálculos, en el dibujo o en el mismo ensayo.

10. RECOMENDACIONES

Verificar el estado de los elementos antes de utilizarlos, tener cuidado al momento de manipular los equipos y materiales y por último dejar los elementos utilizados en la práctica limpios y en completo orden.

11. REFERENCIAS

I.N.V. E -142 - 13