



Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA



CURSO DE GEOTECNIA I
(Código: 236161)

M. Sc. Carlos Medina
Departamento de Ingeniería Civil
Universidad de Sucre

[f](#) [g](#) [t](#)



Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA



TEORIA DE COMPACTACIÓN



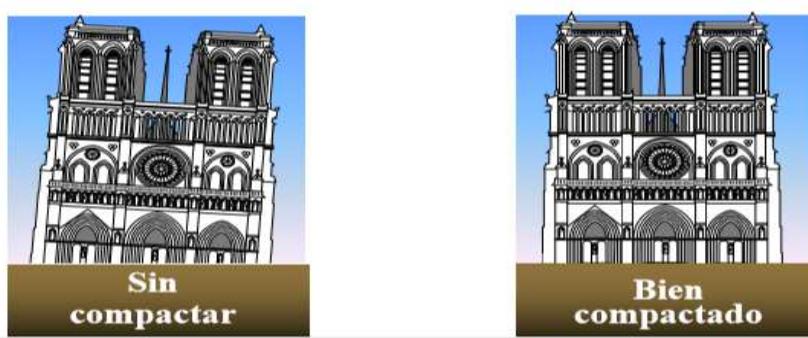
[f](#) [g](#) [t](#)

 Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA | 

COMPACTACIÓN DEL SUELO

La compactación es el procedimiento de aplicar energía al suelo suelto para eliminar espacios vacíos, aumentando así su densidad y en consecuencia , su capacidad de soporte y estabilidad entre otras propiedades.

Su objetivo es el mejoramiento de las propiedades de ingeniería del suelo.



Sin compactar

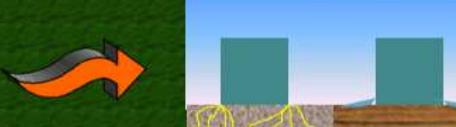
Bien compactado

 Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA | 

COMPACTACIÓN DEL SUELO

Ventajas de la compactación

La compactación permite el mejoramiento de las siguientes propiedades :

- Aumenta la capacidad de soporte del suelo. 
- Reduce los asentamientos del terreno. 
- Reduce la permeabilidad del suelo, el escurrimiento y la penetración del agua. El agua fluye y el drenaje puede regularse. 



TEORIA DE COMPACTACIÓN

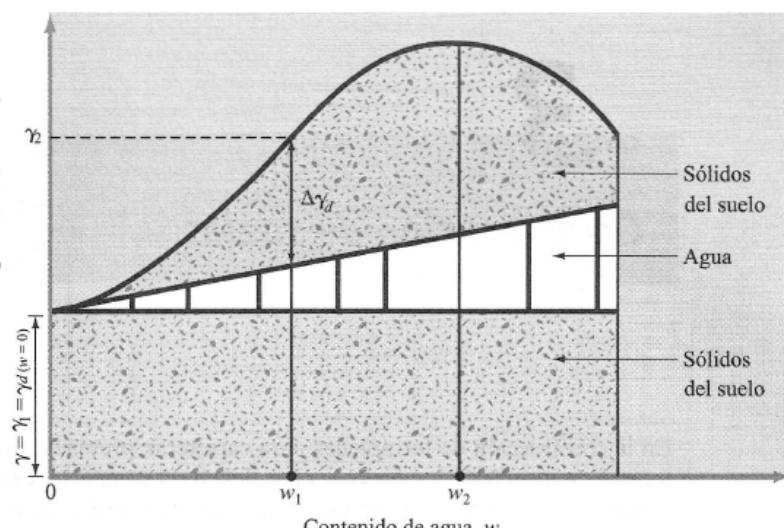
En la actualidad, la compactación es una manera bastante económica y efectiva para mejorar las propiedades de un suelo dado.

La compactación es cuantificada en términos del peso unitario seco del suelo (γ_d), la cual puede ser calculada en términos del peso unitario γ , y el contenido de humedad, w (expresada como un decimal), por la formula:

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+w}$$



Peso específico húmedo, γ



 Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA | 

TEORIA DE COMPACTACIÓN

En muchos casos, los suelos secos pueden estar mejor compactados (y alcanzar una mejor densidad) si para cada suelo es adicionada una cierta cantidad de agua .

De hecho, el agua actúa como un lubricante y permite que a las partículas de suelo ser mejor acomodadas.

Por tanto, para un esfuerzo de compactación dado, existe un particular contenido de humedad al cual el peso unitario seco es mayor para un estado compactado.

Este contenido de humedad es llamado el *contenido de humedad óptima*, y el peso unitario seco asociado es conocido como la *máximo peso unitario seco*.



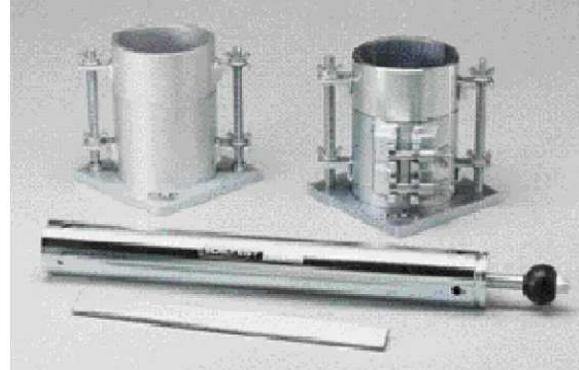
 Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA | 

TEORIA DE COMPACTACIÓN

Prueba Próctor



EQUIPO PROCTOR





Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA

**ACREDITACIÓN NACIONAL
MINISTERIO DE EDUCACIÓN
RESOLUCIÓN M.E. 001401-2012**

TEORÍA DE COMPACTACIÓN

Hammer:
5.5-lb Weight (for Standard Proctor Compaction)
10-lb Weight (for Modified Proctor Compaction)

Note:
1 in. = 25.4 mm
1 ft = 0.3048 m
1 lb = 4.448 N

Removable Collar
Proctor Cylinder (or Mold)
4 in. Diameter
4 1/2 in. Height (Approximately)
 $V_{in} f^3$ Volume (Unless Otherwise Specified)

CURVA DE COMPACTACIÓN

The graph shows a bell-shaped curve starting at a low water content (w) with a low dry unit weight (γ_d). It rises to a peak at the optimum water content (w_{opt}) and then falls. Two branches of the curve are labeled: "Rama Seca (baja humedad)" (dry branch) and "Rama Húmeda (mayor humedad)" (wet branch). A horizontal dashed line extends from the peak of the curve to the y-axis, labeled $(\gamma_{d máx})$.

Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA

**ACREDITACIÓN NACIONAL
MINISTERIO DE EDUCACIÓN
RESOLUCIÓN M.E. 001401-2012**

TEORÍA DE COMPACTACIÓN

En los proyectos de construcción son llevadas a cabo pruebas de compactación de laboratorio sobre muestras representativas de suelo del sitio de construcción para determinar el contenido de humedad optima del suelo y el máximo peso unitario seco.

El máximo peso unitario seco es usado por el diseñador para calcular la resistencia al corte de diseño, la resistencia futuros asentamientos y las características de permeabilidad.

Los suelos son luego compactados por métodos de compactación de campo hasta alcanzar un aceptable porcentaje de los valores obtenidos en el laboratorio.

Por último, son llevadas a cabo pruebas en el campo para determinar los valores de compactación obtenidos en el sitio de construcción.

 Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA | 

TEORIA DE COMPACTACIÓN

Pruebas de compactación en el laboratorio

Son llevadas a cabo para determinar el contenido de humedad óptimo de un suelo y el máximo peso unitario seco.

Consiste esencialmente en compactar una muestra de suelo húmedo en un molde cilíndrico de un volumen específico y con una energía de compactación especificada.

Se usan diferentes ensayos, tres de los cuales se basan en las normas británicas y dos en las normas de estados unidos.

Los cuatro primeros están basados en la compactación dinámica creada por el impacto de un martillo metálico de una masa específica que se deja caer libremente desde una altura determinada, el suelo se compacta en un número determinado de capas iguales, cada capa recibe un número específico de golpes.

 Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA | 

TEORIA DE COMPACTACIÓN

Ensayo	Referencia estándar	Martillo			
		Masa	Altura de caída	Volumen del molde	Capas
Método del martillo de 2.5 kg	BS 1377: 1975 Ensayo 12	2.5 kg	300 mm	1,000 cm ³	3
Método del martillo de 4.5 kg	BS 1377: 1975 Ensayo 13	4.5 kg	450 mm	1,000 cm ³	5
Proctor (estándar) AASHTO estándar	ASTM D-698-78 AASHTO T-99	2.49 kg (5.5 lbs)	305 mm (12 pulg)	944 cm ³ (1/30 pie ³)	3
Proctor modificado ASSHTO modificado	ASTM D-1557-78 AASHTO T-180	4.54 kg (10 lbs)	457 mm (18 pulg)	944 cm ³ (1/30 pie ³)	5
Método del martillo vibratorio	BS 1377: 1975 Ensayo 14	Se utiliza un molde CBR para compactar una muestra aproximadamente 2,360 cm ³ de volumen mediante el uso de un martillo vibratorio; el suelo se compacta en tres capas mediante 60 segundos, de vibración.			

 Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA | 

PRUEBAS PROCTOR

ESTÁNDAR	MODIFICADO
<ul style="list-style-type: none"> Tres capas Nº de golpes 25 a 56 golpes Peso del martillo 2,49 Kg (5,5 lbs) Altura de caída 30,48 cm (12 pulgs) 	<ul style="list-style-type: none"> Cinco capas Nº de golpes 25 a 56 golpes Peso del martillo 4,52 Kg (10 lbs) Altura de caída 45,72 cm (18 pulgs)



Tabla 5.2 Especificaciones de la prueba Proctor estándar (Basadas en la Norma ASTM 698)

Elemento	Método A	Método B	Método C
Diámetro del molde	101.6 mm	101.6 mm	152.4 mm
Volumen del molde	943.3 cm ³	943.3 cm ³	2124 cm ³
Peso del martillo	24.4 N	24.4 N	24.4 N
Altura de la caída del martillo	304.8 mm	304.8 mm	304.8 mm
Número de golpes de martillo	25	25	56
por capa de suelo			
Número de capas de compactación	3	3	3
Energía de compactación	591.3 kN·m/m ³	591.3 kN·m/m ³	591.3 kN·m/m ³
Suelo utilizado	Porción que pasa el tamiz núm. 4 (4.57 mm). Puede ser utilizada si 20% o menos del peso de material es retenido en el tamiz núm. 4	Porción que pasa el tamiz de 9.5 mm. Puede utilizarse si el suelo retenido en el tamiz núm. 4 es más de 20% y 20% o menos del peso es retenido en el tamiz de 9.5 mm	Porción que pasa el tamiz de 19 mm. Puede utilizarse si más de 20% del material es retenido en el tamiz de 9.5 mm y menos de 30% del peso es retenido en el tamiz de 19 mm

Proctor Estándar

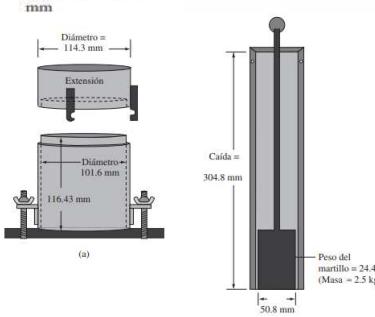


Figura 5.2 Esquema para la prueba Proctor estándar

EJEMPLO 1

Calcule la energía de compactación utilizada en el ensayo de Proctor estándar.

Solución:

$$\text{Energía de compactación} = \frac{W_{\text{martillo}} * \text{Altura de caída} * N^{\circ}_{\text{capas}} * N^{\circ}_{\text{golpes capa}}}{\text{Volumen molde}}$$

$$= \frac{2.49 \text{ kg} * (9.81 \text{ m/s}^2) * 0.3048 \text{ m} * 3 \text{ capas} * 25 \text{ golpes/capa}}{0.944 \times 10^{-3} \text{ m}^3}$$

$$= 592.7 \frac{\text{KJ}}{\text{m}^3}$$

Tabla 5.3 Especificaciones de la prueba Proctor modificada (Basadas en Norma ASTM Prueba 1577)

Elemento	Método A	Método B	Método C
Diámetro del molde	101.6 mm	101.6 mm	152.4 mm
Volumen del molde	943.3 cm ³	943.3 cm ³	2124 cm ³
Peso del martillo	44.5 N	44.5 N	44.5 N
Altura de la caída del martillo	457.2 mm	457.2 mm	457.2 mm
Número de golpes de martillo por capa de suelo	25	25	56
Número de capas de compactación	5	5	5
Energía de compactación	2696 kN-m/m ³	2696 kN-m/m ³	2696 kN-m/m ³
Suelo utilizado	Porción que pasa el tamiz núm. 4 (4.57 mm). Puede ser utilizarse si 20% o menos del peso de material es retenido en el tamiz núm. 4	Porción que pasa el tamiz de 9.5 mm. Puede utilizarse si el suelo retenido en el tamiz núm. 4 es más de 20% y 20% o menos del peso es retenido en el tamiz de 9.5 mm.	Porción que pasa el tamiz de 19 mm. Puede utilizarse si más de 20% del material es retenido en el tamiz de 9.5 mm y menos de 30% del peso es retenido en el tamiz de 19 mm.

Proctor Modificado

EJEMPLO 2

Calcule la energía de compactación utilizada en el ensayo de Proctor modificado

Solución:

$$\text{Energía de compactación} = \frac{W_{\text{martillo}} * \text{Altura de caida} * N^{\circ}_{\text{capas}} * N^{\circ}_{\text{golpes capa}}}{\text{Volumen molde}}$$

$$= \frac{4.54\text{kg} * (9.81\text{m/s}^2) * 0.457\text{m} * 5\text{capas} * 25\text{golpes/capa}}{0.944 \times 10^{-3}\text{m}^3}$$

$$= 2695.12 \frac{\text{KJ}}{\text{m}^3}$$

Pruebas de compactación en el laboratorio

Después se realiza una gráfica de los contenidos de humedad de las muestras de suelo (vs) los pesos unitarios seco para los datos recogidos.

γ_d

$\gamma_{d \max}$

Rama Seca (baja humedad)

Rama Húmeda (mayor humedad)

w opt

w (%)

Curva de Saturación

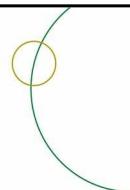
$\gamma_{zav} = \frac{G_s \gamma_w}{1 + w G_s}$

Peso unitario seco cuando la saturación es del 100%

Límite superior del peso unitario a cualquier contenido de humedad

 Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA | 

TEORIA DE COMPACTACIÓN







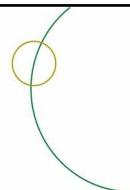
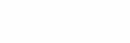
Factores que afectan la compactación de suelos

Algunos factores afectan de una manera u otra la compactación de los suelos.

- El contenido de humedad
- La energía de compactación
- Tipo de suelo

 Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA | 

TEORIA DE COMPACTACIÓN


Factores que afectan la compactación de suelos

- La energía de compactación

A mayor energía de compactación por unidad de volumen mayor será la compactación.

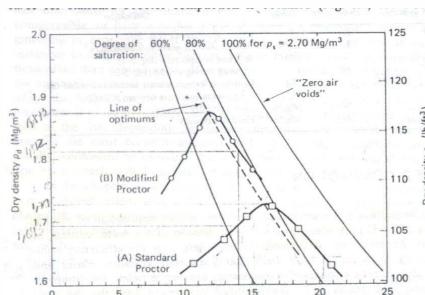


Fig. 5.1 Standard and modified Proctor compaction curves for Crosby B till.

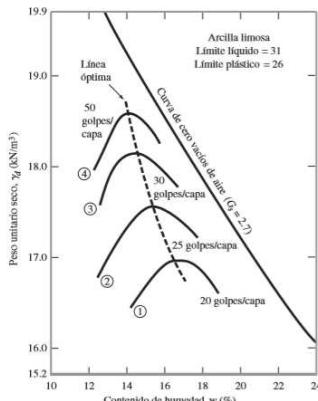


 Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA | 

TEORIA DE COMPACTACIÓN

Factores que afectan la compactación de suelos

- La energía de compactación



Arcilla limosa
Límite líquido = 31
Límite plástico = 26

Línea óptima
50 golpes/capa
30 golpes/capa
25 golpes/capa
20 golpes/capa

Peso unitario seco, γ_d (kN/m^3)

Contenido de humedad, w (%)

Figura 5.6 Efecto de la energía de compactación en arcilla limosa

 Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA | 

TEORIA DE COMPACTACIÓN

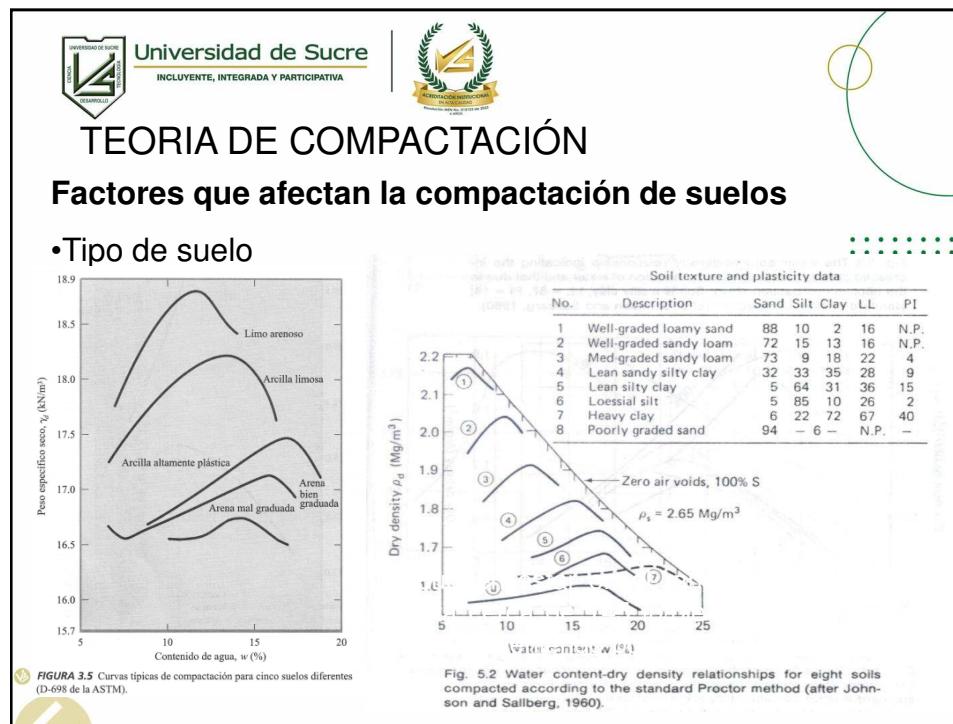
Factores que afectan la compactación de suelos

- Tipo de suelo

Claramente, el tipo de suelo también podría afectar la compactación de los suelos.

La distribución del tamaño de los granos, la forma, la gravedad específica de los sólidos así como el tipo y la cantidad del tipo de mineral arcilloso presente en el suelo afecta el máximo peso unitario seco y el contenido de humedad óptima para un esfuerzo de compactación y un método de compactación dado.



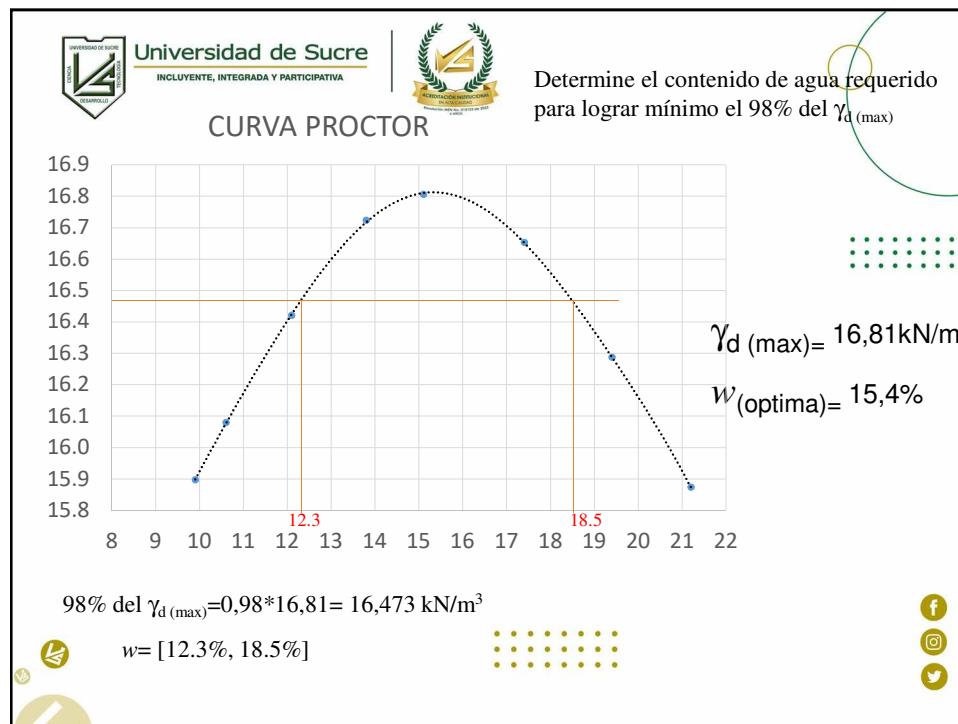


Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA

The results of a standard Proctor test are given in the following table. Determine the maximum unit weight (kN/m^3) of compaction and the optimum moisture content.

Volume of Proctor mold (cm^3)	Mass of wet soil in the mold (kg)	Moisture content (%)	$\gamma = \frac{W}{V}$ peso Unitario Húmedo (KN/m^3)	$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+w}$ peso Unitario Seco (KN/m^3)
943.3	1.68	9.9	17,471	15,897
943.3	1.71	10.6	17,783	16,079
943.3	1.77	12.1	18,407	16,421
943.3	1.83	13.8	19,031	16,723
943.3	1.86	15.1	19,343	16,806
943.3	1.88	17.4	19,551	16,654
943.3	1.87	19.4	19,447	16,288
943.3	1.85	21.2	19,239	15,874

Determine el contenido de agua requerido para lograr mínimo el 98% del $\gamma_d(\text{max})$



Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA

TEORÍA DE COMPACTACIÓN

Equipos y procedimientos de compactación en el campo

Los equipos que se utilizan en el campo para realizar la compactación incluyen placas vibratorias (ranas), apisonadores mecánicos y diferentes tipos de rodillos.

La compactación producida por estos equipos se da por:

- Presión estática
- Impacto
- Vibración
- Amasado

La energía de compactación se especifica en términos del número de pasadas.

La escogencia del equipo de compactación depende de la aplicación a la que está destinada y del tipo de material de relleno.

Métodos para compactar el suelo

Se emplean cuatro métodos principales de compactación :

1. COMPACTACIÓN ESTÁTICA O POR PRESIÓN :

La compactación se logra utilizando una máquina pesada, cuyo peso comprime las partículas del suelo, sin necesidad de movimiento vibratorio.
Por ejemplo : Rodillo Estático o Rodillo Liso



Métodos para compactar el suelo

2. COMPACTACIÓN POR IMPACTO :

La compactación es producida por una placa apisonadora que golpea y se separa del suelo a alta velocidad.
Por ejemplo : Un apisonador



Métodos para compactar el suelo

3. COMPACTACIÓN POR VIBRACIÓN :

La compactación se logra aplicando al suelo vibraciones de alta frecuencia .
Por ejemplo : Placa o rodillos vibratorios.



Métodos para compactar el suelo

4. COMPACTACIÓN POR AMASADO :

La compactación se logra aplicando al suelo altas presiones distribuidas en áreas mas pequeñas que los rodillos lisos.
Por ejemplo : Un rodillo "Pata de Cabra"



Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA

ACREDITACIÓN NACIONAL
Resolución Mineduc N° 002-2012

TEORIA DE COMPACTACIÓN

Equipos y procedimientos de compactación en el campo

- Las placas vibratorias (ranas) y los apisonadores mecánicos (canguros): son ejemplo de equipos manuales de compactación que se utilizan en áreas pequeñas en donde los compactadores de gran tamaño no pueden acceder con facilidad.

Los rodillos lisos: tiene un tambor hueco de acero que pueden llenarse con arena o agua para aumentar su peso y pueden ser autopropulsados o remolcados.

A menos que se les coloque un vibrador, la compactación se produce solo por el efecto de la carga estática que produce presiones de contacto de aproximadamente 400 kN/m^2 .

Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA | **TEORÍA DE COMPACTACIÓN**

Equipos y procedimientos de compactación en el campo

Su aplicación principal es la compactación de bases o subrasantes compuestas por arenas o gravas bien gradadas y la compactación de pavimentos asfálticos.

Sin embargo también pueden utilizarse para suelos finos, siempre y cuando no estén muy húmedos



Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA | **TEORÍA DE COMPACTACIÓN**

Equipos y procedimientos de compactación en el campo

- **Los rodillos pata de cabra:** tienen un tambor hueco de acero que cuenta con numerosas protuberancias o “patas”, estas patas generalmente tienen una longitud entre 15cm y 25cm y un área de 25cm² a 80 cm² en la punta.

Funciona de manera adecuada en suelos finos y en suelos gruesos con más del 20% de finos.



Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA | **TEORÍA DE COMPACTACIÓN**

Equipos y procedimientos de compactación en el campo

- Los compactadores de llantas:* tienen entre dos y seis llantas colocadas a muy poca distancia en cada uno de los dos ejes; el eje trasero a menudo tiene una llanta más que el eje delantero y están desfasados para asegurar el cubrimiento de la totalidad de la superficie de terreno.

Son aconsejables para la mayor parte de los suelos finos y de grano grueso a excepción de los materiales con gradación uniforme.



Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA | **TEORÍA DE COMPACTACIÓN**

Equipos y procedimientos de compactación en el campo

- Los compactadores vibratorios:* a cualquiera de los compactadores descritos se le puede adicionar un vibrador con el fin de impartir un efecto vibratorio adicional al suelo que se desea compactar.

Son particularmente eficaces en la compactación de suelos granulares sin finos.



Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA

TEORÍA DE COMPACTACIÓN

Equipos y procedimientos de compactación en el campo

**SELECCIÓN DEL TIPO DE MÁQUINA EN FUNCIÓN DEL TIPO DE SUELO
SEGÚN LA CLASIFICACIÓN AASHTO (Dujisim y Rutland, 1974)**

	A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7	A-4	A-5	A-6	A-7
Rodillo Liso	1	2	2	1	1	1	2	2	3	3	4
Rodillo Neumático	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	3
Rodillo Pata de Cabra	5	5	5	4	4	3	2	2	1	1	1
Pisón impacto	2	2	1	2	2	2	4	4	4	4	4
Rodillo vibratorio	1	1	1	1	1	3	4	3	3	5	5

Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA

TEORÍA DE COMPACTACIÓN

Medición de la compactación en el campo

Existen varios métodos para medir el grado o porcentaje de la compactación que se ha realizado en el campo. Entre ellos tenemos:

- *Método del cono de arena:*

Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA | **TEORÍA DE COMPACTACIÓN**

Medición de la compactación en el campo

- Método del cono de arena:

Datos requeridos:

- 1) Densidad seca de la arena
- 2) Masa de la arena que llena el cono
- 3) Masa del equipo antes del ensayo
- 4) Masa del equipo después del ensayo
- 5) Masa material sacado del agujero
- 6) Humedad del material sacado del agujero

Masa de la arena que llena el agujero
3 - 4 - 2

$$\gamma_d = \frac{W}{V}$$

Símbolos:

Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA | **TEORÍA DE COMPACTACIÓN**

Medición de la compactación en el campo

Laboratorio	Campo	
γ_d (max)	γ_d (suelo compactado campo)	$C_{relativa} = \frac{\gamma_{d\ campo}}{\gamma_{d\ max\ laboratorio}} \times 100$
$w_{(optima)}$	$w_{(suelo\ compactado)}$	

Especificaciones

Base: $100\% \gamma_d$ (max lab)

Subbase: $\geq 98\% \gamma_d$ (max lab)

Subrasante: $\geq 95\% \gamma_d$ (max lab)

Sección Transversal:

Riego de Sello (opcional)

Riego de Impregnación

Carpetá Asfáltica	5 - 10 cm
Base	10 - 30 cm
Subbase	10 - 30 cm
Subrasante	20 - 50 cm

Símbolos:

Laboratory compaction test results for a clayey silt are given in the following table.

Moisture content (%)	Dry unit weight (kN/m^3)
6	14.80
8	17.45
9	18.52
11	18.9
12	18.5
14	16.9

Following are the results of a field unit weight determination test on a soil with the sand cone method:

- Calibrated dry density of Ottawa sand = 1667 kg/m^3
- Calibrated mass of Ottawa sand to fill the cone = 0.117 kg
- Mass of jar + cone + sand (before use) = 5.99 kg
- Mass of jar + cone + sand (after use) = 2.81 kg
- Mass of moist soil from hole = 3.331 kg
- Moisture content of moist soil = 11.6%

Determine:

- Dry unit weight of compaction in the field
- Relative compaction in the field

EJEMPLO 4 Universidad de Sucre | INCLUSIVA, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA | ACRÉDITACION INTERNACIONAL | RESOLUCIÓN M.C. 0017 DE 2012

Gráfica del ensayo Proctor

Gráfica Peso Unitario seco (vs) humedad

Moisture content (%)	Dry unit weight (kN/m^3)
6	14.80
8	17.45
9	18.52
11	18.9
12	18.5
14	16.9

$\gamma_{d\maximo} = 19.0 \text{ kN/m}^3$

$CHO = 10.3\%$

EJEMPLO 4 Universidad de Sucre INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA | 

Masa arena para llenar el agujero

5,99kg-2,81kg-0,117kg

Masa de la arena para llenar el agujero= 3,063kg

Volumen del agujero

$$V = \frac{M}{\rho} \quad V = \frac{3,063kg}{1667kg/m^3} = 0,0018m^3$$

Densidad húmeda en el campo

$$\rho = \frac{M}{V} \quad \rho = \frac{3,331kg}{0,0018m^3} \quad \rho = 1812,855kg/m^3$$

$$\gamma = 17,784kN/m^3$$

EJEMPLO 4 Universidad de Sucre INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA | 

Densidad seco en el campo

$$\gamma_d \text{ campo} = \frac{\gamma}{1+w}$$

$$\gamma_d \text{ campo} = \frac{17,784kN/m^3}{1+0,116}$$

$$\gamma_d \text{ campo} = 15,935kN/m^3$$

Compactación relativa

$$C_{relativa} = \frac{\gamma_d \text{ campo}}{\gamma_d \text{ laboratorio}} \times 100$$

$$C_{relativa} = \frac{15,935kN/m^3}{19 kN/m^3} \times 100 \quad C_{relativa} = 83,8\%$$