

# ***NOCIONES DE MECÁNICA DE SUELOS PARA CONSTRUCCIÓN***

*Dr. José Luis Arumí R.*  
Ingeniero Civil, Ph.D.  
Facultad de Ingeniería Agrícola  
Universidad de Concepción

## ***I. INTRODUCCION***

Desde el punto de vista de la construcción, el suelo cumple una función estructural que es la de recibir todos los esfuerzos que transmiten las estructuras a través de sus fundaciones. Además el suelo es un importante material de construcción ocupado en rellenos y muros de embalses.

El objetivo de este apunte es entregar nociones generales sobre mecánica de suelos que permitan a los participantes del curso conocer conceptos básicos, realizar pequeños cálculos y sobre todo comunicarse con especialistas.

## ***II. GENERALIDADES***

### ***2.1. Clasificación e identificación del suelo***

El suelo se clasifica según el tamaño de los granos que lo conforman; de acuerdo a esto se tienen:

a) Granulares:

- Bolones: partículas mayores a 6"
- Grava: partículas mayores a 4.76 mm y menores de 6"
- Arenas: partículas entre 0.074 mm y 4.76 mm

b) Finos :

- Limos: partículas entre 0.074 mm y 0.002 mm
- Arcillas: partículas menores a 0.002 mm

## 2.2. Perfil estratigráfico

Corresponde a la representación gráfica de los estratos de suelo observados en un pozo de reconocimiento (calicata).



**FIGURA 1. Perfil Estratigráfico.**

### **2.3. Forma de los granos**

La forma de los granos influye en la resistencia al corte. En general se puede encontrar granos de las siguientes formas:

- Redondo
- Subredondeado
- Subangulares
- Angulares

En la medida que la forma de los granos es más angular aumenta la resistencia de suelos al corte porque existe una mayor trabazón entre las partículas.

## **III. IDENTIFICACION VISUAL Y DESCRIPCION DE SUELOS**

### **3.1. Generalidades**

Por identificación visual de suelos se entiende el reconocimiento del tipo de suelo que se realiza normalmente en terreno sin ayuda de equipo alguno. El profesional debe poder diferenciar entre un suelo fino y un suelo granular, entre un limo, una arcilla, una arena y una grava para entender y relacionar claramente las diversas características y el comportamiento de estos suelos.

### **3.2. Bases de la Identificación**

Se hace necesario definir los suelos para diferenciarlos de las rocas. Para fines de Mecánica de Suelos se acepta una definición simplificada que no traza un límite bien demarcado entre ambos: El suelo es un agregado natural de granos minerales que puede ser separado en sus

partículas individuales ya por simple muestreo, ya por medios mecánicos suaves tales como agitación en agua.

La identificación visual de los suelos debe estar estrechamente relacionada con un sistema generalizado de clasificación de suelos que apoyado por ensayos normalizados de laboratorio, busque separar los suelos en grupos tales que, dentro de cada uno de las propiedades de ingeniería significativa sean en alguna forma similar. En nuestro caso la identificación visual se relaciona con la Clasificación Unificada (USCS Unified Soil Classification System).

Esta identificación visual pretende clasificar un suelo sin necesidad de ensayos de laboratorio, de modo que la realización posterior de éstos, confirme y amplíe la información cualitativa obtenida en terreno.

### ***3.3. Principales tipos de suelos***

Los principales términos usados para describir los suelos son: grava, arena, limo y arcilla. La mayor parte de los suelos naturales son una mezcla de dos o más de estos constituyentes y muchos contienen un agregado de materias orgánicas en un estado de descomposición parcial o total. La muestra recibe el nombre del constituyente que aparece como más influyente en el comportamiento y los demás constituyentes se indican como adjetivo.

Así, una arcilla limosa tiene las propiedades de una arcilla, pero contiene una cantidad importante de limo, y un limo orgánico está compuesto primariamente por limo, pero contiene una cantidad significativa de material orgánico.

Arenas y gravas son conocidas como suelos granulares, y limos y arcillas como suelos finos, la distinción entre suelos granulares y suelos finos se basa en si las partículas individuales son o no visibles a simple vista.

### **3.4. Identificación de los suelos finos**

En laboratorio, la diferencia entre suelos finos y gruesos, esta normalizada y se consideran suelos finos los que pasan por la malla N°200 (0.074 mm). Para reconocer si un suelo fino es limo o arcilla se recurre a los siguientes ensayos sencillos que se describen:

#### *a) Ensayo de sacudimiento (dilatancia)*

Se separa aproximadamente 4 cm<sup>3</sup> de suelo y se le agrega agua hasta formar una bolita de suelo con una humedad tal que el agua casi aparezca en la superficie. Se coloca esta pasta en la palma de la mano y se le sacude horizontalmente golpeándola varias veces y fuertemente contra la otra mano.

Se dice que un suelo tiene reacción rápida a este sacudimiento cuando la pasta cambia de forma y muestra el agua en su superficie con muy pocos golpes. Se puede entonces asegurar que se trata de un limo.

En el otro extremo se tienen los suelos cuya reacción a este ensayo es muy lenta (o no hay reacción): no hay cambio de forma y el tiempo de ensayo necesario para que aparezca una superficie algo brillante debido al agua, es mucho mayor. Es el caso de las arcillas.

Reacciones intermedias tales como reacciones medias y medias a lentas dificultan la identificación del suelo por lo que es necesario recurrir al ensayo siguiente. Sin embargo, aún en el caso en que el tipo de suelo fino se pueda definir sólo con el ensayo de sacudimiento es siempre conveniente continuar con el ensayo de amasado.

#### *b) Ensayo de amasado (tenacidad)*

Se toma la pasta ensayada según lo descrito en (1) y se amasa entre ambas manos formando un bastoncito que decrece en diámetro. Una vez alcanzado el diámetro de aproximadamente 3 mm, se vuelve a reconstituir una bolita y se continua repitiendo estas etapas hasta que el

bastoncito se rompa en varias parte al ser amasado. En los ciclos finales se hace necesario formar la bolita oprimiendo fuertemente el suelo entre los dedos.

Existen tres características de los suelos que deben ser observadas en el curso de este ensayo.

Ellas son:

- La resistencia al amasado que es la resistencia que opone el suelo a ser amasado cuando está cerca de las condiciones de ruptura descritas. Una arcilla opone mucha resistencia al amasado a diferencia de un limo para el cual esta resistencia es baja.
- La plasticidad para explicar esta propiedad del suelo es necesario observar que durante el amasado el suelo está constantemente perdiendo humedad y, que durante todo el proceso de amasado el suelo se está comportando plásticamente y deja de hacerlo una vez que alcanza la humedad que tiene el bastoncito al romperse.  
El tiempo de amasado nos dice que suelos tienen una mayor capacidad de retención de agua en estado plástico, o mejor dicho, un mayor rango de humedades dentro del cual un suelo se comporta plásticamente (plasticidad). Es siempre conveniente entregar en la descripción de un suelo fino alguna información de plasticidad.
- Brillo inmediatamente después de haberse alcanzado la ruptura del bastoncito, se puede unir sus partes oprimiendo el suelo fuertemente entre los dedos. Se frota entonces el suelo contra la uña y se observa el brillo de la superficie frotada. Las arcillas presentan una superficie brillante que crece para las arcillas muy plásticas.

### ***3.5. Identificación y descripción de suelos granulares***

Comparativamente los suelos granulares son fácilmente identificables.

- El tamaño que separa las gravas de las arenas se considera en terreno igual a 0.5 cm. Las gravas mayores de 6" reciben el nombre de bolones.
- Las gravas pueden separarse entre gruesas (6" –3/4") y finos (3/4"-0.5 cm).

- Las arenas según sea su tamaño dominante (si lo hay) se pueden separar en arenas gruesas medias y finas, para lo cual se requiere experiencia.

Las características particulares que por su importancia en el comportamiento del suelo, deben incluirse en la descripción de un suelo granular, son las siguientes:

- Suelos fundamentales como por ejemplo, grava arenosa, arena con grava.
- Tamaño máximo de las gravas o bolones en pulgadas.
- Porcentaje estimado de bolones. Tanto este valor como el tamaño máximo deben ser estimados, siempre que sea posible, en el pozo y no en la muestra obtenida.
- Tamaño de granos dominantes. Para suelos granulares que no tienen una buena distribución de tamaños (pobrementemente graduados), indicar si las arenas son gruesas, medias o finas y las graves gruesas o finas.
- Forma de los granos. Se emplean en términos redondeados, subredondeados, subangulares y angulares.
- Porcentaje de finos. Es siempre conveniente entregar rangos: 10-15% de finos.
- Plasticidad de los finos de acuerdo a los procedimientos indicados en la identificación de suelos finos.
- Estado de las partículas. Si el mineral se constituye de los granos no es sano y está en estado de alteración, las partículas pueden romperse entre las manos.

### ***3.6. Observaciones comunes a suelos finos y granulares***

Para evitar repetición se incluyen aquí las características que, además, de las indicadas anteriormente deben acompañar la descripción de un suelo.

- a) Compacidad o consistencia. Es el estado de densificación o firmeza que tiene el suelo en terreno. Para suelos granulares se habla de compacidad y existen estados densos, medios y sueltos. Para suelos finos se habla de consistencia, y sus estados se conocen como firmes, medios y blandos. Se requiere experiencia para el reconocimiento de estos estados.

- b) Color. Debido a que con la variación de humedad varía el color, es siempre recomendable dar el color del suelo insitu (en terreno). Colores muy oscuros son muchas veces indicación de alto contenido orgánico. Colores claros indican suelos inorgánicos.
- c) Olor. Las muestras frescas de suelo orgánico tienen un olor característico de materias orgánicas descompuestas. No es necesario indicar que un suelo no tiene olor.
- d) Estado de humedad (seco, húmedo, muy húmedo, saturado).
- e) Otros materiales presentes y otras características de interés. Indican la existencia de raicillas y de gravas aislada en un suelo fino, de ladrillos en una grava arenosa. El tipo de ruptura de un suelo es muchas veces importante.

### ***3.7. Modelos de descripción***

Las descripciones de suelos deben ser directas y breves. A continuación se describen algunos suelos para permitir una visualización de tales descripciones. Sin embargo, estas descripciones no necesariamente deben considerarse como modelos absolutos.

- a) Arena fina limpia (que no tiene finos) y uniforme (todos sus granos están comprendidos en un rango muy corto de tamaño), de color gris claro, de cantos redondeados, capacidad media a densa, bastante seca.
- b) Arena limosa con bastante grava, de color café grisáceo; grava de cantos angulares y tamaño máximo de 2"; arena de cantos redondeados y subangulares; los finos (10-15%) son limos de baja resistencia para la probeta seca sin plasticidad; densa y humedad en estado no perturbado.

- c) Limo orgánico de mediana plasticidad, de color gris negruzco, de consistencia media a firme y ruptura frágil en estado de perturbado y muy blanda y adherente (pegajosa) en estado remoldeado, húmedo.
- d) Arcilla de alta plasticidad, de color amarillo claro, de consistencia media a blanda en estado inalterado, blanda y adherente cuando está remoldeada.

### **3.8. Observaciones**

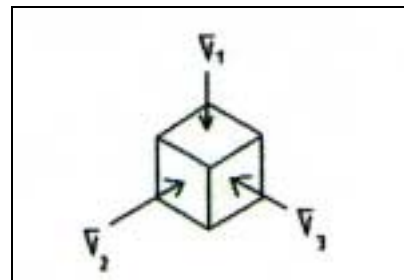
Para suelos finos la resistencia del suelo seco (a ser realizado con las manos sobre un trozo de suelo) entrega una información adicional para su identificación. Resistencias bajas corresponden a limos y resistencias altas a arcillas.

## **IV. MECANICA DE SUELOS**

### **4.1. Esfuerzos principales**

Una masa de suelos se ve sometida a los siguientes esfuerzos.

- $\sigma_1$  = fatiga principal mayor
- $\sigma_2$  = fatiga principal media
- $\sigma_3$  = fatiga principal menor



**FIGURA 2. Esfuerzos Principales.**

En general se trata de un problema bidimensional

$$\sigma_3 = \sigma_a = \sigma_h$$

$$\sigma_1 = \sigma_v$$

#### **4.2. Resistencia al corte**

La ecuación que entrega la resistencia al corte de un suelo esta dada por:

$$\tau = C + \sigma \cdot \operatorname{tg}(\phi)$$

Donde:

$\tau$  = resistencia al corte [kg/cm<sup>2</sup>]

$\sigma$  = fatiga normal al plano de falla

$C$  = cohesión, es la parte de la resistencia al corte de un suelo independiente de la fatiga normal al plano de falla

$\phi$  = ángulo de fricción interna del suelo

El ángulo de fricción depende de las características del suelo.

$$\phi_{\text{máx}} = \phi_u + \Delta\phi$$

Donde:

$\phi_u$  = ángulo de roce mínimo (20 a 22°)

$\Delta\phi$  = incremento del roce por compactación trabazón

Aproximadamente se considera:

$$\phi_u = \frac{2}{3} \phi_{\text{máx}}$$

**TABLA 1. Angulos de fricción para distintos suelos.**

<b>Tipo de Suelo</b>	<b>Pendiente Talud</b>	<b>Compactación</b>		
		<b>Baja</b>	<b>Media</b>	<b>Alta</b>
Limo no plástico	1:2 – 1:1.75	26-30	28-32	30-34
Arena fina a media	1:2 – 1:1.75	26-30	30-31	32-36
Arena bien graduada	1:1,75 – 1:1.5	30-34	34-40	38-46
Arena y grava	1:1.6 – 1:1.4	32-36	36-42	40-48

- En suelos granulares, el ángulo de fricción es el único mecanismo que entrega resistencia al corte.
- El aumento de la resistencia se logra mediante la compactación y/o el uso de partículas con gran trabazón (chancado).
- En suelos finos la resistencia al corte se ve aumentada por la cohesión entre partículas, llegando esta a ser mucho más importante que la fricción.

#### **4.4. Compactación**

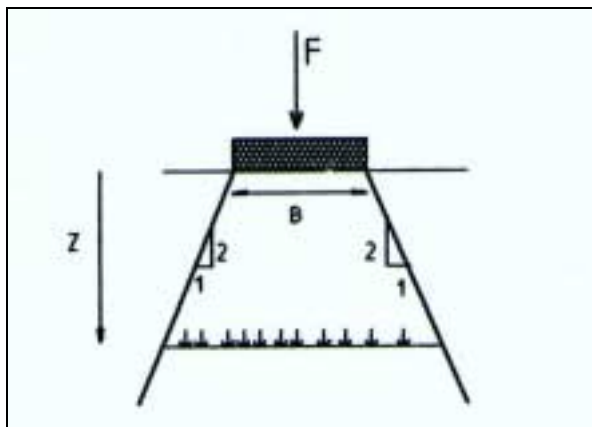
En general los suelos granulares se utilizan para construir rellenos, muros de embalses y bases de caminos; en estos casos el corte es la principal solicitud que condiciona el diseño de estas estructuras que esta dado por ángulo del talud con que se construye.

Para aumentar la capacidad de resistencia al corte de una masa de suelo granular, se utiliza la compactación. Este es un proceso constructivo en el cual se transmite una sobrepresión al suelo que reduce le volumen de vacíos aumentando la trabazón entre partículas.

El índice de compactación más utilizado es el ensayo de Proctor modificado que determina la relación entre la humedad de las muestras y su densidad máxima posible de alcanzar. Por ejemplo, se habla de compactar al 95% del valor de densidad del test de Proctor modificado.

Como las presiones se transmiten a través de las partículas en la medida que aumenta la profundidad del suelo la sobrepresión ocasionada por una carga se disipa en lo que se llama bulbo de presiones.

La simplificación más conocida para la disminución de la presión con respecto a la profundidad es la mostrada en la figura 3.



**FIGURA 3. Modelo simple del bulbo de presiones.**

Para esta razón es ineficiente compactar capas de suelo de más de 20 centímetros de espesor, ya que la energía de compactación se disipa y el suelo no resulta compactado.

La disminución de la presión con respecto a la profundidad puede ser calculada usando las siguientes expresiones:

Para zapatas corridas de largo L

$$\Delta\sigma = \frac{F}{(\beta + Z) \cdot (L + Z)}$$

Zapata cuadrada

$$\Delta\sigma = \frac{F}{(\beta + Z)^2}$$

#### **4.5. Consolidación**

Consiste en la disminución lenta de los vacíos de un suelo al drenar el agua de los poros. Se produce cuando el suelo es sometido a una presión que provoca el desplazamiento del agua. Al ocurrir esto, el tamaño de los poros disminuye, razón por la cual el volumen total de suelo decrece. Un ejemplo de este fenómeno es el asentamiento diferencial que afecta a la Catedral de la Ciudad de México y a la Torre de Pisa en Italia.

### **V. ESTABILIDAD DE TALUDES**

Los taludes corresponden a la pendiente de los planos inclinados de formaciones naturales como cerros o de aquellas estructuras construidas por el hombre como muros de embalses o rellenos. En el caso de obras civiles es importante considerar el talud de la estructura pues afecta directamente su resistencia al corte. Como ejemplo de esto se puede mencionar:

- Muros de embalses
- Cortes para zanjas
- Rellenos para muros de embalses

Según el tipo de suelo que conforma el material del talud se pueden considerar dos casos.

#### **5.1. Taludes infinitos**

Son aquellos cuya altura es muy grande en relación a un parámetro denominado altura crítica ( $H_c$ ). Este parámetro se calcula según la siguiente expresión:

$$H_c = \frac{2.6 * C}{\gamma \sqrt{K_a}}$$

Donde:

$$K_a = \frac{1 - \text{Sen}\phi}{1 + \text{Sen}\phi}$$

C = cohesión

Por ejemplo (0.045 km/cm<sup>2</sup>) arena fina  
(0.8 kg/cm<sup>2</sup>) arcilla

$\phi$  = ángulo de fricción

$\gamma$  = peso específico del suelo

Este tipo de talud corresponde a todos aquellos formados por suelos granulados y a aquellos de suelos cohesivos que son muy altos. Los mecanismos de falla de un talud infinito son por resistencia al corte. La falla se produce por un deslizamiento de capas de suelo paralelo al talud.



**FIGURA 4. Mecanismo de falta de un talud.**

El factor de seguridad al corte se calcula usando la siguiente expresión:

$$FS = B \cdot \frac{\text{tg}\phi}{\text{tg}i}$$

Donde:

$i$  = ángulo de inclinación del talud

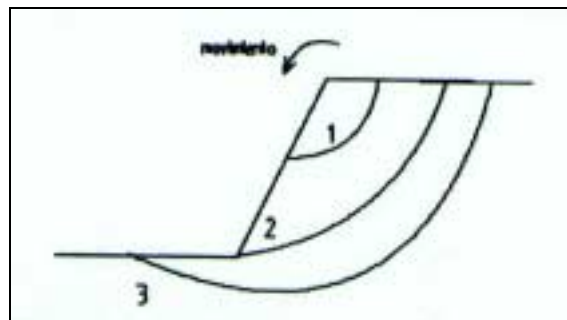
El coeficiente B se puede estimar:

- Suelo granular seco y sin cohesión  $B = 1$
- Suelo granular sin cohesión con flujo al talud  $B = 0.5$

## 5.2. Talud de altura limitada

Son taludes cuya altura es similar a la altura crítica y que normalmente están constituidos por suelos cohesivos. Los mecanismos de falla de este tipo de taludes se ilustran en la figura 5.

1. Falla de talud, gira una rebanada de suelo
2. Falla de pie
3. Falla profunda



**FIGURA 5. Fallas por deslizamiento.**

El cálculo de la estabilidad de un talud de este tipo requiere del conocimiento adecuado del tipo de suelo y del grado de compactación de este. Para esto se pueden utilizar diferentes metodologías, siendo las más comunes los métodos de Bishop, Terzaghi y Peck. Por su complejidad, este tipo de cálculo escapa al objetivo de este apunte.

### 5.3. Taludes típicos para represas

La tabla siguiente presenta valores recomendados para los taludes de presas pequeñas. Esto es, presas cuya altura máxima no sea superior a 5 metros de altura, ni cuya capacidad de acumulación sea superior a 50.000 m<sup>3</sup>.

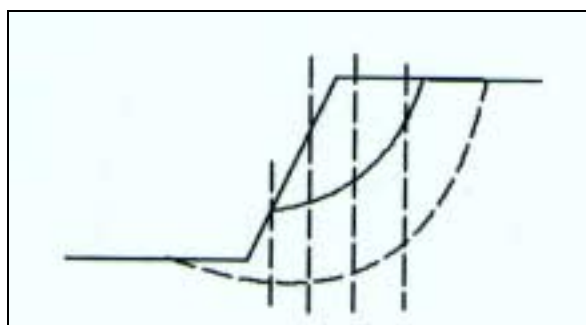
**TABLA 2. Taludes típicos para presas pequeñas.**

Talud	H:v	Tipo de suelo
Aguas arriba	2.5 : 1.0	gravas arenosas
	3.5 : 1.0	limos arcillosos
Aguas abajo	2.0 : 1.0	Gravas
	3.5 : 1.0	limos arcillosos

### 5.4. Mejoras de estabilidad de un talud

En el caso de que un talud presente problemas de estabilidad, es posible tomar algunas medidas para disminuir el riesgo de falla. Algunas medidas son:

1. Reducir la pendiente del talud
2. Colocar un muro de contención al pie de este
3. Forzar una falla a mayor profundidad hincando pilotes en el talud
4. Inyectar productos químicos o algún aglomerante como cemento.



**FIGURA 6. Refuerzo de talud.**

## VI. FUNDACIONES

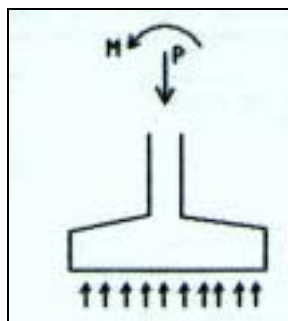
Se denominan fundaciones a la parte de una estructura que le sirve de apoyo transmitiendo las cargas al suelo en forma de presión sobre éste. Las fundaciones se pueden clasificar según su profundidad.

### 6.1. Tipos de fundaciones

#### a) Fundaciones superficiales.

Con este tipo de fundaciones, el suelo resiste la carga de la estructura sólo a través de la presión que ésta ejerce (figura 7). Dentro de este tipo de fundaciones se encuentran las zapatas (aisladas o corridas) y las losas de fundación.

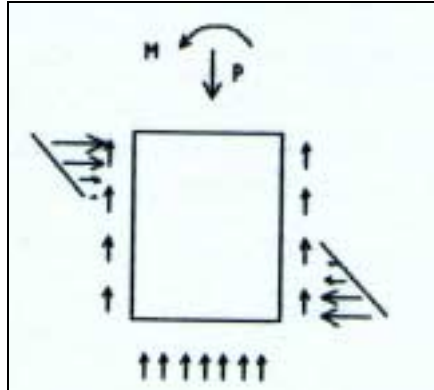
Las zapatas aisladas corresponden a la fundación de pilares o columnas. Las zapatas corridas corresponden a las fundaciones de muros. Finalmente las losas de fundación se utilizan en estructuras pesadas, edificios altos o estanques de agua.



**FIGURA 7. Fundación superficial**

#### b) Fundaciones semisuperficiales

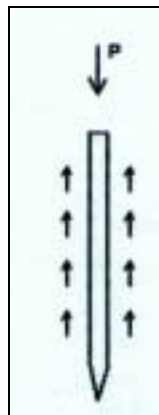
Este tipo de fundación permite incorporar los roces del manto y la resistencia pasiva o activa del terreno a la resistencia de una estructura. Se utilizan en algunos caso de muros de contención o en la fundación de estructuras más pesadas.



**FIGURA 8. Fundación semisuperficial.**

*c) Fundaciones Profundas*

Este sistema de fundación permite traspasar las cargas que recibe el suelo a estratos más profundos. Son elementos semejantes a los pilares de hormigón, acero o madera y se usan comúnmente en las fundaciones de puentes y edificios de altura.

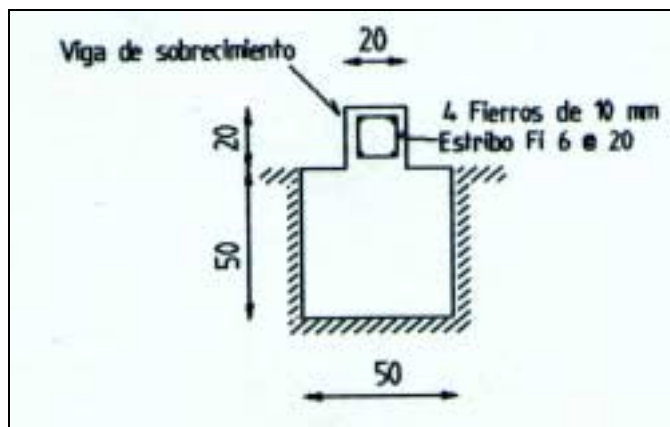


**FIGURA 9.**

Para el caso de fundaciones para edificaciones livianas, se puede utilizar zapatas (aisladas o corridas) considerando las siguientes recomendaciones:

- Profundidad mínima de fundación 40 a 50 cm
- Se debe traspasar la capa de tierra superficial (suelo con materia orgánica)

- Para suelos no muy resistentes se deben colocar vigas de sobrecimientos armadas entre todas las zapatas.



**FIGURA 10. Corte tipo de zapata.**

## 6.2. Capacidad de soporte admisible del suelo ( $Q_u$ )

Es la presión o fatiga máxima que la fundación puede aplicar sobre el suelo, para que éste tenga un factor de seguridad razonable a la falla.

**TABLA 2. Capacidad de soporte admisible de algunos suelos.**

Tipos de suelos	$Q_u$ kg f/cm <sup>2</sup>
Roca dura y sana	20 – 25
Roca blanda-arenisca	8 – 10
Tosca-arenisca arcillosa	5 – 8
Maicillo	2 – 4
Ripio, conglomerado duro	5 – 7
Ripio suelto	3 – 4
Arena gruesa	1.5 – 2.0
Arena seca a arcilla compacta	1 – 1.5
Arena fina	0.5 – 1.0

Ejemplo de cálculo de una zapata de largo L.

Sean:

$$\begin{aligned} P &= \text{Carga axial} \\ M &= \text{Momento basal} \end{aligned}$$

Se define la excentricidad como la relación entre el momento y la carga axial:

$$e = \frac{P}{M}$$

Las fatigas máximas y mínimas que una zapata ejerce sobre el suelo se calculan con la siguiente expresión

$$\sigma_{1-2} = \frac{P}{B \cdot L} \pm \frac{M}{I_{xx}} \cdot \frac{B}{2}$$

Donde:

$$I_{xx} = \frac{1}{12} B^3 L$$

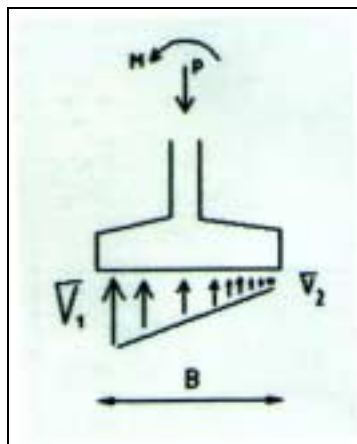
Considerando la definición de excentricidad

$$\sigma_{1-2} = \frac{P}{BL} \left[ 1 \pm \frac{6e}{B} \right]$$

En general se recomiendan los siguientes criterios:

- $\sigma_1 \text{ máx} < 1.33 Q_u$
- $e < B/4$

Lo último permite que el 75% del área basal esté comprimida y evita valores extremos de fatiga.



**FIGURA 11. Cálculo de una zapata.**

## **APÉNDICE SOBRE COMPACTACIÓN**

*Claudio Crisóstomo F.*

Ingeniero Civil Agrícola

Facultad de Ingeniería Agrícola  
Universidad de Concepción

Los suelos granulares se compactan mejor por vibración. Esto se debe a que la vibración reduce las fuerzas de fricción en las superficies de contacto, dejando así que las partículas caigan libremente por su propio peso. Al mismo tiempo, a medida que las partículas comienzan a vibrar, se separan momentáneamente las unas de las otras para poder girar y desviarse hasta llegar a una posición que limita su movimiento. La acción de asentarse y colocarse las partículas constituye la compactación. Todos los vacíos que había anteriormente han sido rellenados en suelo bien compactado.

Los suelos cohesivos se compactan mejor por fuerza de impacto. Los suelos cohesivos no se asientan con la vibración, debido a las fuerzas naturales de ligazón entre las diminutas partículas del suelo. La tendencia de estos suelos es de combinarse formando láminas continuas con espacios de aire entre ellas.

Las partículas de arcilla especialmente presentan un problema debido a su poco peso que permite que la arcilla se ponga muy fluida cuando hay exceso de humedad. Asimismo las partículas de arcilla tienen una forma plana que sirve para impedir que caigan en los vacíos con la vibración. Por lo tanto los suelos cohesivos como el limo y la arcilla se compactan eficazmente empleando fuerza de impacto que produce un efecto de cizallamiento oprimiendo las bolsas de aire hacia la superficie.

También se emplean combinaciones de fuerza de impacto y vibración. Por ejemplo con planchas vibratoras y rodillos vibratorios grandes se combina peso estático con vibración para ejecutar la compactación.

El suelo compactado se mide en relación a su densidad en kilos por metro cúbico ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

El suelo suelto puede pesar  $1.605 \text{ kg}/\text{m}^3$ . Después de la compactación, el mismo suelo puede tener una densidad de  $1.925 \text{ kg}/\text{m}^3$ . Esto significa que la compactación incrementa densidad del suelo en  $320 \text{ kg}/\text{m}^3$ .

### **Pruebas de laboratorio**

Para determinar el valor de la densidad del suelo con respecto al sitio de una obra dada, se envía una muestra del suelo a un laboratorio de pruebas y se realiza una Prueba Proctor.

Los objetivos de la Prueba Proctor son:

1. Medir e indicar la densidad obtenible de un suelo dado como norma
2. Determinar el efecto de la humedad en la densidad del suelo

En esta prueba se compacta una muestra de suelo en un recipiente estándar de 101,6 mm de diámetro x 116,6 mm de altura con una capacidad de 0,00094 m<sup>3</sup>. El recipiente se llena con tres capas. Cada capa de suelo se compacta empleando una pesa de 2,5 kg que se eleva a una distancia de 0,3048 m y se deja caer 25 veces uniformemente sobre cada capa de suelo obteniéndose una muestra de suelo que ha recibido un total de 60.579 metros kilogramos de energía por metro cúbico (mkg/m<sup>3</sup>) calculada como sigue:

$$\begin{aligned} 0,3048 \text{ m} \times 2,5 \text{ kg} \times 25 \text{ caídas} \times 3 \text{ capas} &= \\ 57,15 \text{ mkg aplicado a } 0,00094 \text{ m}^3 & \\ 57,15 \times 1060 &= 60.579 \text{ mkg/m}^3 \end{aligned}$$

Después de golpear la superficie del recipiente, la muestra de suelo se pesa inmediatamente después de la prueba (peso húmedo) y después de secar el suelo en un horno (peso en seco). La diferencia entre estos pesos representa el peso del agua que contenía el suelo. La densidad del suelo seco puede ahora indicarse en kg/m<sup>3</sup>. La cantidad de agua o de humedad también puede indicarse como un porcentaje del peso en seco.

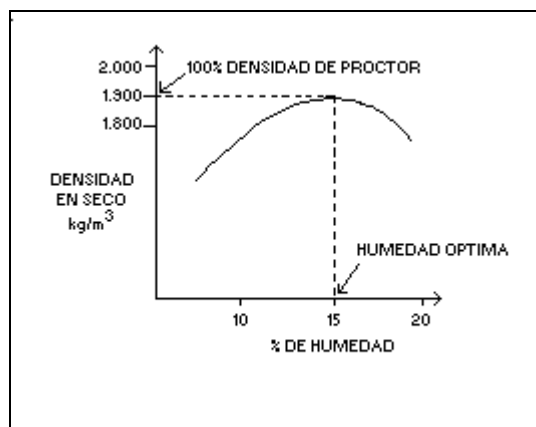
Ejemplo:	
Para una muestra dada de suelo	0,00094 m <sup>3</sup>
Peso del suelo húmedo	2,08 kg
Peso del suelo seco	1,81 kg
Pérdida de peso (agua)	0,27 kg

Luego se hace el siguiente cálculo:

Densidad del suelo seco	$1,81 \text{ kg} / 0,00094 \text{ m}^3 = 1.925,5 \text{ kg/m}^3$
% de humedad	$27 \text{ kg} / 1,81 \text{ kg} \times 100 = 15\%$

El procedimiento se repite añadiendo al suelo distintas cantidades de agua para cada repetición, anotando los pesos del suelo lo mismo que los porcentajes de humedad como se hizo anteriormente.

Marcando estos datos en una gráfica, se obtiene una curva semejante a la mostrada en la figura 20. La curva es designada curva de humedad - densidad o curva de control.



**FIGURA N° 1 Curva humedad - densidad del suelo**

### Conclusiones

1. Con cierta humedad, el suelo llega a su densidad máxima cuando se aplica una cantidad específica de energía de compactación
2. La densidad máxima que se obtiene bajo estas condiciones se llama Densidad Proctor 100%
3. El valor de la humedad en el punto de densidad máxima se denomina humedad óptima
4. Cuando se compacta el suelo para obtener una humedad superior o inferior a la óptima, usando el mismo esfuerzo de compactación, la densidad del suelo es menor que la obtenida cuando se compacta con humedad óptima
5. El valor Proctor 100% que así se obtiene se utiliza como base para medir el grado de compactación del suelo. Este valor de densidad Proctor 100% puede entonces considerarse como la medida estándar para la compactación

### Ejemplo

Para el suelo que se esté examinando, el valor Proctor 100% representa una densidad de 1.925 kg/m<sup>3</sup>. Suponiendo que el mismo suelo haya sido compactado a una densidad en seco de 1.848 (kg/m<sup>3</sup>), el grado de compactación para el suelo se indica entonces como sigue:

$$\frac{1.848 \cdot 100}{1.925} = 96\%$$

En otras palabras, el suelo ha sido compactado a un valor Proctor 96%.

La prueba de laboratorio anterior de la densidad del suelo fue desarrollada por R.R. Proctor, un ingeniero municipal de la ciudad de Los Angeles, California, a principios de la década de 1930. Ahora ha sido aceptada por toda la industria de construcción y es reconocida como la PRUEBA PROCTOR ESTÁNDAR.

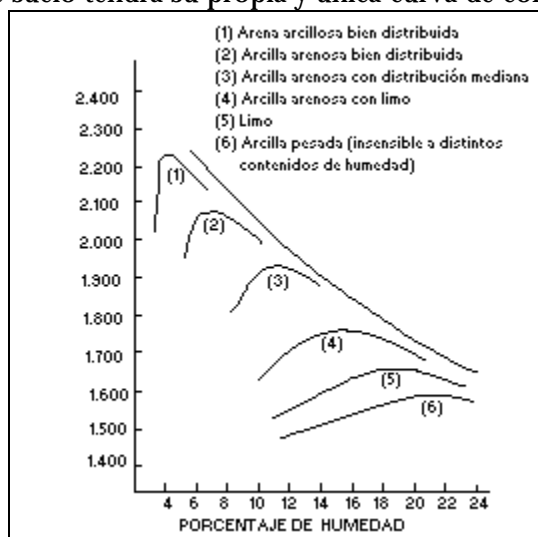
La tendencia de edificar estructuras de gran peso como centrales de energía nuclear y pistas para aviones de propulsión a chorro ha aumentado la exigencia de especificaciones de compactación a otras más rígidas. Para dichas estructuras, se ha desarrollado una PRUEBA PROCTOR MODIFICADA. Los principios y procedimientos para ambas pruebas son muy semejantes.

La Tabla 16 muestra una comparación entre los requisitos para las pruebas Proctor Estándar y Modificada.

**TABLA N° 1** Especificaciones del test de proctor estándar y modificado.

ESPECIFICACIONES	PROCTOR ESTANDAR	PROCTOR MODIFICADA
Peso del martillo	2,50 kg	4,536 kg
Distancia del golpe	30,48 cm	45,72 cm
Número de capas del suelo	3	5
Número de golpes en cada capa	25	25
Volumen del receptáculo de prueba	0,00094 m <sup>3</sup>	0,00094 m <sup>3</sup>
Energía transmitida al suelo	60.579 kg/m <sup>3</sup>	274.786,0 kg/m <sup>3</sup>

Cada suelo reacciona de diferente manera con respecto a densidad máxima y humedad óptima. Por lo tanto, cada tipo de suelo tendrá su propia y única curva de control. Vease la figura 21



**FIGURA N° 2** Curvas de control de varios suelos

La prueba Proctor se realiza generalmente en laboratorio, no en el sitio de trabajo. Es muy posible que un suelo pueda ser compactado hasta más de 100% Proctor, por ejemplo, hasta 104%. Esto es debido a que el grado 100% Proctor se obtiene empleando una cantidad

específica de energía durante la compactación. Si se aplica más energía al suelo, pueden producirse mayores densidades.

La prueba Proctor Estándar y la Modificada han sido internacionalmente adoptadas.

Al establecer la curva Proctor para el suelo y determinar su densidad de 100%, el ingeniero puede ahora especificar el porcentaje Proctor para el cual la tierra debe ser compactada. La compactación se realiza entonces en el sitio de trabajo.

### **Métodos de prueba en el sitio de trabajo**

Hay dos métodos principales que en la actualidad se emplean para probar la compactación en el sitio de trabajo.

#### **Método del cono de arena**

Se excava un hueco de 15 cm de ancho por 15 cm de profundidad en el suelo compactado. Se pesa el suelo extraído, luego se seca completamente y se vuelve a pesar. La cantidad de agua perdida dividida por el peso en seco da por resultado el porcentaje de humedad de suelo. Un aparato de cono y frasco que contiene granos finos y uniformes de arena especiales se coloca sobre el agujero, y el agujero se llena con arena. El frasco se pesa antes de llenar el agujero determinándose de esta manera el volumen de arena que se requiere para llenar el agujero.

Dividiendo el peso en seco de suelo que se extrae por el volumen de la arena que se requiere para llenar el agujero, se obtiene la densidad del suelo compactado en  $\text{kg}/\text{m}^3$ . La densidad obtenida se compara con la máxima de una Prueba Proctor, obteniéndose la densidad Proctor relativa. El método de cono de arena ha sido empleado por mucho tiempo y es bien conocido y aceptado.

Sin embargo, los que realizan las pruebas en el sitio de trabajo a veces cometen varios errores que pueden causar la inexactitud de la prueba con el cono de arena, estos errores son:

Asumir que la arena es uniforme y 100% compactable. Sin embargo las partículas no son completamente redondas, por lo que las vibraciones en el sitio de trabajo pueden compactarla mostrando una densidad más baja que la real.

En pruebas de cono de arena se utilizan varios tipos de arena, pero cada aparato de cono de arena se calibra para utilizar un solo tipo de arena. Los errores pueden resultar del empleo del tipo de arena incorrecto en algún aparato para pruebas.

En vista de que la ejecución de la prueba de cono de arena dura varias horas, realizar pruebas después de cada pasada de compactación no es práctico y existe la posibilidad de que se realice una compactación inadecuada.

## **El método nuclear**

El medidor de la densidad/humedad nuclear opera según el principio de que suelos densos absorben más radiación que suelos sueltos. El medidor nuclear se coloca directamente sobre el suelo que se va a probar y se conecta para que funcione. Los rayos gamma de una fuente radioactiva penetran en el suelo y, según sea el número de vacíos de aire que existan, un número de los rayos se reflejan y vuelven a la superficie. Estos rayos que se reflejan son registrados en el contador luego la lectura del contador se compara con los datos en un cuadro que indica la densidad del suelo en  $\text{kg/m}^3$ .

Esta densidad se compara con la densidad máxima de una prueba Proctor y se obtiene la densidad relativa Proctor como se hizo anteriormente.

El método nuclear ha adquirido popularidad debido a su exactitud y rapidez. Los resultados de la prueba se obtienen en un par de minutos y el suelo no se perturba. Los medidores nucleares más recientes incorporan **módulos indicadores rápidos** para verificar instantáneamente la densidad después de cada pasada del equipo. Además, el método de medidor nuclear permite establecer rápidamente el uso óptimo del compactador al eliminar compactación excesiva, desgaste y abuso del equipo y el desperdicio del tiempo del operador. El costo inicial de un medidor nuclear puede ascender a varios miles de dólares; sin embargo, el tiempo que se economiza en cada prueba es considerable en comparación con otros métodos.

La prueba Proctor de laboratorio descrita anteriormente, junto con estas dos pruebas de campo, representan la parte teórica de la compactación del suelo que deben comprenderse perfectamente.

## **Zonas de empréstito**

Este es el lugar físico desde donde se realiza la extracción de material con el propósito de relleno en una obra.

Las zonas de empréstito deben estar ubicadas en puntos estratégicos que cumplan con los siguientes requisitos:

- Cerca del lugar de la faena
- Fuera de lugares que afecten la estabilidad de la obra y de predios vecinos
- Cumplir con requisitos de calidad para ser realmente utilizables en faenas de relleno y compactación