

**MATERIAL DE APOYO**

# **COMPACTACIÓN DE SUELOS Y MATERIALES ESTABILIZADOS**

**CATEDRA TRANSPORTE III**

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

**FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, INGENIERÍA Y AGRIMENSURA**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO**

Año 2002

## COMPACTACIÓN DE SUELOS Y MATERIALES ESTABILIZADOS

### 1.- Introducción:

La compactación de suelos y materiales estabilizados es el proceso por el cual se obliga a las partículas a ponerse más en contacto unas con otra. Se realiza generalmente por medios mecánicos, produciéndose la expulsión del aire de los poros. La compactación se mide cuantitativamente por la densidad seca del suelo (peso de las partículas sólidas del suelo por unidad de volumen,  $[\text{gr}/\text{cm}^3]$ ;  $[\text{Kg}/\text{dm}^3]$ ). La humedad del suelo es el peso del agua que contiene, expresado con respecto al peso del suelo seco. La densidad seca se puede determinar entonces, a partir de determinar la densidad húmeda del suelo y su porcentaje de humedad.

$$\text{Densidad seca} = \frac{\text{densidad húmeda}}{1 + \% \text{ de humedad}}$$

R. R. Proctor hacia 1933, propone un ensayo empírico de compactación en laboratorio. Para un determinado trabajo de compactación, relaciona la densificación de los suelos con el contenido de humedad. Actualmente tal ensayo se encuentra normalizado con algunas variantes. Permite obtener resultados reproducibles que ofrecen la posibilidad de emplearlos como referencia de control de densificación en obra.

Las variables que entran en juego son:

- Energía por unidad de volumen de suelo compactado, en el trabajo mecánico de compactación, en  $\text{Kg. cm}/\text{cm}^3$ . Trabajo logrado mediante impactos de un pisón.
- Composición en volumen de las distintas fases: partículas del suelo, aire y agua.
- Naturaleza del suelo y la proporción de partículas gruesas.

### 2.- El Proceso de Densificación:

#### 2.1.- Trabajo Mecánico o energía de Compactación:

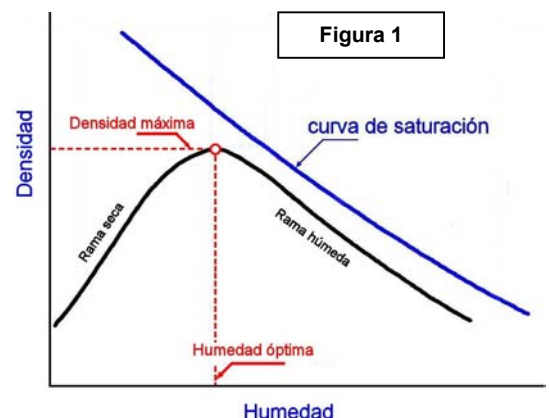
La realización de ensayos de compactación, implica la entrega de un trabajo mecánico que comprende: número de golpes, altura de caída, peso del pisón, número de capas. Además, está en juego la forma de entrega de esa energía: amasado, presión estática, impacto.

La entrega unitaria de trabajo, debe ser suficiente para vencer la resistencia al corte del suelo y por lo tanto, poder deformarlo de manera irreversible. Ello se expresa en la desigualdad de la ley de Coulomb:

$$\text{Trabajo externo} > C + \sigma \text{ tg } \phi$$

Este trabajo determina la orientación de las partículas con modificación de las características mecánicas de los suelos y materiales estabilizados.

La representación gráfica (figura 1) de la relación densidad seca – humedad, da lugar a lo que habitualmente se denomina “**curva de compactación**” o “**curva Proctor**”. La primera parte ascendente se denomina “**rama seca**”. El punto máximo superior es un punto singular, del cual se obtiene el valor de la “**densidad seca máxima**” y la “**humedad óptima**”. La parte descendente se conoce como “**rama húmeda**”.

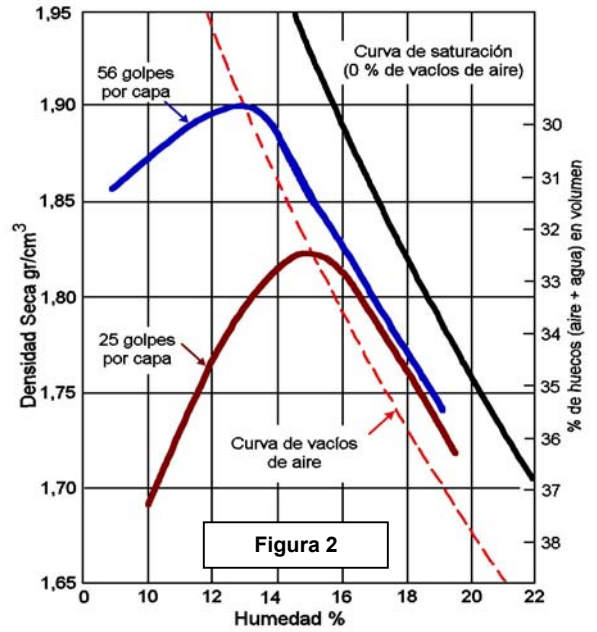


Para un mismo suelo compactado con diferentes energías de compactación, los puntos correspondientes a las densidades máximas, se ordenan sobre una línea marcadamente paralela a la curva de saturación. Además sus respectivas ramas húmedas, exhiben una considerable coincidencia y paralelismo con la curva de saturación. La figura 2 muestra las curvas de compacta

ción para dos energías diferentes. A mayor trabajo mecánico de compactación, se obtiene una mayor densidad seca máxima y una menor humedad óptima.

Dicho alineamiento tiene marcado paralelismo con la curva de saturación y contiene entre 4 y 6 % de aire. Ambas características responden al fenómeno físico de oclusión de aire, el que mantiene aproximadamente el mismo volumen independientemente de la energía exterior aplicada.

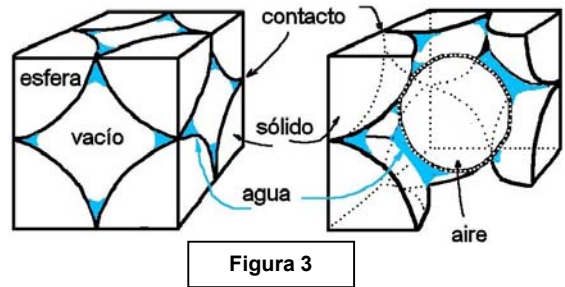
El grado de saturación de los suelos en las líneas de óptimos, se mantiene en un ámbito restringido. Para los suelos granulares graduados el grado de saturación es del orden de 0,73, en los cohesivos del orden de 0,83 y algo mayor para los suelos netamente arcillosos.



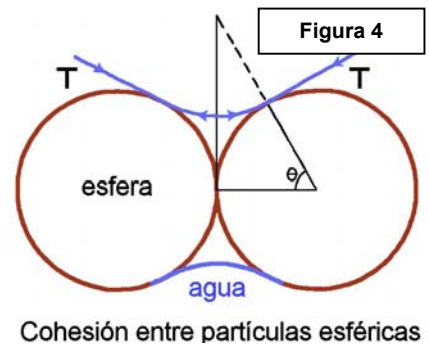
**2.2.- Composición en Volumen de las Distintas Fases:**

En un suelo parcialmente saturado se encuentran presentes la fase sólida, las partículas, y la fase fluida constituida por agua y aire.

La figura 3, muestra un sistema ideal, constituido por esferas rígidas de igual tamaño en arreglo cúbico. En este estado, cada esfera tiene contacto con otras seis resultando el estado más suelto. Este suelo ideal es capaz de retener una cierta cantidad de agua, que no drena por acción gravitacional. Se dispone en forma de anillos cónicos aislados alrededor de cada contacto. Ello determina el desarrollo de tensión superficial, como se muestra en la figura.



La fuerza "T" que actúa en dirección tangencial a la superficie de tales anillos de agua, opera reteniendo la misma de la acción de la gravedad. Como consecuencia las esferas se mantienen unidas por este efecto, como si existiera una presión exterior. (figura 4).



Una aproximación a este esquema se tiene en las arenas naturales de granulometría uniforme, parcialmente saturadas, donde se desarrolla una cohesión aparente dada por los anillos de agua.

**2.3.- Naturaleza del Suelo y la Compactación:**

Los factores inherentes al suelo que condicionan la compactación, están vinculados a las características de las partículas, a saber:

- Forma.
- Textura de la superficie.
- Orientación relativa entre partículas.
- Distribución de los tamaños (granulometría).
- Actividad superficial.

**2.3.1.- Forma de las Partículas:**

La forma de las partículas de los suelos se aparta en distinto grado de la esférica y en consecuencia también de la de los anillos de agua en cada contacto. Simples consideraciones geométricas, indican que la superficie contactada para un mismo volumen de partículas, será tanto mayor cuando la forma de las partículas se aparte más de la esférica.

### 2.3.2.- Textura de las Partículas del Suelo:

La textura de la superficie de las partículas condiciona el coeficiente de fricción entre las mismas y por ende la acción de un esfuerzo exterior destinado a lograr la densificación.

### 2.3.3.- Orientación de las Partículas:

La orientación relativa de las partículas incide en la forma de los anillos de agua. Por otra parte dependerá de la forma de entrega de la energía de compactación, (golpes, amasado, presión estática, etc.). Cuanto mayor sea el paralelismo en su distribución, mayores serán los puntos de contacto y por ende la cantidad de anillos de agua que se formen.

### 2.3.4.- Granulometría del Suelo:

Para un mismo volumen sólido y forma de las partículas una granulometría bien graduada, provee mayor número de contactos que en una granulometría uniforme. A mayor uniformidad de tamaños, el contenido de humedad tiene menor influencia en la compactación, lo que se evidencia en curvas de forma más achatada comparativamente con suelos similares mejor graduados granulométricamente.

### 2.3.5.- Actividad Superficial de las Partículas del Suelo:

Las fracciones finas son superficialmente activas, por lo tanto capaces de retener e inmovilizar agua por adsorción (orientación polar). Ésta actúa como un incremento de su volumen sólido real. El agua está retenida por energías muy elevadas y la de contactos solo puede existir, cuando el contenido de humedad supera el necesario para saturar la capacidad de adsorción propia de cada suelo.

### 2.4.- Características de un Suelo Granular:

En la figura 5 se muestra un modelo simplificado de suelo granular parcialmente saturado, sometido a esfuerzos externos " $\sigma$ ". Como consecuencia de este proceso de carga, en los puntos de contacto entre partículas, quedan actuando cargas normales  $P$  y tangenciales  $T$ . El cociente entre  $T/P$  brindará un valor más o menos próximo al coeficiente de rozamiento entre partículas  $\mu$ .

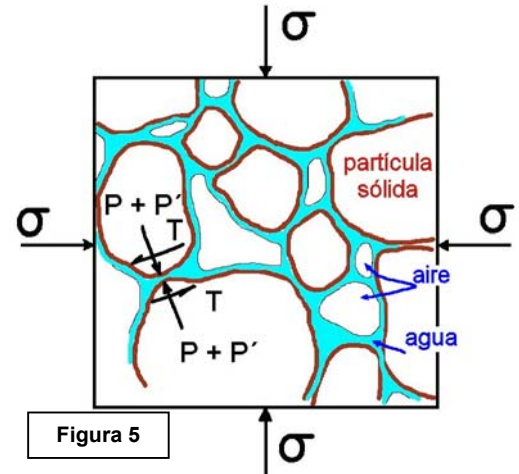
Cuando a este sistema se lo somete a un incremento de la carga exterior, aunque sea en forma isótropa, se producirá un incremento de la carga normal  $P'$ , pudiéndose señalar las siguientes situaciones:

- $(T/P+P') < \mu$  el sistema se encontrará en equilibrio.
- $(T/P+P') > \mu$  el sistema colapsará produciéndose movimientos relativos entre partículas, hasta que el acomodamiento genere nuevos puntos de contacto que reestablezca nuevamente el equilibrio.

En el límite sin embargo, el agua llena los huecos, y la adición posterior de agua desplaza las partículas, dando lugar a una densidad seca más baja.

### 2.5.- Características de un Suelo Arcilloso:

Resulta difícil representar de modo simplificado la arcilla en un solo modelo. Sin embargo a los efectos conceptuales, se puede considerar que está formada por partículas de arcilla agrupadas en "paquetes", según puede apreciarse en la figura 6. Los granos de arena, limo y los "pa



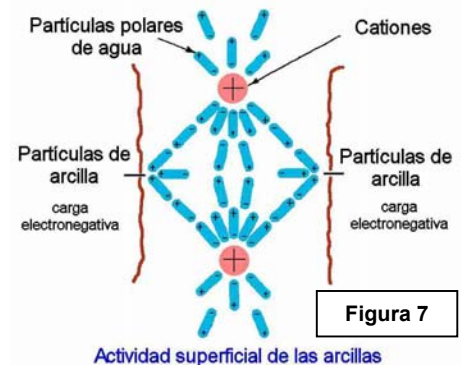
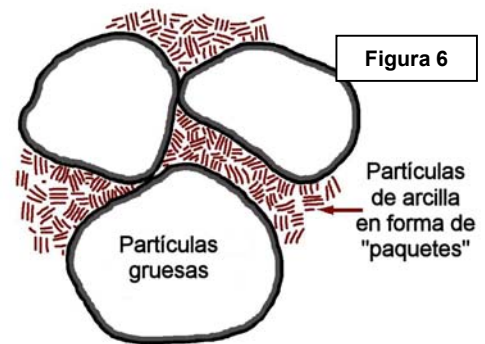
quetos" de arcilla, se encuentran unidos entre sí y rodeados de agua en sus puntos de contacto. Las partículas de la fracción arcillosa tienen forma de láminas, con elevadas superficie específica y actividad superficial unitaria.

El comportamiento volumétrico, depende de los movimientos relativos de las partículas gruesas y de las características de expansividad y retracción de los paquetes de arcilla. Dentro de los mismos tienen lugar las siguientes fuerzas:

- La **tensión superficial** en la interfase aire / agua dentro de la estructura del suelo.
- Las de **interacción** entre las partículas del suelo y las moléculas de agua.

El agua de adsorción es un valor inherente a cada suelo cohesivo dependiendo del contenido y actividad de la fracción arcillosa, del índice de plasticidad y de la capacidad de intercambio de cationes.

Los iones presentes en el agua, actúan como agentes de enlace. En el agua hay iones cargados positivamente (cationes) como  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Al}^{+++}$  entre otros, en número suficiente para neutralizar las cargas negativas de las partículas del suelo, haciendo el sistema eléctricamente neutro, (figura 7). Tanto la actividad superficial como la presencia de tales iones, son responsables de los **cambios volumétricos de los paquetes arcillosos** ante un cambio del contenido de humedad.



### 3.- Secuencia de las Etapas del Ensayo de Compactación:

#### 3.1.- Rama Seca:

Antes de comenzar a desarrollarse la rama seca de la curva de compactación, el suelo se encuentra con un contenido muy bajo de humedad. Es el tenor de agua que determina un espesor de película del orden molecular, energicamente unida al suelo. Corresponde al agua adsorbida, y en este estado se considera que el suelo está seco. El suelo debe superar ese umbral de humedad, para que **el agua tome el rol de lubricante entre partículas**. Hasta que ello no ocurra, la fricción entre los granos impide el deslizamiento de unas partículas sobre las otras; y por consiguiente, que se densifique.

##### 3.1.1.- Lubricación y Expulsión del Aire:

La adición de agua al suelo que se distribuye alrededor de cada contacto, no solamente modifica la composición en volumen, sino que actúa como un lubricante entre partículas. La efectividad del trabajo de compactación, depende de este rol del agua. Alcanzado este efecto, se obliga a las partículas a desplazarse hacia un empaquetamiento más cerrado, que conduce a una reducción de los poros. **La presión en la fase fluida obliga al aire a drenar hacia el exterior**. Este proceso ocurre en la medida que existan poros comunicados entre sí y con el exterior.

Cada impacto determina un incremento positivo de la presión de poros por compresión del aire. En el comienzo de la rama seca, la permeabilidad al aire es alta y va decreciendo a medida que se aproxima al punto de máxima densidad. La presión que cada impacto provoca en el aire, se disipa rápidamente en tiempos del orden de 1/100 de segundo, más lentamente cerca del óptimo y no llega a ser total en la rama húmeda.

Paralelamente el volumen de agua presente, se subdivide en un número mayor de "anillos" de volumen individual menor. Consecuentemente se desarrollan menores radios de curvatura de los meniscos, que implican mayor succión y cohesión aparente entre partículas.

Cuando se eleva la energía exterior aplicada, se vence más fácilmente la resistencia al desplazamiento de partículas. Ello se manifiesta en un corrimiento de la curva de compactación hacia una mayor densidad máxima y una menor humedad óptima, como lo muestra la figura 2.

La presión de poros negativa de los suelos arcillosos compactados (presión de poros residual) disminuye a lo largo de la curva de compactación tendiendo a anularse en la rama húmeda. Ello muestra que la disipación de la sobrepresión del aire es cada vez menor en estos suelos.

**3.2.- Densidad Seca Máxima y Humedad Óptima:**

La reducción de porosidad y el incremento de la humedad, conducen a un estado límite en el que se forma una red continua de agua. Más allá de cierto contenido de humedad, el agua comienza a tener una continuidad que cierra los poros comunicados. Como consecuencia el aire queda encerrado en forma de burbujas aisladas. Éstas son retenidas en cada poro y no es posible lograr una mayor densificación en el suelo para un mismo trabajo mecánico.

A partir de este estado, surge un neto cambio de propiedades por la existencia de un componente perfectamente elástico (aire ocluido). Su presencia implica que la permeabilidad al aire tienda a valores mínimos, dado que las burbujas solo pueden drenar junto con el agua o bien deslizándose dentro del conjunto.

**3.3.- Rama Húmeda:**

La zona húmeda comienza en el punto de máxima densidad de la curva. En él se dan las condiciones para que una proporción del aire pase al estado ocluido. En esta condición el aire se comporta como un material perfectamente elástico, lo que aunado al incremento de humedad se traduce en una separación de las partículas con una disminución de la densidad seca.

En esta parte de la curva, la interfase curva agua/aire de las burbujas, se asimila a una membrana elástica en tensión.

El único drenaje de aire posible, es por deslizamiento con coalescencia de las burbujas. En consecuencia, la porosidad resulta ligeramente inferior a la lograda en el estado límite que determina la densidad máxima y la humedad óptima. Para tal condición, las curvas en la zona húmeda se acercan sin alcanzar la línea de saturación teórica sin aire y con marcado paralelismo con esta última (figura 1).

**4.- Curvas Típicas para Diferentes Tipos de Suelos**

Las curvas típicas de compactación para diferentes tipos de suelos, se muestran en la figura 8.

Puede apreciarse que para suelos con granulometría bien graduada, los valores de densidad máxima son elevados y las humedades óptimas relativamente bajas.

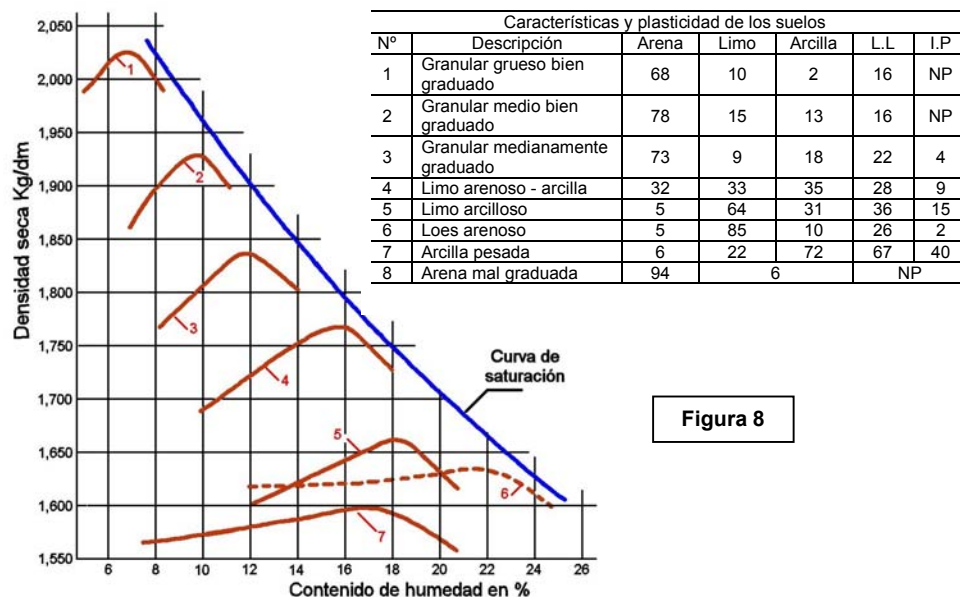


Figura 8

En los suelos finos, las densidades secas máximas son tanto más elevadas cuando mejor graduada es su granulometría, sin exceso de arcilla. Las arenas limosas son en general las que dan densidades secas más elevadas, las arcillas puras por el contrario dan densidades secas relativamente bajas, con humedades óptimas más elevadas.

En el caso de las arenas uniformes (curva 8), se obtienen densidades bajas y se evidencia una curva más achatada. Es el caso de las arenas del río Paraná por ejemplo, donde la diferencia de densidades entre el estado más suelto y el más denso es muy estrecha.

Las curvas Proctor de arcillas son con mucha frecuencia más aplastadas que las curvas de arenas y limos arenosos.

### 5.- Aplicación de los Valores de Densidad Máxima y Humedad Óptima

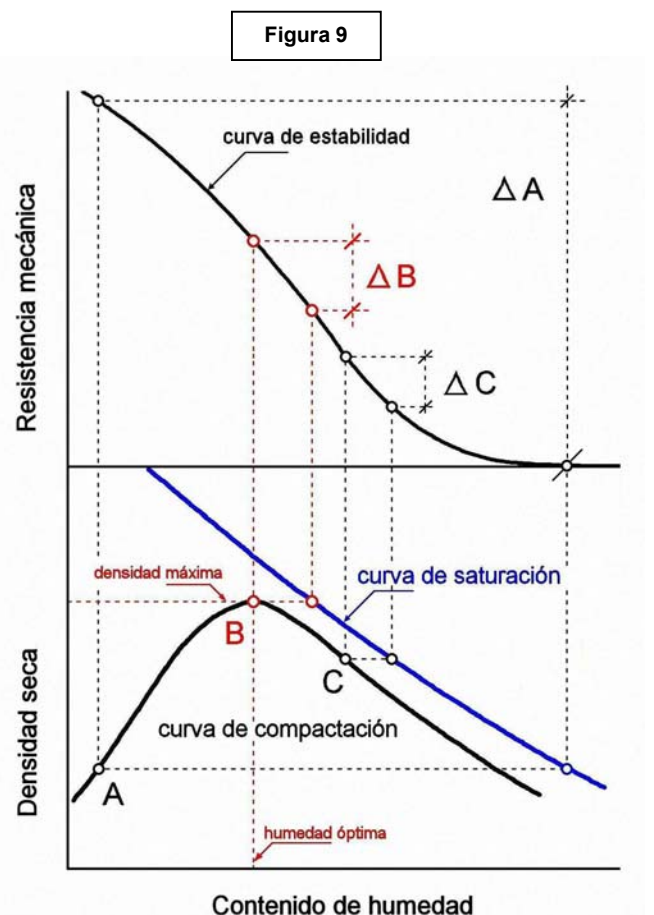
En la figura 9 se han representado una curva Proctor y la resistencia mecánica del suelo para diferentes condiciones de densidad y humedad. Se ha considerado que **el suelo puede saturarse manteniendo su densidad seca, hipótesis que dista significativamente de la realidad, particularmente en presencia de suelos cohesivos.**

En la rama seca, punto "A", el suelo alcanza una elevada resistencia mecánica. Esta situación puede evolucionar hacia una muy baja resistencia si el suelo se satura, dando como resultado una diferencia de resistencias " $\Delta A$ ".

Para el punto "B", correspondiente a la densidad seca máxima y humedad óptima, ocurre algo similar. No obstante ser la resistencia mecánica inferior a la que proporciona el punto "A", la pérdida por saturación " $\Delta B$ ", resulta menor.

En la rama húmeda, el punto "C" ofrece similares condiciones, salvo que el entorno " $\Delta C$ " de resistencias, se ubica en valores inferiores.

En el concepto de estabilización de suelos, la compactación es la primer forma de proporcionarla. Puede además señalarse, como el proceso por el cual se mejora el comportamiento de un material. Siendo el criterio dominante el mantener sus propiedades en un cierto entorno bajo las condiciones de servicio a que estará sometido. Por esta razón, la elección de la densidad máxima y la humedad óptima quedan justificadas.



### 6.- Implicancia de Diferentes Energías de Compactación:

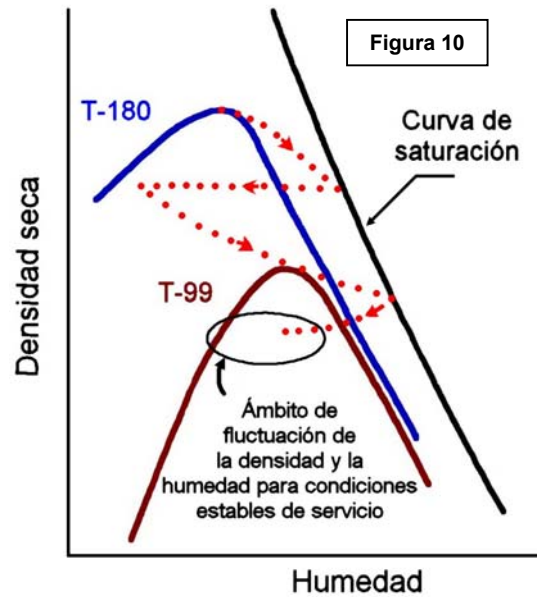
#### 6.1.- Suelos Granulares:

La resistencia mecánica puede incrementarse al aumentar la energía de compactación, elevando el punto de densidad máxima, (figura 2). En los suelos granulares dará lugar a una curva de resistencia también más elevada, motivado en su menor sensibilidad a la acción del agua. Por este motivo, es habitual que los suelos granulares se compacten con mayor energía que los cohesivos.

**6.2.- Suelos Finos Cohesivos:**

No ocurre lo propio con los suelos arcillosos donde la resistencia al corte es preponderantemente cohesiva. La tendencia de los materiales arcillosos a hincharse, si son de naturaleza expansiva, originan un aumento de volumen del conjunto de las partículas. En consecuencia, se puede alcanzar la saturación con una disminución apreciable de la densidad seca. Si el material es sometido a un proceso de secado, no se verifica una recuperación de la densidad seca inicial. Sobreviene un mecanismo de fisuración por retracción del suelo.

En servicio, el resultado final de una serie de ciclos de humedecimiento y secado, lleva al suelo a fluctuar en un entorno de densidad seca y humedad acotados. A ambos entornos se lo suele asociar con la **humedad y densidad de equilibrio**. Los mismos dependerán de factores tales como la carga exterior a que está sometido, las características expansivas de los materiales arcillosos interpuestos entre los granos, la permeabilidad del material. Además, depende del tiempo en que actúan y que tardan en ponerse en acción cada uno de los efectos mencionados.



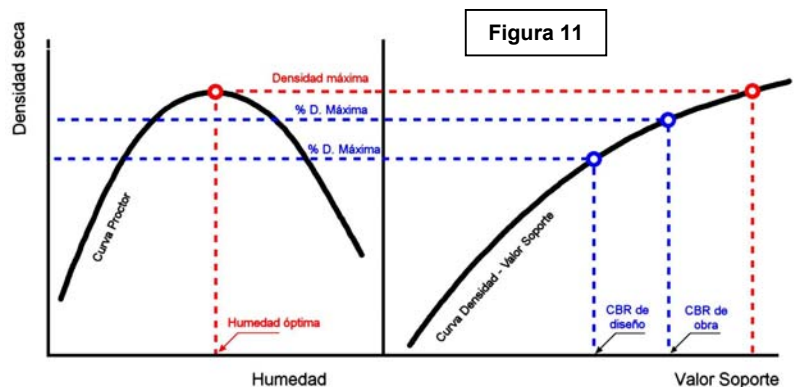
Un exceso de densificación en un suelo arcilloso, hará evolucionar la humedad y densidad hasta que se alcance dicho ámbito de equilibrio. Es el caso que esquemáticamente se muestra en la figura, donde una arcilla compactada con una elevada energía, evoluciona hacia el mismo. En el caso inverso, una insuficiencia de densificación, provocará la consolidación del material con incremento de la densidad seca.

En un terraplén, las condiciones de ingreso y egreso de agua, no son uniformes. Por lo tanto esta situación puede derivar en expansiones y contracciones irregulares. Esta situación puede manifestarse como deformaciones permanentes en la superficie del pavimento. Sobre la base de este escenario es que importa poder predecir tal ámbito antes de la construcción, lo que redundará en ventajas técnicas y económicas.

**7.- Exigencias de Compactación:**

La experiencia acumulada en reparticiones viales, ha conducido a recomendaciones y especificaciones sobre la forma de compactar los diferentes suelos.

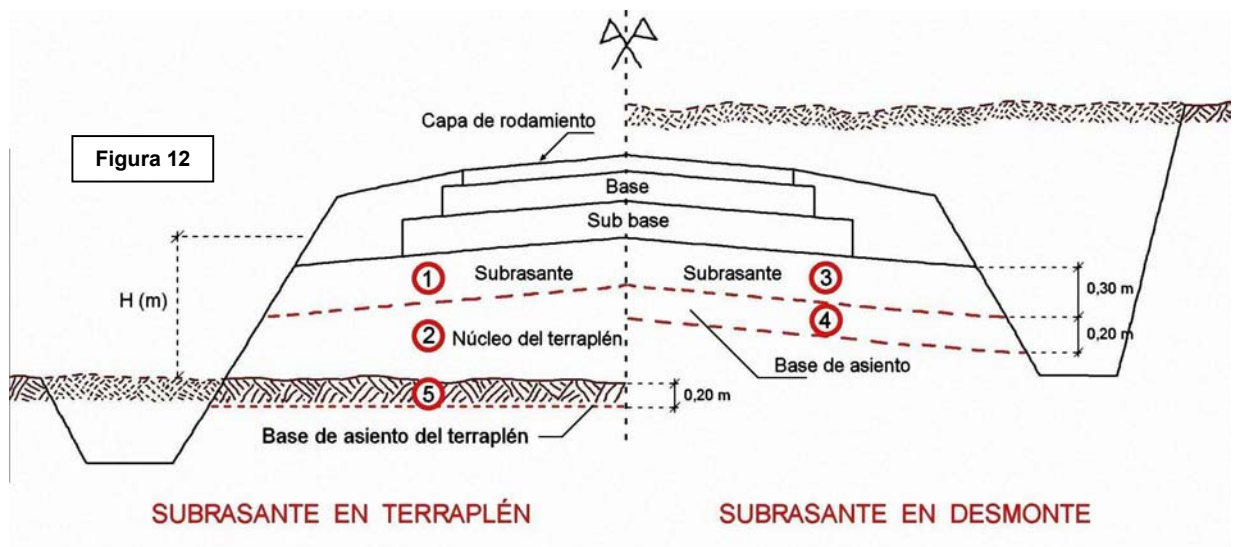
En la figura 11 se señala cómo el grado de densificación se emplea para definir condiciones de diseño y de exigencias de densificación en obra.



En la siguiente tabla y en la figura 12, se sintetizan los criterios de la Dirección Nacional de Vialidad para la densificación de suelos en capas de subrasante y base de asiento. Se expresan como un porcentaje de la densidad máxima de un determinado ensayo de compactación.



Clasificación HRB	HINCHAMIENTO						Exigencia de compactación en obra		CBR de diseño
	≤ 2 %			> 2 %			(A)	(B)	
	Ensayo	Fino	Granular	Ensayo	Fino	Granular			
A-1	AASHTO T-180	II	V	AASHTO T-99	I	IV	100 %	95 %	95 %
A-2							95 %	90 %	90 %
A-3									
A-4									
A-5	AASHTO T-99	I	IV				100 %	95 %	95 %
A-6									
A-7									



- (1) Compactación según (A)
- (2) Compactación según (B)
- (3) Preparación de la subrasante, compactación según (A)
- (4) Compactación según (B)
- (5) Base de asiento en terraplenes:
  - Si  $H \leq 2$  m: Compactación especial (C)  $\exists D/(B) \times 100 + 5 \%$ . Donde "D" es la densidad natural del suelo.
  - Si  $H > 2$  m: No se exige compactación especial (C).

CARACTERÍSTICAS DE LOS ENSAYOS DE COMPACTACIÓN DINÁMICA											
ENERGÍA POR UNIDAD DE VOLUMEN (Kg x cm / cm <sup>3</sup> )					5,86	6,04	8,46	12,20	27,46		
DENOMINACIÓN CORRIENTE					C.B.R. Dinám. 12 Golpes	Proctor estándar	Proctor estándar 35 Golpes	C.B.R. Dinám. 25 Golpes	Proctor modificado		
DENOMINACIÓN DE LA DIRECCIÓN NACIONAL DE VIALIDAD						I / IV	III		II / V		
DENOMINACIÓN NORMAS IRAM					10520/7	10511/7		10511/7	10520/7		
DENOMINACIÓN NORMAS AASHTO					1	T-99		2	T-180		
DENOMINACIÓN NORMAS ASTM						D-698			D-1557		
Características generales	Volumen cm <sup>3</sup>	Altura cm	Ø cm	Pisón (1)	Capas	Golpes x capa					
Molde Proctor chico	943,93	11,643	10,16	Chico	3	25					
				Chico	3	35					
				Chico	5	30					
				Grande	5	25					
Molde Proctor grande	2.123,85	11,643	15,24	Chico	3	56					
				Chico	3	79					
				Grande	5	25					
				Grande	5	56					
Otros	Molde C.B.R. dinámico	3.243,33	17,78	15,24	Chico	5	52				
					Chico	5	72				
					Grande	5	38				
					Grande	5	86				
	C.B.R. Din. con disco espaciador	2.123,85	11,643	15,24	Grande	5	12				
					Grande	5	25				
				Grande	5	56					

Los ensayos de compactación indicados en la tabla, corresponden a la normativa AASHTO y los números romanos, a las variantes de tamaño de molde establecidos por la Dirección Nacional de Vialidad. La siguiente tabla muestra las características de diferentes de ensayos de compactación normalizados y otros alternativos de aplicación especial.

Nota (1): Pisón "chico": Peso 2,495 Kg; altura de caída: 30,48 cm.  
 Pisón "grande": Peso 4,536 Kg; altura de caída: 45,72 cm.

Con el criterio de la equiparación de diferentes ensayos a través de la energía por unidad de volumen, pueden realizarse los mismos en moldes de diferentes tamaños. Sin embargo es menester señalar que debe complementarse con el siguiente requisito físico:

- **La aplicación de cada golpe de un pisón, debe ser capaz de vencer la resistencia al corte del material.**

$$\text{Trabajo mecánico} > C + \sigma \text{ tg } \phi$$

**8.- Control de la Compactación:**

**8.1.- La Densidad como Control:**

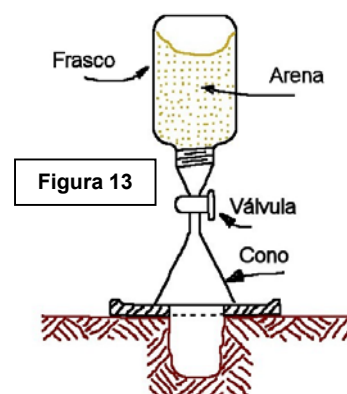
La compactación se mide cuantitativamente por la densidad seca del suelo. Sin embargo, resulta en un parámetro indirecto para medir o calificar las propiedades mecánicas. Para ello existe una muy amplia correlación experimental, que avala su empleo con este propósito. En muy contadas oportunidades se requiere el uso directo de la densidad. Una de ellas corresponde a aquellas situaciones en las cuales se pretende estimar la consolidación de capas del terreno natural, debido al peso de un terraplén.

**8.2.- Ensayos de Control de Compactación:**

Los controles en el camino pueden ser destructivos o no destructivos. Los ensayos destructivos involucran la excavación y remoción de parte de la capa, mientras que los ensayos no destructivos miden indirectamente por medio de radiaciones nucleares.

**8.2.1.- Ensayos Destructivos:**

Comprenden las siguientes etapas:



- 1) Excavación del material de la capa a controlar. La dimensión de la excavación dependerá del tamaño máximo del agregado. Se determina el peso del material extraído, en laboratorio.
- 2) Se determina la humedad de la muestra en laboratorio.
- 3) Se mide el volumen de la excavación realizada. Las técnicas más comúnmente empleadas son las del cono de arena y la del volumenómetro a membrana. Según muestran las figuras 13 y 14.
- 4) Se calcula la densidad seca como cociente entre el peso de la muestra seca y el volumen que ocupaba en la capa.
- 5) Se compara con los requerimientos de densificación especificados.

Existen numerosos problemas asociados con los ensayos de naturaleza destructiva.

Primero, es difícil y costoso obtener un número suficiente de muestras, para un análisis estadístico de los resultados de los ensayos de densidad. El volumen de material involucrado en cada ensayo constituye un porcentaje extremadamente pequeño del volumen total de la capa controlada.

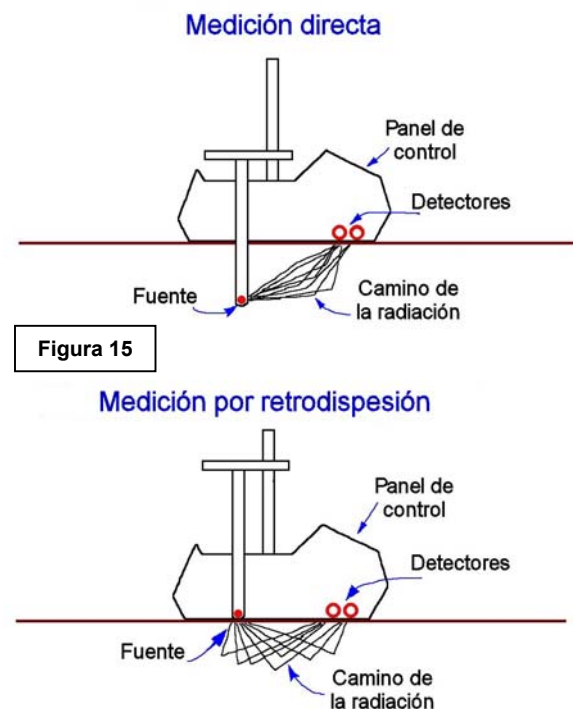
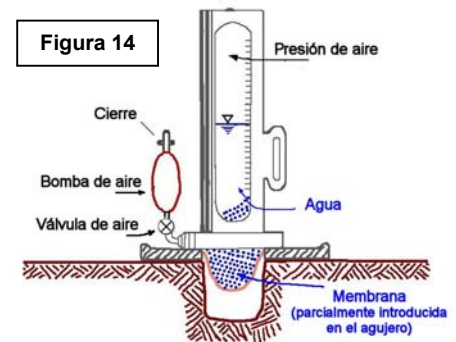
Segundo, las partículas de gran tamaño presentes en el suelo, obligan a una corrección de la densidad. Del mismo modo en que se condiciona el tamaño máximo de las partículas en los ensayos de compactación de laboratorio.

El tercer problema de significación, resulta del tiempo que demanda la determinación de la humedad de cada muestra. No obstante, debe señalarse que existen numerosos métodos que agilizan la determinación, incorporando a su vez otros inconvenientes. Por ejemplo el empleo del carburo de calcio para que reaccione con el agua y medir la presión del gas producido en un recipiente hermético (speedy test). La presión desarrollada resulta proporcional a la presencia de agua en el suelo.

Otro problema de significación resulta en la determinación del volumen de la excavación. En el caso del cono de arena, son varios los factores que lo afectan: el peso específico de la arena, su granulometría, las vibraciones durante su vertido, regularidad de las paredes de la excavación etc. Para el caso del volumenómetro, la lisura de las paredes, la fijación de la placa base, el ajuste para obtener la lectura inicial y el muy bajo volumen de medición entre otros factores constituyen problemas no siempre adecuadamente atendidos.

### 8.2.2.- Ensayos no Destructivos:

El empleo de isótopos radioactivos, posibilita medir la densidad y la humedad en forma muy rápida y precisa. En el mismo tiempo en que se realiza una determinación densidad y humedad por medios destructivos, se pueden realizar decenas de ensayos con un nucleodensímetro. Ello posibilita la verificación inmediata de resultados y el tratamiento estadístico de los mismos. La desventaja de este método radica en el elevado costo inicial del equipo y los potenciales daños por acumulación de radiación. No obstante debe señalarse que empleado correctamente por un operador durante todo un año, el nivel de radiación acumulada resulta ser inferior a la que se recibe en una radiografía dental. Ello no inhabilita de las



correspondientes verificaciones del órgano de control de equipamiento radioactivo.

La figura 15 muestra las dos formas más usuales de medición con equipos portátiles: medición directa y retrodispersión.

La rapidez y precisión del ensayo permite seguir el proceso de compactación y efectuar correcciones tendientes a su optimización. Surgen en a partir de ello los tramos de prueba o ajuste del proceso, los que pueden ser empleados como referencias de control para secciones de construcción posteriores. Los réditos derivados de la optimización de los procesos de compactación, terminan justificando la inversión en equipamientos de esta naturaleza.

### **8.3.- Número de Determinaciones de Control:**

El número de determinaciones para el control suele figurar en las especificaciones técnicas. Es usual en los procedimientos destructivos efectuar tres determinaciones cada 100 metros de capa construida, alternando entre el borde izquierdo, eje y borde derecho. Sin embargo, cuando se requiere un tratamiento estadístico, el empleo de métodos expeditivos se impone.

No se pretende en este apunte incursionar en temas de estadística, No obstante y dado que el promedio de resultados es ampliamente empleado en las especificaciones, se hacen algunas consideraciones sobre el número de muestras. Se considera conveniente señalar un procedimiento sencillo, para determinar el número mínimo de ensayos para alcanzar cierta confiabilidad en el promedio.

En la obtención de un promedio con determinado nivel de confianza, se deben considerar dos factores que lo determinan: El valor de las tolerancias de aceptación y la variabilidad de las mediciones.

Un promedio basado en pocos ensayos es menos confiable que uno basado en un gran número de ellos. Se requieren más mediciones para obtener un valor medio de mayor precisión. También se requieren más determinaciones, cuando la diferencia entre los valores extremos de los datos se incrementa.

En todo los casos, la información es más confiable cuanto mayor es el número de muestras ensayadas. No obstante, el número de muestras que se toman está limitado por el costo y el tiempo que requieren los ensayos. Por ende optimizar el número de muestras y de ensayos, es un objetivo deseable.

#### **8.3.1.- Estimación del Número de Ensayos:**

A continuación se expone un sencillo procedimiento, que permite verificar si el número de ensayos es suficiente para alcanzar un promedio con una determinada precisión.

Para ello considera un número mínimo de muestras (4) y el rango de las mismas (diferencia entre el valor más alto y el más bajo de la serie). Emplea además, un algoritmo y un valor referencial que contempla la incidencia del número de datos.

Se emplea la siguiente ecuación para determinar el número de ensayos que deben realizarse, para obtener un valor medio confiable, cuando la variabilidad no se conoce.

$$N_1 + N_2 = N_1 (F) (R/D)^2$$

Donde:

$N_1$  = Número inicial de determinaciones.

$N_1 + N_2$  = Número total de determinaciones necesarias para un determinado grado de precisión.

R = Diferencia entre la mayor y la menor determinación, (con su respectiva unidad).

D = Grado de precisión deseado para el valor promedio  $N_1$  y  $N_2$ . Este valor se expresa en las mismas unidades que los valores medidos. En consecuencia el cociente R/D resulta adimensional.

F = Factor predeterminado dependiente del número de determinaciones, tal como se muestra en la tabla.

Factor "F"	
$N_1$	F
3	1,700
4	0,514
5	0,257
6	0,159
7	0,111
8	0,083
9	0,065
10	0,053

Para emplear la ecuación se debe:

- Definir cuantas muestras ( $N_1$ ) emplear en la ecuación. Estas deben ser como mínimo cuatro, tomadas en forma aleatoria. Calcular el promedio con tales determinaciones.
- Efectuar los ensayos requeridos sobre dichas muestras y registrar los resultados.
- Calcular el promedio.
- Decidir sobre el porcentaje de precisión deseado, y convertirlo en una fracción decimal. Este suele ser usualmente  $\pm 1\%$  ( $\pm 0,01$ ).
- Multiplicar este resultado por el promedio de las mediciones. Se obtiene el valor "D".
- Restar el valor más bajo del valor más alto de las mediciones. Se obtiene el valor "R".
- Seleccionar el valor para "F" a partir del valor  $N_1$ , en la tabla de factores "F".
- Sustituir todos los valores en la ecuación y obtener  $N_2$ .

$N_2$  es el **número de determinaciones que deben adicionarse** para que el promedio alcance la precisión deseada.

Ejemplos:

Se han planteado cuatro ejemplos de control de densidad. Los resultados ( $N_2$ ), indican el número de muestras adicionales para alcanzar una dada precisión del promedio, se muestran en la última fila de la tabla.

Parámetro	Densidad (Kg/dm <sup>3</sup> )		Densidad (Kg/dm <sup>3</sup> )	
	$\pm 1\%$	$\pm 1,5\%$	$\pm 0,5\%$	$\pm 1\%$
Datos de ensayos individuales	1,678		1,802	
	1,625		1,768	
	1,695		1,789	
	1,638		1,765	
	1,685		1,792	
	1,626		1,771	
Promedio	1,658		1,781	
$N_1$	6		6	
R	0,06		0,037	
F	0,159		0,159	
D	0,016578	0,024867	0,008906	0,017811
<b><math>N_2</math></b>	<b>12</b>	<b>2</b>	<b>11</b>	<b>-2 (*)</b>

Al disminuir el requerimiento de precisión disminuye el número de muestras a incorporar al promedio. Puede destacarse que en el caso del segundo grupo de densidades (\*) cuando se pretende una precisión de  $\pm 1\%$  el número  $N_2$  resulta negativo, vale decir que para la precisión pretendida el número de muestras resulta suficiente en función de la dispersión de sus datos.

### 9.- Equipos de Compactación en Obra:

Los equipos de compactación en obra se basan fundamentalmente en hacer circular cargas elevadas sobre una capa de suelo, previamente distribuido y nivelado. La forma de entrega de la energía de compactación son variados pero en general responden a una combinación de los siguientes tipos de esfuerzos, que pueden denominarse elementales: **Vibratorio**, **Estático**; **Amasado** e **Impacto**. Los mismos se ilustran en la figura 16.

El **esfuerzo vibratorio** produce una rápida sucesión de impactos y, por lo tanto de ondas de presión que se propagan en profundidad.

El **esfuerzo estático** produce bajo la carga circulante tensiones con predominio de la componente vertical.

El **esfuerzo de amasado** produce esfuerzos en dos sentidos, vertical y horizontal, obligando al material a deformarse en más de una dirección.

El **esfuerzo de impacto** produce una onda de presión que se propaga hacia abajo produciendo movimiento relativos entre partículas. Se alcanza un esfuerzo mayor que el correspondiente al peso estático.

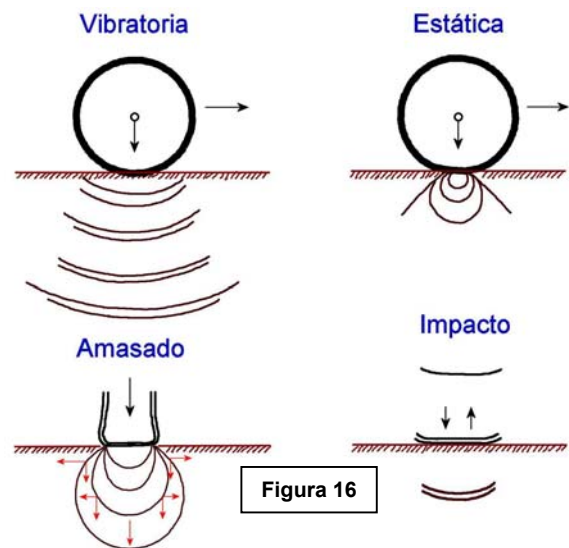


Figura 16

### 9.1.- Clasificación de los Equipos:

Las formas de clasificar los equipos son muy variadas, no obstante una de las más generalizadas consiste en la forma en que se entrega la energía de compactación.

El tamaño del equipo y la magnitud de la entrega unitaria de energía constituye otra forma de clasificación. En algunos países los equipos son sometidos a la verificación de su aptitud por un organismo público (Francia). Sin embargo estas disposiciones han sido muchas veces cuestionadas por fabricantes de otros países que encuentran en esta certificación una forma de protección de la industria local.

#### 9.1.1.- Equipos que Entregan la Energía por Compresión y Amasado:

- Rodillos cilíndricos metálicos lisos.
- Rodillos neumáticos.
- Rodillos con salientes (pata de cabra).

#### 9.1.2.- Equipos que Entregan la Energía por Impacto:

- Placas.
- Vibropisones.
- Caída de masa.

#### 9.1.3.- Equipos que Entregan la Energía por Vibración:

- Placas vibratorias.
- Rodillos cilíndricos metálicos lisos, operados en modo vibratorio.

### 9.2.- Definiciones:

Se define como "**pasada**" al viaje de ida o vuelta de un equipo de compactación sobre una dada sección de compactación.

Se define como "**cobertura**" a la acumulación del número de pasadas que permite aplicar una pasada, al ancho completo de la capa que se está compactando.

**9.3.- Diagrama de Cobertura:**

Consiste en graficar la variación de la densidad seca de una capa en función del número de coberturas. Para ello es necesario recurrir a un método expeditivo para la determinación de la densidad. La figura 17 muestra un ejemplo de graficación.

Un esquema similar, en donde se pone en evidencia la evolución del proceso de compactación, puede realizarse mediante la determinación de la resistencia del suelo. En este caso también debe emplearse un procedimiento expeditivo, por ejemplo el penetrómetro dinámico de cono (DCP).

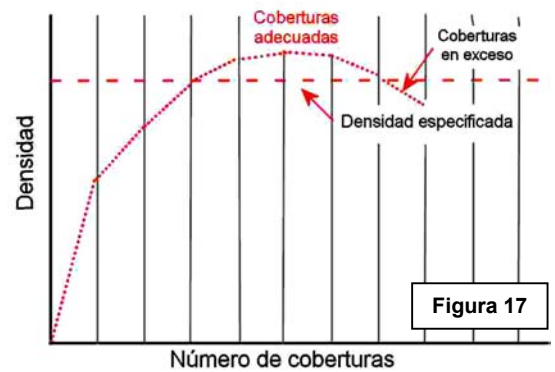


Figura 17

**9.4.- Rodillos Metálicos Lisos:**

Los rodillos lisos pueden operar en modo estático o en modo vibratorio. En el primer caso el peso propio más el lastre hace que en la generatriz de contacto con el material, se ejerza una presión destinada a densificar el material.

En modo vibratorio una masa excéntrica gira dentro del cilindro para proveer una mayor energía de compactación. El efecto vibratorio reduce la fricción interna del material y permite lograr la acomodación de partículas más eficientemente. En los casos de suelos finos cohesivos, este efecto pierde prácticamente sentido por la naturaleza de las fuerzas internas que se desarrollan. Su campo de aplicación abarca los suelos con comportamiento granular y en los trabajos de compactación de terminación superficial de otros equipos.

La variación de la energía aplicada en modo vibratorio reconoce varios parámetros. Entre ellos pueden mencionarse:

- Peso estático.
- Frecuencia de vibración.
- Amplitud.
- Velocidad de avance del equipo.

La figura 18 muestra esquemáticamente el proceso de entrega de energía de un cilindro liso en modo vibratorio.

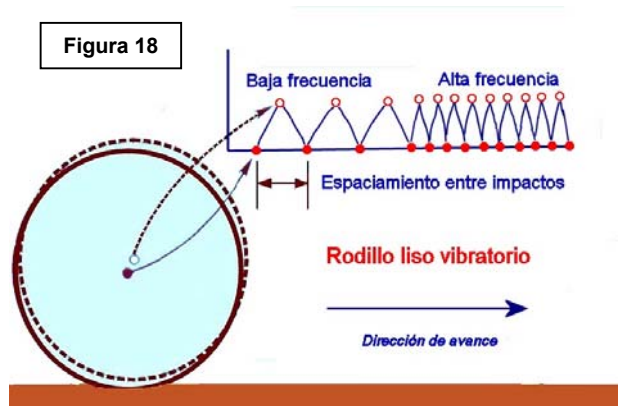


Figura 18

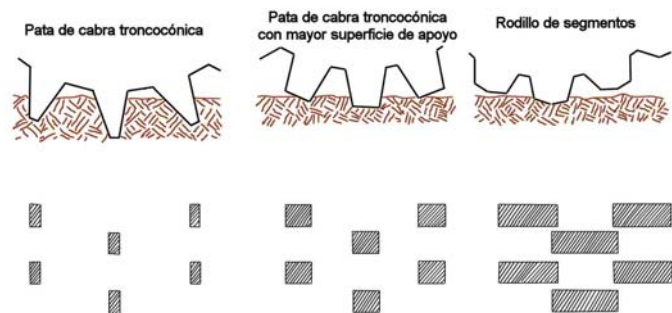
**9.5.- Rodillos Pata de Cabra:**

Esta denominación genérica se aplica a rodillos cilíndricos metálicos que cuentan con protuberancias. Éstas se presentan de variadas formas, pudiendo citarse:

- Pata de cabra.
- Segmentos.
- Grillas.

Los más frecuentemente empleados son los rodillos de segmentos.

Las protuberancias producen un punzonado en el material suelto, con desplazamiento y densificación debajo de cada una de ellas cuando



Improntas del proceso de compactación

**Rodillos de compactación pata de cabra y de segmentos**

Figura 19

do entran en contacto con el mismo. Este hecho ha permitido que se señale que este tipo de equipos “compacta desde abajo hacia arriba”. Cuando luego de un cierto número de coberturas no se producen punzonados de significación, la superficie queda con marcas que demandan su regularización y la posterior compactación con rodillos lisos o bien neumáticos. La figura 19 muestra distintos tipos de protuberancias y las respectivas improntas de contacto.

Encuentran su ámbito de aplicación en suelos finos cohesivos. No resultan aptos para compactar suelos de comportamiento netamente friccional.

**9.5.- Rodillos Neumáticos:**

Consiste en un equipo dotado de ruedas neumáticas lisas, de un ancho de banda superior al de un neumático de un vehículo de carga.

Resulta un equipo de gran adaptación a una amplia gama de materiales. Sin embargo no resultan los más adecuados para la compactación de granulares de granulometría uniforme.

El área de contacto de cada neumático produce un cierto grado de confinamiento, lo que hace que a la inversa que los pata de cabra, se considera que “compactan desde arriba”. La

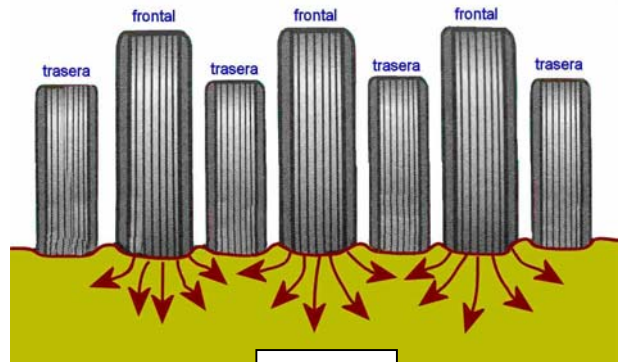


Figura 20

figura 20 muestra la disposición de los neumáticos delanteros y traseros, que permiten lograr por superposición un ancho dado de compactación en cada pasada.

El confinamiento que produce cada neumático, permite realizar tareas de terminación de compactación. Esta tarea habitualmente se denomina en obra como “compactación de sellado” o simplemente “sellado”.

**9.6.- Compactadores de Pequeñas Dimensiones:**

Consisten en equipos de tracción manual o mecánica, destinados a la compactación de áreas de difícil acceso. Pueden ser de placa o de rodillos, siendo la aplicación del esfuerzo vibratorio. La figura 21 muestra el esquema de un doble rodillo liso, autopropulsado de accionamiento manual.

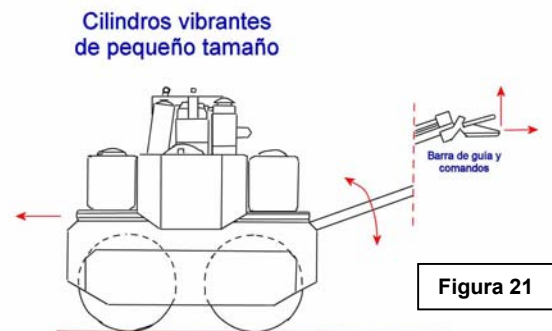


Figura 21

Resultan muy difundidos los compactadores de placa vibratoria de accionamiento y tracción manual. La vibración de la placa debido a excéntricos produce una componente horizontal que permite guiar el desplazamiento en forma manual. Las dimensiones de la placa varían en su ancho de 30 a 80 cm en tanto su largo oscila entre 50 y 100 cm.

Estos equipos en la jerga de obra se los suele denominar “chanchita”. La figura 22 muestra un esquema del mismo.

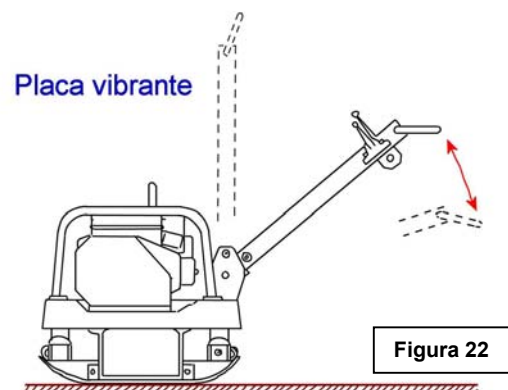


Figura 22

Las placas de impacto son pisones que se accionan mediante aire comprimido, elevando una masa que luego cae por la acción de la gravedad. Se emplean particularmente para compactar en lugares muy reducidos.



---

**Revisiones:**

1. Ing. Marta Pagola, falta revisar desde el título 9 en adelante. (23/11/02)
2. Ing. Pablo Martínez, falta revisar completo. (23/11/02)

**Bibliografía:**

- Terraplenes y pedraplenes. V. Escario Ubarri; J. A. Hinojosa Cabrera; S. Rocci Boccaleri. Ministerio de Obras Públicas y Transporte. Madrid 1989.
- Guide to Earthwork Construction, State of the Art Report 8. Transportation Research Board 1990.
- Sobre el mecanismo del proceso de compactación de los suelos. Dr. Celestino Ruiz e Ing. Yolanda R. R. de Ronchi. VI Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito, tomo III. Mar del Plata 1968.
- Quality Control for Hot Mix Asphalt Operations. NAPA, Quality Improvement Series 97.
- Proyecto y Construcción de Carreteras, tomo I. G. Jeuffroy. Barcelona 1972.
- Compactación en carreteras y aeropuertos. Georges Arquie. Barcelona 1972.
- Mecánica del suelo para ingenieros de carreteras y aeropuertos. Road Research Laboratory. Edición en español, Madrid 1972
- Publicación 19 Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo: Sistematización de los medios de compactación y su control. J. Abecasis Hachuel y Sandro Rocci Boccaleri. Madrid 1987.