

Propiedades de los suelos compactados

Patricia Sagüés
LMS – FIUBA

1 OBJETO DE LA COMPACTACIÓN DE SUELOS

La compactación de suelos es un procedimiento por el cual se mejoran algunas propiedades mecánicas de los suelos.

Mediante la aplicación de energía mecánica se reducen los vacíos que se encuentran con aire en la masa de suelo para aumentar su peso unitario.

De esta forma se logra un aumento en la resistencia, en la rigidez, una mejora en la estabilidad volumétrica y una disminución de la permeabilidad del suelo.

El mejoramiento mediante compactación es utilizado en rellenos artificiales para la construcción de caminos, presas, terraplenes, entre otros. También puede ser requerido en caso de cimentaciones sobre terreno natural, por ejemplo en arenas sueltas.

2 ENSAYO DE PROCTOR

El ensayo Proctor Standard o A.A.S.H.T.O T99-61 (de la *American Association of State Highway and Transportation Officials, ASTM D-698-00AE01*) es un ensayo de compactación de laboratorio, en el que se aplica una energía de compactación dinámica similar a la que podía obtenerse con los equipos que había en el mercado en el año 1933, cuando el ensayo fue desarrollado.

Parte de la base que el peso unitario de un suelo compactado depende de la humedad, la energía de compactación y el tipo de suelo.

En un cilindro normalizado, de 1000ml de volumen, se aplica una energía específica de compactación constante a tres capas de suelo (pasante por el tamiz N°4) con un martillo normalizado de 25kN, una altura de caída de 30cm y 25 golpes por capa.

Una vez realizada la compactación se obtiene el peso unitario húmedo. Al medir la humedad del suelo se calcula el peso unitario seco con la expresión

$$\gamma_d = \frac{\gamma_h}{1 + \omega} \quad (1)$$

Con el avance de la técnica se desarrollaron mejores equipos de compactación. La reproducción de las condiciones del terreno en el laboratorio debió adaptarse, por lo que se creó el ensayo Proctor Modificado, que varía respecto del ensayo standard cantidad

de energía entregada. En el ensayo de Proctor modificado, se emplean 5 capas de suelo, un martillo de 45.4kN, una altura de caída de 45.7cm y 25 golpes por capa, utilizando el mismo molde que en el ensayo Proctor Standard.

Pueden hacerse ensayos con diferentes energías específicas mediante la combinación de diferente cantidad de capas, la cantidad de golpes por capa o el tamaño del martillo. La energía específica es

$$E_c = \frac{N \cdot n \cdot W \cdot h}{V} \quad (2)$$

donde N es la cantidad de golpes, n de capas, W es el peso del martillo y h la altura de caída. En el caso que el suelo contenga partículas de mayor tamaño, es posible aumentar el volumen del cilindro.

3 INFLUENCIA DE LA COMPACTACIÓN EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS

3.1 Peso unitario

Si se aplica una dada energía de compactación y se varía el contenido de humedad de compactación se obtienen diferentes valores de peso unitario seco.

La variación del peso unitario en función de la humedad de compactación arroja una curva similar a una parábola, como se muestra en la figura 1.

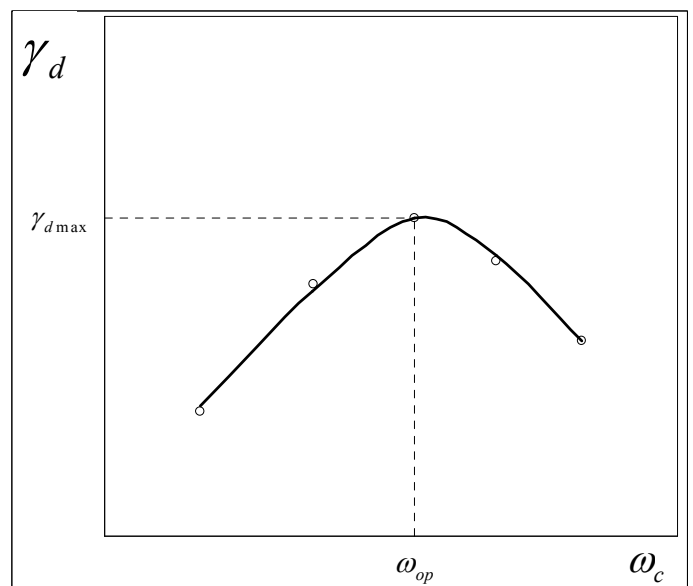


Figura 1. Curva de compactación

La forma de la curva esta relacionada con la forma en que se disponen las partículas durante la compactación.

Para bajas humedades de compactación las partículas tienen una alta fricción entre si. A medida que se agrega agua, las partículas se recubren con agua libre, generan presión neutra local y se desplazan relativamente para formar una estructura más compacta, con peso unitario seco mayor.

El peso unitario llega a un máximo a partir del cual disminuye con el aumento de la humedad.

El agua, comienza a ocupar el lugar de partículas sólidas y genera deformación a volumen constante.

El máximo peso unitario se obtiene con la denominada humedad óptima.

Al variar la energía de compactación se obtienen curvas de similares características.

Para una mayor energía, la curva se desplaza hacia arriba y hacia la izquierda, obteniéndose un mayor peso unitario y una menor humedad óptima. En la figura 2. se muestra el resultado de un ensayo de compactación con dos energías diferentes

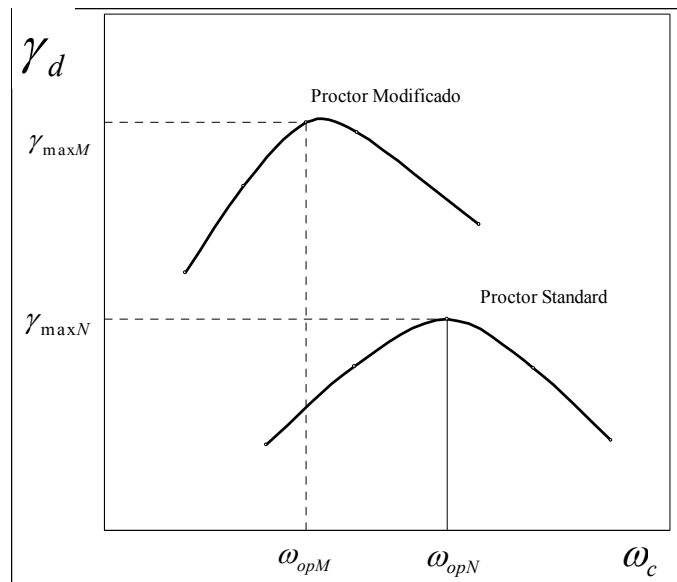


Figura 2. Variación de γ_d con diferentes energías de compactación y humedades de ensayo.

La preparación de las muestras también tiene influencia en las curvas de peso unitario seco. En la figura 3 se presentan cinco curvas correspondientes a cinco ensayos efectuados en un mismo suelo, en los cuales se modificaron las condiciones de preparación (Núñez 1974).

Según estos ensayos, para un mismo suelo y una determinada energía de compactación el valor del peso unitario seco varía en un rango de 1.2 kN/m^3 .

Debe notarse que la humedad óptima no parece ser afectada por las diferencias en la preparación del ensayo y se encuentran dentro de un rango acotado.

El agregado de agua y posterior secado al aire produce las mayores variaciones. La recompactación de muestras también afecta el resultado de manera significativa.

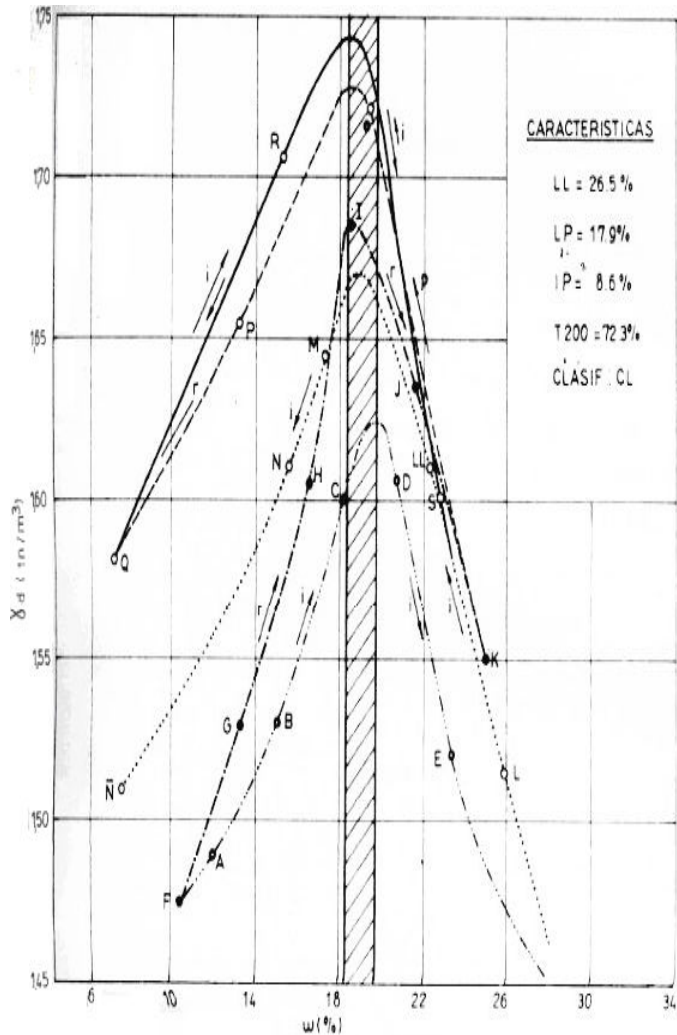


Figura 3. Variación de γ_d y ω_{op} con el método de preparación de las muestras. Ver Tabla 1 (Núñez 1974).

Tabla 1. Nomenclatura de la Figura 3.

Curva	Preparación
ABCDE	$\omega_N=10\%$ P. Standard (1)
FGHIJK	$\omega_N=10\%$ recompactado al incorporar agua (2)
LLLMNÑ	$\omega_{inicial}=28\%$, secado al aire para cada punto (3)
KOPQ	suelo (2) secado al aire, recompactado con ω decreciente (4)
QRS	$\omega_{inicial}=28\%$, secado al aire hasta $\omega_{inicial2}=7.4\%$ (5)

La curva depende también del tipo de suelo. En el caso de suelos no cohesivos, se obtienen mayores densidades y menores humedades óptimas que en el caso de suelos cohesivos, para los cuales las curvas resultan a su vez más abiertas con mayores rangos de humedad. En la figura 4 se muestra la diferencia entre las curvas Proctor Standard para ocho suelos diferentes. Se puede ver la gran diferencia entre una arcilla (7) y una arena bien graduada (1).

Los suelos no cohesivos poseen curvas más cerradas, por lo que son más propensos a que una diferencia en la humedad de compactación resulte en una diferencia significativa en el peso unitario obtenido.

Existen relaciones aproximadas para obtener a priori la humedad óptima y el peso unitario seco máximo, se presentan en la Tabla 2.

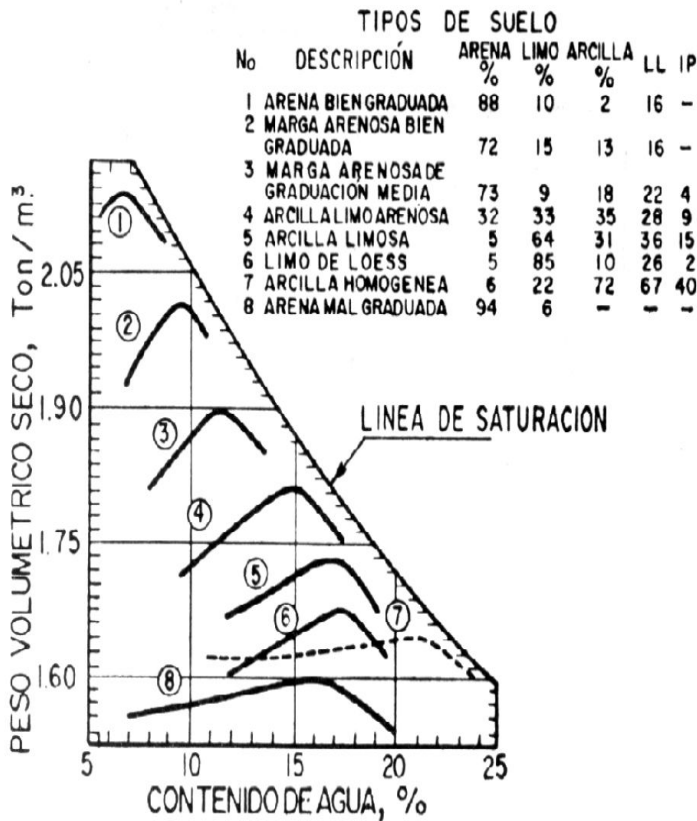


Figura 4. Compactación de suelos cohesivos y no cohesivos (Rico Castillo 2000)

Tabla 2. Relaciones aproximadas. (Nuñez 1974)

Proctor Normal ($\gamma_{dmax}N$)
$\omega_{op} = LP - 5$ (Para $\omega_{op}=10$)
$\omega_{op} = LP - 2$ (Para $\omega_{op}=30$)
$\omega_{op} = 6.77 + 0.43.LL - 0.21.IP$
$(\gamma_{dmax}N) = 2.09 - 0.0013.LL - 0.005.IP$
Proctor Modificado ($\gamma_{dmax}M$)
$\omega_{op} = LP - 7$
$\omega_{op} = LP - 2$ (Para $\omega_{op}=10$)
$\omega_{op} = LP - 5$ (Para $\omega_{op}=30$)
$\omega_{op} = 6.77 + 0.43.LL - 0.21.IP$
$(\gamma_{dmax}M) = (\gamma_{dmax}N) + 0.11$. (Para $\gamma_{dmax} = 2.05 \text{ tn/m}^3$)
$(\gamma_{dmax}M) = (\gamma_{dmax}N) + 0.13$. (Para $\gamma_{dmax} = 1.45 \text{ tn/m}^3$)

LL= Limite Liquido, LP= Limite Plástico, IP= Índice de plasticidad.

3.2 Permeabilidad

La permeabilidad de un suelo compactado varía con la relación de vacíos, el grado de saturación y su estructura. Se puede correlacionar también con la humedad de compactación.

Las permeabilidades más altas se obtienen cuando se compacta con humedades por debajo de la óptima. Al incrementar el contenido de agua la permeabilidad disminuye.

En la figura 5 se puede observar que existe una diferencia de un orden de magnitud entre el coeficiente de permeabilidad compactando con humedades mayores y menores que la óptima. Para muestras compactadas del lado seco del óptimo $k = 3.5 \cdot 10^{-6} \text{ cm/s}$ y del lado húmedo $k = 1.5 \cdot 10^{-7} \text{ cm/s}$.

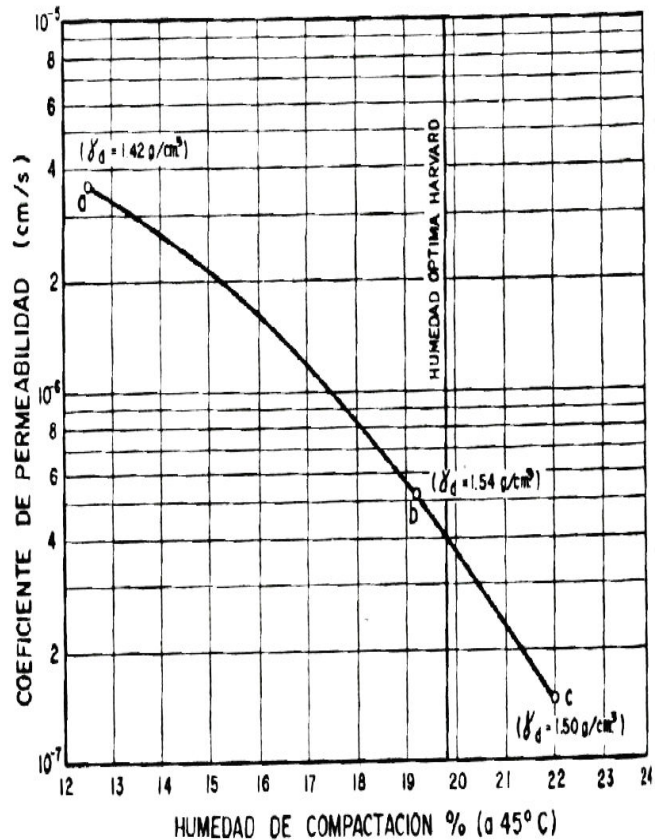


Figura 5. Variación del coeficiente de permeabilidad en función de la humedad de compactación en un limo yesífero saturado con contrapresión de 6 kg/cm^2 (Rico Castillo 2000).

3.3 Estabilidad volumétrica

Los suelos arcillosos son propensos a sufrir cambios volumétricos. Al compactarlos con humedades inferiores a la óptima exhiben una mayor tendencia al hinchamiento dado por la mayor succión y tendencia a absorber agua.

Lo contrario ocurre al compactar con humedades superiores a la óptima, el suelo tiende a sufrir contracción cuando se lo expone a pérdida de humedad.

La expansión también está relacionada con el método de compactación. Los suelos compactados con métodos estáticos tienen en general mayores expansiones que cuando son compactados con rodillos. A su vez la expansión crece casi linealmente con el aumento de la energía de compactación (Rico Castillo 2000).

3.4 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica depende fundamentalmente de la concentración de sales, del volumen de vacíos y del grado de saturación y en menor grado del tamaño de las partículas y temperatura.

Se puede relacionar con el peso unitario seco manteniendo la humedad constante. Esta característica puede ser utilizada para el control de compactación en terraplenes donde la humedad es uniforme.

En la figura 6 se muestra la variación de la resistividad para diferentes pesos unitarios en función del contenido volumétrico de agua.

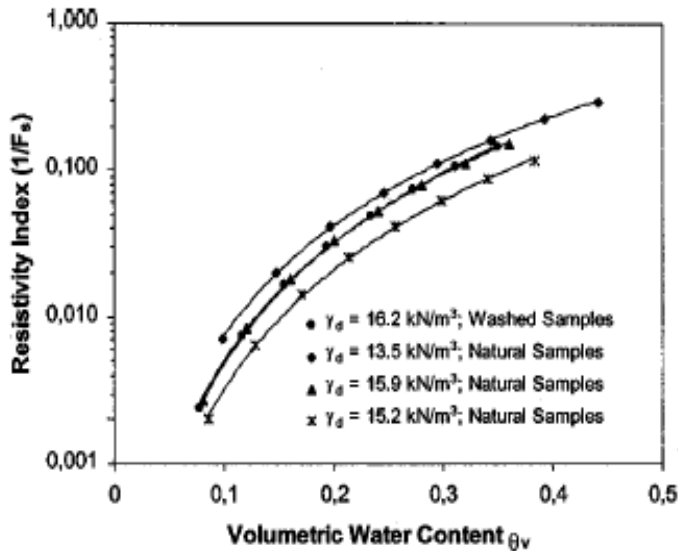


Figura 6. Variación de el índice de resistividad eléctrica en función del contenido volumétrico de agua para un loess (Rinaldi 2002).

4 INFLUENCIA DE LA COMPACTACIÓN EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS

4.1 Resistencia

Los suelos compactados son suelos remodelados que han perdido su estructura original y su cementación, al menos a escala macro. La compactación, como proceso mecánico, reduce los vacíos de ese suelo remodelado pero no restituye la estructura ni la cementación perdida.

Para suelos remodelados, una menor relación de vacíos está siempre asociada a un mayor ángulo de fricción interna, una mayor dilatancia y, por lo tanto, una mayor resistencia al corte, tanto drenada como no drenada.

La evidencia experimental es que la envolvente de resistencia intrínseca de los suelos compactados es curva. Como el material está remodelado, la cohesión efectiva es siempre cero y por lo tanto el ángulo de fricción interna depende de la presión de ensayo, o sea

$$s = \sigma \tan[\phi[p]] \quad (3)$$

En la práctica, la envolvente de resistencia intrínseca se reemplaza por la recta correspondiente al criterio de rotura de Mohr – Coulomb

$$s = c + \sigma \tan[\phi] \quad (4)$$

por lo que aparece un término de cohesión. Debe notarse que esta cohesión no es una propiedad física del material sino un parámetro de la ecuación 4.

En la figura 7 se muestra la dependencia de la cohesión y del ángulo de fricción interna en función del grado de compactación para un loess y loess modificado (Núñez1974).

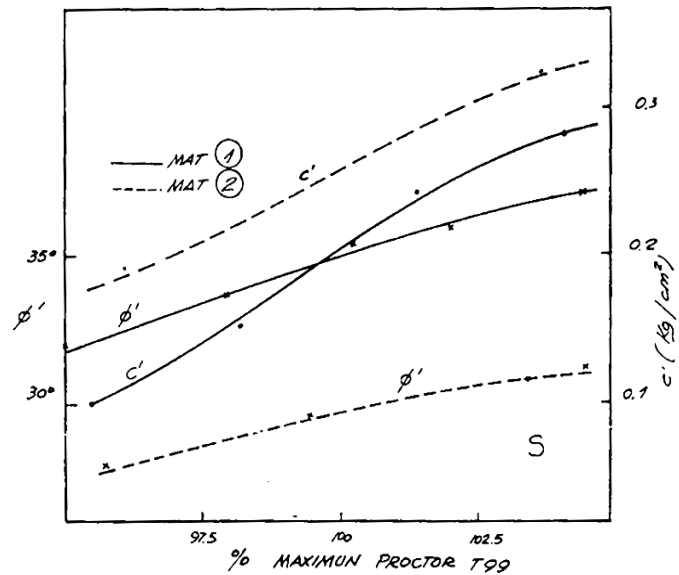


Figura 7. Variación de C' y ϕ' en función del grado de compactación. (Núñez 1974)

En términos de tensiones totales, el grado de saturación de una muestra compactada ensayada con la humedad de compactación influye en su resistencia.

En el caso de ensayos triaxiales no drenados con muestras ensayadas con su humedad de compactación, al aumentar la humedad de compactación disminuye la resistencia. Si las muestras se saturan, su resistencia depende únicamente del peso unitario, pero la forma de la curva depende de la humedad de compactación. A mayores humedades la rigidez disminuye como se puede ver en la figura 8.

La diferencia en la resistencia es causada por el ordenamiento de la estructura al compactar con humedades mayores que la óptima que genera mayores presiones neutras.

Cuando se ejecutan ensayos drenados de muestras compactadas al mismo peso unitario con diferentes humedades y energías de compactación, la resistencia aumenta con el aumento de la humedad de compactación.

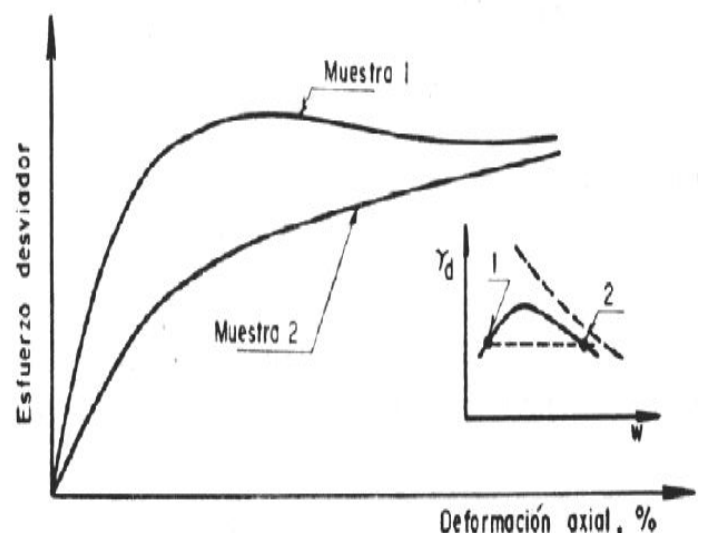


Figura 8. Relación tensión – deformación para muestras saturadas. Ensayo no drenado (Rico Castillo 2000).

4.2 Rigidez

La rigidez de un conjunto de partículas no cementadas es función de la presión media y de la relación de vacíos o sea

$$\sigma = E[p, e]\varepsilon \quad (5)$$

En el caso de los suelos reales compactados, intervienen otros factores, como la estructura de partículas, la cementación de pequeños fragmentos, la plasticidad, etcétera.

En términos generales, la rigidez crece con la presión media y con el peso unitario seco. La humedad de compactación, el grado de saturación y las condiciones de compactación tienen efectos significativos sobre la rigidez.

En esta tesis se estudia la relación entre la rigidez a baja deformación y el peso unitario seco de un suelo compactado, por lo que el tema será tratado en detalle más adelante en este documento.

5 TÉCNICAS DE COMPACTACIÓN

La eficiencia del método de compactación depende en todos los casos del tipo de suelo, en tanto se trate de suelos no cohesivos o cohesivos.

El peso unitario obtenido depende de los métodos de compactación conforme las siguientes variables: energía específica entregada por el equipo utilizado en la compactación, tipo de suelo, espesor de la capa y humedad de compactación.

Para mensurar dichas variables, resulta adecuado realizar ensayos de laboratorio.

5.1 Rodillos lisos

En el caso de los suelos no cohesivos la compactación con rodillos lisos o neumáticos resulta ser efectiva.

La compactación se realiza desde las capas superiores hacia las inferiores en cada pasada del equipo, por lo que el peso unitario varía con la profundidad. La energía de compactación se materializa con pasadas de rodillo.

5.2 Rodillos vibratorios

Combinan la vibración con la presión del rodillo. En este caso la energía de compactación depende de la velocidad de avance. Es utilizado con mejores resultados en suelos granulares con algún contenido de finos. La vibración permite llegar a capas más profundas que la sola aplicación de una carga estática.

En la figura 9 se puede observar la diferencia del peso unitario en el caso de un suelo compuesto por grava, arena y arcilla compactado con o sin vibración es de aproximadamente 1 kN/m^3 . En la figura 10 se muestra un rodillo vibratorio.

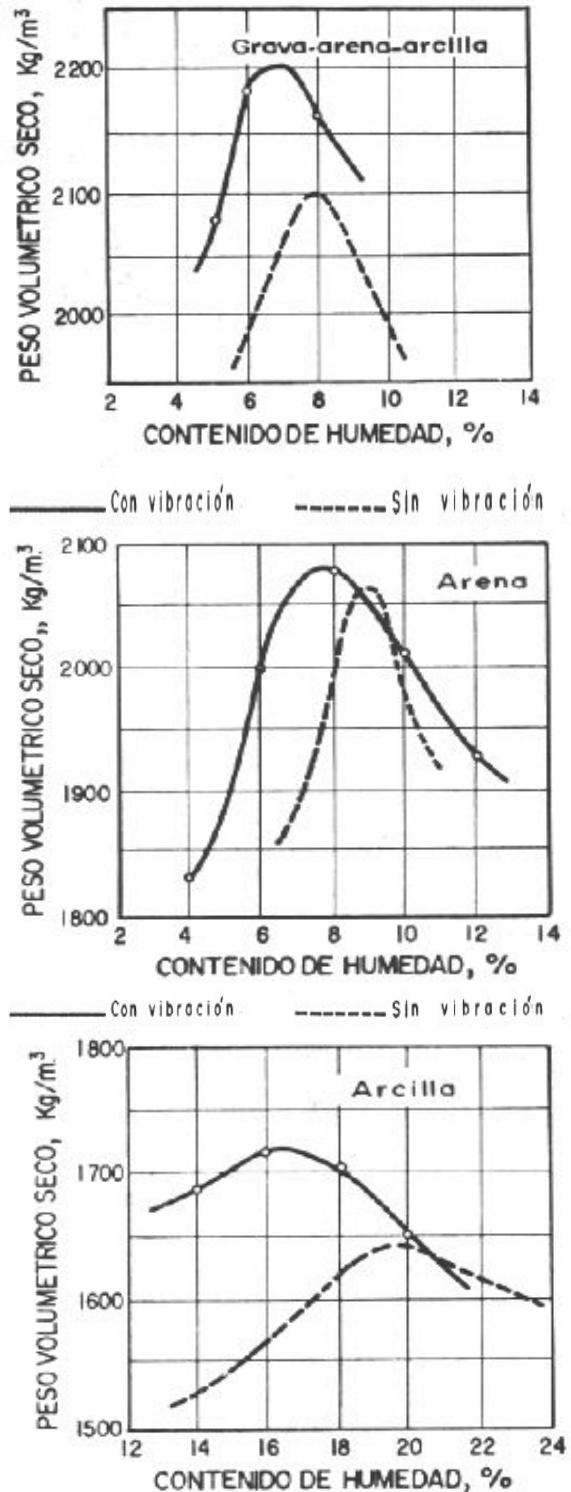


Figura 9. Peso unitario seco luego de la compactación con y sin vibración (Rico Castillo 2000).



Figura 10. Rodillo vibratorio.

5.3 Pata de cabra

En algunos suelos cohesivos los métodos anteriores pueden resultar ineficientes, por lo que se utilizan los rodillos con la denominada pata de cabra. De esta forma se destruyen los terrones que suelen formarse en suelos arcillosos.

La compactación se inicia desde las capas inferiores a las superiores como consecuencia de la penetración de la pata de cabra. En la figura 11 se muestra un rodillo con pata de cabra.



Figura 11. Rodillo con pata de cabra .

5.4 Apisonadores manuales

Se emplean en espacios reducidos y en sectores de difícil acceso. En la figura 12 se muestra un apisonador manual.



Figura 12. Apisonador manual.

6 CONTROL DE COMPACTACIÓN

Con la finalidad de determinar el grado de compactación y las condiciones necesarias para conseguirlo, fueron desarrollados distintos tipos de ensayos. Existen ensayos que miden la densidad in situ del suelo compactado y otros que miden alguna propiedad que depende de esta densidad, o sea, son ensayos indirectos de compactación.

6.1 Grado de compactación

El grado de compactación se define como el cociente entre el peso unitario obtenido en el terreno y el peso unitario seco del ensayo de compactación elegido como referencia.

$$C_{\%} = \frac{\gamma_d}{\gamma_{d,max}} \quad (6)$$

6.2 Ensayos de densidad in situ

6.2.1 Volumenómetro

El ensayo del volumenómetro permite obtener el volumen de suelo de una excavación de diámetro y profundidad reducidos. Por separado se pesa el suelo extraído y se calcula su humedad, con lo que se obtienen los datos necesarios para calcular el peso unitario seco.

El equipo posee una membrana expansible que se introduce en la excavación y se llena con agua hasta completar el espacio dejado por el suelo extraído. En la figura 13 se muestra un volumenómetro.



Figura 13. Volumenómetro.

6.2.2 Cono de arena

Este ensayo se diferencia del volumenómetro en que la excavación se rellena con arena previamente calibrada y graduada. Conociendo el peso de la arena utilizada se determina el volumen de la excavación. El método permite excavaciones de mayor tamaño que el volumenómetro y superficies de la excavación más rugosas. En la figura 14 se muestra un dispositivo de cono de arena.



Figura 14. Cono de arena.

6.2.3 Otros

Cuando los suelos a ensayar contienen partículas grandes, el método del volumenómetro y del cono de arena es inefectivo porque el volumen que ensaya no es representativo. En este caso se utilizan excavaciones de mayor tamaño que se llenan con arena, agua o materiales granulares sintéticos. En la figura 15 se muestra uno de estos ensayos.



Figura 15. Medición de densidad in situ en suelos con partículas grandes.

6.3 Mediciones indirectas

6.3.1 Resistividad

Mediante la utilización de electrodos colocados en la rueda de un vehículo es posible medir la resistividad eléctrica del suelo y relacionarla con el volumen de vacíos.

Este método permite realizar muchas mediciones en poco tiempo obteniendo lecturas en áreas y detectar zonas de inhomogeneidades en el terraplén. Variando la distancia de los electrodos es posible medir a grandes profundidades. En la figura 16 se muestra el equipo de ensayo (Ueno 2003).

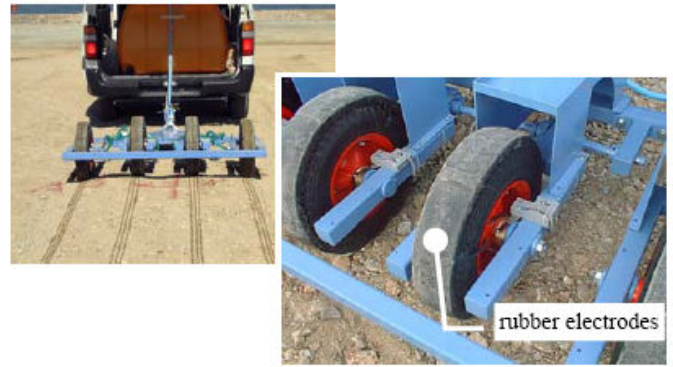


Figura. 16. Equipo de control mediante electrodos (Ueno 2003).

6.3.2 Nucleodensímetro

Mediante la medición de la absorción de de isótopos radiactivos se puede estimar el peso unitario y la humedad del terreno, previa calibración en un terraplén del mismo suelo con peso unitario conocido. Este método es rápido y eficiente, pero es costoso porque involucra materiales potencialmente peligrosos y contaminantes que requieren permisos especiales de manipulación. En la figura 17 se muestra un nucleodensímetro.



Figura 17. Nucleodensímetro.

6.3.3 Carga dinámica

Aplicando una carga sinusoidal a la superficie de la capa compactada y midiendo su respuesta dinámica se puede obtener el modulo de elasticidad, que se correlaciona con el grado de compactación previa calibración en un terraplén del mismo suelo con peso unitario conocido. Es un método sencillo, rápido y no requiere especialización. En la figura 18 se muestra un equipo de control de compactación mediante carga dinámica.



Figura 18. Equipo de control mediante carga dinámica.

7 RELACIONES HUMEDAD – PESO UNITARIO

Los suelos cohesivos presentan características diferentes si fueron compactados con humedades mayores o menores que la óptima. Se observan diferencias de permeabilidad, orientación de las partículas, compresibilidad y variaciones volumétricas.

7.1 Estructura de los suelos compactados del lado seco del óptimo

La rigidez de un suelo compactado con una humedad menor que la óptima es mayor que la que muestra el mismo suelo a la misma densidad, compactado con una humedad mayor que la óptima.

Para bajas humedades, la concentración de carga en las caras de las partículas generan repulsión y tendencia al hinchamiento. A su vez la succión es alta, lo que favorece el desarrollo de una estructura desorientada.

7.2 Estructura de los suelos compactados del lado húmedo del óptimo

Si se compacta con una humedad superior a la óptima, la forma de compactación tiene influencia en la estructura, compresibilidad y resistencia del suelo.

La compactación con humedades mayores que la óptima permite obtener un material de comportamiento más dúctil que permite una mayor capacidad de adaptación a los asentamientos.

La estructura en este caso resulta más orientada. Se presume que las partículas comienzan a orientarse a medida que se aumenta la humedad porque las fuerzas de repulsión y capilares disminuyen con un mayor contenido de humedad.

Aumentando la energía de compactación a humedad constante, también se produce el mismo efecto.

En la Figura 19 se esquematiza la estructura de un suelo cohesivo compactado del lado seco y húmedo.

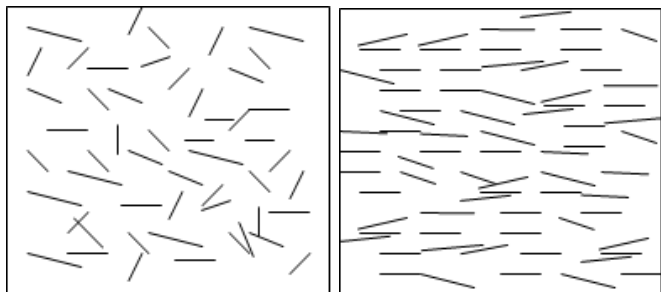


Figura 19. Estructura dispersa que se obtiene cuando se compacta del lado seco del óptimo y orientada del lado húmedo del óptimo.

7.3 Compactación alcanzable

El peso unitario seco de un suelo con un determinado contenido de humedad aumenta con la energía de compactación hasta un valor máximo que es el que

corresponde a la expulsión total del aire contenido en la mezcla suelo – agua – aire.

El peso unitario saturado teórico es el que se alcanzaría si se expulsara todo el aire del material

$$\gamma_{sat,teo} = \frac{\gamma_s (1 + \omega)}{1 + \omega \cdot \gamma_s / \gamma_w} \quad (7)$$

mientras que el peso unitario seco teórico corresponde al mismo material seco a peso constante

$$\gamma_{d,teo} = \frac{\gamma_s}{1 + \omega \cdot \gamma_s / \gamma_w} \quad (8)$$

En la figura 20 se observa que la curva de γ_{dteo} es la asíntota superior a γ_d .

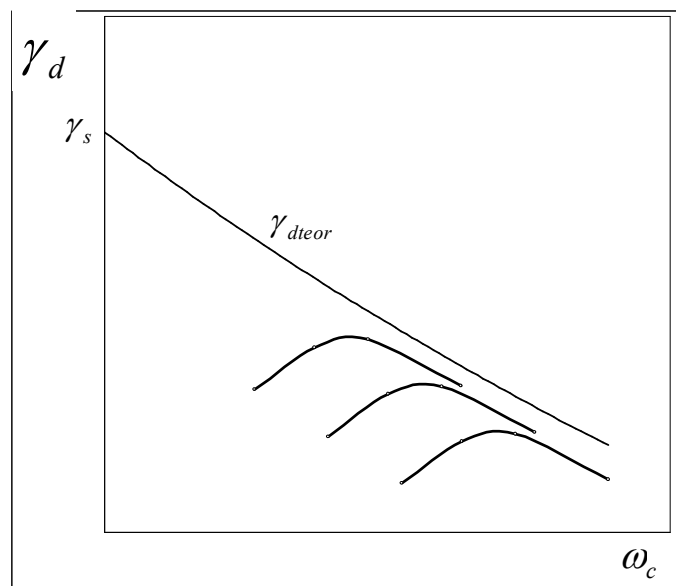


Figura 20. Curvas γ_d y $\gamma_{d,teo}$ vs. humedad de compactación.

REFERENCIAS

- Holtz, R., Kovacs, D. (1981). An introduction to geotechnical engineering. 1° edición, Prentice – Hall, 733 p.
- Juarez Badillo, E., Rico Rodríguez, A. (1974). Mecánica de suelos. Tomo I, 1° edición, Ed. Limusa, 642 p.
- Núñez, E., Vardé, O. (1974) –Curso de Mecánica de Suelos. Centro Argentino de Ingenieros, 334 p.
- Núñez, E. (1976) Propiedades de los suelos compactados. Publicación FIUBA.
- Rico Rodríguez, A. del Castillo, A. (1974). La ingeniería de suelos en las vías terrestres. Ed. Limusa, 666 p.
- Rinaldi, V., Cuestas, G. (2002). Ohmic Conductivity of a Compacted Silty Clay. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 128, 10, 824-835.
- Sagüés, P. (2008). Rigidez a baja deformación en el Pampeano Compactado. Tesis de grado, LMS, FIUBA.
- Nobumasa, U., Knonsuke, N, Makoto, N, Tamotsu, M. (2002). Development and Applicability of a Construction Control Technique for Embankment Using Apparent Resistivity. J Tsuchi to Kiso, 48 (4) 29-32.