

CAPÍTULO 14

COMPACTACIÓN DE SUELOS

14.1 DEFINICIÓN

Es la densificación del suelo por medios mecánicos. El objetivo, mejorar la resistencia y estabilidad volumétrica, afectando la permeabilidad, como consecuencia del proceso de densificación de la masa.

14.2 ESTABILIZACIÓN DE SUELOS. Concepto más amplio y general que el de COMPACTACIÓN, pues incluye cualquier procedimiento útil para mejorar las propiedades ingenieriles del suelo, como estructura.

La estabilización comprende:

- Compactación
- Mezcla granulométrica
- Adición de compuestos especiales (antes de mezcla y/o compactación)

Los estabilizantes son de tres tipos:

- Cemento
- Material bituminoso (asfalto, por ejemplo)
- Productos químicos (óxidos e hidróxidos de Ca, cloruro de Ca y Na, cloruro férrico, silicato Na y resinas)

14.3 MEDIDA DE LA COMPACIDAD DEL SUELO.

Se califica la compacidad por la comparación cuantitativa de las densidades secas o pesos unitarios secos, γ_d , que el suelo va adquiriendo gradualmente, al variar la humedad, la energía o el método de compactación.

14.4 MÉTODO PROCTOR.

Consiste en compactar el material dentro de un molde metálico y cilíndrico, en varias capas y por la caída de un pistón. Existen dos variaciones del MÉTODO PROCTOR.

- Proctor estándar o normal, con pistón de 5 ½ lbs, h = 12'', N = 25 golpes y 3 capas a compactar. El molde de $\phi = 4''$ y volumen 1/30 ft³.
- Proctor modificado, con pistón de 10 lbs, h = 18'', N = 25 golpes, y compactando en 5 capas, con el mismo molde.

14.4.1 Curva de humedad – densidad o de COMPACTACIÓN. Esta curva da la variación, γ_d Vs ω , que se obtiene en laboratorio. La densidad seca (y también el γ_d) va variando al modificar la humedad, ω , de compactación.

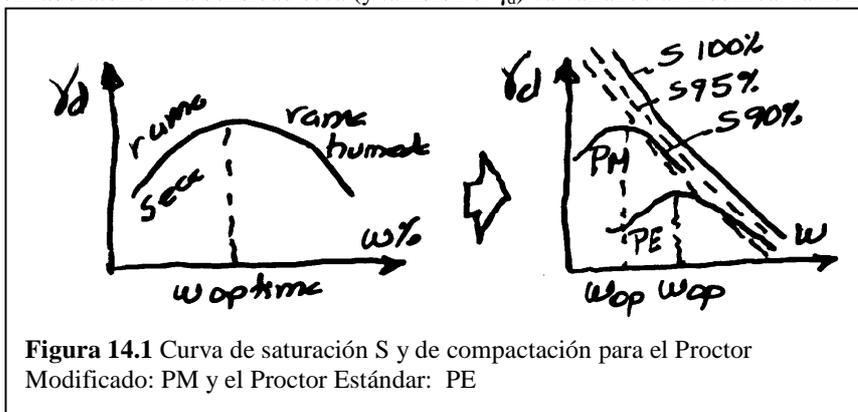


Figura 14.1 Curva de saturación S y de compactación para el Proctor Modificado: PM y el Proctor Estándar: PE

La humedad óptima es la que se corresponde con el máximo de la curva de densidad. La rama seca es la que se corresponde al suelo bajo de humedad, donde la fricción y cohesión dificultan su densificación. La rama húmeda, es asíntota a la línea de saturación, que se desplaza hacia la derecha de la humedad

óptima de compactación, dado que la energía de compactación de un suelo muy húmedo la absorbe el agua y no el esqueleto mineral.

La curva de saturación, o de contenido de aire nulo, es dibujada como auxiliar para el análisis, es teórica y no depende de los resultados del ensayo. La ecuación es:

$$\gamma_d = \frac{G_s * \gamma_w}{1 + \frac{\omega * G_s}{S}}$$

$$\begin{cases} G_s = \text{Gravedad específica} \\ \gamma_w = \text{Peso unitario del agua} \\ \omega = \text{Humedad del suelo} \\ S = \text{Grado de saturación} \end{cases}$$

Para $S = 1$ y $\gamma_w = 1$, se tiene $\gamma_d = \frac{G_s}{1 + \omega * G_s}$. Esto facilita el dibujo rápido de la curva $S = 100\%$. La curva S de los valores de γ_d que debe tener el suelo saturado para cada valor de ω .

En la compactación, sale aire, y no agua. Como es imposible sacarlo todo, la curva de compactación no podrá llegar a confundir su rama húmeda con la curva $S = 100\%$. Esta propiedad nos permite tener en evidencia errores en la curva γ_d Vs ω .

Las otras curvas ($S = 80\%$, por ejemplo) dicen qué porcentaje de aire queda en el suelo (20%, por ejemplo).

14.4.2 Penetrómetro Proctor. Herramienta que se hinca a mano. Se trata de una aguja o varilla con un dispositivo para medir la fuerza requerida (en libras), para que la penetre (variable en tamaño y forma) profundice en el suelo 3'' por lo general. La operación se hace en laboratorio y en campo, simultáneamente, para comparación de γ_d , o de la humedad si se quiere. (No debe existir grava en el suelo).

14.4.3 Energía de compactación. La calidad de la compactación depende de: Contenido de humedad, método de compactación y energía de compactación. (ver fig ω Vs $\gamma_d - \sigma$ y # de pasadas Vs γ_d)

En el ensayo proctor, la energía específica E_e , está dada por:

$$E_e = n * N * W * h / V$$

Siendo $N = \#$ de capas; $n = \#$ de golpes; $W =$ peso del pistón; $h =$ altura de caída del pistón; $V =$ volumen del molde y muestra. La AASHTO (departamento de carreteras de USA), tiene dos normas: La T99 para el proctor estándar que exige $E_e = 6,03 \text{ Kg cm/cm}^3$ y la T180, para proctor modificado, con $E_e = 27,4 \text{ Kg cm/cm}^3$. Ambas normas aplicables a materiales "Pasa tamiz #4".

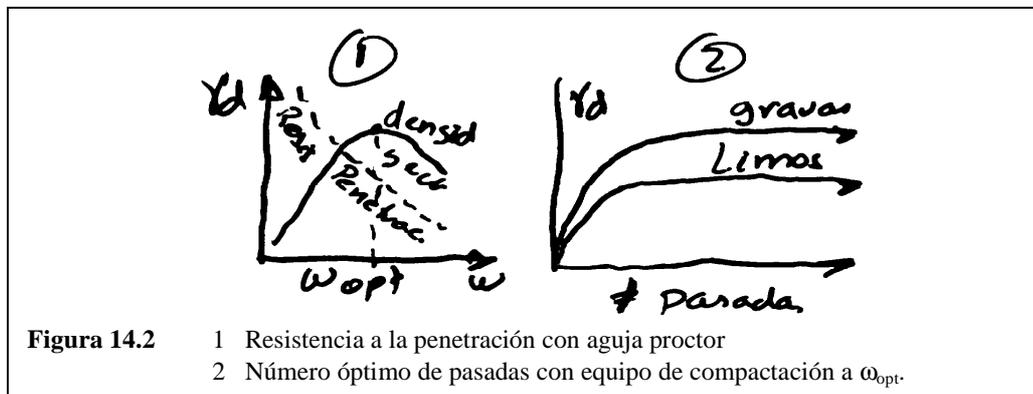


Figura 14.2 1 Resistencia a la penetración con aguja proctor
2 Número óptimo de pasadas con equipo de compactación a ω_{opt} .

14.5 VARIABLES DEL PROCESO.

Son 3: Suelo, método y energía:

- a. Suelo: Puede ser granular (friccionante) o fino (cohesivo)
- b. Método de compactación: En campo (rodillos); en laboratorio (varios).
- c. Energía: Energía específica, temperatura y humedad.

Los métodos de laboratorio son impacto, amasado y de carga estática. Ellos dan resultados diferentes y afectan las condiciones del suelo de manera distinta.

La compactación de campo se hace con rodillos lisos, neumáticos o con “pata de cabra”. Los rodillos pueden ser vibratorios y los sistemas suelen hacerse mixtos. Se pueden usar ranas o canguros (vibrocompactadores), en áreas pequeñas.

En carga estática, la E_c es difícil de evaluar y está afectada por el tiempo de aplicación y la deformabilidad del suelo.

En amasado, la E_c es más difícil y compleja de evaluar, pero se puede cuantificar variando el número y espesor de las capas, y la presión de apisonado y número de aplicaciones.

El contenido de agua ω del suelo se relaciona con la permeabilidad. En arcillas se dan tensiones capilares que favorecen la formación de grumos que dificultan la compactación. El resultado no es el mismo, en γ_d , aumentando agua que esperando a que el suelo la pierda; es decir, compactando por la rama húmeda o por la rama seca, pues el suelo tarda tiempo en admitir agua que se agrega, en el primer caso.

En suelos recompactados, el resultado es diferente al de los suelos vírgenes. Los pesos unitarios resultan mayores.

La temperatura genera evaporación o condensación, con lo que se afecta la humedad del suelo. Esto obliga a compactar iniciando con humedades diferentes a la óptima.

El equipo puede condicionar la humedad de trabajo, obligándose a una humedad diferente a la óptima.

14.6 MÉTODOS DE CAMPO

Amasado →	Rodillo pata de cabra	PC
Presión →	Rodillo neumático o liso, tractor	RN, RL, TR
Impacto →	Canguro y pisones	C, P
Vibración →	Rodillos y ranas	RV, R
Mixtos →	Presión y vibración	PV

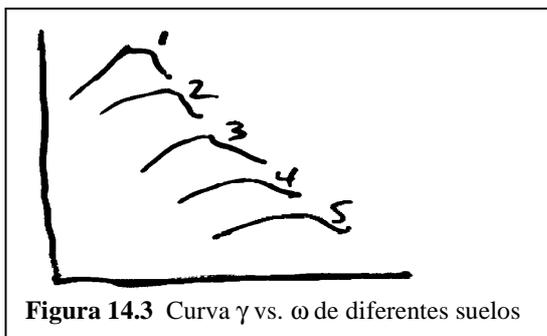


Figura 14.3 Curva γ vs. ω de diferentes suelos

Comparación de diferentes suelos

1 =	Cascajo arenoso.	2,19 $\frac{gr}{cm^3}$	$\omega = 8\%$
2 =	Arena.	2,00 $\frac{gr}{cm^3}$	$\omega = 12\%$
3 =	Arcilla arenosa.	1,84 $\frac{gr}{cm^3}$	$\omega = 14\%$
4 =	Arcilla limosa.	1,65 $\frac{gr}{cm^3}$	$\omega = 15\%$
5 =	Arcilla plástica.	,62 $\frac{gr}{cm^3}$	$\omega = 18\%$

14.7 DENSIDAD DE CAMPO.

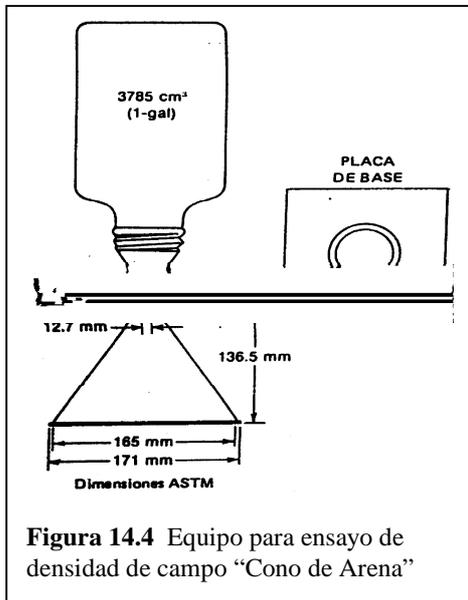


Figura 14.4 Equipo para ensayo de densidad de campo “Cono de Arena”

Se hace un hueco en el terreno, de forma cilíndrica; se pesa el suelo extraído en estado húmedo y seco, y el volumen, que es el del hueco, se mide llenándolo de arena curzosa (de Ottawa o Guamo, Tolima), que debe lavarse y gradarse periódicamente. En su defecto, con aceite grueso o con una vejiga de agua, siendo este último un método poco exacto.

Grado de compactación: Se mide de dos posibles maneras, con el porcentaje de compactación G_C , o con la relación de compactación C_r

$$G_C = \left[\frac{\gamma_d}{\gamma_{dMAX}} \right] * 100 \qquad C_r = \frac{\gamma_d - \gamma_{dMIN}}{\gamma_{dMAX} - \gamma_{dMIN}} * 100$$

$G_C = 90\%$ es el mínimo para pocas exigencias de resistencia e incompresibilidad.

$G_C = 95\%$ es el mínimo para terraplenes.

$G_C = 100\%$ es el mínimo para subrasante.

Relaciones de compactación entre los suelos, según SUCS.

Suelo	Posibilidades	Equipo recomendable en campo	Valores típicos
GW	+++	TR, RN, RL, PV	1,9 – 2,1 $\frac{TT}{m^3}$
GP	++	TR, RN, RL, PV	1,8 – 2,0
GM	++	RN, PC	1,9 – 2,2
GC	+	RN, PC	1,8 – 2,1
SW	+++	TR, RN, PV	1,7 – 2,0
SP	++	TR, RN, PV	1,6 – 1,9
SM	++	RN, PC	1,7 – 2,0
SC	+	RN, PC	1,6 – 2,0
ML	-	RN, PC	1,5 – 1,9
CL	+	PC, RN	1,5 – 1,9
OL	---	PC, RN	1,3 – 1,6
MH	--	PC, RN	1,1 – 1,6
CH	--	PC	1,3 – 1,7
OH	---	PC	1,0 – 1,6
Pt	No utilizar		

Regresar a Contenido del libro M d S