

2. RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO

2.1. Introducción

En un suelo se distinguen tres fases constituyentes: la sólida, la líquida y la gaseosa. La fase sólida son las partículas minerales del suelo (incluyendo la capa sólida adsorbida¹); la líquida por el agua (libre), aunque en el suelo pueden existir otros líquidos de menor significación; la fase gaseosa comprende sobre todo el aire, pero pueden estar presentes otros gases (vapores sulfurosos, anhídrido carbónico, etc.).

Las fases líquida y gaseosa del suelo suelen comprenderse en el volumen de vacíos (V_v), mientras que la fase sólida constituye el volumen de sólidos (V_s).

Se dice que un suelo está totalmente saturado cuando todos sus vacíos están ocupados por agua. Un suelo en tal circunstancia consta, como caso particular de solo dos fases, la sólida y la líquida.

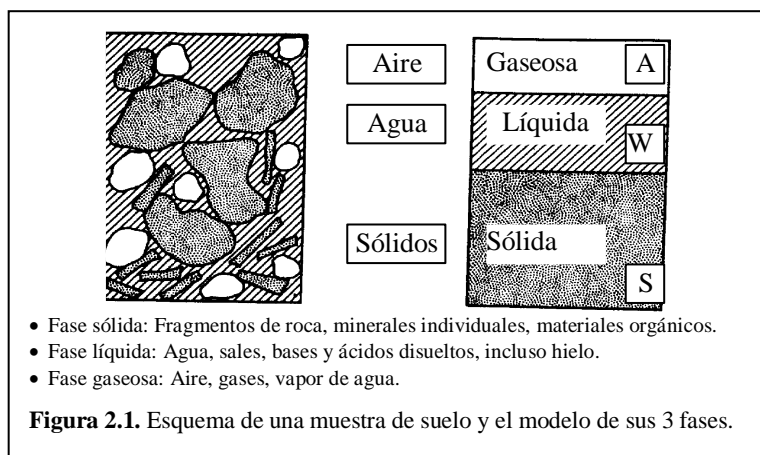
Es importante considerar las características morfológicas de un conjunto de partículas sólidas, en un medio fluido: eso es el suelo.

Las relaciones entre las diferentes fases constitutivas del suelo (fases sólida, líquida y gaseosa), permiten avanzar sobre el análisis de la distribución de las partículas por tamaños y sobre el grado de plasticidad del conjunto.

En los laboratorios de mecánica de suelos se determina fácilmente el peso de la muestra húmeda, el peso de la muestra secada al horno, el volumen de la muestra y la gravedad específica de las partículas que conforman el suelo, entre otras.

Las relaciones entre las fases del suelo tienen una amplia aplicación en la Mecánica de Suelos para determinar la masa de un suelo, la magnitud de los esfuerzos aplicados al suelo por un cimiento y los empujes sobre estructuras de contención.

La relación entre las fases, la granulometría y los límites de Atterberg se utilizan para clasificar los suelos, permitiendo, además estimar su comportamiento.



¹ **Agua adsorbida:** La que se encuentra en una masa de suelo o roca, íntimamente ligada a las partículas sólidas por efecto de las fuerzas electroquímicas, y cuyas propiedades pueden diferir de las propiedades del agua en los poros a la misma presión y temperatura, debido a la alteración de la distribución molecular. El agua adsorbida no puede ser removida por calentamiento a 110°C. (Geotecnia, diccionario básico, Fabián Hoyos Patiño. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Medellín, 2001).

Modelar el suelo es colocar fronteras que no existen. El suelo es un modelo discreto, y eso entra en la modelación con dos parámetros, e y η (relación de vacíos y porosidad), y con la relación de fases.

El agua adherida a la superficie de las partículas o "agua adsorbida" se considera como de la fase sólida. En la fase líquida se considera el agua libre que se puede extraer por calentamiento a temperatura de 105 °C cuando, después de 18 o 24 horas, el peso del suelo no disminuye más y permanece constante.

2.2. Fases, volúmenes y pesos

En el modelo de fases, se separan volúmenes (V) y pesos (W) así: Volumen total (V_T), volumen de vacíos (V_V), que corresponde al espacio no ocupado por los sólidos; volumen de sólidos (V_S), volumen de aire (V_A) y volumen de agua (V_W). Luego

$$V_T = V_V + V_S \quad (2.1)$$

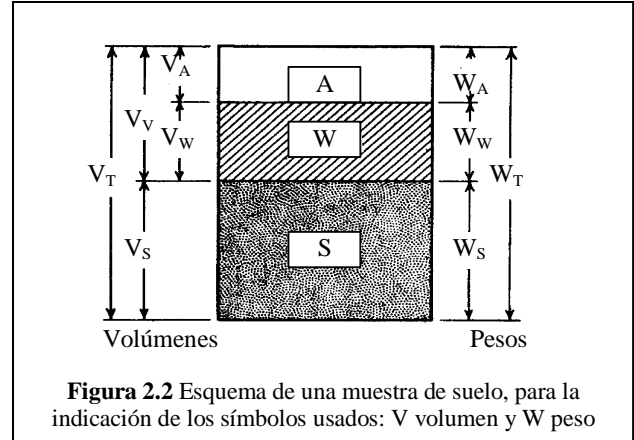


Figura 2.2 Esquema de una muestra de suelo, para la indicación de los símbolos usados: V volumen y W peso

y

$$V_V = V_A + V_W \quad (2.2)$$

En los pesos (que son diferentes a las masas), el peso del aire se desprecia, por lo que $W_A = 0$. El peso total del espécimen o de la muestra (W_T) es igual a la suma del peso de los sólidos (W_S) más el peso del agua (W_W); esto es

$$W_T = W_S + W_W \quad (2.3)$$

2.3. Relaciones de volumen: η , e , D_R , S , C_A

2.3.1. Porosidad η .

Es una relación, expresada como un porcentaje, entre: a) el volumen de espacios vacíos de un suelo, y b) el volumen total de la muestra. O sea es la probabilidad de encontrar vacíos en el volumen total. Por eso $0 < \eta < 100\%$ (se expresa en %). En un sólido perfecto $\eta = 0$; en el suelo $\eta \neq 0$ y $\eta \neq 100\%$.

$$\eta = \frac{V_V}{V_T} * 100(\%) \quad (2.4)$$

2.3.2. Relación de vacíos e .

Es una relación entre: a) el volumen de espacios vacíos, y b) el volumen de las partículas sólidas en una masa de suelo. Su valor puede ser menor a 1, y puede alcanzar valores muy altos.


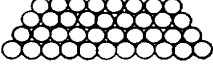
	Estado más suelto. $\eta = 47,6\%$; $e = 0,91$
	Estado más compacto. $\eta = 26\%$; $e = 0,35$

Figura 2.3 Compacidad de un conjunto de esferas iguales.

En teoría $0 < e \rightarrow \infty$.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (2.5)$$

El término compacidad se refiere al grado de acomodo alcanzado por las partículas del suelo dejando más o menos vacíos entre ellas. En suelos compactos, las partículas sólidas que lo constituyen tienen un alto grado de acomodo y la capacidad de deformación bajo la aplicación de cargas será pequeña. En suelos poco compactos el volumen de vacíos y la capacidad de deformación serán mayores. Una base de comparación para tener la idea de la compacidad alcanzada por una estructura simple se tiene estudiando la disposición de un conjunto de esferas iguales. En la figura 2.3 se presenta una sección de los estados más suelto y más compacto posible de tal conjunto. Pero estos arreglos y los cálculos matemáticos son teóricos.

Los parámetros adicionales η y e (siempre $\eta < e$), se relacionan así: como V_v/V_s es la relación de vacíos, entonces:

$$\frac{V_v}{V_s} = \frac{V_v}{V_T - V_v} = \frac{\frac{V_v}{V_T}}{1 - \frac{V_v}{V_T}} \Rightarrow e = \frac{\eta}{1 - \eta} \quad (2.6) \quad \eta = \frac{e}{1 + e} \quad (2.7)$$

Con la práctica, para suelos granulares, los valores típicos son:

Arena bien gradada	$e = 0,43 - 0,67$	$\eta = 30 - 40\%$
Arena uniforme	$e = 0,51 - 0,85$	$\eta = 34 - 46\%$

2.3.3. Densidad relativa D_R . (Compacidad relativa)

Es la medida de la compactación de un suelo dada por la relación porcentual entre: a) la diferencia de la relación de vacíos de un suelo no cohesivo en su estado más suelto y

$$D_R = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (2.8)$$

cualesquier relación de vacíos del suelo compactado, y b) la diferencia entre relaciones de vacíos en su estado más suelto y más denso. Este parámetro permite determinar si un suelo está cerca o lejos de los valores máximo y mínimo de densidad que se puede alcanzar.

Además $0 \leq D_R \leq 1$, siendo más resistente el suelo cuando $D_R \approx 0$ y menor cuando $D_R \approx 1$. Algunos textos expresan D_R en función de γ_d .

$$\gamma_d \leq \gamma_T \leq \gamma_{sat} \quad (2.11)$$

Generalmente, los suelos cohesivos tienen mayor proporción de vacíos que los granulares.

$$S = \frac{V_w}{V_v} \times 100 \quad (\%) \quad (2.9)$$

2.3.4. Grado de saturación (S).

Se define como el grado o la proporción en que los espacios vacíos de un suelo o una roca contienen fluido (agua, petróleo). Se expresa como un porcentaje en relación con el volumen total de vacíos. Es la relación porcentual entre el volumen de agua en una masa de suelo o roca, y el volumen total de espacios vacíos. Por lo que $0 \leq S \leq 100\%$. Físicamente en la naturaleza $S \neq 0\%$, pero admitiendo tal extremo, $S = 0\% \Rightarrow$ suelo seco y $S = 100\% \Rightarrow$ suelo saturado.

2.3.5. Contenido de humedad: ω

Es la cantidad relativa de agua que se encuentra en un suelo respecto a la masa de sólidos o al volumen del suelo analizado. Se expresa en porcentaje (%), y es la relación entre el peso del agua del espécimen, y el peso de los sólidos. El problema es ¿cuál es el peso del agua? Para tal efecto se debe señalar que existen varias formas de agua en el suelo. Unas requieren más temperatura y tiempo de secado que otras, para ser eliminada. En consecuencia, el concepto "suelo seco" también es arbitrario, como lo es el agua que se pesa en el suelo de la muestra. El suelo seco es el que se ha secado al horno, a temperatura de $105^\circ\text{C} - 110^\circ\text{C}$, durante 18 o 24 horas, hasta lograr un peso constante.

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} * 100 \quad (\text{en } \%) \quad (2.10)$$

El valor teórico del contenido de humedad varía entre: $0 \leq \omega \rightarrow \infty$. En la práctica, las humedades varían de 0 (cero) hasta valores del 100%, e incluso de 500% ó 600%, en suelos del valle de México.

NOTA: En compactación se habla de humedad (ω) óptima, la humedad de mayor rendimiento, con la cual la densidad del terreno alcanza a ser máxima. En la Figura 14.1, puede observar dos curvas de compactación para un mismo material, dependiendo el valor de la humedad óptima de la energía de compactación utilizada para densificar el suelo.

Relaciones Gravimétricas. Una masa de 1 Kg pesa distinto en la luna que en la tierra. El peso es fuerza, la masa no. La densidad relaciona masa y volumen, el peso unitario relaciona peso y volumen y la presión, fuerza y área.

El valor de la gravedad en la tierra es $g = 9,81 \text{ m/sg}^2 = 32,2 \text{ ft/seg}^2$

El peso unitario del agua es $62,5 \text{ lb/ft}^3 = 9,81 \text{ KN/m}^3 = 1 \text{ gr/cm}^3$ (si $g = 1$)

En presión $1 \text{ lb/ft}^2 = 47,85 \text{ N/m}^2 = 47,85 \text{ Pa}$.

$1 \text{ lb/m}^2 = 6,90 \text{ KPa}$ y $1 \text{ ft de agua} \approx 2,99 \text{ KPa}$

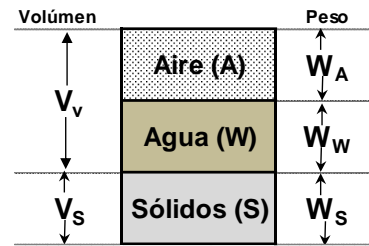
2.3.6. Peso unitario de referencia (γ_0)

El peso unitario de referencia γ_0 es el del agua destilada y a 4 °C.

$\gamma_0 = 9,81 \text{ KN/m}^3 \approx 1,00 \text{ Ton/m}^3 = 62,4 \text{ lb/ft}^3 = 1,0 \text{ gr/cc}$ (para $g = 1\text{m/seg}^2$). Este es el resultado de multiplicar la densidad del agua por la gravedad, dado que densidad es masa sobre volumen y que peso es el producto de la masa por la gravedad.

2.3.7. Peso unitario del suelo.

Es el producto de su densidad por la gravedad. El valor depende, entre otros, del contenido de agua del suelo. Este puede variar desde el estado seco γ_d (fórmula 2.11) hasta el saturado γ_{sat} (fórmula 2.14), y el estadio intermedio supone valores de S (grado de saturación) entre 0 y 1,0, dependiendo del mayor o menor contenido de humedad del suelo. Queda establecido entonces que el concepto difiere del de densidad y también que:



$$\gamma_d = \frac{W_S}{V_T} \quad (2.11) \quad \text{y} \quad \gamma_{sat} = \frac{W_{Sat}}{V_T} \quad (2.12); \quad \gamma_w = \frac{W_W}{V_W} \quad (2.13) \quad \gamma_T = \frac{W_T}{V_T} \quad (2.14)$$

Se presentan algunos valores del peso unitario seco de los suelos de interés, dado que no están afectados por el peso del agua contenida, sino por su estado relativo de compactad, el que se puede valorar con la porosidad.

Descripción	η %	γ_d g/cm ³
Arena limpia y uniforme	29 – 50	1,33 – 1,89
Arena limosa	23 – 47	1,39 – 2,03
Arena micácea	29 – 55	1,22 – 1,92
Limo INORGÁNICO	29 – 52	1,28 – 1,89
Arena limosa y grava	12 – 46	1,42 – 2,34
Arena fina a gruesa	17 – 49	1,36 – 2,21

Tabla 2.1 Valores de η y γ_d para suelos granulares (MS Lambe).

En el suelo el peso de los sólidos (W_s) es prácticamente constante, no así el peso del agua (W_w) ni el peso total (W_T). Además se asume que, siendo la gravedad específica (G_s) un invariante, no se trabaja nunca con γ_s sino con su equivalente, que equivale a $G_s \times \gamma_w$.

Los suelos bien compactados presentan pesos unitarios (γ_d) entre 2,20 y 2,30 g/cm³, para gravas bien gradadas y gravas limosas. En la zona de Caldas, las cenizas volcánicas presentan pesos unitarios húmedos (γ_T) entre 1,30 y 1,70 gr/cm³.

2.3.8. Peso unitario sumergido γ' .

Esto supone considerar el suelo saturado y sumergido. Al sumergirse, según Arquímedes, el suelo experimenta un empuje hacia arriba, igual al peso del agua desalojada.

$$\gamma' = \frac{W_{sat} - W_w}{V_T} = \frac{W_{SAT} - V_T * \gamma_w}{V_T} = \gamma_{SAT} - \gamma_w$$

Entonces:

$$\gamma' = \gamma_{SAT} - \gamma_w \quad (2.15)$$

Es la situación de la masa de suelo bajo el nivel de agua freática (NAF) del terreno.

2.3.9. Gravedad específica.

La gravedad específica es la relación del peso unitario de un cuerpo referida a la densidad del agua en condiciones de laboratorio y por lo tanto a su peso unitario γ_0 . Se puede considerar para este parámetro, la muestra total (G_T) pero el valor no tiene ninguna utilidad, la fase sólida (G_s) que es de vital importancia por describir el suelo y la fase líquida (G_w), que se asume igual a 1,00, por ser la γ_w la misma del agua en condiciones de laboratorio. En cualquier caso, el valor de referencia es γ_0 , pero $\gamma_0 \approx \gamma_w$. En geotecnia sólo interesa la gravedad específica de la fase sólida del suelo, dada por $G_s = \gamma_s / \gamma_w$ pero referida al peso unitario de la fase líquida del suelo γ_w , para efectos prácticos.

Los valores típicos de la gravedad específica, están asociados a los valores de los minerales constituyentes de la fase sólida del suelo, son: Gravias 2.65 a 2.68; Arenas 2.65 a 2.68; Limos 2.66 a 2.70 y arcillas 2.68 a 2.80. En general los suelos presentan valores de G_s comprendidos entre 2,5 y 3,1 (adimensional).

$$G_T = \frac{\gamma_T}{\gamma_w}; \quad G_s = \frac{\gamma_d}{\gamma_w}; \quad G_w = \frac{\gamma_w}{\gamma_0} \quad (2.16)$$

Una relación básica que permite vincular ω , S , e y G_s es:

$$\frac{W_w}{W_s} = \frac{V_w \times \gamma_w}{V_s \times \gamma_w \times G_s} \quad (G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{W_s}{V_s} \times \frac{1}{\gamma_0})$$

$$\frac{W_w}{W_s} = \frac{V_w}{V_v} \times \frac{V_v}{V_s} \times \frac{1}{G_s} \quad (\text{Suprimo } \gamma_w \text{ e introduzco } \frac{V_v}{V_v})$$

$$\omega = \frac{S \times e}{G_s}$$

$$\mathbf{G}_S \times \boldsymbol{\omega} = \mathbf{S} \times \mathbf{e} \quad (2.17)$$

Otra relación fundamental surge de:

$$\gamma_T = \frac{W_T}{V_T} = \frac{W_S + W_w}{V_S + V_v} = \frac{W_S \left[1 + \frac{W_w}{W_S} \right]}{V_S \left[1 + \frac{V_v}{V_S} \right]} \Rightarrow \gamma_T = \frac{G_S(1+\omega)}{(1+e)} \gamma_w \quad (2.18)$$

Obsérvese que no se escribió γ_s sino $G_s \times \gamma_w$. Ahora, se sustituyen $G_s \omega$ por $Sx e$

$$\gamma_T = \left[\frac{G_S + S \times e}{1+e} \right] \times \gamma_w \quad (2.19)$$

$$\gamma_T = \left[\frac{G_S + S \times e}{1+e} \right] \times \gamma_w \quad \Rightarrow \text{Si } S = 1 \Rightarrow \gamma_{SAT} = \left[\frac{G_S + e}{1+e} \right] \times \gamma_w \quad (2.20)$$

(saturado)

\Rightarrow Si $S = 0 \Rightarrow$

$$\gamma_d = \left[\frac{G_S}{1+e} \right] \times \gamma_w \quad (2.21)$$

(seco)

Dos relaciones deducibles, útiles en geotecnia, al analizar resultados de compactación son:

$$\gamma_T = \frac{W_T}{V_T} = \frac{W_S + W_w}{V_T} = \frac{W_S}{V_T} \left[1 + \frac{W_w}{W_S} \right] \Rightarrow \gamma_T = \gamma_d (1 + \omega) \quad (2.22)$$

y de la suma de volúmenes:

$$V_T - V_A = V_S + V_w ; \left(\text{pero: } G_S = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{W_S}{V_S} \times \frac{1}{\gamma_w} \right) \text{ entonces, al transformar volúmenes en pesos se tiene :}$$

$$V_T \left[1 - \frac{V_A}{V_T} \right] = \frac{W_S}{G_S \times \gamma_w} + \frac{W_w}{\gamma_w} = \frac{W_S}{G_S \times \gamma_w} \left[1 + \frac{W_w}{W_S} \right] \text{ luego, al dividir peso por volumen para obtener } \gamma_d$$

$$\frac{W_S}{V_T} = \frac{G_S \left[1 - \frac{V_A}{V_T} \right]}{\left[1 + G_S \frac{W_W}{W_S} \right]} \gamma_w \Rightarrow \gamma_d = G_S (1 - n) \times \gamma_w \quad (2.23)$$

Cuando el suelo está seco, no hay agua, $V_A = V_V$ y ω es cero.

2.4. Diagramas de fases con base unitaria

a) Podemos obtener $\gamma_T = f(e)$ haciendo $V_s = 1$ en el gráfico. Así, necesariamente

$$V_v = e ; \left(e = \frac{V_v}{V_s} \right)$$

(Recuérdese que $\omega = \frac{W_w}{W_s}$, $W_s = G_s * V_s * \gamma_w$) Además el Volumen total, $V_T = e + 1$

Después de asumir el volumen de sólidos y de vacíos, se procede a calcular los pesos de los sólidos (S), del agua (W) y total.

$$\begin{aligned} W_s &= G_s * \gamma_w, \quad W_w = \omega * G_s * \gamma_w \\ \gamma_T &= \frac{W_T}{V_T} = \frac{W_s + W_w}{V_s + V_w} = \frac{G_s * \gamma_w + \omega * G_s * \gamma_w}{1 + e} \\ &= \frac{G_s * \gamma_w (1 + \omega)}{(1 + e)} \end{aligned}$$

b) Para obtener $\gamma_T = f(\eta)$: se procede a realizar el cálculo en forma similar, asumiendo $V_T = 1$, en el gráfico. Así, necesariamente $V_v = \eta$ ya que $\left(\eta = \frac{V_v}{V_T} \right)$ y $V_s = 1 - \eta$

Calculados los volúmenes, se procede a obtener los pesos del suelo, apoyado en la expresión γ_s ; luego se calcula el peso del agua (W_w), para determinar la humedad (ω).

$$W_S = (1 - \eta) * G_S * \gamma_W ; W_W = \omega(1 - \eta) * G_S * \gamma_W$$

$$\gamma_T = \frac{W_T}{V_T} = \frac{W_S + W_W}{V_T}$$

$$= \frac{(1 - \eta) * G_S * \gamma_W + \omega * (1 - \eta) * G_S * \gamma_W}{1}$$

Volúmen		Peso
\updownarrow $V_V = \eta$	Aire (A)	$W_A = 0$
	Agua (W)	$W_W = \omega * G_S * \gamma_W * (1 - \eta)$
$V_S = 1 - \eta$	Sólidos (S)	$W_S = G_S * \gamma_W * (1 - \eta)$

$$\gamma_T = G_S \times \gamma_W \times (1 - \eta) \times (1 + \omega) \quad (2.24)$$

NOTA: En los diagramas unitarios existen 3 posibilidades: V_s , V_T y $W_s = 1$; con la tercera se obtienen resultados en función de la relación de vacíos como los del caso a). Además se puede hacer cálculos, igualmente fáciles con diagramas unitarios en dos fases, para suelo seco o para suelo saturado.

Tabla 2.2- PESOS UNITARIOS EN SUELOS

Denominación	PU en gr/cm3
Muy bajo	< 1,4
Bajo	1,4 a 1,7
Moderado	1,7 a 1,9
Alto	1,9 a 2,2
Muy alto	>2,2

Tabla 2.3- GRADOS DE SATURACIÓN EN SUELOS

Denominación	Grado de saturación (%)
Seco	0 - 25
Húmedo	25 - 50
Muy húmedo	50 - 80
Altamente saturado	80 - 95
Saturado	95 - 100

Alberto J. Martínez Vargas, 1990

Tabla 2.4- Contenido Orgánico de los suelos

Denominación	% de Materia orgánica		% de Materia orgánica
Muy bajo	0-1	Alto	4-8
Bajo	1-2	Muy alto	8-20
Medio	2-4	Kohnke, 1972	

EJERCICIOS.**Ejercicio 2,1.**

A partir de los diagramas unitarios de dos fases, obtener la relación γ_{sat} en función de S , e , γ_w , y otra relación para obtener γ_d .

NOTA: Para resolver un problema de fases, se hace el esquema de los diagramas unitarios, haciendo V_T o $V_S = 1$, o en su defecto $W_S = 1$. Además, siempre se requieren 3 parámetros conocidos adicionales, uno por cada fase.

De la relación $S \times e = G_s \times \omega$

En suelos saturados $S=1$ y se despeja ω

$$\omega = \frac{e}{G_s}$$

El peso del agua

$$W_\omega = \frac{e}{G_s} \times G_s \times V_s \times \gamma_0$$

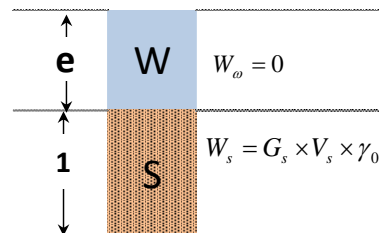
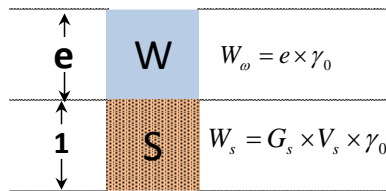
El peso del agua se obtiene al simplificar G_s y hacer $V_s=1$. Al hacer arreglos y factorizar se tiene

$$\gamma_{sat} = \frac{\gamma_0 (G_s + e)}{1 + e}$$

El peso unitario seco γ_d

En suelos secos el peso del agua es cero y en la hipótesis del problema $V_s=1$

$$\gamma_d = \frac{G_s \gamma_0}{1 + e}$$



Ejercicio 2.2

Una muestra de suelo en estado natural, pesa 62,1 gr, y seca al horno pesa 49,8 gr. Determinado el peso unitario seco y la gravedad específica correspondientes, se obtienen los valores $\gamma_d = 1,39 \text{ gr/cm}^3$ y $G_s = 2,68$. Hallar e y S para el estado natural.

Solución

$$\omega = \frac{62,1 - 49,8}{49,8} = 0,247 = 24,7\%$$

$$e = \frac{\gamma_w \times G_s}{\gamma_d} - 1 = \frac{1,00 \times 2,68}{1,39} - 1 = 0,93$$

$$S = \frac{\omega \times G_s}{e} \quad (2.17) = \frac{0,247 \times 2,68}{0,93} = 0,71 = 71\%$$

Ejercicio 2.3

Un suelo en estado natural tiene, $e = 0,80$; $\omega = 24\%$; $G_s = 2,68$. ¿Cuáles son las magnitudes del peso unitario natural, del peso unitario seco y del grado de saturación? Realizar los cálculos en el sistema internacional. ($g = 9,81 \text{ m/seg}^2$)

$$\gamma_T = \frac{G_s \times \gamma_w (1 + \omega)}{(1 + e)} \quad (2.18) = \frac{2,68 \times 9,81(1 + 0,24)}{(1 + 0,8)} = 18,11 \text{ KN/m}^3$$

$$\gamma_d = \frac{G_s \times \gamma_w}{(1 + e)} \quad (2.22) = \frac{2,68 \times 9,81}{(1 + 0,8)} = 14,61 \text{ KN/m}^3$$

$$S = \frac{\omega \times G_s}{e} \quad (2.17) = \frac{0,24 \times 2,68}{0,8} = 0,804 = 80,4\%$$

Para el caso anterior, calcular el peso unitario saturado.

$$\gamma_{SAT} = \frac{W_T}{V_T} = \frac{W_S + W_W}{V_T} = \frac{G_s \times \gamma_w + e \times \gamma_w}{1 + e} \quad (\text{utilizando diagrama sección 2.4.a, con } V_G = 1)$$

$$\gamma_{SAT} = \frac{9,81[2,68 + 0,80]}{1 + 0,8} = 18,97 \text{ KN/m}^3$$

Ejercicio 2.4

Calcular el contenido de humedad natural (ω) y el γ_{SAT} de una muestra saturada de suelo, cuyo diámetro ϕ es 3,80 cm y la altura h es 7,80 cm. El peso de la muestra es 142 gr, y seca es de 86 gr. ($\gamma = 9,81$ m/seg²)

$$\text{Masa de agua} = 142\text{gr} - 86\text{gr} = 56\text{ gr}$$

$$\text{Masa del suelo} = 86\text{ gr}$$

$$\omega = \frac{56}{86} = 0,651 = 65.1\%$$

$$\text{Peso del suelo saturado } w_{SAT} = 142 \times 9,81 \times 10^{-6} = 0,0139\text{ KN}$$

$$\text{Volumen del cilindro } V_T = \frac{1}{4} \pi \times 3,8^2 \times 7,8 \times 10^{-6} = 0,0008846\text{ m}^3$$

$$\gamma_{SAT} = \frac{W_{SAT}}{V_T} = 15,75\text{ KN/m}^3$$

En el mismo problema calcule e , η y G_s .

Reemplazo G_s , de la fórmula (2.17), en la (2.18)

$$\gamma_T = \left[\frac{S * e}{\omega} \right] \gamma_W \frac{(1 + \omega)}{(1 + e)} \quad \text{y } S=1 \text{ (saturado)}$$

$$\frac{\gamma_T}{\gamma_W} = \left(\frac{e}{\omega} \right) * \left(\frac{1 + \omega}{1 + e} \right) = \left(1 + \frac{1}{\omega} \right) * \left(\frac{1}{\frac{1}{e} + 1} \right) \Rightarrow \frac{15,75}{9,81} = \left(1 + \frac{1}{0,651} \right) * \left(\frac{1}{\frac{1}{e} + 1} \right)$$

$$e = 1,72 \Rightarrow \eta = \frac{e}{(1 + e)} = \frac{1,72}{(1 + 1,72)} = 0,63$$

$$G_S = \frac{e}{\omega} : \text{(Saturado)} \quad G_S = \frac{1,72}{0,651} = 2,65$$

Ejercicio 2.5

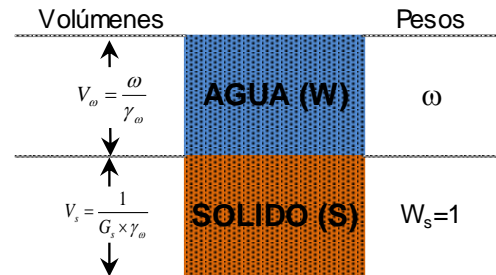
En un suelo saturado; dado $W_s = 1$ resolver el diagrama unitario y obtener γ_{sat} y γ'

$W_s = 1$

$$\omega = \frac{W_W}{W_S} \Rightarrow W_S = 1 \quad \therefore W_W = \omega$$

$$G_S = \frac{\gamma_S}{\gamma_W} = \frac{W_S}{V_S * \gamma_W} \quad \therefore V_S = \frac{1}{G_S * \gamma_W}$$

$$V_W = \frac{W_W}{\gamma_W} \quad \therefore V_W = \frac{\omega}{\gamma_W}$$



Luego : $\gamma_{Sat} = \frac{W_{sat}}{V_T} = \frac{(1 + \omega)}{\left[\frac{\omega}{\gamma_W} + \frac{1}{G_S * \gamma_W} \right]}$ entonces

$$\gamma_{Sat} = G_S * \gamma_W \frac{1 + \omega}{1 + \omega * G_S} = \gamma_{Sat}$$

además :

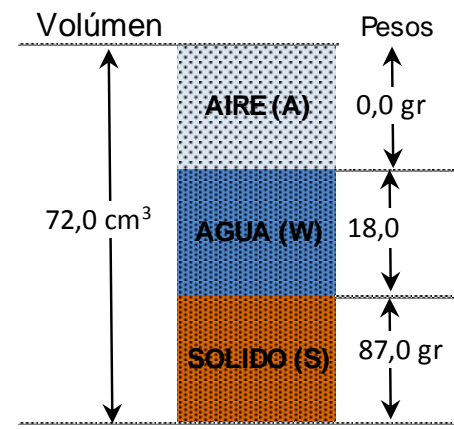
$$\gamma' = \gamma_T - \gamma_W = G_S * \gamma_W \frac{1 + \omega}{1 + \omega * G_S} - \gamma_W = \frac{(G_S - 1)}{(1 + G_S)} \gamma_W$$

2.5 Problemas de clase

- (1) Una muestra pesa en estado húmedo 105 gr, y en estado seco, 87 gr. Si su volumen es 72 cm³ y la gravedad específica de los sólidos 2,65, calcule ω , e , γ_d , γ_T , γ_{SAT} Y γ'

Solución:

- Dados: $W_T = 105$ gr
 $W_s = 87$ gr
 $V_T = 72$ cm³
 $G_s = 2,65$
 $\gamma_w = 1$ gr/cm³



Como se involucra e , el modelo unitario conviene con $V_S = 1$

$$W_W = W_T - W_S = 105 - 87 = 18 \text{ gr.}$$

$$G_S = \frac{\gamma_S}{\gamma_W} = \frac{W_S}{V_S * \gamma_S} \Rightarrow V_S = \frac{W_S}{G_S * \gamma_S} = \frac{87}{2,65 * 1} = 32,83 \text{ cm}^3$$

$$V_V = V_T - V_S = 72 - 32,83 = 39,16 \text{ cm}^3$$

$$e = \frac{V_V}{V_S} = \frac{39,16}{32,83} = 1,19 \text{ (relación de vacíos)}$$

$$\omega = \frac{W_W}{W_S} = \frac{105 - 87}{87} = 0,207 = 20,7\% \text{ (contenido de humedad)}$$

$$G_S = \frac{\gamma_S}{\gamma_W} = \frac{W_S}{V_S} * \frac{1}{\gamma_W} \Rightarrow W_S = G_S * \gamma_W$$

$$\omega = \frac{W_W}{W_S} \Rightarrow W_W = \omega * W_S$$

$$\gamma_T = \frac{W_T}{V_T} = \frac{G_S * \gamma_W + \omega * G_S * \gamma_W}{1 + e} = \frac{G_S * \gamma_W (1 + \omega)}{1 + e} = \frac{2,65 * 1 * (1 + 0,207)}{1 + 1,19}$$

$$\gamma_T = 1,46 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \text{ (Peso unitario total)} \quad \gamma_T = \frac{G_S * \gamma_W (1 + \omega)}{(1 + e)}$$

$$\text{En I si } \omega = 0 \Rightarrow \gamma_T = \gamma_d = \frac{G_S * \gamma_W}{1 + e}$$

$$\gamma_d = \frac{2,65 * 1}{(1 + 1,19)} = 1,21 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \text{ (Peso unitario seco)}$$

¿ V_w, V_s, V_v ?

$$S = \frac{V_w}{V_v} \left\{ \begin{array}{l} \gamma_w = \frac{W_w}{V_w} \Rightarrow V_w = \frac{W_w}{\gamma_w} \\ G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{W_s}{V_s} * \frac{1}{\gamma_w} \Rightarrow V_s = \frac{W_s}{G_s * \gamma_w} \\ e = \frac{V_v}{V_s} \Rightarrow V_v = e * V_s = \frac{e * W_s}{G_s * \gamma_w} \end{array} \right.$$

$$S = \frac{W_w * G_s * \gamma_w}{\gamma_w * e * W_s} = \frac{\omega * G_s}{e} = \frac{0,207 * 2,65}{1,19} = 0,461 = 46,1\% \text{ (Saturado)}$$

Cuando $S = 1 \Rightarrow \omega = e/G_s$

$$\gamma_{SAT} = \frac{G_s * \gamma_w \left(1 + \frac{e}{G_s}\right)}{(1 + e)} = \frac{\gamma_w (G_s + e)}{(1 + e)}$$

$$\gamma_{SAT} = \frac{2,65 + 1,19}{(1 + 1,19)} = 1,75 \text{ gr/cm}^3$$

$$\gamma' = \gamma_{SAT} - \gamma_w = 1,75 - 1 = 0,75 \text{ gr/cm}^3$$

- (2) Se tiene una muestra de suelo con los siguientes resultados de laboratorio: $e = 0,8$; $\omega = 24\%$; $G_s = 2,68$; $\gamma_w = 62,4 \text{ lb/ft}^3$ ¿Se solicita calcular $\gamma_T, \gamma_d, \gamma_{SAT}$?

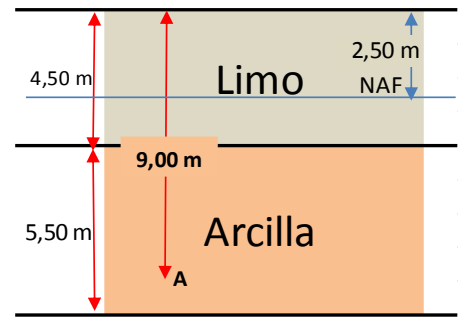
$$\gamma_T = \frac{G_s * \gamma_w (1 + \omega)}{(1 + e)} = \frac{2,68 * 62,4 (1 + 0,24)}{(1 + 0,8)} = 115,20 \text{ lb/ft}^3$$

$$\gamma_d = \frac{G_s * \gamma_w}{(1 + e)} = \frac{2,68 * 62,4}{(1 + 0,8)} = 92,91 \text{ lb/ft}^3$$

$$\gamma_{SAT} = \frac{\gamma_w (G_s + e)}{(1 + e)} = \frac{62,4 (1 + 0,24)}{(1 + 0,8)} = 120,64 \text{ lb/ft}^3$$

Recuerde que $\gamma_d \leq \gamma_T \leq \gamma_{SAT}$.

- (3) Se hizo la extracción de una muestra de un suelo arcilloso, en un perfil de un suelo conformado por un limo de 4,50 m de espesor y una arcilla de 5,50 m de espesor. La muestra de limo para un ensayo de compresión no confinada tuvo una altura de 7,10 cm y el diámetro es de 3,05 cm; el peso de la muestra es de 98 gr, el peso de los sólidos es 75 gr y la gravedad específica de los sólidos es 2,82.



La muestra de arcilla para el ensayo de compresión no confinada tuvo una altura de 7,10 cm, el diámetro de 3,05 cm y su peso es 85 gr. El peso del suelo seco al horno es 72 gr y la gravedad específica de sólidos es 2,65. Se necesita determinar las presiones total, de poro y efectiva de un punto "A" localizado a 9,00 m de profundidad. El nivel de aguas freáticas está a 2,50 m de profundidad.

H _{limo}	4,50	m
H _{Arcilla}	5,50	m

Limo			ω	30,67	%	e	0,95
h _m	7,10	cm	V _T	51,87	cm ³	γ _T	1,89 gr/cm ³
D _m	3,05	cm	γ _T	1,89	gr/cm ³	γ _{sat}	1,93 gr/cm ³
W _T	98,00	gr	V _S	26,60	cm ³		
W _S	75,00	gr	V _v	25,28	cm ³		
G _s	2,82						

Arcilla			ω	18,06	%	e	0,91
h _m	7,10	cm	V _T	51,87	cm ³	γ _T	1,64 gr/cm ³
D _m	3,05	cm	γ _T	1,64	gr/cm ³	γ _{sat}	1,86 gr/cm ³
W _T	85,00	gr	V _S	27,17	cm ³		
W _S	72,00	gr	V _v	24,70	cm ³		
G _s	2,65						

$$\omega = \frac{W_T - W_s}{W_s} \times 100 \quad (\%)$$

$$V_T = \frac{D_m^2 \pi}{4} \times h_m \quad (\text{cm}^3)$$

$$\gamma_T = \frac{W_T}{V_T} \quad (\text{gr/cm}^3)$$

$$V_s = \frac{W_s}{G_s \times \gamma_0} \quad (\text{cm}^3)$$

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

$$\gamma_T = \frac{G_s \times \gamma_0 (1 + \omega)}{(1 + e)} \quad (\text{gr/cm}^3)$$

$$\gamma_{sat} = \frac{(G_s + e) \times \gamma_0}{(1 + e)} \quad (\text{gr/cm}^3)$$

Presiones sobre el punto A				
H _{limo}	4,50	m	σ _{VA}	18,86 Ton/m ²
H _{Arcilla}	5,50	m	U _A	8,00 Ton/m ²
Z _{NAF}	2,00	m	σ' _{VA}	10,86 Ton/m ²

$$\sigma_{VA} = Z_{NAF} \times \gamma_{TL} + (H_{limo} - Z_{NAF}) \gamma_{satL} + H_{arcilla} \times \gamma_{satarc} \quad (\text{Ton/m}^2)$$

$$U_A = (H_{Limo} - Z_{NAF} + H_{arcilla}) \gamma_\omega$$

$$\sigma'_A = \sigma_{VA} - U_A$$

Problemas propuestos.

1. El peso unitario de un suelo es 1,62 gr/cm³, y la gravedad específica de los sólidos que lo conforman es 2,65. Determinar si el suelo está seco.
2. En una muestra saturada tiene una humedad de 11% y la gravedad específica de los sólidos es G_s = 2,65. Se solicita calcular e, γ_T, γ_{sat} y γ_d.
3. Una muestra de suelo se tiene G_s=2,65 y e= 0,45. Hallar γ_d y γ_{sat}

4. Un suelo seco tiene una relación de vacíos de 0,65 y la gravedad específica de los sólidos es 2,80. Hallar el peso unitario seco, el peso unitario saturado y el peso unitario sumergido.
5. A la muestra del problema anterior, se le agrega agua hasta lograr 60% de saturación, sin que varíe la relación de vacíos. Hallar la humedad de la muestra (ω) y el peso unitario total (γ_T)
6. Una muestra de suelo tiene un peso unitario de 1,90 gr/cm³, la gravedad específica de los sólidos es 2,69 y la humedad $\omega = 28\%$. Hallar e , n , S , γ_{sat} , γ_d .
7. Una muestra de suelo seco tiene $e = 0,80$ y $G_s = 2,80$. hallar γ_T , γ_{sat} y γ_d .
8. A la muestra del problema anterior, se le agrega agua hasta lograr $S = 55\%$, sin que varíe la relación de vacíos. Hallar ω y γ_T .

CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS DE MANIZALES

1- Complejo Quebradagrande. Observaciones en La Sultana según Aquaterra.

Ensayo	Promedio	Mínimo	Máximo
Humedad natural -%	34,13	10,70	176,6
Límite Líquido -%	39,68	17,6	178,1
Límite Plástico -%	27,02	13,9	67,8
Índice Plástico -%	12,65	3,1	110,3
Compresión Inconfinada -t/m ²	9,94	5,54	18,28
Peso Unitario Húmedo -t/m ³	1,738	1,06	2,15
Cohesión t/m ²	2,98	0,30	4,90
Ángulo de Fricción - grados	31,92	28,16	35,67

Fuente: Estudio Geológico, Geotécnico e Hidráulico de la Ladera Sur del Barrio La Sultana, Manizales. Aquaterra Ingenieros Consultores SA. Manizales 2004.

2- Formación Casabianca. Observaciones en Fundadores según Aquaterra.

Ensayo	Promedio	Mínimo	Máximo
Humedad natural -%	88,3	51,9	128,9
Límite Líquido -%	86,0	65,2	135,4
Límite Plástico -%	40,9	37,2	45,0
Índice Plástico -%	45,0	19,0	90,4
Índice de Liquidez -%	0,9	0,8	0,9
Peso Unitario Húmedo -t/m ³	1,715	1,609	1,821
Peso Unitario Seco -t/m ³	1,036	0,874	1,198
Compresión Inconfinada -t/m ²	21,22	13,86	28,57
Penetración Estándar -Golpes /pie	17,0	15,0	19,0

Fuente: Estudio de Suelos para la Rehabilitación Estructural del Teatro Fundadores. Aquaterra Ingenieros Consultores SA. Manizales 2003.

3- Supraterrenos de cobertura en Manizales

Parámetros geotécnicos para el rango de valores	Cenizas Volcánicas Unidad No Consolidada	Cenizas Volcánicas Unidad Consolidada	Suelos residuales de depósitos conglomeráticos
Peso Unitario Húmedo (t/m ³)	1,5-1,7	1,33	1,5-1,9
Humedad Natural (%)	25-65	>80	30-80
Pasa 200 (%)	25-50	>70	5->90
Límite líquido (%)	30-70	>100	NP->80
Límite plástico (%)	20-50	>60	NP->50

Índice plástico (%)	5-30	>40	NP->40
SUCS	SM	MH	MH-ML-SM-SP
Cohesión (t/m ²)	1-3	>4	1->4
Ángulo de fricción (°)	30-36	25-30	20-35
Permeabil (cm/día)	15-85	2-14	>20

Fuente: Francisco José Cruz Prada. Relaciones Lluvias Deslizamientos en la Ciudad de Manizales. Revista SCIA 48 años. Manizales 2004.

Fuentes de Complemento:

Consistencia del Suelo – Límites de Atterberg – Índices. Blog de Santiago Osorio R. <http://geotecnia-sor.blogspot.com.co/search/label/Indice%20de%20Liquidez>

El Agua en el Suelo. Blog de Santiago Osorio R. <http://geotecnia-sor.blogspot.com.co/search/label/Agua%20Capilar>

Geotecnia de Oleoductos en Colombia. GARCÍA LÓPEZ, Manuel; FRANCO LATORRE, R. In: VIII Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones, 1987, CARTAGENA. MEMORIAS VIII Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones. 1987. v.3. <http://manuelgarcialopez.blogspot.com>

Manual de geología para ingenieros. Duque Escobar, Gonzalo (2003) Universidad Nacional de Colombia, Manizales. - See more at: <http://www.bdigital.unal.edu.co/1572/>

Relaciones De Fase En La Ingeniería Geotécnica Moderna. Ing. Ricardo Rubén Padilla Velázquez. Prof. Facultad de Ingeniería, UNAM. <http://smig.org.mx/archivos/pdf/RelDeFase.pdf>

Túnel Manizales. Gonzalo Duque Escobar y Eugenio Duque Escobar (2006) Estudio de prefactibilidad de una conducción subterránea de 1850 m. <http://www.bdigital.unal.edu.co/2046/2/gonzaloduqueescobar.20108.pdf>

Geomecánica de las Laderas de Manizales. Gonzalo Duque Escobar y Eugenio Duque Escobar (2009). Foro "Gestión del Riesgo por Inestabilidad de Terrenos en Manizales". <http://www.bdigital.unal.edu.co/1603/>



GEOMECÁNICA. Duque Escobar, Gonzalo and Escobar P., Carlos Enrique. Universidad Nacional de Colombia (2016). See more at: <http://galeon.com/geomecanica>