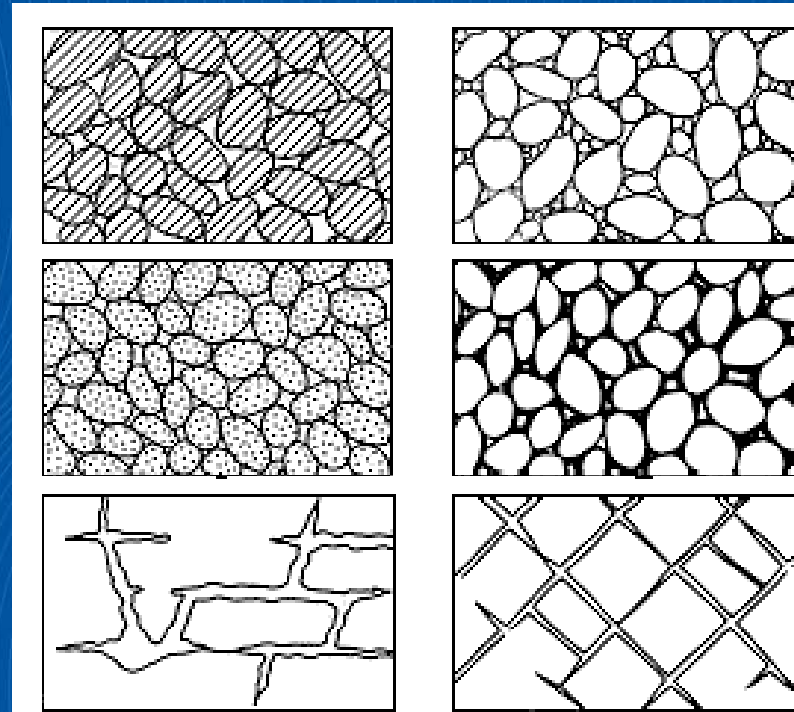


# Mecánica Avanzada de Suelos

## MCieTAT (UPCT)



## Tema 1

# Parámetros físicos del suelo



# ÍNDICE

**Introducción**

**Fases del suelo y magnitudes físicas elementales**

**Parámetros físicos fundamentales**

**Repaso. Cómo abordar los problemas de obtención de parámetros físicos del suelo**

**Referencias**



## Introducción

¿Qué se entiende por **parámetros físicos del suelo**?

Conjunto de **magnitudes** que sirven para **analizar, identificar y caracterizar un suelo mediante un valor numérico**. Las utilizamos para distinguir unos suelos de otros, para diferenciar estados de un mismo suelo y para estudiar modelos de comportamiento.

**Sinónimo** → **Propiedades índice**

¿Por qué estudiamos estos parámetros?

**Para lograr una caracterización geotécnica del terreno** de cara a realizar obras de ingeniería: excavaciones, cimentaciones, movimientos de tierra...

Recuerda... →

Prefijos del SI			
Prefijo	Símbolo	Factor	Equivalencia decimal
yotta	Y	$10^{24}$	1 000 000 000 000 000 000 000 000
zetta	Z	$10^{21}$	1 000 000 000 000 000 000 000
exa	E	$10^{18}$	1 000 000 000 000 000 000
peta	P	$10^{15}$	1 000 000 000 000 000
tera	T	$10^{12}$	1 000 000 000 000
giga	G	$10^9$	1 000 000 000
mega	M	$10^6$	1 000 000
kilo	k	$10^3$	1 000
hecto	h	$10^2$	100
deca	da	$10^1$	10
sin prefijo		1	1
deci	d	$10^{-1}$	0.1
centi	c	$10^{-2}$	0.01
mili	m	$10^{-3}$	0.001
micro	$\mu$	$10^{-6}$	0.000 001
nano	n	$10^{-9}$	0.000 000 001
pico	p	$10^{-12}$	0.000 000 000 001
femto	f	$10^{-15}$	0.000 000 000 000 001
atto	a	$10^{-18}$	0.000 000 000 000 000 001
zepto	z	$10^{-21}$	0.000 000 000 000 000 000 001
yocto	y	$10^{-24}$	0.000 000 000 000 000 000 000 001



**Recuerda las unidades más comunes para la fuerza y para el esfuerzo = presión = tensión**

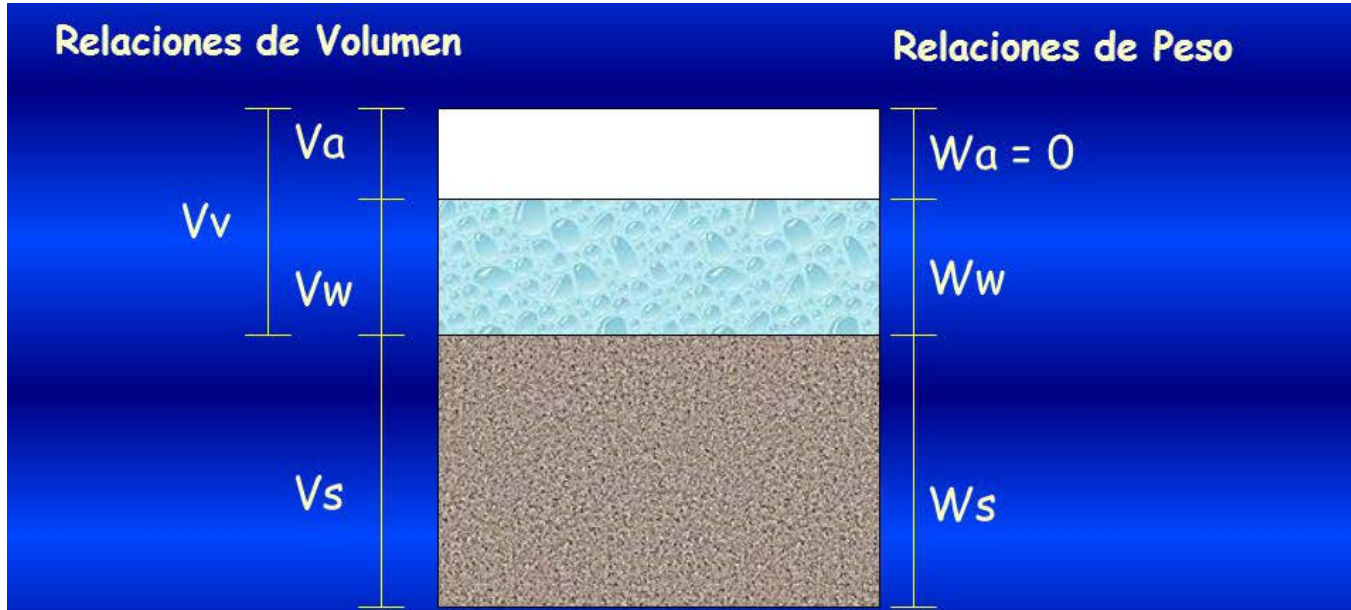
$$N = kg \cdot m/s^2$$

$\gamma = \rho \cdot g = (kg/m^3) \cdot m/s^2;$ $(kg \cdot m/s^2)/m^3 \rightarrow N/m^3$  $\gamma_w = 1000 kg/m^3 \cdot 9.8 m/s^2 = 9800 N/m^3 = 9.8 kN/m^3;$ peso de 1 m <sup>3</sup> de agua	$1000 N/m^3 = 1 kN/m^3$	$1 MPa = 10^6 Pa;$ $1 GPa = 10^9 Pa$
	$10^4 N/m^2 = 10 kN/m^2 = 10 kPa$	$1 bar = 10^5 Pa$
$10 N = 1 kg \cdot 10 m/s^2 \rightarrow$ Fuerza que ejerce una masa de 1 kg (si se considera $g = 10 m/s^2$ ) $\rightarrow 1 kp$	$1 kN = 10^4 kp$ (si se considera $g = 10 m/s^2$ )	$0.98 N/m^2 = 0.98 Pa =$ $= 0.1 kg$ apoyados en 1 m <sup>2</sup>
	$1 kp = 9.8 N$ (el peso de 1 kg); $1 kp / cm^2 = 100 kPa$ , a veces $1 kp \rightarrow 1 kg$	$1 bar = 1 atm$ (si se considera $g = 10 m/s^2$ )
$1 t/m^2 = 1000 kg/m^2 = 10000 n/m^2 = 10 kN/m^2 = 10 kPa$		



Fases del suelo y magnitudes físicas elementales

Fases componentes de suelos parcialmente saturados. Volúmenes (V) y pesos (W)



$$W_T = \cancel{W_a} + W_w + W_s$$

$$V_T = V_a + \underbrace{V_w + V_s}_{V_v}$$

slideplayer.es (Óscar Donayre)

NOTACIÓN:

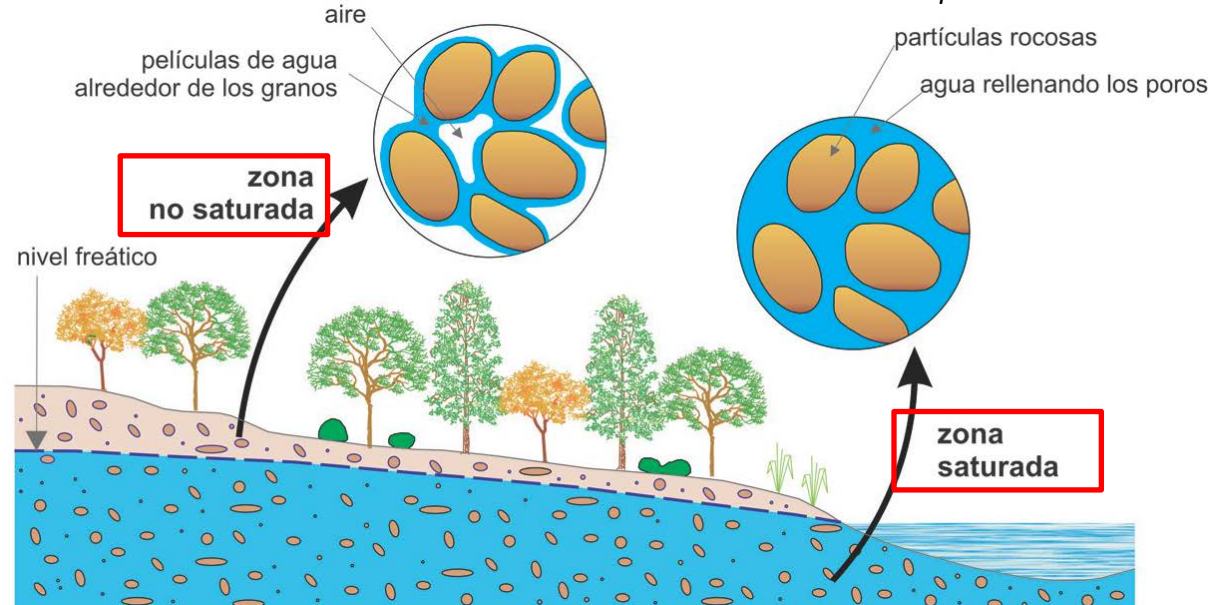
Índices:  $\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{V} \rightarrow \text{Volumen} \\ \mathbf{W} \rightarrow \text{Weight (peso)} \end{array} \right.$

Subíndices:  $\left\{ \begin{array}{l} a \rightarrow \text{air (aire)} \\ w \rightarrow \text{water (agua)} \\ v \rightarrow \text{voids (huecos)} \\ s \rightarrow \text{sólids (sólidos)} \\ T \rightarrow \text{Total} \end{array} \right.$



# Fases del suelo y magnitudes físicas elementales

medioambientedecalidad.wordpress.com



$$V_t = V_s + V_g + V_w$$

$$M_t = M_s + M_w$$

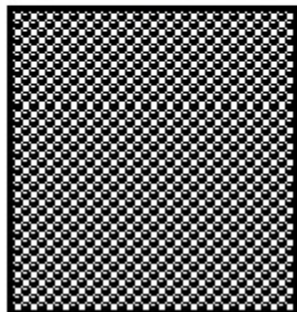
## volumen de huecos, volumen de vacíos o índice de poros (e)

Los términos volumen de huecos y volumen de vacíos se emplean indistintamente y significan lo mismo

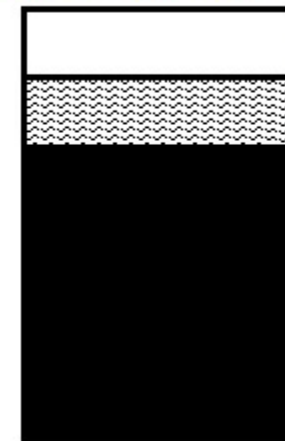
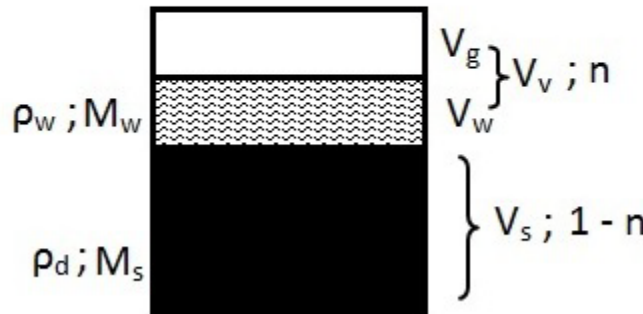
## Relaciones volumétricas básicas en Ingeniería de Suelos Índice de poros (e) y porosidad (n)

$$V_t = v = (1 + e)m^3$$

$$V_t = 1 \text{ m}^3; M_t; \rho_a$$



### porosidad (n)



Siempre y cuando



**Parámetros físicos fundamentales****G. García. UPCT****¿Cuáles son estos parámetros, sus unidades, su símbolo de identificación y su utilidad?**

PARÁMETRO	SÍMBOLO	UNIDADES	RANGO DE VALORES	CÁLCULO (a partir de magnitudes elementales)	SIGNIFICADO/UTILIDAD
Densidad	$\rho$	kg/m <sup>3</sup> g/cm <sup>3</sup>	1400-2500	$\frac{W_t}{V_t}$	Cálculo de tensiones en el terreno
Densidad del agua	$\rho_w$		1000-1025	$\frac{W_w}{V_w}$	
Densidad de las partículas sólidas, densidad de sólidos, densidad real	$\rho_s$		2300-3000; 2700	$\frac{W_s}{V_s}$	
Densidad aparente seca	$\rho_d$			$\frac{W_s}{V_t}$	Sobre el nivel freático, ausencia de agua en poros, $S_r=0$
Densidad aparente, densidad o densidad natural	$\rho_a$		finos 0.9-1.5	$\frac{W_s + W_w}{V_t}$	Es el término general, sobre o bajo el n.f.
			Granulares 1.4-1.9		
Densidad saturada	$\rho_{sat}$			$\frac{W_t}{V_t}$	Bajo el nivel freático, todos los poros saturados de agua, $S_r=100$
Densidad efectiva o sumergida	$\rho'$			$\rho_{sat} - \rho_w$	Bajo el nivel freático, cálculo de peso específico sumergido. Cálculo de tensiones efectivas
Peso específico relativo o gravedad específica relativa o gravedad/peso específico de las partículas	$G_s$	adimensional	2.6-2.8	$G_s = \frac{\rho_s}{\rho_w}$	Es el parámetro que se obtiene en ensayos de laboratorio con picnómetro

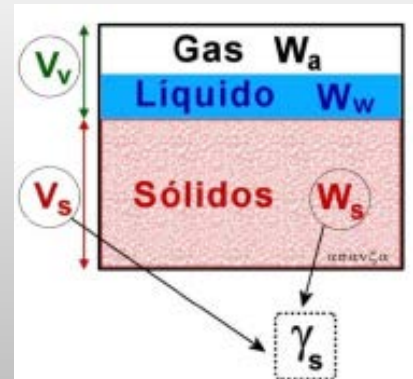
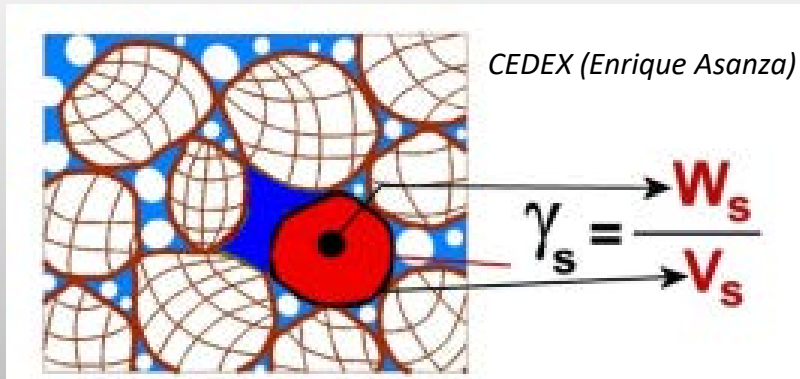
- Cuando surja confusión en torno a la manera de nombrar el parámetro, aclarar las dudas viendo las unidades.
- La densidad saturada y la densidad de las partículas sólidas a veces aparece con el mismo signo  $\rho_s$ .
- *densidad = densidad aparente. Podemos no especificar si se trata de seca o sumergida, refiriéndonos a ella como densidad aparente o densidad*



**Parámetros físicos fundamentales**

¿Cuáles son estos parámetros, sus unidades, su símbolo de identificación y su utilidad?

PARÁMETRO	SÍMBOLO	UNIDADES	RANGO DE VALORES	CÁLCULO (a partir de magnitudes elementales)	SIGNIFICADO/UTILIDAD
Peso específico (gravedad específica)	$\gamma$	N/m <sup>3</sup>	Ver tablas	$\rho \cdot g$	
Peso específico del agua	$\gamma_w$			$\rho_w \cdot g$	
Peso específico saturado	$\gamma_{sat}$			$\rho_{sat} \cdot g$	Bajo el nivel freático, $S_r=100\%$
Peso específico aparente	$\gamma, \gamma_a$			$\rho_a \cdot g$	Es el término general, sobre o bajo el n.f.
Peso específico de las partículas sólidas	$G, \gamma_s$			$\rho_s \cdot g$	
Peso específico del suelo seco	$\gamma_d$			$\rho_d \cdot g$	Sobre el nivel freático, $S_r=0$
Peso específico sumergido	$\gamma'$			$\gamma_{SAT} - \gamma_w$	Calculo de tensiones efectivas







¿Cuáles son estos parámetros, sus unidades, su símbolo de identificación y su utilidad?

PARÁMETRO	SÍMBOLO	UNIDADES	RANGO DE VALORES	CÁLCULO (a partir de magnitudes elementales)	SIGNIFICADO/UTILIDAD
Porosidad	$n$	adimensional %	0.2-0.5	$\frac{V_v}{V_t}$	Grado de compactación, capacidad para almacenar agua
Índice de poros o relación de vacíos	$e$	adimensional	1.2-0.4	$\frac{V_v}{V_s}$	Grado de compactación; si aumenta e disminuye la compactación. $e_{max}$ y $e_{min}$
Volumen específico	$v$	adimensional		$\frac{V_t}{V_s}$	Representa el espacio total ocupado por una masa de suelo que contiene un volumen de sólido unitario. Grado de compactación
Grado de saturación	$S_r$	adimensional %		$\frac{V_w}{V_v}$	
Humedad	$W$	adimensional %		$\frac{W_w}{W_s}$	
Contenido en aire	$A_r$	adimensional %		$\frac{V_a}{V_t}$	
Densidad relativa, Índice de densidad, compacidad relativa	$I_D, D_r$	adimensional %	0 - 1	$\frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}};$ $\frac{\gamma_d - \gamma_d(min)}{\gamma_d(max) - \gamma_d(min)};$	Grado de compactación natural de un suelo: Si aumenta e, disminuye $D_r$



## Parámetros físicos fundamentales

### Rangos de valores de los parámetros físicos más comunes:

$e, n, w, G_s, \rho_d, \rho_s, \gamma_d$

Terzaghi y Peck (1967)

Descripción	Porosidad $n$ (%)	Relación de vacíos $e$	Contenido de humedad $S_r = 1$ $w$ (%)	Densidad ( $\text{Mg/m}^3$ )	
				$\rho_d$	$\rho_s$
Arena uniforme suelta	46	0.85	32	1.44	1.89
Arena uniforme densa	34	0.51	19	1.75	2.08
Arena bien gradada suelta	40	0.67	25	1.59	1.98
Arena bien gradada densa	30	0.43	16	1.86	2.16
Tilita glacial bien gradada	20	0.25	9	2.11	2.32
Arcilla glacial blanda	55	1.20	45	1.21	1.76
Arcilla glacial dura	37	0.60	22	1.69	2.06
Arcilla ligeramente orgánica blanda	66	1.90	70	0.92	1.57
Arcilla muy orgánica blanda	75	3.00	110	0.68	1.43
Arcilla montmorilonítica blanda (bentonita)	84	5.20	194	0.44	1.28
Turba amorfa	91	10	500	0.18	1.09
Turba fibrosa	94	15	1,000	0.09	1.03

Das (2010)

Type of soil	Void ratio, $e$	Natural moisture content in a saturated state (%)	Dry unit weight, $\gamma_d$	
			lb/ft <sup>3</sup>	kN/m <sup>3</sup>
Loose uniform sand	0.8	30	92	14.5
Dense uniform sand	0.45	16	115	18
Loose angular-grained silty sand	0.65	25	102	16
Dense angular-grained silty sand	0.4	15	121	19
Stiff clay	0.6	21	108	17
Soft clay	0.9–1.4	30–50	73–93	11.5–14.5
Loess	0.9	25	86	13.5
Soft organic clay	2.5–3.2	90–120	38–51	6–8
Glacial till	0.3	10	134	21

## MCieTAT: Parámetros físicos del suelo

Mineral	$G_s$	
Dolomita	2.85	
Feldespatos (ortoclase)	2.53–2.56	Wood (2009)
Feldespatos (oligoclase)	2.64–2.68	
Cuarzo	2.63	
Minerales de arcilla		
Caolinita	2.6	
Haloisita	2.6	
Illita	2.75	
Montmorilonita	2.3–3.0	

Berry y Reid  
(1993)

$G_s$	Tipo de suelo
2.65	Grava, arena y limo
2.70	Arcilla inorgánica
2.60	Arcilla orgánica
2.00	Turba amorfa
1.50	Turba fibrosa

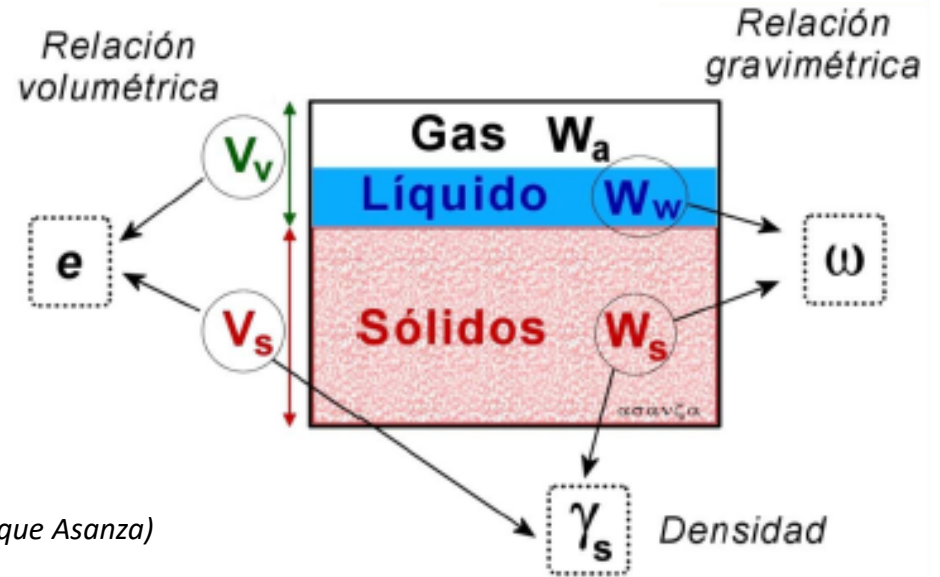
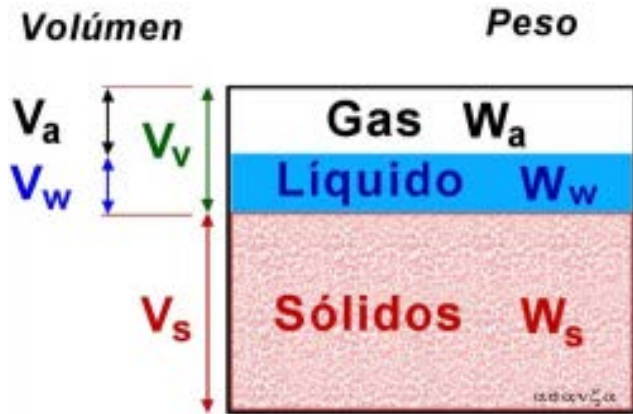
Mineral

Specific gravity,  $G_s$

Quartz		2.65
Kaolinite		2.6
Illite		2.8
Montmorillonite	Das (2010)	2.65–2.80
Halloysite		2.0–2.55
Potassium feldspar		2.57
Sodium and calcium feldspar		2.62–2.76
Chlorite		2.6–2.9
Biotite		2.8–3.2
Muscovite		2.76–3.1
Hornblende		3.0–3.47
Limonite		3.6–4.0
Olivine		3.27–3.7



Parámetros índice. Adimensionalización con el volumen de sólidos



CEDEX (Enrique Asanza)

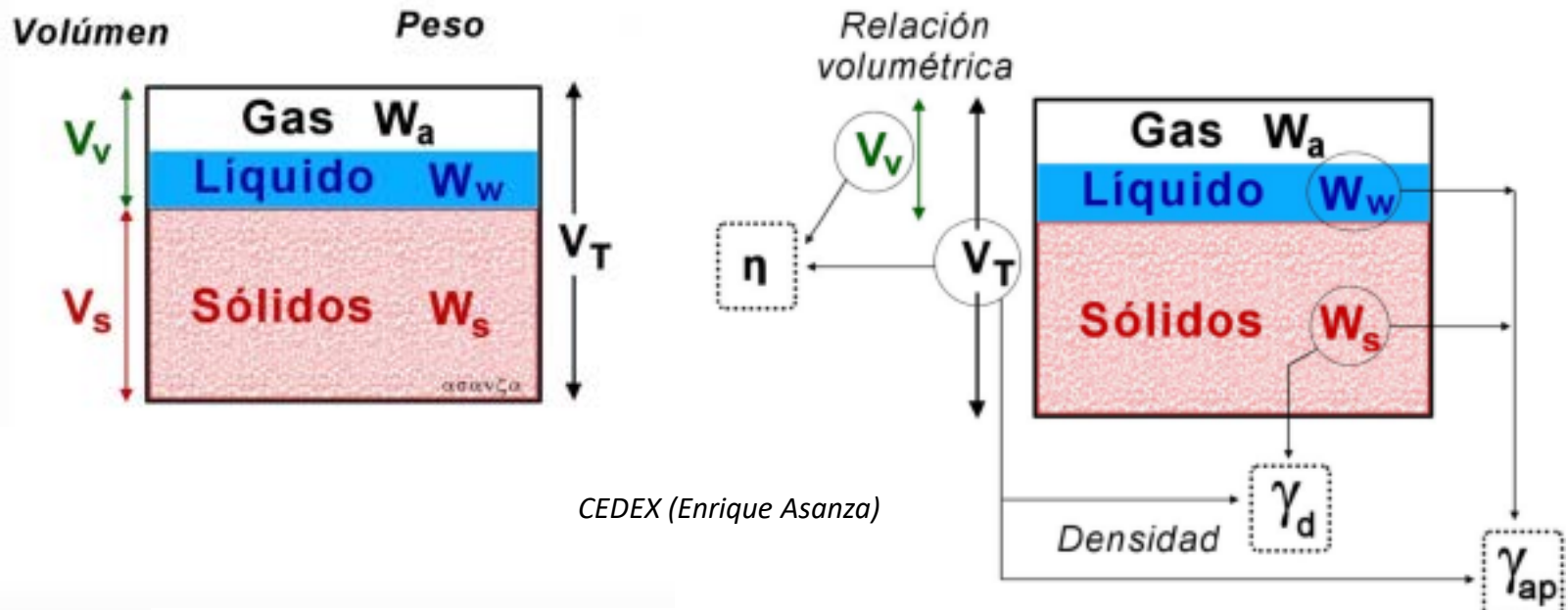
Relación volumétrica	$e = \frac{V_v}{V_s}$	ÍNDICE DE HUECOS
Relación gravimétrica	$\omega = \frac{W_w}{W_s}$	HUMEDAD
Densidad (peso específico)	$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$	PESO ESPECÍFICO DE LAS PARTÍCULAS



# Parámetros físicos fundamentales

G. García. UPCT

## Parámetros índice. Adimensionalización con el volumen total



CEDEX (Enrique Asanza)

Relación volumétrica	$\eta = \frac{V_v}{V_T}$	POROSIDAD
Densidad (peso específico)	$\left\{ \begin{aligned} \gamma_d &= \frac{W_s}{V_T} \\ \gamma_{ap} &= \frac{W_s + W_w}{V_T} \end{aligned} \right.$	DENSIDAD SECA
		DENSIDAD APARENTE

**Parámetros físicos fundamentales**Parámetros índice. Humedad, densidad seca y densidad aparente

HUMEDAD

$$\omega = \frac{W_w}{W_s}$$

{

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V_T}$$

DENSIDAD SECA

$$\gamma_{ap} = \frac{W_s + W_w}{V_T}$$

DENSIDAD APARENTE

Ejercicio 1

*En un depósito cuarcítico ( $G_s = 2.65$ ) se ha tallado una muestra inalterada de un sondeo, la cual tiene 1.5" de diámetro y 3" de altura (probeta típica de un triaxial). Nada más tallar pesaba 160.6 g y tras secase en estufa (24 horas a 60 °C) 137.2 g.*

*Se pide:*

*Humedad, índice de huecos, densidad seca y densidad aparente.*

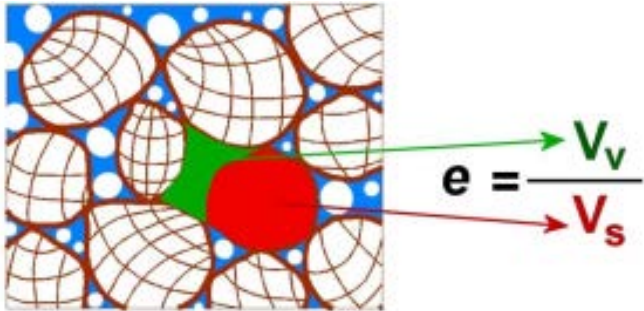
*1" = 2.54 cm  
(1 pulgada)*



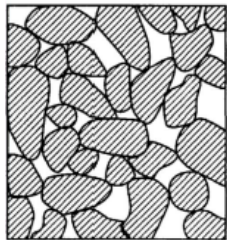


**Parámetros físicos fundamentales**

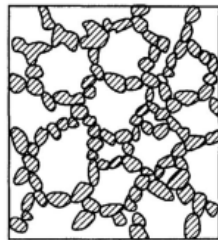
**Índice de poros. Tipos de empaquetamiento**



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

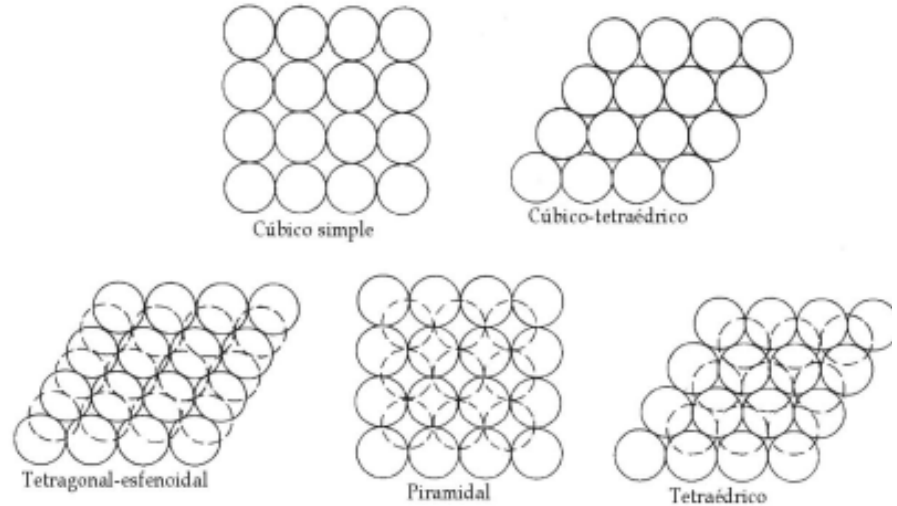


Suelo granular  
0,35 - 1,1  
(aprox.)

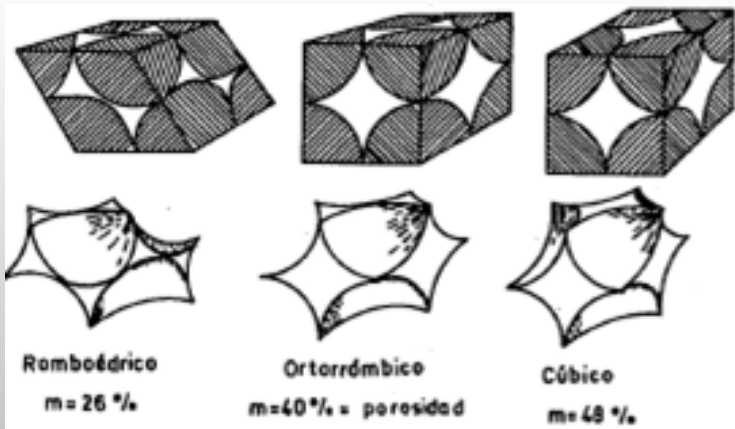


Arcillas  
0,35 - 2,5  
(precons.) (fangos)

CEDEX (Enrique Asanza)



Tipo de empaquetamiento	n° de coordinación	Índice de huecos	Porosidad (%)
Cúbico simple	6	0.91	47.64
Cúbico-tetraédrico	8	0.65	39.54
Tetragonal-esfenoidal	10	0.43	30.19
Piramidal	12	0.35	25.95
Tetraédrico	12	0.35	25.95



Custodio y Llamas (1976)

**Ejercicio 2**

Supón un **empaquetamiento cúbico simple** y una **partícula esférica**.

Si el volumen de la esfera es  $\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3$ , ¿Cuál es el valor del **índice de poros**?

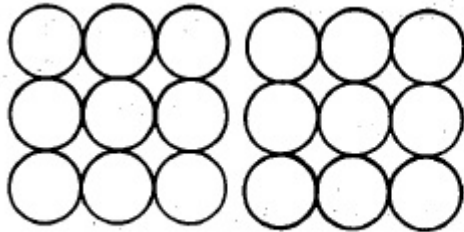
Solución  $e = 0.91$

**G. García. UPCT**





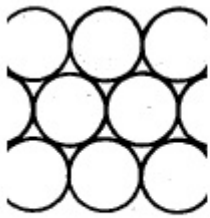
Índice de poros. Rangos de valores



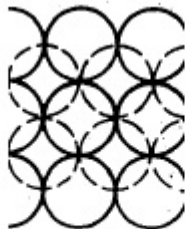
máximo  $e = 0.91$   
máximo  $n = 47.6\%$

Alzada

Planta



Alzada



Planta

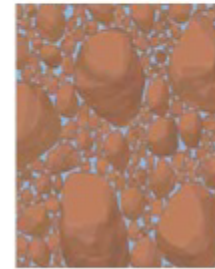
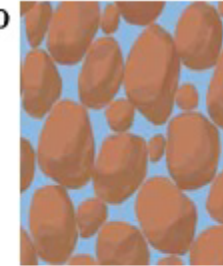
mínimo  $e = 0.35$   
mínimo  $n = 26\%$

Berry y Reid (1993)

arenas de tamaño uniforme

$e = 0.51 - 0.85$

$n = 34 - 46\%$



arenas bien gradadas

$e = 0.43 - 0.67$

$n = 30 - 40\%$

Suelos cohesivos

$e = 0.55 - 5,$

$n = 35 - 83\%$

Densidad relativa  $D_r$ , (o compacidad relativa  $C_r$ ). Rangos de valores

Compacidad relativa, $C_r$ , (%)	Descripción
0-20	Muy suelto
20-40	Suelto
40-60	Medio
60-80	Denso
80-100	Muy denso



Grado de saturación

Relación volumétrica  $S_R = \frac{V_w}{V_v}$  GRADO DE SATURACIÓN

¿Cuanta agua puede llegar a almacenar un suelo?

Si  $S_R = 1$   $\left\{ \begin{array}{l} \omega = \omega_{sat} \quad \text{HUMEDAD DE SATURACIÓN} \\ \gamma_{ap} = \gamma_{sat} \quad \text{DENSIDAD SATURADA} \end{array} \right.$

¿Por qué en geotecnia es mucho más común usar  $e$  y no  $n$ ?

→ Por definición, el denominador ( $V_v$ ) no varía durante la deformación (los sólidos se consideran incompresibles)

Ejemplo numérico:

$$26.5 \text{ kN/m}^3 = \gamma_s > \gamma_{sat} > \gamma_a > \gamma_d = 16 \text{ kN/m}^3$$

El índice de poros ( $e$ ) y la densidad seca ( $\rho_d$ ) dan una idea del empaquetamiento.

El gado de saturación ( $S_R$ ), la porosidad ( $n$ ) y la humedad ( $w$ ) se pueden expresar en tanto por ciento.

¿Pueden superar éstos parámetros el valor del 100%?

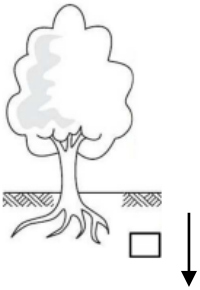
La humedad sí (pensar en un bol de cereales lleno de leche).

El  $S_R$  no puede ser mayor que 100, pues aunque expanda una arcilla, conforme entre agua, aumenta en la misma medida el volumen de vacíos.

Reflexiones

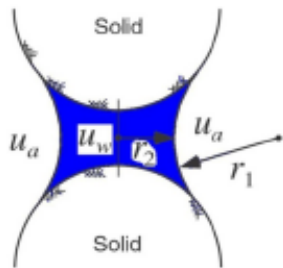
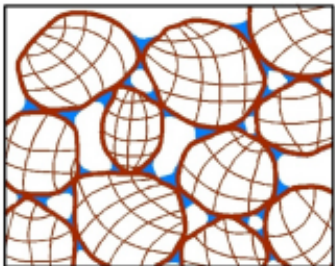


Grado de saturación



$S_R < 65\%$  (aprox.)

Exclusivamente fase gaseosa

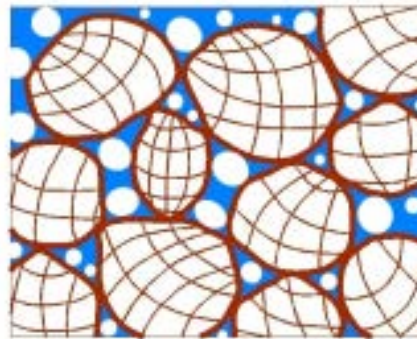


**Meniscos**

En estos casos la presencia de agua ejerce de lubricante en la compactación

Grado de saturación

Ambas fases



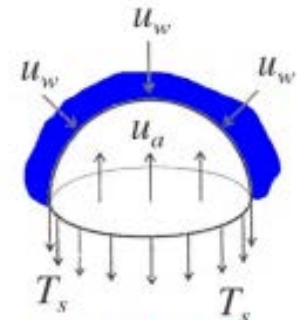
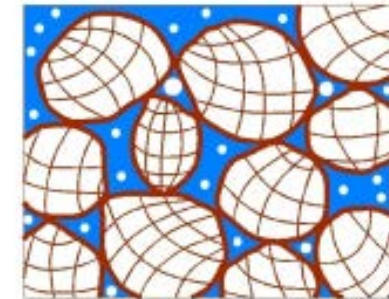
CEDEX (Enrique Asanza)

$$u_a - u_w = T_s \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

La interacción entre fluidos (hidrocarburos, agua, gases...) altera la tensión superficial

$S_R > 85\%$  (aprox.)

Exclusivamente fase líquida



**Burbujas**

¿Es el agua incompresible?

**Repaso. Cómo abordar los problemas de obtención de parámetros físicos del suelo**

Problema: cómo abordar los problemas de obtención de parámetros físicos del suelo

- Expresar los datos en función de las magnitudes físicas elementales (V, W) a partir de las definiciones (ver tablas)
- Referir los cálculos a una unidad de volumen (1 m<sup>3</sup>, por ejemplo)
- Obtención del resto de magnitudes físicas elementales
- Obtención de parámetros que solicita el problema mediante combinación de las magnitudes físicas elementales obtenidas en el paso anterior ( $\gamma_d, \gamma_s, \gamma_a, n, e...$ )

**Ejercicio 3**

***Deduce las siguientes expresiones a partir de las magnitudes elementales del suelo***

$$S_r = \frac{(1 + e) \cdot \frac{\rho}{\rho_w} - G_s}{e} \quad \rho_{sat} = \frac{e + G_s}{1 + e} \cdot \rho_w \quad e = \frac{n}{1 - n}$$

$$e = G_s \cdot \frac{\rho_w}{\rho_d} - 1 \quad \rho_d = \frac{G_s}{v} \cdot \rho_w \quad v = \frac{\rho_s}{\rho_d}$$

$$WG_s = eS_r$$

$$v = 1 + e$$

$$n = \frac{e}{1 + e}$$

$$w = \frac{\rho_d - \rho_{sat}}{\rho_d} \cdot 100$$

## Repaso. Cómo abordar los problemas de obtención de parámetros físicos del suelo

HUMEDAD

$$\omega = \frac{W_w}{W_s}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma_d = \frac{W_s}{V_T} \quad \text{DENSIDAD SECA} \\ \gamma_{ap} = \frac{W_s + W_w}{V_T} \quad \text{DENSIDAD APARENTE} \end{array} \right.$$

### Ejercicio 4

*Deducción de  $\gamma_d$  en función de  $\gamma_s$  y  $e$*

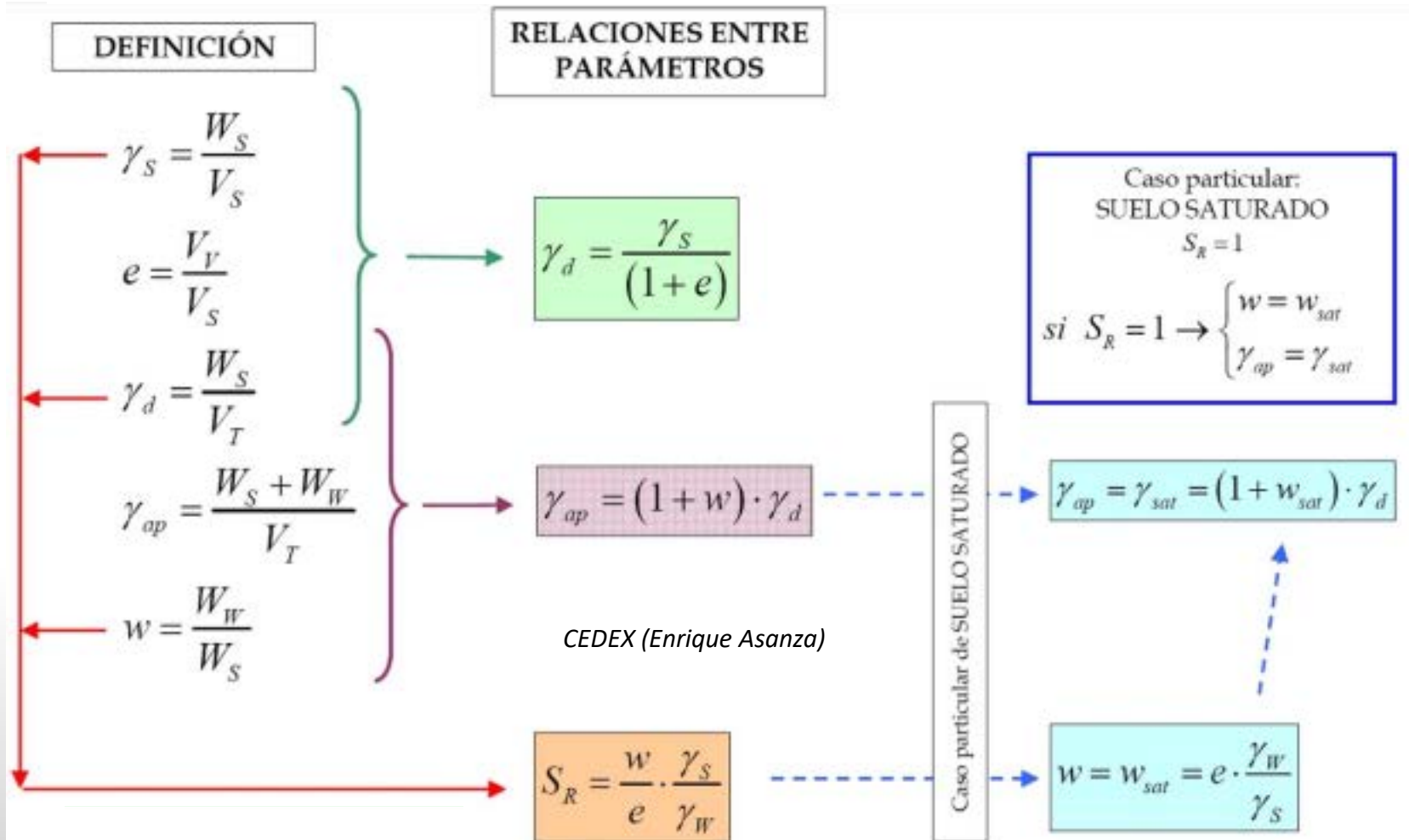
*Deducción de  $\gamma_a$  en función de  $\gamma_d$  y  $e$  (habitualmente  $\gamma_{ap} = \gamma_a$ )*

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V_T} = \frac{W_s}{V_s + V_v} = \frac{\frac{W_s}{V_s}}{\frac{V_s + V_v}{V_s}} = \boxed{\gamma_d = \frac{\gamma_s}{1 + e}}$$

CEDEX (Enrique Asanza)

$$\gamma_{ap} = \frac{W_s + W_w}{V_T} = \frac{\frac{W_s + W_w}{W_s}}{\frac{V_T}{W_s}} = \frac{1 + \omega}{\frac{1}{\gamma_d}} = \boxed{\gamma_{ap} = \gamma_d \cdot (1 + \omega)}$$

Repaso. Cómo abordar los problemas de obtención de parámetros físicos del suelo







## Referencias

<https://matemovil.com/>

<https://medioambientedecalidad.wordpress.com/>

<https://slideplayer.es/slide/4392338/> (Óscar Donayre Córdova)

Asanza, E. *Máster en Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica del CEDEX*

Das, B. M. (2010). *Principles of geotechnical engineering*. Cengage learning

Berry, P. L., & Reid, D. (1993). *Mecánica de suelos*. McGraw-Hill

Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice*. Wiley. New York

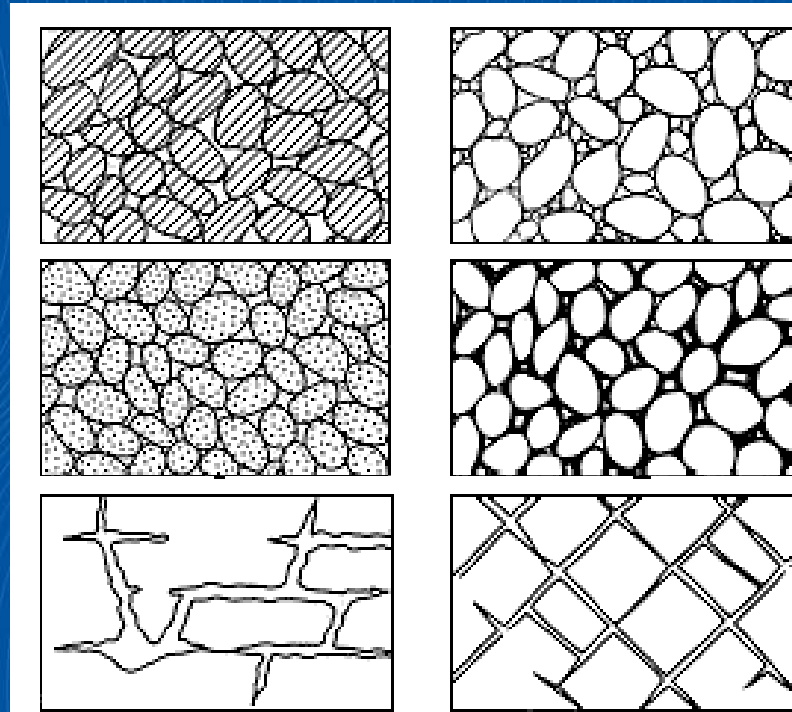
Wood, D. M. (2009). *Soil mechanics: a one-dimensional introduction*. Cambridge University Press

<http://ingenieriaciviltips.blogspot.com/>

Custodio, E. & Llamas, M. R. (1976). *Hidrología subterránea* (Vol. 2). Barcelona: Omega.

# Mecánica Avanzada de Suelos

## MCieTAT (UPCT)



**Gracias por su  
atención**

## Tema 1

# Parámetros físicos del suelo