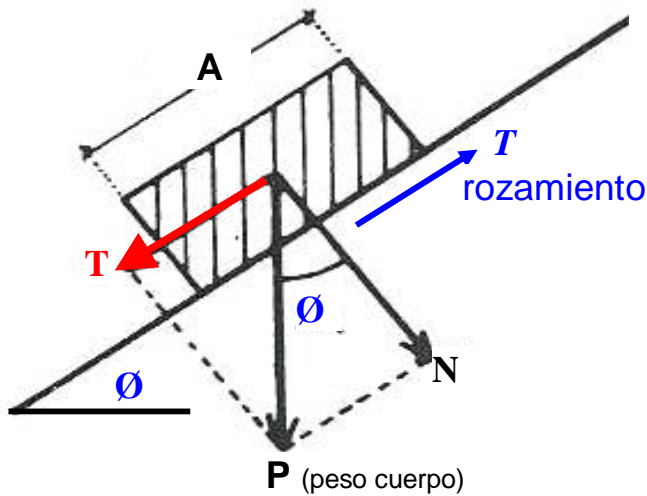


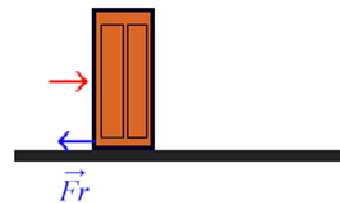
Ángulo de rozamiento interno y cohesión de un suelo.

Ángulo de rozamiento interno.

Deslizamiento de un cuerpo sobre un plano inclinado.



Rozamiento muebles



De la geometría del esquema:
$$\tan \phi = \frac{T}{N} = \frac{\tau * A}{\sigma * A} = \frac{\tau}{\sigma}$$

Siendo: A = Superficie contacto ϕ = Ángulo de deslizamiento o de rozamiento.

Estudiando el equilibrio en la dirección del plano de deslizamiento: $T \geq T = N * \tan \phi$

Que expresado en tensiones: $\tau \geq \sigma * \tan \phi$

Como se ve el rozamiento "T" es independiente del área de contacto, depende únicamente de la rugosidad de las superficies

En suelos granulares, esta resistencia depende de:

Las fuerzas "P" que se apliquen.

Rozamiento entre los granos.

- | | |
|------------------------------|--|
| La estructura de los granos: | Naturaleza: cuarcífera, caliza, yesífera, etc. |
| | Forma: redondeada, angulosa. |
| | Granulometría: tamaño grano, graduación, etc. |

Quedan definidos por un solo

parámetro adimensional: \rightarrow ϕ = Ángulo de rozamiento interno



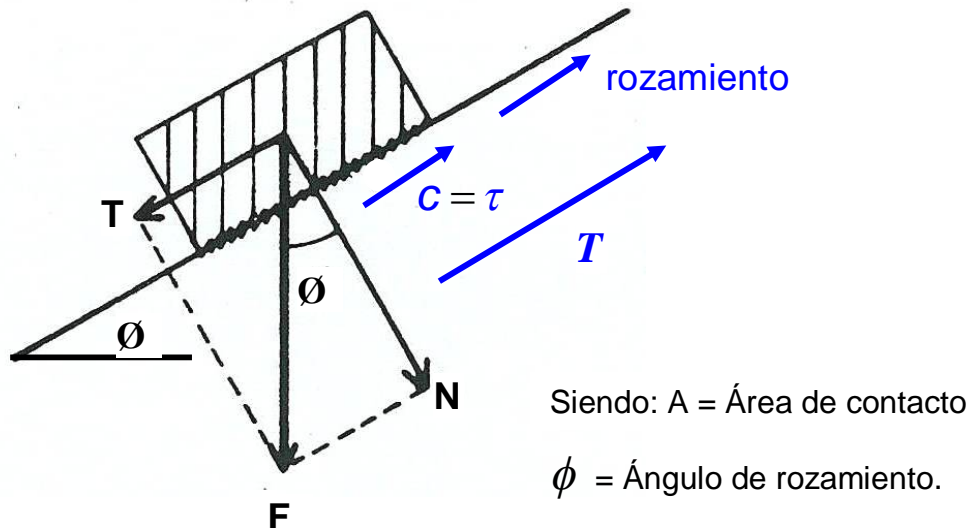
Para carbón: $\phi = 45^\circ$ Para grava: $\phi = 30^\circ$ a 45° **Para arenas: $\phi = 30^\circ$ a 35°**

Para patatas $\phi = 30^\circ$ Para trigo $\phi = 25^\circ$

Cohesión de un suelo.

Cohesión.

En los suelos arcillosos el planteamiento no es tan sencillo debido a su estructura floculada. El deslizamiento depende no sólo del ángulo de inclinación sino también de la cantidad de superficie de contacto.



El equilibrio en la dirección del plano de deslizamiento. $T \geq N * \tan \phi + (c * A)$

Operando: $\frac{T}{A} \geq \frac{N}{A} * \tan \phi + c$

Que expresado en tensiones: $\tau \geq \sigma * \tan \phi + c$ (criterio fallo por corte de Coulomb)

La cohesión es una resistencia tangencial “ τ ” independiente de “ ϕ ”

También se observa que es necesario, ahora, mayor esfuerzo cuanto mayor sea la superficie de contacto

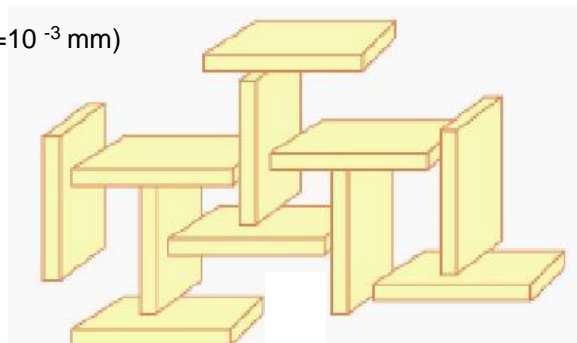
Rotura de suelos cohesivos.:

Las arcillas tienen una estructura a escala microscópica como la de un castillo de naipes (estructura floculada). El tamaño de las partículas y el de los huecos es de tamaño de la **micra**. El espacio que queda entre partículas, los huecos o poros están generalmente llenos de agua.



Estructura floculada

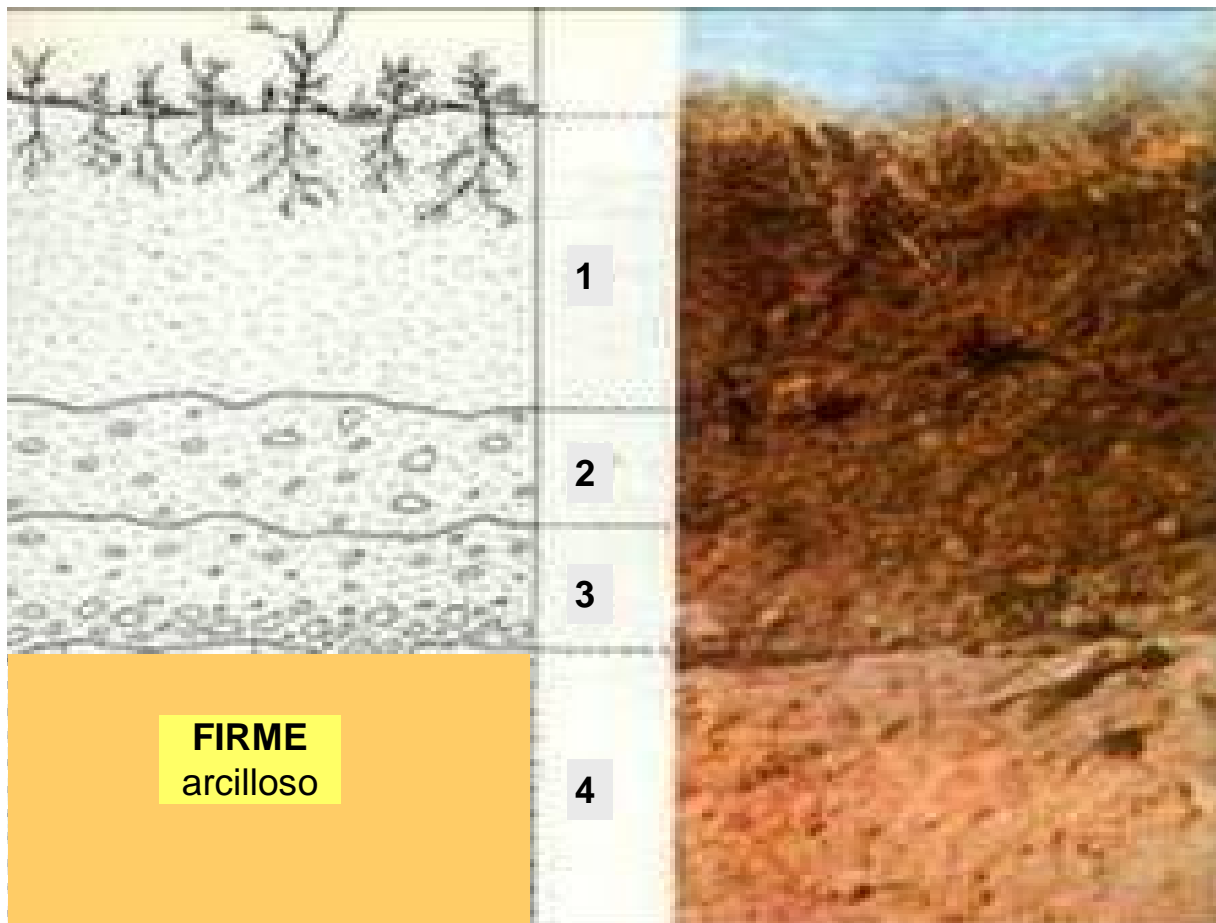
(1 micra = 10^{-3} mm)



Tomás Cabrera (U.P.M.)

Compresión y deformación en un suelo arcilloso I.

El comportamiento de esta estructura y su forma de rotura, cuando se aplica un esfuerzo, varía según las condiciones de contorno que se apliquen.



Primera parte: CARGA RÁPIDA (deformación a corto plazo de tiempo).

Si aplicamos una carga rápida, por ejemplo una zapata de cimentación en terreno arcilloso, el agua no tiene tiempo de disiparse, de escapar, y permitir que la estructura del suelo se deforme en su totalidad. (Deformación primera o **asiento instantáneo**)

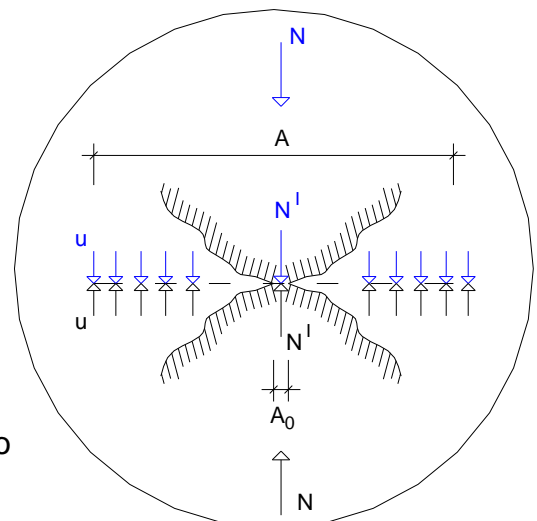
A la carga aplicada se oponen todas las fuerzas de contando entre las partículas.

El suelo presenta una resistencia a la rotura a cortante denominada "**Cohesión**".

Al no permitir que escape el agua tendremos una cohesión aparente, o sin drenaje (**undrained**)

Además: $\sigma = 0$

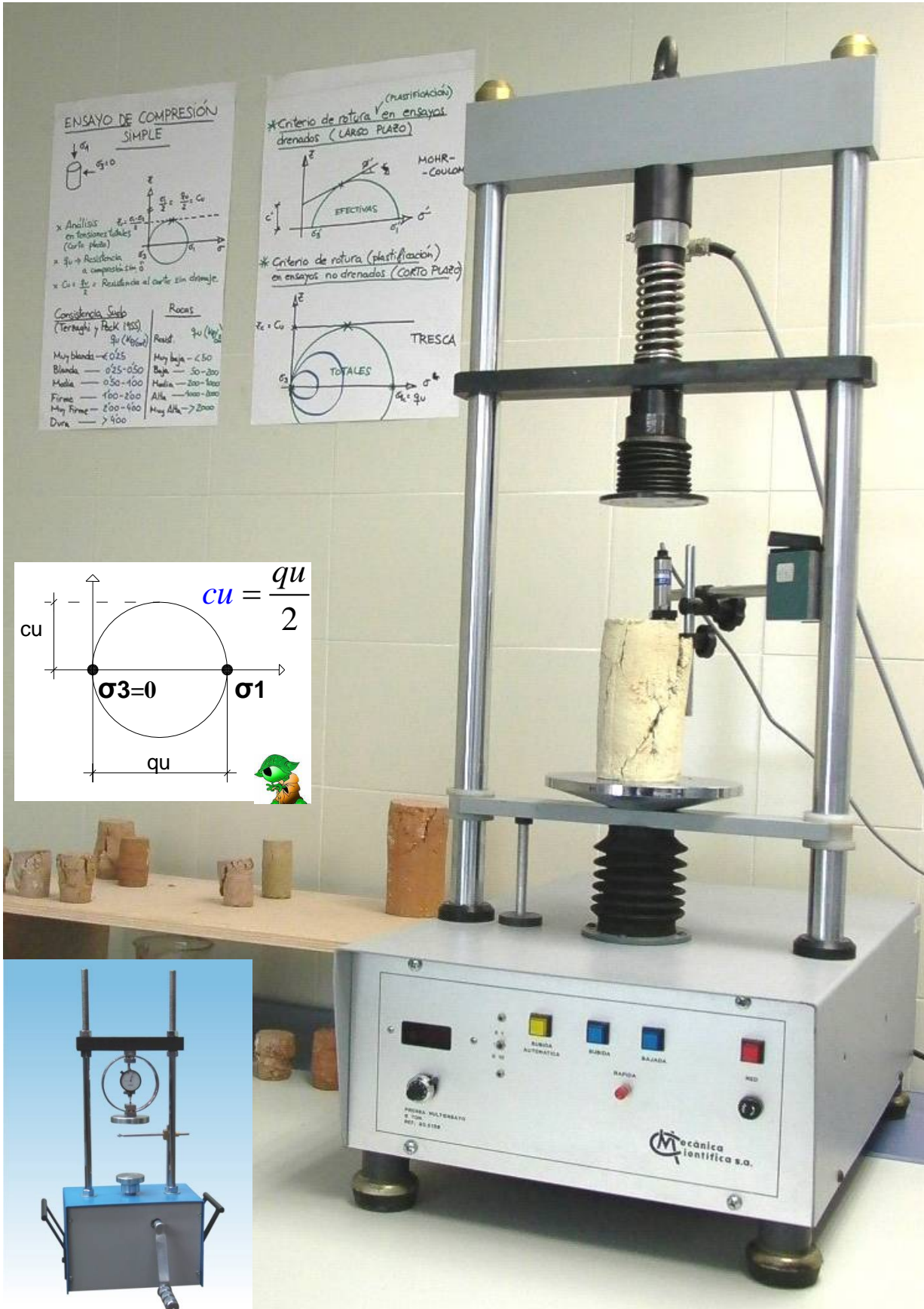
El fenómeno es semejante a si al aplicar una carga de compresión hasta rotura a una probeta de terreno arcilloso y que rompe por cortante (igual que en el ensayo a compresión simple de una probeta de hormigón)



Tomás Cabrera (U.P.M.)

Maquinaria para el ensayo compresión simple en suelos.

La maquinaria varia según se trate de modelos en función del suelo a ensayar: para arcillas blandas, duras, calizas o rocas. Pueden ser manuales o automáticos



Tomás Cabrera (U.P.M.)

Compresión y deformación suelos arcillosos II.

Segunda parte: **CARGA LENTA** (deformación a largo plazo de tiempo).

a/ Suelos normalmente consolidados

Si aplicamos una carga o esfuerzo muy lentamente, el agua intersticial va escapando, disipándose su aportación a las tensiones de contacto

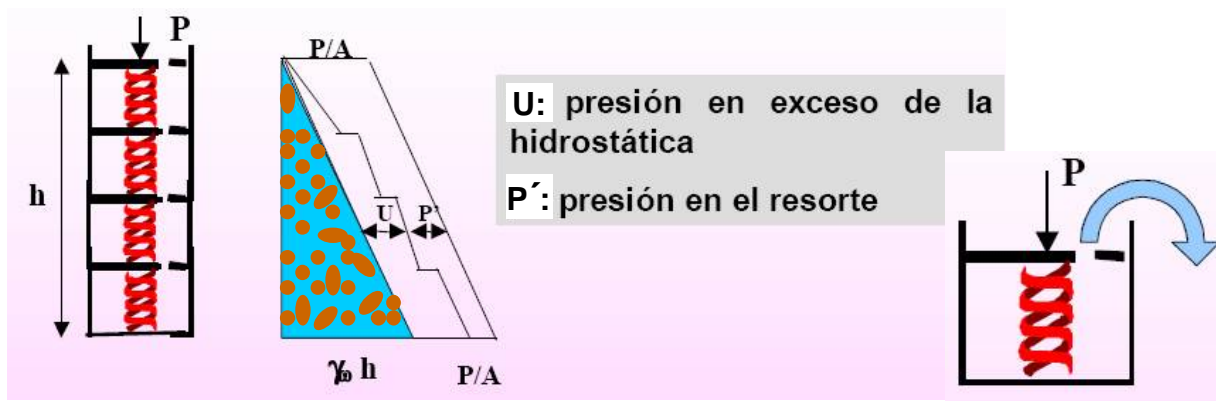
Analogía mecánica del muelle de Terzagui (1936).

En el suelo:

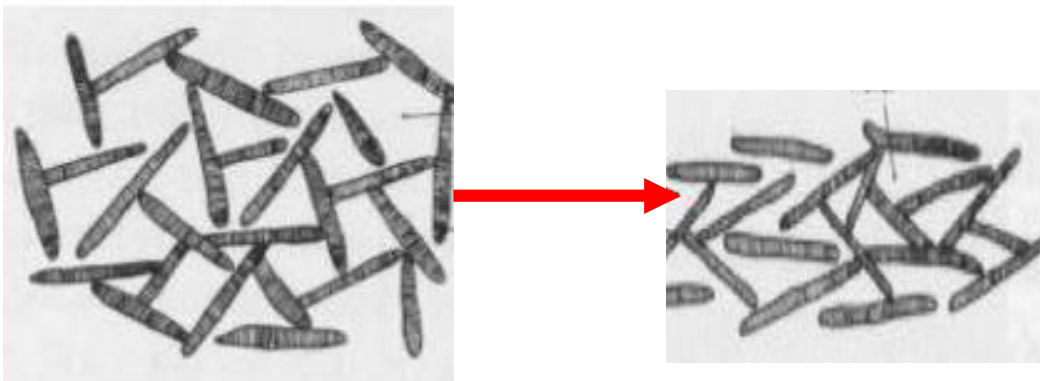
Estructura de partículas sólidas = Resorte.

Agua intersticial = Fluido incompresible.

Capilares continuos (vacíos) = Orificios



Al ir aumentando las tensiones entre las partículas sólidas (muelles), estas se deforman más. Se producen unas rótulas (plastificación) en la zona de contacto de las partículas de arcilla y la estructura de suelo comienza a plegarse sobre si misma compactándose. (deformación secundaria o **asiento diferido**).



Al producirse la plastificación y reorganizarse las partículas del suelo, [la resistencia a cortante debida a la cohesión desaparece.](#)

El mecanismo de resistencia que queda ahora es tan sólo debida al rozamiento entre las partículas del suelo como si se tratara de una arena.

El suelo tendrá ahora un ángulo de rozamiento denominado " ϕ' " o efectivo, puesto que la tensión es efectiva al haber desaparecido el agua. (situación con consolidación y drenaje denominada: **CD**)

Deformación suelos arcillosos sobreconsolidados. Resumen

b/ Suelos sobreconsolidados

Continuando con este suelo idealizado podemos imaginar, además, que las partículas del suelo se someten a grandes presiones y entonces los contactos entre las partículas se plastifican más y más formándose soldaduras en las uniones. Estas soldaduras se ven favorecidas por la presencia de sales, cales, óxidos etc.


Aparece, ahora, otro mecanismo de resistencia a cortan que por analogía se denomina cohesión efectiva: c' que colabora con el rozamiento efectivo: ϕ'

Usualmente para las arcillas, el ángulo efectivo de rozamiento interno: $\phi' = 15^\circ$ a 25°

La razón de sobreconsolidación (Roc) = cociente entre la presión efectiva de sobreconsolidación y la presión efectiva actual.

Resumen suelos cohesivos (arcillosos).

a/ Suelos normalmente consolidados:

Cálculo 1º Situaciones transitorias sin drenaje: $c = c_u$  $\phi = 0$

Cálculo 2º Situaciones permanentes con drenaje: $c' = 0$ $\phi = \phi'$

b/ Suelos sobreconsolidados:

Situaciones transitorias sin drenaje: $c = c_u$ $\phi = 0$

Situaciones permanente con drenaje: $c = c'$ $\phi = \phi'$

En arcillas las comprobaciones con drenaje y sin drenaje son importantes, por ejemplo:

1º **Para la verificación del ELU de estabilidad global de una cimentación**, CTE indica que será necesario comprobar las situaciones transitorias (sin drenaje) y las situaciones definitivas a largo plazo(con drenaje)

2º **Para el cálculo de asentos**, (en el caso más general tiene tres partes):

a/ Cálculo del asiento inmediato o instantáneo. Es el producido casi simultáneamente con la aplicación de la carga.

* En rocas, arenas compactas y suelos nos saturados la mayor parte del asiento es de este tipo y predominantemente elástico.

* En arcillas saturadas corresponde a deformaciones de corte sin drenaje, por tanto, a volumen constante ($\nu = 0,5$). En la teoría de elasticidad: $\Delta V = V * \frac{\sigma}{E} (1 - 2\nu)$

b/ Cálculo de asiento de consolidación. Consecuencia de las deformaciones a largo plazo con drenaje. Disipándose las presiones del agua intersticial y reduciéndose los poros del suelo. Comportamiento típico de las arcillas saturadas.

c/ Asiento de fluencia lenta (consolidación secundaria). Se produce en algunos suelos después del anterior.

Tomás Cabrera (U.P.M.)

CTE: SE-C (Anejo D: Criterios, correlaciones y Valores orientativos)

Tabla D.20. Denominación matizada de suelos granulares⁽¹⁾

Porcentaje de finos < 35%		
Denominación		% de arcilla y limo
Nombre principal	Grava o arena	-
Nombre secundario	Arenosa o con grava	-
Con indicios de	Limos o arcillas	1-10
Algo	Limosa o arcillosa	10-20
Bastante	Limosa o arcillosa	25-35

⁽¹⁾ Los términos arcilla y arcillosa de la tabla deben emplearse cuando se trata de finos plásticos y los términos limo y limosa, cuando los finos no son plásticos o poco plásticos según el criterio de Casagrande.

Tabla D.21. Denominación matizada de suelos finos

Porcentaje de finos > 35%		
Denominación		% de arena y grava
Nombre principal	Arcilla o limo	< 35
Nombre secundario	Arenosa/so o con grava	35-65

Tabla D.23. Valores orientativos de N_{SPT}, resistencia a compresión simple y módulo de elasticidad de suelos

Tipo de suelo	N _{SPT}	q _u (kN/m ²)	k/cm ²	E (MN/m ²) = kN/mm ²
Suelos muy flojos o muy blandos	< 10	0 - 80		< 8
Suelos flojos o blandos	10 - 25	80 - 150	0,8 - 1,5	8 - 40
Suelos medios	25 - 50	150 - 300	1,5 - 3	40 - 100
Suelos compactos o duros	50 - Rechazo	300 - 500	3 - 5	100 - 500
Rocas blandas	Rechazo	500 - 5.000		500 - 8.000
Rocas duras	Rechazo	5.000 - 40.000		8.000 - 15.000
Rocas muy duras	Rechazo	> 40.000		>15.000

Equivalencia unidades sistema SI:

Pa = presión de una altura de 1/10 de mm de columna de agua = **N/m²**

(agua = 1000 k/m³ = 10⁴ N/m³) → Pa = γ * h = 10⁴ N/m³ * 10⁻⁴ m = N/m²)

KPa = 10³ Pa = kN/m².....= 1/100 daN/cm² = 1/1000 **N/mm²** = 1/100 k/cm²

MPa = 10⁶ Pa = N/mm² = MN/m² daN/cm² <> kp/cm² = 1/10 N/mm²

GPa = 10⁹ Pa para módulos elasticidad altos: acero Es= 200 GPa hormigón Eh= 20 GPa

Tabla D.24. Valores orientativos del coeficiente de Poisson

Tipo de suelo	Coficiente de Poisson
Arcillas blandas normalmente consolidadas	0,40
Arcillas medias	0,30
Arcillas duras preconsolidadas	0,15
Arenas y suelos granulares	0,30

Tomás Cabrera (U.P.M.)

CTE: SE-C (Anejo D: Criterios, correlaciones y Valores orientativos)

Tabla D.26. Valores orientativos de densidades de suelos

Tipo de suelo	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)
Grava	20 – 22	15 – 17
Arena	18 – 20	13 – 16
Limo	18 – 20	14 – 18
Arcilla	16 – 22	14 – 21

Tabla D.27. Propiedades básicas de los suelos

Clase de suelo		Peso específico aparente (kN/m ³)	Ángulo de rozamiento interno
Terreno natural	Grava	19 – 22	34° - 45°
	Arena	17 – 20	30° - 36°
	Limo	17 – 20	25 – 32°
	Arcilla	15 – 22	16° – 28°
Rellenos	Tierra vegetal	17	25°
	Terraplén	17	30°
	Pedraplén	18	40°

Tabla D.2. Compacidad de las arenas

Clasificación	Índice N _{SPT}
Muy floja	< 4
Floja	4-10
Media	11-30
Densa	31-50
Muy densa	>50

Tabla D.3. Consistencia de las arcillas

Clasificación	Resistencia a compresión simple q_u (kPa) = kN/m ²
Muy blanda	0-25
Blanda	25-50
Media	50-100
Firme	100-200
Muy firme	200-400
Dura	> 400 = 0,4 N/mm ² = 4 daN/cm ²

CTE: SE-C (Anejo D: Criterios, correlaciones y Valores orientativos)

Tabla D.25. Presiones admisibles a efectos orientativos

Terreno	Tipos y condiciones	Presión admisible [Mpa] = N/mm ²	Observaciones
Rocas	Rocas ígneas y metamórficas sanas ⁽¹⁾ (Granito, diorita, basalto, gneis)	10	Para los valores apuntados se supone que la cimentación se sitúa sobre roca no meteorizada
	Rocas metamórficas foliadas sanas ^{(1), (2)} (Esquistos, pizarras)	3	
	Rocas sedimentarias sanas ^{(1), (2)} : Pizarras cementadas, limolitas, areniscas, calizas sin karsificar, conglomerados cementados	1 a 4	
	Rocas arcillosas sanas ^{(2), (4)}	0,5 a 1	
	Rocas diaclasadas de cualquier tipo con espaciamiento de discontinuidades superior a 0,30m, excepto rocas arcillosas	1	
	Calizas, areniscas y rocas pizarrosas con pequeño espaciamiento de los planos de estratificación ⁽³⁾	-	
	Rocas muy diaclasadas o meteorizadas ⁽³⁾	-	
Suelos granulares (% finos inferior al 35% en peso)	Gravas y mezclas de arena y grava, muy densas	>0,6	Para anchos de cimentación (B) mayor o igual a 1 m y nivel freático situado a una profundidad mayor al ancho de la cimentación (B) por debajo de ésta
	Gravas y mezclas de grava y arena, medianamente densas a densas	0,2 a 0,6	
	Gravas y mezclas de arena y grava, sueltas	<0,2	
Gravas			
Arenas	Arena muy densa	>0,3	
	Arena medianamente densa	0,1 a 0,3	
	Arena suelta	<0,1	
Suelos finos (% de finos superior al 35% en peso)	Arcillas duras	0,3 a 0,6	Los suelos finos normalmente consolidados y ligeramente sobreconsolidados en los que sean de esperar asentamientos de consolidación serán objeto de un estudio especial. Los suelos arcillosos potencialmente expansivos serán objeto de un estudio especial
	Arcillas muy firmes	0,15 a 0,3	
	Arcillas firmes	0,075 a 0,15	
	Arcillas y limos blandos	<0,075	
	Arcillas y limos muy blandos	<0,075	
Arcillas			

OJO
tensiones admisibles