



PROGETTAZIONE STRUTTURALE E GEOTECNICA DI FONDAZIONI E OPERE DI SOSTEGNO

4: COMPORTAMENTO IDRAULICO DELLE TERRE

Di Francesco Romolo

Prof. Gheresi Aurelio

GEOLOGIA DELLE ARGILLE



Le terre possono essere suddivise in due grandi gruppi, sulla scorta delle differenze granulometriche, della loro genesi e del comportamento idraulico e meccanico:

- 1) le sabbie, comprendenti anche le ghiaie e definite **terre a grana grossa**;
- 2) le argille, comprendenti anche i limi e definite **terre a grana fine**.

Da un punto di vista granulometrico possono essere classificate secondo gli standard internazionali sintetizzati nella seguente tabella:

Classificazione	Ghiaia	Sabbia	Limo	Argilla
MIT	60	2	0.06	0.002
AGI	-	2	0.02	0.002
AASHO	75	2	0.075	0.002

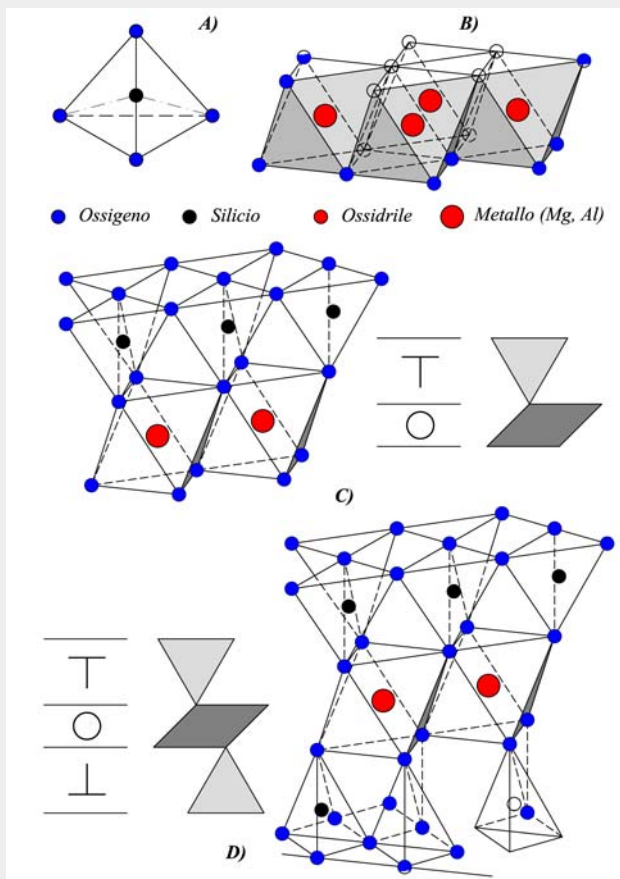
Limitando l'attenzione alle sole terre a grana fine, le uniche campionabili, la loro genesi è suddivisibile in pochi stadi:

- 1) l'attività tettonica che conduce in superficie le rocce esistenti in profondità;
- 2) l'alterazione in ambiente sub-aereo seguita da erosione meccanica;
- 3) Il trasporto fino ai bacini di sedimentazione.



Ciò che però distingue sostanzialmente le argille dalle sabbie è insito nella natura mineralogica delle particelle costituenti, le cui dimensioni impone uno studio mediante microscopi ad elevata risoluzione e che influenzano in maniera drastica il comportamento idraulico e meccanico.

MINERALOGIA DELLE ARGILLE



Le argille, appartenenti al gruppo dei **fillosilicati**, possiedono strutture complesse date dalla combinazione:

- 1) dell'**unità tetraedrica (T)** → schema "A", data dall'unione di Silicio con Ossigeno;
- 2) dell'**unità ottaedrica (O)** → schema "B" data dall'unione di Ossigeno con Metalli.

Dalla ripetizione periodica di tali gruppi si generano le strutture di tipo **TO** e **TOT** caratterizzate dalla presenza di un numero limitato di elementi quali Ossigeno, Silice, Alluminio, Magnesio, Ferro e Potassio.

Inoltre la loro disposizione spaziale, a formare un reticolo regolare e ripetitivo dal quale dipendono le proprietà chimico – fisiche, conduce alla definizione di 6 grandi gruppi:

- il gruppo della **Caolinite**;
- il gruppo della **Illite**;
- il gruppo delle **Smectiti**;
- il gruppo delle **Cloriti**;
- il gruppo delle **Vermiculiti**;
- Il gruppo delle argille a **struttura mista**.

I primi cinque sono caratterizzati da una struttura a strati costituita da lamelle esagonali che manifestano proprietà elettrostatiche.

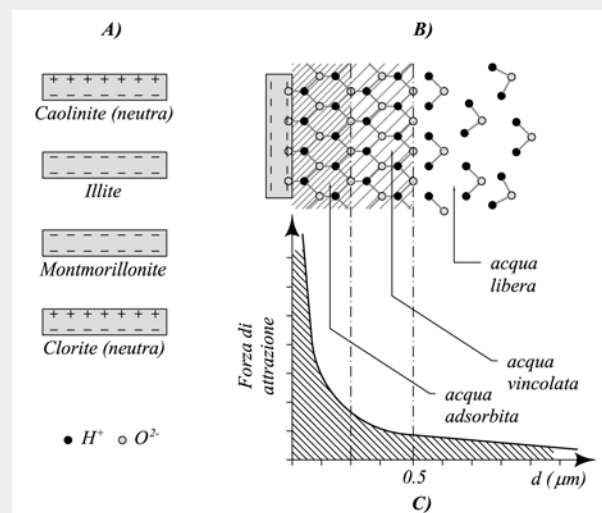
Notare l'analogia con la figura iniziale!

L'ACQUA NELLE ARGILLE

L'acqua nelle argille è presente come:

- 1) **acqua di coordinazione**, facente parte integrante dei reticoli;
- 2) **acqua di struttura**, presente negli interstizi reticolari;
- 3) **acqua adsorbita**;
- 4) **acqua libera**.

L'acqua libera, presente negli interstizi interparticellari, è quella che partecipa al comportamento idraulico e meccanico delle terre, mentre quella adsorbita risente delle forze di attrazione elettrostatiche dovute alla presenza di cariche elettriche sbilanciate esistenti sulla superficie delle lamelle argillose.



Altro elemento importante nello studio delle argille è legato alla loro genesi dovuta alla frammentazione (disgregazione delle rocce) ed all'idrolisi (reazione dei minerali con l'acqua). Considerando che tali processi risentono della latitudine e dell'altitudine si scopre che:

- a) le **Illiti** e le **Cloriti** sono tipiche delle regioni fredde, ossia elevate latitudini e zone montuose;
- b) le **Vermiculiti** e i minerali a strati sono tipici delle zone temperate delle latitudini intermedie;
- c) le **Smectiti** prevalgono nelle zone mediterranee e tropicali;
- d) le **Caoliniti** si rinvencono nelle zone equatoriali.

Le formazioni argillose del centro Italia sono composte da Montmorillonite (circa il 60%), da Illite (circa il 20%), da Caolinite (circa il 10%), da Clorite (circa il 5%) e da Carbonato di Calcio. Quale comportamento attenderci allora dalle argille grigio-azzurre plio-pleistoceniche?

FORZE DI MASSA E FORZE DI SUPERFICIE

Sulle particelle componenti le terre agiscono **forze di massa** (dette anche di volume in quanto legate alla forza peso) e **forze di superficie** dovute alle interazioni interparticellari dipendenti dalla natura geologica.

Per comprendere il loro ruolo nell'ambito dello studio della risposta meccanica alle sollecitazioni imposte può essere utile introdurre un nuovo parametro detto **superficie specifica** data dal rapporto tra l'area della superficie di una singola particella e la sua massa:

$$S_s = \frac{A}{\rho \cdot V}$$

Per poter applicare tale equazione occorre tenere conto anche delle evidenze sperimentali, per cui nel caso delle **sabbie**, indicando con d il diametro di una particella supposta sferica, si ha:

$$S_s = \frac{6}{\rho \cdot d}$$

Considerato il peso specifico medio $\rho = 2.65 \text{ g/cm}^3$ e un diametro medio $d = 0.1 \text{ cm}$ si scopre che la superficie specifica di una sabbia è: $S_s = 22.64 \text{ cm}^2/\text{g}$.

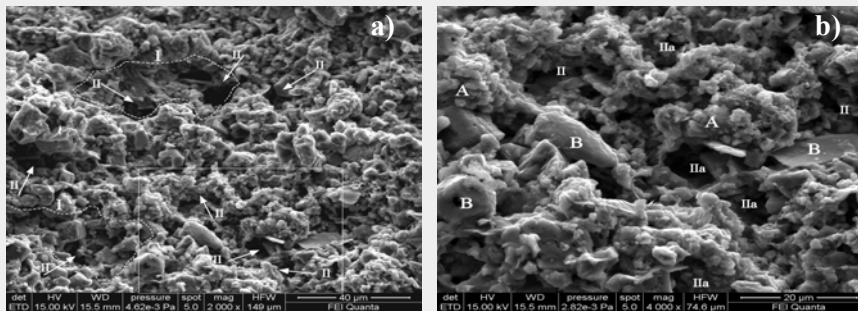
Nel caso delle argille, denotando con s lo spessore delle lamelle, vale invece:

$$S_s = \frac{2}{\rho \cdot s}$$

Per spessori medi delle lamelle $s = 0.1 \div 4$ decimi di micron la superficie specifica delle argille assume valori di $S_s = 10 \div 20 \text{ m}^2/\text{g}$ nelle caoliniti e di $S_s = 800 \text{ m}^2/\text{g}$ nelle montmorilloniti. In altre parole, le argille possiedono superfici specifiche circa 400 volte superiori a quelle delle sabbie.

FORZE DI MASSA E FORZE DI SUPERFICIE

La differenza nella superficie specifica tra le **argille** e le sabbie conducono alla **prevalenza delle forze di superficie** nelle prime, di natura elettrostatica e dipendenti dalle cariche elettriche a loro volta funzione della mineralogia.



Nel caso invece delle **sabbie prevalgono le forze di massa**, dando luogo ad interazioni tra le particelle di natura esclusivamente meccanica.



Tali effetti si traducono nella presenza di acqua libera di muoversi nelle sabbie ed attratta elettrostaticamente nelle argille, conducendo a comportamenti idraulici e meccanici diversi.

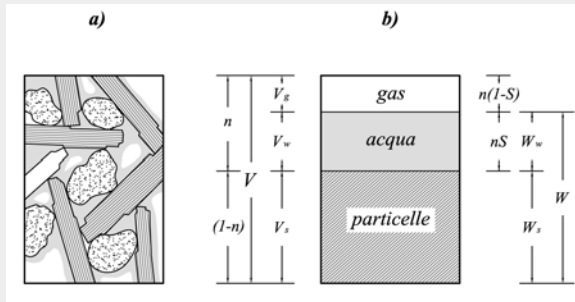
Nota: perché è più corretto definire un “angolo di resistenza al taglio” piuttosto che un “angolo di attrito interno” ?

PARAMETRI INDICE

I terreni nella loro complessità possono essere visti come mezzi bi-trifase, costituiti da uno scheletro solido con vuoti interparticellari più o meno in comunicazione percorsi da fluidi di varia natura.

In genere vengono considerati saturi d'acqua, risultando di fatto sistemi bifase, per tre motivi:

- 1) perché in questo modo è più facile la trattazione matematica del loro comportamento;
- 2) perché, supponendo lo scheletro solido indeformabile, dalla misura della quantità di acqua drenata nelle prove di laboratorio è possibile determinare la variazione di volume;
- 3) perché le prove sono in tal modo replicabili.



Un sistema saturo può essere descritto da un solo parametro, la porosità:

$$n = (V_v / V) \times 100$$

dal quale può essere ricavato l' indice dei vuoti :

$$e = V_v / V_s = n / (1+n)$$

Ulteriori parametri utili sono il contenuto d'acqua:

$$w = (W_w / W_s) \times 100$$

ed il grado di saturazione:

$$S = (V_w / V_v) \times 100$$

In laboratorio viene determinato direttamente il contenuto d'acqua, il peso specifico delle particelle (G_s) ed il peso di volume secco delle terre (γ_d); l'indice dei vuoti, la porosità, il grado di saturazione, il peso di volume naturale (γ_n) e il peso di volume saturo (γ_{sat}) sono ricavati mediante relazioni tra le fasi.

$$\text{Esempio: } \gamma_n = [(1-n) \times G_s] + (n \times S \times \gamma_w)$$

IL COEFFICIENTE DI PERMEABILITA'

L'ipotesi base nella Meccanica delle Terre è che lo scheletro solido sia indeformabile nel campo delle normali tensioni ingegneristiche, ossia tali da evitare ad esempio la frantumazione delle particelle nelle sabbie. Ciò comporta che la risposta meccanica di un terreno saturo deve dipendere dal moto dei fluidi presenti negli interstizi funzione della porosità e pertanto dell'indice dei vuoti.

Litologia	K (m/s)
Argille OC	$< 10^{-9}$
Argille NC	$< 10^{-10}$
Limi	$10^{-4} \times 10^{-6}$
Sabbie limose	$10^{-3} \times 10^{-4}$
Sabbie fini	$10^{-2} \times 10^{-3}$
Sabbie pulite medie	$10^{-1} \times 10^{-2}$
Ghiaia pulita	$10^{-1} \pm 1$

A sua volta lo studio del moto dei fluidi richiede l'introduzione di un ulteriore parametro, il **coefficiente di permeabilità** che esprime la capacità di una terra di trasmettere l'acqua, tanto da assumere la dimensione di una velocità (m/s).



Con riferimento ai valori in tabella, la distanza di 1 centimetro viene percorsa dall'acqua in un tempo trascurabile nelle ghiaie, in circa 17 minuti nelle sabbie e in 115 giorni nelle argille OC!

Ne deriva che le terre a grana grossa possono essere considerate come sistemi idraulici aperti, con conseguente drenaggio istantaneo della fase fluida o comunque in un tempo trascurabile rispetto a quello di applicazione dei carichi esterni.

Al contrario le terre a grana fine si comportano come sistemi idraulici chiusi se paragonati ai tempi di costruzione di una struttura, ovvero a sistemi aperti ma con tempi di drenaggio dell'ordine degli anni o delle decine di anni, tanto da manifestare cedimenti elastoplastici e cedimenti viscosi.

In definitiva si assiste ad una risposta meccanica ritardata per le argille che denota l'esistenza di condizioni differenti tra il breve ed il lungo termine, ossia tra condizioni non drenate (Tresca) e drenate (Mohr-Coulomb)!

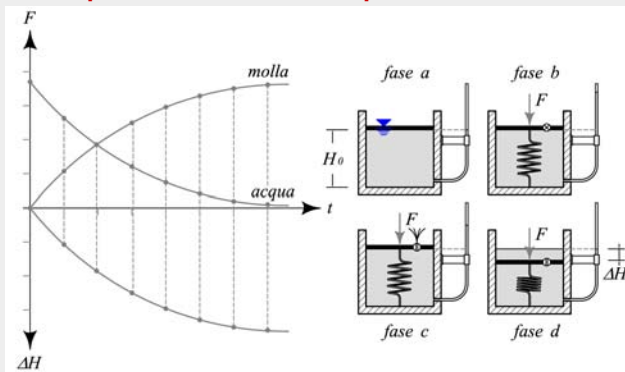
IL CONCETTO DI RITARDO IDRODINAMICO

Occorre innanzitutto considerare che le terre possono essere viste come sistemi marcatamente iperstatici (ad esempio **le particelle possono essere pensate come connesse con cerniere a doppia biella**).

Nel caso delle sabbie l'applicazione di un carico comporta l'immediata espulsione dell'acqua, con conseguente trasferimento degli sforzi all'impalcatura solida. Ne consegue lo sviluppo di cedimenti che si traducono in diminuzione della porosità, con un riassetto strutturale che diminuisce i gradi di libertà del sistema. La fase fluida non partecipa al processo, assumendo un ruolo neutro, com'è possibile verificare passeggiando sulle spiagge con l'acqua che sfugge dal di sotto dei nostri piedi.

Nelle argille la bassissima permeabilità impedisce il drenaggio nelle fasi iniziali di applicazione del carico che viene pertanto interamente sopportato dalla fase fluida. Siamo in **condizioni non drenate** per le quali sono possibili solo riassetti strutturali interni in assenza di variazione di volume ($\Delta u \neq 0, \Delta V = 0$). Con il trascorrere del tempo si assiste al lento drenaggio dell'acqua, che termina nel momento in cui gli sforzi sono interamente trasferiti allo scheletro solido. Siamo arrivati alla fine del processo, corrispondente a **condizioni drenate** ed al quale corrispondono variazioni di volume ($\Delta u = 0, \Delta V \neq 0$).

Il comportamento meccanico differenziato tra il breve ed il lungo termine si traduce, per le argille, in una risposta ritardata nel tempo nota come ritardo idrodinamico!

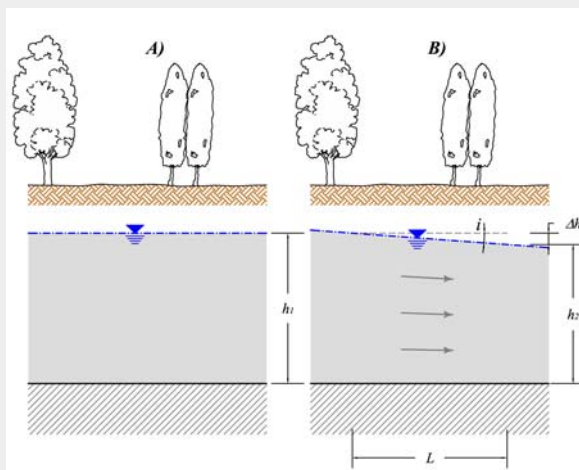


Il processo descritto può essere simulato con il **modello analogico idromeccanico**, nella quale la molla simula lo scheletro solido e la fase fluida l'acqua presenti nei pori.

La presenza di una valvola consente di distinguere le fasi iniziali (non drenate) da quelle finali (drenate), con la conseguente trasmissione degli sforzi dall'acqua alle particelle e relativo sviluppo di **cedimenti di consolidazione** (ΔH).

Analogia con bottiglia di acqua gassata!

FALDE, MOTI DI FILTRAZIONE e CONSOLIDAZIONE



Le falde possono essere di due tipi:

- 1) **freatiche**, in quanto in equilibrio con la pressione atmosferica;
- 2) **artesiane**, ossia in pressione.

Nel primo caso sono possibili solo tre differenti moti filtratori:

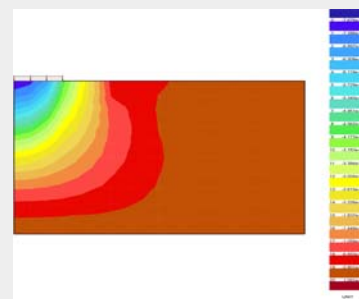
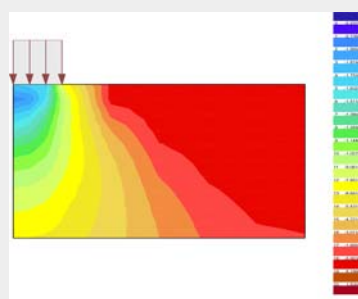
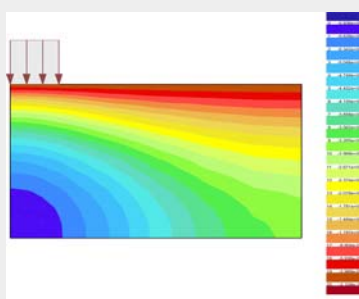
- a) **assenza di filtrazione** corrispondente ad acqua in quiete,
- b) **filtrazione stazionaria** o a regime, con acqua in movimento costante sotto l'azione di un gradiente idraulico;
- c) **filtrazione transitoria**, con velocità variabile nel tempo.

All'ultimo caso corrisponde il fenomeno della consolidazione!

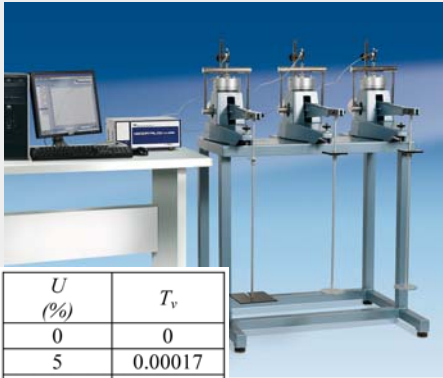
sovrapressioni interstiziali iniziali

bulbo delle tensioni indotte

cedimenti verticali



BREVE INTRODUZIONE ALLA TEORIA DELLA CONSOLIDAZIONE



La teoria della consolidazione monodimensionale fu presentata dal Terzaghi e Fröhlich nel 1936, sintetizzata in un'equazione differenziale che lega la variazione nel tempo delle sovrappressioni indotte nel sottosuolo ad esempio da un carico trasmesso da una fondazione:

$$c_v \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t}$$

$$c_v = \frac{K_z}{\gamma_w \cdot m_v}$$

Tale equazione governa il fenomeno della filtrazione in regime transitorio dall'istante di applicazione del carico fino al raggiungimento delle condizioni stazionarie finali (recupero della pressione interstiziale iniziale).

Nel 1948 Taylor presentò la soluzione approssimata, introducendo due parametri adimensionali che modificarono l'equazione di Terzaghi:

$$Z = \frac{z}{H}$$

$$T_v = \frac{c_v \cdot t}{H^2}$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial Z^2} = \frac{\partial u}{\partial T_v}$$

Tale soluzione comporta che, una volta determinato il c_v in laboratorio è possibile calcolare i tempi di dissipazione dei cedimenti di consolidazione di una fondazione tramite i valori tabellati di T_v in funzione del grado di consolidazione U .

La soluzione di Taylor manifesta due grandi limiti:

- 1) **Sovrastima i tempi di dissipazione rispetto ai dati sperimentali;**
- 2) **Utilizza valori di T_v sempre uguali, qualunque sia la storia geologica di un'argilla.**

U (%)	T_v
0	0
5	0.00017
10	0.0077
15	0.0177
20	0.0314
25	0.0491
30	0.0707
35	0.0962
40	0.126
45	0.159
50	0.197
55	0.238
60	0.286
65	0.342
70	0.404
75	0.477
80	0.567
85	0.684
90	0.848
95	1.129
100	∞

FINE

*Tutte le figure sono protette dai diritti di copyright;
contattare gli autori per l'autorizzazione all'uso.*