

V CONGRESSO INTERNAZIONALE DI GEOTECNICA  
Parigi, luglio 1961

LA TEORIA DELL'ACQUA PELLICOLARE  
NELLA INTERPRETAZIONE DELLA COERENZA DELLE TERRE  
E DI ALTRI FENOMENI

R. DI MARTINO (\*)

**SOMMARIO:** Lo studio comparato di alcuni fenomeni del terreno ha condotto l'Autore a rivedere la teoria dell'acqua pellicolare formulando l'ipotesi che questa costituisca con continuità, come acqua libera di muoversi rispetto alle particelle solide, non solo gli anelli intergranulari ma anche un velo continuo monomolecolare intorno alla restante superficie delle particelle, e la ipotesi che ai tre possibili stati tensionali dell'acqua costituente gli anelli ( $p \leq 0$ ) corrispondano altrettanti aspetti e comportamenti caratteristici del terreno.

A conforto delle dette ipotesi sta di fatto che partendo da questa base unitaria di carattere essenzialmente meccanico l'Autore ha potuto dare una convincente interpretazione ad alcuni fenomeni del terreno molto caratteristici, finora poco chiaramente collegabili.

Gli studi e le ricerche effettuate, molto succintamente riportati per motivi di spazio, vertono sui seguenti argomenti:

La coerenza delle terre; le frazioni adesive delle terre; plasticità ed umidità critica; il limite di ritiro; la curva di Proctor; distribuzione dell'acqua nel terreno in base alla granulometria; movimento dell'acqua pellicolare; il punto di steccamento.

### Premessa

La finalità di questo studio è stata quella di trovare una base comune a parecchi fenomeni del terreno apparentemente indipendenti tra loro benché tutti connessi al contenuto di acqua.

L'approfondimento del meccanismo di azione dell'acqua pellicolare si è rivelato particolarmente efficace a tale scopo.

Questa relazione, molto sunteggiata, è pertanto divisa in due parti: 1) studio dell'acqua pellicolare; 2) interpretazione di alcuni fenomeni del terreno.

## I PARTE

### Il meccanismo dell'acqua pellicolare

Chiamiamo *acqua pellicolare* l'acqua libera che ricopre come pellicola lo strato di acqua adsorbita e forma *anelli* nei punti di contatto tra particelle adiacenti.

(\*) Prof. Ing. Renato DI MARTINO - Libero Docente in *Costruzioni Stradali e Ferroviarie* presso l'Università di Napoli.

HAINES (1925) e FISCHER (1926) furono i primi a studiare la teoria degli anelli, largamente riportata nel testo di BAVER [1] e in altri testi; per motivi di spazio consideriamo nota la conoscenza dei presupposti e delle conclusioni dei loro studi e illustreremo soltanto i principali aspetti del meccanismo di azione dell'acqua pellicolare secondo la nostra rielaborazione.

#### a) Spessore della pellicola di acqua

La pellicola di acqua che circonda ciascuna particella aderisce allo strato di acqua adsorbita a causa dell'effetto combinato della tensione superficiale e della curvatura diretta verso l'interno; pertanto qualsiasi molecola di acqua libera che fosse compresa fra lo strato adsorbito e la pellicola esterna monomolecolare si troverebbe in stato di compressione.

L'acqua libera dell'anello è, almeno in fase di formazione, in uno stato di depressione a causa del prevalere della curvatura verso l'esterno della pellicola superficiale monomolecolare dell'anello stesso; conseguentemente, nessuna molecola di acqua libera, a eccezione di quelle costituenti il velo esterno mo-

nomolecolare, può circondare lo strato di acqua adsorbita a meno che non sia parte dell'anello intergranulare.

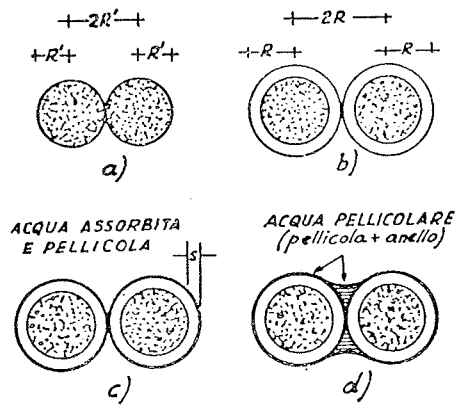


Fig. 1 - Progressiva distribuzione dell'acqua su due granuli adiacenti quando umidificati a partire dallo stato secco.

La Fig. 1 mostra la progressiva distribuzione dell'acqua su due particelle sferiche quando l'inumidimento inizia dallo stato completamente secco.

b) Pressione dell'acqua costituente gli anelli intergranulari

Con riferimento a un terreno ideale le cui particelle siano tutte sfere monometriche, la pressione dell'acqua costituente l'anello tra due granuli adiacenti

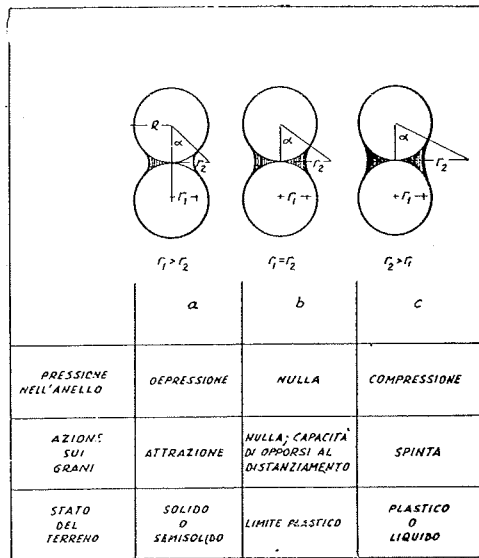


Fig. 2 - Pressione nell'anello e sue conseguenze.

centi si calcola mediante la formula di LAPLACE:

$$p = T \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

dove  $r_1$  ed  $r_2$  sono rispettivamente i raggi della parte convessa e di quella concava dell'anello, come indicato nella Fig. 2 (1).

(1) La curva concava è stata supposta circolare per semplicità di calcolo; in effetti [2] essa è una catenaria. La differenza non incide l'aspetto qualitativo dei risultati del presente studio.

Qualunque variazione del contenuto di acqua pellicolare nel terreno significa, presto o tardi, un cambio di dimensioni degli anelli; poiché i raggi  $r_1$  ed  $r_2$  variano in misura diversa col variare di dette dimensioni, possiamo prevedere tre diversi e consecutivi stati tensionali di un terreno a seguito dell'aumento di dimensioni degli anelli a partire dall'istante della loro formazione (p. e. inumidendo il terreno a partire dallo stato secco).

1)  $p$  negativa fin quando  $r_1 > r_2$ ; l'acqua è in stato di trazione (suction) Fig. 2a.

2)  $p$  nulla quando  $r_1 = r_2$  Fig. 2b; l'acqua non è in pressione.

3)  $p$  positiva fin quando  $r_1 < r_2$  Fig. 2c; l'acqua è in compressione.

E' da notare che la compressione (caso 3) dovuta alla differenza di curvature dell'anello non può mai essere maggiore della compressione dovuta alla cur-

vatura  $\frac{1}{R}$  delle sfere; pertanto queste ultime non

possono mai essere circondate da una pellicola di acqua libera di spessore maggiore di una molecola, malgrado qualsiasi addizione di acqua.

Da un certo punto in poi si formerà una goccia che riempirà un poro adiacente o scorrerà verso il basso.

II PARTE

Principali deduzioni dalla teoria esposta

1) La coerenza delle terre

Chiamiamo coerenti quelle terre che mostrano una apprezzabile resistenza a trazione entro un certo campo di umidità o dopo essiccazione.

La causa diretta o indiretta di tale coerenza (2) può attribuirsi, a nostro parere, all'acqua pellicolare.

In effetti è verosimile che la coerenza di un campione di terra essiccata sia dovuta alla formazione di uno scheletro cristallino costituito dai sali precedentemente disciolti nell'acqua libera e poi concentrati dagli anelli intergranulari nei punti di contatto; l'esistenza di sali anche nell'acqua adsorbita e nella pellicola esterna, dà all'insieme una continuità chimico-fisica che, in assenza del solvente (acqua libera), spiega bene la resistenza meccanica, la fragilità e la mancanza di tixotropia dei campioni di terra secca ovvero, in natura, delle zolle di terra.

La coerenza delle terre non sature è dovuta, a nostro parere, esclusivamente all'acqua pellicolare agente direttamente nei punti di contatto tra le particelle con una forza attrattiva che può essere assai diversa da punto a punto in quanto dipendente da fattori di forma e dalla pressione dell'acqua.

(2) Abbiamo preferito chiamare coerenza la resistenza a trazione per poter lasciare alla parola coesione il suo convenzionale (in Geotecnica) significato di resistenza a taglio; in questo modo è ammissibile che un terreno incoerente possa talvolta, presentare coesione (dovuta ovviamente alla compenetrazione dei grani).

La forza attrattiva elementare tra due particelle sferiche può essere calcolata con la formula di HAINES e FISHER:

$$h^+ = F_1 + F_2 = p \pi r_1^2 - 2 \pi r_1 T =$$

$$= \pi T \left(1 - \frac{r_1}{r_2}\right) r_1 - 2 \pi r_1 T = -\pi T \left(1 + \frac{r_1}{r_2}\right) r_1$$

Da questa relazione si desume che, qualunque sia il valore del rapporto  $\frac{r_1}{r_2}$  la risultante delle due forze  $F_1$  e  $F_2$  è sempre tale da spingere le particelle l'una contro l'altra, cosicchè l'eventuale stato di compressione dell'acqua ( $r_1 < r_2$ ) indebolisce certamente l'azione legante dell'anello ma non può eliminarla, nè può distaccare le particelle.

La resistenza totale a trazione  $H$  misurata in  $g/cm^2$  o  $kg/cm^2$ , deve considerarsi come la somma delle forze elementari di coerenza  $h^+$ . Di conseguenza, per un terreno ideale il cui numero di particelle sferiche mo-

nometriche per  $cm^2$  può supporre pari ad  $n = \frac{1}{D^2}$  (sistemazione aperta), possiamo scrivere:

$$H = nh^+ = \frac{1}{D^2} \pi T \left(1 + \frac{r_1}{r_2}\right) r_1 \frac{D}{2} =$$

$$= \frac{1}{D} \frac{\pi T}{2} \left(1 + \frac{r_1}{r_2}\right) r_1$$

dove  $r_1$  ed  $r_2$  sono quelli riportati nella Tab. 1. I valori teorici di  $H$  per le tre frazioni dei fini del terreno sono indicati nella Tab. 2.

TABELLA 1

$\alpha$	$R_a = R_b = 1 \text{ cm}$				$R_a = 1 \text{ cm}$
	$r_1$	$\frac{r_1}{r_2}$	$p$ g/cm <sup>2</sup>	$h$ g	$R_b = \infty$ $\alpha$ g
30'	0,00859	217,250	1.875,00	0,44509	0,88909
1°	0,01731	115,400	495,60	0,46315	1,01818
2°	0,03461	56,738	120,75	0,4693	0,9463
3°	0,05104	37,255	53,32	0,4590	0,9353
4°	0,06749	27,660	29,55	0,4547	0,9233
5°	0,08367	21,903	18,75	0,4504	0,9172
7°	0,11528	15,370	9,30	0,4432	0,9088
10°	0,16091	10,435	4,42	0,4337	0,8917
14°	0,21872	7,145	2,13	0,4190	0,8684
18°	0,27346	5,314	1,18	0,4057	0,8431
22°	0,32549	4,144	0,72	0,3933	0,8158
24°	0,35060	3,705	0,57	0,3881	0,8013
30°	0,42266	2,732	0,31	0,3710	0,7552
40°	0,53369	2,171	0,10	0,3443	0,6710
45°	0,58579	1,414	0,05	0,3329	0,6264
50°	0,63603	1,144	- 0,02	0,3205	0,5811
53°07'	0,66614	1,000	0,00	0,3151	0,5532
55°	0,685	0,922	+ 0,008	0,3100	0,5341
60°	0,738	0,738	0,02	0,3019	0,4883
65°	0,778	0,570	0,04	0,2878	0,4427
68°40'	0,811	0,463	0,05	0,2799	0,4297

Ovviamente la finalità di tali calcoli è quella di ottenere dei valori indicativi dell'ordine di grandezza di  $h^+$  e  $H$ .

La variazione di coerenza con il contenuto di acqua pellicolare.

Con riferimento a particelle sferiche, la relazione analitica tra la coerenza  $h^+$  e la umidità  $w$  può essere studiata come relazione tra  $h^+$  e  $\alpha$ , chiamando con  $\alpha$  l'angolo che la congiungente i due centri delle sfere forma con il raggio passante per il punto di inizio dell'anello (vedi Fig. 2).

Abbiamo sviluppato tale indagine per i due seguenti casi:

- a) due particelle sferiche aventi lo stesso raggio  $R$ ;
- b) una particella sferica di raggio  $R$  adiacente a una superficie piana.

Poiché i parametri  $r_1$  ed  $r_2$  dai quali dipende  $h^+$  sono funzioni di  $\alpha$ , possiamo scrivere:

a)  $R_a = R_b = R$

$$r_2 = R \left( \frac{1}{\cos \alpha} - 1 \right)$$

$$r_1 = R \left( \operatorname{tg} \alpha - \frac{1}{\cos \alpha} + 1 \right)$$

b)  $R_a = R \quad R_b = \infty$

$$r_2 = \frac{R}{2} \left( \frac{1}{\cos \alpha} - 1 \right)$$

$$r_1 = R \operatorname{sen} \alpha + r_2 (\operatorname{sen} \alpha - 1)$$

Quando  $R_a \neq R_b$  possiamo scrivere  $R_b = n R_a$  e quindi

$$r_2 = R_a \frac{(1 - \cos \alpha) (n + 1)}{(n - 1) + (n + 1) \cos \alpha}$$

$$r_1 = R_a \left[ \operatorname{sen} \alpha + \frac{n + 1}{(n - 1) + (n + 1) \cos \alpha} (\operatorname{sen} \alpha - 1) (1 - \cos \alpha) \right]$$

La forza attrattiva tra il granulo e la superficie piana potrebbe denominarsi *aderenza*; a parità di  $R$  e  $\alpha$  l'aderenza è più forte della coerenza e richiede

un maggior quantitativo di acqua. Nella Fig. 3 sono indicati mediante linea continua i valori in grammi di  $h^+$  e di  $a$  (aderenza) calcolati per  $R = 1$  cm, e

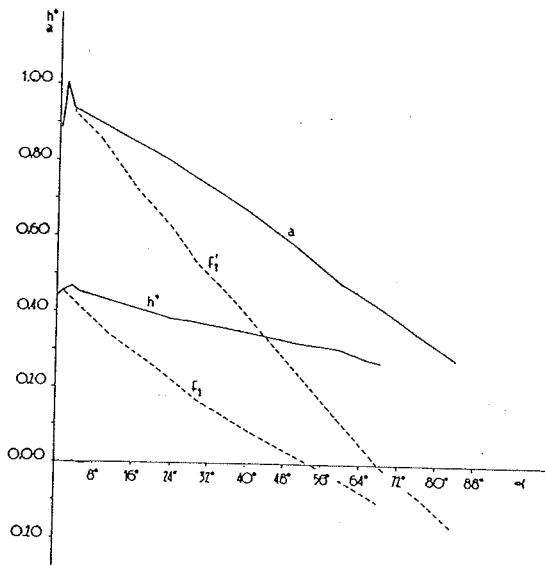


Fig. 3 - Variazione della coerenza e dell'aderenza con l'umidità pellicolare.

mediante linea tratteggiata i rispettivi valori di  $F_1 = p \pi r^2$ , mentre la differenza delle ordinate dà  $F_2$ .

Nella Tab. 1 abbiamo riportato in funzione di  $\alpha$  i valori della coerenza  $h^+$ , della pressione  $p$  e della aderenza  $a$  per  $R = 1$  cm. Poiché  $h^+ = R f(\alpha)$ , e

$$p = \frac{1}{R} f(\alpha), \text{ se vogliamo conoscere i valori di que-}$$

sti parametri per  $R$  diverso da 1 cm, possiamo mol-

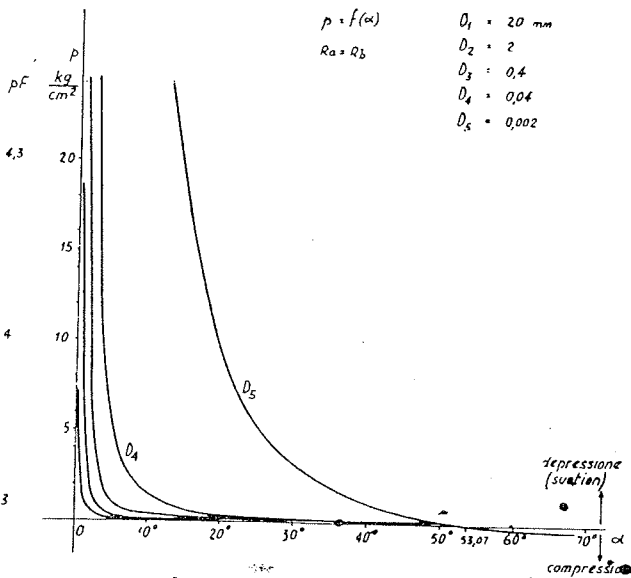


Fig. 4 - Variazione della pressione pellicolare con il contenuto di acqua.

tiplicare o rispettivamente dividere i valori della tab. 1 per il valore del nuovo raggio  $R$ .

In Fig. 4 è indicato l'andamento del parametro  $p=f(\alpha)$  equivalente a quello  $p=f(w)$ , per  $R_u=R_b$ ;

le ordinate sono espresse in  $\text{kg/cm}^2$  nonché in  $pF$  che, secondo la notazione di SCHOFIELD, è il logaritmo decimale del numero che indica la pressione in cm di altezza d'acqua.

La coerenza delle terre lamellari

I risultati ottenuti per le particelle sferiche possono estendersi con alcune modifiche anche alle particelle lamellari (Fig. 5) prendendo in considerazione solo la

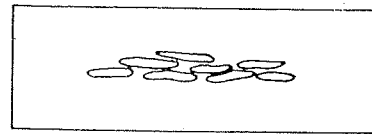


Fig. 5 - Possibile sistemazione delle particelle lamellari.

parte interessata dall'anello, così come schematizzato nella Fig. 6 dove, a titolo di esempio, si è assunto  $R = 0,0004$  cm e  $\alpha_{max} = 8^\circ$ . Abbiamo trovato che

quando il rapporto  $\frac{r_1}{r_2}$  è pari a 0,10 l'acqua è in

stato di compressione con un valore  $p = 5,2 \text{ kg/cm}^2$  e la coerenza è  $h^+ = 0,000069$  grammi, laddove

quando il rapporto  $\frac{r_1}{r_2} > 1$ , l'acqua ha una depres-

sione rapidamente variabile con l'angolo  $\alpha$  mentre la coerenza  $h^+$  mantiene quasi costantemente il valore  $h^+ = 0,00019$  g, che è circa 28 volte il valore trovato prima. Per  $\alpha = 1^\circ$  i valori della depressione e della coerenza sono rispettivamente  $p = -1230 \text{ kg/cm}^2$  e  $h^+ = 0,00019$  g.

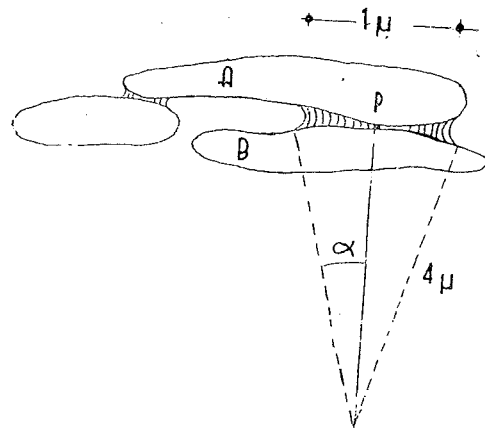


Fig. 6 - Formazione degli anelli nelle particelle lamellari

Secondo il diagramma della Fig. 7 riprodotto in maniera schematica i valori numerici trovati, le particelle lamellari dovrebbero mostrare una decisa variazione di coerenza quando l'acqua pellicolare è al limite fra lo stato di compressione e quello di

depressione. Ciò perché l'area sulla quale il cambio di pressione agisce è relativamente grande; lo stesso fenomeno non è altrettanto evidente con le particelle sferiche perché l'area dei loro anelli è molto piccola in confronto alle dimensioni delle sfere.

Dalla forma decisamente diversa degli anelli nei due casi si può desumere che il quantitativo percentuale di acqua per raggiungere la condizione  $p = 0$  è molto maggiore per particelle lamellari anziché per particelle sferiche.

L'applicazione dei criteri di calcolo soprariportati a particelle lamellari di diametro pari a 1 micron conduce a valori della coerenza totale  $H$  superiori a  $10 \text{ kg/cm}^2$ , valori dello stesso ordine di grandezza di quelli indicati nella Fig. 8, curve C e D riprodotte dal testo di BAYER [3] e nella Fig. 9 (desunta da nostre prove presso il *Laboratorio Stradale* dell'Università di Napoli). In effetti si raggiungono per trazione i  $40 \div 60 \text{ kg/cm}^2$ .

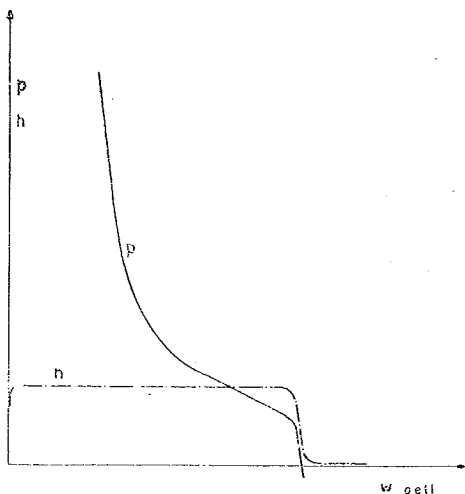


Fig. 7 - Coerenza elementare e pressione dell'anello in funzione dell'umidità pellicolare nei terreni lamellari.

La coerenza  $H$  raggiunge i suoi massimi valori solo per umidità ottenute mediante evaporazione a partire dallo stato plastico (curva A della Fig. 8 e A della Fig. 9); per le stesse umidità ottenute invece per addizione di acqua a partire dallo stato secco e sciolto e successiva compressione,  $H$  è molto minore (curva C della Fig. 8 e curva B della Fig. 9).

*Influenza di fattori chimico-fisici sulla coerenza*

Le caratteristiche chimico-fisiche dell'insieme solido-acqua possono variare da terreno a terreno sia a causa della natura delle particelle solide e sia a causa della variabilità di fattori esterni quali la temperatura e l'ambiente elettrochimico i quali possono determinare una variazione di spessore dello strato di acqua adsorbita.

Si desume perciò che, a parità di umidità totale, ad ogni aumento di spessore dello strato di acqua

adsorbita corrisponde un aumento di coerenza dovuto alla diminuzione dell'acqua pellicolare e in particolare delle dimensioni dell'anello. Il contrario invece quando, per una qualsiasi ragione, lo spessore dello strato adsorbito diminuisce.

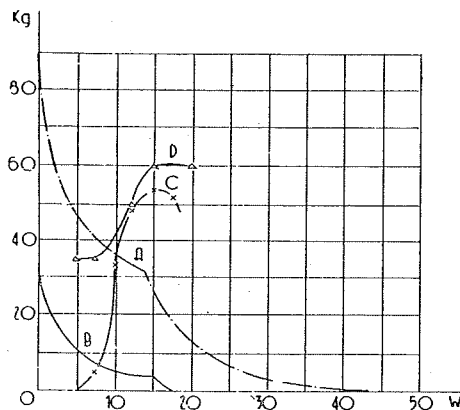


Fig. 8 - Influenza del contenuto d'acqua sulla resistenza di una argilla (A) e di un loam fine sabbioso (B) provate mediante un cono in fase di essiccamento; resistenza a trazione di un'argilla (C) e tra un'argilla e una superficie piana (D) provate dopo inumidimento e compressione (riprodotta dal testo di BAYER).

Noi riteniamo, in definitiva, che il problema della coerenza delle terre, in quanto legato all'acqua libera, vada affrontato su basi puramente meccaniche, prescindendo quindi dai complessi fenomeni di adsorbimento, pur riconoscendo che questi ultimi possono influenzarne gli aspetti quantitativi.

2) Identificazione delle frazioni adesive delle terre

L'attitudine dei granuli di terra a mantenersi in equilibrio lungo la superficie delle scarpate dei rilevati dipende fino a un certo grado dalla compenetrazione reciproca dei granuli che impedisce il rotolamento verso il basso, cosicché per l'equilibrio secondo un'inclinazione superiore a quella di natural declivio è necessario l'intervento di una forza legante che controbilanci l'azione della gravità.

$$h+$$

Il rapporto  $\frac{h+}{q}$  tra la forza legante o coerenza

$h+$  e il peso  $q$  del granulo potrebbe definirsi *adesività*  $L$  perché misura la capacità legante della particella nonché il grado di indipendenza della particella stessa dalla forza di gravità. Il rapporto 1 corrisponde al limite tra le frazioni adesive ( $L > 1$ ) e le frazioni non adesive ( $L < 1$ ) delle terre.

Chiamiamo pertanto coerenti quelle terre contenenti un quantitativo di frazioni adesive sufficiente a mantenere una forma parzialmente o addirittura totalmente indipendente dal peso delle singole particelle.

Per un terreno ideale possiamo scrivere la seguente relazione:

$$L = \frac{h^+}{q} = \frac{3T \left(1 + \frac{r_1}{r_2}\right) r_1}{G_s D^2}$$

dove  $r_1$  ed  $r_2$  sono quelli della Tab. 1.

Il valore teorico di  $D$  corrispondente a  $L = 1$  è mm 4, avendo posto  $\alpha = 5^\circ$ ,  $T = 0,075$  g/cm e  $G_s = 2,65$  g/cm<sup>3</sup>.

Le particelle lamellari hanno il rapporto  $L$  molte

### 3) Plasticità e umidità critica

Lo stato plastico, caratterizzato dalla « *attitudine del terreno ad assoggettarsi a notevoli modifiche di forma (modifiche comportanti una completa risistemazione delle particelle) senza un'apprezzabile modifica di volume* » [4] può interpretarsi, a nostro parere, come lo stato fisico corrispondente alle condizioni di compressione dell'acqua pellicolare ( $r_1 < r_2$ ); ovviamente, il fenomeno è evidente solo per parti-

celle di piccole dimensioni il cui rapporto  $L = \frac{h^+}{q}$

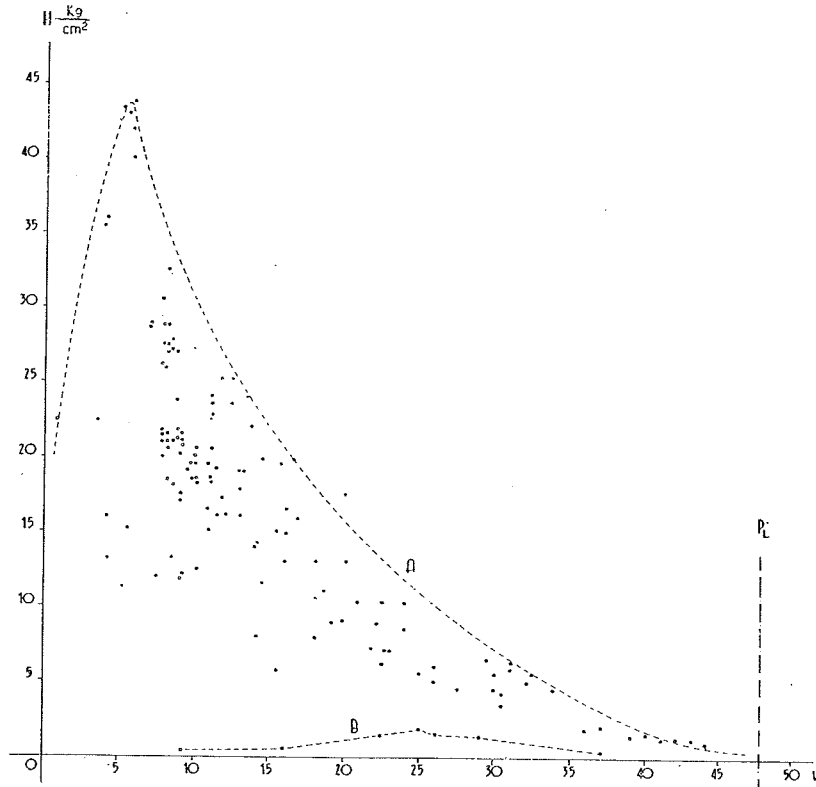


Fig. 9 - Resistenza a trazione di una argilla a diversi contenuti d'acqua raggiunti per evaporazione (A) o per inumidimento a partire dallo stato secco (B).

volte maggiore che non le particelle sferiche di pari diametro.

L'ordine di grandezza del rapporto  $L$  e della coerenza  $H$  relative alle note frazioni dei fini del terreno è indicato, per particelle sferiche, nella seguente tab. 2.

TABELLA 2

Frazione	Diametro mm	Adesività	Resistenza a trazione H kg/cm <sup>2</sup>
Sabbia	4 ÷ 0,06	1 ÷ 4470	0,00059 ÷ 0,0373
Limo	0,06 ÷ 0,002	4470 ÷ 4000000	0,0373 ÷ 1,120
Argilla	< 0,002	> 4000000	> 1,120

è molto alto, ossia per quelle particelle tanto leggere da « sentire » la spinta della pressione pur rimanendo fortemente attaccate mediante gli anelli.

In effetti lo stato di compressione dell'acqua comporta i seguenti fenomeni:

— indebolimento del legame coesivo tra le particelle e conseguente miglioramento delle loro possibilità di reciproco scorrimento;

— miglioramento della tixotropia (formazione più o meno rapida di legami tra particelle adiacenti);

— aumento della velocità di evaporazione della umidità del terreno (secondo TERZAGHI [5] in misura di circa il 4%).

Secondo il nostro punto di vista, quando un terreno in condizioni plastiche non è contenuto lateralmente, il suo strato superficiale è in uno stato di

trazione e tende a mantenere costante la sua area, come un sacchetto di stoffa contenente piccole sfere; l'acqua della massa interna è invece in uno stato di compressione.

Essiccando il terreno, la sua consistenza va dallo stato plastico a quello semisolido passando attraverso il limite plastico  $P_L$ , fisicamente caratterizzato da una brusca variazione di resistenza meccanica (il « punto critico di portanza » di B. H. LEVENSON citato da TERZAGHI [6]); la prova standard per il  $P_L$  identifica abbastanza bene quel grado di umidità, come risulta da molte prove comparative. Nella Fig. 10 e nella Fig. 11 sono indicati graficamente i risultati di una delle prove di TERZAGHI e di una prova eseguita dall'Autore.

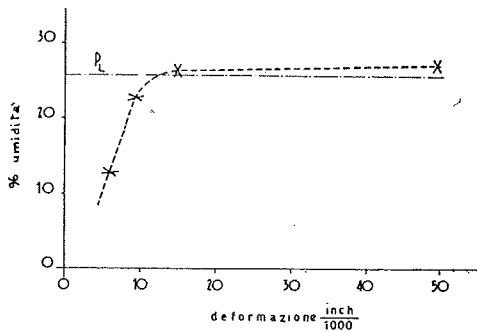


Fig. 10 - Relazione tra umidità e deformazione di un cubo di terra sottoposto a pressione (a dilatazione libera). (Riprodotta da una pubblicazione di TERZAGHI).

A nostro parere il limite plastico  $P_L$  corrisponde al contenuto di umidità per il quale la pressione dell'acqua costituente gli anelli è zero ( $r_1 = r_2$ ); un quantitativo di acqua minore comporta una depressione ( $r_1 > r_2$ ) da cui consegue la consistenza semisolido.

4) Il limite di ritiro

Dalla evaporazione dell'acqua contenuta in un terreno saturo deriva una progressiva contrazione di questo; le forze agenti sulle particelle traggono origine in una prima fase dell'acqua capillare e successivamente dell'acqua pellicolare la quale, per ragioni di carattere termodinamico, evapora dopo.

L'essiccamento di un terreno non saturo avente una umidità vicina al limite plastico conduce ad una contrazione finale che è quasi la stessa di quella ottenuta partendo dallo stato saturo, il che dimostra il ruolo preminente dell'acqua pellicolare.

L'inizio dell'evaporazione dell'acqua pellicolare e la conseguente formazione dello scheletro cristallino è evidente nel diagramma della coesione indicato con la lettera A nella Fig. 8 (da BAVER); da quel diagramma si nota infatti che la resistenza cresce con due leggi completamente diverse.

Abbiamo motivo di credere che la relazione

$$S_L = \frac{1}{\gamma_d} - \frac{1}{G_s}$$

basata sulla ipotesi della saturazione sia esatta solo quando non c'è « contrazione residua »; in ogni altro caso il valore del limite di contrazione è molto minore di quello che risulta dai calcoli di laboratorio giacché la maggior parte della contrazione avviene in condizioni di non-saturazione.

5) La curva di Proctor

Il fenomeno della progressiva formazione degli anelli intergranulari e dei loro successivi stati tensionali fino alla coalescenza può desumersi in un terreno sciolto, dal grado di libertà delle particelle di scorrere l'una sull'altra.

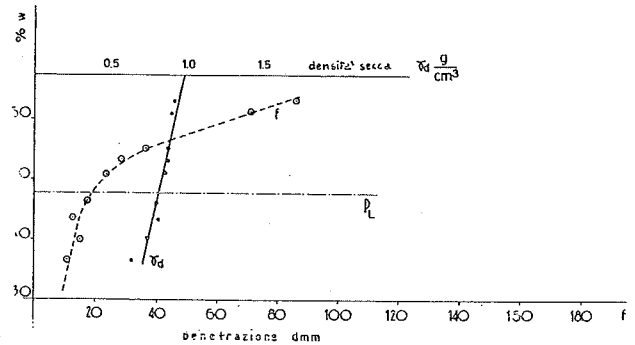


Fig. 11 - Penetrazione di un ago Dow e densità secca di una argilla in funzione del contenuto di acqua aggiunta a partire dallo stato secco.

Secondo questo punto di vista la densità minima corrisponde al completamento della formazione degli anelli (massima coerenza), la densità massima alla completa coalescenza (3).

La perdita di energia per la espulsione dell'acqua dai pori spiega il ramo umido della curva di costipamento.

I diagrammi della Fig. 12 desunti da nostre esperienze, possono interpretarsi nel modo suddetto più convincentemente di quanto sia possibile con la corrente ipotesi della pellicola di acqua lubrificante prima e distanziatrice poi.

6) Distribuzione dell'acqua pellicolare nel terreno secondo la granulometria

Mentre il quantitativo di acqua adsorbita è, a parità di natura e peso di terra, proporzionale alla superficie delle particelle, il quantitativo di acqua pellicolare dipende invece dal numero dei punti di contatto; il primo e il secondo aumentano con il diminuire delle dimensioni delle particelle costituenti la unità di peso.

Poiché il volume dell'anello è una precisa frazione, circa 0,10, del volume della sfera adiacente quando  $r_1 = r_2$ , l'umidità massima pellicolare di un terreno ideale non può superare, per quanto piccole siano le particelle, un valore che al limite è circa il 12%.

(3) La progressiva coalescenza conduce alla saturazione dei terreni granulari privi di elementi finissimi, alla pseudo-saturazione dei terreni fini bene assortiti.

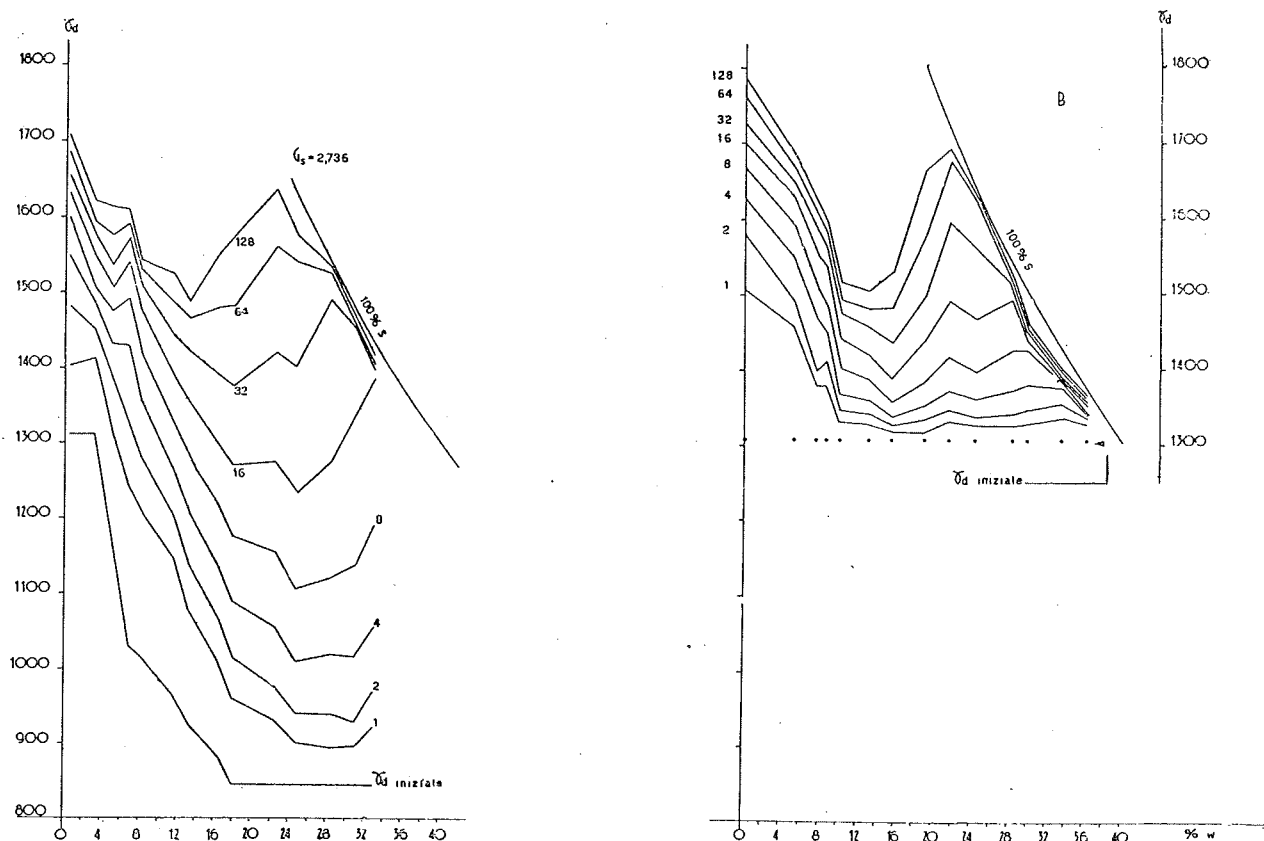


Fig. 12 - Curve di addensamento per mezzo dell'apparecchio I.S.S. di una miscela di sabbia e argilla (50 + 50) al variare del numero dei colpi e iniziando l'addensamento dallo stato sciolto (A) o dal valore della densità corrispondente a quella dello stato secco sciolto (B).

### 7) Movimento dell'acqua pellicolare nel terreno

La pellicola superficiale monomolecolare che senza soluzione di continuità circonda particelle ed anelli, *tende* a formare una superficie equipotenziale di uniforme curvatura, mentre l'acqua degli anelli *tende* ad assumere una condizione di equilibrio stabile ossia una pressione interna nulla ( $r_1 = r_2$ ).

Lo spostamento di acqua da un anello ad un altro avente diversa pressione si effettua mediante lo slittamento della pellicola ricoprente lo strato adsorbito sopra questo ultimo. La velocità del movimento può raggiungere, per esempio 0,15 mm/giorno [7].

Da ciò si desume:

a) la possibilità di spostamento di acqua da terreni più secchi a terreni più umidi sempre che questi ultimi abbiano una granulometria più fine;

b) la impossibilità di fermare l'acqua pellicolare a meno di non usare diaframmi impermeabili o di miscelare al terreno sostanze repellenti all'acqua;

c) la tendenza di tutti i terreni alla neutralizzazione dell'eventuale stato di depressione degli anelli di acqua intergranulari mediante assorbimento di acqua da qualsiasi fonte disponibile; di qui, per i terreni plastici, la tendenza a raggiungere il limite plastico  $P_L$  (secondo il nostro punto di vista).

Al movimento dell'acqua pellicolare si oppone la resistenza di attrito che aumenta con la superficie

di contatto che, a sua volta, aumenta con la depressione (vedi Fig. 4); questa considerazione spiega le curve di isteresi  $pF = f(w)$  di HAINES e SCHOFIELD nonché alcune apparenti anomalie relative alla velocità di spostamento dell'acqua pellicolare per effetto di differenti depressioni [8].

Lo stesso attrito della pellicola pone, verosimilmente, un limite alle possibilità di spostamento dell'acqua pellicolare; essa è inoltre la causa della non attitudine dell'acqua pellicolare a trasmettere pressioni idrostatiche, fenomeno questo che, secondo KASHIRSKI [10], era stato sperimentalmente rilevato da LEBEDEFIN fin dal 1930.

### 8) Il punto di stecchimento

Gli anelli di acqua pellicolare esistono anche tra le particelle del terreno e le radici degli alberi le quali per osmosi aspirano l'acqua nei loro canali capillari adducanti alle foglie.

Ora, quando la depressione dell'acqua capillare della pianta è maggiore della depressione dell'acqua pellicolare del circostante terreno, c'è un movimento di acqua verso la pianta; in caso contrario c'è deidratazione della pianta.

Il punto di stecchimento del terreno è quel contenuto di acqua corrispondente alla depressione suscettibile di deidratare le piante; il valore di questa depressione è mediamente sulle 15 atm [9] laddove



la corrispondente umidità varia notevolmente a secondo della granulometria dei terreni, come precedentemente notato.

Da notare infine l'azione stabilizzante delle piante sulla superficie del terreno conseguente allo stato di depressione che esse determinano.

### Bibliografia

- [1] L. D. BAVER - *Soil Physics* - Wiley and Sons - York 1956, pag. 100.
- [2] R. L. NICHOLLS and D. T. DAVIDSON - *Polyacid and Lignin used as Large Organic Cations for Soil Stabilization* - Proceedings H.R.B. 1958 - Washington D.C. 1958 - pag. 518.
- [3] L. D. BAVER - Op. cit. pag. 104.
- [4] K. TERZAGHI - *Simplified Soil Tests for Subgrades and their Physical Significance* - Public Roads - October 1926 - pag. 154.
- [5] K. TERZAGHI - op. cit. pag. 154.
- [6] K. TERZAGHI - op. cit. pag. 155.
- [7] ROAD RESEARCH LABORATORY - *Soil Mechanics for Road Engineers* - H.M.S.O. - London 1957 - pag. 316.
- [8] ROAD RESEARCH LABORATORY - Op. cit. - pag. 316.
- [9] L. D. BAVER - op. cit. - pag. 284.
- [10] ALEJO KASHIRSKI - *Teoria del agua edafica y su aplicación a la práctica caminera* - III Reunion anual de caminos - Universidad Nacional de la Plata - 1939 - pag. 477.

SUMMARY: A comparative study of a few soil phenomena has lead the Author to revise the theory of the pellicular water by formulating the hypothesis that this latter forms with continuity, as water free to move in respect of the particles, not only the intergranular rings but also a continuous monomolecular film surrounding the rest of the particle surface, and the hypothesis that the three possible tensional states of the water ( $p \geq 0$ ) correspond to as many peculiar aspects and behaviors of the soil.

To confirm such hypothesis there is the fact that by means of this approach of mechanical character, the Author has been able to give a convincing interpretation to a few soil phenomena up to date not clearly connected to each other.

The studies and the researches undertaken, here reported very summarized for lack of space, deal with the following subjects:

Soil coherence; the adhesive fractions of a soil; plasticity and critical humidity; the shrinkage limit; the Proctor curve; soil moisture distribution on a grain size basis; movement of pellicular water; the wilting point.

SOMMAIRE: L'étude comparé de quelques phénomènes des sols a conduit l'Auteur à réviser la théorie de l'eau pelliculaire en formulant l'hypothèse que cette-ci constitue avec continuité, comme eau libre de se mouvoir relativement à les particules solides, non seulement les anneaux intergranulaires mais aussi une continue pellicule monomoléculaire autour du reste de la surface des particules, et l'hypothèse qu'aux trois possibles états tensionnels de l'eau composant les anneaux ( $p \geq 0$ ) correspondent autant d'aspects et de comportements du sol.

En confirmation de ces hypothèses il y a le fait qu'en partant de cette base unitaire de caractère mécanique, l'Auteur a pu donner une satisfaisante interprétation à quelques phénomènes bien caractéristiques des sols jusqu'à présent peu clairement liés l'un l'autre.

Les études et les recherches effectués, rapportés tres succinctement pour faute d'espace, regardent les suivants sujets:

La cohérence des sols; les fractions adhésives des sols; plasticité et humidité critique; la limite de retrait la courbe Proctor; distribution de l'eau dans le sol d'après la granulometrie; mouvement de l'eau pelliculaire; le point de flétrissement.