

Permeabilità e pressione di rigonfiamento dei terreni coesivi costipati

G. DENTE, L. ESPOSITO *

SOMMARIO: Nel presente lavoro vengono riportati i primi risultati di prove condotte in laboratorio su terreni coesivi costipati.

L'indagine, volta ad accertare l'influenza dei parametri del costipamento sul comportamento dei terreni coesivi, è in questa sede, limitata, all'esame delle caratteristiche di permeabilità e rigonfiamento. L'insieme dei dati fino ad oggi acquisiti, incluse le microfotografie ottenute con l'ausilio del S.E.M., mostra come le moderne teorie chimico-fisiche che attribuiscono alla struttura un ruolo dominante possono contribuire alla generale comprensione del comportamento del terreno.

1. Introduzione

L'uso del terreno come materiale di costruzione, laddove è possibile, risulta quasi sempre conveniente grazie alla grande disponibilità ed ai costi, relativamente contenuti, che ne rendono competitivo l'impiego in molte applicazioni costruttive.

Le dighe in terra, gli argini dei fiumi, i rilevati stradali ed aeroportuali sono tipici esempi di opere per la cui costruzione si ricorre al terreno, soprattutto in presenza di condizioni geotecniche dove si impone la realizzazione di manufatti in grado di tollerare elevati valori dei cedimenti differenziali.

Applicazioni recenti, dal futuro molto promettente sono costituite dalla terra armata, ottenuta associando il materiale naturale, la terra, con elementi resistenti a trazione.

Al pari di altri materiali da costruzione, il terreno va scelto (oppure va reso) di caratteristiche adeguate al problema in esame: così, ad esempio, nel caso delle dighe zonate con nucleo impermeabile ci si orienterà verso materiali costituiti in prevalenza da grana fine allo scopo di assicurare la tenuta idraulica dell'opera.

Per un rilevato stradale, viceversa, si ricorre a quest'ultimi solo se non sono disponibili materiali a grana grossa.

Inoltre, a prescindere dalla granulometria, è da tenere presente che se il terreno venisse posto in opera senza adottare le opportune modalità esecutive, si otterrebbe un prodotto di basso peso unitario, altamente cedevole e instabile.

Pertanto occorre quasi sempre intervenire

sul terreno al fine di conferirgli quelle caratteristiche fisiche meccaniche che lo rendono adatto per utilizzazioni ingegneristiche.

Molteplici sono le metodologie di miglioramento che operano la stabilizzazione del terreno per mezzo di processi meccanici, chimici, termici ecc.

Una delle tecniche più diffuse, il costipamento, provoca l'addensamento mediante l'applicazione di energia meccanica.

Gli effetti che ne conseguono fanno registrare un aumento della resistenza e taglio e una diminuzione sia della compressibilità che della permeabilità.

Nei confronti del costipamento i terreni coesivi vengono di solito considerati separatamente da quelli incoerenti.

Ciò perché contengono quantità sufficienti di frazione fina da rendere la massa di terreno praticamente impermeabile in seguito al costipamento; essi includono le argille, i limi e le sabbie limose.

In laboratorio il costipamento dei terreni coesivi si rende necessario per il controllo delle caratteristiche del materiale ed avviene, per lo più, secondo la procedura standard denominata comunemente prova PROCTOR dal nome del suo ideatore.

Nel presente lavoro vengono esposti i primi risultati di prove condotte in laboratorio su terreni coesivi costipati, provenienti da siti dell'Italia Meridionale.

L'indagine, volta ad accertare l'influenza dei parametri del costipamento sul comportamento dei terreni coesivi, è in questa sede limitata all'esame delle caratteristiche di permeabilità e rigonfiamento.

L'insieme dei dati fino ad oggi acquisiti, ivi incluse le microfotografie ottenute con la tecni-

* Dr. Ing. Giovanni DENTE, Dr. Ing. Luigi ESPOSITO, Dipartimento di Difesa del Suolo, Università della Calabria.

ca del SEM, mostra come le moderne teorie chimico fisiche che attribuiscono alla struttura un ruolo determinante possono contribuire alla generale comprensione del comportamento del terreno.

2. Materiali analizzati e sperimentazioni in laboratorio

Sono stati oggetto dell'indagine due tipi di terreno di diversa provenienza.

Il primo (nel seguito verrà chiamato terreno « A »), prelevato nell'area del Comune di Santa Maria (CZ) da depositi superficiali di origine marina, è stato preso in esame per la costru-

zione del nucleo della diga in terra in località Sant'Anna.

Il secondo (terreno « B »), proveniente da depositi di origine fluviale affioranti nella valle dell'Ofanto, viene utilizzato per il nucleo della diga attualmente in avanzata fase di realizzazione a Conza della Campania (AV).

Dal punto di vista della granulometria il materiale A è classificabile come limo con argilla e sabbia; il materiale B, come limo sabbioso con argilla.

Le caratteristiche fisiche generali della frazione fina dei due materiali, nonché le rispettive composizioni mineralogiche sono riportate nelle tabelle I e II.

TABELLA 1
CARATTERISTICHE FISICO-MINERALOGICHE E CHIMICHE DEL MATERIALE A

$w_L = 59.3\%$; $w_p = 21.4\%$; $I_p = 37.9\%$; $I_A = 1.52$
Montmorillonite = 79.48%; Illite = 11.85%; Caolinite + Clorite = 8.67%
Analisi chimica (milliequivalenti)
$Na^+ = 6.52$; $Ca^{++} = 2.32$; $Mg^{++} = 0.530$

TABELLA 2
CARATTERISTICHE FISICO-MINERALOGICHE E CHIMICHE DEL MATERIALE B

$w_L = 45.5\%$; $w_p = 22.0\%$; $I_p = 23.5\%$; $I_A = 0.920$
Illite = 60.32%; Caolinite = 29.68%; Montmorillonite = 10.00%
Analisi chimica (milliequivalenti)
$Na^+ = 4.32$; $Ca^{++} = 1.30$; $Mg^{++} = 2.13$

La sperimentazione di laboratorio è stata diretta alla determinazione delle proprietà di permeabilità e rigonfiamento, con particolare riguardo all'influenza delle modifiche strutturali indotte dal costipamento.

Per quanto riguarda le modalità di esecuzione di quest'ultimo, ci si è attenuti alla procedura prescritta dalla AASHO modificata (ASTM D 698 - 58T).

Le prove di permeabilità sono state condotte con un permeometro « Geonor » di cui si riporta lo schema di funzionamento in fig. 1.

I campioni di forma cilindrica sono stati prelevati nella maggior parte dei casi con as-

se parallelo alla direzione dell'azione costipante.

Le caratteristiche dell'apparecchio, particolarmente adatto per i terreni a grana fina, consentono l'applicazione di una pressione sferica di consolidazione nonché della « back pressure » per la saturazione dei provini.

Partendo da diversi valori del contenuto d'acqua di costipamento, le misure sono state eseguite su provini portati progressivamente a saturazione completa, l'applicazione della pressione di consolidazione si è resa necessaria per contrastare il rigonfiamento allo scopo di non alterare apprezzabilmente la struttura iniziale.

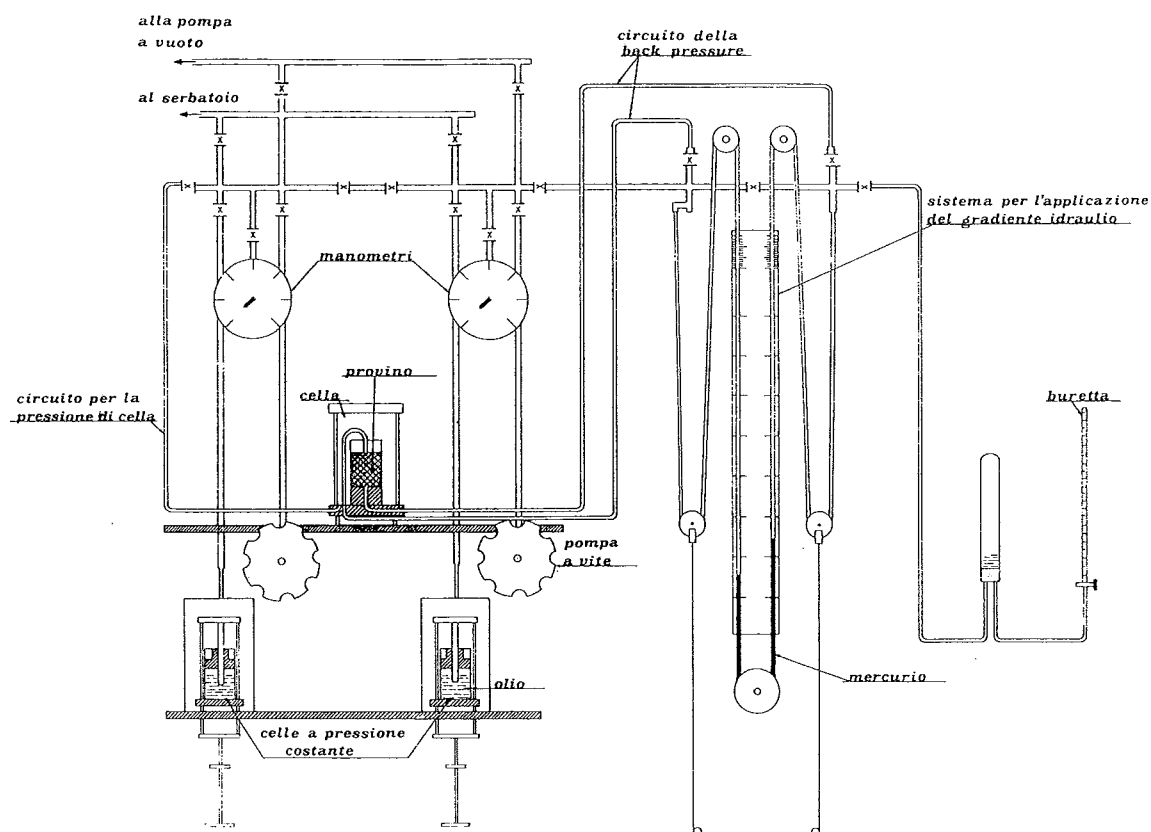


Fig. 1. - Schema di funzionamento del permeametro « GEONOR »

L'attitudine a rigonfiare dei terreni in esame è stata valutata sulla base delle pressioni di rigonfiamento ottenute per mezzo di un apposito edometro (Rigonfimetrom Geonor).

Questo apparecchio è costituito da una cella, del tutto simile a quella di un edometro convenzionale, collegata mediante un sistema di contrasto ad una leva che amplifica notevolmente i più piccoli movimenti. All'altra estremità della leva è posto lo strumento di misura (anello dinamometrico o trasduttore di forza). Quando il provino tende a rigonfiare, il sistema di contrasto glielo impedisce, pertanto viene esercitata una forza che attraverso la leva viene trasmessa allo strumento di misura; dividendo la forza così misurata per l'area del provino, si ottiene la pressione di rigonfiamento.

Le pressioni di rigonfiamento sono state misurate in tutto il campo dei contenuti d'acqua di costipamento con due tecniche sperimentali diverse: nel primo caso i provini a contatto con acqua hanno la possibilità di giungere subito a saturazione; nel secondo caso è stato inizialmente impedito ogni contatto con l'ambiente esterno in modo da non alterare il contenuto d'acqua di costipamento.

Le due metodologie di prova verranno nel seguito indicate rispettivamente con i termini « standard » e « as compacted ».

3. Caratteri strutturali dei terreni coesivi

3.1. Generalità

Un terreno coesivo può essere definito come un aggregato di particelle costituite per un certo ammontare di minerali argillosi la cui presenza conferisce coesione alla massa.

Una completa descrizione delle proprietà di questi terreni richiede la conoscenza sia delle forze interparticellari che della disposizione geometrica (tessitura o « fabric ») delle particelle.

Poiché è quasi impossibile misurare direttamente le forze interparticellari, la maggior parte delle ricerche hanno avuto per oggetto lo studio della tessitura delle particelle e fanno derivare da quest'ultima la valutazione delle forze interparticellari.

Come è noto, per la loro struttura molecolare, le particelle di argilla si presentano appiattite e con una distribuzione di cariche negative sulle due facce. Esse sono quasi sempre idratate, cioè, circondate da strati di molecole d'acqua (acqua adsorbita) fortemente attratta dalla particella e contenente ioni metallici. Per effetto delle attrazioni e repulsioni tra cariche elettriche, la concentrazione dei cationi è funzione decrescente della distanza dalla particella e quella degli anioni ne è funzione decrescente.

Gli ioni attratti dalla particella costituiscono il « doppio strato »; l'insieme formato dalla particella e dal doppio strato viene denominato micella. Lo spessore del doppio strato, secondo la teoria di GOUY - CHAPMAN, è dato da:

$$\frac{I}{K} = \left(\frac{DHT}{8 \pi \eta_0 e^2 v^2} \right)^{1/2} \quad (1)$$

in cui:

K = costante di Boltzmann

D = costante dielettrica

T = temperatura assoluta

η_0 = concentrazione dei cationi (moli/litro)

e = unità di carica elettrica

v = valenza dei cationi

H = spessore del doppio strato

Le interazioni fra micelle presiedono alla formazione della tessitura e le variazioni di spessore del doppio strato inducono modifiche delle proprietà dei terreni e delle caratteristiche d'interesse ingegneristico.

Recenti studi sui terreni argillosi hanno evidenziato, attraverso l'esame di fotografie eseguite con il microscopio elettronico a scansione che le singole particelle di argilla tendono ad aggregarsi in unità submicroscopiche dette « domains ».

Le « domains » a loro volta si raggruppano per formare unità submicroscopiche denominate « clusters ». Le « clusters » infine si uniscono per costituire le « Peds ».

La considerazione della microstruttura, più importante da un punto di vista generale che ingegneristico, è di valido aiuto per una più approfondita comprensione del comportamento del terreno.

Le ricerche di numerosi studiosi sulla disposizione geometrica delle particelle, hanno con-

dotto alla definizione dei seguenti modelli di assetto strutturale:

a) Modello casuale; risulta dall'aggregazione di particelle e di unità strutturali con orientazione casuale, ma non vicine tra di loro (struttura aperta);

b) Modello flocculato; implica la presenza di gruppi di particelle e/o di unità strutturali molto vicine tra loro (struttura chiusa) e senza una specifica orientazione.

c) Modello disperso; comporta una completa orientazione sia dei gruppi di particelle che delle unità strutturali.

Un'argilla può assumere una delle strutture sopra descritte a seconda delle dimensioni del doppio strato. Se questo è depresso ed il materiale è attivo la disposizione delle particelle è di tipo flocculato, le unità strutturali hanno orientamento casuale, per cui la struttura nel suo complesso è totalmente isotropa [YONG e WARKENTIN, 1975].

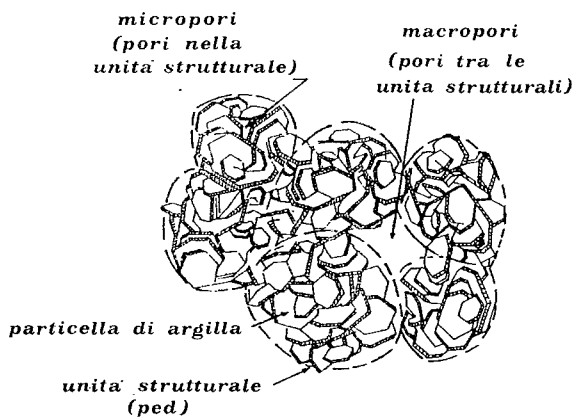


Fig. 2. - Rappresentazione schematica delle unità strutturali (da BOWLES).

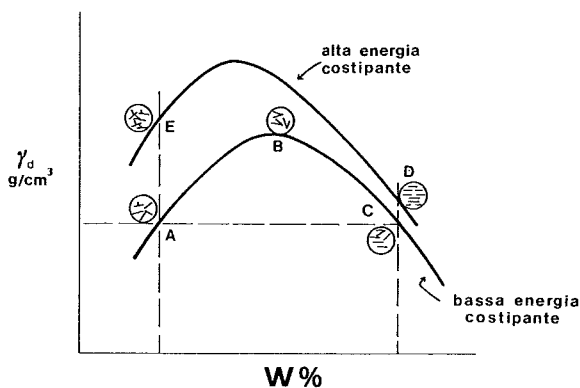


Fig. 3. - Orientazione della struttura al variare del contenuto d'acqua di costipamento (da LAMBE).

Una espansione del doppio strato provoca una parziale orientazione sia delle particelle che delle unità strutturali. La completa espansione del doppio strato conduce a una struttura completamente orientata e quindi totalmente anisotropa.

La tendenza delle particelle ad assumere una delle strutture suddette può essere provocata da un'alterazione del sistema. La flocculazione delle particelle e/o delle unità strutturali può essere causata dall'incremento della concentrazione elettrolitica, dall'incremento della valenza degli ioni e/o della temperatura. Un effetto analogo si ottiene facendo decrescere il valore della costante dielettrica, la dimensione degli ioni idratati ed il PH.

Da tutto ciò appare chiaro che per far variare le forze di repulsione, e quindi le dimensioni del doppio strato, basta far variare la concentrazione elettrolitica il che si ottiene molto semplicemente aggiungendo o sottraendo acqua in accordo con la teoria di GOUY-CHAPMAN.

3.2. Proprietà e struttura dei terreni argillosi costipati.

Le teorie più avanzate sul comportamento dei terreni coesivi costipati, alla cui formulazione ha notevolmente contribuito lo sviluppo delle moderne tecniche microscopiche e ultramicroscopiche, fanno discendere dalla struttura le proprietà esibite dai terreni costipati. Oltre che dal tipo di terreno, la struttura è influenzata dalla tecnica con cui viene eseguito il costipamento, dall'energia costipante e dal contenuto d'acqua.

LAMBE [1958] e SEED e CHAN [1959], hanno rilevato che a sinistra del contenuto d'acqua ottimo, punto di massima densità della curva di costipamento, la struttura è indipendente dalle modalità esecutive del costipamento mentre a destra ne è significativamente influenzata.

Direttamente correlati con la osservazione microscopica della struttura dell'argilla sono i risultati dell'indagine sperimentale eseguita da BARDEN e SIDES [1970].

Gli Autori attribuiscono la forma della curva di costipamento riportata nel diagramma di fig. 9 al fatto che per bassi contenuti d'acqua i ridotti valori delle densità sono dovuti alla presenza di ampi macropori riempiti di aria e interposti fra strutture macropeds, che hanno elevata resistenza e sono in grado di resistere

alla pressione di confinamento senza subire distorsioni.

Al crescere del contenuto d'acqua, le « macropeds », diventando più « soffici », possono essere più facilmente distorte e, quindi, la grandezza dei vuoti si riduce.

Quando per effetto dell'incremento del contenuto d'acqua le « macropeds » diventano ancora più deformabili, i vuoti tendono a scomparire e la densità secca raggiunge il massimo; un ulteriore aumento del contenuto d'acqua causa una diminuzione della densità secca così come gli strati d'acqua tra le particelle di terreno aumentano di spessore. BARDEN e SIDES mostrano che i vuoti d'aria risultano occlusi, non contigui, in prossimità del W_{opt} ; con l'ulteriore aggiunta di acqua l'aria non può più essere espulsa efficacemente, per cui esercita una pressione che s'oppona all'energia di costipamento.

Le osservazioni di BARDEN e SIDES trovano riscontro nei risultati ottenuti da DIAMOND [1971] riportati dal YONG e WARKETIN sulla distribuzione della dimensione dei pori (fig. 4) al variare del contenuto d'acqua e della energia costipante.

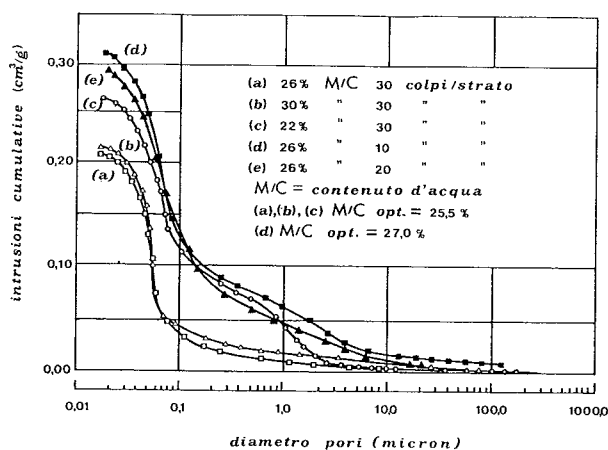


Fig. 4. - Distribuzione della dimensione dei pori (da DIAMOND).

Da un attento esame delle microfotografie eseguite su provini del materiale A (figg. da 5 a 8) si ha una conferma diretta da quanto detto dagli Autori citati, notando per bassi contenuti d'acqua, strutture non orientate e con ampi macropori; al crescere del contenuto d'acqua le strutture si presentano con gradi di orientazione crescenti con scomparsa progressiva dei macropori.

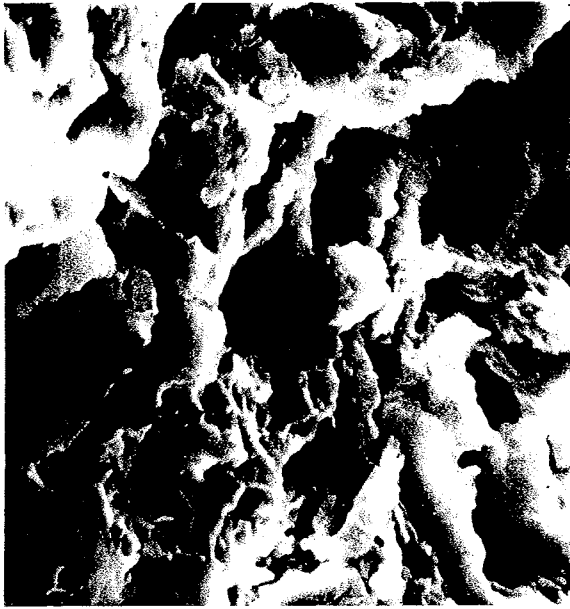


Fig. 5. - Fotografia della struttura del materiale A ottenuta al S.E.M., w = 9,5%.



Fig. 6. - Fotografia della struttura del materiale A ottenuta al S.E.M., w = 11,00%.

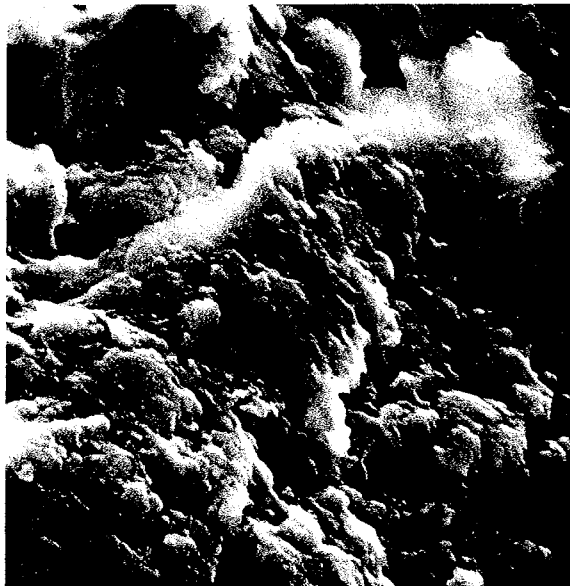


Fig. 7. - Fotografia della struttura del materiale A ottenuta al S.E.M., w = 12,50%.

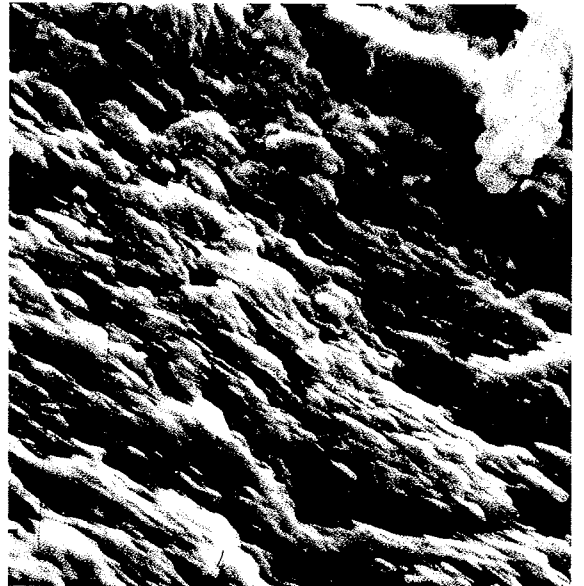


Fig. 8. - Fotografia della struttura del materiale A ottenuta al S.E.M., w = 15,90%.

4. Permeabilità

La permeabilità di un terreno è una proprietà che regola importanti processi naturali e interviene in numerosi problemi di ingegneria civile. Per i terreni argillosi costipati, utilizzati per la realizzazione di nuclei di dighe in terra, la permeabilità gioca un ruolo decisivo per la funzionalità dell'opera.

Nell'ipotesi di validità delle leggi di POISELLE e di DARCY, il coefficiente di permeabilità K è

dato dalla equazione di Kozeny - Karmann, appresso riportata

$$K = \frac{w}{\mu} \frac{C_s}{S^2} \frac{e^3}{1+e} S^3 \quad (2)$$

dove

w = peso dell'unità di volume del fluido

e = indice dei vuoti

S = grado di saturazione

C_s = rapporto fra area della superficie bagnata e volume delle particelle solide.

L'applicabilità della (2) è affetta da numerose limitazioni dovute al semplice modello di flusso capillare e può dare luogo a considerevoli discrepanze fra i risultati previsti e quelli misurati.

Numerosi ricercatori hanno tentato di spiegare il motivo di tali discrepanze. OLSEN [1960] ha ipotizzato che queste differenze fossero dovute ad una non uniforme distribuzione della dimensione dei pori attraverso cui avviene il flusso; questa ipotesi trova conferma in quanto verrà detto di seguito.

Considerando i risultati delle prove di permeabilità diagrammati in funzione del contenuto d'acqua di costipamento (fig. 10) si rileva un andamento del coefficiente di permeabilità del tutto analogo a quello riscontrato da LAMBE [1958] e da MITCHELL *et al.* [1975].

Tale diagramma può essere ben interpretato, per quanto detto in precedenza, in base all'as-

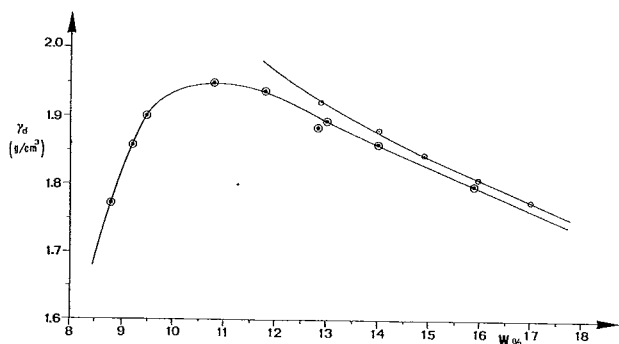


Fig. 9. - Curva $\gamma_d - w\%$ per il materiale A.

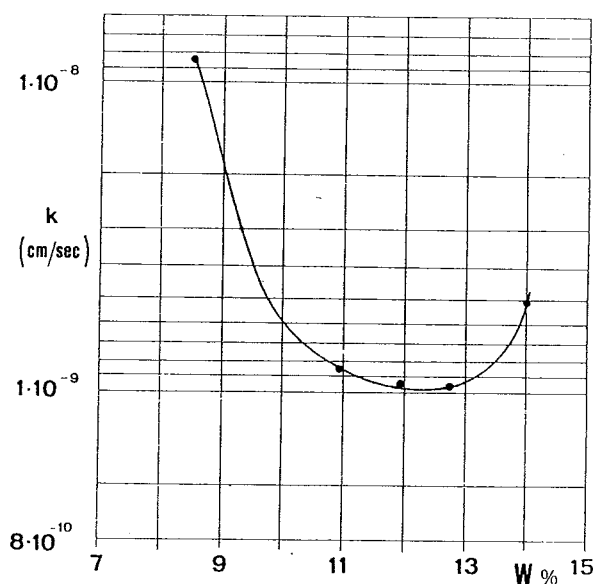


Fig. 10. - Variazione del coefficiente di permeabilità al variare del contenuto d'acqua di costipamento.

setto strutturale assunto dal materiale per effetto del costipamento.

Difatti, per bassi contenuti d'acqua si ha una struttura casuale con presenza di numerosi macropori tra le unità strutturali (fig. 4).

Dall'equazione (2) si rileva che il coefficiente di permeabilità è proporzionale alla quarta potenza della dimensione dei pori, per cui in presenza di macropori si ha un valore di K che risulta essere superiore di interi ordini di grandezza rispetto a quello misurato in assenza dei su citati macropori.

Il lieve incremento di K per i contenuti d'acqua elevati, può giustificarsi tenendo presente che l'espansione degli strati d'acqua tra le particelle favorisce il flusso attraverso i micropori.

L'andamento dell'indice dei vuoti « e », al variare del contenuto d'acqua di costipamento è affine a quello del coefficiente di permeabilità (fig. 11); ma a differenza di quest'ultimo, il valore di « e », per elevati contenuti d'acqua, aumenta fino a eguagliare i massimi valori attinti a sinistra.

Da ciò discende che la variazione di « e », da sola, non giustifica completamente l'andamento del coefficiente di permeabilità, il che equivale a dire che campioni dello stesso valore di « e » possono avere permeabilità che differiscono di interi ordini di grandezza.

L'influenza del grado di saturazione e della direzione del flusso sul coefficiente di permeabilità è stata analizzata per mezzo dell'apparecchiatura precedentemente descritta, con riferimento al materiale « B » (figg. da 12 a 15).

Come era da attendersi, in una struttura dispersa quale è quella corrispondente a $w=19\%$, la permeabilità, valutata normalmente alla orientazione delle particelle, assume il minimo valore.

Per i contenuti d'acqua in prossimità del-

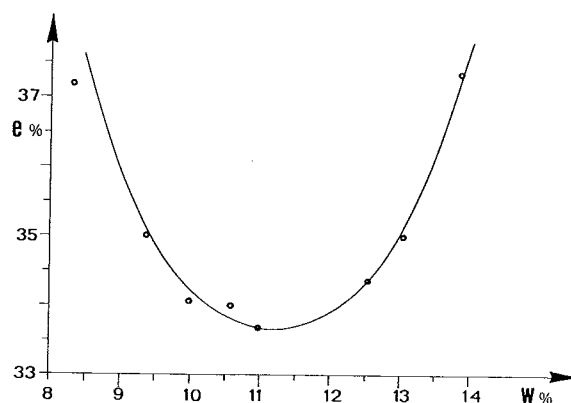


Fig. 11. - Variazione dell'indice dei vuoti iniziali al variare di $w\%$ di costipamento.

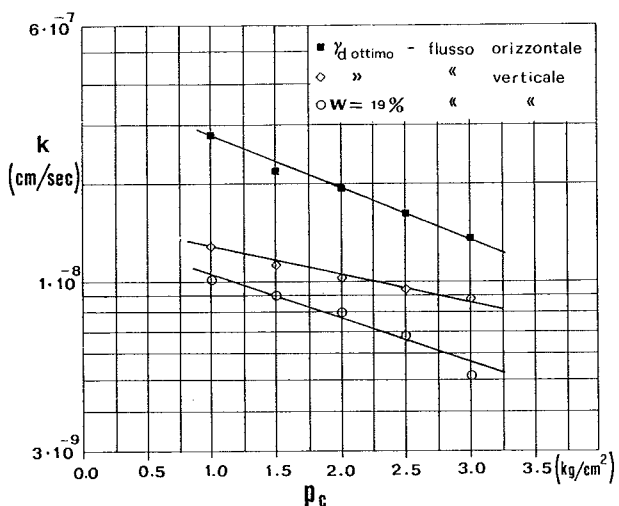


Fig. 12. - Influenza dell'anisotropia sul coefficiente di permeabilità, $S = 70\%$.

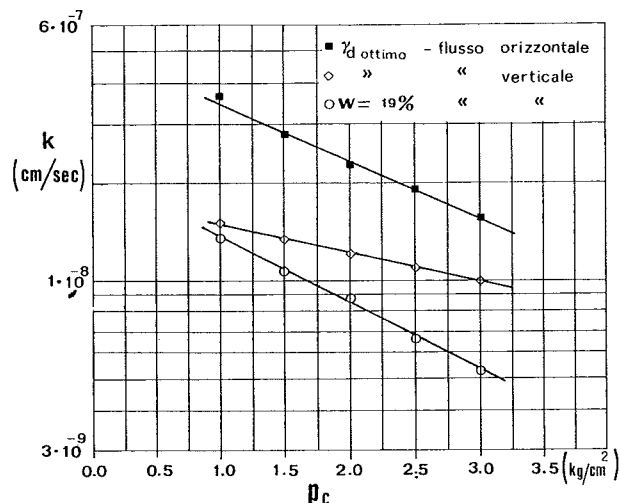


Fig. 13. - Influenza dell'anisotropia sul coefficiente di permeabilità, $S = 90\%$.

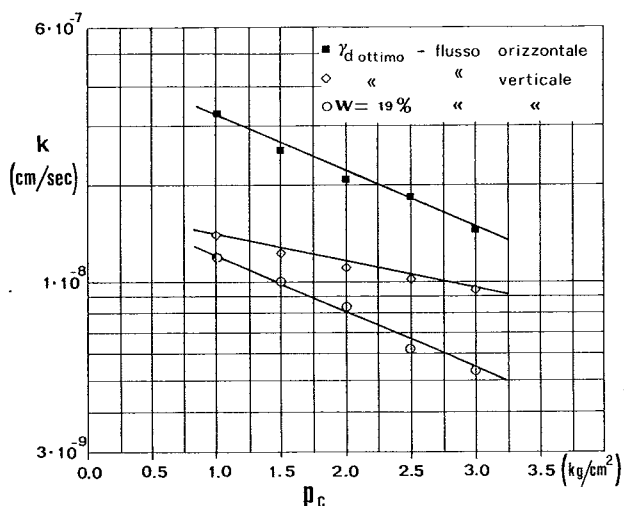


Fig. 14. - Influenza dell'anisotropia sul coefficiente di permeabilità, $S = 80\%$.

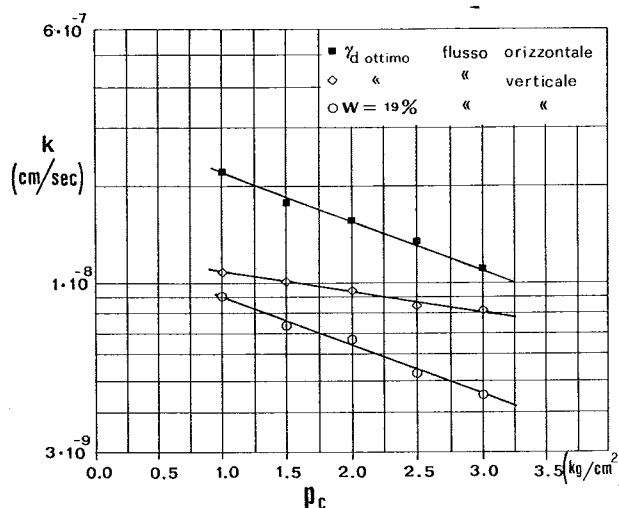


Fig. 15. - Influenza dell'anisotropia sul coefficiente di permeabilità, $S = 100\%$.

l'optimum, la permeabilità in direzione orizzontale, normale all'azione costipante, è maggiore di quella verticale, a conferma del fatto che la struttura è parzialmente orientata, e, quindi, non insensibile alla direzione del movimento dell'acqua.

L'aumento della « back pressure » e, conseguentemente del grado di saturazione, conduce ad un incremento della permeabilità conformemente alla circostanza che un maggiore volume è disponibile al flusso.

4. Rigonfiamento

È ben noto che i terreni argillosi costipati presentano una più o meno marcata tendenza a rigonfiare allorché vengono in contatto con

l'acqua. Se la variazione di volume viene impedita, il terreno esercita una pressione detta pressione di rigonfiamento.

L'entità di tale pressione è influenzata dalla natura dei minerali argillosi, dai cationi adsorbiti e dalle condizioni del provino. La superficie specifica del minerale è un parametro che può rendere conto della capacità di adsorbire acqua e ioni: Montmorillonite, Illite e Caolinite sono, nell'ordine, i minerali argillosi che hanno la maggiore tendenza a rigonfiare, specialmente se i cationi adsorbiti sono monovalenti. Minore influenza esercitano le condizioni del provino; si riscontra comunque che il materiale intatto rigonfia meno di quello rimaneggiato per il venir meno, nel secondo caso, dei legami esistenti fra le unità strutturali.

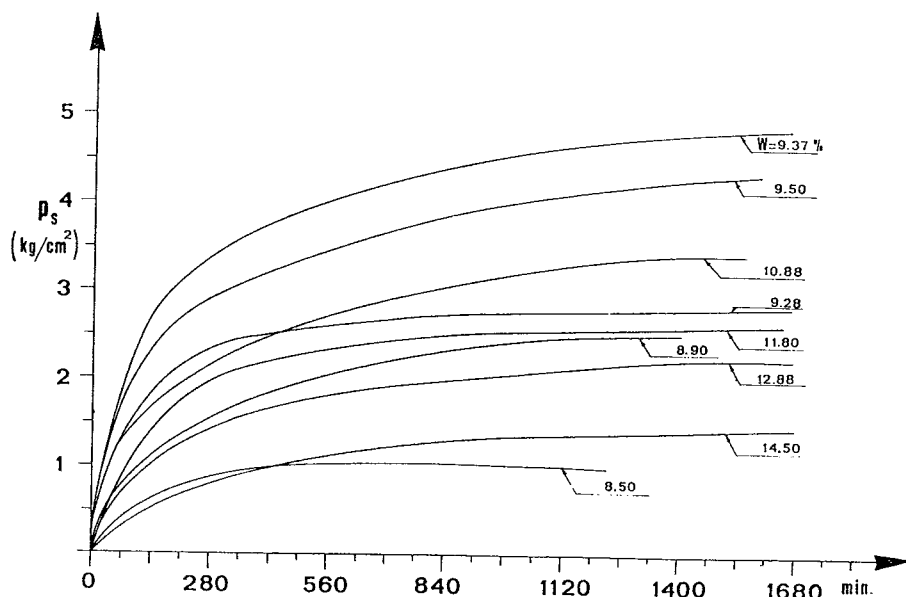


Fig. 16. - Andamento nel tempo delle pressioni di rigonfiamento (materiale A).

SEED *et al.* [1962] propongono una caratterizzazione dei materiali rigonfianti basata sull'indice di attività e sulla percentuale di fino minore di 0.002 mm. HOLTZ e GIBBS [1956] suggeriscono un criterio che richiede la determinazione dell'indice di plasticità, del limite di ritiro e del contenuto in colloidi (0.001 mm). KOMORNIK e DAVID [1969], applicando la teoria di BOLT [1956] hanno trovato che l'indice di compressibilità C_c dipende dal limite di liquidità W_L , ottenendo così una conferma indiretta della formula empirica di TERZAGHI e PECK: $C_c = 0.009 (W_L - 10)$.

Benché i suddetti parametri siano indicativi della presenza di materiali rigonfianti, la loro determinazione non tiene alcun conto delle condizioni ambientali in cui andrà posto in opera il terreno costipato.

Viceversa, il ricorso a una prova edometrica convenzionale rappresenta una procedura abbastanza accurata per la misura dei parametri di rigonfiamento e inoltre consente una ragionevole simulazione delle condizioni al contorno reali.

In fig. 16 sono riportate le curve pressioni di rigonfiamento-tempo per i campioni (del materiale A) sottoposti a prova secondo modalità standard. La pressione, come si può constatare, non si sviluppa istantaneamente ma richiede un certo tempo che è funzione del contenuto d'acqua di costipamento.

Le pressioni di rigonfiamento al variare del contenuto d'acqua di costipamento, è riportata nelle figg. 17a e 17b. Si noti che la pressione

raggiunge un massimo ben definito per un valore di w a sinistra dell'optimum per poi decrescere.

In fig. 18 sono mostrati i risultati ottenuti per provini « as compacted » del materiale A. I campioni costipati con contenuto d'acqua minore dell'optimum non esercitano pressioni di sorta, mentre quelli con contenuto d'acqua maggiore dell'optimum rigonfiano secondo l'andamento della curva a tratteggio.

Nella seconda fase della prova, in cui viene consentito il contatto con l'acqua, le pressioni di rigonfiamento si portano allo stesso livello di quelle esibite dai campioni sottoposti alla prova standard. Si osservi, in particolare, che per $w = 12.50\%$, già nella prima fase viene raggiunto il massimo valore possibile della pressione di rigonfiamento.

È evidente, dall'esame dei risultati, l'influenza del grado di saturazione, e sono altresì immediate le implicazioni che ne scaturiscono per le opere in terra, quali le dighe e gli argini, in cui la saturazione viene raggiunta solo in fase d'esercizio dopo la costruzione.

La tendenza a rigonfiare delle argille è stata interpretata da BOLT [1956] in base al modello di doppio strato, attribuendo il rigonfiamento alla pressione osmotica che si genera per effetto della differenza di concentrazione ionica dell'acqua adsorbita rispetto a quella della soluzione esterna al doppio strato. L'analisi svolta da BOLT è applicabile a particelle di minerali argillosi disposte parallelamente.

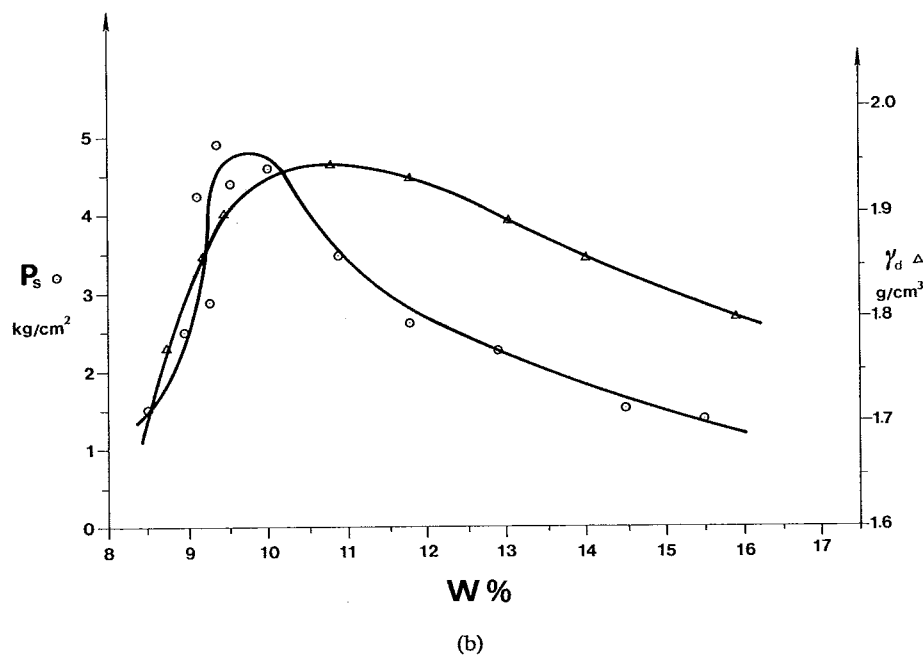
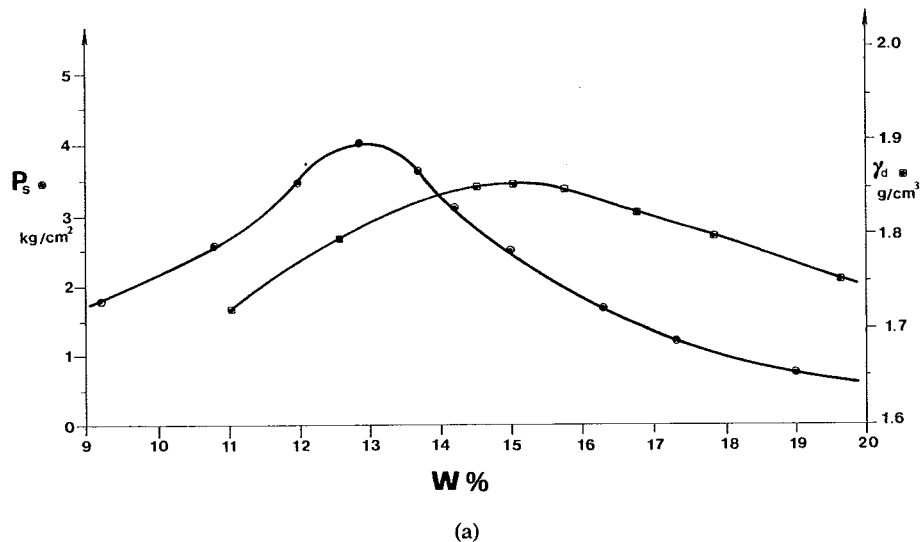


Fig. 17. - Andamento delle pressioni di rigonfiamento in funzione di w% di costipamento: (a) mat. A; (b) mat. B.

Studi successivi [AYLMORE e QUIRK, 1959, 1960; KOMORNIK e DAVID, 1969] hanno puntualizzato che occorre distinguere la componente del rigonfiamento prodotta dalla espansione del doppio strato da quella connessa con il potenziale acqua-terreno, il quale è proporzionale alla tensione superficiale dell'acqua contenuta nei pori ed è direttamente responsabile della formazione dei menischi. Poiché, di norma, i terreni contengono particelle non argillose, e la struttura dell'argilla stessa non è necessariamente orientata, quest'ultima componente non può essere ignorata.

L'esistenza di queste due componenti sembra confermata dal fatto che la maggior parte dei riscontri sperimentali evidenzia che per w a si-

nistra dell'optimum si hanno le maggiori pressioni di rigonfiamento.

In qualche caso [OLSON, 1964] sono stati misurati valori più alti delle pressioni in corrispondenza di più elevati contenuti d'acqua di costipamento che, come è stato già segnalato, provocano una struttura orientata.

Anche per i terreni oggetto del presente studio le massime pressioni di rigonfiamento si registrano per contenuti medi d'acqua minori dell'ottimo, cioè nel caso di strutture parzialmente orientate; è quindi ipotizzabile che la componente meccanica e quella fisico-chimica contribuiscano entrambe a determinare il comportamento rigonfiante anche di questi materiali.

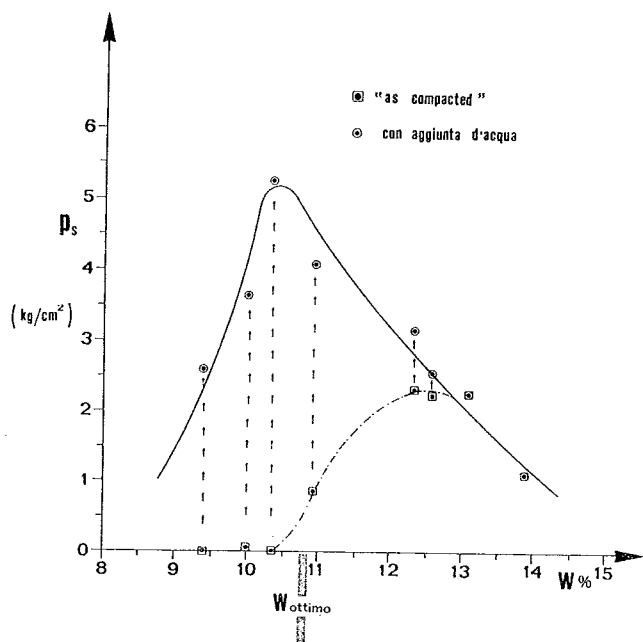


Fig. 18. - Andamento delle pressioni di rigonfiamento in funzione di w% di costipamento per provini « as compacted ».

Per quanto concerne i risultati delle misure condotte sui campioni « as compacted » (materiale « a ») nella prima fase esercitano pressioni non nulle solo i provini con grado di saturazione prossimo all'unità (fig. 18) e con assetto strutturale marcatamente orientato. In siffatte condizioni, l'effetto connesso con l'espansione dei doppi strati tende a prodursi interamente e la teoria di BOLT, di cui sono verificate le assunzioni fondamentali (*), ne rende possibile la valutazione.

In sostanza, la teoria stabilisce una relazione di diretta proporzionalità fra pressione di rigonfiamento e concentrazione elettrolitica; in mancanza di dati sperimentali circa il valore di quest'ultima, è sembrato utile agli scriventi utilizzare ugualmente la relazione di BOLT deducendo, però, la concentrazione elettrolitica, nota la pressione di rigonfiamento misurata in laboratorio. I dettagli di tale determinazione sono riportati altrove [FEROLETO e FAMILIARI 1983].

In questa sede preme rilevare (fig. 19) che l'andamento della concentrazione elettrolitica C_0 in funzione del contenuto d'acqua, è qualitativamente analogo a quello di P_s con il valore massimo spostato più sulla destra, come deve essere se si pensa che l'altra componente del rigonfiamento si sviluppa per bassi contenuti d'acqua. Ciò costituisce una conferma indiretta del fatto che la componente fisico-chimica ha avuto, nelle condizioni di prova indagate e per il materiale in esame, un ruolo rilevante.

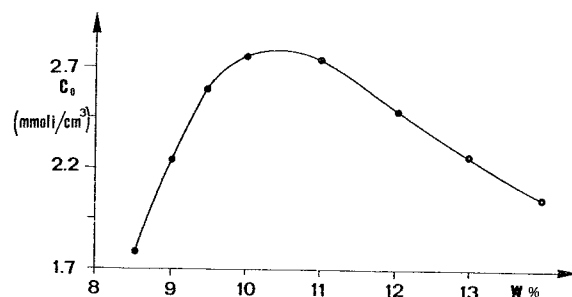


Fig. 19. - Variazione della concentrazione elettrolitica al variare del w% di costipamento.

5. Conclusioni

L'indagine sperimentale svolta ha confermato, per i materiali presi in esame, che due importanti proprietà dei terreni costipati, la permeabilità ed il rigonfiamento, dipendono strettamente dal contenuto d'acqua di costipamento.

In accordo con l'evidenza sperimentale disponibile, i valori della permeabilità esibiti da campioni costipati con contenuto d'acqua a sinistra dell'optimum sono maggiori (nel caso del terreno A, di più di un ordine di grandezza) di quelli costipati con w maggiore dell'ottimo.

Tale comportamento, che contrasta con l'influenza esercitata dal grado di saturazione e, in parte, con l'andamento dell'indice dei vuoti, è giustificabile in termini di struttura delle particelle di argilla.

Le foto eseguite al microscopio elettronico a scansione documentano sia il maggior grado di orientazione della struttura che la progressiva scomparsa di macropori, al crescere del contenuto d'acqua.

La determinazione delle pressioni di rigonfiamento ha mostrato, conformemente a gran parte dei risultati riportati in letteratura, che i maggiori valori si ottengono per campioni costipati con $w < w_{opt}$.

Una analisi teorica del meccanismo che regola il rigonfiamento è piuttosto difficoltosa; da studi, anche recenti, si rileva che la pressione di rigonfiamento è somma di due componenti, l'una fisico-chimica, dovuta all'espansione del doppio strato, l'altra meccanica, connessa con le tensioni capillari. Il prevalere dell'una o dell'altra componente dipende dai cationi adsorbiti e dal contenuto d'acqua.

Nel caso del materiale « A », oggetto del presente studio, nel quale prevalgono cationi monovalenti (Na^+), l'applicazione della teoria di

(*) L'analisi mineralogica ha evidenziato per il materiale A in prevalenza ioni sodio montmorillonite.

BOLT si rivela adatta a cogliere almeno qualitativamente, gli aspetti più importanti della curva di rigonfiamento, ciò comporta implicitamente, che la componente prodotta dall'espansione del doppio strato è dominante per il terreno in esame.

Dal punto di vista applicativo, in particolare per quanto riguarda la costruzione del nucleo di dighe in terra, dai risultati acquisiti si evince la opportunità di effettuare il costipamento con contenuti d'acqua superiori all'optimum, al fine di garantire ridotte pressioni di rigonfiamento ed una maggiore tenuta idraulica.

È del tutto ovvio, comunque che l'entità del contenuto d'acqua non può farsi dipendere unicamente dalla condizione di ottenere bassi valori della permeabilità e del rigonfiamento, ma deve essere anche tale da dare luogo ad un materiale con adeguate caratteristiche di deformabilità e resistenza.

A tale proposito, sembra generalmente accertato che costipando con $w < w_{opt}$ si produce un materiale di elevata resistenza con comportamento a rottura di tipo fragile; viceversa, materiali costipati con $w > w_{opt}$ sono caratterizzati da una minore resistenza che si accompagna a una marcata tollerabilità ai cedimenti differenziali senza che avvengano fenomeni fessurativi.

Occorre, inoltre, tenere presente che le condizioni di prova realizzate in laboratorio non sempre simulano perfettamente quelle esistenti in sito.

Differenze di comportamento possono ad esempio riscontrarsi, sia nei riguardi della permeabilità che delle pressioni di rigonfiamento, a causa degli effetti tixotropici ai quali i terreni argillosi sono sottoposti dopo il costipamento. Il fenomeno, in conformità alle leggi di conservazione dell'energia, è dovuto alla riorientazione delle particelle da uno stato disperso, indotto dall'energia costipante, verso uno stato flocculato di più basso livello energetico.

Nel caso delle dighe, il nucleo viene a contatto con l'acqua non prima di alcuni mesi dalla sua realizzazione e, poiché durante questo intervallo gli effetti tixotropici hanno la possibilità di manifestarsi interamente, è da prevedere a parità di tutte le altre condizioni, un aumento della permeabilità rispetto ai risultati conseguiti sottoponendo a prova i campioni subito dopo il costipamento.

Da tutto ciò consegue che la scelta appropriata del contenuto d'acqua, a parità di energia costipante, costituisce una delicata operazione

progettuale volta ad assicurare un campo di valori accettabili a una molteplicità di parametri, la cui importanza relativa deve essere attentamente valutata prima di adottare soluzioni definitive.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano i Consorzi Riuniti di Catanzaro e la Ferrocemento S.p.A. per la fornitura dei campioni di terreno.

Si ringrazia altresì il professore Antonio Vallario, della Facoltà di Scienze dell'Università di Napoli, per aver reso possibile l'esecuzione delle foto al microscopio elettronico a scansione.

BIBLIOGRAFIA

- AYLMORE L. A. G., QUIRK J. P. (1960) - *The structural status of clay sistem.* Clay and clay minerals, pp. 140-130.
- BARDEN L., SIDES G. R. (1970) - *Engineering behaviour and structure of compacted clay.* A.S.C.E., J. Soil Mech. Found. Div., vol. 96, n. S.M. 4.
- BOLT G. H. (1956) - *Physico - Chemical analysis of the compressibility of pure clays.* Geotechnique 8. p. 86.
- BOWLES J. E. (1979) - *Physical and geotechnical properties of soil.* Mc Graw-Hill.
- DIAMOND S. (1971) - *Microstructure and pore structure of impact-compacted clays.* Clays and clay minerals, vol. 19, pp. 239-250.
- FEROLETO, FAMILIARI (1983) - Tesi di laurea non pubblicata.
- HOLTZ W. G., GIBBS H. J. (1956) - *Engineering of expansive clays.* Transactions A.S.C.E., 121.
- KOMORNIK A., DAVID D. (1969) - *Prediction of swelling pressure of clays.* A.S.C.E., J. Soil Mech. Found. Div., N.S.M. 1.
- LAMBE T. W. (1958) - *The structure of compacted clay.* A.S.C.E., J. Soil Mech. Found. Div., vol. 84, n. S. M. 2.
- LAMBE T. W. and WHITMAN R. V. (1969) - *Soil Mechanics.* Wiley and son.
- MITCHELL J. K., HOOPER D. R., CAMPANELLA G. R. (1965) - *Permeability of compacted clay.* A.S.C.E., J. Soil Mech. Found. Div., Vol. 91, n. S.L. 4, pp. 41-65.
- MITCHELL I. K. (1975) - *Fundamental of soil behaviour.* Mc Graw - Hill.
- OLSEN H. W. (1960) - *Hydraulic flow through saturated clays.* Clays and clay minerals, 9.
- OLSON R. E. (1964) - *Effective stress theory of soil compaction.* A.S.C.E., J. Soil Mech. Found. Div. Vol. 90, n. S.M. 2, pp. 171-189.
- YONG R.N., WARKENTIN B. P. (1975) - *Soil properties and behaviour.* Elsevier.

SUMMARY

Permeability and swelling pressure of compacted clays.

The soil for his relatively low cost, easy availability and flexibility, is today widely used as construction material. Dams, river banks, highway embankments etc., are constructed with the soil.

The material is installed with special techniques to improve his shear strength and compressibility.

One of the techniques widely used is the compaction.

In the laboratory the compaction is conducted by Standard test called A.A.S.H.O.. On the compacted soil the la-

laboratory tests are executed to determine his physico-mechanical characteristics. Some earth dams and river banks are impermeabilized with cores of clayey soil.

Therefore in this paper are reported some results of the laboratory tests, to measure permeability and swelling pressure, conducted on samples of compacted cohesive soil. Some of the characteristics of the cohesive materials used, named A e B, are reported in table (1) and (2). Some Authors had established that, for constant compactive effort, the structure of the soil is modified by varying the water content. For samples drier than the optimum the structure is random or flocculated. For soil wet than the optimum the structure is oriented or dispersed (fig. 2, 3, 4).

Moreover the particles are assembled into the structural units, macropeds, cluster etc... For low water content the structural units are hard and are not distorted by the compactive effort. For this reason the density is low and there are much macropore intra structural units. Increasing the water content the structural units become progressively soft. They are distorted by the compaction, the macropores disappears and the density increases. For high water content the density decreases because the water is not able to replace the air entrapped into the isolated pores. Thus the solids particles are removed. All said is confirmed by the microphotographs executed with the S.E.M. (see photographs) on the samples of the material A. The tests to determine the coefficient of permeability, K , are conducted with GEONOR apparatus. The scheme of this apparatus is reported in figure 1. In the diagram of figure 10 is showed the variation of the coefficient of permeability with the water content, W , after compaction. This variation is similar to that obtained by other researchs. The writthers believe that this variation can be explained on the base of the modification of the structure after compaction.

In the diagrams of figures 12, 13, 14 and 15 are reported the variation of the coefficient of permeability with the degree of saturation, S . It is evident the increment of K with S and the low anisotropy for the flow in the vertical and orizontal direction. In every case the influence of soil structure on the coefficient of permeability is dominant. It is well known that the cohesive soils showed the less or more marked tendency to increase his volume. If this variation is prevented the soil exerts a pressure called swelling pressure. Many Authors had established that the swelling pressure is primarily dependent by the clay mi-

neralogy and the valence of the adsorbed cation. The laboratory tests are conducted with two different technics. In the first case the samples are put in contact with water and so had the possibility of become saturated. In the second case the test is subdivided into two stages.

In the first one the sample had not contact with the water and the loss of moisture is prevented. In this way the water content is that obtained after compaction. At end of this stage the sample is put in contact with water. The results obtained with the first experimental technics are reported in the diagram of figures 16, 17(a) e 17(b). It is evident that the maximum value of the swelling pressure is obtained for water content less than optimum, i.e. for partly oriented structure. It is ascertained that the swelling pressure is in partly due to the soil-water potential (mechanical component) and partly to the osmotic pressure.

In this way the experimental results obtained are well interpreted. For samples « as compacted » in the first stage the swelling pressure is exerted only by the samples with the degree of saturation that approach the unity (fig. 18). In this condition the soil water potential approach to zero, thus the swelling pressure measured is enterely due to the osmotic pressure component.

In the second stage the samples had achieved the same values of pressure of those « standard ». As the materials examined contain monovalment cation (Na^+) it is supposed that the osmotic component prevail. This is confirmed by the application of the BOLZ's theory, that makes the determination of the variation of the electrolytic concentration with water content (see figure 19). This diagram is similar with that swelling pressure, P_s , water content W .

By the results obtained in this study it is can concluded that it is convenient greater then the optimum. In this way the permeability and swelling pressure assumed the minimum values.

This conclusion can be questioned on the base of aging effect. This effect cause the change of structure of the material in absence of change in water content. The change of structure is caused by the variation of entropy of the soil-water sistem (principles of the energy conservation). On this basis some Authors had concluded that it is convenient to compact with water content less than optimum.

But this conclusion had not general validity because the experimental results, on which based, are valid for particular technics. Thus the choice of water content for compaction was examined for the specific case.