

# Sull'impiego delle argille costipate per la impermeabilizzazione dei fondi delle discariche controllate

L. ESPOSITO, A.P. FERRANTE\*

**SOMMARIO:** Vengono riportati i risultati di una serie di prove di laboratorio, volte ad accertare le variazioni delle caratteristiche di permeabilità e resistenza a taglio di argille costipate soggette a scambio cationico. I risultati ottenuti evidenziano che, a seguito di detto scambio che simula l'azione di un percolato sul materiale che impermeabilizza il fondo di una discarica di rifiuti solidi urbani, si hanno variazioni sia della permeabilità che della resistenza a taglio.

Tuttavia mentre la resistenza a taglio varia in positivo, cioè cresce, la permeabilità varia in negativo perché cresce a sua volta di un intero ordine di grandezza.

## 1. Premessa

Il ricorso alle discariche controllate per lo smaltimento dei rifiuti solidi urbani, si va sempre più approfondendo malgrado le conseguenze che esse comportano dal punto di vista ambientale.

Uno dei problemi più importanti è il contenimento delle acque di scolo provenienti dalle discariche (percolato) in modo da impedire che queste vengano in contatto con le acque di falda inquinandole in maniera grave. Infatti il percolato che deriva dalle acque di pioggia che filtrano attraverso il materiale della discarica, contiene disciolti o in sospensione elementi fortemente inquinanti.

L'attuale normativa (D.M. 559 del 25/1/88) prevede che:

«- Nel caso in cui gli impianti per i quali non è prevista l'impermeabilizzazione con materiali artificiali, né sistemi di drenaggio o di captazione del percolato, la Regione, prima del rilascio dell'autorizzazione provvisoria, deve accertare, attraverso indagini di natura idraulica, geologica ed idrogeologica che lo spessore, la permeabilità e la capacità di ritenzione ed assorbimento degli strati del suolo interposto tra la massa di rifiuti e le acque superficiali, siano tali da preservare le acque delle falde superficiali dall'inquinamento.

- Lo spessore e le caratteristiche di resistenza dei materiali impermeabilizzanti artificiali devono essere tali da impedire la fuoriuscita del percolato dal fondo e dalle pareti della discarica.

- Il fondo della discarica deve trovarsi al di sopra del livello di massima escursione della falda idrica con un franco di almeno 150 cm.

- Il manto impermeabilizzante composto da materiale artificiale deve essere adeguatamente protetto dagli agenti atmosferici e da pericoli di danneggiamento

in fase di realizzazione e di esercizio della discarica ed in ogni caso poggiate su di uno strato di terreno con permeabilità  $< 10^{-6}$  cm/sec e spesso almeno 150 cm».

L'impermeabilizzazione viene di norma realizzata con membrane polimeriche e con terreni argillosi costipati.

Le membrane polimeriche sono idealmente impermeabili, ma nella realtà i fluidi le possono attraversare per diffusione, per osmosi o attraverso soluzioni di continuità come fori, tagli ecc.. Per i terreni coesivi costipati oltre ai problemi posti dalle fessurazioni dovute a cicli di idratazione ed essiccamento, si hanno delle variazioni delle caratteristiche del materiale dovute allo scambio dei cationi tra quelli presenti nel percolato e quelli disciolti nei complessi di adsorbimento delle argille.

Lo scopo del presente lavoro, è proprio quello di mostrare gli effetti che questo scambio cationico ha sulle caratteristiche dei terreni coesivi costipati, con particolare riguardo alla permeabilità ed alla resistenza a taglio.

In questa prima fase della sperimentazione si sono adoperate delle soluzioni saline a concentrazione controllata di sodio e di calcio. Ciò perché questi sono tra i cationi più abbondanti nei percolati, come si evince dalle analisi chimiche condotte su di essi.

## 2. Caratteristiche microstrutturali delle argille ed operazioni di scambio cationico

È ben noto che le argille sono costituite da particelle solide di forma appiattita e con dimensioni piccolissime (qualche  $\mu\text{m}$ ). Per la loro struttura atomica queste particelle hanno una distribuzione di cariche negative sulle due facce, per cui si circondano di uno o più strati di molecole di acqua, che hanno un comportamento dipolare, detti complessi di adsorbi-

\* Dott. ing. Luigi ESPOSITO, dott. ing. Aldo P. FERRANTE, Dipartimento di Difesa del Suolo dell'Università della Calabria.

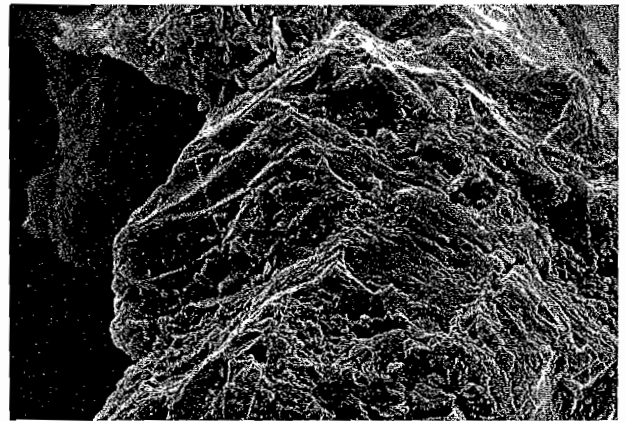
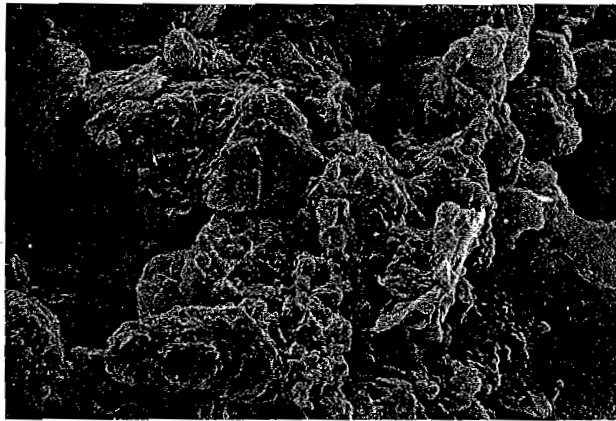
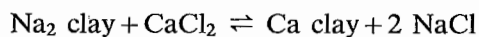


Fig. 1 - Foto al S.E.M. di terreno trattato con  $\text{CaCl}_2$ , foto (a), e  $\text{NaCl}$ , foto (b), simile a quello in studio [ESPOSITO e NAPOLI, 1984].

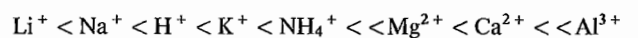
mento. In questi complessi sono contenuti in varia misura cationi ed anioni la cui natura dipende dal tipo di minerale argilloso e dall'ambiente di formazione e deposizione. Il comportamento di un terreno argilloso dipende in larga misura dal tipo e dalla valenza dei cationi adsorbiti [PUSCH, 1973; YONG e WARKENTIN, 1975; NAGARAJ, 1983], per contro gli anioni hanno una influenza relativa data la labilità dei loro legami con i complessi di adsorbimento. È evidente per quanto detto, che si può influire sul comportamento di un terreno coesivo introducendo all'interno dei complessi di adsorbimento i cationi del tipo e della valenza desiderata. Questa operazione è detta di scambio cationico ed è realizzabile in pratica perché i cationi contenuti nei complessi di adsorbimento sono, in linea di principio, scambiabili, possono cioè essere rimpiazzati da altri di ugual valenza o da due di valenza metà di quella originale. Ad esempio se un'argilla contenente sodio viene lavata con una soluzione contenente calcio cloruro, ciascun catione calcio rimpiazza due cationi sodio; il tutto può essere scritto formalmente nel modo seguente:



La quantità di cationi scambiabili per una data argilla è pari all'ammontare delle cariche negative. L'energia relativa con cui ciascun catione è legato alla particella solida di argilla, può essere determinata misurando la relativa facilità con cui viene rimpiazzato da un dato catione ad una data concentrazione (energia o potere di rimpiazzo). Questa misura mostra che una piccola quantità di calcio rimpiazza con facilità del sodio, ma non è vero il contrario a meno di particolari condizioni.

Il potere di rimpiazzo di ciascun catione dipende dalla sua valenza e, a parità di valenza, dalle sue dimensioni. I cationi possono pertanto essere ordinati in una serie crescente in base al loro potere di rim-

piazzo. La serie suddetta può scriversi come segue:



Il numero dei cationi rimpiazzati dipende ovviamente dalla concentrazione della soluzione di rimpiazzo. Se un'argilla contiene cationi sodio ed è messa in una soluzione di ioni calcio, si ha scambio cationico fino al raggiungimento di una condizione di equilibrio, che non necessariamente corrisponde alla saturazione della capacità di scambio. Per cui all'equilibrio vi saranno cationi calcio e cationi sodio liberi.

La più semplice ed utile delle equazioni di equilibrio è quella introdotta da Gapon [YONG e WARKENTIN, 1975]. È da dire infine che per la stessa concentrazione di calcio e sodio, il 90% degli ioni divalenti è presente in forma scambiabile, mentre al crescere della concentrazione questo rapporto decresce. Per le concentrazioni saline normalmente presenti nell'acqua di porosità, gli ioni a valenza più elevata sono adsorbiti di preferenza.

L'effetto dello scambio cationico sulla microstruttura dei terreni coesivi è notevole perché la presenza di cationi di o trivalenti riduce le forze repulsive tra le singole particelle che tendono ad assumere un assetto spigolo contro faccia. È altresì noto che le singole particelle tendono ad aggregarsi per dar luogo a unità strutturali, sia a livello microscopico che macroscopico, dette "ped" le quali interagiscono tra loro con legami di tipo chimico-fisico [QUIRK e AYLMORE, 1960, 62; DELAGE e LAPEVRE, 1983; YONG, SHEERAN e NAGARAJ, 1975].

In presenza di cationi di e trivalenti queste unità strutturali tendono ad assumere un assetto casuale con numerosi macropori tra le unità strutturali (struttura aperta) [YONG e WARKENTIN, 1975; ESPOSITO e NAPOLI, 1984, 86]. A riprova di quanto affermato, nelle microfotografie della figura 1, sono mostrate le microstrutture di un terreno simile a quello in

esame dopo lo scambio con cationi sodio e calcio [ESPOSITO e NAPOLI, 1986].

È da dire in fine che la riduzione delle forze repulsive fa sì che i singoli "ped" tendano a comportarsi come un unico elemento solido. In queste condizioni il comportamento volumetrico dell'argilla è tendenzialmente isotropo e la sua resistenza meccanica è la più alta possibile [Esposito, 1987]. Per contro la permeabilità tende ad aumentare come si dirà in seguito.

### 3. Materiale adoperato e tecniche sperimentali

Per ottenere lo scambio cationico il terreno prescelto, proveniente dalla zona di S. Maria di Catanzaro, è stato trattato con soluzioni di  $\text{CaCl}_2$  (1N) ed  $\text{NaCl}$  (0,5N) fino ad esaurire la sua capacità di scambio (raggiungimento della condizione di equilibrio). Questa condizione è certamente molto prossima a quella che si verifica nella realtà, considerate le elevate concentrazioni saline presenti nel percolato.

La composizione granulometrica del terreno adoperato è molto prossima a quelle delle miscele artificiali, come mostrato in tabella 1. Nella tabella 2 sono riportati i risultati delle analisi chimiche e mineralogiche eseguite sulla frazione fina ( $< 2\mu$ ).

La procedura sperimentale comprende i seguenti passi:

- a) lavaggio del terreno con acqua distillata (rapporto acqua/terreno = 5/1 in peso)
- b) Filtrazione della soluzione per mezzo di centrifugazione a 10.000 giri, adoperando filtri in acetato
- c) Determinazione sul filtrato della concentrazione di  $\text{Na}^+$  e  $\text{Ca}^{++}$
- c) Essiccamento del terreno in stufa a  $105^\circ$
- e) Trattamento del terreno essiccato con soluzione di  $\text{NaCl}$  o  $\text{CaCl}_2$ ; energica agitazione della sospensione
- f) Doppia filtrazione della sospensione per mezzo di centrifugazione
- g) Determinazione sul filtrato degli ioni  $\text{Na}^+$  o  $\text{Ca}^{++}$
- h) Ripetizione degli stadi precedenti fino a quando risultano completamente assenti gli ioni

Tabella 2. - *Composizione mineralogica ed analisi chimica della frazione  $< 2\mu$  del terreno naturale*

| Minerali argillosi (%) |     | Cationi adsorbiti (meq/100 gr) |      |
|------------------------|-----|--------------------------------|------|
| Smectite               | 15% | $\text{Ca}^{++}$               | 5,35 |
| Illite                 | 55% | $\text{Na}^+$                  | 0,98 |
| Kaolinite + Chlorite   | 30% | $\text{Mg}^{++}$               | 1,96 |

$\text{Ca}^{++}$  e  $\text{Na}^+$  nei campioni trattati rispettivamente con  $\text{NaCl}$  e  $\text{CaCl}_2$

Sono stati trattati circa 40Kg di terreno con cloruro di sodio ed altrettanti con cloruro di calcio.

Sui campioni di terreno trattato e su quelli del terreno naturale è stato eseguito il costipamento dinamico secondo la procedura A.A.S.H.O. modificata (A.S.T.M. T 180).

Si sono così ottenuti dei provini su cui sono state condotte sia prove di permeabilità con permeometro tipo Geonor, che prove per la determinazione della resistenza a taglio (triax C.I.D.).

### 4. Prove di permeabilità

Le prove di permeabilità sono state condotte come detto in precedenza, con un permeometro tipo Geonor le cui caratteristiche salienti sono descritte da Esposito et al. [1984]. Il materiale è stato costipato direttamente in un formaprovino per mezzo di un costipatore in miniatura, che permette di ottenere densità molto prossime a quelle di una prova A.A.S.H.O. modificata. Sia il formaprovino che il costipatore sono a corredo del permeometro. I provini, tutti con diametro di 35,7 mm ed altezza di 70 mm, una volta montati nell'apparecchio, sono stati preventivamente saturati in «back pressure». Inoltre in tutte le prove il flusso dell'acqua è avvenuto in direzione parallela all'azione costipante atteso il basso rapporto di anisotropia misurato per questi materiali [Esposito e DENTE, 1985].

Nella tabella 3 sono riportate le caratteristiche salienti dei provini sottoposti a prova di permeabilità prima della saturazione. Le pressioni di cella da applicare ai provini [DENTE ed ESPOSITO, 1984] sono:

Tabella 1. - *Caratteristiche fisiche dei materiali sottoposti a prova*

|                                    | Sabbia % | Limo % | Argilla % | L.L. % | L.P. % | P.I. % |
|------------------------------------|----------|--------|-----------|--------|--------|--------|
| Terreno naturale                   | 48       | 22     | 30        | 45,5   | 22,0   | 23,5   |
| Terreno trattato con $\text{NaCl}$ | 48       | 22     | 30        | 59,3   | 26,5   | 32,8   |
| Terreno tratto con $\text{CaCl}_2$ | 48       | 22     | 30        | 53,2   | 24,6   | 28,6   |

Tabella 3. - Caratteristiche salienti dei provini sottoposti a prove di permeabilità

|  | Provino | W <sub>i</sub><br>% | γ di<br>(KN/m <sup>3</sup> ) | Si<br>% | Pressione di<br>confinamento<br>(Kpa) |
|--|---------|---------------------|------------------------------|---------|---------------------------------------|
| Terreno naturale                       | 1       | 8,5                 | 1,72                         | 70      | 60                                    |
|  | 2       | 9,1                 | 1,83                         | 78      | 100                                   |
|  | 3       | 9,4                 | 1,86                         | 82      | 120                                   |
|  | 4       | 10,2                | 1,92                         | 84      | 130                                   |
|  | 5       | 10,8                | 1,95                         | 88      | 150                                   |
|  | 6       | 12,0                | 1,93                         | 92      | 160                                   |
|  | 7       | 12,8                | 1,87                         | 94      | 180                                   |
|  | 8       | 14,0                | 1,85                         | 96      | 210                                   |
| Terreno trattato con NaCl              | 1       | 6,5                 | 1,80                         | 68      | 50                                    |
|  | 2       | 7,4                 | 1,85                         | 74      | 80                                    |
|  | 3       | 9,2                 | 1,92                         | 86      | 110                                   |
|  | 4       | 10,3                | 1,94                         | 90      | 130                                   |
|  | 5       | 11,5                | 1,98                         | 95      | 150                                   |
|  | 6       | 12,8                | 1,98                         | 96      | 190                                   |
|  | 7       | 13,8                | 1,93                         | 94      | 220                                   |
| Terreno trattato con CaCl <sub>2</sub> | 1       | 10,9                | 1,72                         | 68      | 60                                    |
|  | 2       | 11,2                | 1,74                         | 73      | 100                                   |
|  | 3       | 11,7                | 1,76                         | 78      | 120                                   |
|  | 4       | 13,4                | 1,78                         | 82      | 150                                   |
|  | 5       | 14,5                | 1,82                         | 85      | 180                                   |
|  | 6       | 16,0                | 1,85                         | 92      | 200                                   |

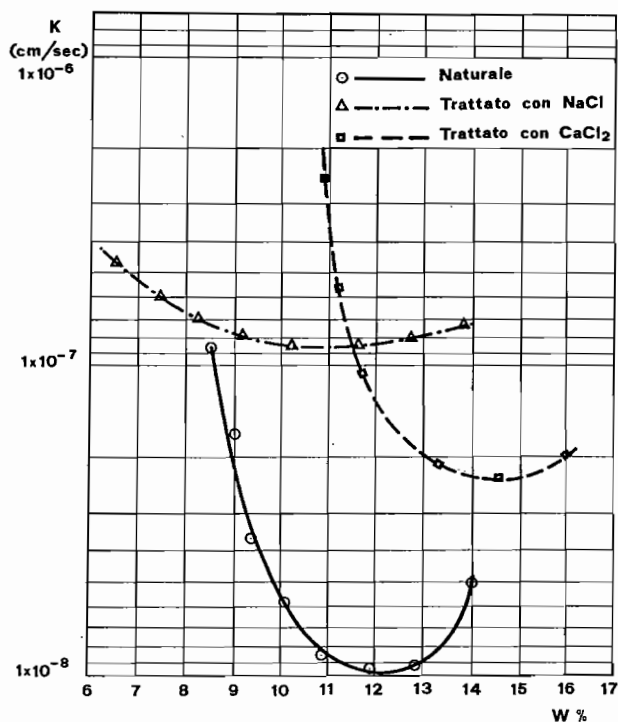


Fig. 2 - Variazione del coefficiente di permeabilità in funzione del contenuto d'acqua di costipamento.

state scelte in maniera tale da non avere rigonfiamento.

Nella figura 2 sono riassunti i risultati delle prove condotte sia su provini di terreno trattato, che su provini di terreno naturale, per diversi valori del contenuto d'acqua di costipamento.

Come si può rilevare dal diagramma di figura 2, i valori sperimentali ottenuti si lasciano interpolare da curve che presentano la concavità verso l'asse delle ordinate, raggiungendo il valore minimo in prossimità del contenuto d'acqua ottimo, a cui corrisponde probabilmente il minimo valore della porosità. Ciò è in accordo con i risultati ottenuti da altri ricercatori [OLSEN, 1960; MITCHELL, HOOPER e CAMPANELLA, 1965].

Dall'esame di queste curve, si rileva che i valori del coefficiente di permeabilità del terreno trattato sono compresi in una fascia superiore, anche di un intero ordine di grandezza, rispetto a quelli misurati per il terreno naturale.

Sempre dallo stesso diagramma si rileva che i valori di k per il materiale trattato con NaCl sono contenuti in una fascia molto più ristretta rispetto sia al terreno naturale che trattato con ione calcio. Si nota infine che curva k-W per il terreno trattato con CaCl<sub>2</sub> è simile a quella del terreno naturale pur risultando spostata verso destra e con valori di permeabilità più alti.

Questi risultati sono conseguenza delle alterazioni della microstruttura dei terreni trattati rispetto a quello naturale [Esposito et al., 1984]. Infatti per il terreno trattato con NaCl, poiché la struttura è fortemente orientata è massimo l'effetto repulsivo delle particelle all'interno delle unità strutturali, si ha quindi la massima densità di micropori e la minima di macropori. In tali condizioni il flusso dell'acqua

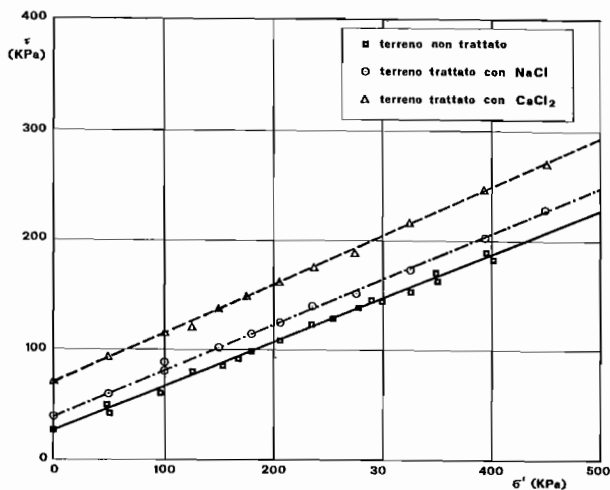


Fig. 3 - Involuppi di resistenza ricavati dalle prove triassiali.

avviene essenzialmente attraverso i micropori il cui numero varia poco al crescere di  $W$ , di qui la contenuta variazione di  $k$ .

Per il terreno trattato con  $\text{CaCl}_2$ , si è in presenza di una struttura molto più aperta che ha quindi una densità di macropori più alta che nel caso precedente (prossima al suo massimo), mentre la densità di micropori è minima. Per cui il flusso dell'acqua avviene inizialmente sia attraverso i macropori che i micropori. Di qui i valori di  $k$  iniziali sensibilmente più alti che negli altri casi. Al crescere di  $W$  la struttura tende a chiudersi per cui il numero di macropori tende a diminuire ed il flusso dell'acqua avviene prevalentemente attraverso i micropori. Ne consegue la diminuzione rapida del coefficiente di permeabilità e quindi l'elevato gradiente della curva  $k$ - $W$  che caratterizza questo materiale. Per il terreno non trattato, che contiene quindi sia cationi calcio che sodio, il flusso dell'acqua avviene tanto attraverso i macropori che attraverso i micropori, come accade per il terreno trattato con  $\text{CaCl}_2$ , di qui probabilmente, la somiglianza tra le due curve già rilevata in precedenza. Ovviamente per i bassi valori del contenuto d'acqua prevale il flusso attraverso i macropori; al crescere di  $W$  la struttura si orienta, i macropori scompaiono e quindi prevale il flusso attraverso i micropori. Poiché per il terreno naturale le densità iniziali di macropori e micropori sono più basse che per i materiali trattati, la permeabilità risulta in assoluto più bassa.

Questi risultati stanno ad indicare che il valore della permeabilità di un terreno coesivo costipato soggetto a scambio cationico, ad esempio per infiltrazione di percolato, non è costante nel tempo. A processo di scambio ultimato il valore della permeabilità può essere più grande di quello iniziale di un intero ordine di grandezza, per cui può venire meno la funzione impermeabilizzante affidata all'argilla.

Inoltre date le elevate concentrazioni di cationi so-

dio e calcio nei percolati (fino a 2000 mg./lt.) il processo di scambio può essere piuttosto veloce.

## 5. Prove di resistenza a taglio

La resistenza a taglio ha rilevanza inferiore a quella della permeabilità, dato il particolare tipo di problema in esame, perché contribuisce a determinare solo in parte la stabilità delle pareti della discarica. In ogni caso, si ritiene interessante sottolineare quelle che sono sia le variazioni di resistenza, che alcuni comportamenti singolari determinati dallo scambio cationico a cui è stato sottoposto il materiale.

Per la determinazione della resistenza a taglio si sono eseguite solo prove di compressione triassiale del tipo drenato con consolidazione isotropa. Si è scelto questo tipo di prova perché la resistenza drenata, a differenza della non drenata, sembra poco influenzata dal contenuto d'acqua di costipamento, a causa delle particolari interazioni tra le particelle solide delle frazioni più grosse e le unità strutturali in cui si raggruppano le particelle delle frazioni fini [BARDEN e SIDES, 1970; YONG e WARKENTIN, 1975; ESPOSITO, 1987; NAGARAJ, 1983], per cui risulta più evidente l'influenza dei cationi adsorbiti. I provini sono stati ottenuti costipando il materiale direttamente in un formaprovino e con la stessa tecnica adoperata per le prove di permeabilità, per cui le loro dimensioni sono identiche a quelle indicate in precedenza. Una volta montati nella cella, i provini sono stati portati a saturazione perché in tal modo vengono eliminate le influenze che i cationi adsorbiti hanno sulle interfacce aria-acqua; inoltre l'applicazione della tensione principale massima è avvenuta in direzione parallela a quella del costipamento.

Nella tabella 4 sono riportate le caratteristiche principali di alcuni dei campioni sottoposti a prova, prima della saturazione. I risultati delle prove di resistenza a taglio sono riassunti nel diagramma di figura 4. L'esame di questa figura evidenzia che il terreno naturale e quello trattato con  $\text{NaCl}$  hanno angoli di attrito molto simili ( $\varphi' = 22^\circ$ ), ma hanno coesioni intercette diverse risultando più alta quella del terreno trattato.

Per il terreno trattato con ione calcio oltre alla coesione risulta più elevato anche l'angolo di attrito ( $\varphi' = 24^\circ$ ).

Questi risultati confermano quanto già rilevato in studi precedenti, e cioè che per i terreni sottoposti a scambio cationico la resistenza cresce rispetto a quello non trattato. Questo aumento risulta più marcato per i terreni trattati con calcio cloruro.

Queste differenti variazioni della resistenza sono dovute, quasi certamente, alla influenza che i cationi

Tabella 4. - *Caratteristiche principali di alcuni provini utilizzati per le prove triassiali*

|  | Provino | W <sub>i</sub><br>% | $\gamma$ di<br>(KN/m <sup>3</sup> ) | Si<br>% | Pressione di<br>confinamento<br>(KPa) | Tensione<br>deviatorica, q<br>(KPa) |
|--|---------|---------------------|-------------------------------------|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| Terreno naturale                       | 1       | 8,8                 | 1,76                                | 74      | 50                                    | 45,0                                |
|  | 2       | 9,3                 | 1,84                                | 79      | 95                                    | 62,5                                |
|  | 3       | 9,7                 | 1,90                                | 48      | 125                                   | 80,0                                |
|  | 4       | 10,6                | 1,91                                | 86      | 155                                   | 87,5                                |
|  | 5       | 11,3                | 1,96                                | 91      | 168                                   | 95,0                                |
|  | 6       | 12,4                | 1,94                                | 93      | 180                                   | 100,0                               |
|  | 7       | 13,3                | 1,90                                | 94      | 210                                   | 110,0                               |
| Terreno trattato con NaCl              | 1       | 7,2                 | 1,82                                | 70      | 50                                    | 60,0                                |
|  | 2       | 7,6                 | 1,86                                | 76      | 100                                   | 80,0                                |
|  | 3       | 8,8                 | 1,90                                | 82      | 100                                   | 90,0                                |
|  | 4       | 9,4                 | 1,93                                | 87      | 150                                   | 103,0                               |
|  | 5       | 10,5                | 1,96                                | 92      | 180                                   | 115,0                               |
|  | 6       | 11,4                | 1,98                                | 95      | 210                                   | 125,0                               |
|  | 7       | 12,8                | 1,92                                | 96      | 235                                   | 142,5                               |
| Terreno trattato con CaCl <sub>2</sub> | 1       | 11,2                | 1,75                                | 68      | 50                                    | 95,0                                |
|  | 2       | 11,6                | 1,78                                | 75      | 100                                   | 115,0                               |
|  | 3       | 11,8                | 1,80                                | 79      | 125                                   | 120,0                               |
|  | 4       | 12,4                | 1,83                                | 82      | 150                                   | 137,5                               |
|  | 5       | 13,1                | 1,86                                | 85      | 180                                   | 150,0                               |
|  | 6       | 13,8                | 1,91                                | 91      | 210                                   | 162,5                               |
|  | 7       | 15,8                | 1,96                                | 95      | 235                                   | 175,0                               |

adsorbiti hanno sulle microstrutture che i terreni coesivi assumono dopo il costipamento. Infatti per i terreni trattati con ione sodio si ha, come detto in precedenza, il prevalere di forze repulsive, per cui le microstrutture iniziali risultano più chiuse a causa di una maggiore deformabilità delle unità strutturali [BARDEN e SIDES, 1970; YONG e WARKENTIN, 1975]. Si ha quindi un maggior numero di punti di contatto tra le unità strutturali, che risultano anche fortemente orientate. A questo tipo di struttura dovrebbe corrispondere una resistenza più elevata a causa del maggior grado di «interconnessione». In realtà questo aumento di resistenza è compensato dalla minore rigidità delle unità strutturali [BARDEN e SIDES, 1970; YONG e WARKENTIN, 1975], che contrastano con minore efficacia gli sforzi di taglio.

Nel caso del materiale trattato con CaCl<sub>2</sub>, prevalgono le forze attrattive per cui, come già detto, le unità strutturali si dispongono con spigolo contro faccia, per cui si ha una struttura più aperta [YONG e WARKENTIN, 1975; NAGARAJ, 1983].

Le unità strutturali sono molto più rigide che nel caso sia di terreno naturale con NaCl, e quindi capaci di resistere a sforzi di taglio più alti [BARDEN e SIDES, 1970; YONG e WARKENTIN, 1975]; anche i legami tra le unità strutturali sono molto forti e quindi capaci di resistere a sforzi notevoli. Per il terreno naturale, per il quale sono presenti entrambi i cationi, la struttura si presenta inizialmente come

intermedia tra quelle assunte dai terreni trattati ma solo per bassi contenuti d'acqua, essendo molto più vicina a quella del terreno trattato con NaCl per valori di W medio alti [BARDEN e SIDES, 1970]. Pertanto il terreno naturale e quello trattato con ione sodio hanno angoli di attrito tra loro molto simili. Il leggero incremento di coesione per il terreno trattato è probabilmente dovuto ad una maggiore interazione di tipo elettrico tra le unità strutturali. Per il terreno trattato con ione calcio l'incremento di resistenza rispetto sia al terreno naturale, che trattato con sodio, è dovuto al tipo di struttura e alla rigidità delle unità strutturali, fenomeni determinati entrambi dal prevalere delle forze di attrazione [BARDEN e SIDES, 1970; YONG e WARKENTIN, 1975].

Quanto detto risulta evidente osservando le curve sforzi deformazioni di tre provini aventi gli stessi contenuti d'acqua iniziali (si vedano le figg. 4, 5 e 6).

Il provino di terreno naturale e quello trattato con NaCl si comportano come se fossero normalmente consolidati, tuttavia si rileva come il provino di terreno trattato raggiunga valori del deviatore di tensione più alti.

Il provino trattato con CaCl<sub>2</sub> si comporta come se fosse leggermente preconsolidato. Questi andamenti sono abbastanza comuni anche quando i provini vengono portati a saturazione [BARDEN e SIDES, 1970; FREDLUND, 1987].

In base a quanto esposto, si può dire che lo scam-



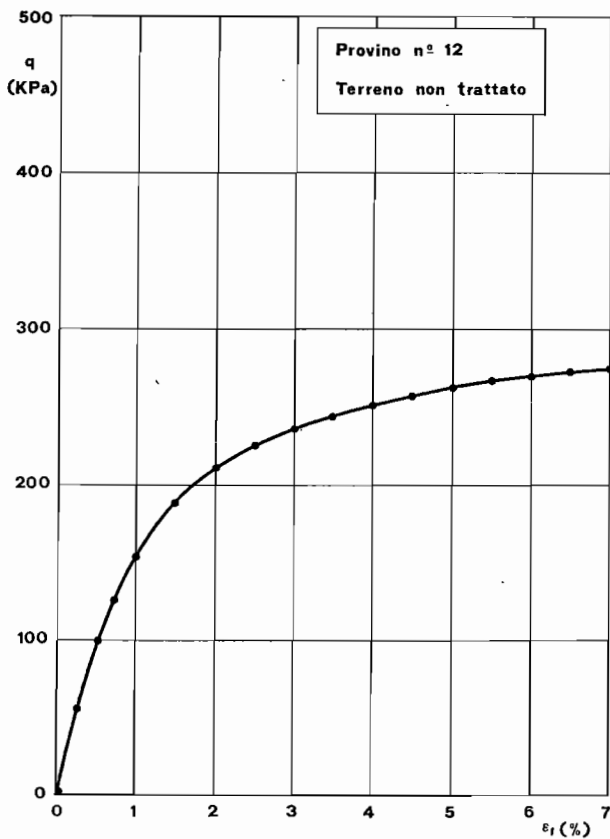


Fig. 4 - Tipica curva sforzi-deformazioni per il terreno non trattato.

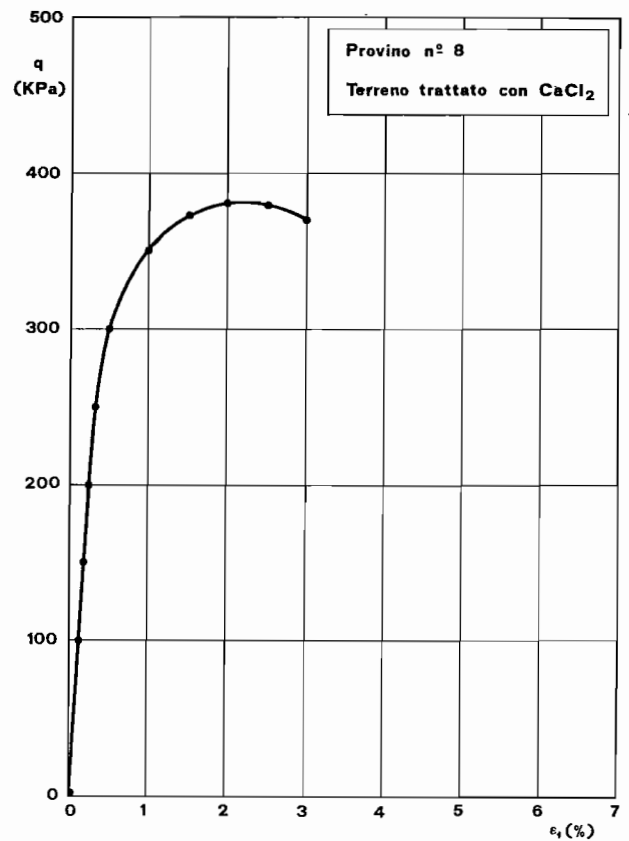


Fig. 6 - Tipica curva sforzi-deformazioni per il terreno trattato con  $\text{CaCl}_2$ .

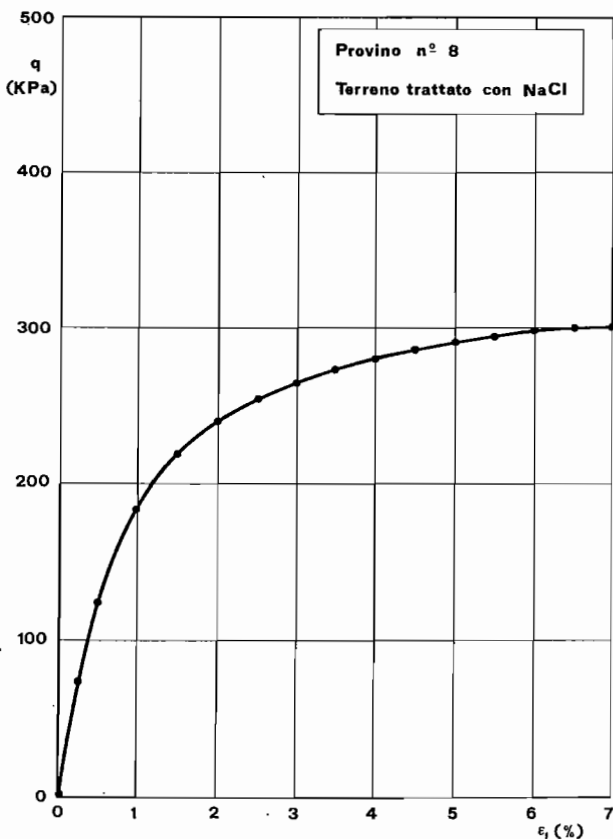


Fig. 5 - Tipica curva sforzi-deformazioni per il terreno trattato con NaCl.

bio cationico non appare pregiudizievole per la stabilità delle pareti della discarica, perché comporta un aumento dei parametri di resistenza.

## 6. Commenti e conclusioni

In base alle esperienze condotte, risulta già abbastanza chiaro che il processo di scambio cationico provoca un'alterazione non secondaria delle caratteristiche dei terreni coesivi costipati.

In particolare risulta che, per il terreno esaminato, a seguito del processo di scambio la permeabilità mostra una tendenza a crescere, questa crescita può essere anche di un intero ordine di grandezza. Sempre per il materiale esaminato, anche la resistenza a taglio mostra una tendenza a crescere a seguito dello scambio cationico. Questa crescita, come era da attendersi, risulta più marcata per il terreno trattato con  $\text{CaCl}_2$ , probabilmente a causa del prevalere delle forze di attrazione tra le unità strutturali. Da quanto detto si evince che, l'uso dei materiali argillosi costipati per l'impermeabilizzazione dei fondi delle discariche di rifiuti solidi urbani, è una pratica che richiede una grande cautela perché il parametro che sembra variare in negativo è proprio la permeabilità.

In ogni caso i risultati esposti sono da ritenere an-

cora parziali perché lo scambio è stato effettuato con due soli cationi dei molti contenuti in un percolato, anche se sono i più abbondanti.

Pertanto in prossimo futuro verranno ripetute esperienze simili adoperando soluzioni con composizione chimica simile a quella di un percolato e con analoga densità.

#### RINGRAZIAMENTI

Gli autori esprimono la loro gratitudine al Prof. Ing. Luciano Piccarelli, per la preziosa collaborazione prestata nella revisione critica del testo.

#### BIBLIOGRAFIA

- BARDEN L., SIDES G.R. (1970) - *Engineering behaviour and structure of compacted clay*. Am. Soc. of Civil Eng., vol. 96, n.° S.M. 4, pp. 1171-1200.
- CANCELLI A., COSSU R., MALPEI F. (1987) - *Prove di laboratorio sull'impiego della bentonite come impermeabilizzante degli scarichi controllati*. Rifiuti Solidi, vol. 1, n. 6, novembre-dicembre.
- DELAGE P., LAPEVRE G. (1983) - Discussion on «Double layer theory and compressibility of clay», by Sridharan and Jayadeva, 1982. Geotechnique 33, n. 4.
- DENTE G., ESPOSITO L. (1984) - *Permeabilità e pressioni di rigonfiamento dei terreni coesivi costipati*. Rivista Italiana di Geotecnica, vol. XVIII, n. 3.
- DENTE G., ESPOSITO L. (1985) - *On some characteristics of compacted cohesive soils*. 1th Italo-Spanish Congress on Clays and clay minerals; Seiano di Vico Equense, 24-28 settembre 1984.
- ESPOSITO L. (1987) - *Resistenza a taglio dei terreni coesivi costipati*. Rivista Italiana di Geotecnica, vol. XXI, 2.
- ESPOSITO L., NAPOLI R.M.A. (1984) - *Su di un problema di inquinamento non puntuale*. VI Corso di aggiornamento sulle «Tecniche per la difesa dall'inquinamento». Camigliatello Silano, giugno.
- ESPOSITO L., NAPOLI R.M.A. (1986) - *Lo scambio ionico nella stabilizzazione dei pendii in frana*. Atti del XVI Convegno Nazionale di Geotecnica, Bologna, 14-16 maggio.
- FREDLUND D.G., RAHARDJO H. & GAN J.K.M. (1987) - *Non-linearity of strength envelope for unsaturated soils*. 6th International Conference on Expansive soils, 1-4 december, New Delhi, India.
- NAGARAJ T.S. (1983) - *Prediction of soil behaviour*. On «Recent developments in laboratory and field tests», Bangkok.
- ØLSEN H.W. (1960) - *Hydraulic flow through saturated clay*. Clays and clay minerals, 9.
- PAPANICOLAU E.P. (1976) - *Determination of cation exchange capacity of soil and their parent base saturation*. Soil Scien., 121.
- PUSCH R. (1973) - *Influence of salinity and organic matter on the formation of clay microstructure*. Gothenberg, Sweden, pp. 161-173.
- QUIRK J.P., AYLMOORE L.A.G. (1960) - *Domain or turbostatic structure of clay*. Nature, 187.
- QUIRK J.P., AYLMOORE L.A.G. (1962) - *The structural status of clay system*. Clays and clay minerals, 104, 1962.
- YONG R.N., SHEERAN D.E. & NAGARAJ T.S. (1975) - *Soil composition control of fabric and response behaviour*. Int. clay conf. Mexico, pp. 663-672.
- YONG R.N., WARKENTIN B.P. (1975) - *Soil properties and behaviour*. Elsevier, 1975.

#### SUMMARY

##### On use of compacted clayey soils for waterproofing of the bottom of controlled urban solid waste discharge

The use of compacted clay soils in order to waterproof the bottom of controlled waste discharge is usually accepted. Neverth-

less the water percolating through the waste contains some dissolved ions that cause ionic exchange phenomena in clay. Because of this ionic exchange the clay characteristics varies in a sensible way.

The aim of this paper is to analyze the variations of some soil characteristics, such as permeability and drained shear strength, caused by cations exchange.

The experimental tests have been carried out on compacted clay soils in natural state and after cationic exchange with  $\text{Na}^+$  and  $\text{Ca}^{++}$ , which are the most frequent cations dissolved in the percolated water.

In table 1 physical properties of the soils before and after cation exchange are reported. In table 2 minerals and adsorbed cations of clay fraction (i.e. lesser than  $2\mu$ ) are listed.

The permeability and isotropic triaxial compression tests, have been conducted on samples prepared by kniding compaction.

In both test types samples have been soaked before the test, in order to emphasize the effect of adsorbed cations. In the tables 3 and 4 some of the characteristics of tested samples are reported. The results of permeability tests, conducted with GEONOR apparatus, are shown in fig. 2.

From the results reported we can say that:

- the coefficient of permeability  $k$  is a non linear function of the moulding water content;
- minimum value of  $k$  is reached by a water content approaching the optimum;

- the values of permeability coefficient for soil treated with  $\text{NaCl}$  are contained in a narrow band;

- the values of permeability for the treated soil are greater than the ones of natural soil, reaching changes of a whole unity order.

These results are mostly caused by modifications of soil microstructure obtained from cationic exchange. As a matter of fact for soil treated with  $\text{NaCl}$  the microstructure is strongly oriented; thus the density of macropores is the lowest whereas the density of micropores reaches its maximum. In this condition the water flow occurs through the micropores whose number is almost constant by varying the moulding water content. So the permeability of this soil has a little variation with  $W$ .

Conversely for soil treated with  $\text{CaCl}_2$  repulsive forces are weak and so the microstructure of soil after compaction is random, the macropores are numerous and the structural units are stiff. Increasing the water content the macropores disappear and the structural units become soft. In this case the water flow for low water content occurs through the macropores and the micropores. While for high values of water content it occurs only through micropore.

In this way the great variation of permeability can be explained and the initial steepness of  $k$ - $W$  curve for soil treated with calcium chloride as well.

For the natural soil, where both cations are present, water flow occurs initially through macropores and micropores as for soil treated with  $\text{CaCl}_2$ . But for natural soil the initial density of micropore and macropore is smallest than the treated soil, for this reason the permeability reaches its minimum value.

The shear strength has been determined by means of drained triaxial compression tests with isotropic consolidation. Because of the independence of drained shear strength by moulding water content, in the diagram of fig. 3 the strength envelopes are reported without pointing the value of water content.

From the results shown in the fig. 3 it can be seen that in treated soil the strength is greater than in natural soil.

Moreover the stress-strain behaviour is determined by the cation present in the adsorbed water. In fact natural soil and the one treated with  $\text{NaCl}$  show a typical behaviour of normally consolidated soil. On the other hand soil treated with  $\text{CaCl}_2$  show a typical behaviour of slightly over consolidated soils (see figg. 4, 5 and 6).

These results can be explained by basing on the microstructure variation caused by cation exchange as reported above and shown in photos of figure 1 obtained by S.E.M. on the soil similar to the one here discussed.

It is evident, from all obtained results, that cation exchange causes modifications in permeability and shear strength of compacted clay.

In particular permeability increases substantially, thus the use of compacted clay for waterproofing the bottom of the discharge of solid urban wastes needs some caution.