

Sul trattamento elettrosmotico dei terreni argillosi

S. CHISARI*, G. CONTE*, R. CIGNA**

SOMMARIO: Vengono descritti i principi generali che governano il fenomeno elettrosmotico nei terreni coesivi, con particolare riguardo ai processi elettrochimici, alle caratteristiche cristallochimiche dei componenti minerali più adatti al trattamento e ai parametri più importanti per la valutazione del fenomeno. Successivamente vengono illustrati i risultati di esperienze effettuate in laboratorio e in campo in base ai quali è stato possibile elaborare un'espressione utile alla valutazione e alla previsione dell'entità dell'elettrodrenaggio provocato nei terreni limoso-argillosi, avendo noti i seguenti parametri fondamentali: tensione elettrica, caratteristiche geometriche del terreno da trattare e coefficiente di permeabilità elettrosmotica.

Tale espressione può avere una conveniente applicazione nella progettazione di un intervento di consolidazione. Infine sono riportati i risultati di prove svolte in presenza di additivi sugli stessi terreni.

1. Premessa

Una differenza di potenziale elettrico continua applicata tra due serie di elettrodi infissi in un terreno argilloso provoca, oltre al passaggio di corrente elettrica, la mobilitazione del liquido interstiziale verso gli elettrodi di segno negativo.

Utilizzando tubi catodici forati si può raccogliere ed in seguito asportare il liquido in arrivo e quindi drenare il terreno.

Il fenomeno della migrazione di liquido sotto l'azione di un campo elettrico è definito «elettrosmosi», e si presta come valido e rapido sistema di drenaggio e di consolidamento di terreni poco permeabili come i limi e le argille (elettrodrenaggio).

Il flusso di acqua può anche essere sfruttato per inviare nel terreno sostanze in grado di consolidarlo (elettroiniezione).

Quantunque il trattamento elettrosmotico dei terreni sia noto sin dagli anni '30 (L. Casagrande), è lecito affermare che attualmente sussiste ancora un ampio margine di approfondimento di indagine sui meccanismi che regolano il processo ed i suoi limiti di applicazione.

2. I sistemi elettrochimici

Poiché il trattamento di consolidamento per via elettrosmotica richiede l'invio di corrente nel terreno attraverso elettrodi in esso infissi, si ritiene opportuno riportare alcuni cenni sui processi elettrochimici che interessano il fenomeno ed in particolare sull'elettrolisi.

I sistemi elettrochimici, in senso generale, sono caratterizzati dalla disposizione in serie di conduttori

di prima specie (elettrodi) e di conduttori di seconda specie (elettroliti).

Tra i conduttori di prima specie rientrano i metalli e le sostanze a conducibilità metallica (es. grafite), tutti caratterizzati dalla natura dei portatori di carica (elettroni), dalla loro concentrazione e dalla mobilità.

Tra i conduttori di seconda specie rientrano le soluzioni elettrolitiche ed i solidi a conducibilità ionica; nel caso dei terreni umidi le cariche elettriche che trasportano la corrente sono gli ioni.

Il passaggio di corrente in un sistema elettrochimico comporta, agli elettrodi, delle trasformazioni chimiche causate da una cessione o da un'acquisizione di elettroni da parte degli ioni dell'elettrolita, oppure da una cessione o acquisizione di elettroni da parte di specie neutre.

L'elettrodo dove si verificano i processi di ossidazione (anodo), quando il sistema riceve energia (celle di elettrolisi) è il polo positivo, quando invece produce energia (pila) è il polo negativo. Sull'elettrodo di segno opposto (catodo) avvengono le reazioni di riduzione.

È importante osservare che gli ioni che consentono il passaggio di corrente attraverso l'elettrolita possono non essere gli stessi che danno luogo alle reazioni agli elettrodi.

Per provocare il passaggio di corrente in un sistema occorre applicare agli elettrodi la tensione necessaria a vincere sia la f.e.m. che compete alle due reazioni elettrochimiche che le cadute ohmiche dell'elettrolita e nel circuito di prima specie; inoltre un ulteriore contributo di tensione, talora considerevole, è richiesto dai fenomeni di polarizzazione che si manifestano in corrispondenza dell'interfaccia elettrodi-soluzione.

È opportuno distinguere i fenomeni di polarizzazione chimica dai fenomeni di polarizzazione di concentrazione.

La polarizzazione chimica comporta una modificazione della natura chimica degli elettrodi, come la

* Geosud, Roma

** Dip. ICMMPM, Univ. La Sapienza, Roma.

formazione di uno strato di ossido o la deposizione di un film metallico di natura diversa.

La polarizzazione di concentrazione riguarda invece le modificazioni che la corrente induce nell'elettrolita; lo spostamento degli ioni compensa solo parzialmente i processi di scarica (cessione ed acquisizione di elettroni) che avvengono agli elettrodi e ciò è causa di sensibili variazioni di concentrazione in prossimità degli elettrodi.

La capacità di un elettrolita (sia esso una soluzione o un terreno) di trasportare corrente è data dalla sua conducibilità χ ricavabile dalla legge di Ohm:

$$\chi = 1/\rho = d/S \cdot 1/R \quad (\text{ohm}^{-1} \text{ cm}^{-1})$$

Dove:

d = distanza interelettrodica eteropolare

S = sezione di passaggio della corrente

ρ = resistività

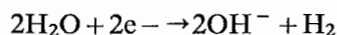
R = resistenza.

Tale grandezza viene generalmente determinata con appositi strumenti (conduttimetri) alimentando il circuito con corrente alternata onde evitare il fenomeno della polarizzazione degli elettrodi. Nei terreni generalmente si usa esprimere la capacità di trasportare la corrente tramite la resistività ρ (inverso della conducibilità) che si esprime in $\text{ohm} \cdot \text{cm}$ oppure in $\text{ohm} \cdot \text{m}$.

3. Il sistema elettrochimico elettrodo/terreno

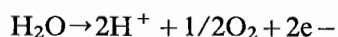
Nel trattamento elettrochimico dei terreni argillosi si ha la riduzione al catodo dello ione idrogeno con formazione di idrogeno gassoso, mentre all'anodo si ha la reazione di ossidazione:

a) l'acqua espulsa al catodo contiene quantità variabili di sostanze in soluzione, che sono così sottratte al terreno naturale. In particolare la reazione di forte alcalinizzazione che si ha in vicinanza dell'elettrodo a seguito della reazione catodica:

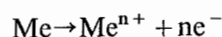


comporta necessariamente il richiamo di ioni positivi, per lo più sodio e potassio, e la conseguente formazione di soda e potassa. Di conseguenza il liquido estratto al catodo presenta pH molto elevati; misure effettuate durante il trattamento di differenti tipi di terreno argilloso hanno dato valori compresi fra 12 e 14;

b) contemporaneamente all'anodo dove ha luogo prevalentemente la reazione:



oltre alla reazione di ossidazione dell'elettrodo metallico



si ha un'acidificazione locale del terreno, cui fa seguito il richiamo di anioni che formano composti quali HCl e H_2SO_4 ;

c) l'instaurarsi di zone aventi valori di pH diversi da quelli di partenza determina squilibri chimico-mineralogici del terreno.

Dei tre contributi di tensione richiesti per ottenere un determinato passaggio di corrente nel terreno, quello dovuto alla f.e.m. propria delle reazioni con gli elettrodi di ferro può essere valutato intorno a 1.3 volt massimo, mentre il secondo, legato ai fenomeni di polarizzazione, può essere considerato quasi trascurabile grazie alla non elevata densità di corrente sugli elettrodi; è quindi il terzo contributo, dovuto alle cadute ohmiche, il più rilevante.

Da prove di laboratorio effettuate su campioni di argilla caolinica sottoposta a trattamento elettrosmotico, si è osservato che la maggior parte del terreno presenta variazioni trascurabili di resistività rispetto alla diminuzione del contenuto di acqua. In altre parole l'ordine di grandezza della variazione di umidità globale che si ottiene durante un normale trattamento è tale da avere solo un trascurabile riscontro sulle caratteristiche elettriche del mezzo. Fanno eccezione le porzioni di terreno adiacenti agli elettrodi.

Le variazioni di resistività possono attribuirsi a diversi fattori, dei quali i più significativi sono: aumento di temperatura, essiccamento e trasformazioni chimico-fisiche nel terreno adiacente agli elettrodi.

Così come in laboratorio anche nei campi elettrosmotici sperimentali il progressivo aumento di temperatura dei tubi elettrodici, dovuto all'addensamento delle linee di corrente ed al conseguente effetto Joule, ha contribuito a provocare sensibili cambiamenti chimico-fisici e mineralogici nelle porzioni di terreno ad esso circostanti.

I campioni prelevati a fine trattamento hanno mostrato chiaramente gli effetti di tale fenomeno: a partire dalla superficie del tubo elettrodico, fino a circa 15 cm di distanza, si è verificato un graduale indurimento del terreno in senso radiale con conseguente formazione di crostoni a struttura concentrica.

È da osservare, inoltre, che a seguito di variazioni sensibili di resistività che si possono avere nelle vicinanze degli elettrodi, la distribuzione delle cadute ohmiche diviene nel tempo molto irregolare, e pertanto il gradiente di potenziale nel terreno non può più considerarsi uniforme. Questo fatto, come si vedrà di seguito, comporta conseguenze rilevanti per i trattamenti elettrosmotici nei terreni argillosi. In figura 1a sono mostrati i profili potenziometrici relativi a fasi successive di una prova effettuata me-

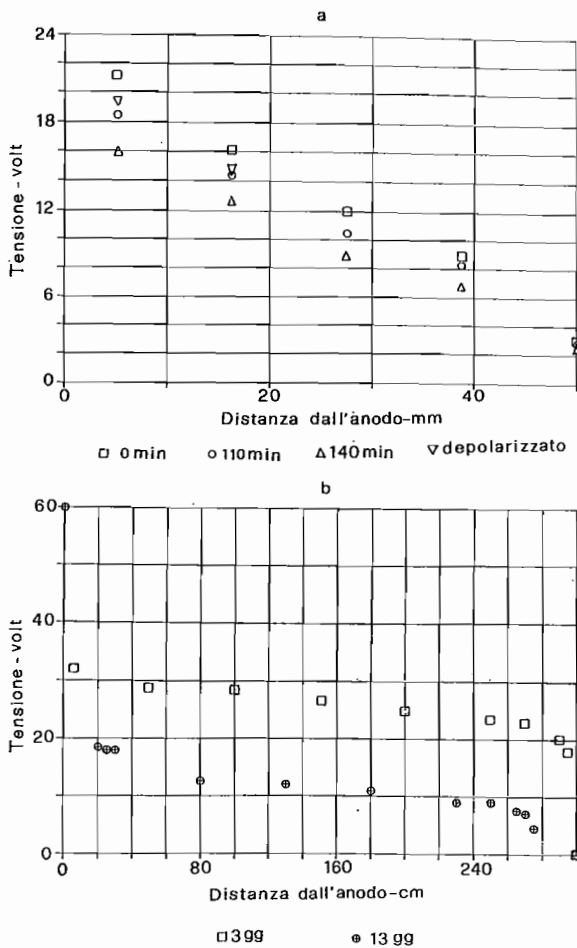


Fig. 1. — Misure di potenziale elettrico effettuate durante i trattamenti elettroosmotici. a) Prove di laboratorio d.d.p. = 24 V; b) prove in campo d.d.p. = 60 V.

dante un dispositivo simile ad un elettroedometro con elettrodi piano-paralleli. In figura 1b viene riportato lo stesso tipo di misurazione, effettuato però in campo e con elettrodi di forma cilindrica (tubi in ferro).

Il fenomeno elettroosmotico si verifica in quei terreni caratterizzati da una significativa componente argillosa; per spiegare come avviene è necessario accennare alla struttura cristallina dei minerali argillosi e alle loro caratteristiche chimico-fisiche.

I minerali argillosi sono fillosilicati idrati con strutture basate su tetraedri (T) aventi al centro silicio e su ottaedri (O) aventi al centro alluminio e talvolta anche ferro o magnesio (fig. 2).

Una prima suddivisione dei minerali argillosi è basata sulla successione periodica dei vari pacchetti di strati; esistono minerali con pacchetti a due strati (T/O) (fig. 2), minerali con pacchetti a tre strati (T/O/T) (fig. 3) e minerali con pacchetti a tre strati più uno (fig. 4). Le distanze fra i pacchetti possono essere sia fisse che variabili, secondo la natura del terreno.

Di seguito viene riportata una breve descrizione di due gruppi di minerali argillosi molto diffusi aventi

caratteristiche e comportamento meccanico differenti.

Le smectiti sono un gruppo di minerali argillosi a tre strati T/O/T. Le sostituzioni isomorfe degli atomi di alluminio e silicio negli ottaedri e nei tetraedri sono relativamente frequenti e causano un eccesso di carica negativa sulla superficie dei pacchetti di strati. Tale carica tende ad essere compensata dalla presenza di molecole d'acqua e di cationi fra i pacchetti di strati.

Si tratta di specie ioniche scambiabili tra le più co-

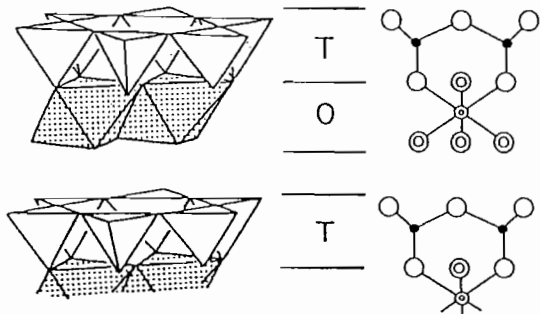


Fig. 2. - Fillosilicati a due strati (1:1) il pacchetto è costituito dalla sovrapposizione di due strati, un ottaedrico O e l'altro tetraedrico T (modificato da Kostov, 1968 - estratto da ALIETTI, 1969).

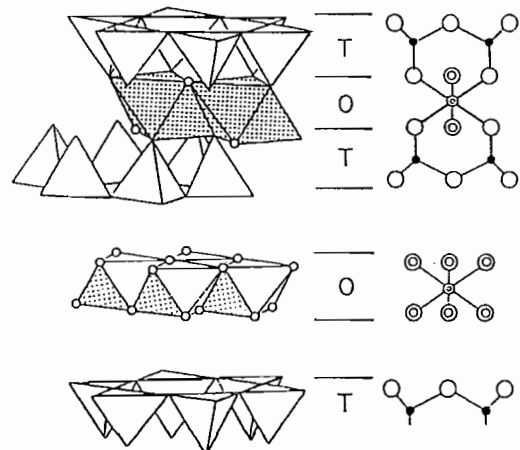


Fig. 3. - Fillosilicati a tre strati (2:1) il pacchetto è costituito da uno strato ottaedrico O compreso fra due strati tetraedrici T (modificato da Kostov, 1968 - estratto da ALIETTI, 1979).

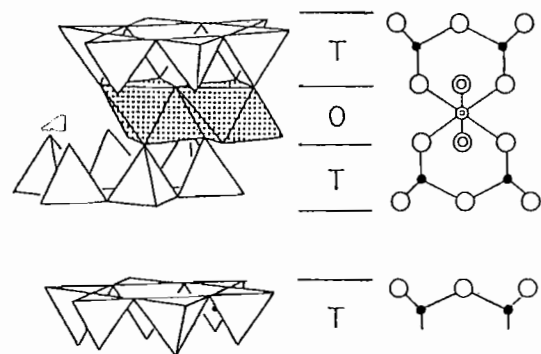


Fig. 4. - Fillosilicati a tre strati più uno (2:1:1). Pacchetto a tre strati con la sovrapposizione di uno strato ottaedrico O (modificato da Kostov, 1968 - estratto da ALIETTI, 1979).

muni delle quali ricordiamo Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , H^+ , NH_4^+ .

L'energia di coesione tra i pacchetti degli strati non è sufficiente a contrastare l'energia di idratazione dei cationi e delle molecole di acqua, da ciò deriva la tendenza al rigonfiamento dei minerali smectitici.

Occorre precisare che i cationi monovalenti (come Na^+ , K^+ , H_3O^+), stabilendo un legame più debole tra i pacchetti rispetto ai bivalenti (Ca^{2+} e Mg^{2+}) permettono l'adsorbimento di maggiori quantità di acqua.

La caolinite ed altri minerali del gruppo (dickite, nacrite, hallosyte) hanno una struttura rigida formata dalla successione di pacchetti a due strati (T/O).

I vari pacchetti si sovrappongono gli uni sugli altri nella direzione dell'asse cristallino e sono tenuti insieme dai legami idrogeno presenti fra gli ossidrili di uno strato ottaedrico e gli atomi di ossigeno dello strato tetraedico adiacente. All'energia di coesione tra i pacchetti contribuiscono le forze di Van der Waals. Pertanto le argille caoliniche non rigonfiano in acqua dato che le molecole d'acqua non possono penetrare tra i pacchetti.

Il fenomeno elettroosmotico avviene grazie alla presenza fra i pacchetti di strati di ioni idratati facilmente scambiabili. La superficie dei pacchetti di strati (TOT) forma con le molecole d'acqua e gli ioni adsorbiti il doppio strato elettrochimico.

4. Il doppio strato elettrochimico

Quando sue sostanze omogenee, o fasi, di composizione diversa, vengono poste in mutuo contatto, di regola si instaura fra esse una differenza di potenziale conseguente alla diversa distribuzione delle cariche nelle due sostanze dovuta alla differente affinità elettronica (tendenza ad acquistare elettroni).

Nel caso delle argille si ha una fase solida, il cristallo, ed una liquida, le molecole d'acqua legate o meno agli ioni.

La tendenza al raggiungimento dell'equilibrio fra le forze chimiche di legame e quelle del campo elettrostatico provoca una redistribuzione degli elettroni fra le fasi in contatto. Si ha in tal modo la formazione di un doppio strato elettrochimico o elettrico.

Il modello semplificato della struttura del doppio strato di un sistema elettrolita-conduttore elettronico (Fig. 5) prevede dalla parte dell'elettrolita uno strato diffuso influenzato dall'agitazione termica degli ioni e dalla pressione osmotica. Quest'ultima si contrappone alla forza elettrostatica fino allo stabilirsi dell'equilibrio per un certo gradiente di concentrazione nell'elettrolita.

Nelle argille l'elettrolita è il liquido interstiziale pre-

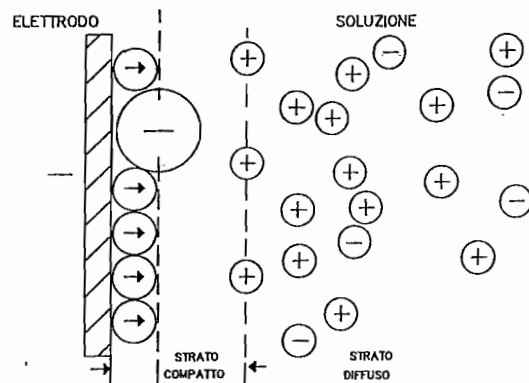


Fig. 5. - Modello schematico del doppio strato elettrico (estratto da BIANCHI).

sente fra i pacchetti di strati e le molecole d'acqua (con dipolo orientato nel campo elettrostatico) presenti fra gli strati di un pacchetto, mentre il «conduttore elettronico» è costituito dai cristalli dei minerali.

Il doppio strato può essere suddiviso come illustrato nella figura 6 a partire dalla superficie della fase solida (o dalla superficie dei cristalli dei minerali argillosi) nelle zone seguenti:

1) *Zona interna* - è compresa tra la superficie adsorbente ed una superficie denominata «piano interno di Helmholtz» il cui spessore è rappresentato dal raggio ionico degli ioni specificamente adsorbiti (dissolvati) e dalle dimensioni delle molecole di solvente adsorbite.

2) *Zona intermedia* - è compresa tra il piano in-

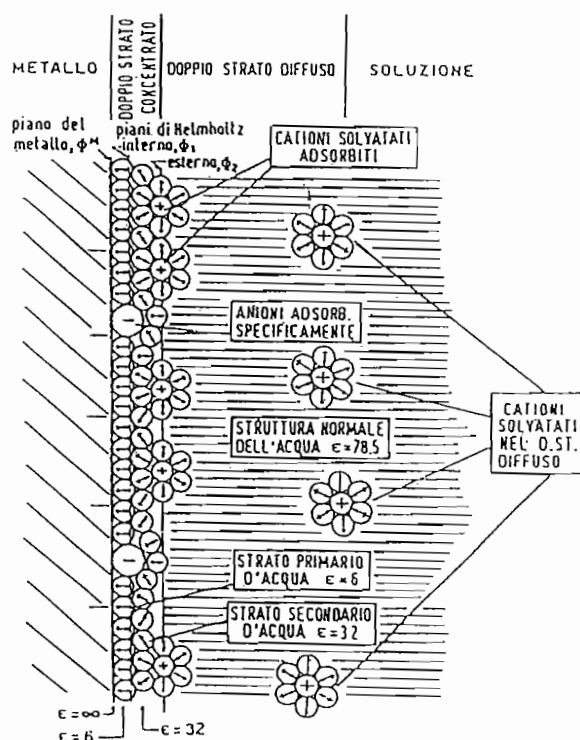


Fig. 6. - Modello del doppio strato elettrico all'interfase elettrodo-elettrolita. Adattato da BOCKRIS, DEVENATHAN e MULLER (1963).

terno ed il piano esterno di Helmholtz il cui spessore è determinato dalle dimensioni degli ioni solvatati. La Zona Intermedia e la Zona Interna assieme formano lo «strato concentrato» o «strato compatto».

3) *Zona esterna* - o Strato Diffuso, è caratterizzata dalla presenza di una carica prevalente (per la quale dunque non sussiste la condizione di elettro-neutralità) dovuta ad uno sbilanciamento fra le cariche anioniche e le cariche cationiche.

In figura 7 sono rappresentati due esempi dell'andamento del potenziale all'interno del doppio strato elettrochimico; in particolare è indicata la differenza di potenziale fra la massa dell'elettrolita ed il primo piano di Helmholtz, è denominata «potenziale elettrocinetico» o «potenziale zeta» (designata con il simbolo ζ), che riveste un notevole interesse pratico in relazione ai fenomeni elettrocinetici. Il potenziale zeta può avere un valore positivo nullo o negativo a seconda della concentrazione dell'elettrolita e della carica libera portata dalla fase solida. Un'equazione semplificata, nell'ipotesi che la carica sulla fase solida resti costante, esprime la dipendenza del potenziale zeta dalla concentrazione molare M nella massa della soluzione.

L'equazione è:

$$\zeta = \text{Cost}(+/-) RT/[zF \ln(M)]$$

dove il segno è positivo se ζ è negativo e viceversa, R è la costante dei-gas, T è la temperatura assoluta, z è la carica ionica ed F il numero di Faraday (96500 Coulomb).

Il potenziale zeta è tanto più piccolo in valore assoluto quanto più elevata è la concentrazione.

5. Il fenomeno elettroosmotico

Si è detto che nell'interfase tra una parete solida ed una soluzione elettrolitica esiste sempre un doppio strato elettrico. Nello strato diffuso di ioni della soluzione, parte delle particelle cariche si dispongono nello strato di molecole di liquido aderenti al solido (uno o due strati molecolari a viscosità infinita) e parte nella massa della soluzione, a viscosità normale.

Sotto l'azione di un campo elettrico parallelo alla superficie di separazione delle fasi, le cariche libere si muovono verso l'elettrodo di segno opposto trascinando per effetto essenzialmente viscoso il liquido. L'elettroosmosi può avvenire in un setto poroso come in tubo pieno di liquido; se i pori del setto o il diametro del tubo sono sufficientemente piccoli (capillari), lo spostamento di liquido diventa sensibile. In un tubo di grande sezione l'elettroosmosi non av-

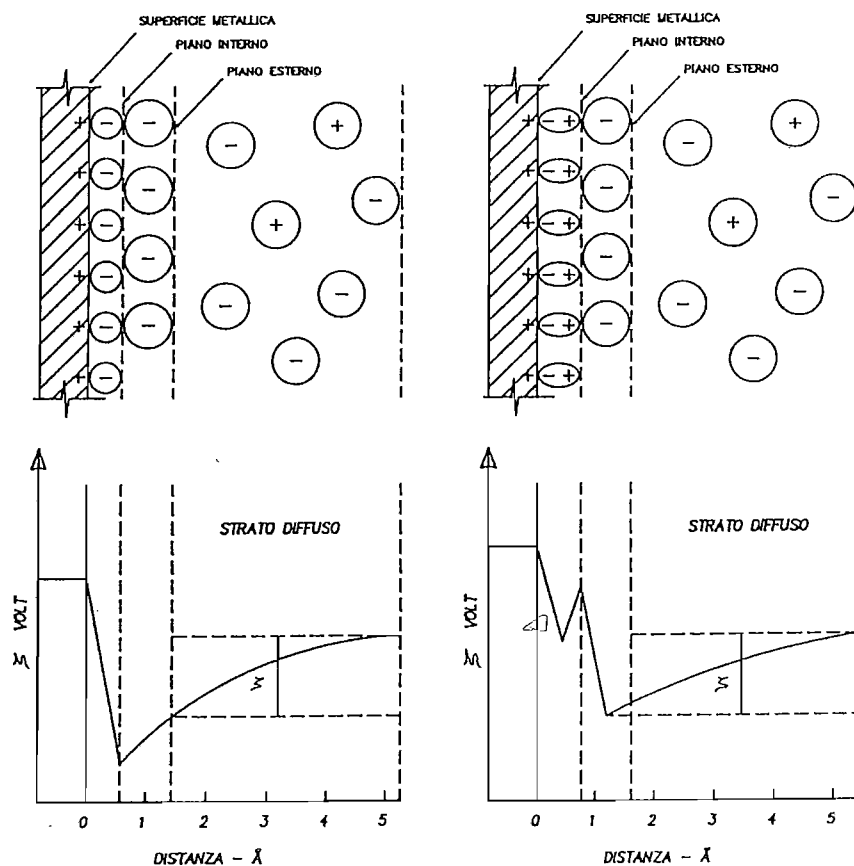


Fig. 7. - Esempi di andamento del potenziale interno del doppio strato elettrico a seconda dell'orientamento dei dipoli e del segno della carica degli ioni specificatamente adsorbiti (scala indicativa - estratto da BIANCHI).

viene in quanto lo spessore dello strato diffuso è trascurabile e non si ha più l'effetto viscoso di trascinamento. In condizioni stazionarie il liquido si muove a velocità costante in direzione parallela all'interfase.

La portata di efflusso attraverso un capillare è data dall'espressione di Helmholtz-Smoluchowski:

$$q^0 = (\zeta \epsilon r^2 / 4 \eta \pi) \cdot (V/d)$$

dove V è la tensione erogata, d è la lunghezza del capillare, ϵ è la costante dielettrica dell'interfase, ζ il potenziale elettrocinetico, η la viscosità della soluzione, r è il raggio del capillare.

Se il sistema è costituito in modo tale che il movimento del liquido possa creare un dislivello alle estremità del setto poroso o del tubo, la velocità di scorrimento del liquido si annulla quando la pressione idrostatica equilibra la pressione elettroosmotica prodotta dal campo elettrico e quindi la somma della filtrazione idraulica ed elettroosmotica è pari a zero.

Quando invece un liquido scorre attraverso un setto poroso o un tubo di piccolo diametro, si stabilisce una ddp misurabile tra le masse liquide sulla superficie di separazione (potenziale di scorrimento). Questo fenomeno è il reciproco del precedente.

La relazione fra pressione elettroosmotica e potenziale elettrocinetico si può calcolare come segue: si abbiano due vasi comunicanti tramite un tubo orizzontale sottile di raggio interno r e lunghezza d ; la velocità di efflusso è:

$$v = (\zeta \epsilon / 4 \eta \pi) \cdot (V/d)$$

D'altra parte la pressione elettroosmotica P , che corrisponde al dislivello formatosi tra i due vasi, sollecita il liquido in direzione contraria a v con una velocità v' il cui valore medio è stabilito dalla formula di Poiseuille:

$$v' = P r^2 / 8 \eta d$$

All'equilibrio, essendo $(v-v')=0$, si ricava:

$$P = 2 \zeta \epsilon V / r^2$$

Pertanto la pressione elettroosmotica risulta direttamente proporzionale oltre che alla ddp anche al potenziale elettrocinetico, ed è inversamente proporzionale al quadrato del raggio del capillare.

Questa relazione, presupponendo noto il valore di d , consente la determinazione del potenziale elettrocinetico da una misura della ddp e del dislivello.

6. L'elettroosmosi nei terreni

Come già accennato in precedenza i minerali argillosi (in particolare le smectiti) presentano nelle zone periferiche del reticolo cristallino un eccesso di

carica negativa compensata da cariche positive (cationi) che sono in parte adsorbite sulla loro superficie ed in parte presenti nello strato diffuso del liquido interstiziale; ne consegue che nel sistema elettrochimico elettrodo/terreno la maggioranza degli ioni interessati dal trasporto elettrocinetico ha carica positiva e quindi il trasporto dei cationi e delle molecole di acqua ad essi legate avviene verso l'elettrodo a polarità negativa (catodo).

Considerando l'insieme dei pori come un fascio di capillari la cui sezione di passaggio globale è rappresentata dalla porosità n , la portata di liquido Q attraverso una sezione circolare di terreno S e raggio di ciascun capillare r è data da:

$$Q = n q^0 = n \zeta \epsilon r^2 / 4 \eta \pi \cdot (V/d)$$

in cui sostituendo

$$n r^2 = S / \pi$$

si ha:

$$Q = (s \zeta \epsilon / 4 \eta \pi) \cdot (v/d) = K_e S \cdot (V/d) \quad (1)$$

da cui

$$q = K_e S t V/d$$

dove q è la quantità di liquido drenato nel tempo T e K_e è il coefficiente di permeabilità elettroosmotica.

Quest'ultimo è una proprietà caratteristica dei terreni ed indica la velocità del flusso idraulico nel terreno stesso per un gradiente di potenziale elettrico unitario. Sperimentalmente si è visto che nei terreni argillosi K_e varia fra $1E-5$ e $10E-5$ $\text{cm}^2/\text{sec} \cdot \text{volt}$ (MITCHELL).

Occorre osservare che il gradiente di potenziale V/d , considerato comunemente costante nella valutazione o nella progettazione dei trattamenti elettroosmotici, è invece grandemente influenzato dall'andamento nel tempo dei fenomeni elettrochimici in prossimità degli elettrodi (di cui si è già parlato in precedenza) e dal ritiro del terreno presso l'anodo conseguente l'essiccamento; tali fenomeni provocano una variazione dell'andamento del gradiente di potenziale nel campo elettrico durante il trattamento tanto da indurre a considerare, ai fini dell'interpretazione corretta del fenomeno, una tensione «efficace» (V_{eff}) da inserire nelle equazioni relative al calcolo teorico del flusso elettroosmotico nel terreno. Questa V_{eff} non è altro che la tensione in grado di provocare nella massa del terreno argilloso il movimento degli ioni ed è solitamente di valore molto inferiore alla tensione applicata tra le coppie di elettrodi.

L'espressione (1) è valida in questa formulazione in condizioni stazionarie. Ai fini della valutazione

del trattamento conviene considerare l'entità del drenaggio rispetto all'unità di volume di terreno da drenare (nel caso di figura 8 è il volume compreso fra le due armature metalliche piano parallele eteropolari):

- fissato un certo intervallo di tempo di trattamento, e variando la sezione di passaggio della corrente S (fig. 8) si ha una variazione proporzionale di q' e quindi di liquido drenato, tuttavia la quantità di acqua drenata per unità di volume rimane la stessa;

- la quantità di acqua drenata per unità di volume di terreno è inversamente proporzionale al quadrato della distanza tra gli elettrodi eteropolari come mostrato di seguito:

$$\text{Liquido drenato per unità di volume di terreno} = \frac{q}{S d} = \frac{V_{\text{eff}} K_e t}{d^2}$$

Quindi, noti la durata del trattamento e il coefficiente K_e , l'entità del drenaggio dipende dal rapporto V_{eff}/d^2 in regime stazionario.

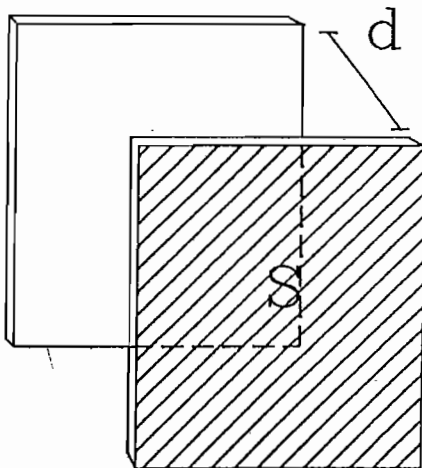


Fig. 8. - Elettrodi a piastre piane parallele. S = Superficie di passaggio della corrente; d = distanza interelettrodica eteropolare.

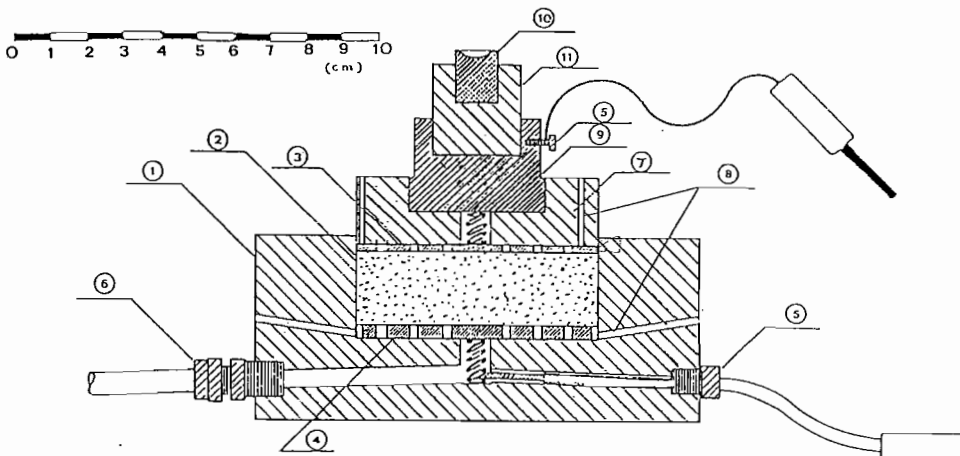


Fig. 9. - Elettroedometro utilizzato in laboratorio. 1) scatola edometrica in perspex; 2) campione di terreno; 3) piastra anodica; 4) piastra catodica; 5) collegamento elettrico (c.c.); 6) scarico liquidi catodici; 7) piastra di carico in perspex; 8) canali di sfogo dei gas elettrolitici; 9) blocco metallico in ottone; 10) punto di carico in acciaio; 11) blocchetto in perspex.

7. Esperienze in campo ed in laboratorio

Nel corso della ricerca condotta sul trattamento elettroosmotico dei terreni argillosi sono stati sottoposti ad una serie di prove di laboratorio campioni di terreno limoso-argilloso di origine lacustre su cui in seguito sono state effettuate delle prove sperimentali in sito.

I trattamenti elettroosmotici di laboratorio sono stati eseguiti mediante elettroedometro (fig. 9) in regime non stazionario, dove cioè il liquido asportato al catodo non veniva rimpiazzato all'anodo e quindi l'umidità del terreno era in costante diminuzione durante il trattamento. Inoltre la corrente, e quindi la differenza di potenziale efficace, è stata mantenuta costante nel tempo.

In tali condizioni è avvenuta una progressiva diminuzione di portata del liquido estratto al catodo, fino all'interruzione del drenaggio. Alcune delle curve cedimenti/tempo così ottenute sono riportate in figura 11.

Sulla base dei risultati sperimentali si è studiata un'espressione adatta a rappresentare la portata nel tempo in qualsiasi tipo di dispositivo e per i trattamenti elettroosmotici la cui geometria fosse assimilabile al modello delle armature piano-parallele (fig. 8).

A ciascuna curva del diagramma di figura 10 corrisponde una curva portata/tempo la cui equazione è del tipo:

$$Q = \frac{V_{\text{eff}}}{K_c K_e} a^{-1} \quad (2)$$

dove « a » è un coefficiente che dipende dalla differenza di potenziale applicata e dalle caratteristiche geometriche di cella o più precisamente dal rapporto V_{eff}/d^2 , e $K_c = d/S = V/I \cdot \rho$ è la cosiddetta «costante di cella».

È stata quindi studiata la relazione che lega il coefficiente « a » al rapporto V_{eff}/d^2 ed una funzione

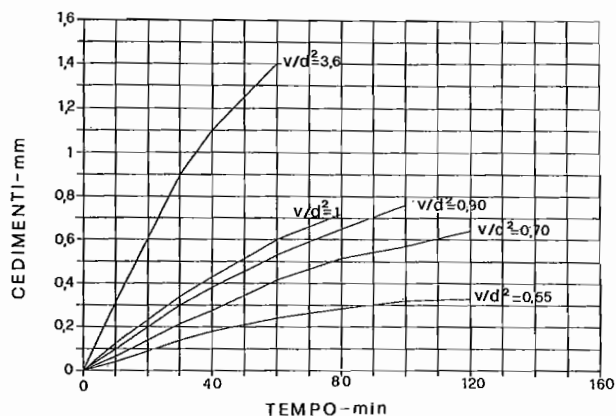


Fig. 10. - Diagramma cedimenti - tempo relativo a differenti prove di laboratorio effettuate con elettrodoometro.

adatta a rappresentare la curva del diagramma $a - V_{eff}/d^2$ (fig. 11) risulta essere del tipo:

$$a = bx^c + 1$$

dove i valori delle costanti b e c si ottengono sperimentalmente a seguito di prove di laboratorio sul terreno in studio e sono caratteristici di quest'ultimo.

Ad esempio nel caso del terreno considerato è risultato:

$$a = 1.1 \cdot (V_{eff}/d^2)^{0.93} + 1 \quad (3)$$

sostituendo la (3) nella (2) si ottiene:

$$Q = Ke \cdot [1.1 \cdot (V_{eff}/d^2)^{0.93} + 1]^{-t} \cdot V_{eff}/Kc$$

che approssimata diventa:

$$Q = Ke \cdot (V_{eff}/d^2 + 1)^{-t} \cdot V_{eff}/Kc \quad (4)$$

dove il tempo (t) è espresso in ore. È evidente che all'istante iniziale $t = 0$ e per $V_{eff} = 0$ le espressioni (2) e (3) coincidono con la (1).

L'espressione di maggiore interesse per la progettazione di un trattamento e.o., in regime variabile è

$$dq = Q dt$$

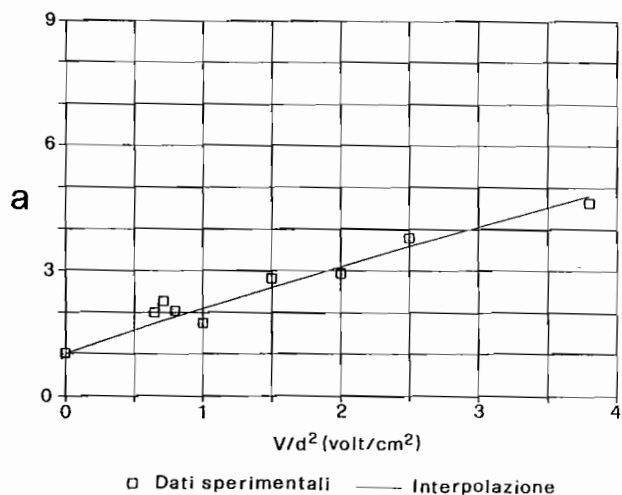


Fig. 11. - Prove di laboratorio, dati sperimentali. Andamento del coefficiente «a» rispetto al rapporto V/d in uno dei terreni analizzati.

da cui

$$q = \int Q dt$$

e dalla (4) si ottiene

$$q = Q \cdot dt = 3.6 \cdot Ke \cdot V_{eff}/Kc \cdot \int_{t_1}^{t_2} (V_{eff}/d^2 + 1)^{-t} dt \quad (5)$$

in cui q risulta espresso in litri, essendo 3.6 un coefficiente di conversione da ore in secondi e da cc in litri.

Sostituendo la (3) nella (5) si ha l'espressione in forma implicita:

$$q = 3.6 V_{eff} Ke/Kc \int_{t_1}^{t_2} a^{-t} dt$$

quindi

$$q = 3.6 V_{eff} Ke/Kc [(a^{-t_1} - a^{-t_2})/1n a] \quad (6)$$

La (6) è l'equazione della curva ottenuta partendo da dati sperimentali di laboratorio e rappresenta il liquido drenato durante il trattamento. Nelle figure 12a e 12b sono riportati i confronti tra i dati speri-

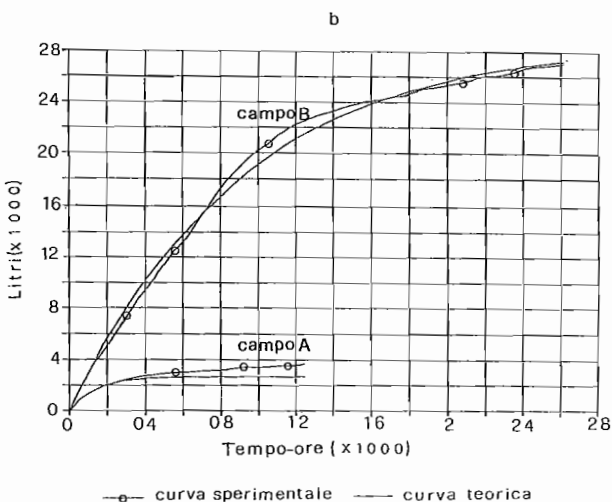
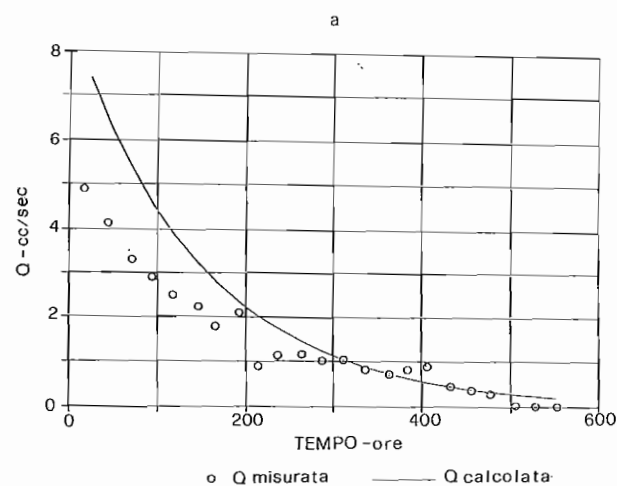


Fig. 12. - Confronto fra i dati sperimentali rilevati in campo e quelli ottenuti dall'espressione teorica. a) portata nel campo sperimentale A; b) Liquido drenato nei campi sperimentali A e B, caratterizzati da diversa geometria.

mentali di portata e di liquido drenato ottenuti in campo e quelli ricavati mediante l'espressione (6).

È evidente che in questa trattazione le curve previsionali portata-tempo sono state ottenute sulla base dei dati sperimentali di laboratorio. Va sottolineato che l'andamento della portata nel tempo è condizionato dai cambiamenti fisico-chimici che avvengono nel terreno durante il trattamento elettrosmotico e, più in generale, dalla variazione della permeabilità idraulica ed elettrosmotica del terreno.

8. Trattamenti elettrosmotici con additivazione

L'elettrosmosi nei terreni argillosi comporta la mobilitazione delle molecole d'acqua e dei cationi adsorbiti sulla superficie dei cristalli e tra i pacchetti di strati; per ottenere lo stesso effetto sarebbe necessario riscaldare la massa di terreno.

Si è già accennato alla possibilità di contribuire al miglioramento delle caratteristiche meccaniche del terreno utilizzando il fenomeno elettrosmotico come mezzo rapido di immissione di composti chimici reagenti e/o precipitanti. Quantunque in letteratura non manchino riferimenti a questo tipo di trattamento, raramente sono state proposte soluzioni teoriche e operative chiare o comunque attendibili. Si parla di sostituzione delle specie cationiche presenti tra i pacchetti di strati con altre di valenza maggiore (con conseguente effetto stabilizzante sul terreno), oppure di additivazione mediante sali a bassa carica ionica come quelli potassici (O'Bannon). Si è anche parlato di immissioni di sali cementanti amorfi o cristallini di neoformazione (Titkov).

Tuttavia le esperienze condotte sia in campo che in laboratorio portano ad affermare che gli ioni introdotti per effetto dell'ossidazione all'anodo (Fe^{++} , Al^{+++}) non riescono ad allontanarsi dall'elettrodo in modo significativo, mentre gli ioni Calcio e Magnesio introdotti direttamente nei tre tipi di terreno utilizzati per la sperimentazione (caolino commerciale, limo argilloso lacustre e limo argilloso di origine marina) non hanno la capacità di migrare con sufficiente velocità e di sostituire quindi gli ioni sodio e potassio così che vi sia un miglioramento nelle caratteristiche geotecniche dei terreni argillosi.

Nelle figure 13 e 14 sono riportati i risultati di analisi chimiche effettuate su campioni di terreno trattato elettrosmoticamente sia in campo che in laboratorio, e prelevati a differenti distanze dagli elettrodi. Le analisi chimiche effettuate su porzioni di terreno indurito prelevato in prossimità degli elettrodi e quelle relative al terreno non trattato sono riportate nella tabella di figura 14.

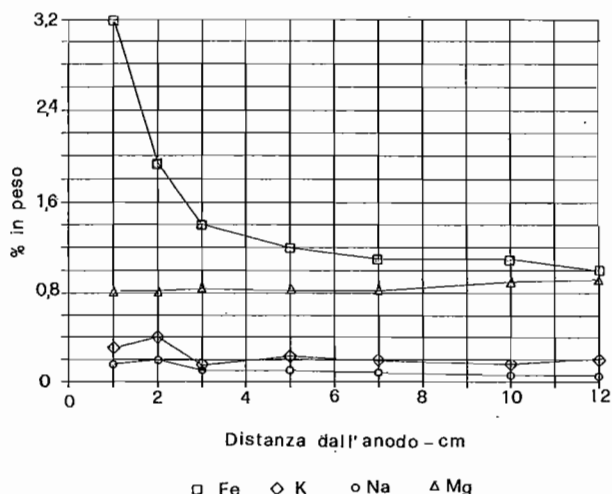


Fig. 13. - Trattamento elettrosmotico di laboratorio, anodo in ferro. Analisi chimica del terreno trattato; studio della diffusione degli ioni nel terreno. Analisi chimica del terreno non trattato (% in peso): Ferro 0.92; Potassio 0.38; Sodio 0.46; Magnesio 0.1; Calcio 14.

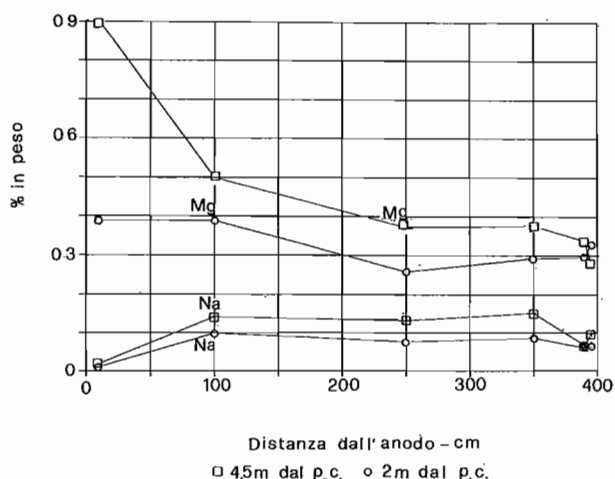


Fig. 14. - Trattamento effettuato in campo. Additivo utilizzato nel corso della prova: soluzione di cloruro di Magnesio. Analisi chimica del terreno non trattato (% peso): Magnesio 0.40%; Sodio 0,15%.

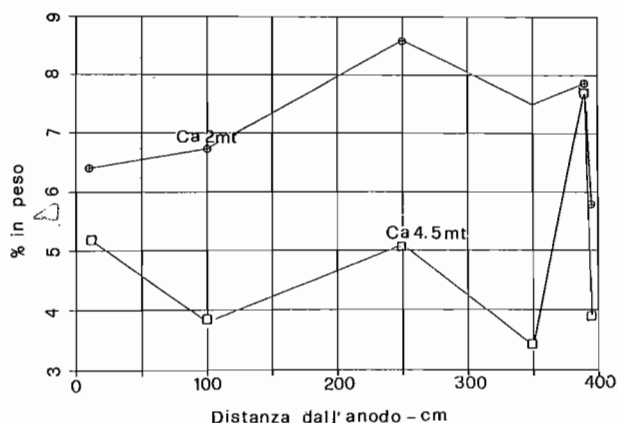


Fig. 15. - Trattamento elettro-osmotico effettuato in campo con immissione di nitrato di calcio. Percentuale in peso del calcio a 4.50 e 2.0 metri dal piano campagna.

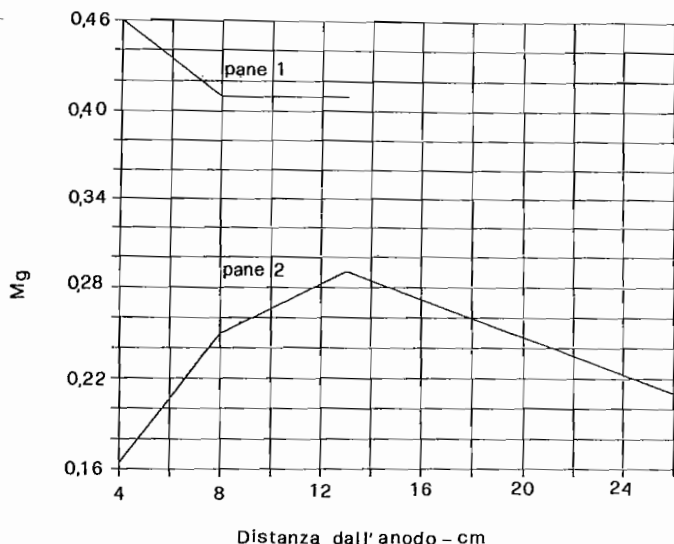


Fig. 16. - Trattamenti elettrosmotici di laboratorio. Analisi chimica del terreno trattato con Solfato di Magnesio in soluzione satura. Pane 1: distanza eteropolare 20 cm, volume 0.015 mc; Pane 2: distanza eteropolare 26 cm, volume 0.019 mc. Analisi chimica del terreno non trattato. Sodio 0.15%; Calcio 4%; Magnesio 0.35%.

9. Conclusioni

Il consolidamento dei terreni argillosi per via elettrosmotica, pur avendo avuto un discreto sviluppo, attualmente ha una diffusione piuttosto limitata.

Ciò è dovuto probabilmente al fatto che in passato non ci si è soffermati a valutare le ragioni per cui l'effetto pratico dell'applicazione di un campo elettrico nei terreni non corrispondeva a quanto previsto teoricamente.

Il presente lavoro, oltre a richiamare in modo sistematico i principi che sono alla base del consolidamento elettrosmotico, mette in rilievo il ruolo che giocano le modificazioni che avvengono nel terreno in prossimità degli elettrodi sull'andamento nel tempo del potenziale elettrico e del flusso idraulico.

Non vi è dubbio che questa maggiore conoscenza dei meccanismi che regolano il fenomeno dell'elettrosmosi, unitamente ai progressi nel settore della perforazione, conducono ad una considerazione critica di tale metodologia, in vista di applicazioni laddove un equilibrato calcolo dei costi-benefici lo consenta.

Alcuni risultati ottenuti in laboratorio ed in campo, evidenziano che il trattamento elettrosmotico cosiddetto additivato, consistente nell'invio forzato di ioni che dovrebbero contribuire alla consolidazione dei terreni, possa essere sconsigliato, almeno in molti tipi di essi in quanto non adeguato agli scopi prefissi.

SIMBOLI ADOTTATI

χ = conducibilità

ρ = resistività
 q^o = portata attraverso un capillare
 ζ = potenziale elettrocinetico (potenziale zeta)
 ϵ = costante dielettrica
 V = tensione elettrica erogata
 V_{eff} = tensione elettrica efficace
 η = viscosità
 d = lunghezza del capillare - distanza eteropolare
 r = raggio del capillare
 v = velocità di efflusso
 P = pressione elettrosmotica
 Q = portata attraverso una sezione di terreno S
 Ke = coefficiente di permeabilità elettrosmotica
 t = tempo
 I = intensità di corrente
 q = quantità di liquido drenato in un intervallo di tempo
 S = sezione di passaggio della corrente

BIBLIOGRAFIA

- ALIETTI A., DELL'ANNA L., LOMBARDI G., MATTIAS P. (1979) - Struttura e composizione dei minerali argillosi. *Geologia Applicata e Idrogeologia*, Vol. XIV, parte 1, pp. 79-103.
- BIANCHI G., MUSSINI T. (1976) - *Elettrochimica*. Tamburini Masson Editori.
- BANERJEE S., VITAYASUPAKRON V. (1984) - *Appraisal of Electro-osmotic Oedometer Test*. A.S.C.E., Journal of Soil Mechanics and Foundation Division.
- CASAGRANDE L. (1939) - *Die Elektrochemische Bodenverfestigung*. *Bautechnik* 17, 16, 228-230.
- ESRIG M.I. (1968) - *Pore Pressures, consolidation and electrokinetics*. J. of Soil Mech. and Found. Div. A.S.C.E., vol. 94 N.SM4 - pp. 899-921.
- GRAY D.H., MITCHELL J.K. (1967) - *Fundamental Aspects of Electro-osmosis in Soils*. J. of Soil Mech. & Found. Div. pp. 209-236.
- MITCHELL J. (1976) - *Fundamental of Soil Behavior*. Electrokinetic Phenomena 353-370, (Wiley J. & Sons, Inc.) University of California Berkeley.
- O'BANNON C.E., GENE R.M., MANCINI F.P. (1976) - *Electrochemical Hardening of Expansive Clays*. Trans. Res. Board. Res. Rec. n. 593, pp. 46-50, Arizona Dept. of Transportation.
- TITKOV N.I., KORZHUEV A.S., SMOLYANINOV V.G., NIKISHIN V.A., NERETINA A.Y. (1959) - *Electrochemical induration of Weak Rocks*. Consultants Bureau of New York (authorized translation from Russian).
- WAN T.Y., MITCHELL J.K. (1976) - *Electro-osmotic Consolidation of Soil*. A.S.C.E., Journal of Soil Mechanics and Foundation Division - vol. 102, n. -GT5, pp. 473-491.

SUMMARY

Electro-osmosis in clays

Applying an electric potential across a wet clay between two electrodes there will be a water flow towards the negative electrodes; this process is called «electro-osmosis». The soil/electrode system is an electrochemical one and is characterized by conductors of the first class (metallic electrodes) and conductors of the second class (electrolytes) in series. To provoke a current flow in the soil, an electric potential is necessary to overcome: the electromotive force due to electrode reactions (max 1.3 volts), the resistance drop (of considerable value) and the chemical and concentration polarization (almost negligible because of low current density on electrodes).

Both field and laboratory tests showed that the soil resistivity variations are remarkable during electro-osmosis; they occur especially near the electrodes owing to different factors the most important being: temperature increase, soil drying and chemical-physical transformations.

During electro-osmosis the resistance drop distribution becomes very irregular in the soil because of the resistivity variations, and therefore the electric potential gradient cannot be considered uniform anymore; figures 1a and 1b show the potentiometric profile of laboratory and field tests.

The electro-osmosis occurs in clay because of the particular crystalline structure of clay minerals and their chemical-physical features (figs 2-4).

The electric field action forces free charges to move owing to the «electrochemical double layer» in clay minerals. free charges drag water in wet soil mainly because of viscous effect (electro-osmosis).

In the electrochemical system electrode/soils the most of the ions, which take part in the electrokinetic drag, have a positive charge, therefore the hydrated hydrogen ions, bonded with them, move towards the negative electrode.

The coefficient of electro-osmotic permeability (K_e) is a soil property that indicates the hydraulic flow rate under a unit electrical gradient.

During electro-osmosis tests it was possible to observe that the electrochemical phenomena near the electrodes influence the electric potential gradient in soil, usually considered constant in time. Therefore in order to obtain a good evaluation of electro-osmosis, it's necessary to consider an «effective e.m.f.» (V_{eff}) to be put in the equa-

tion for the theoretical calculation of electro-osmotic flow rate in soil:

$$q = K_e \cdot S \cdot t \cdot V_{eff} / d$$

where S is current flow section, t is the time and d is the distance between heteropolar electrodes.

On the basis of the experimental results an equation has been developed to represent the water flow rate in every system whose geometry could be considered as the model of plane-parallel electrodes (fig. 8).

Figure 10 shows the flow/time curve representing the theoretical equation, whereas the figures 12a and 12b shows field and laboratory experimental and theoretical data of flow rate and drained water.

It must be emphasized that physical-chemical variation in soils and, more generally, electro-osmotic and hydraulic permeability influence the flow rate during electro-osmosis.

Moreover laboratory and field tests have been conducted using electro-osmosis to add reactants to the soil or to precipitate chemical compounds.

In tested soils it was possible to observe that ions created by anode oxidation (Fe^{++} , Al^{+++}) do not go much far from the electrodes and that Calcium and Magnesium added to the soil ions move too slow. Figures 13 and 14 shows chemical analysis results of soil samples treated with chemical compound by electro-osmosis.