

**RECUPERO PARZIALE MEDIANTE ELETTROSMOSI DEI CEDIMENTI
DIFFERENZIALI DI COSTRUZIONI ADIBITE A CIVILI ABITAZIONI CON
STABILIZZAZIONE DEI LORO TERRENI DI FONDAZIONE CHE
PRESENTANO LA COMPONENTE ARGILLOSA ATTIVA.**

PASQUALE ARMILLOTTA

SOMMARIO

Applicando il processo elettrosmotico con basse tensioni in terreni coesivi con componente argillosa attiva, senza drenaggio catodico, in quattro campi sperimentali sono stati registrati:

- il recupero parziale dei cedimenti differenziali;
- variazioni dei valori di alcune caratteristiche dei terreni dopo il trattamento;
- la non ripresa delle variazioni stagionali di volume delle argille attive nei campi sperimentali.

1 INTRODUZIONE

Il processo elettrosmotico, scoperto e studiato fin dalla metà dell'800, consiste nell'ottenere la migrazione dell'acqua e dei sali sciolti in un mezzo poroso, attivandone il flusso con l'applicazione di un campo elettrico continuo.

Il processo elettrosmotico è stato applicato ai terreni coesivi e studiato sistematicamente per la prima volta da Casagrande nel 1939 (Veniale F., 1978).

Il passaggio di corrente nel terreno coesivo consiste essenzialmente nella migrazione di ioni presenti nel fluido di porosità. In particolare, i cationi coordinano le molecole d'acqua e migrano verso il catodo (Evangelista A., 1995).

La diffusione dei sali agisce prevalentemente sugli elettroliti dei fluidi nei pori e quindi sull'impalcatura delle particelle d'argilla, mentre l'elettrosmosi genera delle trasformazioni nell'interstrato dei minerali argillosi "aperti", bloccandone la reattività (Veniale F., 1978).

In natura, il processo avviene spontaneamente quando materiali coesivi di diversa natura ed umidità sono a contatto: si genera in tal caso una differenza di potenziale che tende a far migrare l'acqua dal materiale a potenziale più alto a quello con potenziale più basso.

In situ, l'uso finora fatto del processo elettrosmotico è stato finalizzato al consolidamento dei materiali coesivi (argille, limi argillosi e argille limose), quindi con diminuzione di volume, mediante drenaggio dell'acqua al pozzo catodico e modifica della struttura intima dei fillosilicati che, in casi estremi, arriva fino a quella granulare, con l'utilizzo di campi elettrici ad alta differenza di potenziale (200 – 300V), con valori di V/cm elevati, circa 1 V/cm. I risultati migliori sono stati ottenuti sui limi argillosi.

In laboratorio è stato osservato il comportamento dei terreni coesivi sottoposti a campo elettrico costante, sia con drenaggio, sia

con aggiunta d'acqua, che senza drenaggio; tutte prove, però, che permettevano l'eventuale diminuzione di volume del terreno, ma ne impedivano l'eventuale espansione.

2 SPERIMENTAZIONE ATTUATA

La novità sta nell'utilizzo del processo elettrosmotico in assenza di tubo catodico drenante, utilizzando l'acqua naturalmente presente nel terreno o artificialmente fornita.

La metodologia dell'intervento non è invasiva e permette la salvaguardia ed il rispetto degli ambienti presenti, soprattutto in ambito urbano. L'applicazione qui descritta è coperta da brevetto internazionale.

La sperimentazione prevedeva l'infissione nel terreno di elettrodi positivi ed elettrodi negativi, senza pozzi catodici drenanti, instaurando un campo elettrico continuo con bassi valori di V/cm, entro i terreni coesivi con componente argillosa attiva, presenti sotto il piano di fondazione di alcune piccole costruzioni adibite a civile abitazione.

Il fenomeno è stato applicato ed osservato in un primo cantiere circa tre anni fa' con risultati, positivi per i nostri scopi, ma inattesi. In quella sede (Caso A) non è stato possibile mettere in opera la batteria di analisi attuata per gli altri tre casi analizzati (Caso 1, Caso 2, Caso3).

Le condizioni a contorno prevedevano la presenza d'acqua nel terreno da sottoporre a trattamento, ovvero la sua fornitura in prossimità dei catodi; la non immissione di sali nel terreno; l'applicazione del processo non più ad un "sistema chiuso" come il laboratorio, ma ad un sistema aperto, con bassa differenza di potenziale; esclusione del drenaggio catodico; presenza della componente attiva delle argille.

Ci si aspettava, a seguito del processo elettrosmotico, l'aumento di volume del terreno,

e la variazione dei valori di alcune caratteristiche geotecniche.

Tutti e quattro i campi prova avevano in comune la variazione dell'apertura delle fessure nelle piccole palazzine in funzione della stagione: dopo periodi piovosi le fessure tendevano a chiudersi, dopo periodi asciutti ad aprirsi.

In tre dei quattro casi (Caso A, Caso 1 e Caso 3), la vicinanza con alberi d'alto fusto ha probabilmente influenzato il fenomeno.

La falda, monitorata nel "Caso A" prima, durante e dopo l'intervento, non ha avuto alcuna influenza sulla sperimentazione. Non è stato registrato alcun innalzamento della falda nei piezometri.

Sono stati messi in opera due serie di elettrodi; quelli negativi erano distanziati 1 – 1.5 metri l'uno dall'altro lungo una retta parallela al muro esterno dell'edificio, ed ad esso più prossimi; quelli positivi anch'essi distanziati 1 – 1.5 metri l'uno dall'altro lungo una retta parallela a quella degli elettrodi negativi. La distanza tra le due serie era di circa 1.5 metri.

Gli elettrodi positivi sono stati infissi verticalmente, mentre quelli negativi obliquamente, in modo tale che la punta dell'elettrodo fosse circa un metro sotto le fondazioni, interessando così il bulbo degli sforzi.

Gli elettrodi così disposti sono stati collegati ad una centralina che manteneva costante la differenza di potenziale, ma non l'intensità di corrente.

L'ipotizzata bassa umidità naturale di alcuni terreni di fondazione, ha portato al tentativo di innazarla nel Caso 1 e nel Caso 3, immettendo acqua nei fori poi destinati ad accogliere gli elettrodi. Alla luce dei risultati ottenuti, il tentativo sembra aver avuto esito positivo.

In tutti i casi, si è proceduto ad una inversione del campo elettrico motivata dall'intenzione di eliminare la possibile presenza di "zone d'ombra" (Veniale F., 1978), e di diminuire la resistività del terreno dovuta ad un pH neutro tra gli elettrodi.

Nei tre campi sperimentali analizzati sono stati prelevati alcuni campioni di terreno, prima e dopo il trattamento. Tutti i campioni sono stati sottoposti alla seguente batteria d'indagine:

- analisi granulometrica;

- determinazione di alcuni limiti di Atterberg e degli indici ad essi correlati;
- determinazione del contenuto naturale d'acqua del terreno;
- prova del blu di metilene con metodologia AFNOR – NF P 94-068;
- analisi mineralogica XRD semiquantitativa (TQ + FF_{nat.+gli.}, metodo Biscaye) con analisi chimica XRF.

3 RISULTATI OTTENUTI

Tabella 1

Cantiere	Numero di campioni prelevati prima del trattamento	Numero di campioni prelevati dopo il trattamento	Profondità di prelievo sotto le fondazioni in metri
Caso A	-	-	-
Caso 1	1	1	1
Caso 2	2	2	1
Caso 3	1	1	1

Tabella 2

Cantiere	Composizione granulometrica (A.G.I.)	Diagramma di Plasticità di Casagrande	Limite di liquidità	Limite di plasticità	Indice di plasticità	Umidità
			Valori espressi in percentuale			
Caso A	Argilla	-	-	-	-	-
Caso 1 C1N T	Argilla limosa grigio nerastro	Argilla inorganica di alta plasticità	88.90	33.18	55.72	55.65
Caso 1 C1T	“	“	88.70	34.10	53.60	39.20
Caso 2 C1N T	Argilla limosa	Argilla inorganica di alta plasticità	83.70	30.70	53.00	41.92
Caso 2 C1T	“	“	87.90	30.52	57.38	28.50
Caso	“	“	85.30	28.34	56.96	35.00

2 C2N T						
Caso 2 C2T	“	“	91.30	30.50	60.80	30.61
Caso 3 C1N T	Argilla limosa con sabbia	Argilla inorga nica di alta plasticità	74.60	28.40	46.20	28.96
Caso 3 C1T	“	“	53.45	25.20	27.25	26.80
C:	campione					
NT:	non trattato					
T:	trattato					

Scaglioni (Scaglioni A., 1992) riporta una tabella orientativa, tratta da una pubblicazione americana di Sowers G.F. del 1962, che indica come in “zone umide”, contrapposte a “zone aride”, ad un indice di plasticità compreso tra 30 e 50 corrisponda “un’entità dei cambiamenti di volume con i cambiamenti di umidità” “da piccola a moderata”, mentre ad un indice di plasticità maggiore di 50 corrisponde un’entità dei cambiamenti di volume con i cambiamenti di umidità” “da moderata a forte”. In base a questa classificazione il Caso 1 e il Caso 2 hanno un’entità dei cambiamenti di volume con i cambiamenti di umidità” “da moderata a forte”, mentre il Caso 3 ha un’entità dei cambiamenti di volume con i cambiamenti di umidità” “da piccola a moderata”.

Nel Caso 1 e nel Caso 3, come già detto, si è fatto ricorso ad immissione d’acqua nel terreno per favorire il processo elettrosmotico, vista la relativamente bassa percentuale d’acqua libera.

Dai dati riportati nella precedente tabella, è possibile:

1. calcolare il Coefficiente di Attività Colloidale delle argille (A), come il rapporto tra l’indice di plasticità e la percentuale di passante inferiore ai 2µm;
2. ricavare il Grado di Plasticità, molto plastico con l’Indice di Plasticità maggiore di 40, plastico se compreso tra 15 e 39;
3. ricavare l’indice di consistenza (Ic), e quindi la consistenza, come il rapporto tra la differenza tra il limite liquido ed il contenuto naturale d’acqua, e l’Indice di plasticità.

Tabella 3

Cantiere	A	Grado di Plasticità	Ic	Consistenza
Caso 1 C1NT	0.84 - Mediamente attiva	Molto plastico	0.60	Plastica
Caso 1 C1T	-	“	0.92	Solido- plastica
Caso 2 C1NT	0.74 - Inattiva	“	0.79	Solido- plastica
Caso 2 C1T	-	“	1.04	Semisolida
Caso 2 C2NT	0.78 - Mediamente attiva	“	0.88	Solido- plastica
Caso 2 C2T	-	“	1.00	Semisolida
Caso 3 C1NT	0.62 - Inattiva	“	0.99	Solido- plastica
Caso 3 C1T	-	Plastico	0.98	Solido- plastica

È possibile correlare l’indice di plasticità con la frazione argillosa inferiore ai due micron (Skempton A.W., 1953).

Tabella 4

Cantiere	Indice di plasticità	Frazione < 2µm	Ipotesi mineralogica
Caso 1 C1NT	55.72	66.19 %	Illite
Caso 1 C1T	53.60	50.03 %	“
Caso 2 C1NT	53.00	72.07 %	“
Caso 2 C1T	57.38	83.72 %	“
Caso 2 C2NT	56.96	72.07 %	“
Caso 2 C2T	60.80	84.69 %	“
Caso 3 C1NT	46.20	74.38 %	Caolinite
Caso 3 C1T	27.25	74.38 %	“

I campioni di terreno sono anche stati sottoposti alla prova del “blu di metilene” detta “alla macchia”, strettamente secondo la metodologia AFNOR – NF P 94-068, per la determinazione di una serie di parametri legati

alle caratteristiche fisiche e mineralogiche della frazione argillosa. Per detta prova, si fa anche riferimento a quanto ben riportato in “Chiappone e Scavia”.

Sono riportati di seguito i risultati di tale prova, media di tre prove effettuate su ogni campione. Il peso secco era identico in ciascuna prova; Vm è il volume medio di blu di metilene in ml con concentrazione di 10 g/l utilizzato in ciascuna prova; e VB è il “valore di blu” per 100 grammi di campione ottenuto dalla relazione $VB = V/Ps$, dove Ps è il peso secco in grammi; Sa è la superficie specifica totale (esterna più interna) dei minerali argillosi presenti nel campione che si sta analizzando, ottenuta dalla relazione $Sa = 21 VB$ in mq/g; Acb è il VB della frazione di particelle inferiori ai 2µm e viene definito come Indice di Attività della frazione argillosa del terreno, ottenuto dalla relazione $Acb = 100 VB/F$, dove F è la percentuale di argilla con dimensioni inferiori ai 2µm (Lautrin D., 1989).

Per gli inerti, la superficie specifica totale è dell’ordine di $1 \div 4$ mq/g, mentre per le argille è dell’ordine di $20 \div 900$ mq/g (Chiappone A e Scavia C., 1999). In particolare, è dell’ordine di 15 mq/g per la caolinite, di 80 mq/g per l’illite, di 800mq/g per la montmorillonite. Per frazioni di materiale fine caratterizzate da miscele di minerali argillosi, VB aumenta col crescere del tenore di montmorillonite. Per la correlazione tra VB, Acb e Sa da prove “alla macchia”, e VB, Acb e Sa da prove elettroforetiche, vedasi oltre.

Un’estesa campagna sperimentale condotta da Lautrin mostra che Acb cresce con la percentuale di montmorillonite, e che i valori più bassi si ottengono per frazioni argillose poco attive o inerti. In particolare, Acb è compreso tra 1 e 2 per la caolinite pura, tra 4 e 5 per l’illite pura, e tra 18 e 20 per la montmorillonite pura (Lautrin D., 1987 e Lautrin D. 1989).

Tabella 5

Cantiere	Peso secco	Vm	VB	Sa	Acb
Caso 1 C1NT	33.4	220	6.6	138.6	10.0
Caso 1 C1T	35.2	125	3.6	75.6	7.2
Caso 2 C1NT	35.6	300	8.2	172.2	11.4
Caso 2	36.1	265	7.3	153.3	8.7

C1T					
Caso 2 C2NT	34.2	295	8.6	180.6	11.9
Caso 2 C2T	33.5	260	7.8	163.8	9.2
Caso 3 C1NT	39.6	185	4.7	98.7	6.3
Caso 3 C1T	35.2	205	5.8	121.8	7.8

Utilizzando i valori sopra riportati, utilizzando le relazioni di Lautrin si ricavano i dati sotto riportati.

Tabella 6

Cantiere	VB	Frazione < 2µm	Caolinite	Illite	Montmorillonite
Caso 1 C1NT	6.6	66.19 %	0 %	98 %	2 %
Caso 1 C1T	3.6	50.03 %	10 %	45 %	45 %
Caso 2 C1NT	8.2	72.07 %	0 %	98 %	2 %
Caso 2 C1T	7.3	83.72 %	10 %	45 %	45 %
Caso 2 C2NT	8.6	72.07 %	0 %	98 %	2 %
Caso 2 C2T	7.8	84.69 %	10 %	45 %	45 %
Caso 3 C1NT	4.7	74.38 %	80 %	0 %	20 %
Caso 3 C1T	5.8	74.38 %	10 %	45 %	45 %

Un’altra relazione di Lautrin (Lautrin D., 1989), modificata e presente nel citato articolo di Chiappone e Scavia, mette in relazione l’Acb con delle classi di terreno, cui corrispondono dei gradi diversi di attività. In base a quanto su riportato, si ottengono i seguenti valori.

Tabella 7

Cantiere	Acb	Classe	Attività
Caso 1 C1NT	10.0	5	Terreni con frazione argillosa attiva
Caso 1 C1T	7.2	4	Terreni con frazione argillosa normale
Caso 2 C1NT	11.4	5	Terreni con frazione argillosa attiva
Caso 2 C1T	8.7	5	Terreni con frazione argillosa attiva
Caso 2 C2NT	11.9	5	Terreni con frazione argillosa attiva
Caso 2 C2T	9.2	5	Terreni con frazione argillosa attiva
Caso 3 C1NT	6.3	4	Terreni con frazione argillosa normale
Caso 3 C1T	7.8	4	Terreni con frazione argillosa normale

Bisogna tener presente che i valori di VB, Acb ed Sa risultano sovrastimati rispetto ai valori ottenuti sugli stessi indici con prove tradizionali.

È però anche vero che esiste una correlazione lineare marcata tra le due stime degli stessi indici ottenuti con le due modalità differenti, che permette di rapportare i valori dei tre indici da prove col blu di metilene, a valori da prove elettroforetiche (Chiappone A e Scavia C., 1999):

- $VB_{\text{alla macchia}} = 1.6136 VB_{\text{elettroforesi}} + 0.2516$;
- $Acb_{\text{alla macchia}} = 1.9509 Acb_{\text{elettroforesi}} + 2.0735$;
- $Sa_{\text{alla macchia}} = 1.6136 Sa_{\text{elettroforesi}} + 5.2666$.

Tutti i campioni sono stati sottoposti ad analisi chimica e diffrattometrica, con il seguente esito riassuntivo: i campioni esaminati sono da ritenersi dal punto di vista chimico-mineralogico del tutto simili. I tracciati diffrattometrici mostrano infatti poche differenze essenzialmente riguardanti i plagioclasti e i fillosilicati, ma tutte riconducibili a differenze di orientamento preferenziale dei campioni analitici.

Il tipo di analisi non ha permesso di individuare alcun tipo di modifica strutturale e non, a seguito del trattamento del terreno col sistema elettrosmotico.

Sono stati raccolti dati empirici, stimoli iniziali per questa ricerca, che alla luce dei dati oggettivi raccolti nella campagna di indagine,

assumono un significato. Vieni data di seguito una descrizione di ogni campo sperimentale.

3.1 Caso A

In prossimità della zona danneggiata è presente un albero (aghifoglie) con fusto di circa 15 cm di diametro ed un latifoglie con diametro di 70 cm.

La palazzina presentava la variazione dell'apertura delle fessure in funzione della stagione: dopo periodi piovosi le fessure tendevano a chiudersi, dopo periodi asciutti ad aprirsi.

È stata applicata costantemente una differenza di potenziale di 10 V, con iniziali 2 A di intensità ($R = 5 \Omega$). Dopo 24 ore, si è registrato un calo d'intensità di circa 0.4 A ($R = 6.25 \Omega$), cui è seguito un ulteriore calo ad 1 A ($R = 10 \Omega$) nei successivi 4 giorni. Al termine dell'applicazione, l'intensità di corrente era di 0.6 A ($R = 7.14 \Omega$). La differenza di potenziale era mantenuta costante da una centralina.

Dopo 24 ore d'applicazione del campo elettrico, è stata immessa dell'acqua, circa 20 litri in totale, nei fori predisposti ad accogliere gli elettrodi negativi, anche per evitare il distacco degli elettrodi dal terreno a seguito dell'applicazione del campo elettrico.

Sono state infisse 9 coppie di elettrodi in lega d'alluminio, in due ordini paralleli, uno per la polarità positiva, ed uno per la polarità negativa, distanti tra loro circa 1.5 metri, a loro volta paralleli alla zona della costruzione da trattare.

L'ordine negativo, quello più prossimo alla costruzione, aveva una lunghezza di 1.7 metri, infisso con un'inclinazione di 40° rispetto al p.c., ricoperto di isolante per i primi 1.2 metri circa, e scoperto per gli ultimi 50 cm, posto a circa 60 cm sotto le fondazioni.

L'ordine positivo aveva una lunghezza di 1.2 metri, infisso verticalmente, ricoperto di isolante per i primi 50 cm circa, e scoperto per gli ultimi 70 cm.

Dopo i primi 4 giorni d'applicazione del campo elettrico, i vetrini hanno segnalato un recupero totale dei cedimenti di 9 mm, circa i 2/3 del cedimento differenziale totale.

L'applicazione del campo elettrico è durata 45 giorni. Dal quinto giorno in poi, non sono stati registrati altri recuperi.

Si è proceduto ad una inversione del campo elettrico motivata dall'intenzione di eliminare la possibile presenza di "zone d'ombra" (Veniale F., 1978) e di diminuire la resistività del terreno dovuta ad un pH neutro tra gli elettrodi, non registrando alcuna diminuzione di volume del terreno.

Sono state effettuate due inversioni del campo elettrico con differenze di potenziale fino a 20 V a fine applicazione, senza che i vetrini registrassero alcun movimento. L'intensità di corrente è scesa asintoticamente verso $I = 0.6 \text{ A}$, più velocemente rispetto "all'andata".

Il processo, sia in andata che in ritorno, ha iniziato a produrre degli effetti una volta superata la soglia di attivazione, ed ha avuto termine quando, esaurita la fase del recupero dei cedimenti, l'intensità di corrente ha raggiunto valori asintotici e costanti nel tempo.

A distanza di tre anni, dopo periodi piovosi e siccitosi, non si registra alcun movimento relativo del terreno o della costruzione. Non è stato eseguito alcun ulteriore intervento.

3.2 Caso 1

In prossimità della zona danneggiata è presente un albero (aghi-foglie) con fusto di circa 15 cm di diametro.

Il campo prova presentava la variazione dell'apertura delle fessure nella palazzina in funzione della stagione: dopo periodi piovosi le fessure tendevano a chiudersi, dopo periodi asciutti ad aprirsi.

È stata applicata una differenza di potenziale iniziale di 10 V, con iniziali 4 A di intensità ($R = 2.5 \Omega$). Dopo 24 ore, si è registrato un calo d'intensità di circa 0.8 A ($R = 3.13 \Omega$), cui è seguito un ulteriore calo a 3 A ($R = 3.3 \Omega$) nei successivi 6 giorni, senza registrare alcun recupero dei cedimenti.

Sono stati infissi, durante questa prima fase, 9 elettrodi in lega d'alluminio, in due ordini paralleli, uno per la polarità positiva, ed uno per la polarità negativa, tra loro distanti circa 1.5 metri, a loro volta paralleli alla zona della costruzione da trattare, 5 negativi e 4 positivi.

L'ordine negativo, quello più prossimo alla costruzione, aveva una lunghezza di 3 metri, infisso verticalmente, ricoperto di isolante per i primi 1.5 metri circa, e scoperto per gli ultimi

1.5 metri, posto a circa 50 cm sotto il piano di fondazione, adiacente alla costruzione stessa.

L'ordine positivo aveva anch'esso una lunghezza di 3 metri, infisso verticalmente, ricoperto di isolante per il primo metro, e scoperto per gli ultimi 2 metri.

Dopo questa prima settimana d'applicazione, la differenza di potenziale è stata portata a 20 V e l'intensità di corrente a 5 A ($R = 4 \Omega$), cui non è seguito alcun calo nelle successive 24 ore. Durante questa seconda fase, durata 3 giorni, si è registrato un recupero dei cedimenti di circa 1 mm, non corrispondente all'obiettivo prefissato.

Dopo questi 10 giorni, mantenendo costante la differenza di potenziale a 20 V, si è alzata l'intensità di corrente a 5.5 A ($R = 3.6 \Omega$), dopo l'immissione di molta acqua nei fori predisposti ad accogliere gli elettrodi negativi, per evitare il distacco degli elettrodi dal terreno a seguito dell'applicazione del campo elettrico.

L'immissione d'acqua nei fori predisposti ad accogliere gli elettrodi negativi, è stata effettuata anche in altri due nuovi fori adiacenti alla costruzione destinati ad accogliere altri due nuovi elettrodi negativi, entrambi di 4 metri di lunghezza, isolati per i primi 3 metri.

Durante le 24 ore seguenti non si è registrato alcun calo. Dopo una settimana, i vetrini hanno registrato un ulteriore recupero dei cedimenti di circa 1.5 mm. Questa terza fase è durata 30 giorni.

Al termine dell'applicazione, l'intensità di corrente era di 2.8 A ($R = 7.14 \Omega$). La differenza di potenziale era mantenuta costante da una centralina. Il recupero totale è stato di 2.5 mm.

Si è proceduto ad una inversione del campo elettrico durante la terza fase, motivata dall'intenzione di eliminare la possibile presenza di "zone d'ombra" (Veniale F., 1978) e di diminuire la resistività del terreno dovuta ad un pH neutro tra gli elettrodi, non registrando alcuna diminuzione di volume del terreno.

Sono state effettuate tre inversioni del campo elettrico con differenze di potenziale di 10, 20 e 30 V a fine applicazione, senza che i vetrini registrassero alcun movimento. L'intensità di corrente è scesa asintoticamente verso $I = 2.8 \text{ A}$ più velocemente rispetto "all'andata".

Il processo, sia in andata che in ritorno, ha iniziato a produrre degli effetti una volta superata la soglia di attivazione, ed ha avuto

termine quando, esaurita la fase del recupero dei cedimenti, l'intensità di corrente ha raggiunto valori asintotici e costanti nel tempo.

Sono state effettuate due prove penetrometriche statiche, una prima ed una dopo l'applicazione, da cui è emerso che fino alla profondità di 10.80 metri non è presente la falda, e che i valori di R_p e R_l sono più bassi di circa il 10 % nel volume di terra trattato col campo elettrico. Il lieve e trascurabile calo delle caratteristiche geotecniche, è largamente compensato dagli effetti del trattamento del terreno di fondazione col campo elettrico. Tale calo, infatti, rientra pienamente nei limiti d'esercizio del terreno (1/3 del carico di rottura del terreno).

A distanza di due anni, dopo periodi piovosi e siccitosi, non si registra alcun movimento relativo del terreno o della costruzione. Non è stato eseguito alcun ulteriore intervento.

3.3 Caso 2

Il campo prova presentava la variazione dell'apertura delle fessure nella palazzina in funzione della stagione: dopo periodi piovosi le fessure tendevano a chiudersi, dopo periodi asciutti ad aprirsi.

È stata applicata una differenza di potenziale iniziale di 15 V, con iniziali 10 A di intensità ($R = 1.5 \Omega$). Dopo 24 ore, si è registrato un calo d'intensità di circa 2 A ($R = 5 \Omega$). È seguita, dopo un giorno, un calo a 10 V e 4 A ($R = 2.5 \Omega$), senza registrare alcun ulteriore calo nelle 24 ore successive.

Durante la prima fase, nel giro di due giorni, è stato registrato dall'apparecchiatura laser, un recupero dei cedimenti di circa 2 mm, mentre nella seconda fase non si è avuto alcun recupero.

Sono state infisse 10 coppie di elettrodi in lega d'alluminio, in due ordini paralleli, uno per la polarità positiva, ed uno per la polarità negativa, tra loro distanti circa 1.5 metri, a loro volta paralleli alla zona della costruzione da trattare.

Tutti gli elettrodi avevano una lunghezza di 2.8 metri, tutti isolati per i primi 2.3 metri e scoperti per gli ultimi 50 cm. Gli elettrodi positivi sono stati infissi verticalmente, mentre quelli negativi, più prossimi alla costruzione,

erano inclinati di circa 50° , a circa 2 metri di profondità, sotto le fondazioni.

Non c'è stata alcuna immissione d'acqua, viste le condizioni di saturazione del terreno e la presenza della falda a circa 1 metro di profondità dal p.c.

Al termine dell'applicazione, l'intensità di corrente era di 3.2 A ($R = 3.1 \Omega$). La differenza di potenziale era mantenuta costante da una centralina. L'applicazione del campo elettrico è durata in totale 4 giorni.

Si è proceduto ad una inversione del campo elettrico per 24 ore motivata dall'intenzione di eliminare la possibile presenza di "zone d'ombra" (Veniale F., 1978) e di diminuire la resistività del terreno dovuta ad un pH neutro tra gli elettrodi, non registrando alcuna diminuzione di volume del terreno.

È stata effettuata una inversione del campo elettrico con la differenza di potenziale di 10 V a fine applicazione, senza che il sistema laser di controllo registrasse alcun movimento. L'intensità di corrente è scesa asintoticamente verso $I = 3.2$ A più velocemente rispetto "all'andata".

Il processo, sia in andata che in ritorno, ha iniziato a produrre degli effetti una volta superata la soglia di attivazione, ed ha avuto termine quando, esaurita la fase del recupero dei cedimenti, l'intensità di corrente ha raggiunto valori asintotici e costanti nel tempo.

A distanza di 2 mesi, dopo un periodo piovoso ed uno siccitoso, non si registra alcun movimento relativo del terreno o della costruzione.

3.3 Caso 3

In prossimità della zona danneggiata è presente un albero (latifoglie) con fusto di circa 20 cm di diametro.

Il campo prova presentava la variazione dell'apertura delle fessure nella palazzina in funzione della stagione: dopo periodi piovosi le fessure tendevano a chiudersi, dopo periodi asciutti ad aprirsi.

Sono state infisse 8 coppie di elettrodi in lega d'alluminio, in due ordini paralleli, uno per la polarità positiva, ed uno per la polarità negativa, tra loro distanti circa 1.5 metri, a loro volta paralleli alla zona della costruzione da trattare.

Tutti gli elettrodi negativi, più prossimi alla costruzione, avevano una lunghezza di 2.8 metri, isolati per i primi 1.8 metri e scoperti per l'ultimo metro, infissi con un'inclinazione di circa 45°, a circa 1 metro di profondità dalle fondazioni. Gli elettrodi positivi, non isolati per tutta la loro estensione, avevano una lunghezza di 1.5 metri, e erano infissi verticalmente.

È stata applicata inizialmente una differenza di potenziale di 17 V ed un'intensità di corrente di 5 A ($R = 3.4 \Omega$). Dopo circa un'ora, l'intensità è calata a 3.8 A ($R = 4.5 \Omega$), rimanendo costante fino al giorno dopo, quando la differenza di potenziale è stata portata a 20 V e l'intensità di corrente a 5.8 A ($R = 3.4 \Omega$). A distanza di circa due ore dalla variazione della differenza di potenziale e dell'intensità di corrente, quest'ultima è scesa a 4.8 A ($R = 4.2 \Omega$). Nell'arco delle prime 24 h è stato registrato, con un sistema di controllo laser, un recupero dei cedimenti di 1.2 mm.

Dopo altre 24 h, rimanendo costante la differenza di potenziale, l'intensità di corrente è stata portata a 3.3 A ($R = 6.1 \Omega$), immettendo nei fori ospitanti gli elettrodi 10 litri d'acqua in totale, cui è corrisposto un passaggio a 3.5 A ($R = 5.7 \Omega$) dell'intensità di corrente. Questa fase è durata 2 giorni.

Dopo la fase precedente, la differenza di potenziale è stata portata a 30 V e l'intensità è rimasta costante a 3.8 A ($R = 7.9 \Omega$) fino a fine applicazione. Il recupero è stato circa il 25% del cedimento differenziale totale.

In questo caso non si è proceduto ad alcuna inversione del campo elettrico. Il processo, sia in andata che in ritorno, ha iniziato a produrre degli effetti una volta superata la soglia di attivazione, ed ha avuto termine quando, esaurita la fase del recupero dei cedimenti, l'intensità di corrente ha raggiunto valori asintotici e costanti nel tempo.

A distanza di 2 mesi, dopo un periodo piovoso ed uno siccitoso, non si registra alcun movimento relativo del terreno o della costruzione.

4.CONCLUSIONI

Applicando un campo elettrico a bassa tensione a terreni coesivi con componente argillosa attiva senza pozzo catodico, con

presenza d'acqua naturale o artificialmente fornita al terreno, si è registrato un parziale recupero dei cedimenti e la cessazione della variazione di volume del terreno di fondazione in funzione dell'alternanza di periodi siccitosi e di periodi piovosi.

Il sistema, coperto da brevetto internazionale, consente di intervenire in situazione di difficoltà operativa con i mezzi tradizionali, e di ridurre al minimo le attività di cantiere.

A seguito degli inaspettati e positivi effetti dell'applicazione del campo elettrico, nei mesi scorsi è stata effettuata una campagna sperimentale volta ad individuare le componenti interessate dagli effetti della presenza del campo. È emerso quanto segue.

Il processo, sia in andata che in ritorno, ha iniziato a produrre degli effetti una volta superata la soglia di attivazione, ed ha avuto termine quando, esaurita la fase del recupero dei cedimenti, l'intensità di corrente ha raggiunto valori asintotici e costanti nel tempo.

Quindi una volta raggiunto il nuovo equilibrio nel "sistema terreno", il passaggio di corrente, indice del processo, tende a calare asintoticamente senza che si registrino modificazioni significative.

È da notare che nel rispetto dell'ambiente naturale, le tensioni indotte hanno avuto un valore molto basso in confronto a quelle registrate dagli autori in bibliografia, e che non c'è stato bisogno di additivare il fluido interstiziale con sali.

Inoltre, è stato notato un discreto "consumo" degli elettrodi in lega d'alluminio nella zona non isolata, per la cessione al terreno dei componenti dell'elettrodo, come riportato da diversi autori in bibliografia.

Il processo, sia in andata che in ritorno (con l'inversione del campo elettrico), è avvenuto con una tensione costante, ma con un'intensità di corrente variabile in funzione delle condizioni del terreno durante l'applicazione. In particolare si è registrato in generale un calo repentino nelle prime 24 ore, che prosegue nei giorni successivi fino ad un valore costante. Si è notato, inoltre, che la diminuzione dell'intensità di corrente in andata ha una ragione minore che in ritorno. Si può supporre che l'area sottesa dalle due curve (intensità di corrente in funzione del tempo, in

andata e in ritorno) sia il lavoro totale svolto dal sistema impianto - terreno - costruzione.

Si registra un calo dell'umidità nel terreno dopo il trattamento; si considera in via generale l'indice di plasticità come indicatore qualitativo del comportamento del terreno; l'eventuale immissione d'acqua nel terreno aiuta il processo; si nota un aumento dell'indice di consistenza nel Caso 1 e nel Caso 2, ed una diminuzione nel Caso 3; utilizzando la correlazione di Skempton, nel Caso 1 e nel Caso 2 siamo in presenza della specie mineralogica illitica sia prima (confermata dalla correlazione di Lautrin) che dopo il trattamento, mentre nel Caso 3 di quella caolinica sia prima (confermata dalla correlazione di Lautrin) che dopo il trattamento; dalle prove col blu di metilene, si nota la diminuzione dopo il trattamento di VB, Sa ed Acb per il Caso 1 ed il Caso 2, mentre per il Caso 3 si nota un incremento; utilizzando un'altra relazione di Lautrin (Lautrin D., 1989), si nota il passaggio per il Caso 1 da terreni con frazione argillosa attiva a terreni con frazione argillosa s.s., mentre rimane immutata la situazione per gli altri due casi; il parziale recupero dei cedimenti sembra essere funzione anche del tempo d'applicazione del campo elettrico.

Alla luce dei risultati ottenuti e della cronologia degli eventi per ogni caso, il fattore tempo è molto importante in questo tipo di applicazione. Applicazioni con durata molto breve, seppur dando risultati positivi, non hanno certamente sortito gli effetti dei due campi dove la durata dell'applicazione è stata maggiore.

Si tratta, a questo, punto di risolvere piccoli problemi organizzativi per un utilizzo di routine della nuova tecnologia.

A distanza di tempo, le variazioni stagionali del volume di terreno trattato, presente sotto le fondazioni, non si sono più verificate. Nel Caso A, del gesso applicato per tre anni alle fessure non ha evidenziato che delle sottilissime cavillature, probabilmente non imputabili alla variazione di volume del terreno di fondazione.

Per quanto riguarda il consumo di elettricità da parte dell'impianto, esso è tranquillamente sopportato dalla comune rete domestica.

L'ipotesi da me individuata prevede una trasformazione aggradativa dei componenti argillosi a seguito del processo elettrosmotico,

verso termini a struttura gradualmente più stabile dell'interstrato dei fillosilicati. Probabilmente, il campo ha prodotto anche una diminuzione della capacità di scambio cationico con conseguente diminuzione dei siti attivi in seguito all'inserimento nell'interstrato e/o sulla superficie esterna delle micelle, dei cationi idrati, rendendo i minerali argillosi più stabili, forse per progressivo distanziamento dei pacchetti molecolari che si manifesta macroscopicamente col rigonfiamento del terreno. Tali trasformazioni non sono state rilevate in maniera evidente dalle analisi di laboratorio, ma sono spunti per la futura ricerca scientifica in questo campo.

5 RINGRAZIAMENTI

Ringrazio il dott. Giuseppe Mandrone, ricercatore presso la facoltà di Geologia dell'Università di Parma.

6 BIBLIOGRAFIA

Veniale F., 1978, *Consolidazione elettrosmotica e chimica*, Atti del Seminario su Consolidamento di terreni e rocce in posto nell'ingegneria civile, Stresa 26/27 maggio 1978, pp. 240, 259, 260

Evangelista A., 1995, *Valutazioni teoriche e osservazioni sperimentali sui processi di trattamento dei terreni sulle modifiche indotte*, Atti XIX Convegno Nazionale di Geotecnica, Pavia 19/21 settembre 1995, Vol. II, pag. 176

Scaglioni A., 1992, *Geologia d'urgenza nelle calamità naturali, aspetti tecnici e legislativi*, GEO - GRAPH s.n.c., Segrate 1992, pag. 54

Skempton A.W., 1953, *The colloidal activity of clays*, 3rd ICSMFE, Vol. I, 1953, pag. 57

AFNOR Norme française NF P 94-068, 1993, *Mesure de la qualité et de la fraction argileuse*, Association Française de Normalisation, Paris, La Defense

Chiappone A., Scavia C., 1999, *La prova del blu di metilene nella caratterizzazione geotecnica: un'applicazione allo studio della stabilità dei versanti*, Rivista Italiana di Geotecnica, n. 4/99, pag. 36

Lautrin D., 1989, *Utilisation pratique des paramètres dérivés de l'essai au bleu de méthylène dans les projets de génie civil*, Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n. 160, févr.-mars, 1989, pp. 29-41

Lautrin D., *Une procédure rapide d'identification des argiles*, Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n. 152, novembre-décembre, 1987, pp. 75-84

ABSTRACT

Applying an electric field with low voltage by means of electrode in aluminium alloy to cohesive soils with active clayey component without cathode well, we have reported a partial recovery of subsiding and the cessation of volume change of foundation soil, in function of the alternation of dry periods and rainy ones. The system, covered by international patent, permits to intervene in situation of operative difficulty by traditional means, and to reduce strongly the building site activities. It is important to note that, in the respect of the natural environment, the tensions have had a very low value compared with ones reported by some the authors in bibliography, and that it hasn't necessary to add the interstitial fluid with salts. It is reported a drop in the humidity of the soil after the treatment; it is registered an increase of the index of consistency in two of three cases; using the Skempton's correlation, in two of three cases we are in presence of the illitic mineralogical species, while in a case we are in presence of the kaolin both before, and after the treatment; from the blue test of methylen, it is registered the decrease after the treatment of VB, Sa and Acb for two of three cases; the partial recovery of subsiding seems to be influenced from the application time of the electric field. After a lot of time, the seasonal variation of the treated soil volume under the foundations haven't been registered. In a case, the chalk applied to the cracks for three years has shown only some very thin cracks probably not due to the foundation soil. As concerns the electricity consumption of the plant, it is supported by the common domestic network.