

Utilizzo dell'elettrosmosi per la stabilizzazione dei terreni coesivi

Pasquale Armillotta

Geologo, libero professionista

1. PREMESSA

Il "terreno di fondazione" è la parte del terreno che riceve il carico di una costruzione e ne risente in modo significativo. A seguito della sollecitazione dovuta all'applicazione del carico, il terreno sottostante una costruzione tende a deformarsi e l'entità della deformazione dipende dal tipo di terreno: per esempio, è praticamente nulla in caso di una roccia compatta, mentre può essere considerevole per depositi fini (argille o limi) con elevato contenuto di acqua e che non siano mai state sottoposte a carichi nella loro storia. Ed è questo il caso più frequente nelle pianure alluvionali (figura 1).

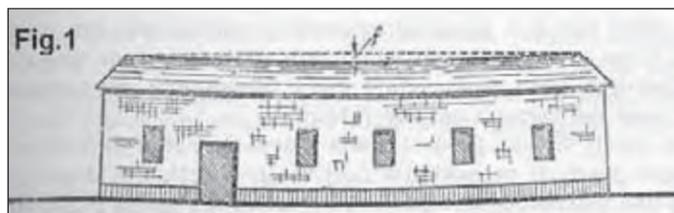


Figura 1. Effetti legati alle deformazioni subite da un terreno sottoposto ad un carico strutturale.

2. CAUSE DELLA DIMINUZIONE DI VOLUME DEI TERRENI ARGILLOSI

In depositi argillosi, inoltre, un apporto d'acqua può provocare un rigonfiamento (cioè un aumento di volume), come il disseccamento ne determina una compattazione (una diminuzione di volume). Si tratta di cicli naturali legati alla stagionalità (alternanza di periodi piovosi e di periodi siccitosi).

Questi fenomeni di rigonfiamento/ritiro possono sovrapporsi ai normali processi di consolidazione di un fabbricato determinando delle oscillazioni stagionali in cui il

terreno "trascina" nelle sue variazioni di volume (che in superficie si traducono in "abbassamenti" e "sollevamenti") le fondazioni e provoca delle variazioni di ampiezza delle lesioni strutturali: per esempio, l'apertura estiva e la chiusura invernale delle crepe. Si deve tenere conto che il ciclo non è completamente reversibile e, negli anni, si assiste al progressivo peggioramento del quadro fessurativo.

In diversi casi si è constatato che all'essiccamento del terreno contribuiscono sensibilmente gli apparati radicali delle piante, che possono assorbire acqua al di sotto delle fondazioni degli edifici contigui (figura 2).



Figura 2. Presenza di vegetazione ad alto fusto che contribuisce alla consolidazione dei terreni d'imposto del fabbricato.

L'apparato radicale, il cui sviluppo avviene per la maggior parte delle specie presenti nel nostro territorio nello strato di suolo compreso tra la superficie e la profondità di un metro, un metro e mezzo, assolve la funzione di assorbire acqua per il fabbisogno della pianta ricercandola nel terreno. Se il problema non si pone in termini sensibili laddo-

ve c'è un continuo approvvigionamento idrico del terreno, diventa invece rilevante in suoli a granulometria fine, poco permeabili e in carenza stagionale di approvvigionamento d'acqua. In questo caso, l'apparato radicale tende a svilupparsi maggiormente per aumentare la superficie d'assorbimento e a ricercare le zone più "umide". Tra queste ultime è spesso da annoverare anche il terreno sottostante una costruzione, maggiormente protetto nei confronti dei processi di evaporazione nella stagione secca. In diversi casi l'apparato radicale ha un'estensione areale molto ampia (figura 3), ben maggiore dell'estensione della chioma, contrariamente a quanto si creda: in un caso, nella zona di Piazza di Traversetolo, si è osservata la presenza dell'apparato radicale di un tiglio a oltre quindici metri dal fusto.



Figura 3. Gli apparati radicale delle essenze arboree possono interessare spessori di terreno molto importanti.

Il fenomeno appare ancora più accentuato in caso di essenze vegetali esotiche, non in equilibrio con le caratteristiche di umidità e di approvvigionamento idrico dei nostri suoli e più in generale del clima.

Localmente può assumere una certa importanza l'azione meccanica delle radici, il cui effetto "cuneo" è responsabile di lesioni e inclinazioni anomale di strutture generalmente leggere e fondate in superficie, quali muretti, marciapiedi, ecc., anche se si conoscono casi di lesioni localizzate su fondazioni di fabbricati. Nella figura sottostante è possibile notare la "densità" di radici in uno scavo profondo circa 80 cm quasi in adiacenza ad una costruzione. L'urbanizzazione di vaste aree coltivate nelle cinture periferiche di città e paesi, a cui si è assistito negli ultimi decenni, ha comportato una progressiva impermeabilizzazione del suolo (figura 4): l'uso di coperture impermeabili (asfalto, cemento, ecc.), la raccolta delle acque piovane provenienti dai tetti, dalle superfici stradali, ecc. in una rete fognaria e il loro allontanamento, sono tutti fattori che impediscono l'infiltrazione e il mantenimento di una quota di umidità nel sottosuolo, al contrario di quanto avveniva in presenza di un terreno scoperto, fosse esso incolto o soggetto a coltivazione.



Figura 4. L'intensa urbanizzazione e la pavimentazione stradale riducono gli apporti idrici al terreno.

La conseguenza è un progressivo essiccamento del terreno che si produce nel corso degli anni, coinvolgendo nel conseguente processo di consolidazione i fabbricati fondati su di esso. Non a caso, appare piuttosto frequente l'affiorare di quadri fessurativi significativi su edifici costruiti negli ultimi venti-trent'anni nelle zone di espansione urbana.

A questo proposito, si fa notare come anticamente le città padane erano percorse da una rete di canali a cielo aperto funzionali, oltre che allo scolo delle acque e dei

liquami, anche al trasporto dei materiali e alla produzione di forza motrice. Oggi questi canali sono in gran parte tombinati, in alcuni casi con l'impermeabilizzazione completa anche del fondo e delle sponde.

I canali costituiscono vere e proprie "vene" del suolo: quando l'impermeabilizzazione è totale, la mancata dispersione idrica dal fondo e dalle sponde è un ulteriore fattore di essiccamento del terreno. In caso contrario, si assiste a una compensazione degli effetti impermeabilizzanti dell'urbanizzazione, in quanto il canale coperto favorisce un'idratazione del suolo nelle sue vicinanze e, negli edifici, si assiste a un lesionamento progressivamente crescente allontanandosi dal canale. Occorre aggiungere anche il continuo e sempre maggiore emungimento di acqua dalle falde acquifere che provoca un graduale costipamento degli strati argillosi superficiali e profondi. Anche l'insolazione gioca un ruolo importante (figura 5): il terreno esposto a meridione subirà il processo di evapotraspirazione in misura superiore rispetto a quello esposto a settentrione.

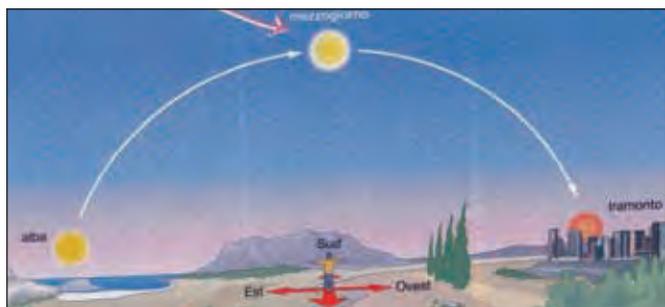


Figura 5. Esposizione a meridione.

3. LA TECNOLOGIA

Come vediamo, l'intervento umano può variare sensibilmente il contenuto d'acqua del terreno, con conseguenze spesso non trascurabili sugli edifici, sulle opere stradali, sulle tubazioni interrato di grandi dimensioni.

La diminuzione di umidità nel terreno ha quindi ripercussioni spesso non trascurabili sugli edifici.

Anche gli interventi per frenare quest'azione sono diversi: sottofondazioni, palificazioni, iniezioni di resine poliuretatiche, iniezioni di cemento, ecc.

Sono però tutti interventi che agiscono sul sintomo della "malattia" ma non sulla causa.

Occorre reidratare i terreni, portando acqua laddove c'è bisogno, eliminando, possibilmente, le cause che hanno contribuito alla diminuzione di umidità. In altri termini, è necessario reidratare il terreno coesivo (argilloso - limo-

so) per un congruo spessore.

Ho a lungo studiato ed applicato il processo elettrosmotico per questo fine: esso consiste nell'ottenere la migrazione dell'acqua e dei sali in essa disciolti in un mezzo poroso, attivandone il flusso con l'applicazione di un campo elettrico continuo, come da figura sottostante. E_1 ed E_2 sono due elettrodi, ed S è un materiale poroso (figura 6).

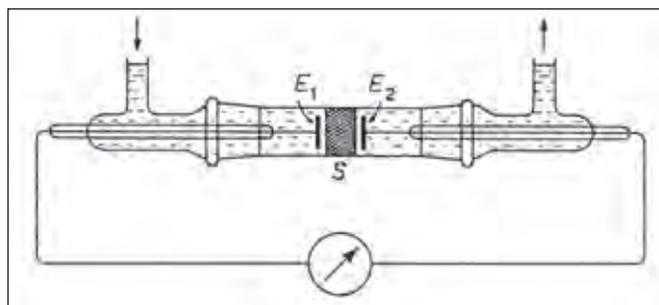


Figura 6. Sopra si riporta lo schema dei primi esperimenti di laboratorio sull'elettrosmosi.

Il passaggio di corrente nel terreno coesivo consiste essenzialmente nella migrazione degli ioni presenti nell'acqua che agiscono prevalentemente sull'impalcatura delle particelle d'argilla bloccando la proprietà di variare il proprio volume in funzione del contenuto in acqua.

La metodologia dell'intervento non è invasiva e permette la salvaguardia e il rispetto degli ambienti presenti, soprattutto in ambito urbano.

Dal punto di vista geologico, il terreno di fondazione della zona meridionale della pianura emiliana è costituito da materiale coesivo autoctono classificato come "Alluvioni recenti" del Quaternario continentale.

Le condizioni al contorno prevedono la fornitura d'acqua al terreno da sottoporre a trattamento, la non immissione di sali nel terreno; l'applicazione del processo ad un sistema aperto con bassa differenza di potenziale; l'esclusione del drenaggio catodico; la presenza della componente attiva delle argille.

In genere si assiste ad una variazione dell'apertura delle fessure in funzione della stagione: dopo periodi piovosi le fessure tendono a chiudersi, dopo periodi asciutti ad aprirsi.

La vicinanza di alberi d'alto fusto, l'esposizione a meridione e l'impermeabilizzazione superficiale influiscono sul fenomeno.

La falda, monitorata prima, durante e dopo l'intervento, non ha alcuna influenza. Non si registra alcun innalzamento della falda nei piezometri di controllo.

Si mettono in opera due serie di elettrodi perimetrali alla zona da trattare. Parte degli elettrodi sono infissi verti-

calmente, e parte obliquamente, in modo tale da interessare il bulbo degli sforzi (figura 7).

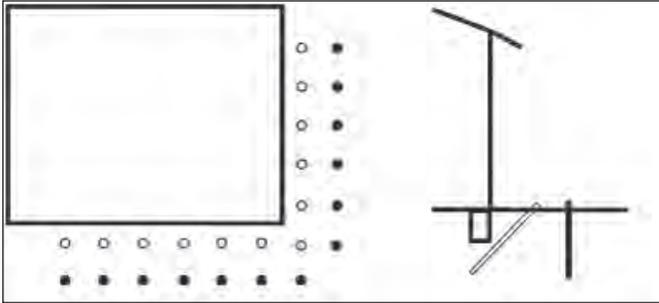


Figura 7. Schema tipo di disposizione degli elettrodi in pianta ed in sezione; i simboli vuoti indicano la prima serie di elettrodi, quelli pieni la seconda serie di elettrodi.

Gli elettrodi così disposti sono collegati ad un alimentatore che mantiene costante la d.d.p.

I risultati non tardano ad arrivare.

Si nota come col passare del tempo, si assiste dapprima ad un forte incremento dell'assorbimento di energia elettrica, poi ad un forte calo della stessa, sintomo e criterio per l'apprezzamento dell'idratazione in corso. Il valore d'assorbimento calerà asintoticamente verso un valore costante (figura 8).

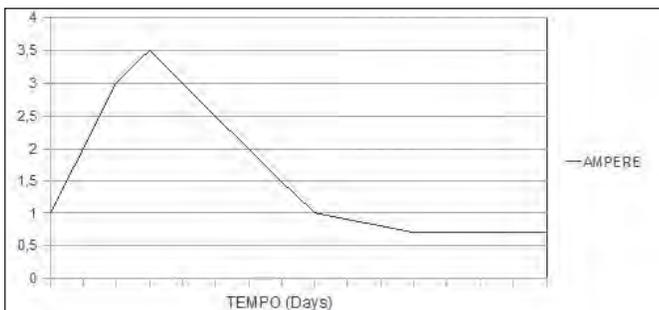


Figura 8. Andamento delle variazioni degli Ampere in funzione del tempo.

Anche il recupero dei cedimenti, altro sintomo del processo di reidratazione ha tempi brevi. Il sottostante grafico, puramente indicativo, mostra quanto affermato. Occorre rilevare che il valore del recupero dei cedimenti è una parte del cedimento totale. I dati esperienziali e di laboratorio hanno evidenziato valori percentuali tra il 30 ed il 100%, funzione delle caratteristiche intrinseche dei terreni stessi.

I recuperi dei cedimenti sono stabili nei valori e nel tempo fin tanto che l'impianto elettrosmotico è in funzione.

Anche gli assorbimenti di acqua, alti all'inizio del trattamento, calano notevolmente col tempo, così come quelli elettrici.

L'impianto è permanente, sempre in funzione 24 ore su 24, sia per la componente elettrica che per quella idrica. Al termine dell'installazione dell'impianto, rimangono visibili in superficie solo i pozzetti d'ispezione dato che l'impianto ha una invasività sull'esistente quasi nulla (figura 9).



Figura 9. L'impianto è alloggiato all'interno di tubi di protezione e coperto con il cemento.

I costi di esercizio sono irrisori e trascurabili. Come tutti gli impianti tecnologici, necessita di annuale manutenzione ordinaria.

4. DUE CASI APPLICATIVI

I due casi analizzati si trovano tutti nella “Bassa parmensese” (figura 10). Dal punto di vista geologico, i terreni di fondazione sono tutti costituiti da materiale coesivo autotono classificato come “Alluvioni recenti” del Quaternario continentale [R.E.R., 2002].

Il fenomeno è stato applicato ed osservato in un primo cantiere dodici anni fa con risultati positivi ma inattesi. **In quella sede (Caso A) non è stato possibile mettere in opera la batteria di analisi attuata invece per l'altro caso analizzato (Caso 1).**

Le condizioni al contorno prevedevano la presenza d'acqua nel terreno da sottoporre a trattamento, ovvero la sua fornitura in superficie; 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 d.d.p.; la presenza della componente attiva delle argille.

Tutti 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 entrambi i casi, la vicinanza con alberi d'alto fusto ha 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 le due serie di elettrodi: quelli negativi e quelli positivi.

Gli elettrodi positivi sono stati infissi verticalmente, mentre quelli negativi obliquamente, in modo tale che la punta dell'elettrodo fosse circa 1 m sotto il piano di fondazione, interessando così il bulbo degli sforzi.

Gli elettrodi così disposti sono stati collegati ad un alimentatore che manteneva costante la d.d.p..

Si è proceduto ad una inversione del campo elettrico motivata dall'intenzione di eliminare la possibile presenza di “zone d'ombra” [VENIALE, 1978] e di diminuire la resistività del terreno dovuta ad un pH neutro tra gli elettrodi [VENIALE, 1978].

Nel Caso 1 sono stati prelevati alcuni campioni di terreno, prima e dopo il trattamento. Tutti i campioni sono stati sottoposti alla seguente serie di indagini (tabella 1 e 2):

- 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.



Figura 10. Stato di fatto del fabbricato.

Rappresentazione planimetrica schematica del Caso A

	Numero di campioni prelevati prima del trattamento	Numero di campioni prelevati dopo il trattamento	Profondità di prelievo sotto le fondazioni in m
Caso A	-	-	-
Caso 1	1	1	1

Tabella 1. Caratteristiche dei campioni prelevati.

	Composizione granulometrica (A.G.I.)	Diagramma di Plasticità di Casagrande	Valori espressi in percentuale			
			WI	Wp	Ip	W
Caso A	Argilla	-	-	-	-	-
Caso 1 C1NT	Argilla limosa grigio nerastra	Argilla inorganica di alta plasticità	88.90	33.18	55.72	55.65
Caso 1 C1T	"	"	88.70	34.10	53.60	39.20

Tabella 2. Esiti dei limiti di Atterberg.

Scaglioni [SCAGLIONI, 1992] riporta una tabella orientativa, tratta da Sowers G.F. del 1962, che indica come in “zone umide”, contrapposte a “zone aride”, ad un Ip compreso tra 30 e 50 corrisponda un’entità dei cambiamenti di volume con i cambiamenti di umidità “da piccola a moderata”, mentre ad un Ip 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 ha un’entità dei cambiamenti di volume con i cambiamenti di umidità “da moderata a forte”.

Dai dati riportati, è possibile:

1. calcolare il Coefficiente di Attività Colloidale delle argille (A), come il rapporto tra I_p e la percentuale di passante inferiore ai $2\mu\text{m}$;
2. ricavare il Grado di Plasticità, molto plastico con l' I_p maggiore di 40, plastico se compreso tra 15 e 39;
3. ricavare l'indice di consistenza (I_c) (tabella 3), e quindi la consistenza relativa (Cr), come il rapporto tra la differenza tra il limite liquido (Wl) ed il contenuto naturale d'acqua (W), e l'Indice di plasticità (I_p).

	A	Grado di Plasticità	I_c	Cr
Caso 1 C1NT	0.84 - Mediamente attiva	Molto plastico	0.60	Plastica
Caso 1 C1T	-	"	0.92	Solido-plastica

Tabella 3. Comportamento delle argille.

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.

Sono riportati di seguito i risultati di tale prova, media di tre prove effettuate su ogni campione (Tabella 4). Il peso secco era identico in ciascuna prova; V_m è il volume medio di blu di metilene 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 $VB = V/P_s$, dove P_s è il peso secco; 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 m^2/g ; Acb è il VB della frazione di particelle inferiori ai $2\mu\text{m}$ 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 $2\mu\text{m}$.

	P_s	V_m	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

Tabella 4. Esiti delle prove al blu di metilene.

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:

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

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".

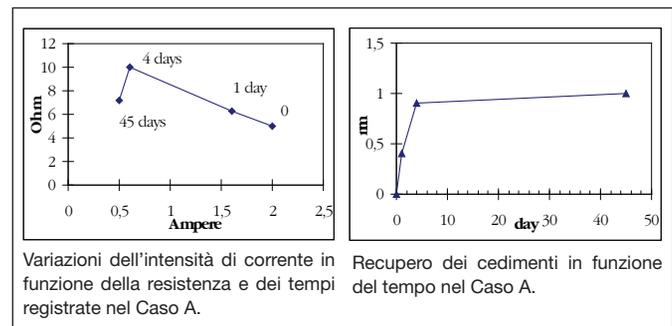


Figura 11. Variazione dell'intensità della corrente in funzione del tempo.

A seguito dell'installazione dell'impianto, sono stati rilevati i seguenti valori sperimentali (figura 11).

Per quanto riguarda il Caso 1, è presente un albero (aghifoglie) con fusto di circa 15 cm di diametro.

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

Dopo l'installazione dell'impianto, è stata applicata una d.d.p. Dopo 24 ore, si è registrato un calo d'intensità, cui è seguito un ulteriore calo nei successivi 6 giorni, senza registrare alcun recupero dei cedimenti.

Dopo questa prima settimana d'applicazione, la d.d.p.

è stata aumentata, cui non è seguito alcun calo nelle successive 24 ore. Durante questa seconda fase, durata pochi giorni, si è registrato un recupero dei cedimenti, frazione di quello totale.

Dopo l'immissione di molta acqua nel terreno, i fessurimetri hanno registrato un ulteriore recupero dei cedimenti.

Il recupero totale è stato di circa il 60 % del cedimento differenziale totale.

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 m non è presente la falda. Da esse è anche emerso che i valori di R_p e R_I sono calati di circa il 10 % nel volume di terra trattato col campo elettrico.

A distanza di dodici anni, dopo le estati 2003, 2005 e 2007, e dopo periodi piovosi e siccitosi, non si registra alcun movimento relativo del terreno o della costruzione. Non è stato eseguito alcun ulteriore intervento.

BIBLIOGRAFIA

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

ARMILLOTTA P. (2000) - *Consolidamento e recupero di cedimenti in terreni coesivi mediante elettrosmosi*. Convegno sul tema "La Geofisica strumento di monitoraggio ambientale". In "GEOFLUID 2000", V. Illi-ceto ed. Piacenza 4 – 7 ottobre 2000 (in stampa).

ARMILLOTTA P., 2002, *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*, Atti XXI Convegno Nazionale di Geotecnica, AGI, L'Aquila.

EVANGELISTA A. (1995) – Valutazioni teoriche e osservazioni sperimentali sui processi di trattamento dei terreni sulle modifiche indotte – Atti del XIX Convegno Nazionale di Geotecnica – A.G.I., Pavia 19/21 settembre 1995, Vol. II – Il miglioramento e il rinforzo dei terreni e delle rocce.

SCAGLIONI A. (1992) – Geologia d'urgenza nelle calamità naturali, aspetti tecnici e legislativi – GEO-GRAPH

VENIALE F. (1978) – Consolidazione elettrosmotica e chimica – Atti del Seminario su Consolidamento di terreni e rocce in posto nell'ingegneria civile, Stresa, maggio 1978.