

STABILITÀ NEL TEMPO DEI TERRENI TRATTATI CON GEL DI SILICE

Omaggio della



ING. GIOVANNI RODIO & C. - S.p.A.
IMPRESA COSTRUZIONI SPECIALI

STABILITÀ NEL TEMPO DEI TERRENI TRATTATI CON GEL DI SILICE STABILITY OF THE SOILS TREATED WITH SILICA GELS

Ing. Achille Balossi Restelli / Dr. Luigi Ginetti dell'Ufficio Tecnico della Ing. Giovanni Rodio & C.

Sommario

L'impiego del gel di silice per migliorare le caratteristiche meccaniche dei terreni si è andato sempre più diffondendo in questi ultimi anni. Sovente il terreno così migliorato deve, in accordo con il progetto, mantenere nel tempo le caratteristiche ottenute.

Nella nota vengono descritti in dettaglio i fenomeni negativi che errate tecnologie comportano agli effetti della stabilità nel tempo dei gel di silice, mentre viene dimostrata, anche con esempi, la possibilità effettiva di ottenere trattamenti durevoli. Questa possibilità è da tenere presente in quanto permette di ottenere notevoli economie nelle realizzazioni delle opere consentendo una riduzione dei costi globali delle opere stesse.

Summary

The use of hard silica gels as a means of improving the mechanical properties of the soils has extensively spread in these last years. It is often required the soil to maintain unaltered the properties so acquired.

In the paper the negative phenomena brought about by incorrect grouting practices and adversely affecting the gel durability are described in detail.

It is exemplified instead that it is quite possible to achieve durable treatments. This fact should be kept in due consideration inasmuch as soil stabilisation by means of silica gels may result in remarkable economies in the realisation of the works with ensuing reduction of the global cost.

1. Generalità

Da una ventina d'anni i gel di silice a reagente organico vengono sempre più impiegati per il consolidamento e l'impermeabilizzazione dei terreni fini.

La stabilità nel tempo di tali gel rappresenta un argomento di primaria importanza nei riguardi dell'utilizzazione di questo sistema d'iniezione.

Nella pratica infatti si devono sovente eseguire interventi aventi carattere definitivo, cioè le migliorate caratteristiche meccaniche conferite al mezzo trattato con iniezione devono perdurare nel tempo.

2. Meccanismo di formazione del gel di silice

Il silicato di sodio commerciale non ha una formula chimica ben definita essendo formato da vari silicati e cioè il metasilicato, il disilicato ed il tetrasilicato di sodio.

È invalso l'uso di caratterizzarlo mediante: il peso specifico ($1,36 \div 1,38 \text{ kg/dm}^3$), la densità ($38 \div 40 \text{ Bé}$), il rapporto $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ ($3,2 \div 3,4$) e la viscosità (100 cP). Il silicato di sodio è un colloide allo stato sol che contiene gruppi SiO_2 negativi.

Il reagente, qualsiasi sia la natura, modifica l'equilibrio elettrico dei gruppi SiO_2 che li manteneva distaccati; si formano allora delle catene dei gruppi base SiO_2 ed il fenomeno si esteriorizza con un irrigidimento dell'insieme. La resistenza del gel così ottenuto è funzione della natura del reagente e della quantità d'acqua presente nella reazione.

Nella pratica bisogna utilizzare dei reagenti « indiretti », dei reagenti cioè che sviluppano dopo un certo tempo e mediante una reazione primaria interna (idrolisi, reazione di Cannizzaro) quei composti chimici capaci di modificare l'equilibrio elettrico dei gruppi SiO_2 .

Diversi procedimenti sono stati brevettati per ottenere questo scopo, citiamo i più noti:

- esteri organici che mediante idrolisi danno luogo ad acidi ed alcoli (brevetto Solétanche-Rodio);
- formammide che mediante idrolisi dà luogo ad acido formico ed ammoniaca (brevetto Diamond Alkali);
- gliossale che mediante reazione di Cannizzaro forma acido glicolico (brevetto Nobel-Bozel).

3. Evoluzione dei gel nel tempo

Diversi autori francesi ed americani (1, 2) hanno messo in evidenza, studiando il comportamento di sabbie trattate con silicato di sodio, che le variazioni di permeabilità nel tempo erano funzione del tipo di reagente e che in nessun caso si aveva la distruzione totale del gel.

Studi successivi (3) hanno dimostrato che l'aumento di permeabilità (e quindi il tasso di dissoluzione del gel) era funzione delle dimensioni dei grani della sabbia (figura n. 1).

Quindi, se in un primo tempo si poteva pensare ad una solubilità del gel in acqua, questi studi hanno dimostrato priva di fondamento questa ipotesi, infatti:

- se lo ione SiO_2 fosse solubile il fenomeno non dipenderebbe dal reagente usato per la gelificazione;

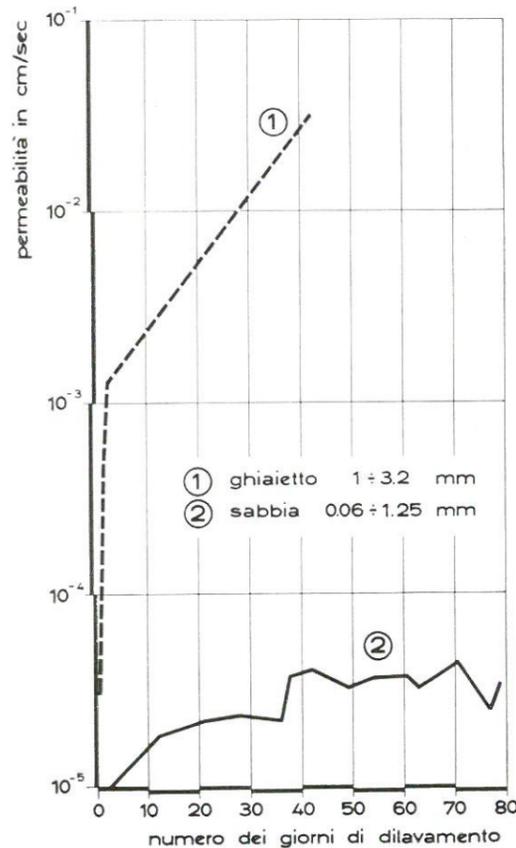


fig. 1

- se lo ione SiO_2 fosse solubile la dissoluzione del gel dovrebbe proseguire fino alla distruzione totale del gel stesso;

- se lo ione SiO_2 fosse solubile la dissoluzione del gel dovrebbe essere indipendente dalle dimensioni del supporto e ciò contrasta con i risultati mostrati in figura 1.

Recenti ricerche (3) hanno dimostrato che nel gel neformato la reazione che ha portato alla gelificazione non si arresta ma continua lentamente sotto forma di policondensazione delle macromolecole di silice: come limite si arriva alla separazione di due fasi, gel policondensato - acqua silicizzata. Questo fenomeno è chiamato « sineresi ».

Affinché si possa verificare il fenomeno, il gel non deve aderire al supporto, deve cioè essere libero di ridurre il proprio volume. Nella figura 2 viene messo in evidenza come variando le di-

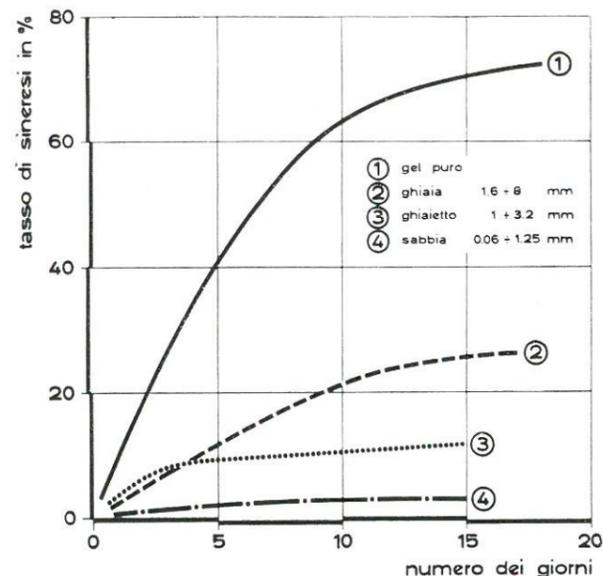


fig. 2

mensioni del supporto il fenomeno vari di intensità.

Come era stato preconizzato dalle ricerche del 1957 (1, 2) il tasso di sineresi dipende dalla na-

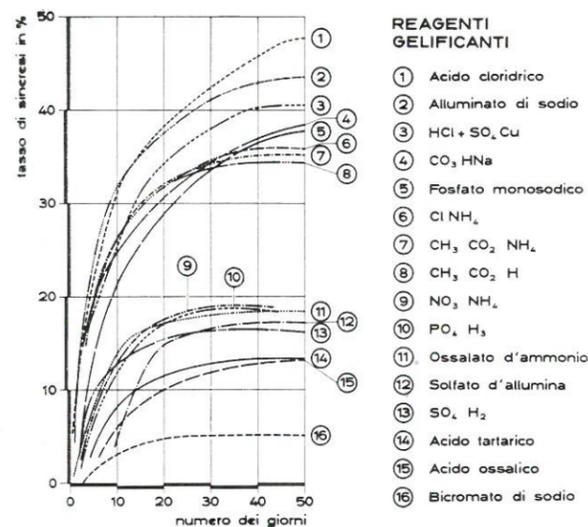


fig. 3

tura del reagente (figura 3). L'osservazione più importante comunque, ai fini di un consolidamento o di una impermeabilizzazione, è che la

sineresi si esaurisce in ogni caso entro un mese (figura 3) dalla formazione del gel.

Da quanto esposto risulta evidente che è possibile ottenere gel di silice stabili nel tempo e che quindi le caratteristiche meccaniche conferite dai gel al terreno trattato hanno la possibilità di sussistere indefinitamente; per ottenere questo scopo è però assolutamente necessario:

- uno studio accuratissimo delle caratteristiche del supporto e quindi delle dimensioni dei grani del terreno da trattare (4);
- evitare che il gel abbia la possibilità di ridurre il proprio volume, perciò se nel terreno sono presenti grosse cavità o fratture, queste devono essere riempite prima mediante altri tipi di miscele che non presentano questo inconveniente (ad esempio miscele cementizie);
- la pressione d'iniezione della miscela al silicato deve essere contenuta in modo che si abbia una « impregnazione » del supporto e non una rottura del terreno secondo vie preferenziali.

È quindi solo una corretta tecnologia fondata su accurati studi preliminari che può portare ad un risultato sicuro.

Gli esempi di interventi andati a buon fine sono innumerevoli (4, 5, 6, 7) e diversi sono stati eseguiti più di dieci anni or sono e mantengono costantemente nel tempo le caratteristiche di resistenza conferite al terreno.

4. Esempi di trattamenti eseguiti da diversi anni

Esponiamo qui di seguito qualche esempio di particolare rilievo, fra i molti, di trattamento eseguito in passato con gel di silice.

- Pensiamo che a tutti sia noto il ruolo di primaria importanza che i gel all'acetato hanno assunto durante la costruzione a Parigi delle nuove linee di metropolitana della rete celere regionale.

Al riguardo esiste una notevole documentazione, a cura soprattutto della Società Solétanche, che ha potuto eseguire un lavoro così arduo approfittando dell'esperienza acquisita nel campo delle miscele all'acetato durante molti anni di studi ed applicazioni. Pensiamo possa interessare, agli effetti della stabilità nel tempo del gel, il fatto che è stato ripreso nella zona di Neuilly, a 16 mesi circa dall'iniezione, uno scavo di terreno trattato con un gel di silice.

Il fronte d'attacco si è mantenuto integro durante il periodo di sosta ed il terreno è apparso assolutamente ben consolidato; non si è notato alcun segno di instabilità del gel.

- Lavoro assai importante d'iniezione di gel è stato eseguito alla diga di Place Moulin in



Fig. 4 - Vista dall'alto della collina, sopra l'asse della galleria in costruzione, della bocca del « camino » formatosi in seguito al dissesto che ha riempito di materiale franato 30 m circa di scavo già completato.



Fig. 5 - Zona del dissesto durante gli scavi eseguiti dopo l'intervento di consolidamento con iniezioni di miscela silicato-acetato caricata con R 70. Si possono notare: le centine che armavano la galleria prima del dissesto completamente accartocciate dal movimento franoso; il terreno franato, così bene ricompreso e consolidato da sembrare roccia; venature marron di gel caricato con R 70; canne a valvola. Sopra le nuove centine sono infilati pochi marciavanti di protezione. L'arco di terreno all'estradosso dello scavo è stato reso autoportante dalle iniezioni.

Valle d'Aosta nella primavera dell'anno 1966. Nella zona più depressa delle fondazioni della diga (altezza in quel punto di 154 m), quindi soggetta a carico idraulico notevole, la continuità della roccia è interrotta da grandi faglie aventi andamento grosso modo parallelo all'asse vallivo.

Tali faglie sono riempite da materiali molto fini originati da fenomeni di frizione e da sabbie fini di deposito.

Le iniezioni di miscela a base di cemento, eseguite negli anni precedenti in modo assai intenso, non erano riuscite ad impermeabilizzare la zona, che era rimasta sede di importanti percolazioni d'acqua.

Con un trattamento di gel di silice (all'acetato) le perdite, che assommavano a 10 l/sec. hanno potuto essere ridotte alla quantità trascurabile di 0,3 l/sec. quantità che ancora oggi viene registrata dai piezometri posti a valle diga e che non ha mai accennato ad aumentare.

— Altro lavoro, a nostro avviso assai interessante nei riguardi della stabilità nel tempo del gel, è il trattamento di consolidamento del terreno sabbioso sotto le fondazioni di un edificio di 12 piani di proprietà del « Office National d'Etudes et Recherches Aéronautiques ».

L'edificio subiva gli effetti di un'insufficiente portanza del terreno di fondazione.

Con iniezioni di gel all'acetato si è conferito all'insieme una resistenza media di 8 kg/cm². L'intervento è stato compiuto nel 1959. Da allora non si sono più verificati cedimenti delle fondazioni.

— Segnaliamo inoltre i lavori d'impermeabilizzazione dei terreni d'imposta della diga Lac Noir in Francia (località: Vosgi - Alto Reno) eseguiti negli anni 1942-1945.

Per le iniezioni sono state utilizzate miscele a base di cemento ed argilla, ma soprattutto a base di silicato di sodio. Il reagente allora impiegato era alluminato di sodio.

Il gel di silice comunque, prodotto dalla reazione, è del tutto simile a quello del nostro caso.

Quindici anni dopo il termine dei lavori l'efficacia delle iniezioni, controllata regolarmente, non è diminuita se non di quantità assolutamente trascurabili.

Siccome le acque qui sono molto pure, è pensabile che quel minimo aumento di permeabilità sia dovuto ad una leggera dissoluzione del cemento.

— Vi sono molti altri esempi di fondazione di dighe impermeabilizzate con miscele chimiche a base di silicato e così pure innumerevoli esempi di consolidamenti di terreno aventi carattere permanente (Biblioteca Rodio - Milano).

5. Additivo « antisineresi »

Due anni fa sono iniziati studi per la ricerca di un additivo da immettere nella miscela chimica a base di silicato di sodio allo scopo di eliminarne totalmente la « sineresi ».

La ricerca è stata necessaria per far fronte ad alcuni tipi di problemi la cui soluzione avrebbe comportato la presenza nel terreno di gel sotto forma lenticolare (ad es. trattamento mediante « claquages » di rocce semicoerenti tipo argilloscisti o serpentinoscisti); lo studio non è dunque stato fatto per i terreni alluvionali che sono ben consolidabili con i metodi finora utilizzati, bensì per terreni dove la penetrabilità al gel è al limite.

Questa apparente incongruenza è spiegata in questo modo:

- 1) per iniettare questo genere di terreno si deve spingere la pressione d'iniezione a valori elevati;
- 2) malgrado iniezioni preliminari di miscela di cemento, in quei terreni ove vi è scistosità è sempre possibile che le miscele al gel seguano delle vie preferenziali (e di conseguenza si avrà ancora sineresi);
- 3) il claquage ottenuto con miscele a base di cemento produce una compattazione meccanica del terreno: lo strato di cemento non aderisce alle due pareti di terreno scostato con la pressione;
- 4) il claquage ottenuto a mezzo di gel caricato consente di raggiungere non solamente la compattazione meccanica, ma il consolidamento delle due fasce di terreno che contornano la fessura creatasi per pressione: si avrà una vera e propria unione di queste due facce di terreno, unione che impedisce ogni passaggio all'acqua (al contatto).

L'additivo ricercato è stato trovato (si tratta di una cenere chiamata « R 70 ») e la sua aggiunta non fa aumentare il prezzo della miscela: infatti la presenza nella miscela di R 70 provoca un incremento della resistenza, per cui, a pari volume per ottenere una resistenza a compressione uguale a quella del gel puro è possibile risparmiare un certo quantitativo di silicato di sodio.

Il sistema è stato dalla Società Rodio brevettato alla fine del settembre 1969.

Questa miscela ha già dato ottimi risultati nello scavo di una galleria dell'autostrada Sestri Levante-Livorno (vedere foto nn. 4-5-6). Per lo scavo si sono dovuti impiegare degli esplosivi e si è potuto constatare che non era avvenuta alcuna infiltrazione d'acqua malgrado le esplosioni.

Stiamo ora impiegando il gel caricato in due nuovi cantieri, dove i terreni hanno caratteristiche simili a quello della galleria sopradescritta.

Casalmiocco, 4 Maggio 1970



Fig. 6 - Particolare del fronte di scavo. Come si può facilmente notare non vi è traccia di « sineresi ». Le venature marron sono formate dal gel caricato; se fosse gel puro, avendo provocato il « claquage » un'apertura dello spessore di 2-3 cm, si sarebbe senza dubbio innescato il fenomeno della « sineresi ». Qui invece tutto appare normale e completamente asciutto. Il fronte di scavo è rimasto allo scoperto, non armato, per più di 20 giorni durante le feste natalizie.

Bibliografia:

- 1) CARON C., CAMBEFORT H.: Le délavage de silicate de soude - 4^o Congrès Int. Méc. Sols et Travaux Fond., Londra 1957.
- 2) POLIVKA M., WITTE L.P., GNAEDINGER J.P.: Field Experiences with Chemical Grouting - Journal A.S.C.E., SM 2/57.
- 3) CARON C.: Consolidation des sables par injection de gel de silice - A.I.T.B.T.P., n. 213 sept. 1965.
- 4) BALOSSI RESTELLI A., GINETTI L.: Un esempio di trattamento preventivo misto d'iniezioni e di drenaggio per rendere possibile lo scavo di una galleria dell'autostrada Napoli-Bari - 1^o Convegno Internazionale sui Problemi Tecnici nelle Costruzioni di Gallerie, Torino 1969.

5) BALOSSI RESTELLI A.: Trattamento preventivo, mediante iniezioni, di terreni difficili sotto falda per consentire lo scavo di grandi gallerie - 1^o Convegno Internazionale sui Problemi Tecnici nelle Costruzioni di Gallerie, Torino 1969.

6) BALOSSI RESTELLI A.: Trattamento preventivo mediante iniezioni di terreni incoerenti per consentire lo scavo di gallerie metropolitane sotto zone edificate, senza che intervengano cedimenti nelle fondazioni delle opere sovrastanti - 1^o Convegno Internazionale sui Problemi Tecnici nelle Costruzioni di Gallerie, Torino 1969.

7) BALDOVIN G., BELLINI A., MASCARDI C., JAMIOLKOWSKI M., JURINA M., TORNAGHI R.: Iniezioni nel terreno di Milano - Atti dell'8^o Convegno di Geotecnica - Cagliari 1967.