

INTERAZIONE DEI SISTEMI CEMENTIZI E RESINOSI CON TERRENI E ROCCE

Mario Collepari

Dipartimento di Scienza dei Materiali e della Terra, Facoltà di Ingegneria, Università di Ancona.

SOMMARIO

I materiali cementizi o di natura organica utilizzati per il consolidamento e la stabilizzazione di rocce e terreni possono interagire con l'ambiente circostante. In generale, per i materiali cementizi l'interazione con le rocce o il terreno da consolidare può manifestarsi in presenza di gesso/anidrite con la formazione di ettringite/thaumasite. Questi prodotti possono dar luogo a fenomeni distruttivi riducendo la stabilità a lungo termine del sistema consolidato. Al contrario, le resine polimeriche di natura organica non provocano alcun degrado del sistema consolidato, ma esse sono considerate dannose dal punto di vista tossicologico.

1. INTRODUZIONE

Esistono diversi trattamenti geotecnici per impermeabilizzare e/o consolidare rocce e terreni. Alcuni di questi - quali l'iniezione in roccia o terreno e la stabilizzazione chimica del terreno - si basano sull'impiego di materiali sintetici ed aggiuntivi rispetto ai materiali naturali ed originari.

L'effetto impermeabilizzante e consolidante consiste spesso nel semplice riempimento dei vuoti o delle fessure preesistenti con il materiale sintetico ed in minor misura in una più complessa interazione tra materiale aggiuntivo e quello originario.

In entrambi i casi tra materiale originario naturale (roccia/terreno) e materiale sintetico aggiuntivo (cemento, resina, ecc.) si stabilisce un contatto interfacciale, più o meno diffuso a seconda della natura del sistema da consolidare o impermeabilizzare e della particolare tecnica impiegata.

L'obiettivo primario del presente rapporto è quello di analizzare criticamente le interazioni negative che a medio e lungo termine possono svilupparsi all'interfaccia tra roccia o terreno da una parte, e materiale sintetico consolidante dall'altra, ancorché a breve termine si sia registrato un positivo effetto in termini di miglioramento nelle usuali proprietà geotecniche (resistenza meccanica, modulo elastico, coesione, angolo di attrito, permeabilità all'acqua, ecc.). In altre parole, laddove si manifestino queste interazioni esiste il rischio di instabilità a lungo termine dell'intero sistema consolidato.

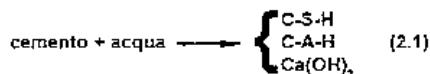
Un secondo obiettivo del presente lavoro è quello di esaminare le possibili interazioni negative del sistema consolidante con l'ambiente circostante in termini di tossicità ambientale.

In linea di massima i rischi di instabilità sono connessi con l'impiego di materiali consolidanti inorganici (cemento e silicati), mentre i problemi di tossicità ambientale sono legati all'utilizzazione di prodotti organici.

Nei paragrafi che seguono verranno esaminati i più importanti materiali consolidanti che nelle due summenzionate applicazioni geotecniche - iniezione e stabilizzazione dei terreni e/o delle rocce - possano presentare problemi di instabilità o tossicità.

2. IL CEMENTO

Il cemento Portland è sicuramente il materiale più largamente impiegato sia nella stabilizzazione del terreno con il quale viene intimamente mescolato, sia nel consolidamento di rocce o terreni entro i cui vuoti viene iniettato in forma di *grout*. In entrambi i casi l'effetto è legato alla reazione tra acqua e cemento Portland:

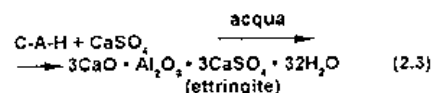
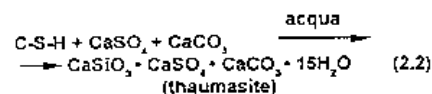


A seguito dell'idratazione si sviluppano gli idrosilicati

di calcio (C-S-H), ai quali si deve il maggior effetto consolidante, gli alluminati di calcio idrati (C-A-H) e l'idrossido di calcio.

Il maggior rischio di instabilità a lungo termine del sistema consolidante consiste nella interazione tra i prodotti di idratazione del cemento (C-S-H e soprattutto C-A-H) con l'eventuale presenza di minerali solfatici che, in forma di gesso $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ o di anidrite CaSO_4 , possono essere presenti nel terreno o nella roccia da consolidare (1,2).

Le interazioni possono essere di due tipi, entrambe di carattere distruttivo e dirupante per l'aumento di volume associato alla formazione di thaumasite o ettringite in rocce in terreni umidi:



La formazione di ettringite (nota anche come "bacillo del cemento") è molto più frequente che non quella della thaumasite ancorché quest'ultima sia molto più distruttiva della prima (3). La formazione di thaumasite, infatti, richiede la coesistenza di calcare (CaCO_3) accanto al gesso o anidrite, ma soprattutto che la temperatura si mantenga per lungo tempo - sia pure non continuamente - tra 0°C e 10°C (4).

Nelle applicazioni geotecniche i rischi di interazione tra cemento e terreno/roccia aumentano con l'aumento della superficie di contatto all'interfaccia tra i due componenti. Ciò significa che, in linea di massima, il rischio è maggiore nella stabilizzazione dei terreni dove il cemento viene intimamente mescolato con terreno preliminarmente suddiviso: questo tipo di problema è già stato segnalato nella letteratura tecnica specifica (1, 2, 5). Per quanto riguarda le iniezioni, il rischio è maggiore nel caso di *grouting* di permeazione ed idrofrazzatura che non in quello di compattazione (Figura 1) dove il contatto interfacciale è limitato all'area superficiale del bulbo di *grout*.

Analogamente nella tecnica del *jet grouting* (6, 7) il rischio di instabilità, legato alla formazione di thaumasite e soprattutto di ettringite, è maggiore quando il terreno è intimamente mescolato *in situ* con il *grout* stabilizzante che non quando il terreno è prima scavato e rimosso e successivamente rimpiazzato da una malta per formare strutture impermeabili e resistenti in forma di pile, diaframmi, ecc.

D'altra parte, tanto nella tecnica del *grouting* per compattazione, quanto in quella di *jet grouting* per

escavazione e sostituzione del terreno con malta, il rischio di interazione tra terreno solfatico e sistema cementante è fortemente ridotto non solo dalla minore superficie interfacciale ma anche dalla maggiore compattazione ed impenetrabilità del sistema cementizio consolidante purché venga adottato un basso rapporto acqua/cemento (a/c) grazie all'impiego di additivi superfluidificanti (8). È noto, infatti, che con rapporti a/c nell'intervallo di 0.45-0.55 è assicurata la durabilità del sistema cementato purché il contenuto di solfato non superi il valore di 3000 mg per 1 Kg di terreno (9).

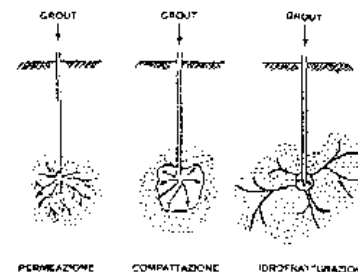


Fig. 1 - Grouting di permeazione, di compattazione e di idrofrazzatura.

Tuttavia, laddove il rapporto acqua/cemento per la particolare tecnica di consolidamento debba essere necessariamente più elevato - iniezioni in roccia, *grouting* del terreno per permeazione - e/o laddove il contenuto di minerale solfatico superi le soglie di 3000 mg per Kg di terreno è assolutamente indispensabile impiegare cementi di per sé più resistenti ai solfati se si vuole evitare il rischio di instabilità provocato dalla formazione di thaumasite e soprattutto di ettringite. Tra i cementi disponibili sul mercato, in accordo con le nuove normative europee vigenti anche in Italia, si possono menzionare i cementi d'altoforno e quelli pozzolanici ed in particolare quelli ad alto contenuto di topa e di pozzolana codificati rispettivamente con i simboli CEM III/C e CEM IV/B (10).

Laddove - con indagini chimiche, mineralogiche o petrografiche - si sia accertata la presenza di gesso o anidrite nel sistema da trattare, o laddove se ne sospetti la presenza, la scelta del cemento per la stabilizzazione del terreno e l'iniezione consolidante della roccia o del terreno può essere preliminarmente saggiata attraverso il cosiddetto *test* di Anstett (11). La prova consiste nel mescolare una parte di gesso naturale con una pasta di cemento pre-idratata per 14 giorni, macinata ed essiccata. La polvere così ottenuta è umidificata con il 6% di acqua e sottoposta a pressione (2 MPa per 1 minuto) entro uno stampo cilindrico

per ottenere, dopo sformatura, un provino (diametro = 30 mm e altezza circa 40 mm). Il provino è mantenuto in ambiente saturo di umidità e deve conservare la sua iniziale dimensione (aumento del diametro $\leq 1\%$) per testimoniare la insensibilità alla presenza di minerali solfatici nella roccia o nel terreno da consolidare.

Nella Figura 2 sono mostrati a confronto due provini confezionati con cemento d'altoforno (CEM III/C 32.5) solfato-resistente e con cemento Portland (CEM I 42.5 R) particolarmente vulnerabile dalla presenza di gesso.

Il saggio di Anstett, mutuato dalla tecnologia di consolidamento delle murature degli edifici storici mediante iniezioni cementizie (12) è molto severo ed evidenzia molto bene, ed in tempi molto rapidi (poche settimane), il rischio di instabilità a lungo termine (qualche anno) soprattutto dei terreni da stabilizzare con miscele cementizie. Il vantaggio del saggio di Anstett, oltre che nella sua rapidità, consiste nella semplicità della prova per la quale non si richiede una specifica competenza da parte dello sperimentatore né una sofisticata attrezzatura di laboratorio.

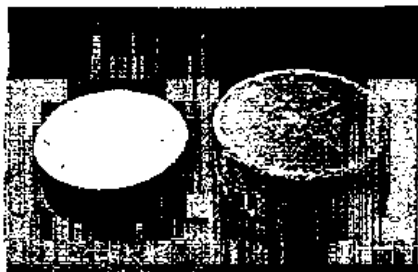
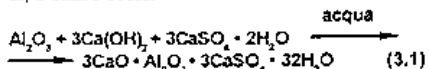


Fig. 2 - Saggio di Anstett: provino di cemento insensibile al gesso (a sinistra) e vulnerabile dalla presenza di gesso (a destra).

3. NUOVI MATERIALI CEMENTIZI IN GEOTECNICA

Un nuovo sistema cementizio per la stabilizzazione (13) ed il disinquinamento (14) dei terreni è stato recentemente sviluppato in Giappone. Paradossalmente, esso è basato proprio sulla formazione di ettringite che, per la sua cattiva "reputazione", è noto anche come "bacillo del cemento". Il processo è basato sulla formazione di ettringite attraverso l'aggiunta al terreno di una miscela di allumina - Al_2O_3 -, calce idrata - $Ca(OH)_2$ - e gesso - $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ - tutti sottoprodotti provenienti da processi industriali e disponibili, quindi, a basso costo:



Il paradosso consiste nel fatto che da una parte l'ettringite formata con la reazione (3.1) consolida il terreno attraverso la fissazione di una rilevante quantità di acqua di cristallizzazione (nell'ettringite ci sono 32 molecole di H_2O) ed addirittura lo disinquina da eventuali metalli pesanti tenacemente adsorbiti e fissati dalla stessa ettringite, dall'altra lo stesso prodotto formato attraverso la reazione (2.3) è fonte di instabilità per l'eccessiva capacità di umidità provocata dal carattere espansivo della reazione stessa.

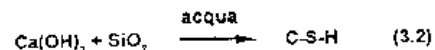
Una possibile interpretazione per spiegare il paradosso, cioè per giustificare l'effetto positivo dell'ettringite formata con la reazione (3.1) e quello negativo dell'ettringite formata con la reazione (2.3), può essere trovata nella diversa morfologia microstrutturale dei due tipi di ettringite.

E' già noto, attraverso le indagini eseguite nel settore della tecnologia del calcestruzzo, che l'ettringite può essere presente in due forme (15):

- ettringite "colloidale" con elementi fibrosi di ridotte dimensioni a livello microstrutturale (Figura 3) capace di assorbire rilevanti quantità di acqua e conseguentemente di rigonfiare;
- ettringite cristallizzata con elementi fibrosi ben accresciuti a livello microstrutturale (Figura 4), stabile dimensionalmente in presenza di acqua.

La formazione dell'ettringite "colloidale", che coincide con quella responsabile della instabilità dimensionale dei sistemi cementizi in presenza di gesso secondo la reazione (2.3), è favorita dalla presenza di calce. L'ettringite ben cristallizzata ed incapace di fenomeni dirompenti, che dovrebbe coincidere con quella proposta per consolidare e disinquinare i terreni secondo la reazione (3.1), è favorita dalla carenza di calce e quindi da un pH ambientale relativamente basso (15) o da un trattamento termico a 60-80°C che favorisce una migliore cristallizzazione del prodotto (16). Poiché è da escludere che questo trattamento termico sia stato applicato dai ricercatori giapponesi (13, 14) per il consolidamento del terreno attraverso la formazione di ettringite, si deve ritenere che il proporzionamento degli ingredienti - allumina, calce e gesso - sia rigorosamente controllato per far decorre il processo (3.1) in difetto di calce e favorire quindi la formazione di una ettringite cristallizzata ed incapace quindi di deteriorare a lungo termine il terreno consolidato.

In alternativa al cemento, la calce è stata largamente impiegata come sistema consolidante soprattutto nella stabilizzazione dei terreni. Il meccanismo di stabilizzazione della calce è anch'esso associato (5) prevalentemente alla formazione di materiale idrosilicatico (C-S-H) cementante attraverso la seguente reazione:



dove la silice - di natura amorfa o mai cristallizzata cioè di natura pozzolanica - è disponibile nel terreno, soprattutto se argilloso. Per ridurre l'aleatorietà del processo consolidante - derivante da una presenza più o meno erratica di silice amorfa nel terreno - si è andata sempre più diffondendo la tecnica di trattare il terreno non già con calce ma con una miscela di calce e cenere volante - ricca in silice amorfa e pozzolanica - e capace di assicurare il decorso del processo (3.2) indipendentemente dalla presenza di silice amorfa nel terreno da stabilizzare. La cenere volante (largamente disponibile già in forma finemente suddivisa ed a basso costo come residuo della combustione del carbone nelle centrali termo-elettriche) è stata impiegata, per esempio, con la calce per il trattamento di un loess in Illinois al fine di produrre strati stabilizzati in spessori fino a circa 8 metri (5).

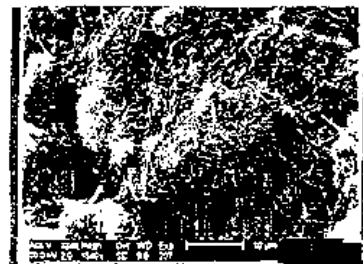


Fig. 3 - Fotografia al microscopio elettronico a scansione di ettringite "colloidale" mal cristallizzata.

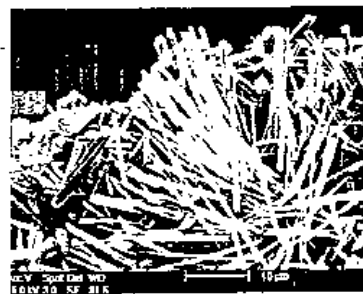
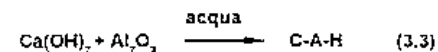


Fig. 4 - Fotografia al microscopio elettronico a scansione di ettringite ben cristallizzata.

In realtà, anche il sistema calce-cenere volante, ai pari del cemento, è potenzialmente vulnerabile in presenza di terreni gessosi o di acque di falda solfatiche. Questo timore può essere desunto dalle applicazioni di questo materiale nel consolidamento delle antiche murature a sacco negli edifici storici (17). Infatti, oltre alla silice, nella cenere volante è presente dell'allumina (Al_2O_3) che può interagire con la calce secondo la reazione (3.3):



Gli alluminati C-A-H, che si formano secondo questo processo, contribuiscono a breve termine ad un consolidamento del terreno da stabilizzare sia pure in misura minore rispetto al C-S-H. Tuttavia, essi sono altamente vulnerabili all'attacco aggressivo del gesso eventualmente presente nel terreno secondo lo schema (2.3) già illustrato, che porta alla formazione di ettringite colloidale.

Pertanto, anche la miscela calce-cenere volante che si intende adottare per la stabilizzazione di un terreno sospettato di contenere solfati, dovrebbe essere preliminarmente sottoposta al test di Anstett precedentemente illustrato.

Il processo di stabilizzazione basato sull'impiego di calce miscelata a silice pozzolanica, per lo più in forma di cenere volante, potrebbe suggerire un impiego di altre combinazioni calce-silice anche nel settore del grouting. Per esempio, in questi ultimi anni, un altro importante materiale - denominato fumo di silice - si è reso disponibile nel settore dei materiali cementizi (18).

Il fumo di silice si differenzia dalla cenere volante per due fondamentali caratteristiche:

- un maggior contenuto di silice pozzolanica (95% contro 45% circa) ed una sostanziale assenza di Al_2O_3 ;
- dimensione dei granuli decisamente minore (0.01-1 μm contro 1-100 μm).

Soprattutto la caratteristica granulometrica rende il fumo di silice - opportunamente trattato - un eccellente candidato alle iniezioni di rocce e terreni in una posizione di superiorità prestazionale rispetto ai microcementi ed in concorrenza con i prodotti liquidi impiegati per i grout chimici.

Il fumo di silice (che all'osservazione del microscopio elettronico a scansione si presenta in forma di sferette sub-microniche tra loro aggregate; Figura 5) può essere disaggregato in particelle individuali attraverso un processo di dispersione in acqua con additivi superfluidificanti (8). La Figura 6 illustra la distribuzione dimensionale, mediante laser-granulometria, di un fumo di silice disperso in acqua mediante onde

ultrasoniche senza e con aggiunta di un superfluidificante poli-acrilico CAE (*Carboxylic Acrylic Ester*): si può osservare che il fumo di silice sospeso in acqua senza additivo si presenta in forma di aggregati fino a circa 90 µm; in presenza del disperdente poli-acrilico CAE (19), invece, le microsfele di fumo di silice si disaggregano fino a risultare tutte al di sotto di 1 µm.

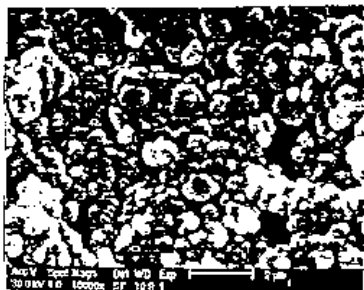


Fig. 5 - Fotografia al microscopio elettronico a scansione del fumo di silice.

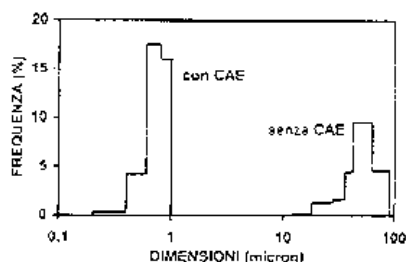


Fig. 6 - Distribuzione particellare con laser-granulometro del fumo di silice senza e con aggiunta di superfluidificante poli-acrilico CAE (2%).

Il fumo di silice trattato con disperdente poli-acrilico CAE per disaggregare le microsfele, ed addizionato con acqua satura di calce per creare le condizioni di cementazione *in situ* in base alla reazione (3.2), può essere impiegato come un sistema da iniettare per consolidare terreni o sigillare fessure in rocce in modo più efficace che non cementi, "microcementi" e bentoniti. Infatti, adottando alcuni dei convenzionali

"rapporti di iniettabilità" per terreni (3.4) e rocce (3.5):

$$\frac{D_{\text{Marrone}}}{D_{\text{Grout}}} > 25 \quad (3.4)$$

$$\frac{\text{fessura roccia}}{D_{\text{Grout}}} > 5 \quad (3.5)$$

si possono stabilire i criteri riportati in Tabella 1 per il consolidamento con *grout* di terreni e rocce.

In aggiunta alle considerazioni di carattere particellare sopra illustrate, e molto positive per l'iniettabilità del fumo di silice nei consolidamenti geotecnici, occorre sottolineare l'altro aspetto che maggiormente interessa per l'argomento del presente rapporto - la stabilità dimensionale a lungo termine del *grout* iniettato - e che può essere così riassunto:

- l'assenza di allumina nel fumo di silice porta ad escludere fenomeni di instabilità a lungo termine associati alla formazione di ettringite in terreni contenenti gesso o acque di falda solfatiche;
- il tipo di C-S-H che si forma attraverso la reazione consolidante (5) tra calce e fumo di silice non comporta rischi di formazione di thaumasite, fenomeno molto più raro che non la formazione di ettringite, ma molto più distruttivo rispetto a questo.

Quest'ultima considerazione trova supporto e conferma nell'impiego del fumo di silice in miscele destinate al consolidamento di murature a sacco sospettate di contenere solfati e sottoposte positivamente al saggio di Anstett (18,20).

Tabella 1 - Caratteristiche del terreno/roccia e del *grout* da iniettare con probabilità di successo.

TERRENO CON D_{15} (µm)	GROUT	D_{15} (µm)
≥ 1125	CEMENTO 32.5	45
≥ 875	CEMENTO 52.5	35
≥ 625	BENTONITE	25
≥ 150	MICROCEMENTO	6
≥ 20	FUMO DI SILICE	0.8
FESSURA ROCCIA (µm)	GROUT	D_{15} (µm)
≥ 350	CEMENTO 32.5	70
≥ 275	CEMENTO 52.5	55
≥ 200	BENTONITE	40
≥ 40	MICROCEMENTO	8
≥ 4.5	FUMO DI SILICE	0.9

4. GROUT CHIMICI LIQUIDI E PROBLEMATICHE DI TOSSICITA'

A differenza dei materiali esaminati nelle precedenti sezioni 2 e 3 - sostanzialmente basati su sospensioni di particelle solide in mezzo acquoso - i *grout* chimici sono costituiti da sistemi liquidi monofasici: capaci di indurire *in situ* dopo essere stati iniettati.

I prodotti chimici impiegabili per questo settore sono tutti organici se si eccettuano i silicati (in forma di "vetro solubile") ed includono acrilammidi, resine poliuretatiche, ligninsolfonato, asfalto, ecc.(5).

Per quanto i prodotti chimici liquidi siano maggiormente e più specificamente destinati alla tecnica del *grouting* proprio per l'assenza di particelle solide che possono ostacolare l'iniezione, non è escluso potenzialmente un loro impiego nella stabilizzazione chimica dei terreni. In realtà - se si eccettua l'impiego dell'asfalto in qualche sporadica applicazione - i materiali organici sono di fatto esclusi dalla stabilizzazione dei terreni soprattutto per ragioni economiche, cosicché l'alto costo di questi prodotti ne ha di fatto limitato l'utilizzo al solo settore del *grouting* dove le sospensioni cementizie sono tecnicamente meno efficaci e talvolta impossibili (Figura 7).

La Figura 7 mostra come con i *grout* liquidi sia possibile consolidare terreni limosi fino a circa 0.01 mm impenetrabili con i *grout* a base di sospensioni solide a carattere cementante.

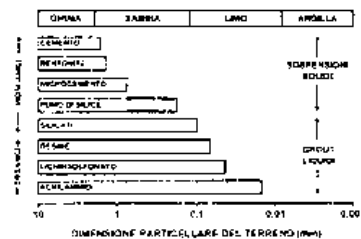


Fig. 7 - Dimensione particellare del terreno e *grout* iniettabili.

I *grout* liquidi, con l'eccezione dei silicati, sono tutti costituiti da prodotti organici capaci di consolidare i terreni o sigillare fessure in rocce grazie ad un processo di solidificazione *in situ* denominato polimerizzazione. In linea di massima, con l'esclusione dei silicati inorganici (dei quali si illustreranno più avanti gli eventuali inconvenienti legati ad un processo di instabilità), i polimeri organici non presentano alcun problema di interazione negativa con il terreno o la roccia da iniettare che possa pregiudicare la instabilità a lungo termi-

ne del sistema consolidato. Gli unici problemi, forse ancor più seri di quelli inerenti la instabilità a lungo termine del terreno o della roccia consolidata, riguardano il rischio di tossicità ambientale. Di seguito sono illustrati i relativi rischi di tossicità di alcuni *grout* chimici tra quelli maggiormente impiegati.

4.1 Ligninsolfonato

Il ligninsolfonato è un sottoprodotto liquido a base acquosa proveniente dal processo di estrazione della cellulosa del legno. Talvolta è impiegato in piccolissime dosi (0.1-0.3%) per fluidificare *grout* a base di cemento del quale favorisce la dispersione e la disaggregazione particellare. In questa forma, tra l'altro largamente impiegata anche per fluidificare il calcestruzzo (8), il ligninsolfonato è assolutamente innocuo dal punto di vista tossicologico. La sua maggiore applicazione nel settore del *grouting* chimico - cioè in forma di liquido addizionato con bicromato che ne favorisce la gelificazione attraverso un complesso processo di ossidazione - è invece considerata molto pericolosa (21) proprio per la presenza del bicromato che può essere rilasciato dal gel stesso con gravi danni delle acque di falda per la cancerogenità del bicromato. In sostanza il *grout* chimico a base di ligninsolfonato catalizzato con bicromato non pone problemi in fase applicativa per gli operatori, ma crea condizioni di rischio tossicologico per le falde acquifere che possono dilavare dal gel consolidato il bicromato presente.

4.2 Resine a base di formaldeide

I *grout* chimici a base di resine urea-formaldeide, fenolo-formaldeide, resorcinolo-formaldeide, ancorché considerate di "media" tossicità secondo una classificazione di Karol (22) stilata all'inizio degli anni '80 (Tabella 2), debbono essere considerati oggi altamente tossici per la presenza di formaldeide. Questo composto - sconosciuto oggi come altamente cancerogeno - pone due ordini di problemi: a) in fase applicativa per la volatilità della formaldeide con rischio diretto per gli operatori, a meno che non si prendano particolari provvedimenti di ventilazione e depurazione ambientali soprattutto in luoghi relativamente chiusi quali per esempio gallerie; b) in servizio per il possibile rilascio alle falde acquifere dei residui di formaldeide libera non completamente polimerizzata nel *grout* indurito e pertanto facilmente dilavabile.

4.3 Acrilammide

L'acrilammide è pericolosa soprattutto in fase applicativa per inalazione o per prolungato assorbimento attraverso l'epidermide. Di per sé l'acrilammide non

è molto pericolosa in una singola esposizione: la dose acuta per ingestione orale su roditori (LD₅₀) è molto alta ed è di circa 200 mg/Kg. Tuttavia l'esposizione prolungata o ripetuta ha effetti cumulativi con disturbi delle funzioni centrali del sistema nervoso, indebolimento delle masse muscolari e squilibri locomotori. Ai primi sintomi di avvelenamento è assolutamente necessario un ricovero ospedaliero e la esclusione da eventuali ripetizioni nella esposizione all'acrilammide (21).

Tabella 2 - Rischio di tossicità di alcuni grout chimici secondo Karol (22) nel 1982.

GROUT CHIMICO	TOSSICITÀ	RESISTENZA MECCANICA
SILICATO	BASSA	MEDIA
LIGNINSOLFONATO	ALTA	BASSA
RESINA FENOLO-FORMALDEIDE	MEDIA*	BASSA
RESINA RESORCINOLO-FORMALDEIDE	MEDIA*	BASSA
RESINA UREA-FORMALDEIDE	MEDIA*	ALTA
ACRILAMMIDE	ALTA	BASSA
ACRILATO	BASSA	BASSA
POLIURETANO	ALTA	ALTA

* Oggi la formaldeide è considerata ad alto rischio di tossicità.

4.4 Resine poliuretaniche ed epossidiche

Sebbene Karol (22) abbia classificato il poliuretano come altamente tossico (Tabella 2), Shroff ed Amin (23) sostengono di aver sperimentato ed elaborato una resina poliuretanicca non tossica oltre che prestazionalmente efficace nel grouting di terreni e rocce.

In realtà le resine poliuretanicche, come anche quelle epossidiche, non presentano di per sé specifici problemi di tossicità come per esempio le resine a base di formaldeide, ma piuttosto un generico rischio di tossicità tipico di quasi tutte le sostanze organiche artificiali: per le quali occorre escludere rischi di ingestione orale attraverso l'inquinamento delle falde acquifere.

Un rischio non direttamente tossicologico ma derivante da incendio esiste per uno dei due ingredienti

della resina poliuretanicca (tolueno-di-isocianato) il quale, alle alte temperature che si sviluppano in caso di incendio, può trasformarsi nel letale acido cianidrico.

Quest'aspetto del problema non va assolutamente sottovalutato in fase di stoccaggio o durante il processo di grouting soprattutto in ambienti chiusi e poco ventilati come per esempio le gallerie.

4.5 Silicati

I silicati, sia per il minor costo rispetto ai grout chimici di natura organica esaminati nelle precedenti sezioni del presente rapporto, sia per la non tossicità in relazione all'ambiente, sono largamente impiegati nel grouting. Secondo Mitchell (5), il consumo di silicati rappresenta il 90% rispetto alla utilizzazione di tutti i grout chimici liquidi.

La letteratura tecnica sulle modalità di impiego, sulle caratteristiche e sulle prestazioni dei silicati nello specifico settore del grouting in applicazioni geotecniche è molto vasta, ed un esame delle relative prestazioni è fuori dallo scopo del presente rapporto. In questa sede, in vista degli obiettivi primari di questo articolo, ci si limiterà ad esaminare i potenziali rischi di instabilità a lungo termine del sistema consolidato premesso che, come si è già detto, non esistono sostanziali rischi di tossicità associati all'impiego di prodotti inorganici quali sono i silicati.

I silicati impiegati nel grouting sono sostanzialmente una soluzione acquosa di silicato di sodio, con una concentrazione del 25-30% se l'obiettivo del grouting è l'impermeabilizzazione, e del 40-60% se l'obiettivo è il consolidamento. In entrambi i casi il silicato sodico è destinato a reagire con un secondo componente capace di liberare direttamente o indirettamente ioni Ca⁺⁺ in grado di formare *in situ* idrosilicati di calcio molto simili a quelli già menzionati nel consolidamento con prodotti cementizi (C-S-H). Lo ione Ca⁺⁺ può essere miscelato inizialmente con il silicato sodico poco prima di avviare il grouting, oppure può essere iniettato successivamente al silicato con la tecnica del "two-shot".

Un secondo possibile meccanismo di gelificazione dei silicati consiste nella precipitazione di silice polimerica solida, e pertanto consolidante, attivata da componente a base di amidi deboli, sali metallici, ecc.

Il rischio di instabilità a lungo termine di un terreno o di una roccia sottoposti a grouting con silicati deriva esclusivamente dalla presenza di ioni sodio (Na⁺) che accompagnano inizialmente il silicato nel prodotto liquido originale.

Gli alcali presenti nel silicato iniettato possono essere dilavati nel tempo e trasportati verso zone di terreno o roccia eventualmente ricche in silice amorfa (selce, opale, calcedonio), criptocristallina o deformata meccanicamente (quarzo, cristobalite, trimidite). In questa eventualità può innescarsi un fenomeno, già

noto nella tecnologia del calcestruzzo come reazione alcali-aggregato o più specificamente come reazione alcali-silice, dal carattere dirompente per il sistema circostante a causa della natura fortemente espansiva e localizzata di questa reazione.

Il fenomeno della reazione alcali-silice nella forma in cui è stata sopra illustrata non è stato in realtà mai segnalato nella letteratura riguardante il grouting in geotecnica, ancorché sia tecnicamente possibile. Tuttavia, danni provocati da questo fenomeno sono stati riscontrati in alcune applicazioni di calcestruzzo contro rocce precedentemente consolidate con iniezioni di silicati. In queste circostanze, la roccia contenente forti concentrazioni di sodio apportate da iniezioni di silicati può interagire con gli aggregati lapidei del calcestruzzo provocando distruttivi fenomeni espansivi all'interno del conglomerato cementizio (24).

5. CONCLUSIONI

Sono state esaminate le possibili interazioni dei prodotti impiegati in geotecnica (per stabilizzare i terreni ed iniettare rocce o terreni) con il sistema da consolidare (instabilità a lungo termine) o con l'ambiente circostante (tossicità ambientale).

I fenomeni di instabilità a lungo termine del sistema roccia/terreno consolidato non coinvolgono i prodotti resinosi di natura organica, ma solo i prodotti inorganici in polvere (cemento Portland, calce-cenere volante) o liquidi inorganici (silicati di sodio). Questi fenomeni sono sostanzialmente riconducibili alla presenza di gesso o anidrite nel terreno o nella roccia da consolidare che portino alla formazione di ettringite e/o thaumasite oppure alla interazione di alcali iniettati con talune forme di silice reattiva presenti nella roccia o nel terreno.

I rischi di tossicità ambientale non coinvolgono i prodotti inorganici a base cementizia o di silicati liquidi, ma esclusivamente i prodotti organici (resine, poliuretani, ecc.) impiegati quasi esclusivamente - ed in misura molto ridotta - come grout liquido.

Viene segnalata la possibilità di impiegare il fumo di silice, attivato con calce e disperso con additivo superfluidificante a base acrilica (CAE), per estendere l'applicazione di grout cementizi a terreni o rocce non penetrabili con i normali cementi e neppure con i più innovativi microcementi.

BIBLIOGRAFIA

- (1) SHERWOOD P.T., 1962, "The effects of sulphates on cement and lime-stabilized soils", Roads and Road Construction.
- (2) INGLES O.G. e METCAF J.B., 1973, "Soil stabilization principles and practice", Wiley, New York, 1973, 1 Ed., pag. 374.

- (3) COLLEPARDI M., 1990, "Degradation and restoration of masonry walls of historical buildings", Materials and Structures, pag. 81-102.
- (4) PAURI M. e COLLEPARDI M., 1989, "Thermo-hygro-metrical Stability of Thaumasite and Ettringite", Il Cemento, 3, pag. 177-184.
- (5) MITCHELL J.K., 1981, "Soil Improvement-State of the Art Report", Proceedings of the X International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stoccolma, Vol. 4, pag. 509-565.
- (6) YAHIRO T. e YOSHIDA H., 1973, "Induction grouting method utilizing high speed water jet", Proceedings of the VIII ICSMFE (4.3), Mosca, pag. 359-362 e 402-404.
- (7) MIKI G., NAKANISHI W., IIZUKA T., ICHINO Y. e IMAMISHI H., 1980, "Grout jetting method applied to excavation of soft ground", Technical Report.
- (8) COLLEPARDI M. e RAMACHANDRAN V.S., 1992, "Effect of Admixtures", Proceedings of the IX International Congress on the Chemistry of Cements, New Delhi, India, Vol. 1, pag. 529-570.
- (9) COLLEPARDI M., 1994, "Mechanism of Deterioration and Mix Design of Durable Concrete Structures", Proceedings of the Symposium on Durability of Concrete, Nizza, Francia, pag. 35-60.
- (10) Composizioni, Specifiche e Criteri di Conformità per i cementi. Norma UNI/ENV 197, Parte 1*, 1993.
- (11) BLONDIAU L., 1935, "Les ciments destinés a la mer doivent-ils satisfaire a l'essai de résistance chimique aux eaux sulfatées suivant le processus de Le Chatelier-Anstett?", Revue de Malénaux de Construction et Travaux Publics, pag. 262-268.
- (12) COLLEPARDI M. e COPPOLA L., 1990, "Materiali negli Edifici Storici: degrado e restauro", Edizioni Enco, Spresiano (TV), 1990, Cap. IX, pag. 4-7.
- (13) ARIIZUMI A., OOSUGA T. e KURIHARA H., "Solidification of harmful wastes and needs by means of the formation of cement bacillus and its applications", Techn. Report of the Kajima Institute of Construction technology, Giappone, citato dal riferimento (5).
- (14) KURODA E., HAYAKAWA T., OKAMOTO M. e MASHIKO K., "Stabilization effect of a new cement fixing agent (Parts I and II)", Research Institute of Technology, Tokyo Construction Co., Ltd., Giappone, citato dal riferimento (5).
- (15) Mehta P.K., 1973, "Mechanism of Expansion Associated with Ettringite Formation", Cement and Concrete Research, 3, pag. 1-6.
- (16) BELZ G., COPPOLA L., DINELLI G. e COLLEPARDI M., 1995, "Prefabricated Building Elements Based on FGD Gypsum and Ashes From Coal-Fired Electric Generating Plants", Fifth CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica fume, Slag and natural Pozzolans in Concrete,

Supplementary Papers, Milwaukee, USA, pag. 641-656.

- (17) COLLEPARDI M. e COPPOLA L., 1991, "Materiali Innovativi per Calcestruzzi Speciali", Edizioni Enco, Spresiano (TV), 1991, Cap. II (La Cenere Volante), pag. 2/1-2/59.
- (18) COLLEPARDI M. e COPPOLA L., 1991, "Materiali Innovativi per Calcestruzzi Speciali", Edizioni Enco, Spresiano (TV), 1991, Cap. III (Il Fumo di Silice), pag. 3/1-3/41.
- (19) COLLEPARDI M., 1994, "Superplasticizers and Air Entraining Agents: State of the Art and Future Needs", Proceedings of M. Malhotra Symposium Concrete Technology: Past, Present and Future, Ed. K. Mehta, ACI SP-144, S. Francisco, California, pag. 399-416.
- (20) BONORA G., Comunicazione privata.
- (21) SHROFF A.V. e SHAH D.L., 1993, "Grouting Technology in Tunnelling and Dam Construction", Ed. A.A. Bakema, Rotterdam, 1993.
- (22) KAROL R.H., 1982, "Chemical grouts and their properties", Proceedings of the Conference on Grouting in Geotechnical Engineering, New York, pag. 359-378.
- (23) SHROFF A.V. e AMIN D.J., 1982, "Development of polyurethane grout and its geotechnical applications", Proceedings of the International Conference on Construction Practice and Instrumentation in Geotechnique, Surat, Gujarat, Oxford & IBH Publishing Co. Prst. Lmt., New Delhi, India, Vol. 1, pag. 309-312.
- (24) COLLEPARDI, M., 1991, "Scienza e Tecnologia del Calcestruzzo", Edizioni Hoepli, Milano, 1991, III Edizione, pag. 281-286.

ABSTRACT

The cementitious or organic materials used to stabilize or consolidate ground and rocks may interact with the surrounding environment. In general, the potential interaction of the cementitious materials with ground or rocks to be consolidated involves the presence of gypsum/anhydrite and the formation of ettringite and/or thaumasite. These products can cause disruptive phenomena and reduce the long term stabilization of the consolidated system. On the other hand, organic polymeric resins do not cause any degradation of the consolidated system, but they are considered to be dangerous from a toxicological point of view.