

Sterilizzazione dei fontanazzi per mezzo di iniezioni di bentonite.

Autori:

Silvia Solaro - laureata in Scienze Ambientali all'Università Statale di Milano. Specializzata in tecniche di recupero territoriale. Dottoranda in Pedologia (scienza che studia i terreni naturali, vegetali e agrari) all'Università di Milano-Bicocca.

Bolzon Giuseppe - Gruppo Comunale di Protezione Civile di S. Rocco al Porto. E' esperto nella prevenzione e gestione dell'emergenza durante le piene con particolare riferimento alle cosiddette "slow floods". E' responsabile della formazione dei volontari di protezione civile comunale.

1.- Premessa

Durante le piene, quando il fiume è pensile sulla campagna circostante, i fontanazzi costituiscono la fonte di maggior pericolo per una eventuale inondazione dovuta al collassamento degli argini maestri erosi dalle acque sotterranee che scorrono in senso contrario nella falda freatica trascinando con se sabbia e sassi.

Di seguito, insieme ad una descrizione del fenomeno per chi non ha familiarità con esso, viene suggerito un processo per la inibizione di questi fenomeni che si potrebbe ottenere per iniezione di bentoniti nella falda freatica responsabile del fenomeno.

Le bentoniti sono argille naturali che, in determinate condizioni di dispersione in acqua e quando sono in agitazione sono liquide ma, una volta ferme diventano una gelatina impermeabile che si ancora ai granelli di sabbia e ai sassi impermeabilizzando la falda e impedendo lo scorrimento dell'acqua.

2.- Le acque sotterranee

Un fiume invisibile, con una enorme portata d'acqua, corre parallelamente al Po. Si tratta delle acque di falda che percorrono la pianura attraversando le ghiaie e le sabbie alluvionali

che si sono formate nei millenni sotto i nostri piedi.

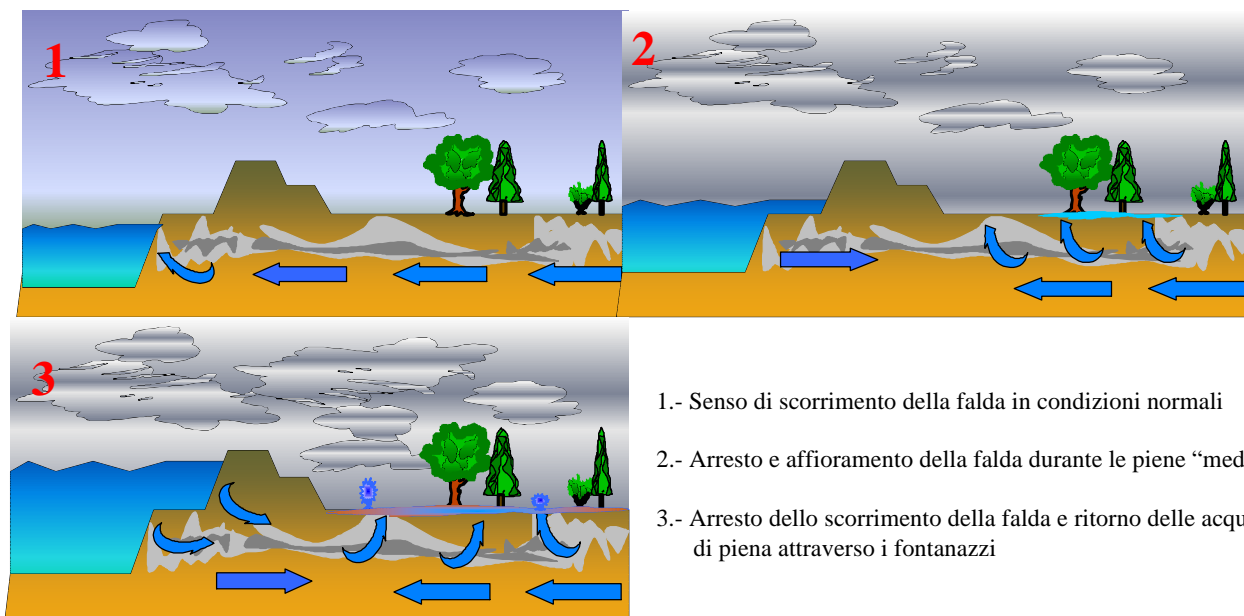
Una piccola parte di queste acque, appartenenti alla falda più superficiale, tende, quando arriva alle sponde del fiume, a confluire nella sua corrente.

In caso di piena, l'acqua del Po preme sul terreno sottostante le sponde e la golena dapprima rallentando e poi fermando il deflusso delle acque della falda freatica. Conseguentemente, la falda superficiale, ostacolata nel suo scorrimento verso il letto del fiume, tende ad innalzarsi e ad affiorare.

Le risorgive e gli affioramenti (surtùm in dialetto) di acqua nei campi sono il primo fenomeno visibile degli effetti di una piena sul territorio. Solitamente quest'acqua si distingue da quella dei fontanazzi perchè è perfettamente limpida e affiora senza zampillare invadendo campi e riempiendo i canali di bonifica.

Se escludiamo gli effetti negativi sull'agricoltura, questi affioramenti non costituiscono nessun pericolo per la sicurezza dei cittadini. Generalmente si verificano alcuni giorni dopo che l'onda di piena ha portato il livello del fiume a lambire gli argini anche per poche decine di centimetri.

Nella figura riportata di seguito vengono schematizzati i fenomeni che sono stati appena citati.



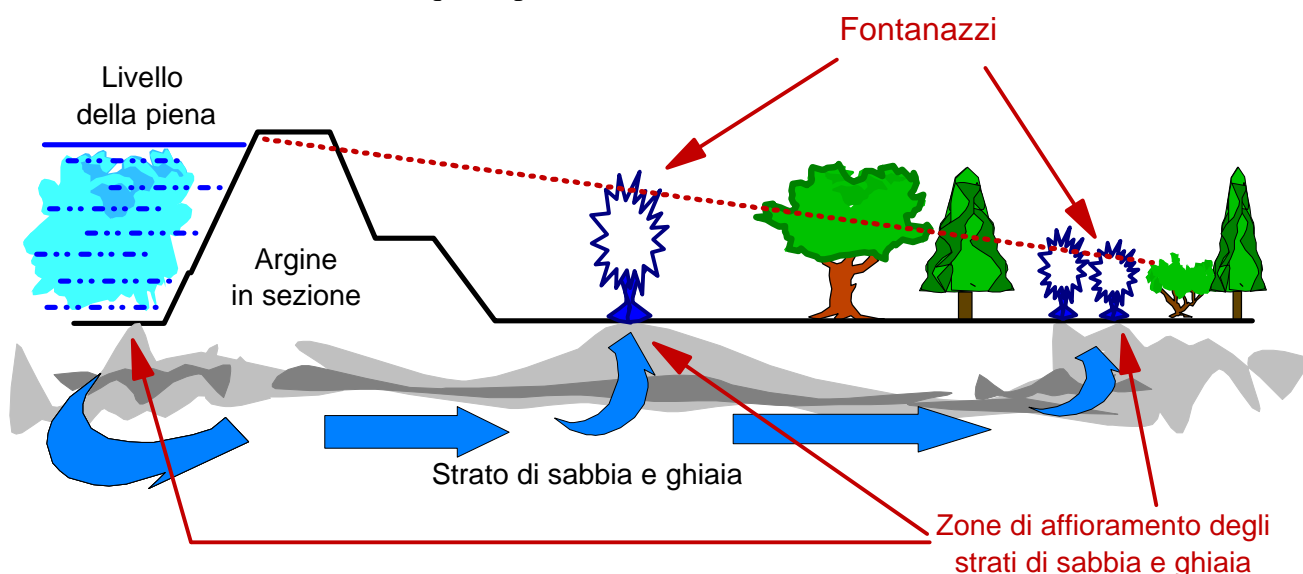
- 1.- Senso di scorrimento della falda in condizioni normali
- 2.- Arresto e affioramento della falda durante le piene "medie"
- 3.- Arresto dello scorrimento della falda e ritorno delle acque di piena attraverso i fontanazzi

3.- I fontanazzi

Ulteriori innalzamenti del livello del fiume, con la conseguente pressione di alcuni metri d'acqua sulle pareti dell'argine, provocano un flusso delle acque delle falde superficiali contrario a quello naturale. Tale flusso, se riesce ad infilarsi in falde costituite da ghiaia o sabbie che affiorano sul territorio, può provocare un fenomeno che non deve mai essere sottovalutato, specialmente quando si verifica in prossimità dell'argine. Questo fenomeno si chiama fontanazzo. Il suo affioramento genera uno zampillo di acqua torbida più o meno imponente che trascina con se la sabbia della falda depositandola sui terreni circostanti. Si tratta dell'acqua di piena

che, attraverso canali sotterranei, passa sotto gli argini e affiora nella pianura allagandola. Il pericolo di questo fenomeno è dovuto alla forza dell'acqua che, trascinando con se la sabbia della falda, allarga il canale nel quale scorre fino a far crollare l'argine sovrastante con la conseguente inondazione della pianura. Per dovere di cronaca, va ricordato che tutte le inondazioni causate dal Po, che hanno interessato il basso Lodigiano nell'ultimo secolo, sono state provocate da rotture degli argini a causa dei fontanazzi e mai per tracimazione.

I fontanazzi più pericolosi sono quelli addossati o nelle immediate vicinanze dell'argine. A questi deve essere dedicata la



massima attenzione nel rallentare il flusso d'acqua.

Il sistema utilizzato per fermare questo fenomeno è quello dell'arginatura con un muro di sacchi di sabbia che formino un pozzo intorno allo zampillo.

Perchè tale intervento sia efficace è indispensabile seguire le regole che vengono descritte di seguito.

Prima di tutto, la chiusura di un fontanazzo non deve avere la pretesa di fermare l'uscita dell'acqua attraverso il foro che si è creato nel terreno ma deve tendere a fermare il trascinarsi della sabbia di falda verso la superficie. Per cui, un fontanazzo si potrà definire ben arginato quando continuerà a lasciar zampillare acqua ma non trascinerà più sabbia e ghiaia in superficie.

I sacchi di sabbia non devono essere buttati direttamente sul buco da chiudere perchè la pressione sotterranea dell'acqua e le dimensioni della falda affiorante, che di solito si estende per alcune decine di metri quadrati, tende a formare un secondo e magari un terzo zampillo intorno ai sacchi appena posati allargando l'area del fontanazzo stesso.

La regola prevede che debba essere costruito intorno al fontanazzo un muro di sacchi di

sabbia del diametro di almeno quattro metri per evitare il fenomeno sopra citato. L'obiettivo viene raggiunto quando l'altezza del muro di sacchi è tale per cui rallenta il flusso dello zampillo interrompendo l'uscita della sabbia. Questo avviene quando la colonna di acqua che si forma all'interno del pozzo è tale da creare una contropressione sufficiente a rallentare la forza dell'acqua in uscita.

4.- Proposta per la sterilizzazione dei fontanazzi

La proposta che viene presentata con questo lavoro è di inibire il deflusso delle acque di piena attraverso la falda freatica sigillando gli interstizi attraverso i quali scorre l'acqua con una sospensione di argille che, iniettate in falda, si espandano occupando gli spazi tra i granelli di sabbia e sassi con una gelatina impermeabile.

Le argille in questione sono conosciute con il termine tecnico di **Bentoniti**.

I minerali di questo gruppo sono caratterizzati dal fatto che dentro i loro strati l'acqua può penetrare in quantità notevoli (con spessori che sono doppi o tripli dello spacing basale). Il rilascio o l'adsorbimento di acqua e cationi determinano rispettivamente contrazione e rigonfiamento del minerale.

Normalmente le bentoniti contengono oltre il 70% di montmorillonite. Questi sono minerali tipici delle rocce vulcaniche.

La bentonite può assorbire acqua fino a cinque volte il suo peso e quando è totalmente saturata occupa un volume 12-15 volte più grande di quello allo stato secco e questo processo è reversibile

Il campo di applicazioni della bentonite è veramente vasto, sebbene certi tipi di bentonite siano particolarmente adatti a particolari impieghi finali.

Si sfruttano le sue caratteristiche principali:

- viscosità: durante le perforazioni petrolifere viene usata nei fanghi di perforazione a base acquosa per controllare la filtrazione o la perdita di acqua;
- coesività: è un agente legante resistente anche alle alte temperature (1200°-1500°C);



Chiusura di un fontanazzo con sacchi di sabbia durante l'alluvione dell'ottobre 2000

- impermeabilità: è largamente usata in un notevole numero di applicazioni per la ritenzione di acqua e fluidi.

La impermeabilizzazione di argini e opere fluviali viene ottenuta in molteplici modi, tra cui il più comune, soprattutto in passato, è l'utilizzo di cemento sia come rivestimento esterno che come materiale per riempire i pori di materiali sciolti. In questo caso le iniezioni di cemento possono essere validamente sostituite da quelle di argilla, materiale con una permeabilità molto bassa.

La proprietà che viene particolarmente sfruttata è la così detta tixotropia di cui alcune argille sono dotate: le soluzioni tixotropiche hanno la proprietà di mantenersi liquide (sol) finché sono agitate, assumendo una certa rigidità ed i caratteri di gel allo stato di riposo. La trasformazione da sol a gel è reversibile, per cui scuotendo la soluzione si passa dal gel nuovamente al sol.

Quando le soluzioni tixotropiche vengono iniettate nelle rocce porose formano dei gel entro i pori occludendoli rendendo impermeabile il materiale. Le eventuali materie inerti associate all'argilla rimangono impigliate nel gel provocando un maggiore ispessimento del sistema senza tuttavia privarlo delle sue caratteristiche. Anche tale accorgimento viene utilizzato nella pratica delle iniezioni associando, per esempio, il cemento all'argilla; in questo caso il cemento fa presa assorbendo una parte dell'acqua dall'argilla. I gel così formati non sono reversibili e questo può essere utile quando si deve contrastare l'eventuale dilavamento delle

particelle fini da parte dell'acqua in movimento e possono in tal modo servire da impermeabilizzanti dei terreni. Quando la permeabilità è molto elevata, si può aggiungere un'altra sostanza inerte grossolana, come la sabbia, formando una miscela composta da argilla (tixotropica), cemento e sabbia. L'iniezione di tale miscela aumenta considerevolmente anche la capacità di resistenza alla pressione della roccia.

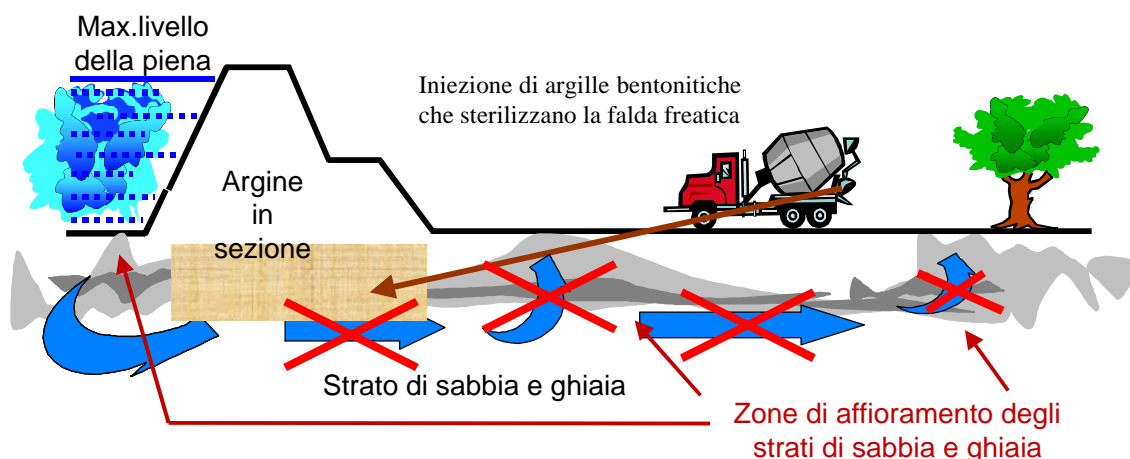
Un materiale comunemente usato per queste iniezioni è la bentonite che può fornire sospensioni colloidali che, con sufficiente concentrazione (5-6%), presentano proprietà tixotropiche, ossia in riposo assumono una notevole consistenza ma se vengono agitate ritornano allo stato fluido.

Le barriere impermeabili costituite da strati di argilla compatta devono essere studiate, progettate e realizzate per ogni singolo caso considerando tutti i diversi parametri che influenzano il grado di impermeabilità:

- grado di compattazione;
- composizione granulometrica e tipologica;
- spessore dello strato;
- tecnica di posa;
- interazione chimica con le soluzioni circolanti.

5.- Conclusioni

L'eventuale utilizzo di questi materiali, iniettati direttamente nelle falde freatiche interessate ai fenomeni dei fontanazzi, potrebbe risolvere in maniera definitiva il problema delle infiltrazioni con un impatto ambientale praticamente nullo essendo le bentoniti argille di origine naturale quindi perfettamente compatibili con l'ambiente.



Allegato: Ricerca bibliografica sulle argille

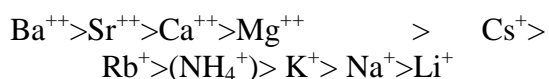
A cura della Dr.ssa Silvia Solaro

Dal punto di vista granulometrico si parla di argille riferendosi alle particelle di diametro inferiore ai 2 μ m.

I minerali argillosi sono silicati idrati di Al, Fe e Mg che presentano una tipica struttura lamellare (fillosilicati); gli elementi strutturali di questi strati sono i tetraedri di silice (un atomo di silicio coordinato con quattro di ossigeno) e gli ottaedri di alluminio e magnesio (un atomo di Al o Mg coordinato con sei atomi di ossigeno o sei ossidrili) che si legano poi tra loro in modi differenti per formare strutture più complesse; le forze che tengono legati i singoli costituenti dei foglietti sono di tipo ionico, mentre i legami che tengono uniti gli strati sono di diversa natura tra cui legami idrogeno e forze di Van der Waals. La forza di questi legami condiziona la tendenza dei fillosilicati a dilatarsi in presenza di liquidi polari quali l'acqua che riesce a infiltrarsi tra strato e strato determinando i caratteristici fenomeni di rigonfiamento di alcune argille.

I singoli fogli sono elettricamente neutri: le cariche positive di Si e Al sono neutralizzate dalle cariche negative di OH e O; questa neutralizzazione non avviene però sulle superfici esterne dove esistono quindi cariche negative solitamente neutralizzate dai cationi presenti nelle soluzioni circolanti. Le forze che si stabiliscono tra cationi e scambiatore sono di tipo coulombiano e quindi risultano più intense quanto più elevata è la carica del catione stesso (valenza). Tra cationi con la stessa carica quelli a più bassa energia di idratazione (cioè quelli con raggio ionico maggiore) si avvicinano maggiormente alle superfici dei colloidali, stabilendo legami elettrostatici più intensi.

Per i cationi più comunemente ritrovabili nel suolo le forze di legame diminuiscono secondo il seguente ordine:



I minerali argillosi sono dotati di caratteri tipici: avendo cariche negative libere, possono trattenere i cationi in forma scambiabile. Alcuni possono assorbire molecole di acqua tra i fogli (le cosiddette argille rigonfianti); in questo caso si hanno notevoli variazioni di volume tra la stagione secca e quella umida. Le interazioni tra argilla e liquidi (acqua e sostanze disciolte) influenzano la disposizione spaziale delle particelle solide: le argille possono trovarsi sia disperse (ad esempio in un mezzo fortemente alcalino) sia flocculate (in presenza di cationi polivalenti come Ca²⁺ o Mg²⁺).

Le argille possono genericamente essere divise tra inerti e attive; le prime (essenzialmente clorite, kaolinite, illite e halloysite) hanno struttura cristallo-chimica stabile rispetto le interazioni con l'acqua, le sollecitudini meccaniche e, per la loro minore superficie specifica, hanno una attività esterna ridotta. I minerali argillosi attivi (vermiculite, smectiti) sono rigonfianti-collassanti, hanno elevata capacità di scambio e superficie specifica.

Lo stato delle argille inerti dipende anche dal contenuto di elettroliti nelle soluzioni interstiziali circolanti: quando esso è alto le argille sono stabili, mentre quando la concentrazione diminuisce si verificano collassi e movimenti repentini del terreno dovuti a modifiche dell'arrangiamento spaziale delle particelle solide trasformando l'argilla coerente in una pasta semifluida inconsistente.

L'allontanamento degli elettroliti (ad esempio ad opera di acqua dolce) "libera" le cariche negative prima neutralizzate da cationi, e provoca il respingimento delle particelle e quindi l'aumento di deformabilità e di instabilità del terreno.

Bentonite

Il termine bentonite si riferisce a qualsiasi materiale argilloso costituito essenzialmente da minerali del gruppo delle smectiti, tra i quali il principale è la montmorillonite, ma ci sono anche beidellite e nontronite. I minerali di questo gruppo sono caratterizzati dal fatto che dentro i loro strati tripli l'acqua può penetrare in quantità notevoli (con spessori

che sono doppi o tripli dello spacing basale). Il rilascio o l'adsorbimento di acqua e cationi determinano rispettivamente contrazione e rigonfiamento del minerale.

Normalmente le bentoniti contengono oltre il 70% di montmorillonite che si forma per devetrificazione e conseguente alterazione chimica di vetri di origine magmatica, generalmente tufi o ceneri vulcaniche; secondariamente si ritrova anche beidellite, alcali e terre alcaline (5-10%) e ferro ferrico (3%). Minerali accessori sono feldspati (in genere ortoclasio e oligoclasio), biotite, quarzo, pirosseni, zirconi, e vari altri minerali tipici delle rocce vulcaniche.

Il suo peso specifico si aggira attorno a $2,2 - 2,7 \text{g/cm}^3$ e la densità apparente tra $1,5 - 2 \text{g/cm}^3$.

In natura si trovano due varietà di bentonite: quella calcica e quella sodica; la differenza tra le due è il grado di espansione quando vengono a contatto con l'acqua che per la prima è minore di quello della seconda.

In presenza di acqua, i cationi che occupano gli spazi interstrati si idratano generando cariche negative che si respingono, allontanando i foglietti e provocando un complessivo rigonfiamento del minerale. La bentonite può assorbire acqua fino a cinque volte il suo peso e quando è totalmente saturata occupa un volume 12-15 volte più grande di quello allo stato secco e questo processo è reversibile

Principali impieghi della bentonite

Il campo di applicazioni della bentonite è veramente vasto, sebbene certi tipi di bentonite siano particolarmente adatti a particolari impieghi finali.

Si sfruttano le sue caratteristiche principali:

- viscosità: durante le perforazioni petrolifere viene usata nei fanghi di perforazione a base acquosa per controllare la filtrazione o la perdita di acqua;
- coesività: è un agente legante resistente anche alle alte temperature ($1200^\circ - 1500^\circ\text{C}$);
- impermeabilità: è largamente usata in un notevole numero di applicazioni di ritenzione di acqua e fluidi.

Permeabilità

La permeabilità indica l'attitudine di un materiale ad essere attraversato da un liquido; quella delle argille dipende dalle interazioni fra le particelle solide, l'acqua e gli ioni in soluzione e, quindi, dalla porosità, dalla costante dielettrica, dal potenziale elettrocinetico ed è influenzata anche dal grado di saturazione, dalla viscosità del fluido oltre che dal gradiente idraulico, termico ed elettrico.

In ordine di permeabilità decrescente, i minerali argillosi possono essere distinti in tre gruppi: le caoliniti, le illiti e le montmorilloniti (includendo smectiti e bentoniti).

La permeabilità può essere rallentata in modo diverso dalla presenza nella soluzione circolante e/o nell'interstrato espandibile delle smectiti di ioni scambiabili (secondo la serie già accennata parlando delle forze di legame tra cationi e argille): ad esempio il Ca e altri cationi bivalenti ritardano la conducibilità idraulica rispetto al Na e gli altri cationi monovalenti.

La permeabilità viene comunemente espressa come m/s: un materiale è considerato praticamente impermeabile per valori inferiori a 10^{-7} m/s. Per valori maggiori si ha permeabilità:

- molto bassa tra 10^{-7} e 10^{-5} m/s
- bassa tra 10^{-5} e 10^{-3} m/s
- media tra 10^{-3} e 10^{-1} m/s
- alta $> 10^{-1}$ m/s

Per avere un'idea degli ordini di grandezza dei valori di permeabilità, si riportano dei valori indicativi per materiali di diversa granulometria:

- ghiaia pulita $1 - 10^{-2}$
- sabbia e ghiaia $10^{-2} - 10^{-5}$
- sabbia fine $10^{-4} - 10^{-6}$
- limo $10^{-5} - 10^{-8}$
- argilla fessurata $10^{-4} - 10^{-8}$
- argilla compattata $< 10^{-9}$
- cemento $< 10^{-10}$

Impermeabilizzazioni

La impermeabilizzazione di argini e opere fluviali viene ottenuta in molteplici modi, tra cui il più comune, soprattutto in passato, è l'utilizzo di cemento sia come rivestimento

esterno che come materiale per riempire i pori di materiali sciolti. In questo caso le iniezioni di cemento possono essere validamente sostituite da quelle di argilla, materiale con una permeabilità molto bassa.

La proprietà che viene particolarmente sfruttata è la così detta tissotropia di cui alcune argille sono dotate: le soluzioni tissotropiche hanno la proprietà di mantenersi liquide (sol) finché sono agitate, assumendo una certa rigidità ed i caratteri di gel allo stato di riposo. La trasformazione da sol a gel è reversibile, per cui scuotendo la soluzione si passa dal gel nuovamente al sol.

Tale proprietà dell'argilla è legata al suo potere adsorbente (adesione dell'acqua attorno ai granuli) e tale potere è tanto maggiore quanto più alto è il valore del rapporto $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$. La tissotropia delle argille può essere favorita dall'aggiunta di particolari sostanze in soluzione, come il silicato di soda. Fra le sostanze del gruppo delle argille più adatte a tali impieghi ci sono le smectiti, tra cui la montmorillonite e le bentoniti per il loro elevato potere adsorbente, ma anche le comuni argille grasse possono servire bene allo scopo.

Quando le soluzioni tissotropiche vengono iniettate nelle rocce porose formano dei gel entro i pori occludendoli rendendo impermeabile il materiale. Le eventuali materie inerti associate all'argilla rimangono impigliate nel gel provocando un maggiore ispessimento di esso senza tuttavia privarlo delle sue caratteristiche. Anche tale accorgimento viene utilizzato nella pratica delle iniezioni associando, per esempio, il cemento all'argilla; in questo caso il cemento fa presa assorbendo una parte dell'acqua dall'argilla. I gel così formati non sono reversibili e questo può essere utile quando si deve contrastare l'eventuale dilavamento delle particelle fini da parte dell'acqua in movimento e possono in tal modo servire da impermeabilizzanti dei terreni. Quando la permeabilità è molto elevata, si può aggiungere un'altra sostanza inerte grossolana, come la sabbia, formando una miscela composta da argilla (tissotropica), cemento e sabbia. L'iniezione di tale miscela aumenta

considerevolmente anche la capacità di resistenza alla pressione della roccia.

Un materiale comunemente usato per queste iniezioni è la bentonite che può fornire sospensioni colloidali che, con sufficiente concentrazione (5-6%), presentano proprietà tissotropiche, ossia in riposo assumono una notevole consistenza ma se vengono agitate ritornano allo stato fluido.

Le barriere impermeabili costituite da strati di argilla compatta devono essere studiate, progettate e realizzate per ogni singolo caso considerando tutti i diversi parametri che influenzano il grado di permeabilità:

- grado di compattazione;
- composizione granulometrica e tipologica;
- spessore dello strato;
- tecnica di posa;
- interazione chimica con le soluzioni circolanti.

Breve bibliografia

Cancelli A., Pilia M., Modalità di realizzazione di barriere impermeabilizzanti utilizzando materiali argillosi. Relazioni del corso di formazione "Argille e minerali delle argille: materiali per barriere impermeabilizzanti di siti per stoccaggio di rifiuti", 1994

Desio A., Geologia applicata all'ingegneria, Hoepli Ed., 1973.

Veniale F., Consolidamento e stabilizzazione dei terreni argillosi mediante diffusione di sali (KCl), Università di Pavia, Istituto di mineralogia, petrografia e geochimica, 1982