

Generalità

Le opere speciali comprendono gli interventi volti a migliorare le caratteristiche fisiche e meccaniche dei terreni e delle rocce. I metodi usati per conseguire questo risultato possono essere suddivisi nelle seguenti tipologie:

- iniezione (iniezioni di miscele consolidanti, jet grouting);
- trattamenti termici (congelamento, cottura ad alte temperature);
- trattamenti chimici (infiltrazione di sali per scambio ionico);
- trattamenti elettrici (elettroosmosi).

L'applicazione di questi trattamenti richiede indagini molto approfondite ed uno studio progettuale basato sui risultati di prove pilota eseguite in sito. I costi d'esecuzione sono in genere molto alti, a causa dell'impiego di attrezzature complesse e di personale specializzato. Per tali motivi, l'impiego di questi metodi per la stabilizzazione di pendii instabili è limitato a casi particolari ad interventi di tipo provvisorio.

Rupe di Orvieto (Perugia): consolidamento della parete tufacea interessata da un'estesa fratturazione. Gli interventi di consolidamento hanno previsto la realizzazione di ancoraggi e chiodature nelle pareti mentre le fessure sono state sigillate con iniezioni di miscele cementizie.



Generalità

Le iniezioni rappresentano le tecniche più avanzate per il miglioramento delle caratteristiche fisiche e meccaniche delle terre e delle rocce.

Il trattamento dei terreni può essere effettuato con una grande varietà di tecniche basate sull'iniezione di fluidi stabilizzanti secondo diversi principi fra i quali:

Permeazione o penetrazione

In questo trattamento le portate e le pressioni devono essere regolate in modo tale da evitare o limitare al massimo i fenomeni di *idrofratturazione* (o *claquage*). Le miscele stabilizzanti penetrano entro i pori del terreno o le fessure della roccia senza significative modifiche della struttura del materiale.

Compattazione o spostamento controllato

Questo trattamento consiste nell'iniettare sospensioni molto dense che formano bulbi o lenti compatte, che esercitano sul terreno circostante variazioni di pressione tali da indurre effetti di spostamento e compattazione in funzione della compressibilità e permeabilità del materiale trattato.

Idrofratturazione o spostamento incontrollato

L'iniezione di miscele a pressioni superiori alla resistenza del terreno o roccia, provoca la formazione di un reticolo di fratture (*claquages*), attraverso le quali il materiale iniettato penetra rapidamente nella zona fratturata. Questa tecnica è applicata in terreni addensati o in rocce porose o minutamente fessurate difficilmente penetrabili dalle normali miscele consolidanti.

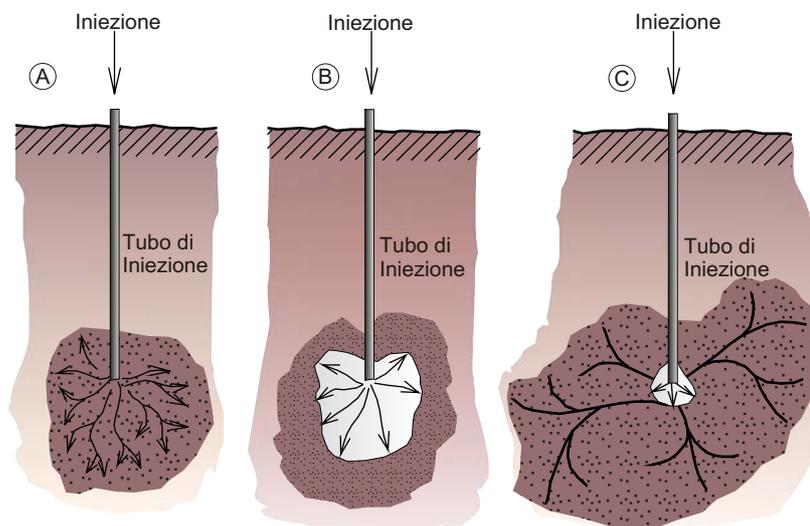
Idroperforazione (jet grouting)

Il sistema è stato sviluppato in Giappone agli inizi degli anni '60, ma è solo a partire dal 1970 che i sistemi jetting hanno avuto un'ampia diffusione nel mondo. La tecnica di idroperforazione si basa sul principio della disgregazione del terreno in posto mediante getti di fluidi ad altissima velocità e sulla miscelazione e/o parziale sostituzione con un fluido consolidante e/o impermeabilizzante, costituito in genere da sospensioni di cemento.

Le tecniche di iniezione sono poco adatte agli interventi di stabilizzazione dei versanti sia per i costi elevati sia per la necessità di disporre di tecnologie specifiche d'intervento. Nel seguito sono trattate le tecniche di "iniezioni di miscele" e il "jet grouting" che hanno trovato applicazione in alcuni interventi di stabilizzazione.

Trattamento con iniezioni:

- A) permeazione o penetrazione;
- B) compattazione o spostamento controllato;
- C) idrofratturazione o spostamento incontrollato.



Iniezioni di miscele

Generalità

Il trattamento di "iniezione" è un moderno procedimento che consiste nell'iniettare nel sottosuolo e/o in strutture portanti di edifici dissestati delle miscele atte a:

- ridurre la permeabilità;
- aumentare la resistenza al taglio;
- diminuire la compressibilità;
- permeare i vuoti del terreno e/o le cavità e fessure delle rocce o di strutture portanti di edifici o altro.

Le prime applicazioni di questo sistema di stabilizzazione ed impermeabilizzazione risalgono a circa 200 anni fa, quando un ingegnere francese, Charles Berignj, nel 1802 consolidò le murature del porto di Dieppe, iniettando con una pompa a pressione, di sua invenzione, una miscela di cemento ed acqua (boiaccia cementizia) nella struttura dissestata. Successivamente, verso la fine del 1800, le iniezioni di miscele di cemento e acqua furono ampiamente impiegate da Naveles (1876) e da Romaux (1882) nell'impermeabilizzazione e consolidamento di terreni ed ammassi rocciosi fratturati in aree minerarie.

Il perfezionamento delle tecniche di iniezione ha dato un ulteriore impulso all'applicazione di questi procedimenti, che sono stati impiegati non solo nei lavori minerari, ma anche nella realizzazione di altre importanti opere di ingegneria civile, come ad esempio dighe, strade, ferrovie e impianti industriali.

L'additivazione delle miscele di cemento-acqua con soluzioni di silicato di sodio e cloruro di calcio, fatta per la prima volta da H. Jonsten nel 1925, e l'introduzione di nuovi tipi di miscele consolidanti chimiche (organiche ed inorganiche) hanno consentito di ampliare il campo di applicazione di questo sistema, limitato prima al consolidamento ed impermeabilizzazione di terreni e rocce di media alta permeabilità, estendendolo anche a quelli caratterizzati da bassa permeabilità. Infine, sempre a partire dal 1925, si sono sviluppate e diffuse le moderne tecniche di stabilizzazione, impermeabilizzazione, costipamento e miglioramento delle capacità portanti dei terreni sciolti dapprima mediante l'esecuzione di "pali di sabbia" (1925) fino ai più recenti sistemi di "vibroflottazione", vibrocompattazione" e di "idroperforazione (Jet Grouting)" ed alle iniezioni di "miscele ternarie aerate".

Particolare di sigillatura in una parete tufacea mediante iniezione di miscele consolidanti.



Descrizione e Caratteristiche

Le miscele iniettate sono fondamentalmente di due tipi: a) “sospensioni”, formate da particelle solide di varia natura (terreno, cemento, emulsioni di asfalto o altro) ed acqua; b) “soluzioni”, formate da sostanze chimiche (organiche ed inorganiche).

Iniezioni di “sospensioni”

”La composizione della sospensione iniettata dipende dalle caratteristiche del mezzo da trattare e in particolare dalla sua permeabilità. Fra i vari tipi di miscela quelli più frequentemente usati includono:

- “boiaccia cementizia”, formata da una miscela di cemento ed acqua con eventuale aggiunta di altri componenti (argilla, sabbia fine, pozzolane o additivi di vario tipo quali bentonite per impermeabilizzare);
- miscele ternarie aerate, formate da acqua, cemento, sabbia con aggiunta di additivo aerante, centrifugata in speciali mescolatori, p a r t i c o l a r m e n t e indicata per il trattamento di terreni granulari in presenza d'acqua;
- stesso materiale presente in sito, con la formazioni di colonne di materiale granulare compatto (“vibroflottazione”). Quest'ultima tecnica è usata per costipare e migliorare le capacità portanti del terreno, quando questo è formato da terreni incoerenti sabbioso-ghiaiosi sciolti;
- “emulsioni di asfalto”.

L’iniezione di “sospensioni” è generalmente usata nei terreni e negli ammassi rocciosi caratterizzati da valori della permeabilità medio- alti, mentre le iniezioni di emulsioni di asfalto sono impiegate per trattare terreni a granulometria più fine, quali sabbie e limi, e rocce con ampiezza delle fessure fino a 10 mm.

Iniezioni di “soluzioni”

I trattamenti con soluzioni chimiche sono usati per la permeazione, il consolidamento e l'impermeabilizzazione dei terreni a grana fine, quali sabbie medio-fini e limi.

I tipi di soluzioni attualmente disponibili per questo tipo di trattamento sono vari. Quelli più comunemente usati comprendono:

- Soluzioni di silicato di sodio e di un reagente, che può essere costituito da cloruro di calcio (metodo Joosten 1925) o da acetato di etile (metodo Soletanche, 1957), iniettati a bassa pressione (10 bar) nel terreno con formazione di un “gel di silice”;
- Iniezioni di resine organiche diluite con acqua, caratterizzate da viscosità molto bassa all'atto della iniezione che successivamente polimerizzano per mezzo di un catalizzatore, solidificando in una massa molto resistente ed impermeabile;
- Soluzioni bituminose;
- Sistemi combinati di soluzioni diverse.

L'iniezione delle miscele consolidanti viene fatta attraverso i fori di perforazione, utilizzando apposite attrezzature di perforazione e speciali pompe.

Negli ammassi rocciosi, prima di procedere a questo trattamento, si eseguono le prove “Lugeon” per determinare il valore della permeabilità in sito. Generalmente il trattamento di iniezione è efficace per valori di permeabilità maggiori di 10 Lugeon (1 Lugeon = $1,3 \times 10^{-5}$ cm/s).

Aspetti ambientali

Le tecniche di iniezione in terreni e rocce in molti casi consentono di eseguire delle opere di ingegneria civile o di sistemazione dei versanti instabili, limitando al minimo il danno ambientale in aree molto spesso di elevato pregio paesaggistico e culturale.

Le soluzioni chimiche iniettate possono avere degli effetti negativi indesiderati sull'ambiente, connessi soprattutto alla loro possibile corrosività e tossicità. Per tali motivi recentemente sono state introdotte delle miscele formate da cementi microfini, in grado di penetrare terreni a bassa permeabilità, senza ripercussioni sull'ambiente.

Applicazioni

Il trattamento con iniezioni di miscele consolidanti è largamente utilizzato in numerose opere di ingegneria civile (dighe, strade, ferrovie, gallerie, impianti industriali o edifici civili, ecc.), dove si rende necessario procedere all'impermeabilizzazione, consolidamento e costipamento di terreni di fondazioni e sciolti. Questo trattamento è anche impiegato per il consolidamento di strutture portanti di edifici civili o di infrastrutture dissestati, trova applicazione negli interventi di sistemazione dei versanti, soprattutto in quelli che riguardano la stabilizzazione di pareti rocciose instabili.

Jet Grouting

Generalità

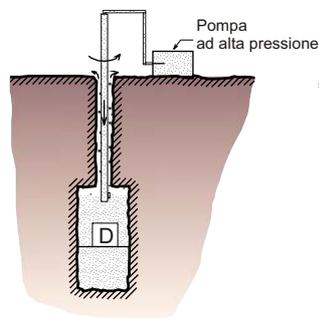
Il trattamento colonnare del terreno con il "jet grouting" rappresenta il più recente sviluppo nella tecnica delle iniezioni e va sempre più diffondendosi, oltre che nelle realizzazioni di opere di ingegneria civile, anche negli interventi di stabilizzazione di pendii instabili.

In Italia questo sistema è stato adottato da alcune ditte che, acquisiti i brevetti giapponesi, hanno a loro volta introdotto delle importanti innovazioni tecnologiche, sviluppando ed ampliando propri sistemi di applicazione.

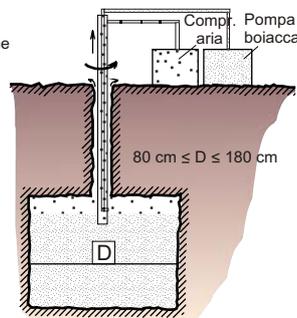
Schemi esecutivi dei tre principali sistemi di trattamento colonnare del terreno (jet grouting):

- A) sistema monofluido;
- B) sistema bifluido;
- C) sistema trifluido.

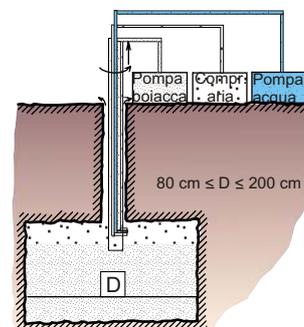
A) SISTEMA MONOFLUIDO



B) SISTEMA BIFLUIDO



C) SISTEMA TRIFLUIDO



Descrizione e Caratteristiche

La tecnica d'idroperforazione o "jet grouting" consente di disgregare il terreno in posto mediante getti di fluidi ad altissima velocità di miscelarlo sostituendolo e sulla miscelazione e/o parziale sostituzione del terreno stesso con un fluido consolidante e/o impermeabilizzante, costituito in genere da sospensioni di cemento.

Questo sistema consente di trattare un'ampia gamma di tipi di terreni, dalle ghiaie alle argille alle rocce tenere, e non comporta problemi d'inquinamento.

I procedimenti esecutivi attualmente in uso, con denominazioni diverse attribuite dalle imprese specializzate, possono essere raggruppati in tre categorie contraddistinte dal numero di fluidi disgreganti e stabilizzanti utilizzati (acqua, aria, miscele cementizie), che comunque comportano due fasi esecutive principali:

- perforazione di un foro, con diametro di circa 40-50 cm, profondità tale da raggiungere e attraversare la parte del terreno da trattare, entro il quale introdurre la colonna di aste d'iniezione;
- "iniezione" mediante uno o più ugelli che lanciano ad altissima velocità i fluidi impiegati.

Sistema monofluido: questo sistema, tutt'ora il più diffuso in Italia, prevede l'utilizzo di un unico fluido quale agente disgregante e stabilizzante, generalmente costituito da una sospensione di cemento, che viene iniettato ad alta pressione attraverso gli ugelli posti al fondo della batteria d'iniezione.

Sistema bifluido: questo sistema, che rappresenta una variante del precedente, prevede la disgregazione e la contemporanea miscelazione del terreno mediante un getto coassiale, ad alta pressione, di aria compressa e di miscela stabilizzante, limitandone in tal modo la dispersione ed aumentandone il potere penetrante ed il raggio d'azione.

Sistema trifluido: in questo sistema l'azione disgregante è riservata a getti coassiali d'acqua ed aria compressa, iniettati ad alta pressione, che provocano una più o meno accentuata rimozione della frazione più fina del terreno, mentre la sospensione cementizia, iniettata contemporaneamente da ugelli sottostanti, ha il ruolo di agente stabilizzante, miscelandosi con il terreno disgregato e parzialmente dilavato dai getti di acqua ed aria compressa.

Questi sistemi possono realizzare colonne di terreno stabilizzato meccanicamente con diametri che variano in funzione delle modalità esecutive e della natura e caratteristiche fisiche e meccaniche dei terreni trattati, generalmente comprese fra 0,30 e 1,50 metri, superando a volte i 2 metri. La profondità del terreno trattato può invece raggiungere e superare anche i 50-60 metri.

Sistema *jet grouting* per la stabilizzazione ed il sostegno dei terreni sabbioso-limosi sciolti di una scarpata stradale in frana. La tecnica del consolidamento dei terreni mediante trattamenti colonnari di *jet grouting* consente in questi casi di garantire la stabilità dei fronti di scavo ed al tempo stesso di ridurre l'ampiezza degli stessi, riducendo l'impatto ambientale.



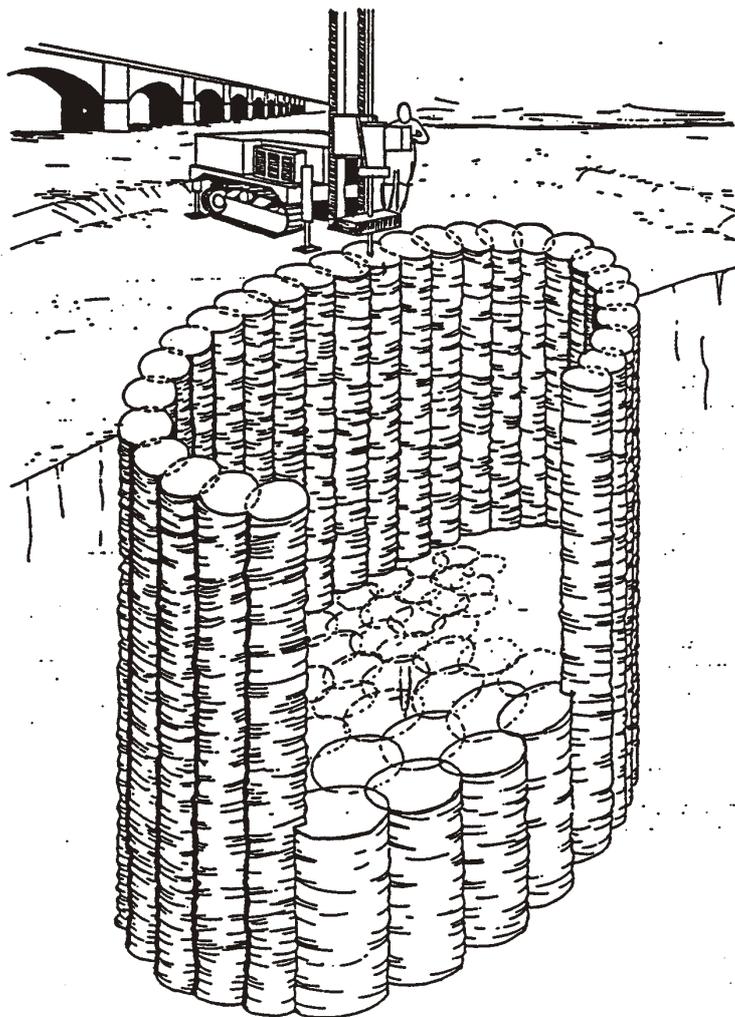
Aspetti ambientali

La stabilizzazione meccanica del terreno con il sistema “jet grouting” ha un impatto ambientale molto ridotto rispetto agli altri sistemi tradizionali di consolidamento o impermeabilizzazione dei terreni per iniezioni di sospensioni o di soluzioni chimiche, dovuto all'utilizzo di fluidi non tossici o inquinanti ed alle tecniche d'esecuzione che non richiedono grossi scavi e attrezzature ingombranti.

Applicazioni

La tecnica del trattamento colonnare con “jet grouting” è largamente utilizzata nelle opere di ingegneria civile (dighe, strade, ferrovie, gallerie, impianti industriali o edifici civili ecc.), quando si rende necessario procedere alla impermeabilizzazione, consolidamento e costipamento di terreni di fondazioni sciolte. Questo trattamento è utilizzato per il consolidamento di strutture portanti di edifici civili o di infrastrutture dissestati, e trova applicazione anche negli interventi di sistemazione dei versanti, soprattutto in quelli che riguardano la stabilizzazione di pendii o scarpate in terreni sciolti instabili.

Realizzazione di pareti provvisorie di contenimento in terreni incoerenti sciolti, o in presenza d'acqua, tramite preconsolidamento con trattamento colonnare “jet grouting”. Questa tecnica permette la successiva esecuzione di fondazioni profonde (ad es. fondazioni a pozzo, protezione di pareti per scavi di gallerie o linee metropolitane), la realizzazione di tamponi di fondo impermeabili anche a grande profondità per l'eliminazione e/o la riduzione della sottospinta idraulica.



Congelamento

Generalità

Il trattamento del terreno mediante congelamento, è un procedimento di stabilizzazione temporaneo molto costoso ed utilizzato per l'esecuzione di scavi o altri interventi di ingegneria civile in terreni a grana fine saturi, quando nessun altro sistema risulta utilizzabile.

La tecnica del congelamento richiede l'impiego di manodopera e tecnici altamente specializzati. Le prime applicazioni di questo metodo furono realizzate in Germania nel 1880 da H. Poetsch per eseguire lo scavo di alcuni pozzi minerari nella Ruhr, in terreni poco consistenti e saturi d'acqua. Successivamente questo sistema è stato ampiamente impiegato per la realizzazione di importanti opere civili in numerose parti del mondo, soprattutto nei lavori di scavo di gallerie: in Francia nel 1908 per un tratto della metropolitana di Parigi, in Svezia nel 1954 nella realizzazione di un tratto di ferrovia in sotterraneo e nel 1936 nella costruzione della metropolitana. Anche in Italia questa tecnica è stata usata nei lavori per la realizzazione di gallerie ferroviarie e stradali o metropolitane, come ad esempio nello scavo di un tratto di galleria della nuova linea ferroviaria Paola Cosenza in terreni limoso-argillosi sotto falda, o per lo scavo di alcuni tratti della metropolitana di Milano.

Descrizione e Caratteristiche

Il congelamento è ottenuto facendo circolare nel terreno un liquido refrigerante costituito da "salamoia" (soluzione acquosa concentrata di sali) raffreddato costantemente da uno scambiatore termico ad azoto liquido. Il liquido viene fatto circolare nel terreno con temperature molto basse (circa $-20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-30 \text{ }^{\circ}\text{C}$), attraverso apposite tubazioni coassiali, disposte entro fori di perforazione di piccolo diametro (intorno ai 15 cm). Particolare attenzione va posta nell'esecuzione dei fori, onde evitare che zone di terreno rimangano non congelate, creando gravi inconvenienti e pericoli al momento dell'esecuzione degli scavi. Se il terreno da trattare è parzialmente saturo o anche secco, è necessario umidificarlo sia preventivamente sia durante l'operazione di congelamento per ottenere un migliore risultato.

Lo spessore della parte congelata dipende dalla profondità di scavo e dalle spinte sul terreno: in genere per avere una buona impermeabilizzazione e consolidamento dell'area interessata dallo scavo, 1,5-2,00 m di spessore sono sufficienti. Non è necessario congelare il terreno che deve essere scavato, in quanto la parete congelata funge da barriera impermeabilizzante.

La resistenza del terreno ottenuta con questo sistema è funzione delle caratteristiche granulometriche, del grado di umidità e della temperatura raggiunta. In generale i terreni sabbiosi risultano molto più resistenti di quelli limosi o limo-argillosi.

La stabilizzazione del terreno con questo procedimento presenta i seguenti vantaggi:

- formazione di un'efficace barriera al flusso delle acque della falda;
- operazioni non eccessivamente rumorose;

Aspetti ambientali

Questo trattamento del terreno ha un ridotto impatto sull'ambiente circostante, in quanto la sua esecuzione non comporta scavi o perforazioni di grande ampiezza o possibili inquinamenti delle acque sotterranee.

Applicazioni

La tecnica di congelamento risulta efficace per la costruzione di paratie temporanee, impermeabili, necessarie alla realizzazione di scavi in terreni sotto il livello di falda.

Congelamento dei terreni con azoto liquido per procedere all'esecuzione degli scavi in terreni limosi saturi della metropolitana di Parigi.



Particolare dell'impianto di congelamento utilizzato per il consolidamento preliminare dei terreni interessati dallo scavo della metropolitana di Parigi. L'impianto per la produzione del freddo è costituito da:

- Un compressore;
- Un condensatore;
- Uno scambiatore di calore fra il liquido frigorifero e la salamoia circolante nel circuito esterno;
- Una pompa per la circolazione della salamoia;
- Una torre di raffreddamento per la dissipazione del calore creato dal liquido frigorifero nella fase di compressione.

Trattamenti termici con alte temperature

Generalità

Il trattamento termico ad alte temperature di terreni limoso-argillosi, rappresenta un metodo di rara applicazione negli interventi di consolidamento e stabilizzazione dei versanti. L'elevato costo del combustibile necessario ha limitato moltissimo l'uso di questa tecnica, applicata solamente in zone dove questo è disponibile in grande quantità ed a poco prezzo (gas naturali, gas di scarto ottenuti dalla lavorazione di prodotti petroliferi ecc.).

In Europa, un esempio dell'uso del gas naturale per stabilizzare colate di fango sulla costa bulgara del Mar Nero è riportato da Beles e Stanculescu (1968). Il gas era combusto, mediante bruciatori, in apposite buche di grande diametro scavate nelle argille dando luogo alla formazione di colonne di argilla indurita che agiscono all'interno del terreno circostante come elementi di rinforzo e sostegno (in modo analogo ai pali).

Descrizione e Caratteristiche

Le elevate temperature, prodotte dalla combustione, hanno l'effetto di eliminare l'acqua in eccesso contenuta nel terreno, fino alla sua essiccazione, successivamente di "cuocerlo" a temperature maggiori di 100° - 500°. Il trattamento causa un cambiamento duraturo nella struttura dell'argilla che perde le sue caratteristiche di plasticità, compressibilità e capacità di assorbimento dell'acqua, migliorando sensibilmente le sue proprietà fisico-meccaniche.

Questa tecnica risulta molto efficace come sistema di stabilizzazione di movimenti franosi di tipo superficiale, con superficie di scorrimento poco profonda, come ad esempio colate di fango o di argilla, ma è raramente utilizzata per gli alti costi.

Stabilizzazione e miglioramento di terreni di fondazioni e di pendii in frana mediante la moderna tecnologia della "Torchia al Plasma". messa a punto negli USA. Con questo sistema la torcia viene calata entro i fori di sondaggio di piccolo diametro e sollevata gradualmente fino a raggiungere la superficie. L'elevatissima temperatura della fiamma provoca dei rapidi ed irreversibili cambiamenti delle proprietà e dello stato dei terreni, solidificandoli e formando delle colonne di terreno consolidato. Questa moderna tecnologia consente di superare le limitazioni presenti nell'uso dei metodi di trattamenti termici tradizionali che impiegano combustibili naturali.



Particolare della torcia al plasma

Generalità

Questo tipo di trattamento è stato sperimentato ed applicato con successo a partire dagli anni 60 soprattutto nelle regioni circumpolari artiche (Svezia, Norvegia, Canada, Alaska, Siberia), per la stabilizzazione ed il consolidamento di argille "sensitive" (Quick clays), che sono sedimenti argillosi costituiti da materiale di trasporto glaciale, depositatosi in ambiente marino. Queste sedimenti sono costituiti prevalentemente da minerali argillosi (clorite, mica, illite, caolinite) oltre a quarzo e feldspati, hanno una granulometria molto fine, hanno elevata sensibilità e non possiedono proprietà tixotropiche. Terreni con comportamenti geomeccanici e composizione mineralogiche simili caratterizzano diverse formazioni, costituite prevalentemente da termini argillosi e affioranti sia in Appennino (Argille Scagliose Auct., Argille Varicolori Auct., depositi torbiditici, ecc.) che in alcune zone dell'arco alpino, formate da materiale di origine glaciale o proveniente dall'alterazione di rocce magmatiche e metamorfiche. In Italia interventi di stabilizzazione con questo trattamento sono stati realizzati recentemente in alcuni tratti di importanti arterie stradali, interessati da movimenti franosi in terreni argillosi.

Descrizione e Caratteristiche

E' noto che i terreni argillosi, formati in prevalenza da minerali argillosi sono stabili fintanto che la concentrazione dei sali, disciolti entro le soluzioni acquose interstiziali dei pori, sono molto elevate. Qualora la concentrazione degli elettroliti nell'acqua interstiziale si abbassa per apporto di acque dolci di varia origine (meteoriche percolanti e/o di falda circolanti nel sottosuolo), si possono verificare delle modificazioni significative delle caratteristiche chimico-fisiche e microtessiture, con conseguente diminuzione della resistenza alla deformazione ed aumento della sensibilità al rimaneggiamento, trasformando l'argilla da uno stato coerente ad uno semifluido. L'aggiunta di additivi chimici nel terreno consente di ricostituire l'originaria microstruttura dell'argilla, secondo una disposizione spaziale più stabile, ottenendo in tal modo un miglioramento delle caratteristiche di consistenza e resistenza del terreno.

Tra i vari tipi di sale sperimentati in questo tipo di trattamento, il cloruro di potassio (KCl) è quello che ha dato i migliori risultati ed è quindi più frequentemente impiegato negli interventi di stabilizzazione del terreno.

L'inserimento e la diffusione del sale nel terreno avviene mediante "pali", di circa 10-15 cm di diametro, dello stesso sale, inserito entro le colonne di perforazione in forma granulare allo stato secco. Le perforazioni sono spinte nel terreno in frana fino a raggiungere il substrato stabile e più resistente (fino a 15-20 m). Un altro sistema, di più recente applicazione, consiste nel miscelare il sale all'argilla entro il foro di carotaggio contemporaneamente alle operazioni di scavo.

Il processo di diffusione del sale nel terreno è innescato dalle acque meteoriche e da quelle della falda circolanti nel sottosuolo. Questo processo è molto lento ed occorrono almeno 10-20 mesi perché produca significativi miglioramenti delle proprietà geotecniche e meccaniche del terreno.

La scelta e la progettazione di questo tipo di trattamento devono essere fatte sulla base dei risultati delle indagini in sito e delle analisi in laboratorio eseguite sulle argille, volte a determinare soprattutto la natura mineralogica dei componenti, le loro caratteristiche chimico-fisiche ed i principali parametri geotecnici. Le indagini devono, inoltre, permettere di conoscere con esattezza lo spessore della massa in movimento, la profondità e la morfologia della superficie di scorrimento, la presenza, il tipo e la localizzazione di eventuali falde poco profonde e la superficie da trattare.

Aspetti ambientali

L'impatto estetico paesaggistico di questo tipo di trattamento è contenuto, occorre tuttavia mettere in risalto la possibilità di inquinamento delle acque di falda, dovuta all'immissione dei sali nei fori di perforazione.

Applicazioni

Il trattamento chimico mediante sali è impiegato soprattutto negli interventi di stabilizzazione e consolidamento dei versanti in frana, costituiti da terreni a prevalente comportamento coesivo, contenenti una significativa percentuale di minerali argillosi quali il "complesso caotico" o le "argille varicolori" affioranti in numerose zone del nostro Appennino. Trattandosi di un procedimento costoso l'uso di questa tecnica è limitato principalmente agli interventi di consolidamento di movimenti franosi che interessano opere civili di notevole importanza.

Generalità

L' *elettroosmosi* e *l'elettrosilicatazione* sono due trattamenti elettrici impiegati per il drenaggio ed il consolidamento di terreni saturi, a comportamento coesivo, molto plastici e poco permeabili. Questi metodi si basano rispettivamente sull'effetto polarizzante della corrente elettrica sull'acqua d'imbibizione, che determina il suo passaggio da un polo positivo a quello negativo (elettroosmosi), e sugli scambi ionici che avvengono tra i terreni argillosi e le soluzioni di silicato di sodio, immesse nel terreno, o gli anodi di alluminio, determinando un effetto di solidificazione dei terreni argillosi.

Le prime applicazioni furono sperimentate da Casagrande (1944), in Canada, per un importante intervento di consolidamento di una scarpata in argilla. In precedenza Casagrande, effettuando prove di laboratorio su argille, aveva scoperto per caso che l'applicazione di un potenziale fra due punti di un provino aveva l'effetto di provocare una migrazione dell'acqua contenuta da un polo all'altro, migliorando sensibilmente le caratteristiche di consistenza e di coesione del materiale. In Italia si hanno notizie dell'uso di questa tecnica di drenaggio e consolidazione nei lavori eseguiti dalla società idroelettrica Sarca Molveno, nel 1950, per la realizzazione dell'impianto di S. Massenza (da pubblicazione dello Studio Italiano di Grafica Mineraria di Piacenza). Altre importanti applicazioni di questa tecnica di stabilizzazione sono state fatte, più recentemente, nei lavori di consolidamento di un vasto movimento franoso in atto nella zona di Pariana (Massa), programmato nel 1969 da parte del Ministero dei Lavori Pubblici.

In tutti i casi, l'applicazione di questa tecnica registrò un miglioramento complessivo delle caratteristiche meccaniche dei corpi argillosi trattati.

Descrizione e Caratteristiche

Elettroosmosi

L'elettroosmosi è realizzata installando un certo numero di elettrodi nel terreno da stabilizzare e, quindi, facendo passare una corrente elettrica continua tra loro. L'acqua contenuta nei pori si carica positivamente e si sposta dall'anodo verso il catodo. Il catodo è generalmente formato da un tubo di metallo forato (pozzo catodico), dove l'acqua penetra e può essere successivamente pompata via. L'anodo può essere costituito da qualsiasi tipo di barra metallica. La configurazione tipica di un impianto di stabilizzazione mediante elettroosmosi prevede una profondità media degli anodi di circa 1,5 - 2,0 m nel terreno da stabilizzare, una spaziatura dei pozzi catodici variabile da 5 a 9 m, con profondità che possono raggiungere anche i 20 - 25 m. Questa tecnica di stabilizzazione è molto costosa e richiede una grande quantità di energia elettrica, con consumi variabili da 1 a 10 kW/m² di terreno stabilizzato.

Elettrosilicatazione

Con il termine "elettrosilicatazione" si definisce il processo di scambio ionico che si verifica al passaggio della corrente, utilizzando anodi in alluminio o introducendo soluzioni di silicato di sodio agli anodi. Il passaggio della corrente continua determina il movimento della soluzione chimica dagli anodi verso il catodo, con scambio di ioni Na e K, presenti nei minerali argillosi, con ioni Al e H dell'anodo o della soluzione. Questo processo causa un cambiamento delle caratteristiche fisico-meccaniche delle argille da consolidare, con diminuzione della loro plasticità ed aumento della consistenza e della coesione.

Aspetti ambientali

Queste tecniche hanno un impatto molto contenuto, con scarse ripercussioni sia dal punto di vista paesaggistico che da quello ecologico-naturalistico sull'ambiente circostante, dato che non comportano grossi lavori di scavo, perforazioni o impieghi di attrezzature pesanti, inoltre le soluzioni normalmente impiegate non sono tossiche.

Applicazioni

Le tecniche di elettroosmosi e/o elettrosilicatazione risultano abbastanza efficaci nel drenaggio e nel consolidamento dei terreni limoso-argillosi saturi, contenenti una significativa percentuale di minerali argillosi "attivi" (minerali argillosi rigonfianti, con elevata capacità di scambio ionico e grande superficie specifica) tipo ad esempio Smectite. Tuttavia, l'alto costo ne limita l'uso solo dove esiste la necessità di consolidare aree in frana che interessano opere civili ed industriali di notevole importanza, o per permettere ad esempio l'esecuzione di scavi di gallerie in terreni a comportamento coesivo sede di falde acquifere.

Trattamento elettroosmotico per il drenaggio e la stabilizzazione di terreni limoso-argillosi, le frecce indicano la direzione del flusso d'acqua e l'area a tratteggio obliquo la porzione di terreno stabilizzato. (A) Scavo di tunnels attraverso terreni limoso-argillosi saturi. (B) Drenaggio alla spalle di paratie o di palancole metalliche negli scavi in terreni sotto falda per diminuire le spinte del terreno. (C) Stabilizzazione di scarpate naturali o artificiali in terreni limoso-argillosi poco consistenti. (D) Stabilizzazione del terreno circostante cassoni affondati in terreni poco consistenti.

