

Le iniezioni nell'Ingegneria Civile

R. BOWEN: *Grouting in Engineering Practice*. Applied Science Publishers - London 1975.

Sul fronte delle iniezioni qualcosa eppur si muove. Ci sembra degno di nota il libro che qui recensiamo, edito nel 1975 ma solo recentemente pervenutoci: in esso vengono succintamente descritti i più recenti progressi del campo, senza però eccessivi dettagli come, ad es., nel trattato del Cambefort.

Il libro inizia con un breve cenno sulla classificazione delle iniezioni. All'inizio del secolo, potendosi usare solo il cemento o il silicato di sodio, all'impiego di quest'ultimo era riservato il termine di « iniezioni chimiche ».

Negli ultimi venti anni sono state realizzate molte nuove miscele, a base oppur no di silicati, alcune con viscosità molto bassa. Una suddivisione tra miscele con viscosità molto maggiore dell'acqua e miscele con viscosità pari all'acqua non darebbe più risalto all'effetto chimico. È stata proposta [JONES] una suddivisione tra miscele organiche e inorganiche, ma con poco successo. Altro elemento di riferimento potrebbe essere il comportamento del fluido: se newtoniano o binghamiano, ovvero potrebbe parlarsi solo di: sospensioni, soluzioni, emulsioni.

Recentemente si è diffusa la tecnica delle iniezioni a fine di costipamento (*compaction grouting*): essa differisce dalle iniezioni convenzionali perché, mentre con queste si cerca di riempire i pori del terreno o le fratture della roccia, con quella si cerca di aumentare il peso del terreno immettendo in esso una miscela viscosa che provoca una dislocazione delle parti di terreno da essa divise, che così vengono costipate. L'Autore distingue tale tecnica da quella chiamata « per claquage » in quanto quest'ultima riguarderebbe i soli terreni molto fini nei quali la miscela si insinua a guisa di lingua attraverso piani di più debole resistenza: ne consegue, oltre che un effetto di costipamento, anche uno d'impermeabilizzazione dato che i volumi di terreno divisi dalla miscela vengono avvolti in membrane impermeabili.

Quanto alle iniezioni di cemento, con o senza l'aggiunta di altri materiali

(sabbia, pozzolana, ceneri, argilla, bentonite, additivi) è da ricordare il significato di « unit take », termine proposto da GRANT [1964], per rappresentare l'assorbimento unitario di miscela quale misura della capacità ricettiva di un terreno.

Esso viene espresso in quantità di miscela assorbita per unità di lunghezza di foro. Nella pratica l'assorbimento unitario, messo in diagramma in funzione della spaziatura tra i fori per ogni stadio d'iniezione, fornisce delle curve utili all'operatore per il buon esito del trattamento. Si può così intervenire in corso d'opera per densificare o comunque modificare la miscela e per portare assorbimenti e costi a valori accettabili.

Quando al cemento si aggiunge la bentonite, occorre sorvegliare che il PH della miscela sia elevato quanto necessario per evitare la flocculazione. Un po' di fosfato di sodio è utile per riportare la miscela al PH desiderabile: è l'epoca degli additivi, abbondantemente citati nel libro (Sika 4, Embeco, Intraplast, Plastiment, Lignasol, Methocal, etc.).

Il libro contiene utili consigli sulle varie miscele.

È indicato in 10^{-1} cm/sec il coefficiente di permeabilità necessario perché un'alluvione possa ricevere l'argilla-cemento; viene ricordata l'asserzione di Terzaghi (1936) che le iniezioni di solo cemento non siano utilizzabili quando le fessure di una roccia abbiano ampiezza minore di 0,1 mm.

Vengono citati esempi di iniezioni in casi reali, quali Kariba (diga ad arco) ove prima delle iniezioni venne effettuato un accurato spurgo delle fessure della roccia, dopo averle debitamente localizzate; viene ricordato il cosiddetto « E.F.T. Process » e cioè il sistema che consente d'impermeabilizzare un terreno alluvionale immettendo nei fori, scavati per gettare i pali, miscele di argilla-cemento.

Con le miscele a bassa viscosità (soluzioni di resine, ovvero altre miscele a comportamento nettamente newtoniano) è possibile oggi iniettare terreni aventi diametro delle particelle inferiore a 0,1 mm. Per quanto riguarda particolarmente i silicati, è stato verificato che iniezioni silicatiche effettuate venti anni or sono non hanno mostrato effetti di deterioramento, sempreché

siano stati adoperati reagenti adatti. Per quanto riguarda i tempi di gelificazione, i vantaggi dei tempi brevi consistono nel fatto che la miscela non può andare molto lontano. Naturalmente la resistenza del terreno iniettato con silicati è inversamente proporzionale alla loro diluizione, e poiché invece l'iniettabilità del terreno è direttamente proporzionale alla stessa diluizione, consegue che una iniezione facile, in terreni fini, non produce elevata resistenza.

Particolare riguardo viene dato al prodotto denominato Siroc. Distribuito dalla Società Raymond International Inc. di Cherry Hill, New Jersey, comprende tre componenti, oltre l'acqua, e risulta idoneo ad iniettare suoli contenenti il 20% e più di sabbia. Mescolato al cemento e dotato di rapida gelificazione può essere impiegato per fermare venute d'acqua; può essere mescolato anche al cemento e alla bentonite; i suoli sotto falda, trattati con Siroc, non hanno mostrato effetti di deterioramento. Poiché il Siroc è formato da tre componenti, ogni miscela si può definire con tre numeri scritti di seguito, il primo dei quali indica la diluizione del materiale di base (silicato), il secondo la natura dell'accelerante (cloruri, alluminati, bicarbonati) e il terzo il tipo di reagente.

Al variare dei componenti, la miscela acquista maggiore o minore resistenza alle aggressioni di particolari ambienti: così un accelerante a base di cloruri presenterebbe maggiore resistenza verso suoli aventi caratteristiche acide.

Sono anche brevemente descritte le proprietà delle miscele a bassa viscosità denominate: « Lignochrome » (composta da lignosolfato e bicromato) e « TDM » (idem con ancora più bassa viscosità).

Le resine servono specialmente per le sabbie più fini, aventi diametro delle particelle minori di 0,1 mm e coefficiente di permeabilità fino a 10^{-5} cm/sec. Vengono ricordati, e brevemente commentati:

- l'AM9, avente viscosità pressoché pari all'acqua;
- la resorcina formaldeide (altrimenti detta « fenoplasto »);
- l'urea formaldeide;
- il Cyanaloc;
- il Geoseal, prodotto dalla Borden Chemical Co. in Inghilterra, particolar-

mente impiegabile in terreni salini specie con l'aggiunta di NaCl;

— il Terranier, a base di resine polifenoliche, adatto per ottenere resistenze piuttosto elevate, con viscosità riducibile a 4 cp.

Altre resine di elevata viscosità, come le epossidiche, sono appena accennate.

Seguono alcune considerazioni sulle attenzioni da porre per la buona riuscita delle operazioni. Vengono dapprima discusse le distanze tra i fori e tra le file di fori, specie allorché i terreni siano disomogeneamente assortiti, il che richiede a volte che la gelificazione avvenga mentre l'iniezione è in corso. In tal modo vengono riempiti subito i grandi vuoti e la miscela è obbligata a entrare nei piccoli. In generale, occorrerebbe che la gelificazione avvenisse non appena cessata l'iniezione del predeterminato volume di miscela (iniezioni con volume prefissato).

Un'altra attenzione dev'essere posta alle variazioni stagionali di falda acquifera, specie allorché le vie che portano al recapito dell'acqua di falda siano bene aperte e libere. In tal caso appare utile il procedimento proposto da Karol, di tenere il tempo di gelificazione entro il terreno più breve del tempo d'iniezione della miscela.

Vengono infine descritti alcuni interventi d'indubbio interesse.

Il Siroc in specie è stato impiegato per consolidare terreni sabbiosi sciolti, per fondazione di nuovi fabbricati adiacenti a fondazioni di fabbricati preesistenti, ovvero per diminuire cedimenti di altri fabbricati, a torre, che avevano destato preoccupazione. Anche l'AM9 ha al suo attivo molti casi risolti, specie per le impermeabilizzazioni contro acque filtranti: in questi casi è opportuno che i tempi di gelificazione siano anche inferiori al mezzo minuto primo. È anche citato il caso dell'AM9 usato in combinazione con una resina epossidica.

Un intero capitolo è dedicato alla tecnica relativamente nuova denominata « Compaction grouting ». Occorre immettere nel terreno un bulbo di miscela molto viscosa dotata di elevato attrito interno: in tal modo s'induce nel terreno compressibile un effetto di costipamento, cioè di addensamento delle particelle, e non di riempimento dei pori come nelle iniezioni tradizionali.

Una miscela di terra e cemento avente « slump » uguale a zero fu impiegata per la prima volta nel 1940 in California, allo scopo di sollevare alcune strutture. Da allora i lavori del genere si contano a centinaia. La miscela più rispondente è formata da cemento e sabbia limosa; i diametri di iniezione devono essere di circa 5 cm; il pompaggio deve essere continuato finché non si noti un sollevamento del terreno o un abbassamento della pres-

sione d'iniezione: questa, in prima approssimazione, può essere stabilita da 4 a 27 kg/cm² per un terreno composto da sabbia avente $\phi = 30^\circ$ e $\gamma = 1,4 \text{ t/m}^3$, al variare della profondità e del raggio d'iniezione. Il procedimento cessa di aver efficacia a profondità poco al di sotto del piano di campagna (circa 1 m) a meno di non utilizzare sovrappesi, come le stesse costruzioni: perciò il sistema è da considerare un'alternativa, specie in riguardo al costo, alle sottofondazioni mediante pali. È chiaro che tale sistema non è applicabile ai terreni argillosi saturi, non passibili di costipamento.

L'Autore si sofferma nei dettagli del procedimento esecutivo, riportando le conclusioni degli operatori di alcuni lavori del genere, principalmente J. Warner e D.R. Brown nei Proceedings ASCE del 1974. Vengono riportati alcuni esempi riguardanti il ricupero di cedimenti di grossi fabbricati.

Nel capitolo 6° l'Autore ricorda le difficoltà di progetto e di costruzione delle dighe, opere sempre interessate dal procedimento iniettivo. In generale le iniezioni vengono impiegate o per otturare fessure all'interno della diga o per migliorare le fondazioni. Per sanare una fessura verticale, verificatasi nella diga Alcantara (Spagna) durante una notte fredda seguita a un caldissimo giorno, fu usata la resina epossidica. Ma il principale campo d'azione delle iniezioni resta l'eliminazione o la riduzione delle perdite, e su tale argomento l'A. spazia abbastanza, partendo dalla constatazione che le perdite non solo possono provenire da difetti di costruzione ma anche da fenomeni che si verificano nel sottosuolo allorché si procede al riempimento del serbatoio: ad es., per la solubilità di terreni gessosi o calcarei, specie se vi è il concorso del biossido di carbonio presente nell'acqua.

I metodi per individuare le perdite da un serbatoio oggi si valgono di un ausilio prezioso, sul quale l'A. si sofferma a lungo, costituito dai radioisotopi, elementi radiattivi, cioè, che emettono radiazioni. Questi si designano anteponendo il loro numero di massa in alto a sinistra del relativo simbolo chimico. Si chiama « processo radioattivo » la disintegrazione di isotopi instabili intesi a raggiungere una stabile configurazione nucleare: durante tale processo sono emesse particelle nucleari. La velocità del processo viene caratterizzata dalla cosiddetta « mezza vita », cioè dal tempo necessario perché si liberino la metà degli atomi radioattivi che si liberano complessivamente. Gli isotopi possono essere prodotti bombardando elementi stabili mediante neutroni: ne consegue la produzione di una notevole radioattività per unità di peso dell'elemento, la quale può essere segnalata mediante un apparecchio segnalatore delle radiazioni

come il noto contatore di Geiger-Müller.

Per la rivelazione di perdite nei serbatoi i più usati radioisotopi sono il bromo 82 (⁸²Br) e lo iodio (¹³¹I) i quali, sui traccianti usualmente impiegati a base di coloranti, presentano i seguenti vantaggi:

— utilizzati in forma anionica possono essere assorbiti in quantità ridotta e introdotti in piccola quantità a causa dell'elevata sensibilità degli apparecchi rivelatori;

— presentano brevi « mezze vite »: quella dell'⁸²Br è di 35,7 ore; quella del ¹³¹I è di 8,05 giorni.

Ambedue emettono radiazioni di bassa energia.

I metodi per la rivelazione di perdite dai serbatoi mediante radioisotopi sono:

— iniettare un radioisotopo, di facile assorbimento, presso il fondo del serbatoio;

— miscelarlo completamente all'acqua;

In ambo i casi un rivelatore di radiazioni, immerso in profondità, indicherà una maggiore accumulazione di radioisotopi assorbiti ove maggiore è stato il passaggio dell'acqua iniettata. L'iniezione può anche essere fatta attraverso un tubo inserito nei pressi del punto sospettato di perdita. Viene anche descritto uno strumento, chiamato DWICA, per misurare basse velocità di correnti alla base dei serbatoi. Vengono citati alcuni casi di ricerche eseguite con buon esito. L'A. descrive ancora altri metodi per rivelare perdite da serbatoi o da canali, come fase preliminare delle iniezioni d'impermeabilizzazione: i metodi riguardano misure di densità e di umidità dei terreni mediante apparecchi a neutroni (« neutron moisture gauges » e « gamma-gamma densimeters ») e ancora l'impiego dei cosiddetti « isotopi ambientali » cioè facenti parte degli isotopi stabili costituenti la molecola dell'acqua (deuterio, ossigeno 18, tritio, etc.).

I metodi suddetti non ci risulta siano usuali in Italia; ad ogni buon conto esistono alcune pubblicazioni specializzate¹.

Un capitolo è dedicato alle applicazioni delle iniezioni alle fondazioni delle macchine vibranti, alle miniere, alle gallerie e ai ponti.

Circa le fondazioni delle macchine vibranti, è necessario intervenire allorché la frequenza della macchina si avvicina a quella del sistema suolo-fondazione, derivando in tal caso il fenomeno della risonanza. Con le iniezioni è possibile variare la frequenza naturale del terreno: casi concreti, citati nel libro, dimostrano che anche variazioni mi-

(1) V., ad es., *Guidebook on Nuclear Techniques in Hydrology*. International Atomic Energy Agency, Vienna, 1968.

noni del doppio riescono ad eliminare le vibrazioni.

Vengono poi citati casi concreti d'interventi in miniere (per sostenere pareti o tetti, o per tamponare venute d'acqua) in gallerie e in fondazioni di ponti. È consigliato l'uso dell'apparecchio per le fotografie a colori del sottosuolo prese da pozzi (borehole camera).

Un altro capitolo è dedicato alle attenzioni da porre per accertare la natura dei terreni, specie in merito al comportamento chimico. In altri termini, per la buona riuscita delle iniezioni oltre che uno studio geotecnico occorre effettuare un vero e proprio studio geochimico. Ciò sia negli strati prossimi al piano di campagna, ove le piogge e l'evaporazione alterano continuamente una certa fascia di terreno, sia negli strati più profondi ove precipitano i minerali (specie ferro e manganese) disciolti negli strati superiori. Se c'è falda sotterranea, gli equilibri temporali sono spesso rotti per la sopravvenienza di nuovi fenomeni chimici provocati dal variare delle acque.

L'A. non risparmia raccomandazioni sulla necessità d'indagare e di ottenere una chiara rappresentazione del terreno ov'è prevista l'iniezione. Ne riportiamo le principali:

— identificazione e classificazione del terreno: tessitura, struttura, composizione, colore, granulometria;

— prove fisiche: umidità naturale, peso secco, peso specifico, rigonfiamento, porosità;

— prove meccaniche e dinamiche: relazione sforzi-deformazioni, compressione a dilatazione libera, triassiali, velocità delle onde sismiche, modulo di deformazione dinamico;

— determinazione della distribuzione delle dimensioni dei grani, limiti di Atterberg, sezioni sottili;

— prove speciali, ove interessi il comportamento all'atmosfera, al congelamento, ai carichi pesanti.

Ugualmente viene attirata l'attenzione sulle componenti chimiche ed elettrochimiche dei terreni, in ispecie in ordine alla stabilità degli elementi in un

qualsiasi stato di ossidazione, dipendente a sua volta dall'attitudine ad agguingere o sottrarre elettroni al contorno (potenziale di ossidazione e riduzione, detto « redox potential »). Le relative attenzioni devono essere più rigorose per i terreni sedimentari e metamorfici, che non per i magmatici, essendo questi ultimi più stabili; l'acqua invasata in un serbatoio, poi, può accelerare o ritardare i processi naturali di decomposizione del terreno, particolarmente ove siano presenti giunti o contatti tra vari materiali. L'A. distingue tra « rock mass » e « rock material » per sottolineare la differenza che può rilevarsi in pratica tra la natura del terreno e il suo stato di aggregazione.

Alcune considerazioni strettamente tecnologiche chiudono i capitoli: ci sembra interessante la raccomandazione di usare, per la miscelazione dei vari materiali d'iniezione, l'acqua prelevata dal terreno ove s'inietta. Viene consigliato di variare il rapporto acquacimento durante l'iniezione in roccia: una maggiore diluizione iniziale evita il rapido formarsi d'intasamenti. Infatti nelle iniezioni in roccia lo scopo non è d'intasare i vuoti solo in prossimità dell'opera muraria, ma di risanare la roccia per tratti di rilevante ampiezza.

Occorre poi guardare con attenzione i ricorrenti cicli di aumento e diminuzione della pressione durante uno stesso pompaggio a portata costante: si scopre che sono state liberate altre vie di assorbimenti. Viene anche dato avvertimento del pericolo insito nel contatto di alcuni materiali (silicati, acrilamide, resine fenoliche ed epossidiche) con gli operatori. Quanto alla saturazione dei vuoti con le miscele, si tenga conto che difficilmente con le miscele fluide può essere saturato più del 50% dei vuoti.

Infine viene lamentato che raramente vengono fatte valutazioni sui risultati ottenuti: la causa è attribuita sia ai capi d'azienda, che non vogliono sostenere spese maggiori di quelle strettamente attinenti al lavoro, sia alle organizzazioni professionali, incapaci di

trovare la disponibilità dei necessari fondi. L'Autore rende anche colpevoli di ciò i Consulenti e i VIP.

Conclude il libro un « glossario » dei termini più usati: in 24 facciate sono condensati i significati delle parole-chiave dei procedimenti iniettivi. Ogni capitolo è poi corredato da un'estesa e aggiornata bibliografia.

(Franco Mercogliano)

Scavi in presenza di falda

BEDAUX R. - *Terrassement dans les terrains aquifères*. Technique et Documentation; 11, rue Lavoisier Paris; 1978.

L'Autore elenca i procedimenti disponibili per intervenire sulle falde presenti nel terreno (dall'aggottamento dal fondo di uno scavo all'elettroosmosi ed al congelamento), ma concentra la sua attenzione essenzialmente sull'abbassamento della falda mediante pozzi.

Dopo una breve introduzione sul problema degli scavi in presenza di acqua, l'Autore richiama in maniera semplice e chiara le proprietà dei terreni che influenzano la filtrazione fornendone i valori ed espone gli aspetti essenziali dei moti di filtrazione.

Tratta poi con sistematicità il procedimento well-point esaminandone dettagliatamente gli aspetti progettuali, costruttivi e di esercizio, con dovizia di disegni e di dati.

Infine passa all'abbassamento di falde mediante pozzi.

Al termine è sviluppato il progetto di una applicazione di well points ad una trincea.

In conclusione l'opera che si recensisce è un testo semplice, esauriente e completo sull'abbassamento delle falde, certamente molto utile per chi deve affrontare per la prima volta tali problemi, meno indicato per chi ha già una conoscenza generale dell'argomento e desidera approfondire i problemi ancora irrisolti di questo settore.

(Arturo Pellegrino)