

Una verifica sperimentale degli effetti della gettiniezione

P. CROCE, A. GAJO, L. MONGIOVÌ, A. ZANINETTI*

SOMMARIO. Si riporta uno studio sperimentale finalizzato all'analisi degli effetti della gettiniezione (*jet-grouting*) su terreni a grana grossa e a grana fina. A tale scopo è stato eseguito uno specifico intervento, in condizioni accuratamente controllate. Prima e dopo l'esecuzione del trattamento, sono state effettuate diverse indagini, in sito ed in laboratorio, comprendenti prove geotecniche di tipo convenzionale e misure dinamiche di nuova concezione. L'analisi dei numerosi dati ottenuti consente di rilevare la marcata dipendenza delle caratteristiche dei materiali trattati dalle proprietà geotecniche dei terreni e fornisce alcune indicazioni per il progetto ed il controllo degli interventi.

1. Introduzione

La tecnica della gettiniezione (*jet-grouting*) consiste nell'iniezione di miscele fluide, proiettate ad alta velocità nel sottosuolo attraverso uno o più ugelli posti all'estremità di un'asta metallica cava. La specificità del metodo risiede nell'azione meccanica dei getti fluidi, mediante i quali si produce un complesso fenomeno di disgregazione e permeazione del terreno, il cui obiettivo finale è la cementazione del terreno stesso. I procedimenti esecutivi attualmente in uso, con denominazioni commerciali diverse, possono essere classificati in tre categorie: monofluido, bifluido, trifluido (Fig.1).

Nel sistema monofluido, le azioni di disgregazione e permeazione del terreno sono svolte da un'unica miscela, costituita generalmente di acqua e cemento. Il procedimento esecutivo comprende due fasi successive: nella prima fase, si introduce l'asta metal-

lica nel sottosuolo, mediante perforazione a rotazione; quindi l'asta viene estratta lentamente dal terreno, mentre ruota intorno al proprio asse con velocità costante. In questa seconda fase, la miscela cementizia viene espulsa in direzione normale all'asta d'iniezione, determinando il consolidamento del terreno circostante.

Il sistema bifluido è simile al monofluido, con l'unica differenza che ciascun ugello consente l'iniezione contemporanea di miscela cementizia ed aria compressa. L'introduzione dell'aria compressa ha lo scopo di facilitare la disgregazione del terreno ed incrementare quindi il raggio d'azione del trattamento.

Il sistema trifluido può consentire di estendere ulteriormente l'ampiezza del consolidamento, separando le azioni di disgregazione e permeazione del terreno. Con questo particolare procedimento, il meccanismo disgregativo viene determinato da un getto di acqua ed aria compressa, che ha anche lo scopo di provocare la parziale asportazione del terreno. Quest'ultimo viene trascinato in superficie dal medesimo fluido disgregante, che rifluisce lungo lo spazio libero compreso tra il foro e l'asta d'iniezione. Contemporaneamente, la miscela cementizia, proiettata attraverso un ugello sottostante al precedente, riempie i vuoti prodotti dall'asportazione del terreno, mescolandosi con i frammenti solidi non rifluiti in superficie.

Indipendentemente dal particolare sistema adottato, scopo dei trattamenti di gettiniezione è la realizzazione nel sottosuolo di elementi di terreno cementato, di forma approssimativamente cilindrica, comunemente denominati «colonne consolidate». Queste ultime possono essere successivamente rinforzate con l'inserimento di armature metalliche, generalmente di forma tubolare. Diminuendo opportunamente l'interasse dei trattamenti, è possibile collegare tra loro diverse colonne consolidate, al fine di costituire strutture di varie caratteristiche geometriche.

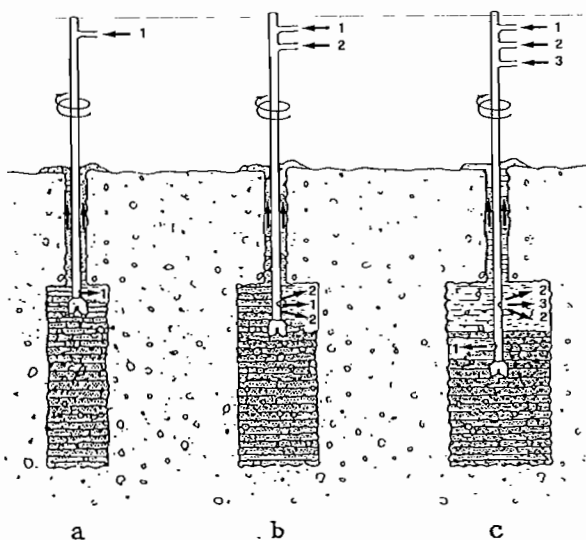


Fig. 1 - Procedimenti esecutivi per i trattamenti di gettiniezione: a monofluido; b bifluido; c trifluido; 1 miscela cementizia; 2 aria; 3 acqua.

P. Croce, Ricercatore, Università di Roma «Tor Vergata»; A. Gajo, Ricercatore, Università di Trento; L. Mangiovi, Professore Straordinario di Geotecnica, Univ. di Trento; A. Zaninetti, Ingegnere, ENEL-CRIS, Milano.

Le applicazioni portate a termine con successo negli ultimi anni sono molteplici e riguardano opere di vario tipo: fondazioni, strutture di sostegno, diaframmi, gallerie. Tuttavia, in alcuni casi, i risultati ottenuti non sono stati soddisfacenti, ponendo in luce l'esigenza di approfondire le conoscenze sull'argomento.

Si osserva infatti che l'attenzione degli specialisti è stata rivolta, prevalentemente alla messa a punto dei procedimenti esecutivi, che sono ormai sufficientemente collaudati. D'altra parte, tra i numerosi casi applicativi riportati in letteratura, solo poche sono le descrizioni esaurienti degli effetti prodotti dai trattamenti. Si rilevano, inoltre, l'esiguità degli studi sperimentali sulle caratteristiche fisico-meccaniche dei materiali trattati e la scarsa attenzione dedicata all'influenza delle proprietà geotecniche dei terreni da trattare. Anche i tentativi di interpretazione teorica del meccanismo di consolidamento sono in una fase ancora preliminare.

Considerando lo stato attuale delle conoscenze sulla gettiniezione, è sembrato utile intraprendere un'attività di ricerca sistematica che, partendo da una serie di osservazioni sperimentali, ha il duplice obiettivo di mettere a punto tecniche di controllo dell'efficacia dei trattamenti e di sviluppare modelli teorici per l'analisi e l'interpretazione dei fenomeni indotti nel terreno dalla gettiniezione.

L'occasione per un primo studio sperimentale si è presentata durante la costruzione di alcuni viadotti autostradali, per i quali sono stati eseguiti estesi interventi di gettiniezione. Confrontando le diverse tecniche adottate nei trattamenti monofluido esaminati [CROCE *et al.*, 1990], si è constatato che, nonostante la varietà delle modalità esecutive (numero e diametro degli ugelli, portata della miscela, velocità di rotazione e di innalzamento, pressione di iniezione) il volume di miscela iniettato per metro di trattamento risulta compreso in un'intervallo relativamente ristretto ($0,3 \div 0,4 \text{ m}^3/\text{m}$). Si è rilevato, inoltre, che l'efficacia dei trattamenti è correlabile al rapporto tra volume di miscela assorbito dal terreno e volume immesso a boccaforo e che tale rapporto varia sensibilmente, in funzione delle caratteristiche geotecniche dei terreni.

Le osservazioni eseguite hanno indicato inoltre che, nei terreni limo-argillosi, i trattamenti hanno un'efficacia molto ridotta, almeno quando si adotta il sistema monofluido. Nei terreni ghiaio-sabbiosi, si è invece constatato che la gettiniezione determina generalmente una forte cementazione. Si è ravvisata dunque la necessità di intensificare il rilevamento ed il confronto sistematico delle caratteristiche dei terreni, dopo il trattamento, in rapporto alle loro proprietà geotecniche originarie.

Uno studio particolarmente accurato è stato condotto su due trattamenti sperimentali, eseguiti per le fondazioni del Viadotto Fadalto, ubicato su un pendio fortemente inclinato costituito di materiali a grana grossa [MONGIOVI *et al.*, 1991]. Le indagini in sito sul materiale trattato hanno compreso sondaggi a carotaggio continuo e prove *cross-hole*. Le indagini di laboratorio hanno riguardato numerosi campioni cilindrici prelevati mediante carotaggi ed alcuni campioni cubici, di grandi dimensioni, sui quali sono state eseguite prove meccaniche di vario tipo e misure della velocità di propagazione delle onde longitudinali.

Lo studio del caso Fadalto ha indicato che il comportamento meccanico rilevato in laboratorio, sui campioni rappresentativi del materiale ben cementato, può essere assimilato a quello di un calcestruzzo di mediocre qualità. Tuttavia, le prove in sito hanno evidenziato marcate disuniformità del trattamento, correlabili a modeste variazioni granulometriche del terreno naturale. Si è inoltre osservato che il trattamento determina un complesso fenomeno di disgregazione, miscelazione e permeazione. In particolare, si possono distinguere due zone principali: una zona interna, nella quale il getto fluido produce la disgregazione e la miscelazione del terreno, ed una esterna, dove prevale un fenomeno di permeazione che non altera significativamente la struttura del terreno naturale [MONGIOVI e CROCE, 1993].

Nella presente nota, si descrive un nuovo studio sperimentale, finalizzato all'analisi degli effetti della gettiniezione su terreni a grana grossa ed a grana fina. A tale scopo, è stato eseguito uno specifico intervento, in condizioni accuratamente controllate. Prima e dopo l'esecuzione del trattamento, sono state effettuate numerose indagini, in sito ed in laboratorio, che comprendono prove geotecniche di tipo convenzionale e misure dinamiche di nuova concezione. L'analisi dei dati ottenuti consente di verificare la dipendenza dei risultati dell'intervento dalle proprietà geotecniche dei terreni naturali.

2. Indagini sperimentali

L'intervento sperimentale di gettiniezione è stato eseguito sui depositi alluvionali del torrente Polcevera (GE), in un sito caratterizzato dalla presenza di due diversi materiali: terreni a grana grossa, fino a circa 8 m di profondità, e terreni a grana fina, a profondità maggiori (Fig. 2).

Le indagini eseguite hanno mostrato che il sedimento alluvionale di superficie è costituito da terreni eterogenei, dal punto di vista petrografico, con

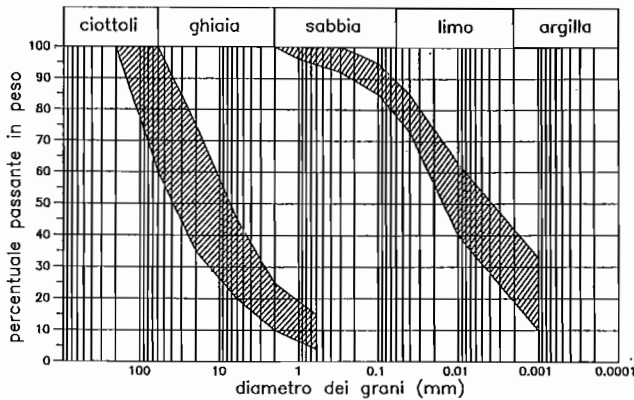
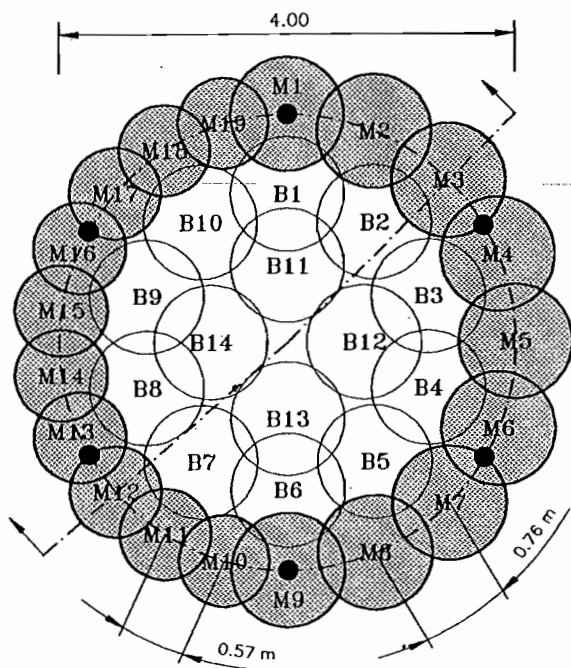


Fig. 2 - Distribuzione granulometrica del deposito superiore di materiale grossolano e del sottostante strato di terreno a grana fina.

elementi di origine antropica. L'analisi granulometrica del materiale grossolano indica, inoltre, che la percentuale di ciottoli diminuisce leggermente con la profondità. Il sottostante deposito a grana fina è costituito da limo argilloso sabbioso, con limite di liquidità $w_l = 0,32 \div 0,38$ ed indice di plasticità $I_p = 0,09 \div 0,13$. Si segnala inoltre che, durante l'esecuzione dei trattamenti e delle indagini, la quota della falda ha subito rapide oscillazioni, tra il piano campagna ed il tetto del deposito limoso, collegate al regime torrentizio del Polcevera.



Colonne consolidate	Diametro nominale	Sistema esecutivo
M.1 ÷ M.9	1.00 m	Monofluido
M.10 ÷ M.19	0.80 m	Monofluido
B.1 ÷ B.14	1.00 m	Bifluido

Fig. 4 - Schema dell'intervento (sezione orizzontale) e ubicazione dei sondaggi.

La geometria dell'intervento (Figg. 3 e 4) è stata prescelta allo scopo di realizzare successivamente uno scavo d'ispezione all'interno della zona di terreno consolidato. In particolare, sono stati eseguiti 33 trattamenti colonnari: 19 con il sistema monofluido (M) e 14 con il bifluido (B). I trattamenti tipo M sono stati ubicati in modo da realizzare un anello di materiale consolidato, del diametro di 4 m, fino alla profondità di 13 m. I trattamenti tipo B sono stati eseguiti all'interno dell'anello suddetto, a profondità compresa tra 11 e 13 m circa, nell'intento di assicurare la stabilità del fondo dello scavo d'ispezione. Più precisamente, è opportuno distinguere tre gruppi di trattamenti colonnari: M1 ÷ M9 (monofluido con diametro nominale delle colonne pari a 1,00 m), M10 ÷ M19 (monofluido con diametro nominale 0,80 m) e B1 ÷ B14 (bifluido con diametro nominale 1,00 m).

I parametri di controllo, registrati automaticamente, hanno evidenziato l'uniformità del procedi-

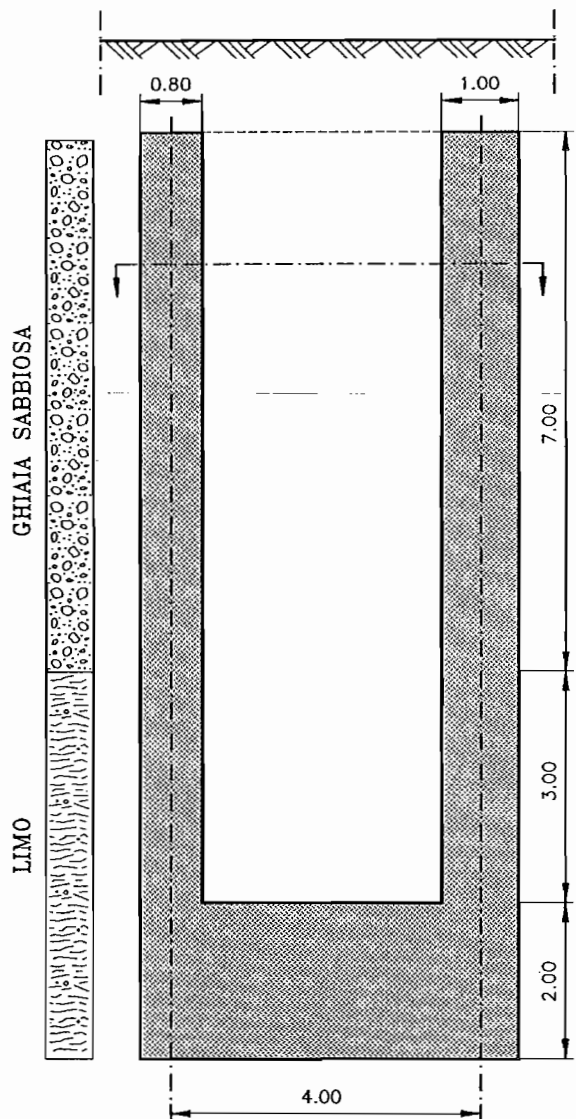


Fig. 3 - Schema dell'intervento (Sezione verticale).

mento esecutivo, dalla profondità massima del trattamento fino ad $1 \div 2$ m dal piano campagna, dove il getto è stato interrotto per evitare il sollevamento del terreno. I dati caratteristici dei trattamenti sono: velocità di rotazione $1,6 \div 2,1$ rad/s ; velocità media di sollevamento $4,4 \div 6,7$ mm/s ; portata di miscela iniettata $1,7 \div 2,0 \times 10^{-3}$ m³/s. Il volume di miscela iniettata per metro lineare di trattamento risulta quindi compreso tra 0,3 e 0,4 m³/m, in accordo con i dati rilevati negli studi precedenti.

Le indagini in sito sul terreno trattato hanno compreso sondaggi e misure geofisiche. Lo scavo d'ispezione è stato eseguito all'interno e, parzialmente, all'esterno dell'anello di materiale consolidato, con prelievo di alcuni blocchi del volume di 1 m³ circa.

I sondaggi sono stati eseguiti procedendo a carotaggio continuo, con circolazione d'acqua. Le percentuali di carotaggio ottenute sono comprese tra 15 e 50%, con valori di RQD ancora più modesti (15% circa) ed indicano quindi che il materiale non è cementato con continuità. In particolare, nel sondaggio eseguito in asse alla colonna M1 (Fig. 4), si osserva che la costituzione del materiale varia nettamente alla profondità di 8,70 m, corrispondente approssimativamente al passaggio dal deposito di materiale grossolano al sottostante terreno limoso. Infatti, nella parte superiore, si rinviene materiale costituito da elementi lapidei e boiaccia di cemento, con grado di cementazione variabile, mentre, nella zona inferiore, le carote sono formate quasi interamente di boiaccia. Nel sondaggio eseguito tra le colonne M6 ed M7, si rinviene, fino alla profondità di 9 m, materiale simile a quello recuperato dal sondaggio relativo alla colonna M1 mentre, a profondità superiori, le carote risultano costituite di terreno limoso. Il terzo sondaggio, eseguito tra le colonne M12 ed M13, fornisce risultati analoghi al precedente, con la differenza che il passaggio al terreno limoso si osserva alla profondità di 12 m.

Le differenze riscontrate in profondità, tra i primi due sondaggi considerati, possono essere spiegate ammettendo che il diametro delle colonne consolidate si riduca sensibilmente nel materiale a grana fina, dove l'intervento produce essenzialmente il riempimento della perforazione con la miscela cementizia. I risultati del terzo sondaggio sono di più difficile interpretazione, per la presenza di materiale lapideo grossolano fino alla profondità di 12 m.

I diametri delle colonne M1, M2, M18 ed M19 sono stati misurati direttamente, dopo lo scavo di ispezione, fino alla profondità di 4,5 m circa. Nell'interpretazione delle misure (Fig. 5), occorre tuttavia considerare che il bordo delle colonne all'interno del pozzo (I) è stato smussato durante lo scavo, mentre all'esterno (E) si è generalmente conservata la forma irregolare prodotta dal trattamento. Risulta,

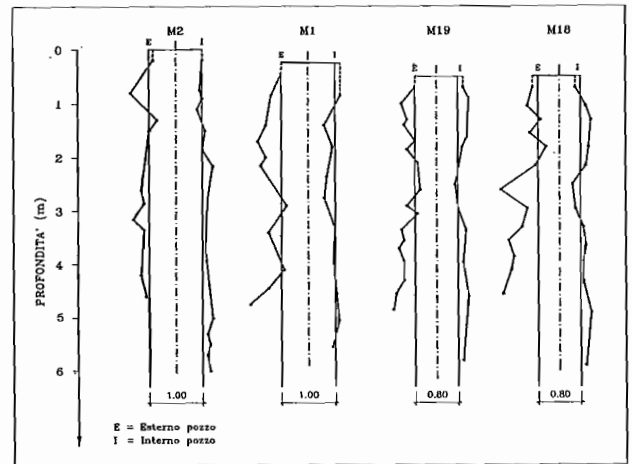


Fig. 5 - Profilo delle colonne consolidate.

in particolare, che le due colonne con diametro nominale 1,00 m hanno diametro minimo di 0,80 m e diametro medio di 1,20 m, mentre le due colonne con diametro nominale 0,80 m hanno diametro minimo di 0,70 m e diametro medio di 1,10 m.

L'esame visivo eseguito all'interno del pozzo ha mostrato che le alluvioni grossolane risultano ben consolidate, dando luogo ad un conglomerato cementizio eterogeneo, ma consistente. In corrispondenza del banco limoso, gli effetti del consolidamento non sono stati verificati direttamente, a causa di difficoltà tecniche incontrate nell'approfondimento del pozzo. Da una osservazione locale, si è rilevata comunque la presenza di una colonna di boiaccia di cemento, il cui diametro è stato stimato di circa 0,30 m.

Le misure geofisiche hanno compreso carotaggi sonici, prove *cross-hole* e tomografie soniche.

I carotaggi sonici sono stati eseguiti con una sonda cilindrica, del diametro di 45 mm, sulla quale sono alloggiati un trasmettitore ed un ricevitore piezoelettrici, distanziati di un metro ed isolati acusticamente; l'accoppiamento dei due trasduttori con il terreno è ottenuto per mezzo dell'acqua con cui è riempito il foro. Le misure sono state eseguite spostando la sonda verticalmente, ad intervalli di 0,5 m, e determinando, volta per volta, la velocità delle onde longitudinali.

Le prove *cross-hole* hanno consentito di determinare la velocità di propagazione delle onde longitudinali e di quelle trasversali. I percorsi di misura adottati sono sub-orizzontali, con scansione verticale di 0,5 m. Le distanze tra trasmettitore e ricevitore sono state determinate accuratamente, dai rilievi plan-altimetrici dei boccafiori e dalle misure inclinometriche eseguite nei fori. Le velocità di propagazione sono state calcolate dalla misura del tempo compreso tra emissione e ricezione del segnale, nell'ipotesi di percorso rettilineo.

Per le onde longitudinali, si è utilizzato un trasmet-

titore a scintilla, all'interno del quale viene generata una piccola esplosione tramite una scarica di corrente ad alta tensione in una soluzione salina. I segnali sono stati rilevati da un ricevitore idrofonico.

Per le onde trasversali, è stato impiegato un generatore elettrodinamico, fissato alla parete del foro, che consente di trasmettere al terreno sollecitazioni verticali sia verso l'alto che verso il basso. Per la ricezione, si è utilizzato un geofono sensibile solo alle oscillazioni verticali, fissato pneumaticamente alle pareti del foro.

A titolo di esempio, si riportano i diagrammi della velocità di propagazione delle onde longitudinali ottenuti dalle prove *cross-hole* e dai carotaggi sonici, per la coppia di fori adiacenti relativi alle colonne M1 ed M16 (Fig.6). Pur essendo l'andamento alquanto variabile, si può notare che i valori di v_p diminuiscono sensibilmente, passando dal terreno a grana grossa al terreno a grana fina. Tale andamento risulta più evidente se, per ciascun tipo di prova, si rappresentano su di un'unico diagramma tutti i valori misurati (Fig. 7). I dati sono interpolati con correlazioni lineari a tratti, che mettono in evidenza quattro zone distinte.

Nella zona più superficiale, dello spessore di circa 2 m, la velocità di propagazione aumenta rapidamente procedendo verso il basso, a partire da valori relativamente modesti. Questi ultimi denotano una minore efficacia del trattamento in superficie, legata probabilmente alla necessità di ridurre la pressione d'iniezione in prossimità del piano campagna, onde evitare un eccessivo rifluimento della malta e l'eventuale sollevamento del terreno.

In una zona intermedia, compresa tra 2 e 7 m circa,

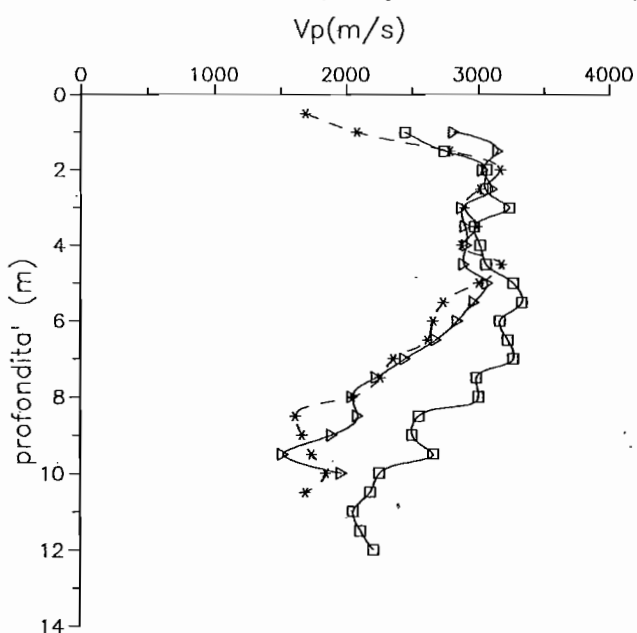


Fig. 6 - Risultati delle misure *cross-hole* (*) e dei carotaggi sonici (Δ , \square) relativi alle colonne M1 ed M16.

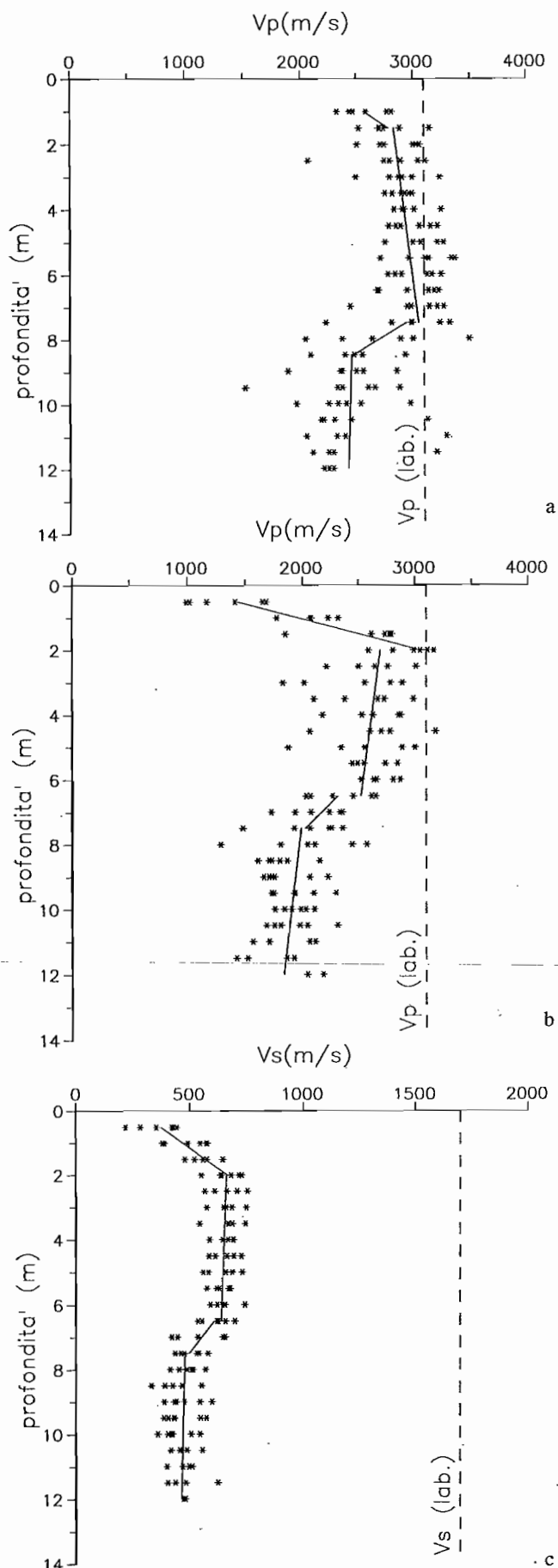


Fig. 7 - Risultati delle misure dinamiche: a valori di v_p ricavati dai carotaggi sonici; b valori di v_p ricavati dalle prove *cross-hole*; c valori di v_s ricavati dalle prove *cross-hole*.

la velocità è mediamente costante intorno a valori alquanto elevati (per il carotaggio sonico, $v_p = 2800$ m/s ; per le misure *cross-hole*, $v_p = 2600$ m/s , $v_s = 650$ m/s) che denotano la buona qualità del trattamento, per il materiale a grana grossa.

Segue una zona di transizione, tra 7 e 8 m di profondità, nella quale la velocità si riduce rapidamente. Tale risultato, che non ha riscontro con la situazione reale, può dipendere, in parte, da eventuali variazioni di spessore della coltre a grana grossa ed, in parte, dalle semplificazioni introdotte nell'interpretazione dei dati. Infatti, per la presenza di un materiale più rigido a quote poco più elevate di quella di misura, le prime onde rilevate dal ricevitore potrebbero aver seguito percorsi marcatamente non rettilinei, corrispondenti a fenomeni di rifrazione.

Infine, nella zona più profonda, al di sotto degli 8 m, la velocità si mantiene mediamente costante, con valori relativamente bassi (per il carotaggio sonico, $v_p = 2400$ m/s; per le misure *cross-hole*, $v_p = 1900$ m/s , $v_s = 470$ m/s) che indicano la modesta qualità del trattamento nel terreno a grana fina.

I dati relativi al materiale trattato possono essere confrontati con quelli del materiale non trattato, dedotti dalle misure *cross-hole* eseguite all'esterno della zona di intervento, con livello della falda poco superiore al tetto del deposito limoso. In particolare, il terreno risulta caratterizzato, prima del trattamento, dai seguenti valori medi: $v_p = 1200$ m/s e $v_s = 330$ m/s, per lo strato superficiale di materiale grossolano; $v_p = 1500$ m/s e $v_s = 390$ m/s, per i terreni limosi saturi inferiori. Gli incrementi riscon-

trati dopo il trattamento sono quindi molto elevati nel materiale a grana grossa, mentre risultano alquanto più ridotti nel terreno a grana fina.

In aggiunta ai carotaggi sonici ed alle prove *cross-hole*, che possono ormai essere considerati tecniche convenzionali, è stato impiegato il recente metodo della tomografia sonica [BERTACCHI *et al.* 1991; ZANINETTI 1993] che consiste nell'esecuzione di un elevato numero di misure tra due fori paralleli, lungo percorsi a diversa inclinazione. Tali misure sono effettuate con tecniche simili a quelle delle prove *cross-hole*. La scansione verticale dei punti di trasmissione e ricezione è pari a 0,5 m. Le misure sono elaborate con un procedimento di calcolo, analogo a quello utilizzato nel campo della diagnostica medica (T.A.C.), che permette di tenere conto degli effetti della rifrazione, rimuovendo l'ipotesi di percorsi rettilinei di propagazione.

Nel caso in esame, oltre alle tomografie basate sulla velocità di propagazione delle onde di compressione, sono state eseguite, in via sperimentale, anche tomografie relative alle onde di taglio. I risultati delle elaborazioni sono riportati graficamente, sia per le misure con onde P (Fig.8) che per quelle con onde S (Fig.9), adottando una rappresentazione cromatica dei diversi campi di velocità. Nell'analisi dei risultati relativi alle onde di taglio, occorre comunque procedere con cautela, considerato il carattere innovativo delle misure eseguite.

Anche dalle tomografie risulta che, dopo il trattamento, la zona superiore, corrispondente al deposito di terreno grossolano, è caratterizzata da elevati

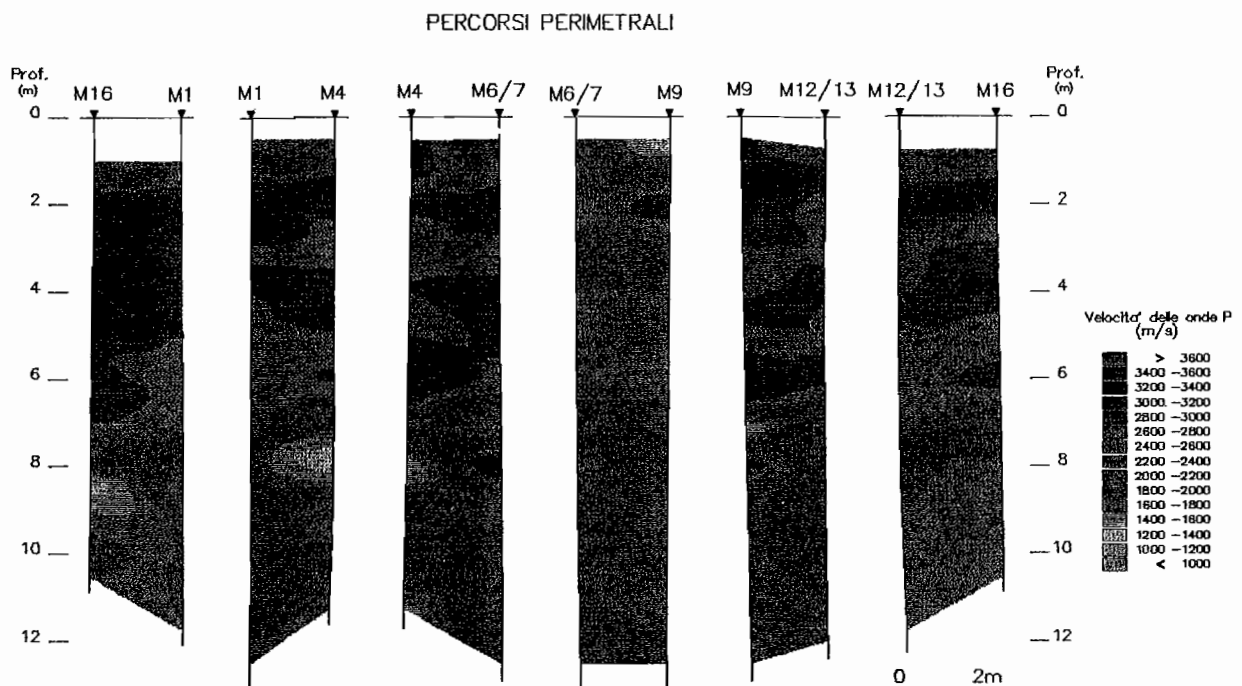


Fig. 8 - Tomografie soniche delle onde di compressione.

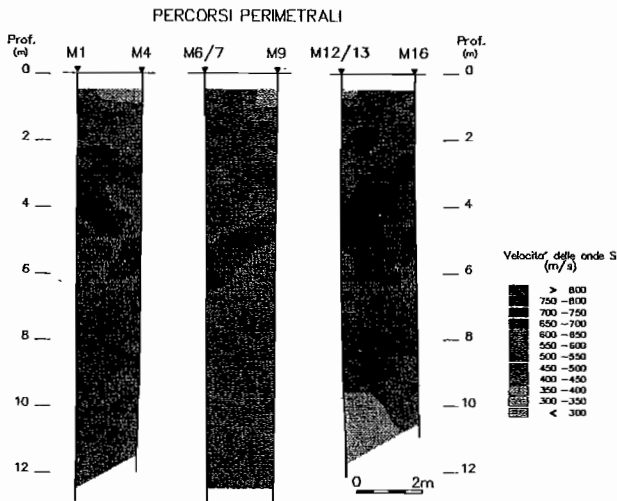


Fig. 9 - Tomografie soniche delle onde di taglio.

valori di velocità delle onde P e delle onde S mentre, nella fascia inferiore corrispondente al terreno limoso, si rilevano valori di velocità nettamente inferiori. Le tomografie consentono, inoltre, di osservare variazioni locali di risposta del materiale trattato. Ad esempio, nella zona superiore, il tratto M9-M6/7 è caratterizzato da valori relativamente bassi di v_p , al contrario del tratto M1-M16 nel quale si raggiungono i valori massimi. Tali risultati sono peraltro in accordo con le misure *cross-hole*.

Le indagini di laboratorio sono state eseguite su campioni cilindrici, del diametro di 100 mm, costituiti da porzioni delle carote estratte dai sondaggi e da provini ricavati dai blocchi. Tutti i campioni provenivano dalla zona superiore di terreno trattato, corrispondente alle alluvioni grossolane, ed erano costituiti da elementi lapidei, di forma e dimensioni varie, ben cementati dalla miscela iniettata.

I campioni sono stati sottoposti a misure di v_p e v_s , prove di compressione semplice, di trazione e di taglio diretto.

Si riportano i risultati delle prove di compressione (Fig. 10), che sono caratterizzati da notevole dispersione. La resistenza è compresa tra 5,9 e 21,2 MPa ed il modulo tangente di elasticità, determinato in corrispondenza del valore di tensione applicata pari alla metà di quella di rottura, varia tra 1600 e 6700 MPa. Le prove di trazione diretta hanno fornito risultati molto variabili, con valori medi di resistenza alquanto modesti ($\sigma_t = 0,25 \div 0,35$ MPa).

I risultati delle prove di taglio diretto sono sintetizzati riportando su un medesimo diagramma i valori della resistenza di picco e quelli della resistenza residua (Fig. 11). Anche in questo caso, i dati risultano alquanto dispersi, forse a causa delle limitate dimensioni dei provini, in rapporto alle dimensioni massime degli elementi lapidei. Si può tuttavia rile-

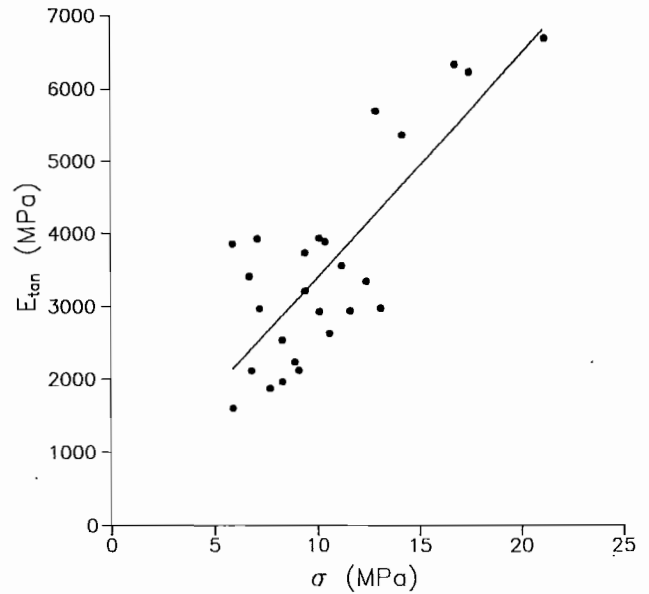


Fig. 10 - Risultati delle prove di compressione semplice.

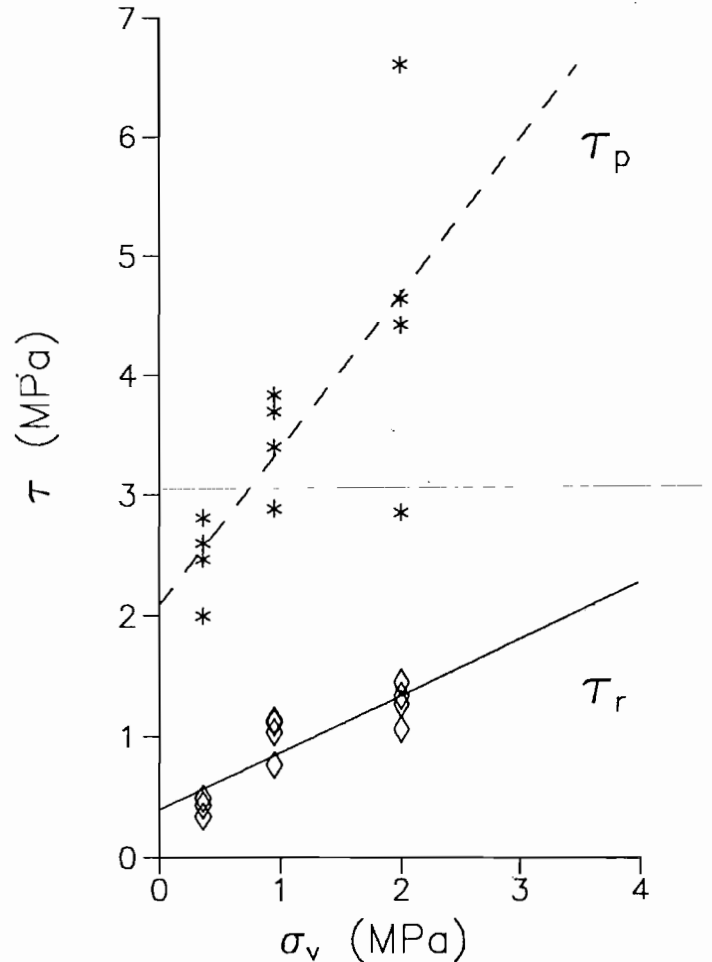


Fig. 11 - Risultati delle prove di taglio diretto.

vare un andamento medio curvilineo, che risulta più evidente per i valori della resistenza residua. Adottando comunque un'interpolazione lineare, si ricavano i seguenti valori dell'angolo d'attrito e della coesione: $\phi_p = 52^\circ$, $c_p = 2,09$ MPa; $\phi_r = 25^\circ$, $c_r = 0,40$ MPa. Tali valori medi vanno comunque interpretati con cautela, tenendo presente l'eterogeneità del materiale ed i modesti livelli di tensione applicati.

Prima di preparare i campioni per le prove meccaniche, sono state eseguite misure di velocità sonica sulle carote più lunghe. Per la trasmissione e la ricezione delle onde P, sono stati impiegati trasduttori a pastiglia piezoelettrica, con frequenza propria di 100 ÷ 200 kHz, posti direttamente a contatto delle carote, sulle estremità opposte. Per le misure relative alle onde S, le pastiglie piezoelettriche sono state disposte in modo da generare una sollecitazione torsionale.

Le misure della velocità di propagazione delle onde di compressione e di taglio sono ben correlabili tra loro (Fig. 12); i valori medi sono $v_p = 3100$ m/s e $v_s = 1700$ m/s.

Riguardando complessivamente i risultati delle indagini eseguite, risulta evidente la marcata discontinuità negli effetti del trattamento tra la zona superiore, corrispondente al materiale a grana grossa, e quella inferiore, corrispondente al terreno limoso. Tale discontinuità è stata evidenziata sia dall'osservazione dello scavo di ispezione, sia dall'esame dei carotaggi, sia infine dai risultati delle misure dinamiche in sito.

Si rileva inoltre che le prove di laboratorio sul materiale trattato sono state limitate ai campioni integri, prelevati nella zona ben consolidata, corrispondente alle alluvioni grossolane. I dati di laboratorio sono quindi da confrontare con quelli ricavati in sito nella fascia compresa tra 2 e 7 m circa di profondità. A tale proposito, si osserva che i valori di v_p misurati in laboratorio sono praticamente coincidenti con quelli determinati dai carotaggi sonici (Fig. 7a) e sono invece leggermente superiori a quelli ricavati dalle prove *cross-hole* (Fig. 7b).

La leggera differenza tra i risultati dei carotaggi

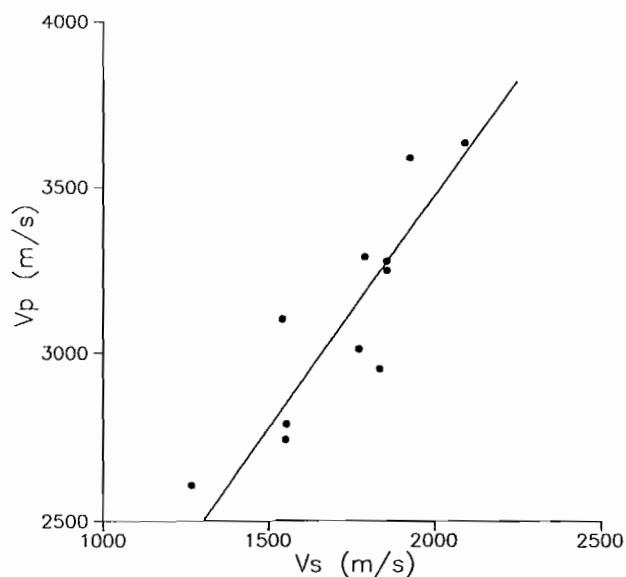


Fig. 12 - Misure di laboratorio della velocità di propagazione delle onde elastiche.

sonici e quelli delle misure *cross-hole* potrebbe essere attribuita ad un'attenuazione dell'efficacia del trattamento, nella zona di contatto tra colonne adiacenti. L'ipotesi non è tuttavia confermata dai carotaggi sonici eseguiti in posizione intermedia tra gli assi di trattamento, che forniscono risultati simili a quelli ottenuti lungo l'asse della colonna. Si ritiene quindi probabile che lo scostamento rilevato tra carotaggi sonici e prove *cross-hole* sia una conseguenza delle differenze nelle tecniche e nelle modalità di interpretazione delle misure, con particolare riferimento alle ipotesi sui percorsi di propagazione.

Risulta invece marcata (Fig. 7c) la differenza tra i valori di v_s determinati in laboratorio (1700 m/s) ed in sito (650 m/s). Tale risultato potrebbe dipendere dal maggior livello di fessurazione del materiale in sito e dai diversi effetti del grado di saturazione sulle onde longitudinali e trasversali. D'altra parte, come già accennato, non sono da escludere eventuali imprecisioni nella esecuzione e nella elaborazione delle misure di velocità delle onde di taglio in sito.

I valori di v_p e v_s determinati sui campioni di laboratorio hanno permesso inoltre di ricavare i parametri di deformabilità E_0 e G_0 , che risultano correlabili linearmente (Fig. 13). I corrispondenti valori del modulo di Poisson sono compresi tra 0,19 e 0,35.

In particolare, il modulo di taglio G_0 è stato determinato in funzione della velocità di propagazione delle onde di taglio v_s e della densità ρ , attraverso la nota relazione

$$G_0 = \rho v_s^2$$

Per la valutazione del modulo di elasticità E_0 , è stata adottata la relazione

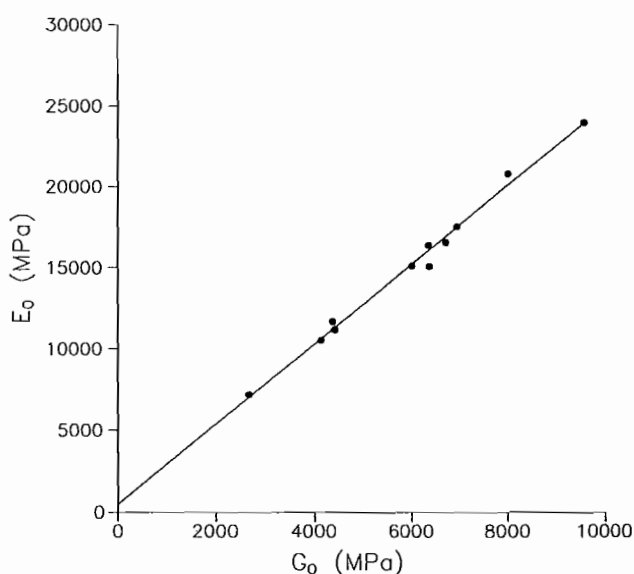


Fig. 13 - Valori di E_0 e G_0 ricavati dalle misure dinamiche di laboratorio.

$$E_0 (1-\nu)/(1-\nu-2\nu^2) = \rho v_p^2$$

che si riferisce allo schema di propagazione in un mezzo infinito. Tale schema sembra infatti più adeguato all'interpretazione delle misure, in conseguenza del modesto rapporto altezza/diametro dei campioni ($h/d = 2,4 \div 3,9$) e delle elevate frequenze di sollecitazione ($100 \div 200$ kHz). A tale proposito, si osserva inoltre che la teoria elementare della propagazione in un elemento cilindrico ($E_0 = \rho v_p^2$) non fornisce valori accettabili del modulo di Poisson che, nel caso in oggetto, risulterebbe maggiore di 0,5.

Come già accennato, dai risultati delle indagini in sito è possibile dedurre che il trattamento del materiale limoso ha prodotto solo la formazione di una colonna di piccolo diametro, costituita di boiaccia di cemento. Tale diametro può essere stimato indirettamente elaborando le misure *cross-hole* che, dopo il trattamento, forniscono, per la zona profonda, i valori medi di velocità $v_p = 1900$ m/s e $v_s = 470$ m/s. Infatti, supponendo che le onde si propagano secondo un percorso rettilineo, in parte nella colonna di cemento ($v_p = 2600$ m/s, $v_s = 660$ m/s) ed in parte nel limo ($v_p = 1500$ m/s, $v_s = 390$ m/s), si ottengono, per entrambi i tipi di onde, valori del diametro d pari a circa 0,3 m. In particolare, risulta $d = 0,25 \div 0,30$ m, per colonne con diametro nominale 0,80 m, e $d = 0,30 \div 0,35$ m, per colonne con diametro nominale 1,00 m.

Infine, si ritiene utile confrontare i dati ottenuti nella presente indagine sulle alluvioni del Polcevera con i risultati del precedente studio, relativo ai materiali trattati del Viadotto Fadalto. Si osserva (Tab. I) che il materiale consolidato di Fadalto ha caratteristiche meccaniche decisamente superiori a quelle del Polcevera, anche se la velocità di propagazione delle onde di compressione non risulta molto diversa, almeno per le prove *cross-hole*.

Le differenze riscontrate non sembrano attribuibili alle tecniche di trattamento adottate, che sono molto simili. In entrambi i casi, la composizione granulometrica dei terreni a grana grossa sembra anch'essa simile (Fig. 14a), ma il fuso granulometrico delle alluvioni grossolane del Polcevera è alquanto più ampio di quello relativo al materiale di Fadalto. La spiegazione delle differenze riscontrate nelle proprietà meccaniche può essere quindi ricercata nella maggiore eterogeneità dei materiali del Polcevera. Si osserva inoltre che le alluvioni grossolane del Polcevera sono costituite da elementi di forma arrotondata, al contrario del detrito di falda di Fadalto, costituito di elementi a spigoli vivi.

Per il materiale a grana fina, entrambi gli studi hanno evidenziato che il trattamento produce solo una colonna di piccolo diametro, costituita essenzialmente di boiaccia di cemento. Nonostante una

	POLCEVERA	FADALTO
geometria del trattamento	ad anello	intensivo
diametro nominale (m)	0,80 ÷ 1,00	1,00
Volume iniettato (m ³ /m)	0,3 ÷ 0,4	0,3 ÷ 0,4
RQD (%)	5 ÷ 45	56 ÷ 84
v_p Cross-hole (m/s)	2000 ÷ 3000	2000 ÷ 3500
v_p Lab. (m/s)	2600 ÷ 3600	2500 ÷ 5000
resistenza a compressione (MPa)	11	25 ÷ 30
modulo di elasticità (MPa)	2000 ÷ 6700	5000 ÷ 20000
ϕ_p	52°	65°
C_p (MPa)	2,1	1,8
ϕ_r	25°	42°
C_r (MPa)	0,4	0,3

Tab. I - Confronto tra i casi Polcevera e Fadalto.

certa differenza tra i due fusi granulometrici (Fig. 14b), si nota che le percentuali di frazione argillosa sono praticamente coincidenti.

3. Conclusioni

Nel quadro di un'ampia ricerca sulla gettiniezione, è stato eseguito un intervento sperimentale, finalizzato allo studio degli effetti del trattamento sui terreni a grana grossa ed a grana fina di un deposito alluvionale di origine fluviale. L'intervento è stato progettato in modo da consentire l'esecuzione di accurate indagini, tra le quali misure ed osservazioni dirette della geometria delle colonne consolidate, carotaggi continui del materiale trattato, prove dinamiche in sito ed in laboratorio con misura della velocità di propagazione delle onde di compressione e di taglio, prove meccaniche di laboratorio su campioni di terreno trattato.

I rilievi in sito hanno posto in evidenza l'influenza

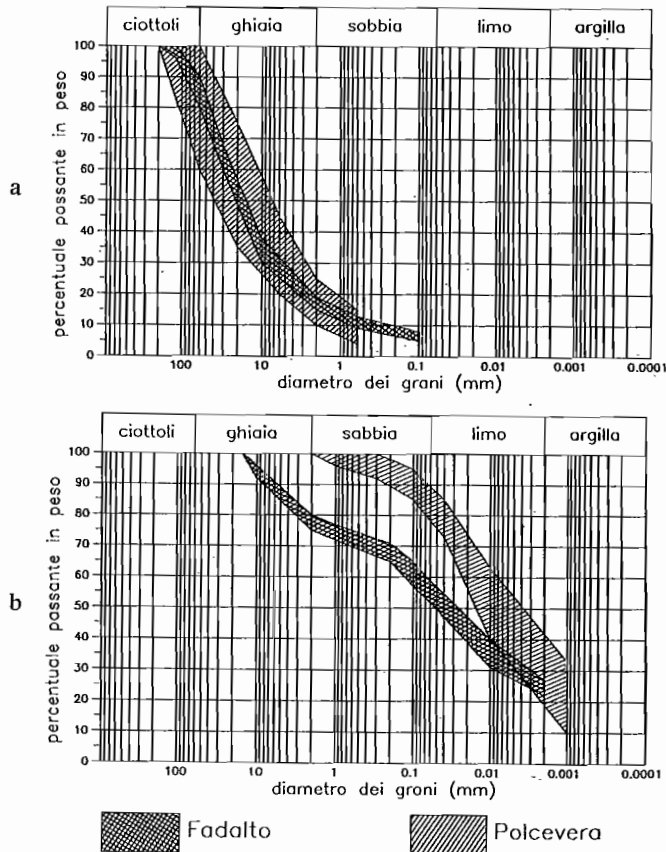


Fig. 14 - Fusi granulometrici dei terreni prima del trattamento di gettinizzazione: **a** consolidamento efficace; **b** consolidamento inefficace.

della composizione granulometrica del terreno sul diametro delle colonne consolidate. Nel materiale a grana grossa, il diametro medio è dello stesso ordine di grandezza del diametro nominale ma con notevoli variazioni, dipendenti dall'eterogeneità del terreno naturale. Nei sottostanti terreni a grana fina, si è potuta osservare localmente una drastica riduzione del diametro delle colonne anche se, per problemi tecnici, non è stato possibile effettuare un rilievo completo.

Per quanto riguarda le prove dinamiche in sito, in aggiunta ai più usuali carotaggi sonici e misure *cross-hole*, è stata impiegata la tecnica della tomografia sonica, effettuando anche misure della velocità di propagazione delle onde di taglio. I risultati evidenziano la buona qualità del trattamento nello strato di terreno a grana grossa, dove le velocità di propagazione sono piuttosto elevate. In corrispondenza del deposito di terreno a grana fina, i valori di v_p e di v_s risultano invece sensibilmente più ridotti e confermano quindi che il trattamento è risultato poco efficace.

Le prove dinamiche di laboratorio, eseguite su campioni prelevati nel terreno grossolano ben cementato, forniscono risultati simili a quelli delle prove in sito, limitatamente alle misure di v_p , mentre i valori di v_s sono notevolmente maggiori di quelli rilevati in sito. Tale differenza potrebbe essere spiegata

con considerazioni relative all'influenza del grado di fratturazione e di saturazione del materiale consolidato. Si osserva comunque che la misura di v_s presenta attualmente maggiori difficoltà sperimentali e di interpretazione e, pertanto, ha un grado di affidabilità minore rispetto alla misura di v_p .

Nel complesso, i risultati delle indagini eseguite confermano che nei terreni a grana grossa la gettinizzazione determina, una buona cementazione, anche se le colonne consolidate hanno forma irregolare e consistenza variabile. L'efficacia dei trattamenti si riduce invece drasticamente nei terreni a grana fina. Le misure dinamiche in sito si sono dimostrate particolarmente idonee per la localizzazione di eventuali zone poco o non cementate. Tali zone sono evidentemente caratterizzate da valori di resistenza e di rigidità molto inferiori a quelli del materiale ben consolidato e la loro individuazione riveste quindi un ruolo fondamentale nelle verifiche progettuali.

La determinazione delle caratteristiche meccaniche del terreno trattato risulta invece, per il momento, alquanto problematica. Si sottolinea, infatti, che i risultati delle prove di laboratorio sono riferibili solo agli elementi ben consolidati, poichè il terreno non adeguatamente cementato si disgrega durante le operazioni di prelievo e preparazione dei campioni. Inoltre, i risultati delle prove meccaniche convenzionali sono alquanto variabili, a causa dell'eterogeneità del materiale consolidato, e non sembrano peraltro correlabili con i parametri determinati dalle prove dinamiche.

Ringraziamenti

Ai tecnici ed esperti dell'ISMES-Divisione Geofisica va il più sentito ringraziamento degli autori per la valida e competente collaborazione prestata per l'esecuzione delle indagini geofisiche.

BIBLIOGRAFIA

- BERTACCHI P., ZANINETTI A., CARABELLI E. e SUPERBO S. (1991) - *Geophysical methods for the detection of ageing and effectiveness of repairs in dams*. XVII ICOLD, Vienna, giugno.
- CROCE P., CHISARI A., MERLETTI T. (1990) - *Indagini sui trattamenti dei terreni mediante jet-grouting per le fondazioni di alcuni viadotti autostradali*. Rassegna dei Lavori Pubblici, novembre.
- MONGIOVI L., CROCE P. (1993) - *Un modello per l'analisi della gettinizzazione*. Rapporto al Gruppo Nazionale di Coordinamento degli Studi di Ingegneria Geotecnica del C.N.R.
- MONGIOVI L., CROCE P., ZANINETTI A. (1991) - *Analisi sperimentale di un intervento di consolidamento mediante gettinizzazione*. II Convegno Nazionale dei Ricercatori del Gruppo di Coordinamento degli Studi di Ingegneria Geotecnica del C.N.R., Ravello, 27-28 febbraio.
- ZANINETTI A. (1993) - *La tomografia sonica, Seminario su Sperimentazione su Strutture*. Venezia, 12-15 febbraio.

SUMMARY**An experimental verification of jet-grouting effects**

The paper deals with a recent experimental study of the effects produced by jet-grouting. A specific treatment has been performed, under carefully controlled conditions, on a particular site where a layer composed of heterogeneous coarse-grained materials overlays a stratum of fine-grained soils. In situ and laboratory investigations have been conducted adopting different techniques, including direct underground observations, conventional geotechnical tests and dynamic measurements.

Detailed analysis shows the fundamental influence of the original

soil properties on dimensions and characteristics of the consolidated elements. In fact, on coarse-grained materials, jet-grouting generally produces good cementation, while treatment effectiveness is drastically reduced for fine-grained soils.

Particular attention is given to in situ measurements of compression and shear waves velocities, obtained by means of different methods (sonic logging, cross-hole, tomography), which have proved to be very effective in detecting weakly cemented zones.

It is finally underlined that meaningful laboratory tests have been performed on good quality samples, which were recovered from the well cemented portions of the treated body. Therefore, laboratory data should be considered as upper limits of the relevant mechanical properties.