

SUPSI IST
Formazione continua
Trevano, CP 72
CH-6952 Canobbio

JET GROUTING: CENNI TEORICI, CAMPI D'APPLICAZIONE E IMPIEGO QUALE OPERA DI SOSTEGNO

Intervento al corso di perfezionamento SUPSI di
Lugano del 23.03.2005 relativo alle
"Opere di sostegno per scavi"

di Giuseppe e Giovanni Como



INDICE

	pagina
1. COS'È IL JET GROUTING O JETTING	1
2. CENNI STORICI	1
2.1 Tecniche di consolidamento mediante miscelazione meccanica del terreno in posto con leganti chimici o inorganici	1
2.2 Jetting	2
3. PRINCIPIO DEL METODO JETTING E CAMPI D'APPLICAZIONE	3
3.1 Principio del metodo jetting	3
3.2 Applicazioni in sotterraneo	5
3.3 Applicazione nei lavori all'aperto	6
4. METODI ESECUTIVI E ASPETTI TECNICI	7
4.1 Panoramica	7
4.2 Terreni trattabili	11
4.3 Parametri jetting	12
4.4 Cenni teorici	14
4.5 Stima del diametro delle colonne	16
4.6 Resistenze raggiungibili con il trattamento	18
4.7 Macchinari	19
5. IL TRATTAMENTO JETTING QUALE OPERA DI SOSTEGNO	22
5.1 Panoramica	22
5.2 Sostegno di pareti	22
5.3 Sottomurazioni	23

1. COS'È IL JET GROUTING O JETTING

Con jet grouting o jetting si definisce una tecnologia che consiste nell'iniezione di un fluido stabilizzante ad altissima pressione nel terreno e che ha come scopo il consolidamento di volumi delimitati di terreno in posto al fine di migliorarne le caratteristiche meccaniche quali la resistenza e la permeabilità.

2. CENNI STORICI

2.1 Tecniche di consolidamento mediante miscelazione meccanica del terreno in posto con leganti chimici o inorganici

Le prime applicazioni pratiche di questa tecnologia si sono avute nel corso degli anni 50 in Svezia (Alimac) e in Giappone (Fudo).

Nel terreno veniva introdotta una colonna di aste munite alle loro estremità inferiore di un utensile in grado di permetterne l'avanzamento nel terreno stesso mediante movimento rotatorio con effetto disgregante o, in terreni adatti, per avviamento.

Raggiunta la profondità prevista (10 - 15 m) attraverso il treno di aste veniva pompato il materiale legante che uscendo all'altezza dell'utensile, veniva mescolato col terreno dall'azione meccanica dello stesso.

Come legante venivano impiegate miscele a base di calce viva e di cemento.

Un procedimento simile è stato sviluppato in Italia dalla Società ELSE di Milano.

Il principio era analogo ai due sopraccitati. Come legante veniva usato una sospensione acqua/cemento con fattore ca. 1 alla pressione di scorrimento.

Nei pali di fondazione, per razionalizzare all'occorrenza la distribuzione dei carichi, venivano introdotti nella massa consolidata a palo finito profilati, tubi o elementi prefabbricati. Il sistema ELSE ha trovato applicazione nell'esecuzione di pali di fondazione, paratie stagne e diaframmi sotto arginature (**figura 1**).

I sistemi sopra descritti erano applicabili esclusivamente in terreni fini, limosi e di qualità omogenea. La dimensione degli elementi colonnari non poteva superare i 500 - 600 mm di diametro e le profondità i 10-15 m per i procedimenti Alimac e Fudo e di una ventina di m per il procedimento ELSE.

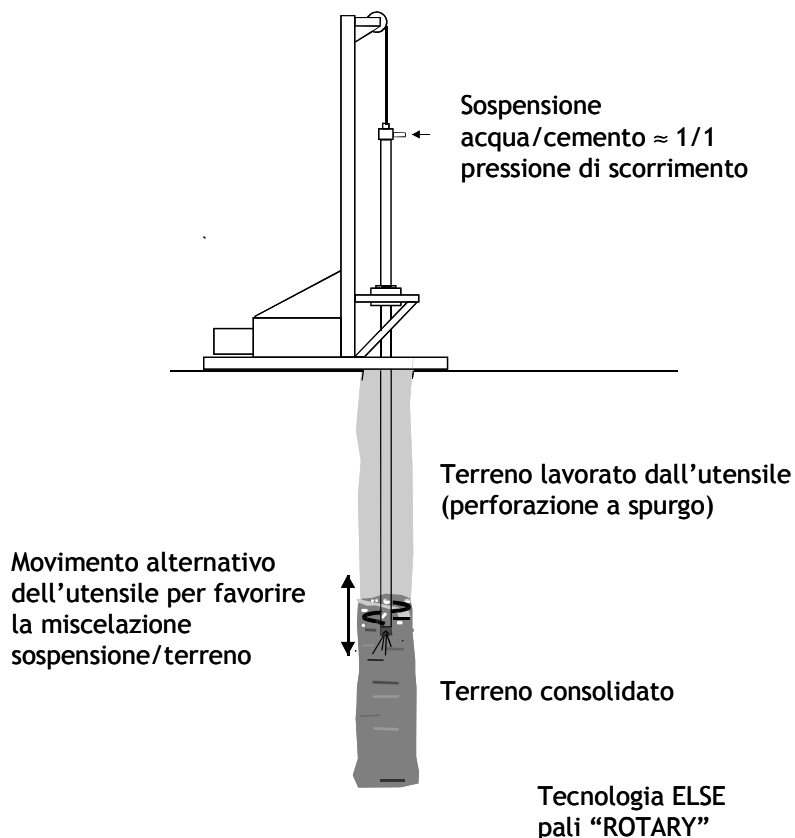


Figura 1: Rappresentazione schematica del procedimento ELSE.

L'avvento nel campo della pianificazione dei procedimenti di perforazione tubata a morsa di grande diametro e la diffusione di macchine di grande potenza ha decretato la fine di questi sistemi.

2.2 Jetting

Alla fine degli anni 60 veniva reso noto da una pubblicazione periodica che in un cantiere del medio oriente la società Cementation aveva eseguito lavori di fondazione e dei diaframmi con un nuovo procedimento non dissimile da quello che oggi conosciamo come Jetting.

Nella prima metà degli anni 70 veniva pure messo a punto in Giappone un procedimento di consolidamento del terreno in posto denominato CCP - Chemical Churning Pile (o Pattern) inventato da Wataru Nacanishi e diffuso dalla Konoike Construction e proposto al mondo scientifico dal Prof. G. Miki dell'università di Tokio. Come legante di base si faceva ricorso infatti a prodotti chimici e solo in un secondo tempo sono subentrate sospensioni a base di cemento.

Con queste tecnologie sono stati realizzati in Giappone importanti lavori di consolidamento in relazione alle costruzioni di manufatti, opere di sostegno per gallerie, miniere e fondazioni in terreni difficili.

Verso la seconda metà degli anni 70 veniva creata a Parma una società CCP che per prima introdusse in Italia il metodo CCP giapponese.

Come legante veniva adottata la sospensione cementizia in luogo dei prodotti chimici. Il procedimento si diffuse abbastanza rapidamente in Italia e incominciò ad imporsi come elemento consolidante essenziale in diversi campi del genio civile.

In Svizzera il procedimento veniva introdotto all'inizio degli anni 80 dalla società Terrajet. Il primo cantiere eseguito riguardava l'estensione a monte dell'albergo Eden con interventi di sottomurazione, sostegno di pareti e fondazioni.

Nel periodo successivo tuttavia esso entrò a far parte del programma di quasi tutte le imprese specializzate del paese.

Le imprese generali costituirono gruppi destinati soprattutto ad eseguire il sostegno agli avanzamenti di gallerie ferroviarie e stradali in terreno sciolto dove erano implicate. Le difficoltà tecnico-esecutive, gli incidenti e i costi indussero tuttavia questi gruppi a desistere e ad affidare lavori del genere a imprese altamente specializzate in questo settore.

Il procedimento è rimasto retaggio di poche imprese specializzate e viene applicato prevalentemente per sottomurazioni, sostegno di pareti e fondazioni in terreni difficili.

Nel 1983 la tedesca Bauer acquisì il procedimento della Terrajet ed in seguito anche la ditta Keller entrò nel mercato tedesco con il procedimento Kahjima (Triple jet). Entrambe diedero all'insieme dei due sistemi uno sviluppo e una estensione notevoli anche fuori dalla Germania.

3. PRINCIPIO DEL METODO JETTING E CAMPI D'APPLICAZIONE

3.1 Principio del metodo jetting

Come già accennato, il principio del jet grouting consiste nell'iniettare ad altissima pressione (20 - 70 N/mm² equivalenti a 200 - 700 bar) attraverso appositi ugelli, una miscela stabilizzante con la quale il terreno viene disgregato e mescolato in situ, a formare, una volta decorso il tempo di presa della miscela, un elemento di

terreno conglomerato (elemento o colonna jetting) con caratteristiche meccaniche migliorate rispetto alle condizioni iniziali.

L'obiettivo principale di questo metodo è quello di riuscire ad ottenere questo miglioramento in maniera controllata, sia fisicamente (delimitando il raggio del trattamento), sia qualitativamente (ottenendo delle caratteristiche dell'elemento jetting predefinite), obiettivi di norma difficilmente raggiungibili mediante iniezioni convenzionali.

A questo scopo il fluido - normalmente una miscela acqua/cemento con fattore $A/C \approx 1$ - viene iniettato attraverso degli ugelli situati alla base delle aste di iniezione, che nella maggior parte dei casi sono le stesse aste di perforazione. Una descrizione più dettagliata dei sistemi operativi segue al sottocapitolo 4.1.

L'inclinazione di una colonna jetting può variare dalla verticale verso il basso (180°) fino a 45° verso l'alto a secondo delle esigenze delle singole applicazioni.

Per l'elevata aderenza al terreno non trattato che circonda la colonna, questa tecnologia trova un'estesa applicazione nel campo dei pali di fondazione ove sia richiesto il massimo sfruttamento dell'attrito laterale.

La possibilità di armare le colonne jetting con tubi d'acciaio o profilati, ne estende ulteriormente i campi d'applicazione ai casi in cui la struttura sia soggetta a sforzi di trazione, flessione o semplicemente a carichi che ne superano la capacità portante allo stato, per così dire, naturale.

La tecnologia jetting è dunque una tecnologia molto versatile. Il suo impiego si estende dai grossi lavori a cielo aperto, su ampi spazi dove possono operare macchine di grosse dimensioni e notevole peso, alle specialissime applicazioni di sottomurazione in scantinati con stretti limiti di spazio e di altezza con l'impiego di macchine di ridottissime dimensioni.

Va ricordato che il sistema si avvale, oltre che delle macchine sopraccitate che operano sul terreno, di stazioni di pompaggio che forniscono miscele consolidanti a pressioni che variano da 200 a 700 bar con portate da 1 a 5 l/s.

Dal punto di vista esecutivo, la tecnologia richiede l'impiego di personale qualificato e, soprattutto per certi lavori, di una sorveglianza tecnica di ottimo livello e pressoché continua.

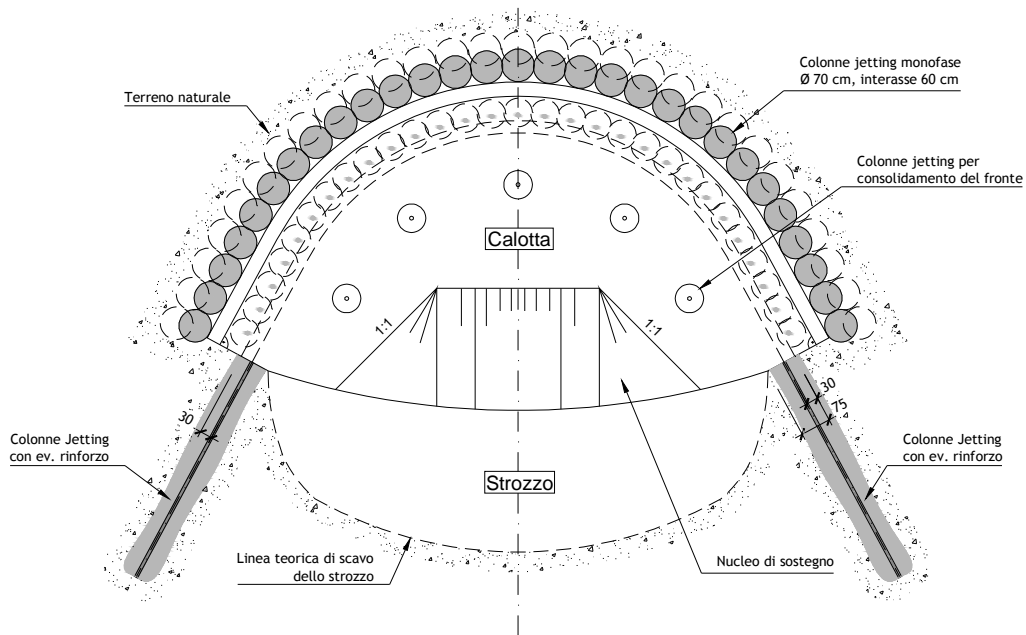
Si può quindi affermare che il metodo del jet grouting ha oggi trovato applicazione in tutti i campi della geotecnica, sia per scavi in sotterraneo, sia per scavi a cielo aperto.

Nel seguito sono brevemente elencate le applicazioni più comuni di questo metodo in questi due campi.

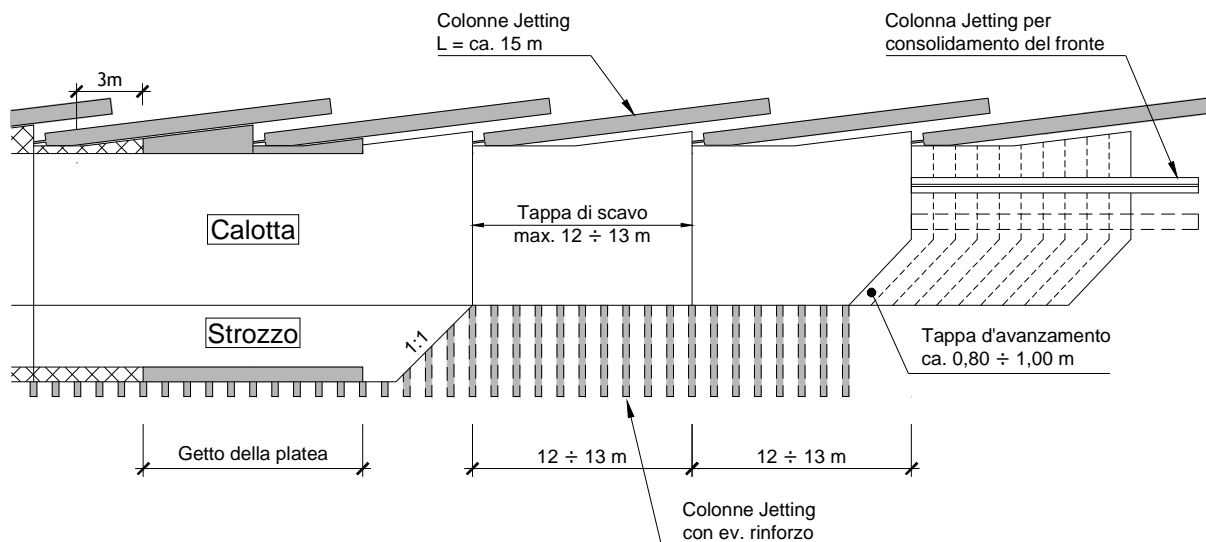
3.2 Applicazioni in sotterraneo

Negli scavi in sotterraneo il jet grouting è normalmente utilizzato per il sostegno delle volte delle gallerie scavate in terreno sciolto.

Questo principio è illustrato nella **figura 2** seguente.



2a): sezione trasversale



2b): sezione longitudinale

Figura 2: Esempio di applicazione del jet grouting in sotterraneo.

Il trattamento viene effettuato realizzando, in avanzamento al fronte di scavo, delle colonne suborizzontali leggermente divergenti, distribuite uniformemente attorno e tangenzialmente all'estradosso della calotta della galleria.

Normalmente le colonne non superano la lunghezza di 15 m, mentre la tappa di scavo eseguita al riparo delle colonne precedentemente realizzate dovrebbe avere una lunghezza massima di ca. 2 - 3 m inferiore alla lunghezza delle colonne stesse in modo da garantire una sovrapposizione con le colonne della successiva tappa di trattamento jetting pari ad almeno questo valore.

In situazioni di potenziale instabilità del fronte è possibile eseguire delle colonne anche nel fronte di scavo.

Nel caso di scavi a sezione parzializzata, ad esempio calotta - strozzo, il jet grouting è spesso utilizzato anche per la sottomurazione del piede della calotta che verrà scoperto durante lo scavo dello strozzo.

3.3 Applicazione nei lavori all'aperto

È proprio nel campo dei lavori all'aperto che il jet grouting trova il suo maggior impiego. Le applicazioni più frequenti di questo metodo sono:

- Consolidamento per sottomurazioni
- Realizzazione di diaframmi d'impermeabilizzazione (argini, dighe in terra)
- Preconsolidamenti per fondazioni
- Consolidamento di fondazioni esistenti
- Sostegni di scavi e trincee
- Tamponi di fondo
- Preconsolidamenti dall'esterno per scavi in sotterraneo
- Stabilizzazione di pendii

In tutti questi casi il terreno viene trattato affiancando gli elementi jetting in una maglia più o meno fitta o secondo una geometria definita in base alle necessità progettuali ed alle caratteristiche del terreno.

Come già accennato in precedenza la colonna jetting può trasmettere al terreno un carico assiale, sia per attrito laterale, sia per resistenza alla punta. Infatti l'area di contatto terreno consolidato - terreno naturale non è regolare e, oltre a questa causa di attrito, un apporto non indifferente è dato dalla compressione dinamica causata dal getto sul terreno interessato, che crea una sorta di precom-

pressione laterale delle colonne. Questo tipo di trattamento si adatta perciò in particolar modo alla realizzazione di fondazioni.

La **figura 3** mostra alcuni esempi caratteristici di disposizione di elementi jetting.

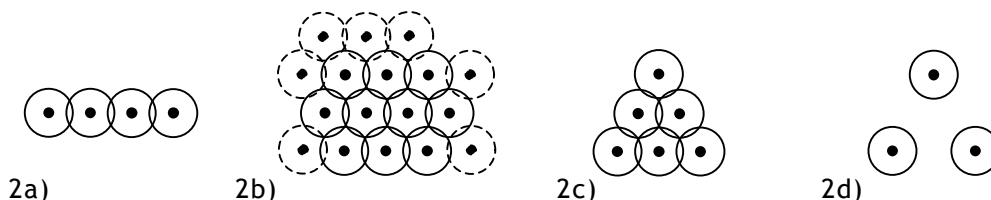


Figura 3: Disposizione caratteristica degli elementi jetting; 2a) fila singola per pareti di sostegno; 2b) elementi secanti per sottomurazioni o tamponi di fondo estesi; 2c) elementi secanti per sottomurazioni di singole fondazioni; 2d) elementi separati per il miglioramento delle proprietà del terreno.

4. METODI ESECUTIVI E ASPETTI TECNICI

4.1 Panoramica

Come descritto nel capitolo precedente, il principio del jet grouting consiste nel mescolare il terreno con un fluido stabilizzante iniettato ad altissima pressione attraverso degli ugelli situati alla base delle aste d'iniezione.

Il procedimento consiste dapprima nell'esecuzione della perforazione realizzata con utensili di uso normale in terreno sciolto con spurgo adeguato alle esigenze della perforazione stessa, e nel successivo trattamento mediante graduale e progressiva estrazione delle aste in rotazione, entrambe a velocità prestabilite, e contemporanea iniezione del fluido.

Questo principio è illustrato nella **figura 4**.

La batteria di perforazione è assemblata da elementi muniti di giunti impermeabili che, unitamente a tutti i dispositivi di apporto dei fluidi di spurgo e successivamente del fluido legante, devono essere adeguati a sopportare pressioni di esercizio che si estendono dalla normalità fino a 700 bar.

Una parte della miscela iniettata rigurgita in superficie attraverso il foro di perforazione. Il materiale fuoriuscito non è riutilizzabile e deve essere smaltito in modo appropriato.

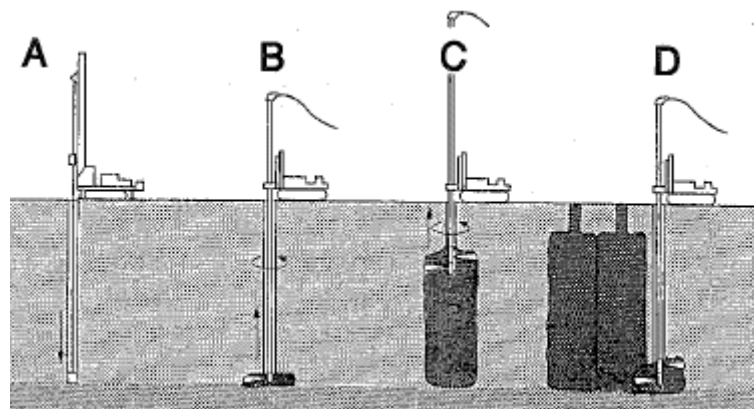


Figura 4: Procedimento del trattamento jetting: A: perforazione; B: inserimento dell'iniezione; C: iniezione, rotazione ed estrazione; C: ripetizione con/senza sovrapposizione del trattamento.

Una volta raggiunta la profondità voluta, un dispositivo a valvola chiude le vie di accesso all'utensile di perforazione in modo che il materiale che viene inviato nel foro attraverso le aste sia obbligato ad uscire da uno o più ugelli di sezione molto ridotta. Questo procedimento è illustrato nella **figura 7** a pagina 10.

La sezione totale di passaggio ripartita su uno o più ugelli varia da 5 a 15 mm² secondo il tipo di lavoro e l'energia che le attrezzature impiegate possono fornire.

Dall'ugello (o dagli ugelli) il fluido legante sottomesso ad elevata pressione, normalmente dai 200 ai 700 bar, esce con una velocità che si aggira sui 180-280 m/sec.

Il terreno viene così investito da un getto dotato di notevole energia e di conseguenza disgregato, entro un certo limite, nei suoi componenti litoidi che sono così costretti a miscelarsi intimamente con il fluido legante.

Con la rotazione della batteria di aste si ottiene così un cilindro di terreno miscelato la cui sezione è in relazione alla resistenza del terreno stesso e alla quantità e qualità di energia che il sistema è in grado di trasmettere al punto di applicazione.

In casi particolari è possibile, limitando l'angolo di rotazione o escludendolo completamente, ottenere elementi di forma semicircolare oppure setti o pareti. Queste applicazioni sono però assai rare e limitate ad oggetti specifici. Questo procedimento è schematizzato nella **figura 5** seguente.

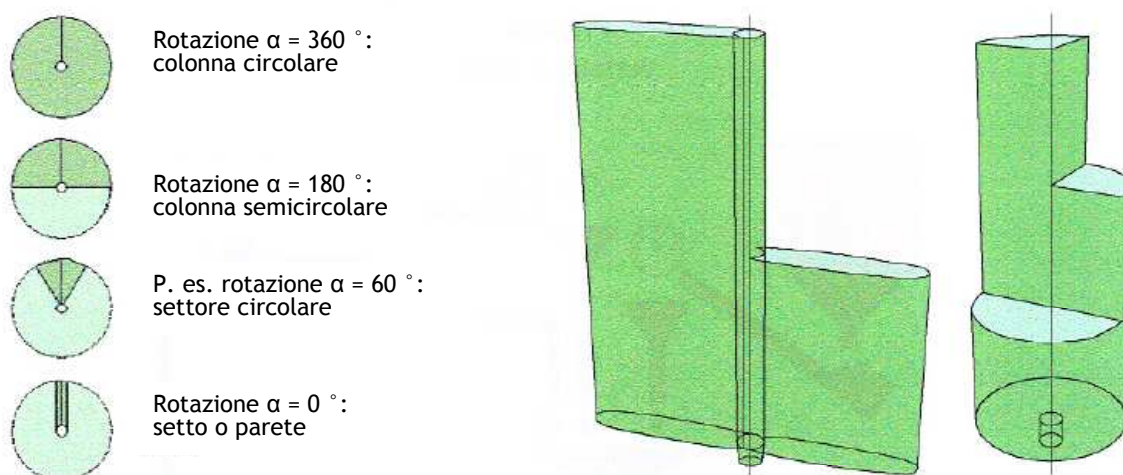


Figura 5: Possibili forme degli elementi jetting (Bauer).

Attualmente sono utilizzati tre diversi metodi, per l'esecuzione del jet grouting. Questi si differenziano essenzialmente per la posizione degli ugelli lungo le aste ma soprattutto per il tipo ed il numero di fluidi utilizzati durante il trattamento. Questi metodi hanno differenti gradi d'efficacia e sono impiegati in base al tipo di terreno da trattare.

Si possono distinguere:

- Jetting monofluido o monofase: la stessa miscela stabilizzante è utilizzata per disgregare il terreno e creare l'elemento. Questo metodo è quello utilizzato in sotterraneo per l'esecuzione di colonne suborizzontali. I metodi seguenti non si adattano, per motivi tecnici, a questo scopo.
- Jetting bifluido o bifase: all'iniezione ad alta pressione del fluido si associa un getto coassiale di aria o di acqua compressa al fine di incrementare il raggio d'azione del trattamento limitando la dispersione della miscela e di favorire la fuoriuscita del materiale di spurgo.
- Jetting trifluido o trifase: l'azione disgregatrice è svolta dall'insieme dei getti contemporanei e coassiali di acqua ad alta pressione e aria compressa, iniettati attraverso un ugello posto alcuni decimetri al di sopra di

quello dal quale viene iniettata la miscela a pressioni inferiori rispetto ai metodi descritti in precedenza. Questo metodo è quello più potente e porta ad un raggio d'azione maggiore e ad una più accentuata rimozione della componente fine del terreno. Per le caratteristiche esposte sopra è indicato per terreni più consistenti.

La **figura 6** seguente mostra il principio dei tre metodi jetting appena esposti.

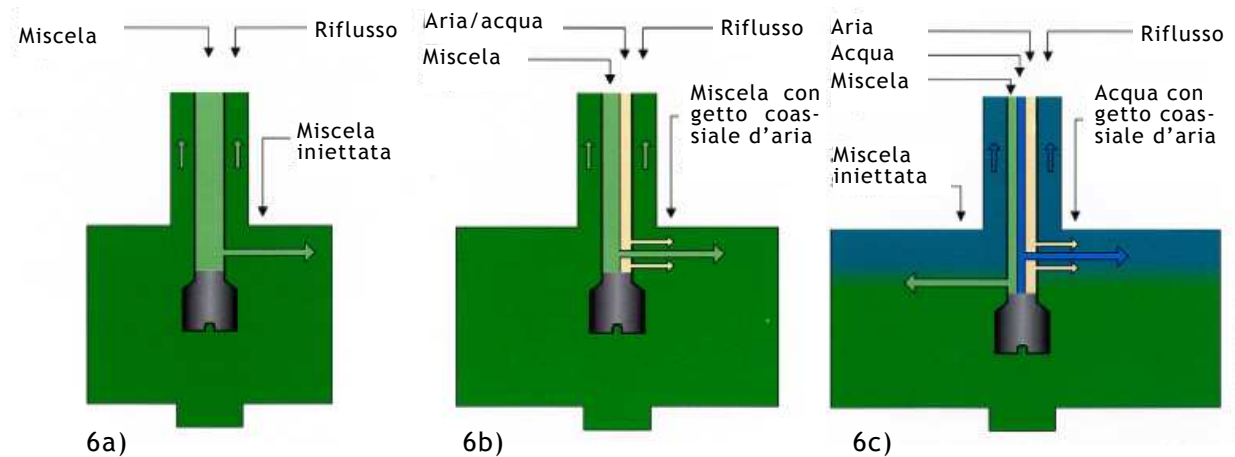


Figura 6: Schema di principio dei tre metodi jetting: 6a) monofase; 6b) bifase e 6c) trifase

Nella **figura 7** che segue sono illustrati in dettaglio gli utensili di perforazione e d'iniezione utilizzati nei tre sistemi.

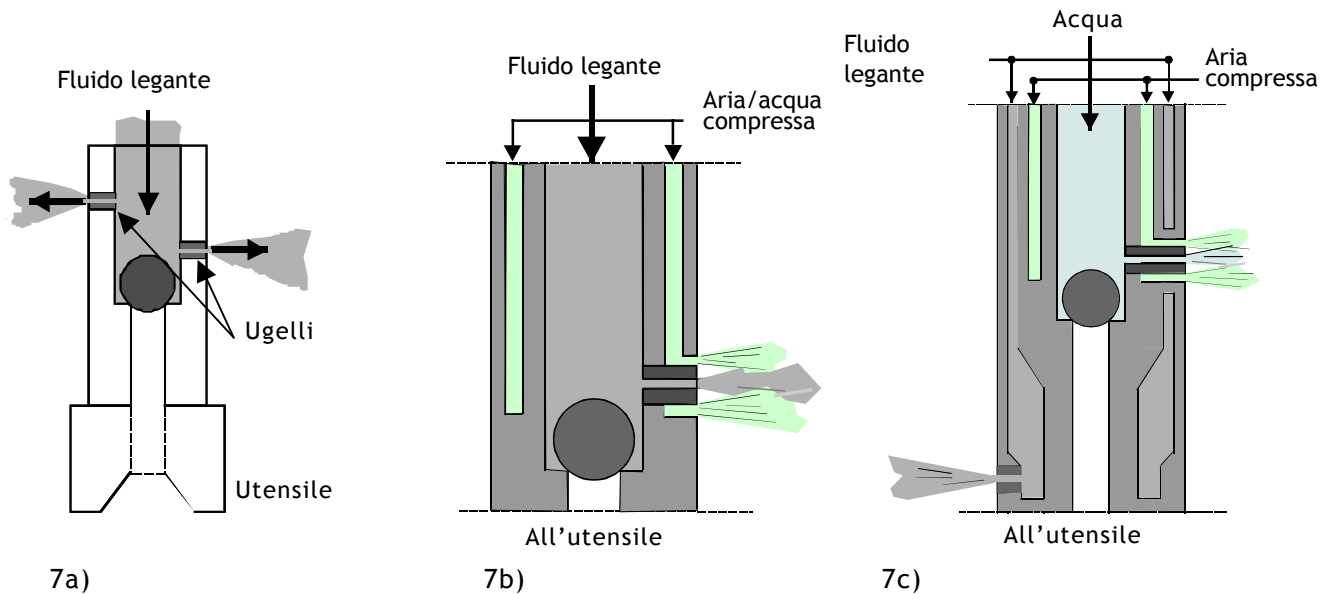


Figura 7: Utensili di perforazione e d'iniezione: 7a) jetting monofase; 7b) jetting bifase; 7c) jetting trifase.

A questo proposito va menzionato che ogni impresa specializzata in questo tipo di lavori possiede procedimenti, utensili e metodi esecutivi propri, spesso patentati, e con denominazioni diverse come ad esempio Rodinjet[®] per RODIO (Italia), HDI[®] per BAUER (Germania) oppure Soilcrete[®] per KELLER (Germania).

In tutti gli elementi realizzati con le tecnologie illustrate è possibile introdurre delle armature quali tubi o barre d'acciaio. Queste possono essere inserite immediatamente dopo l'iniezione oppure in un secondo tempo previa riperforazione della colonna. Questa possibilità amplia di molto il campo d'applicazione di questa tecnologia fornendo la possibilità di passare da quello semplice di trattamento del terreno ad uno strettamente strutturale quale i pali o le paratie, potendo realizzare dei micropali o dei tiranti che hanno una colonna come bulbo d'iniezione.

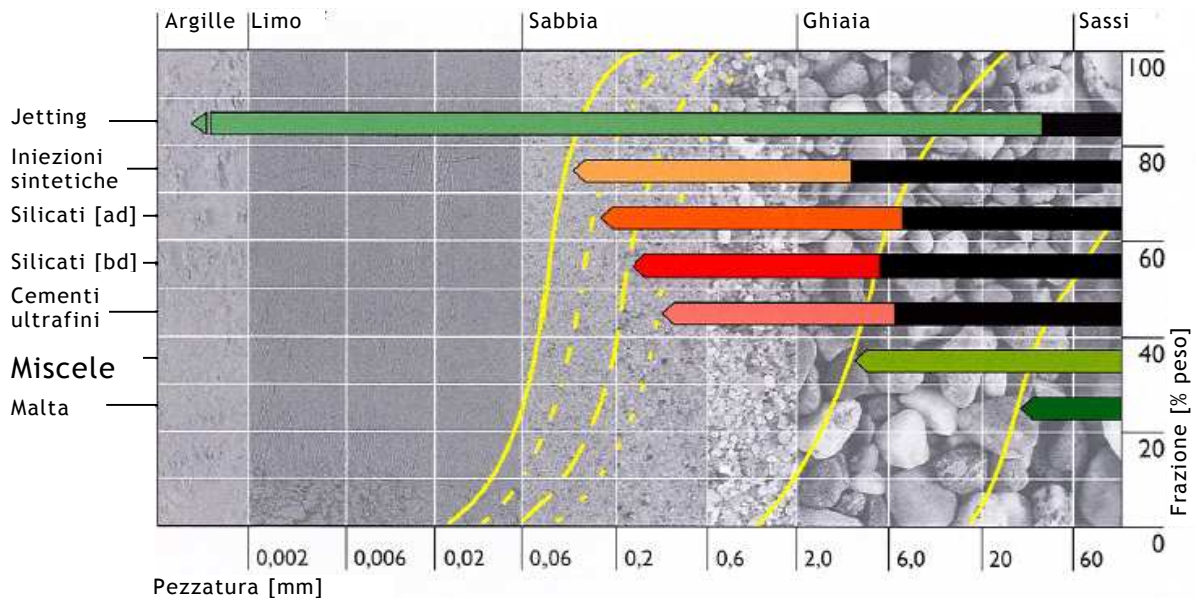
4.2 Terreni trattabili

Il campo di applicazione di questa tecnologia è limitato dal principio di disgregazione e di parziale sostituzione del terreno. Al processo di disgregazione si oppone la resistenza del terreno che, di fatto, rappresenta la sola limitazione all'applicazione di questo sistema, al contrario delle normali iniezioni la cui applicabilità è condizionata dallo spessore delle fessure nelle rocce e dalla dimensione e volume dei pori nei terreni sciolti. Valori che non hanno nessun significato per la tecnologia jetting. La resistenza del terreno è caratterizzata da diverse proprietà:

- In terreni coesivi la resistenza è determinata dalla coesione stessa. Nella pratica sono già state trattate delle argille di media consistenza (Christian Kutzner, *“Injektionen im Baugrund”* Enke, 1991). I limiti applicativi sono dati in questo caso dalla scarsa resa, determinata dalla bassa velocità di ritiro delle aste, necessaria a fornire una maggiore energia per la disgregazione del terreno, e dal conseguente incremento dei tempi esecutivi.
- In terreni non coesivi, la resistenza è determinata dal grado di compattazione del terreno.

Tutti i prospetti di ditte specializzate in questo campo concordano nell'affermare che tutti i tipi di terreno, dalla ghiaia grossolana (≤ 60 mm) fino alle argille possono essere trattate con il jetting. Come accennato in precedenza, i limiti sono rap-

presentati da altri fattori all'infuori di quelli tecnici. Nella **figura 8** è rappresentato il campo d'applicazione del jet grouting rispetto ad altri metodi di consolidamento del terreno.



ad = alta densità
bd = bassa densità

Figura 8: Campi d'applicabilità delle tecnologie più utilizzate per il consolidamento del terreno (Keller). Campo nero: non adatto.

4.3 Parametri jetting

I criteri per giudicare l'efficacia del jetting sono principalmente il diametro delle colonne (o eventualmente lo spessore dei setti), la resistenza e la permeabilità degli elementi, così come i costi di realizzazione. Questi ultimi dipendono essenzialmente dalla velocità d'esecuzione, quindi dalla velocità di rotazione e di ritiro delle aste, dal costo del materiale iniettato e da quello del personale e dei macchinari necessari sul cantiere. Fatta astrazione dei costi dei materiali e di gestione, restano unicamente quei parametri, tipici di questa tecnologia, che possono essere variati o che, in singoli casi, devono essere predeterminati, al fine di ottenere i risultati desiderati in fatto di resistenza e permeabilità degli elementi.

Questi parametri sono molteplici e si influenzano vicendevolmente.

Possono essere riconosciute le seguenti interdipendenze:

- Con il crescere della resistenza del terreno aumenta l'energia indispensabile alla disgregazione del materiale. L'energia è determinata dalla velocità del getto, quindi dalla superficie degli ugelli e dalla pressione d'iniezione.
- A parità di resistenza del terreno le dimensioni degli elementi aumentano con il crescente apporto di energia. Questa è determinata dalla velocità di rotazione e di estrazione delle aste.
- Per ottenere una dimensione costante degli elementi con il crescere della profondità è necessario aumentare l'apporto di energia ed il tempo di lavorazione, dal momento che la resistenza del terreno cresce a sua volta con la profondità.
- La resistenza finale degli elementi dipende dalla composizione del fluido legante, dal rapporto della miscela fluido legante - terreno, dal terreno stesso ed infine dall'omogeneità degli elementi.
- L'impermeabilità degli elementi aumenta normalmente con il crescere della resistenza e dell'omogeneità.

Riassumendo quanto sopra esposto si può affermare che i parametri controllabili che possono determinare la qualità esecutiva degli elementi jetting sono:

- la velocità di rotazione delle aste d'iniezione,
- la velocità di ritiro delle stesse,
- la pressione d'iniezione e
- la sezione degli ugelli d'iniezione.

In ultima analisi questi parametri definiscono l'energia indotta nel terreno.

La complessa interazione di tutti questi fattori, aggiunta alla possibile variabilità del terreno da trattare, richiede una pianificazione accurata dei lavori, una notevole esperienza da parte degli specialisti incaricati e, se possibile, la realizzazione di prove preliminari in scala 1:1.

In Germania, nazione in cui questa tecnologia è largamente utilizzata, è richiesta, per qualsiasi lavoro in cui è prevista l'applicazione del jetting, la verifica d'idoneità del metodo, attraverso la realizzazione di campi prova o dimostrandone l'efficacia in terreni e condizioni simili a quelli di progetto.

In Svizzera questa prassi non è prevista dalla legge, né dalle norme del settore. Va però sottolineata l'importanza di effettuare, sempre che le condizioni locali lo permettano, un campo prova che dia la possibilità all'impresa di "tarare" i parametri jetting e al progettista di avere conferma delle proprie ipotesi teoriche. Il campo prova dovrebbe essere ubicato ed organizzato in maniera tale da permette-

re la messa a nudo almeno di una parte degli elementi realizzati ed il prelievo di campioni ad esempio mediante carotaggio.

Nella **tabella 1** seguente sono indicati i campi di variabilità dei singoli parametri per i tre metodi di jetting mono-, bi- e trifase.

Parametro	Metodo jetting		
	monofase	bifase	Trifase
Pressione miscela cementizia [MPa]	30 - 50	30 - 50	1 - 10
Portata miscela [l/s]	1.5 - 4	1 - 4	1 - 3
Velocità di rotazione [rpm]	10 - 20	5 - 10	3 - 8
Velocità di risalita [m/h]	20 - 60	10 - 30	3 - 8
Diametro ugelli miscela [mm]	2 - 4	2 - 4	3 - 9
Pressione aria [MPa]	-	0.6 - 1.2	0.6 - 1.2
Portata aria [l/min]	-	6'000 - 15'000	6'000 - 15'000
Pressione acqua [MPa]	-	-	30 - 50
Portata acqua [l/s]	-	-	1 - 3

Tabella 1: Campi di variazione dei parametri jetting per i tre metodi mono-, bi- e trifase (RODIO).

4.4 Cenni teorici

Come illustrato nel capitolo precedente, a quantità di fluido e pressione costanti, la quantità di energia che viene apportata al terreno è determinata dalla velocità di estrazione della colonna dal terreno stesso. Essa viene regolata usualmente con scatti di pochi centimetri z_1 a precise distanze di tempo t_1 : es. $z_1 = 4$ cm; $t_1 = 8$ "

L'energia specifica è data da:

$$En_s = \eta_{ug} \cdot \frac{\left(\frac{2 \cdot g \cdot P}{\gamma_1}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot s \cdot \gamma_1}{2 \cdot g \cdot v_e} = \eta_{ug} \cdot \frac{q \cdot P}{v_e} = \left[\frac{J}{m}\right]$$

dove En_s = Energia specifica apportata al terreno

η_{ug} = rendimento degli ugelli (0.90 per $\Phi < \text{mm } 2.5$ - 0.95 per $\Phi > \text{mm } 2.5$)

g = accelerazione di gravità

P = pressione in N/m^2

γ_1 = peso specifico del fluido legante N/m^3

s = somma delle sezioni degli ugelli m^2

v_e = velocità d'estrazione delle aste in m/s
 q = portata in m³/s

Il getto di fluido che esce da un ugello incontra il terreno nella sua quasi integrità a pochi centimetri da esso. Di conseguenza la sua azione dinamica si esaurisce assai rapidamente in funzione della distanza dal punto di uscita.

I fattori che influenzano il suo raggio d'azione sono:

1. la resistenza meccanica del terreno
2. la pressione idrostatica che vi si forma.

Il grafico alla figura 9 mostra la funzione della diminuzione dell'energia del getto in rapporto alla distanza dall'ugello sull'esempio di un getto d'acqua in fango bentonitico.

En_0 = energia del getto all'uscita dall'ugello
 En_x = energia residua alla distanza x dall'ugello

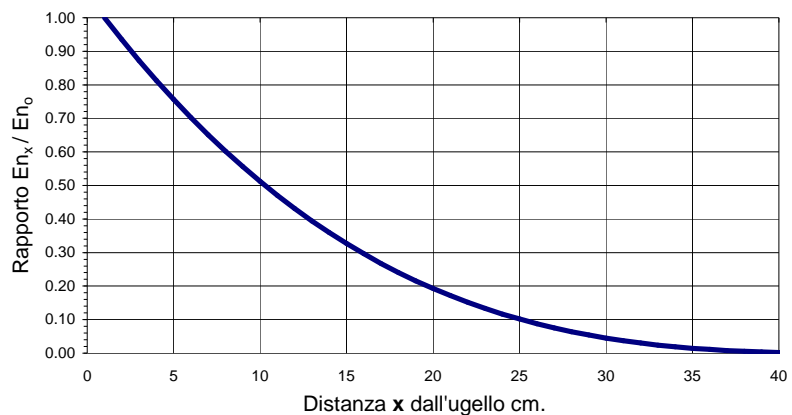


Figura 9: Energia residua del getto in funzione della distanza dall'ugello. Prove eseguite con acqua su fango bentonitico ($P_0 = 430$ bar - visc. 400 cps).

Il fluido legante è in genere costituito da una sospensione - rapporto acqua/cemento 1 con un peso specifico di 1.5 to/m³.

Un normale terreno non saturo può avere una percentuale di vuoti che oscilla secondo la granulometria media intorno al 20-30% del proprio volume. Nel caso di terreni saturi, questi vuoti sono occupati dall'acqua.

Il getto introduce forzatamente una quantità di fluido che sommato al volume di terreno da esso interessato eccede sempre, ad eccezione di terreni con scarsità di parti fini e non saturi, il volume specifico della colonna lavorata. Questa eccedenza deve obbligatoriamente fuoriuscire dalla sommità del foro (spurgo).

Un arresto del suo deflusso provoca la trasformazione dell'azione meccanica del getto in un apporto di fluido a pressione elevata con possibili conseguenze dannose ai manufatti presenti nelle immediate vicinanze della zona interessata (fondazio-

ni, pareti, condutture sotterranee, ecc.). Questo aspetto assume un'importanza fondamentale nell'ambito di lavori di sottomurazione ed in ambiente cittadino.

Qualora vi sia il rischio di un impedimento della fuoriuscita dello spurgo è necessario prevedere dei fori di sfogo nel raggio d'azione dell'iniezione. L'analisi della densità dello spurgo fornisce inoltre indicazioni sulla qualità dell'iniezione.

Nei terreni saturi l'eccedenza è pari al volume del fluido iniettato.

Normalmente il volume di spurgo aumenta con il volume totale iniettato. Si intuisce perciò che il jetting trifase è il metodo che produce più volume di spurgo rispetto al mono- ed al bifase.

Nella pianificazione di lavori di jetting è quindi indispensabile prevedere il trattamento e l'evacuazione del materiale di rifiuto.

Per questo motivo è consigliabile trattare terreni a bassa permeabilità, perciò con maggiori quantità di riflusso, con il metodo monofase. Questo stesso metodo si addice maggiormente in ambiente cittadino, oltre che per i motivi citati, anche per i minori volumi movimentati e per il minor raggio d'azione, che ne permettono un più agevole controllo data la presenza di manufatti ed infrastrutture di varia natura.

4.5 Stima del diametro delle colonne

Stabilire il diametro delle colonne jetting esclusivamente in base ad approcci teorici è alquanto difficile, visto il gran numero di variabili che devono essere tenute in considerazione. Valori indicativi sono forniti dalle imprese specializzate in base ad esperienze proprie.

Quale metodo soggetto al minor numero di variabili, per il jetting monofase è possibile approssimare il diametro delle colonne in modo teorico.

Per determinare con un'accettabile approssimazione il diametro delle colonne Jetting monofase è necessario conoscere alcune caratteristiche fondamentali del terreno.

Esistono diversi sistemi di calcolo che si basano su differenti parametri di valutazione.

Un metodo abbastanza semplice che ha dato risultati soddisfacenti (Injektobohr) è basato sul cosiddetto SPT - Standard Penetration Test. Si rinuncia qui, per motivi di spazio, ad una descrizione dettagliata sul procedimento di questa prova.

A causa del treno di aste necessario per trasmettere l'energia dinamica alla sonda, questo tipo di prova dà dei valori abbastanza affidabili fino ad una quindicina di m di profondità. Per profondità superiori esistono penetrometri statici fondo-foro (Nordman).

Il risultato delle prove viene espresso C_{30} - colpi necessari per infiggere la sonda per i 30 cm ritenuti validi.

È da menzionare il fatto che la formula descritta nel seguito è stata estrapolata a posteriori sulla base di diametri di colonne jetting effettivamente realizzate. Le esperienze sul campo hanno dimostrato la validità della formula.

- Dati
- P = pressione di lavoro in bar
 - V = volume di sospensione A/C = l/m
 - C = valore SPT_{30}
 - D = diametro della colonna risultante in mm

$$\boxed{En' = C^{e'} - C^{-q}} \quad \text{dove} \quad En' \times 10^5 = P \cdot V$$

con

$$e' = \frac{D}{540} - \frac{129.6}{C + 98} \quad \text{e} \quad q = \frac{129.6}{C + 98}$$

Nel grafico alla **figura 10** è indicato il diametro della colonna jetting in funzione del valore SPT_{30} e dell'energia apportata al terreno.

Se, ad esempio, si vuole ottenere una colonna jetting di 0.80 m in un terreno con un valore SPT di 15, che equivale ad un terreno sabbioso debolmente/mediamente compatto, sarà necessario fornire un'energia pari a 2.5×10^5 J/m.

Ammettendo una pressione d'esercizio di 500 bar, occorreranno 500 l per trattare 1 m di colonna. Se la portata dell'iniezione di miscela è di 2 l/s, il trattamento di 1 m di colonna dovrà durare 250 s, pari a 4.17 min. Se si scelgono passi di ritirata di 4 cm occorrerà effettuarne 1 ogni 10 s.

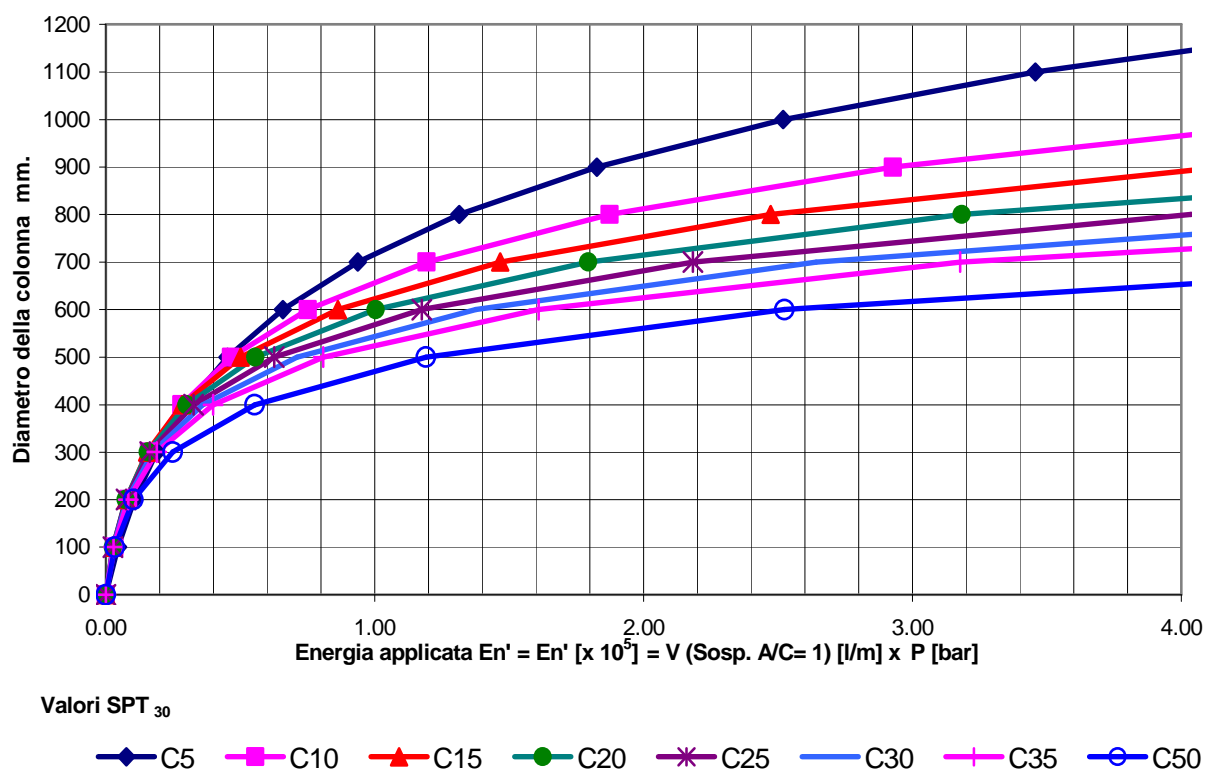


Figura 10: Diametro delle colonne jetting monofase in funzione dell'energia applicata a terreni con valori SPT₃₀ diversi (Injektobohr).

Valori indicativi di diametri di colonna per tutti i tre metodi jetting sono riportati nella tabella 2.

Metodo	Tipo di terreno		
	Argille/limi	Sabbie limose	Ghiaia con sabbia
Monofase	0.4 - 0.5	0.8 - 0.9	0.9 - 1.0
Bifase	0.6 - 0.8	1.1 - 1.3	1.3 - 1.5
Trifase	0.8 - 1.7	1.4 - 2.3	2.0 - 2.8

Tabella 2: Valori indicativi di diametri di colonna per diversi tipi di terreni (C. Kutzner).

4.6 Resistenze raggiungibili con il trattamento

Come per la determinazione del diametro delle colonne, anche la resistenza degli elementi jetting non è determinabile a priori. Per definire una correlazione tra resistenza e quantità di cemento iniettato vi sono grosse difficoltà: la prima è di conoscere quanto cemento è rimasto nel terreno; la seconda è costituita dal cono-

scere il diametro della colonna e infine è difficile stabilire l'influenza del tipo di terreno e del tipo di miscela iniettata.

Dalle imprese specializzate vengono forniti dei limiti raggiungibili in funzione del tipo di terreno da trattare. Questi sono riassunti nella **tabella 3**.

Terreno prevalente	Resistenza a 28 giorni [MPa]	Modulo elastico E [MPa]
Ghiaia e sabbia pulita	7 - 15	400 - 1'000
Sabbie limose e limi sabbiosi	4 - 8	400 - 8.000
Limi e argille mediamente compatte	1 - 3	200 - 500
Argille plastiche soffici o morbide	0.5 - 1.5	100 - 300
Argille compatte	3 - 5	200 - 500

Tabella 3: Valori indicativi di resistenza e modulo elastico di terreni trattati con jetting (RODIO).

A proposito dei valori riportati in tabella 3, vi è da notare che quelli più elevati sono normalmente raggiunti con il jetting monofase dal momento che con questo metodo si ha una maggiore quantità di cemento per metro cubo di colonna.

4.7 Macchinari

Come accennato nei capitoli introduttivi la tecnologia jetting è molto versatile ed applicabile in quasi tutti i tipi di terreni e per quasi ogni tipo di necessità progettuale nell'ambito del trattamento dei terreni sciolti. A questo scopo sono state sviluppate macchine capaci di eseguire questi tipi di lavori di dimensioni e potenze diverse adeguate alle varie esigenze.

La scelta dell'attrezzatura di perforazione è in genere eseguita in modo da avere il minor numero di manovre per realizzare l'intera colonna, ottenere un maggior rendimento in termini di rapidità esecutiva e di diminuire la possibilità di intoppi legati ad ogni interruzione del lavoro di iniezione (intasamento degli ugelli, incidenti di varia natura), che possono compromettere la qualità finale di un elemento. Questo non è evidentemente possibile quando si opera in spazi limitati come scantinati, all'interno di edifici, al di sotto di linee elettriche aree ecc.

La **figura 11** mostra le dimensioni ed i pesi di alcune macchine.

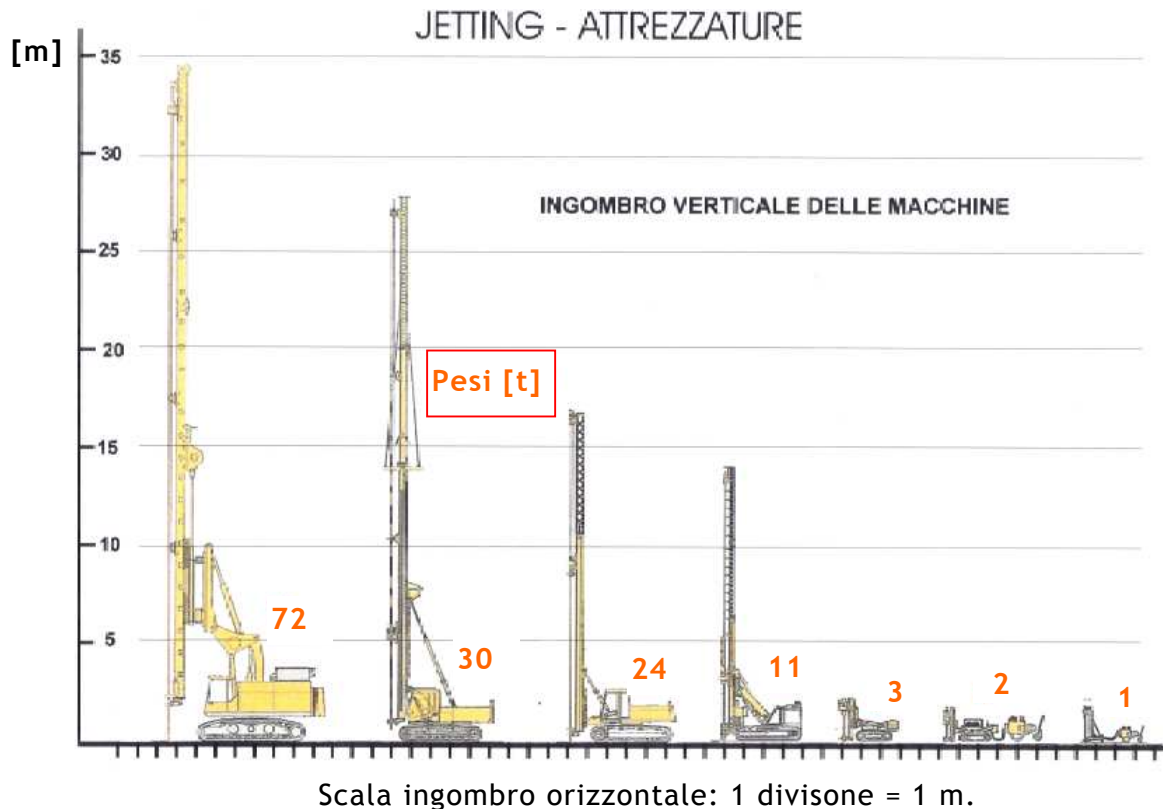
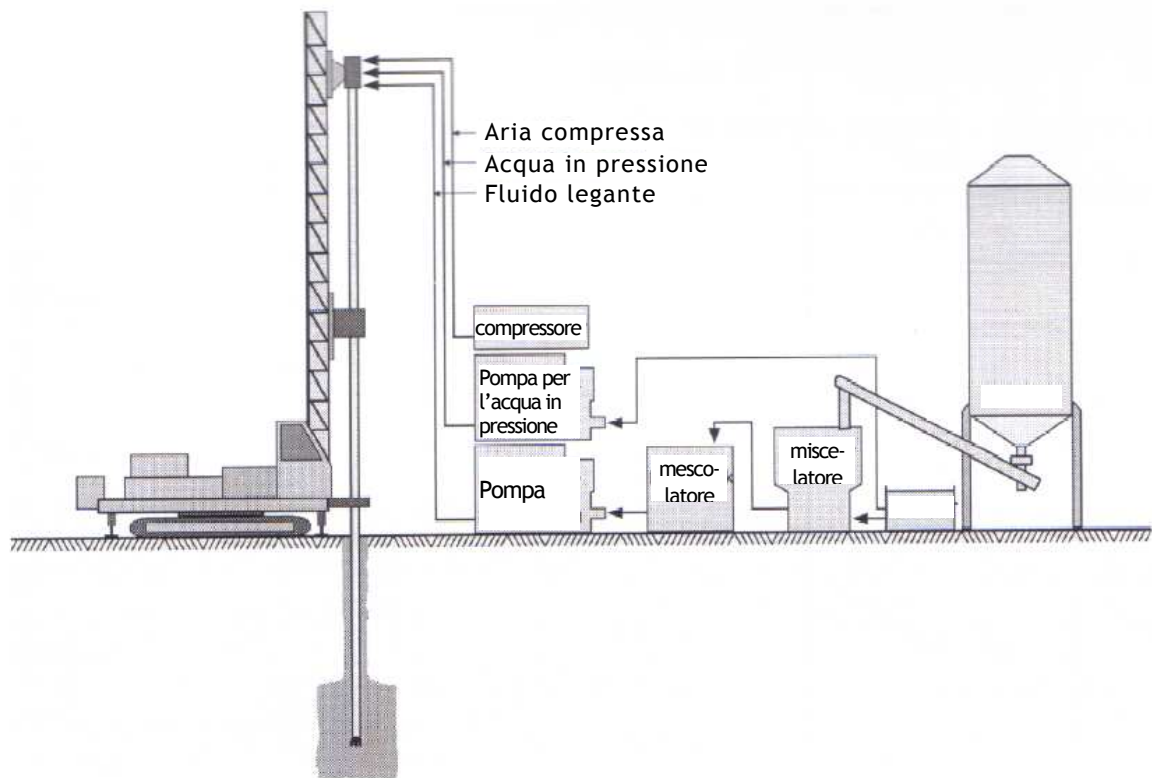
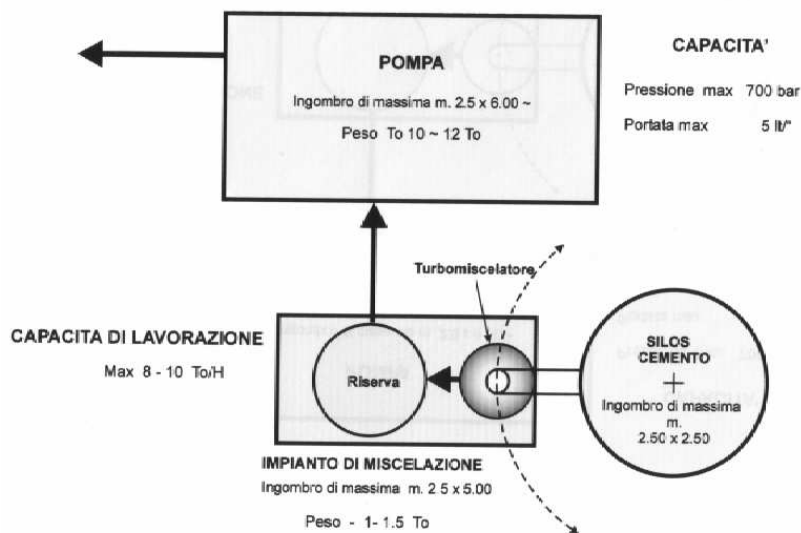


Figura 11: Dimensione e pesi di alcune macchine jetting (Bauer).

Come visibile dalla figura, gli ingombri ed i pesi delle macchine possono essere notevoli. È perciò indispensabile tener conto di questi fattori nella pianificazione degli accessi e dell'area di cantiere, che dovrà ospitare anche tutte le altre installazioni necessarie quali pompe, compressori, stazione di miscelazione, silos ecc. Una sezione longitudinale ed una planimetria schematiche con gli ingombri di massima ed i relativi pesi sono esposti alla **figura 12**.



12a)



12b)

Figura 12: Sezione longitudinale (Bauer) e schema planimetrico (Injektobohr) delle installazioni jetting con pesi ed ingombri.

5. IL TRATTAMENTO JETTING QUALE OPERA DI SOSTEGNO

5.1 Panoramica

Grazie alla possibilità, più volte citata, di armare gli elementi jetting con barre, tubi o profilati d'acciaio, l'applicazione del jetting quale opera di sostegno non diverge, nell'essenziale, da altri sistemi utilizzati a questo scopo che adottano un "pretrattamento del terreno" (s'intendono sistemi messi in opera prima di qualsiasi attività di scavo), quali pali o paratie.

A differenza di questi metodi, il jet grouting presenta il notevole vantaggio di una flessibilità esecutiva ben maggiore di quelle offerta da altri metodi, grazie alla quale è possibile attuare strutture complesse formate da singoli elementi jetting combinati a creare ad esempio muri a gravità. È inoltre possibile, con le dovute precauzioni, intervenire non solo a ridosso, ma anche direttamente al di sotto di strutture esistenti (edifici, fondazioni ecc.), cosa assai complicata se non inattuabile con altri sistemi di sostegno.

Per questi motivi il jetting è indicato sia per il sostegno di pareti, sia per sottomurazioni comunque anch'esse facenti parte della categoria dei sostegni.

Queste due possibilità d'esecuzione sono esposte nei sottocapitoli seguenti.

5.2 Sostegno di pareti

Come già accennato sopra, il sostegno di pareti con il sistema jetting può essere considerato alla stessa stregua di altri tipi di sostegni di pareti.

L'esecuzione avviene realizzando una serie lineare di colonne secanti verticali eventualmente armate con profilati o barre in acciaio, di dimensioni adeguate ai carichi statici che la struttura è chiamata ad assumere. Queste possono essere eventualmente completate da una serie di colonne ad inclinazione diversa a creare ad esempio delle mensole, degli ancoraggi o semplicemente un maggior spessore della parete a dipendenza delle necessità. La messa in opera può avvenire sia sopra che sotto livello di falda.

Naturalmente la parete deve essere strutturata in modo da poter ricevere e ripartire le forze di sostegno come ancoraggi, sbadacchi, chiodi o solette nel caso di scavo in "Deckenbauweise".

In generale solo il Jetting monofase può rispondere alle esigenze di precisione e sovente di delicatezza richieste da questo tipo di applicazione.

La figura 13 mostra due diverse possibili applicazioni del jetting per creare opere di sostegno.

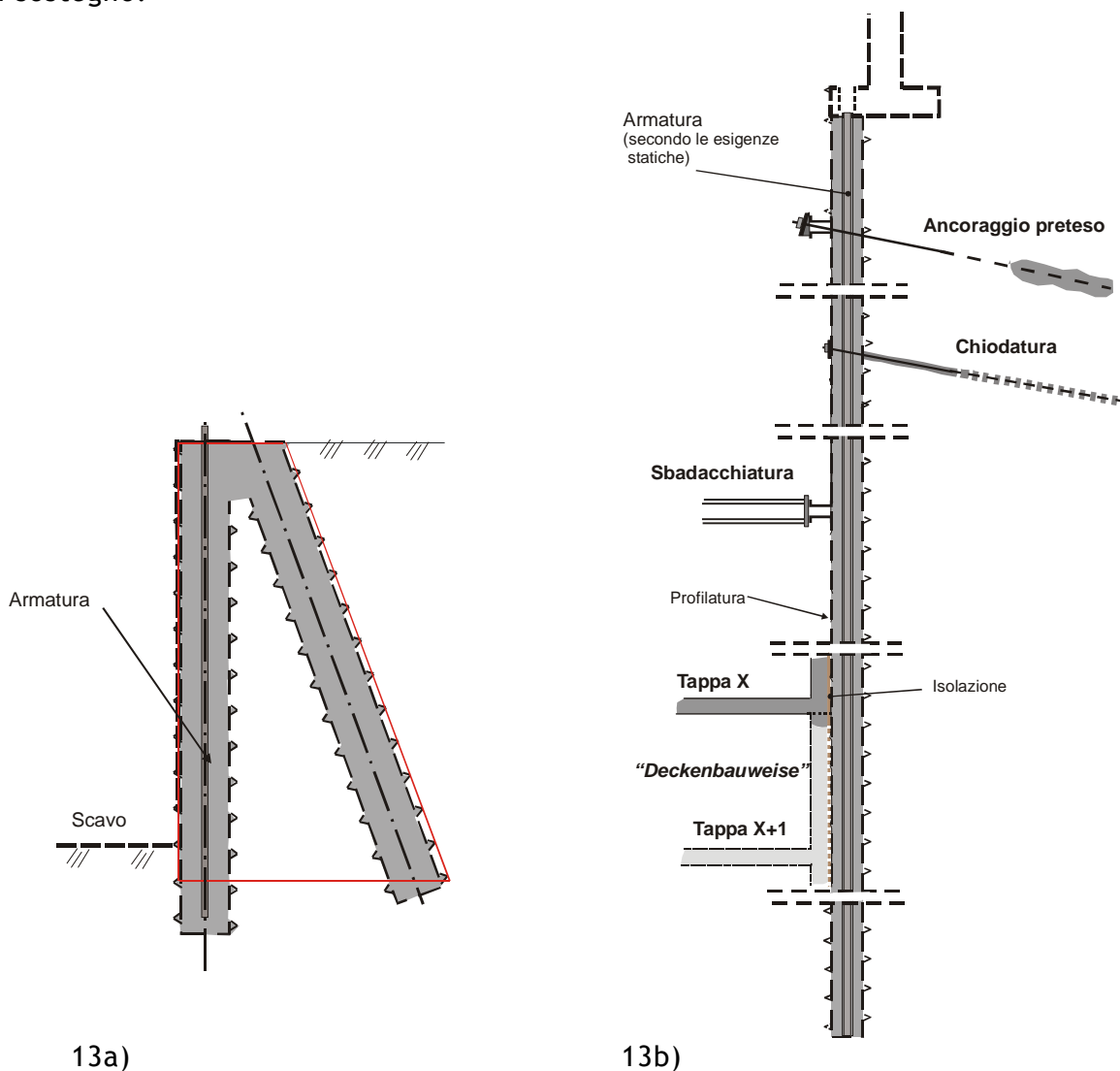


Figure 13: Esempi di pareti sostenute mediante jetting: 13a) muro "a gravità"; 13b) parete di colonne secanti verticali armate con possibili dispositivi di sostegno.

5.3 Sottomurazioni

Il problema di riportare carichi esistenti da un livello superiore ad uno inferiore può essere risolto in modo eccellente con un impiego appropriato di un sistema colonnare Jetting.

Come prima operazione sarà eseguita una serie di colonne distanziate in modo da poter sostenere la totalità del carico della struttura da sottomurare.

Particolare attenzione dovrà essere rivolta alla continuità del deflusso dei materiali eccedenti per non creare pressioni incontrollabili sulle fondazioni interessate. In seconda fase, si provvederà ad estendere la vera e propria sottomurazione con colonne secanti e con colonne disposte in modo da sopperire alle esigenze statiche del sistema.

La sequenza e le modalità esecutive devono sempre prioritariamente salvaguardare la continuità del deflusso delle eccedenze.

Lavori sotto falda devono essere accuratamente studiati e pianificati.

Entro certi limiti è possibile realizzare sottomurazioni autoportanti con l'impiego esclusivo di elementi colonnari Jetting eventualmente armati secondo le esigenze statiche.

Nella **figura 14** è visibile un tipico schema per sottomurazioni con colonne jetting.

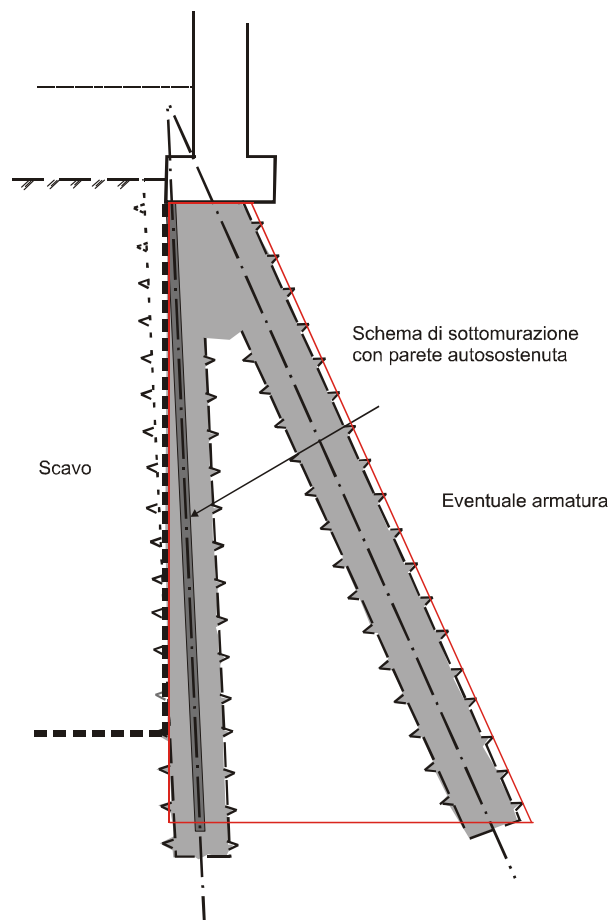


Figura 14: Schema tipico di sottomurazione con colonne jetting.

Con lo scavo viene normalmente eseguita una profilatura delle colonne jetting fino al limite teorico di scavo. La parete può quindi essere rivestita ad esempio con calcestruzzo spruzzato o con un'impermeabilizzazione e la parete della struttura sottostante.

I lavori di questo genere finora eseguiti non hanno mai dato luogo ad assestamenti delle opere sottostanti né immediati né negli anni successivi.

I sollevamenti rilevati dell'ordine di mm, si sono rivelati di carattere elastico e sono rientrati all'entrata in funzione della struttura sottostante.

Come per il sostegno di pareti anche per la sottostanzione solo il Jetting monofase può soddisfare le esigenze di delicatezza, di precisione e spesso di spazio (scantinati, interni di edifici normali e storici, spazi ristretti, ecc.) richieste da questo tipo di lavoro.