





XXII CONGRESSO AGI

## **SICUREZZA E ADEGUAMENTO OPERE ESISTENTI**

**Dott. Ing. Emanuele Nanni – Manager Keller Fondazioni S.r.l.**

**Dott. Ing. Piergiuseppe Foldi – Consulente geotecnico**

TITOLO: *L'UTILIZZO DELLA METODOLOGIA JET-GROUTING PER L'AMPLIAMENTO E LA RISTRUTTURAZIONE DI EDIFICI ESISTENTI (IN AMBITO URBANO)..*

### SOMMARIO:

L'attuale modello di sviluppo dei centri urbani comporta un'intensa attività di riqualificazione dell'esistente.

In particolare gli ampliamenti e le ristrutturazioni edilizie comportano frequentemente una variazione nella destinazione d'uso dell'immobile.

L'ampliamento comporta quasi sempre la creazione di volumi abitativi sotto la quota topografica anche per ricavare nuovi spazi per autorimesse.

Il presente articolo illustra le metodologie e le tecniche utilizzate per realizzare il contenimento delle pareti di scavo e la sottofondazione di edifici esistenti.

Allo scopo di ottimizzare i volumi ricavati con l'ampliamento e per ridurre i tempi esecutivi, la tecnologia jet-grouting si è dimostrata particolarmente versatile ed affidabile.

Le esperienze raccolte in alcuni cantieri del Nord Italia, in cui è stata effettuata anche della sperimentazione, permettono di fare il punto sulle effettive capacità di miglioramento delle caratteristiche geomeccaniche dei terreni ottenibile con la tecnica Jet-Grouting.

## INTRODUZIONE

La tecnologia Jet-Grouting consiste sostanzialmente nell'iniezione ad altissima pressione di miscela cementizia nel terreno da sottoporre a trattamento.

La sua applicazione è tutto sommato abbastanza recente collocandosi, in Europa e negli Stati Uniti, dalla fine degli anni settanta dopo la sua importazione dal Giappone paese nel quale è utilizzata dagli anni sessanta, sotto il nome di "Chemical Churning Pile", acronimizzato in CCP.

A sua volta il Giappone aveva sviluppato la tecnica sulla base delle prime sperimentazioni inglesi risalenti agli anni '50.

Lo sviluppo dell'applicazione in Italia, paese notoriamente fragile dal punto di vista idrogeologico, risale dai primi anni ottanta; la versatilità della tecnologia jet-grouting ne ha permesso un largo impiego in molteplici e disparate situazioni.

Successivamente ai suoi esordi la tecnica si differenziò in molteplici varianti mirate ad ottimizzare il trattamento dei diversi tipi di terreno nelle differenti condizioni geotecniche in sito.

## LA METODOLOGIA SOILCRETE JET-GROUTING

Attraverso il jet-grouting il terreno in sito viene disgregato, rimescolato e combinato con le miscele cementizie, allo scopo di ottenere il prodotto strutturalmente desiderato.

In particolare la realizzazione di un volume di terreno consolidato con Jet-Grouting richiede la modificazione del “fabric” strutturale del suolo, l’evacuazione di un “refluo” di lavorazione e l’introduzione in sito di un legante (miscela cementizia) per la costituzione del terreno consolidato.

Le fasi di lavorazione della tecnica e l’attrezzatura utilizzata sono (vedi Fig. 1):

- 1) perforazione di un foro di piccolo diametro (100÷200 mm) fino all’estremità del trattamento desiderato
- 2) iniezione con pompe ad altissima pressione della miscela cementizia fluida attraverso una o più valvole d’iniezione posizionate sul “monitor” all’estremità della batteria di aste di perforazione
- 3) estrazione lenta delle aste con simultanea rotazione angolare delle stesse, a formare il volume di terreno consolidato desiderato (colonna, pannello, ecc.).

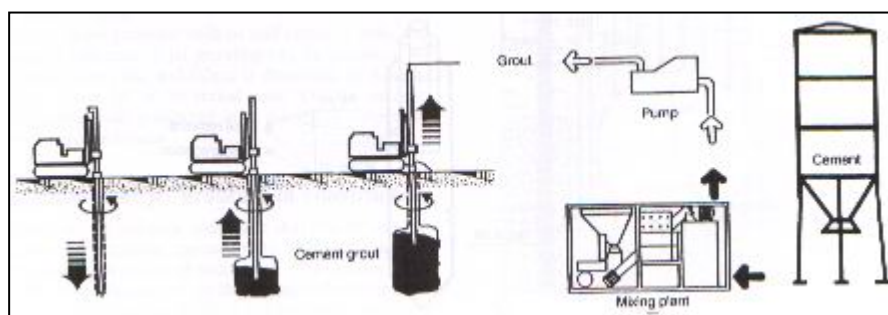


Fig. 1 - Attrezzature e fasi di realizzazione di colonne di terreno consolidato (da Morey & Harris)

Durante il processo di iniezione il fango in eccesso derivante dall’inserimento della miscela fluida nel terreno, fuoriesce liberamente dal suolo. Qualora ciò non avvenga si incorre nel rischio della fratturazione del terreno.

La forma, le dimensioni, la composizione e le caratteristiche meccaniche del volume di terreno consolidato, dipendono sostanzialmente da:

- natura e caratteristiche meccaniche e strutturali del terreno naturale in sito
- caratteristiche della miscela cementizia di iniezione
- modalità e parametri di iniezione.

Relativamente alle modalità di iniezione si possono distinguere tre tecnologie j.g., rispettivamente denominate, con riferimento alla Fig. 2, monofluido, bifluido e trifluido in funzione del numero dei materiali iniettati.

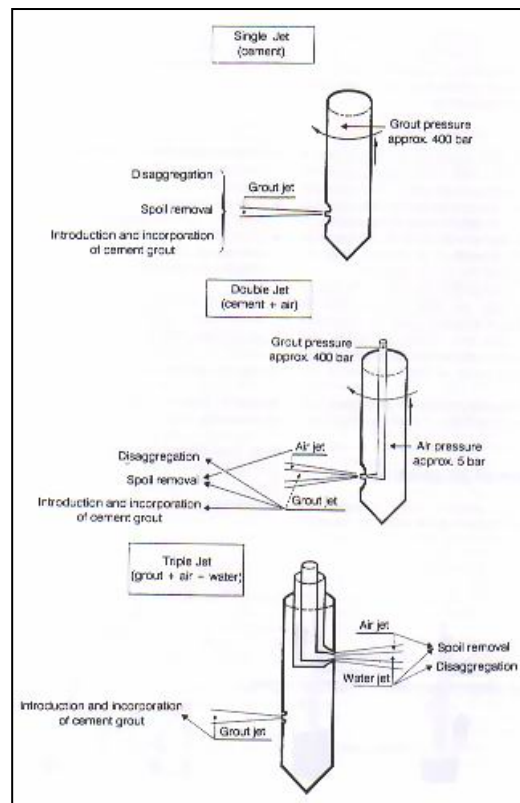


Fig. 2 - Principali metodi del jet-grouting (da Morey & Harris)

Senza entrare nel dettaglio della descrizione dei singoli metodi di j.g., che esula dallo scopo della presente memoria, si può dire che la sofisticazione tecnologica dei metodi bifluido e trifluido rispetto al metodo base (monofluido) è mirata a incrementare la distanza e l'intensità di penetrazione della cementazione all'intorno del foro.

Detto effetto è ben evidente nella Fig. 3 dove si vede, a parità di terreno trattato, l'incremento del diametro delle colonne passando dalla tecnica monofluido (1) alla tecnica trifluido (2).

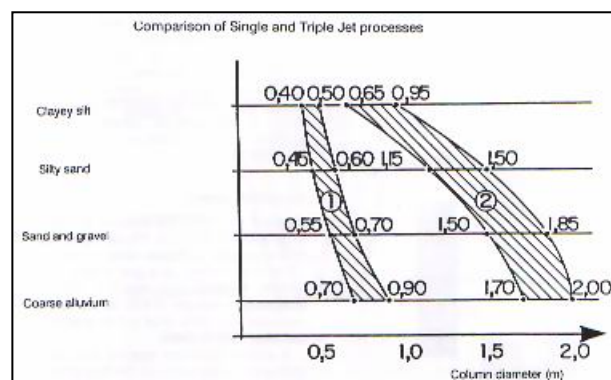


Fig. 3 – Diametri tipici di Jet-Grouting in diverse condizioni litologiche (da Morey & Harris)

Un tipico esempio di colonne di terreno consolidato a mezzo del Jet-Grouting (Soilcrete – sistema Keller) è illustrato nella foto di Fig. 4.

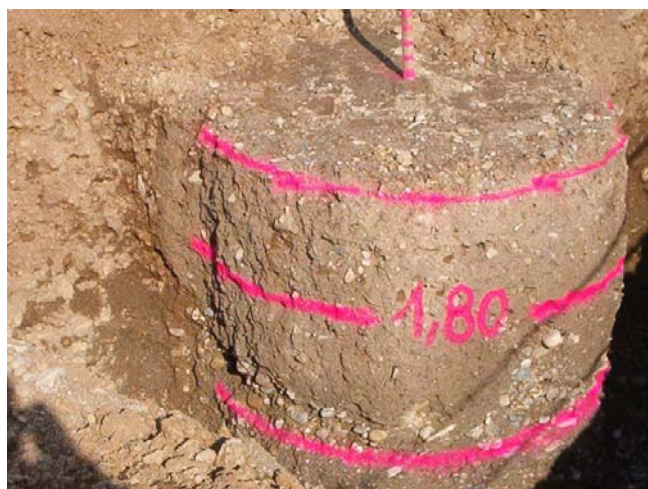


Fig. 4 – Tipico esempio di colonna di terreno consolidato con la tecnica Soilcrete (Keller)

Circa le modalità operative e i relativi parametri, i valori tipici delle pressioni e delle velocità di estrazione e di rotazione, sono espresse, unitamente ad altri valori caratteristici, nella tabella esemplificativa riportata al seguito:

Tab. 2 - Valori caratteristici dei parametri di esecuzione delle tecniche Jet-Grouting

<i>Tecnologia di iniezione</i>	<i>Tipo di fluido</i>	<i>Prssione di iniezione [bar]</i>	<i>Ugelli di iniezione Numero</i>	<i>Ugelli di iniezione Diametro [mm]</i>	<i>Velocità di risalita dell'ugello [cm/min]</i>	<i>Velocità di rotazione [giri/min]</i>	<i>Portata di iniezione [l/min]</i>
Monofluido	Miscela	400÷550	1 o 2	2 ÷ 5	15 ÷ 100	5 ÷ 15	70 ÷ 600
Bifluido	Miscela	400÷550	1 o 2	2 ÷ 5	10 ÷ 30	4 ÷ 8	70 ÷ 600
	aria	10÷12	1 o 2	2 ÷ 5	10 ÷ 30	4 ÷ 8	4000 ÷ 10000
Trifluido	Miscela	50÷100	1 o 2	4 ÷ 5	6 ÷ 15	4 ÷ 8	80 ÷ 200
	Aria	10÷12	1 o 2	4 ÷ 5	6 ÷ 15	4 ÷ 8	4000 ÷ 10000
	Acqua	400÷500	1 o 2	2 ÷ 3	6 ÷ 15	4 ÷ 8	40 ÷ 100

## LA METODOLOGIA SOILCRETE JET-GROUTING

Il prodotto finale dell'applicazione della metodologia Jet-Grouting è un terreno consolidato le cui caratteristiche fisico-meccaniche sono incrementate in funzione principalmente della natura litologica originaria del suolo in sito e delle sue caratteristiche di addensamento e/o compattezza.

Molteplici studi sperimentali hanno permesso di individuare statisticamente le caratteristiche del terreno consolidato con Jet-Grouting; tutti gli studi hanno evidenziato che dette caratteristiche aumentano con l'aumentare della classazione e della granulometria del terreno in sito prima del trattamento.

In generale si osserva che, circa il valore di resistenza a compressione monoassiale UCS del terreno consolidato, si possono individuare i seguenti campi di valori caratteristici:

- torbe – UCS = 1,5 ÷ 7,5 MPa
- argille – UCS = 2,5 ÷ 5,5 MPa
- limo – UCS = 3,5 ÷ 13,5 MPa
- sabbia e ghiaia – UCS = 12 ÷ 19 MPa.

In particolare, considerate le migliorie tecnologiche degli ultimi anni, la tabella al seguito evidenzia i campi di valori anche del parametro coesione C e di elasticità E ottenibili con le tecniche più recenti.

Tab. 2 - Valori di parametri meccanici in vari materiali trattati con Jet-Grouting  
(da Lamberti e Botto)

<b>Litologia</b>	<b>Coesione [kg/cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Modulo E [kg/cm<sup>2</sup>]</b>
Ghiaie pulite	> 300	200.000
Ghiaie sabbiose	200 ÷ 300	150.000
Sabbie pulite	200 ÷ 300	100.000
Sabbie debolmente argillose	40 ÷ 75	80.000
Sabbie limose	40 ÷ 80	25.000
Pozzolane	40 ÷ 80	nd

Il rapporto  $R$  tra i parametri di modulo elastico e la resistenza a compressione monoassiale,  $E / UCS$ , è identificato in letteratura come mediamente pari alle seguenti relazioni:

- ghiaia con sabbia –  $R \approx 900 \Rightarrow E \approx 900 \times UCS$
- ghiaia con sabbia –  $R \approx 360 \Rightarrow E \approx 360 \times UCS$

Nell'ambito della caratterizzazione geomeccanica del terreno consolidato a mezzo della tecnologia Soilcrete di Keller, gli autori hanno esaminato diverse esperienze sperimentali su carote estratte da colonne Jet-Grouting su ghiaie e sabbie ottenendo le seguenti distribuzioni statistiche dei parametri UCS e  $E$ , rispettivamente riportate negli istogrammi illustrati al seguito (vedi Fig. 5 e Fig. 6) con i simboli  $R_b$  e  $E_t$ .

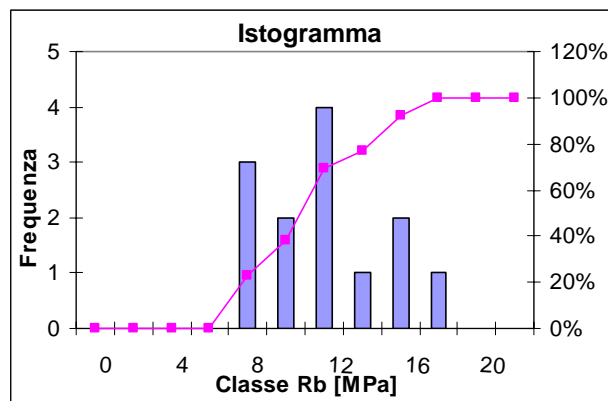


Fig. 5 – Istogramma sperimentale dei valori di  $R_b$  di terreno consolidato con la tecnica Soilcrete (Keller)

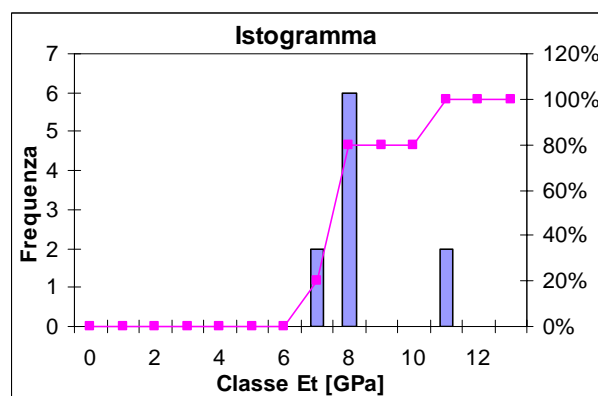


Fig. 6 – Istogramma sperimentale dei valori di  $E_t$  di terreno consolidato con la tecnica Soilcrete (Keller)

Come si può notare dalla sperimentazione i valori dei parametri geomeccanici ottenuti sono concordi con quanto citato nella bibliografia internazionale.

Raccogliendo inoltre anche i valori di sperimentazione ricavati da terreni di natura limoso-sabbiosa trattati con la tecnica Soilcrete, si è ottenuto il diagramma correlativo tra valore di Rb e Et illustrato in Fig. 7.

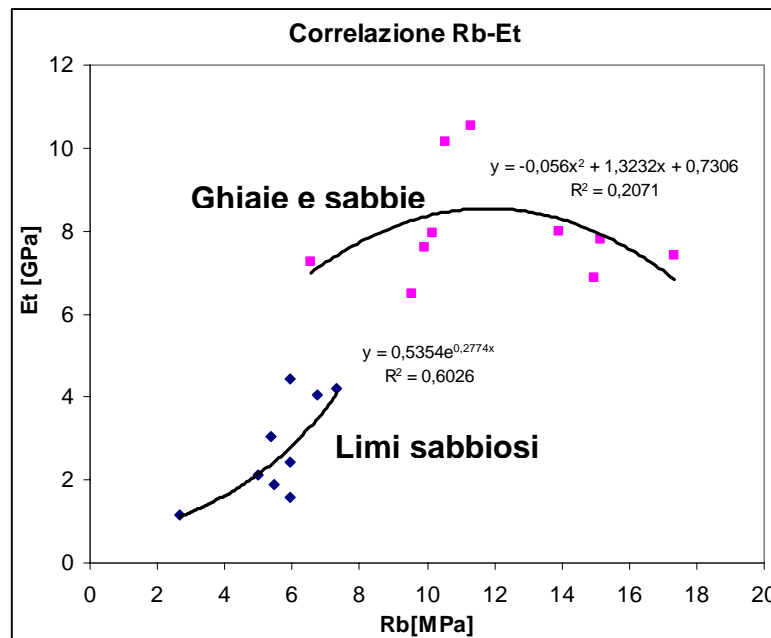


Fig. 7 – Diagramma correlativo dei valori di Et e Rb per differenti terreni consolidati con la tecnica Soilcrete (Keller)

Da tutto quanto espresso è evidente che le condizioni di partenza migliori per l'ottenimento dei massimi risultati in termini di dimensioni delle colonne e caratteristiche meccaniche delle stesse sono rappresentate dai terreni di natura ghiaiosa e sabbiosa dove è possibile ottenere, con la metodologia Soilcrete che ottimizza la procedura Jet-Grouting, volumi consolidati di eccezionali caratteristiche come rappresentati nella seguente Fig. 8.



Fig. 8 – Risultato della ottimizzazione della tecnica j.g. con la tecnica Soilcrete (Keller)

### UN CASO DI APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA SOILCRETE

Un caso tipico di applicazione della tecnica Jet-Grouting Soilcrete nell'ambito dell'adeguamento di un'opera esistente, riguarda la realizzazione di volumi sotterranei all'interno della ristrutturazione architettonica e funzionale dell'ex Hotel Barchetta a Desenzano del Garda sull'omonimo Lago.

In tale intervento di ristrutturazione, la cui planimetria schematica indicativa è raffigurata nella Fig. 9 al seguito, i volumi sotterranei sono stati ricavati sottomurando le fondazioni delle pareti perimetrali a mezzo di volumi di terreno consolidato Soilcrete successivamente ancorate a mezzo di tiranti attivi, per uno sviluppo planimetrico di circa 160÷170 m e scavandone il volume interno per una profondità di circa – 7 m dal piano topografico esterno locale.

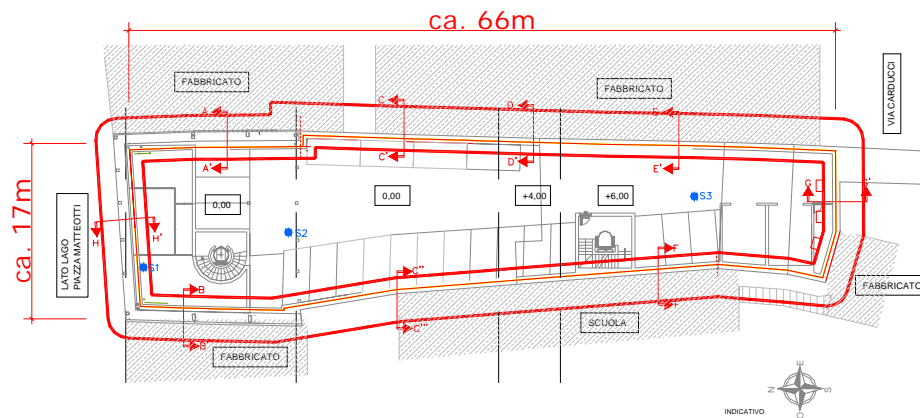


Fig. 9 – Planimetria schematica dell'intervento realizzato con la tecnica Soilcrete (Keller)

Si noti, con riferimento alla Fig. 10 che rappresenta una sezione schematica esemplificativa dell'intervento, che lo scavo, realizzato in differenti fasi intervallate dalle operazioni di tirantatura effettuate secondo tre ordini di ancoraggi, è realizzato pressoché completamente al di sotto della quota della falda del lago all'interno di terreni eterogenei prevalentemente fini saturi.

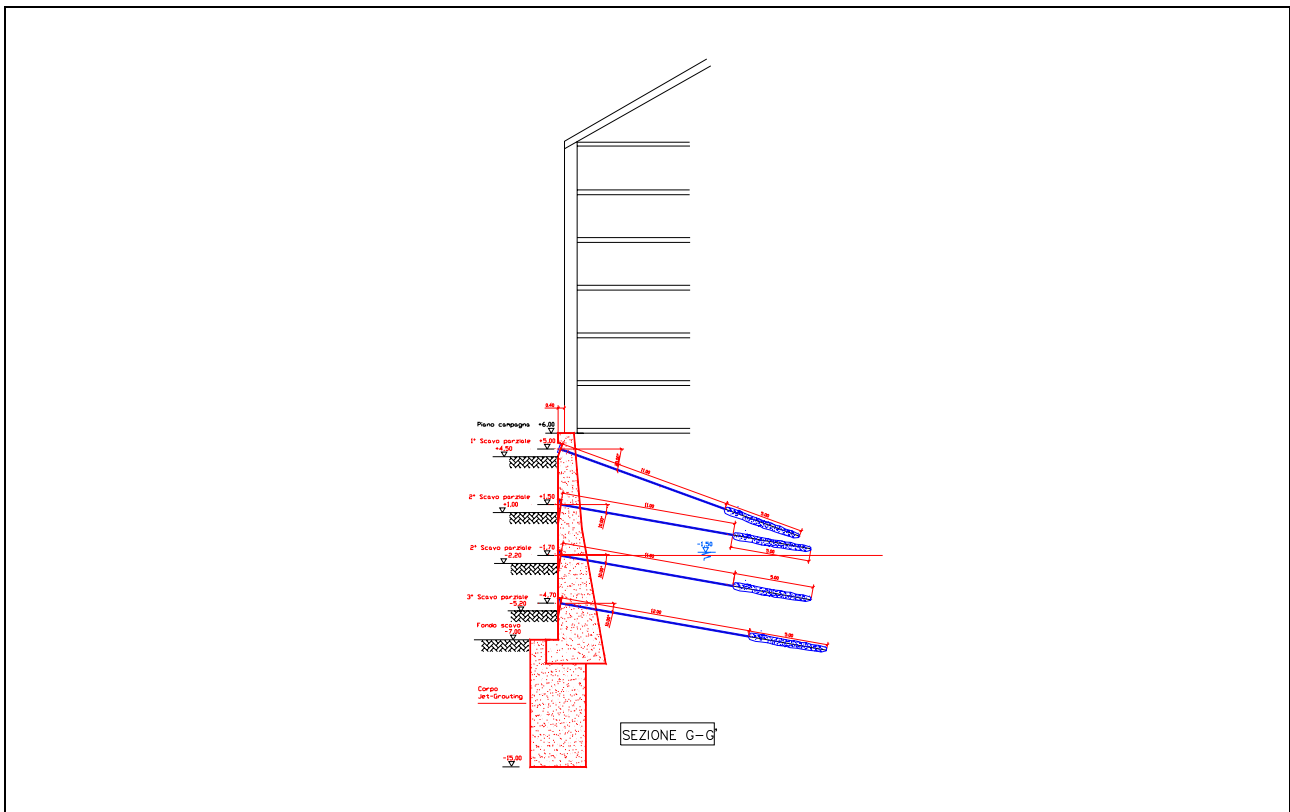


Fig. 10 – Sezione schematica dell'intervento realizzato con la tecnica Soilcrete (Keller)

L'ottimizzazione dei volumi di spazio interno sotterraneo ricavabili con la realizzazione del sostegno perimetrale a mezzo della tecnologia di consolidamento Soilcrete, è stata possibile grazie alle approfondite conoscenze delle caratteristiche meccaniche del terreno consolidato.

Si pensi infatti che le colonne realizzate per l'impermeabilizzazione e il sostentamento delle parete perimetrali ancorate con tiranti a trefoli, non sono in nessun caso armate (vedi foto di una delle fasi di scavo – Fig. 11).

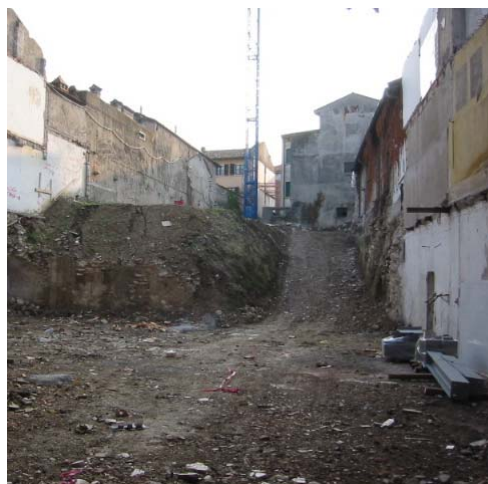


Fig. 11 – foto di una fase di scavo

In particolare il corpo di sottofondazione realizzato con il consolidamento può essere ricondotto ad una sezione trapezoidale con la presenza in taluni casi di speroni anteriori o posteriori. In direzione longitudinale il sistema è visto nel calcolo come illimitato ovvero come piano e non spaziale.

Il calcolo geotecnico è consistito sostanzialmente nelle seguenti due tipologie di verifiche:

- Verifiche esterne a scorrimento, scivolamento e capacità portante nonché quella a stabilità globale.
- verifiche interne attraverso il calcolo delle tensioni massime sulle varie sezioni notevoli. Relativamente alle verifiche interne, l'ottimale conoscenza della traiettoria della funicolare dei carichi di compressione all'interno del volume di terreno consolidato, che deve rimanere sempre all'interno del nocciolo d'inerzia della sezione per non parzializzarla, ha permesso di verificare ad ogni profondità le sezioni di carico a fronte delle caratteristiche di resistenza del j.g. ben conosciute.

Le spinte in essere sul corpo di terreno consolidato sono state implementate attraverso il calcolo delle tensioni secondo la teoria della plasticità di Rankine, sulle differenti porzioni della sezione della sottofondazione (vedi Fig. 12).

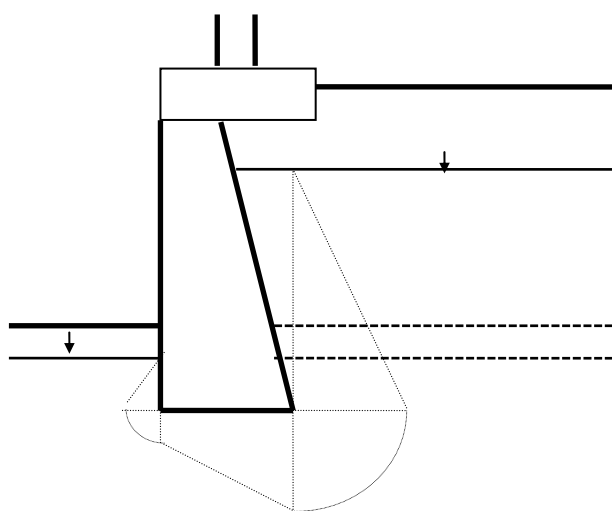


Fig. 12 – Sezione schematica dei diagrammi delle spinte di terra sul volume di terreno consolidato

Analogamente attraverso gli stessi sistemi di calcolo si sono verificati gli ancoraggi, secondo lo schema statico di Fig. 13.

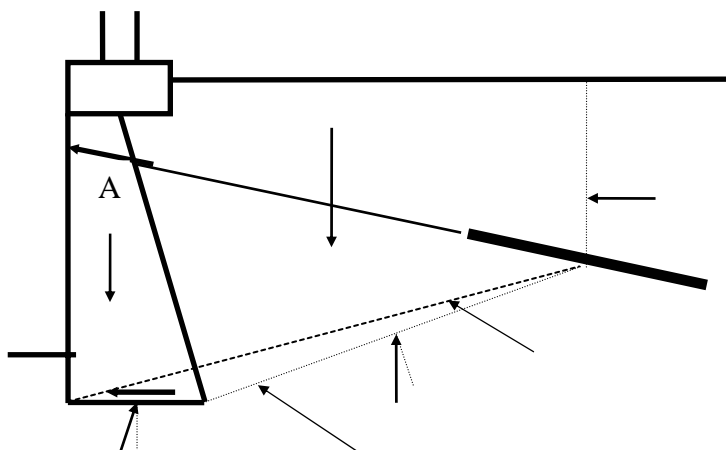


Fig. 13 – Sezione schematica di verifica dei tiranti di ancoraggio

Infine il programma calcola su delle sezioni orizzontali a distanza nota l'una dell'altra l'eccentricità e la tensione massima.

In una sezione subito sotto l'opera da sostenere, ed in due sezioni al piede si programma verifica inoltre la resistenza a compressione ed al taglio (vedi Fig. 14).

I parametri di resistenza del terreno consolidato sono implementati in funzione dei dati sperimentali disponibili sul terreno oggetto dell'intervento.

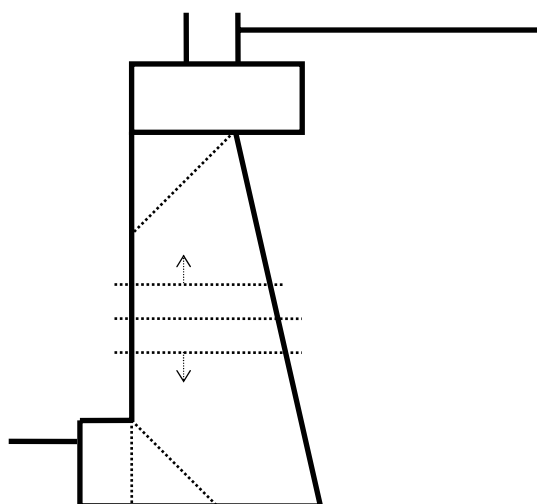


Fig. 14 – Sezione schematica di verifica delle tensioni interne al volume consolidato

Il risultato finale dell'intervento è l'ottenimento di volumi sotterranei significativi, in piena sicurezza, economia e riduzione dei tempi di realizzazione, come si evince dalla fotografia riportata al seguito (Fig. 15).



Fig. 15 – Intervento di recupero dei volumi sotterranei a scavo quasi ultimato.

### BIBLIOGRAFIA

Burke G.K., Peterson J.H. & Smith M.L. (2000?) – Superjet Grouting and the quality of its products – Internal Keller Group Report, Hayward Baker Inc, USA.

Morey J. & Harris R.R.W. (1995) – Jet Grouting in construction – Engineering Geology in Construction – Geological Society Engineering Geology Special Publication n° 10 – Ed. The Geological Society, London.

Lamberti R. & Botto G. (1991) – Consolidamento delle pozzolane di napoli a mezzo di colonne di jet-grouting rinforzate con inerti granulari – Il consolidamento del suolo e delle rocce nelle realizzazioni in sotterraneo – Ed. Società Italiana Gallerie, Milano.



