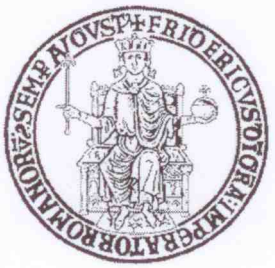
UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI NAPOLI "FEDERICO II"



Corso di Laurea Magistrale in

INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO

(Classe delle Lauree Magistrali in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio, LM-35)

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE

ABSTRACT

PROGETTO PROBABILISTICO DI TAMPONI DI FONDO DI JET GROUTING PER SCAVI A CIELO APERTO SOTTO FALDA

RELATORE

Prof. Ing. Alessandro Flora

CANDIDATO

Giovanni Megaro M67/025

Anno accademico 2011/2012

PROGETTO PROBABILISTICO DI TAMPONI DI FONDO DI JET GROUTING PER SCAVI A CIELO APERTO SOTTO FALDA.

In questo studio di tesi ci si occupa del progetto di un tampone di fondo per scavi a cielo aperto sotto falda, eseguito mediante la tecnica del jet grouting.

Il jet grouting è una tecnica di consolidamento consistente nell'iniezione ad alta velocità di una o più miscele fluide che rimaneggiano e cementano il terreno in sede attraverso la formazione di volumi di terreno trattato approssimativamente cilindrici.

Il trattamento si articola in due fasi successive di perforazione e di iniezione dei fluidi con formazione della colonna consolidata in risalita.

Il trattamento può avvenire principalmente con tre diversi tipi di tecnologia: sistema monofluido, in cui il fluido assolve sia la funzione di rimaneggiamento che di cementazione del terreno trattato; sistema bifluido che permette l'iniezione contemporanea di miscela cementizia ed aria compressa in modo da limitare la dispersione del getto incrementando l'efficienza idrodinamica e quindi il raggio d'azione; sistema trifluido per il quale il trattamento avviene separando le funzioni di disgregazione del terreno in sede (affidata ad un getto di acqua circondato da aria) da quella di cementazione, svolta dalla miscela cementizia iniettata dall'ugello inferiore.

Gli aspetti più critici che caratterizzano un intervento di jet grouting, qualora si debba garantire la compenetrazione tra gli elementi consolidati, riguardano:

- la variabilità del diametro
- la deviazione della colonna dalla verticale

La stima del diametro viene effettuata con una legge di tipo normale con una dispersione dei dati rappresentata da un coefficiente di variazione del diametro (CV(D)).

Per quanto riguarda la stima dell'inclinazione della colonna, questa viene definita mediante due angoli: l'angolo di inclinazione calcolato con una distribuzione normale avente valore medio nullo e deviazione standard (SD(α)) correlabile alla lunghezza di perforazione e l'azimut che, invece, viene stimato con una legge di tipo casuale.

Per il progetto del tampone di fondo (*Figura 1*) si ipotizza uno schema con una configurazione a maglie triangolari (*Figura 2*) che risulta avere un duplice vantaggio sia in termini di minore sovrapposizione delle colonne che in termini di miglior fattore di riempimento inteso come il rapporto tra l'area trattata dal jet e l'area della cella.

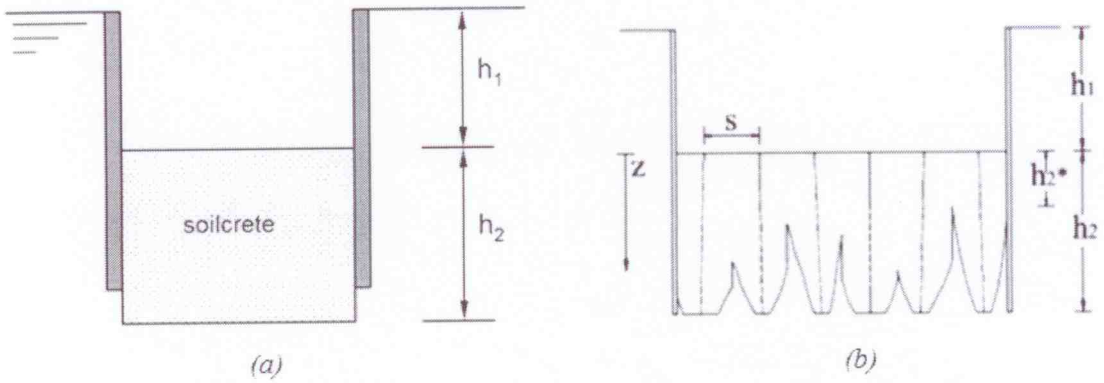


Figura 1. Schema di un tampone di fondo ideale privo di difetti (a) e di un tampone di fondo con difetti di compenetrazione (b).

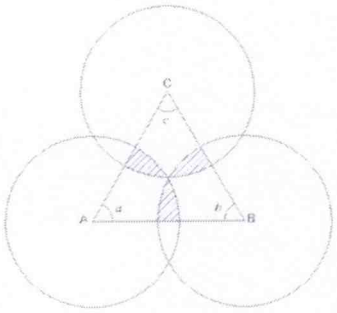


Figura 2. Schema tipo di una maglia triangolare.

L'approccio usato nel progettare il tampone di fondo è di tipo probabilistico.

Al fine di stimare l'area effettivamente trattata dall'intervento di consolidamento, si procede all'implementazione del codice di calcolo, denominato "Megajet". Esso si basa su un'analisi statistica di tipo Monte Carlo, la quale, una volta definite le variabili casuali (diametro medio, inclinazione) e i parametri statistici (coefficiente di variazione del diametro, deviazione standard , frattile di riferimento), genera in maniera random un sistema di colonne calcolando N volte un valore dell'area dei vuoti. Dalle N valutazioni vengono estratti i valori dell'area dei vuoti corrispondenti ad un frattile di riferimento inteso come il valore della variabile aleatoria cui corrisponde una fissata probabilità di essere superato.

Il codice di calcolo consente, anche, di stimare l'eventuale volume di materiale non trattato e un coefficiente di sicurezza che tenga conto dell'effetto della sottospinta dell'acqua al di sotto del tampone di fondo.

Gli input da fornire al codice di calcolo sono di tre tipologie:

- ❖ geometrici: profondità massima dell'intervento (L), profondità di scavo (h_{exc}) alla quale si fissa la testa del tampone di fondo, diametro in sommità delle colonne consolidate (D), interasse in sommità (s)
- ❖ fisico-meccanici: coefficiente di permeabilità (k); peso specifico dell'acqua (γ_w); peso del terreno trattato con il jet grouting (γ_{jet})
- ❖ statistici: coefficiente di variazione del diametro (CV(D)); deviazione standard delle colonne (SD(α)), frattile di riferimento

A questo punto si fa partire la simulazione di calcolo che, al variare dei diversi parametri di input, fornisce l'andamento dell'area non tratta (A_{un}) e del coefficiente di sicurezza al galleggiamento (SF) al variare della profondità, e l'andamento dello spessore di tampone consolidato privo di difetti (h_T) e della portata filtrante adimensionalizzata (Q), al variare dei diversi valori del rapporto di interasse (s/D) considerati.

Alla luce dei risultati ottenuti, che appaio del tutto confrontabili con le esperienze documentate in letteratura, si dimostra come il codice di calcolo Megajet, mediante un approccio probabilistico rappresentato da una simulazione Monte Carlo, risulti idoneo ad interpretare le complesse problematiche legate alla progettazione di un tampone di fondo con la tecnica del jet grouting.

Il codice di calcolo viene poi applicato per la verifica di un caso reale: la stazione dell'alta velocità di Bologna dove è stato previsto un tampone di fondo impermeabile.

Date le considerevoli dimensioni e profondità dello scavo, che hanno reso inopportuno l'esecuzione di un tampone di fondo massivo, si è optato per un tampone con uno spessore di soli 5 metri ancorato da pali di fondazione della struttura in elevazione che in questa fase di lavorazione vengono utilizzati come tiranti. L'esecuzione di tali trattamenti si ha in corrispondenza di due zone: una dal lato Milano, costituita da terreni limo argillosi, e l'altra dal lato Firenze, costituita da terreni prettamente sabbiosi.

Le verifiche effettuate in sito hanno mostrato come la scelta di progetto di usare un interasse delle colonne pari a 1.2 m si sia dimostrata sbagliata, per entrambi i tipi di terreno, rendendo necessaria una modifica dello schema di progetto.

Lo stesso risultato emerge anche dall'applicazione del codice di calcolo Megajet.

Difatti, calcolato il diametro medio con l'approccio proposto da Flora et al. (2013) in Géotechnique 63, e scelto per esso i valori limite dell'intervallo compreso tra il ± 20% di quello calcolato, si è stimata l'eventuale presenza di aree non trattate al variare della

deviazione standard, del coefficiente di variazione del diametro e per un assegnato frattile di riferimento.

Le stime ottenute hanno confermato quanto riscontrato in sito. In particolare, per i terreni sabbiosi (*Figura 3*), con un interasse pari a quello di progetto la compenetrazione delle colonne si raggiunge, per entrambi i valori di deviazione standard considerati, solo per diametri appartenenti alla fascia alta dell'intervallo del diametro medio. La scelta di un interasse minore, s=1 m, invece, porta ad una perfetta compenetrazione al variare del diametro e della deviazione standard.

		LATO FIRENZE											
		PROVE IN SITO			CODICE DI CALCOLO MEGAJET								
		s= 1.2 m			s= 1.2 m Dmin SD(α)=0.1	s= 1.2 m Dmin SD(α)=0.3	s= 1.2 m Dmax SD(α)=0.1	s= 1.2 m Dmax SD(α)=0.3	s= 1 m Dmin SD(α)=0.1	s= 1 m Dmin SD(α)=0.3	s= 1 m Dmax SD(α)=0.1	s= 1 m Dmax SD(α)=0.3
	z (m)	A1	A2	A3								
Sabbia	18	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	18.5	NO	NR	NR	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	19	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	19.5	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	20	NO	NR	NO	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	20.5	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	21	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	21.5	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	22	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	22.5	NO	NO	NR	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	23	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI

Figura 3. Confronto dei risultati del trattamento di jet grouting, ottenuti nella zona Lato Firenze con l'applicazione del codice di calcolo Megajet e dalle prove in sito.

Per quanto riguarda i terreni argillosi (*Figura 3*), una perfetta compenetrazione delle colonne si ottiene solo per un interasse minore di quello di progetto, una deviazione standard SD(α)=0.1, e un diametro corrispondente alla fascia alta dell'intervallo dei valori del diametro medio.

		LATO FIRENZE											
		PROVE IN SITO			CODICE DI CALCOLO MEGAJET								
		s= 1.2 m			s= 1.2 m Dmin SD(α)=0.1	s= 1.2 m Dmin SD(α)=0.3	s= 1.2 m Dmax SD(α)=0.1	s= 1.2 m Dmax SD(α)=0.3	s= 1 m Dmin SD(α)=0.1	s= 1 m Dmin SD(α)=0.3	s= 1 m Dmax SD(α)=0.1	s= 1 m Dmax SD(α)=0.3
	z (m)	A1	A2	A3								
Sabbia	18	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	18.5	NO	NR	NR	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	19	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	19.5	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	20	NO	NR	NO	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	20.5	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	21	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	21.5	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	22	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	22.5	NO	NO	NR	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	23	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI

Figura 4. Confronto dei risultati del trattamento di jet grouting, ottenuti nella zona Lato Milano con l'applicazione del codice di calcolo Megajet e dalle prove in sito.

Dai risultati ottenuti si può concludere che il codice di calcolo elaborato ben si presta a stimare (una volta tarati quelli che sono i parametri statistici di deviazione standard delle colonne dalla verticale SD(α) e del coefficiente di variazione del diametro CV(D) in funzione del tipo di terreno considerato) l'efficacia del trattamento di consolidamento e impermeabilizzazione di un tampone di fondo eseguito con la tecnica del jet grouting.