

Università Degli Studi Di Napoli Federico II



Scuola Politecnica e delle Scienze di Base

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale

Corso di Laurea Magistrale in

Ingegneria per l'Ambiente ed il Territorio

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

Curriculum: Difesa del suolo

ABSTRACT

IL PROGETTO DEI TAMPONI DI FONDO IN JET GROUTING: MODELLAZIONE PROBABILISTICA DEL TAMPONE DELLA STAZIONE "TRIBUNALE" DELLA LINEA 1 DELLA METROPOLITANA DI NAPOLI

RELATORE

Ch.mo Prof. Alessandro Flora

CORRELATORE

Ing. Filippo Cavuoto

CANDIDATA

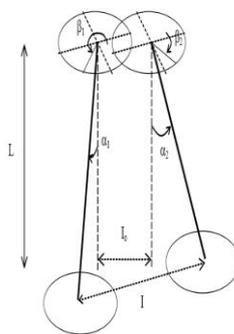
Margherita Saviano

Matricola: M67/289

ANNO ACCADEMICO 2016/2017

Obiettivo del presente lavoro è la modellazione probabilistica del tampone in fase di realizzazione alla stazione “Tribunale” della linea 1 della metropolitana di Napoli. La modellazione probabilistica dell’opera ha avuto lo scopo di effettuare una previsione di classe A, quindi a monte della realizzazione delle opere di presidio agli scavi, delle portate affluenti da fondo scavo, di stimare l’effetto della variabilità statistica dei parametri di progetto delle colonne di Jet Grouting, di valutare la possibilità di ottimizzare il progetto del tampone oggetto di studio ed infine di determinare l’effetto della presenza di materiale non trattato sulla rigidezza del puntone equivalente.

Come ben noto il Jet Grouting è una tecnica di consolidamento dei terreni che consiste nell’iniezione di una miscela acqua cemento che rimaneggia il terreno in sede creando un volume di terreno, di forma cilindrica, che risulta meno permeabile e più resistente. I tamponi di fondo costituiscono un’utile applicazione di tale tecnica di consolidamento per lo scavo in terreni sciolti sotto il livello di falda. Essi sono costituiti da colonne di Jet parzialmente sovrapposte in modo da trattate completamente un volume di terreno e renderlo impermeabile e resistente alla sottospinta.



(Flora et al., 2013)

per terreni a grana fina, E'_n in MJ/m e q_c in MPa

$$D_a = D_{ref} \cdot \left(\frac{\alpha \cdot \Lambda^* \cdot E_{s,u}}{7.5 \cdot 10} \right)^{0.2} \cdot \left(\frac{q_c}{1.5} \right)^{-0.25}$$

per terreni a grana grossa, con E'_n in MJ/m

$$D_a = D_{ref} \cdot \left(\frac{\alpha \cdot \Lambda^* \cdot E_{s,u}}{7.5 \cdot 10} \right)^{0.2} \cdot \left(\frac{N_{SPT}}{10} \right)^{-0.25}$$

Il denominatore è scritto con i seguenti parametri di riferimento:

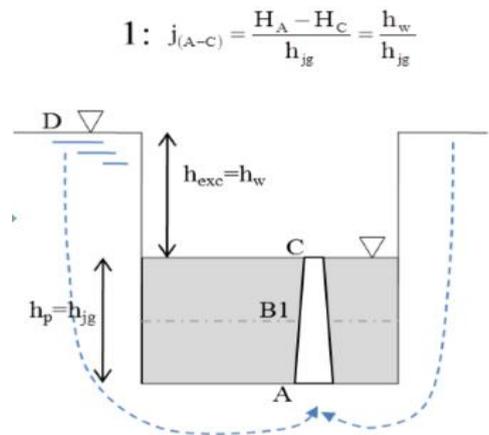
- $\Lambda^*_{ref}=7.5$ per rapporto acqua/cemento pari a 1 (tipico)
- $E_{u,s,ref}=10$ MJ/m valore di energia specifica all’ugello
- $q_{c,ref}=1.5$ MPa, $N_{SPT,ref}=10$

Figura 1

Sperimentalmente è stato osservato che il diametro delle colonne di Jet varia secondo una legge di distribuzione normale, così come l’inclinazione delle colonne sulla verticale, mentre l’azimuth dell’inclinazione è distribuito con legge uniforme. Grazie a formule presenti in letteratura, come quella riportata in figura 1, è possibile prevedere come vari il diametro delle colonne con la profondità, in funzione di risultati di prove CPT o SPT, e dei parametri di iniezione delle colonne che determinano l’energia specifica di trattamento.

La variabilità statistica dei parametri di progetto delle colonne di jet grouting che costituiscono i tamponi di fondo può determinare la presenza di volumi di terreno non trattato che partono dal fondo del tampone ed arrivano alla testa dello stesso determinando una via di accesso di acqua da fondo scavo, come mostrato in figura 2. Se le portate affluenti sono gestibili in cantiere, tramite l’utilizzo di pompe a bassa prevalenza, questo non è necessariamente un problema. Possono risultare vincolanti invece fenomeni di sifonamento, dati gli elevati valori di gradienti idraulici associati ai moti di filtrazione, ed i problemi di cedimenti delle opere adiacenti lo scavo che tali moti di filtrazione causano.

Il software di modellazione probabilistica sviluppato durante il percorso di tesi permette di ottenere risultati utili alla valutazione di tali problemi.



$$I: j_{(A-C)} = \frac{H_A - H_C}{h_{jg}} = \frac{h_w}{h_{jg}}$$

Figura 2

Scritto in linguaggio Matlab il software JetPlug applica la procedura “Montecarlo” alla modellazione dei tamponi di fondo in jet ed è dotato di una interfaccia di Input e OutPut di tipo Excel. All’interno di tale interfaccia bisogna inserire tutti i dati di input necessari all’analisi, che come mostrato di seguito in figura 3, risultano:

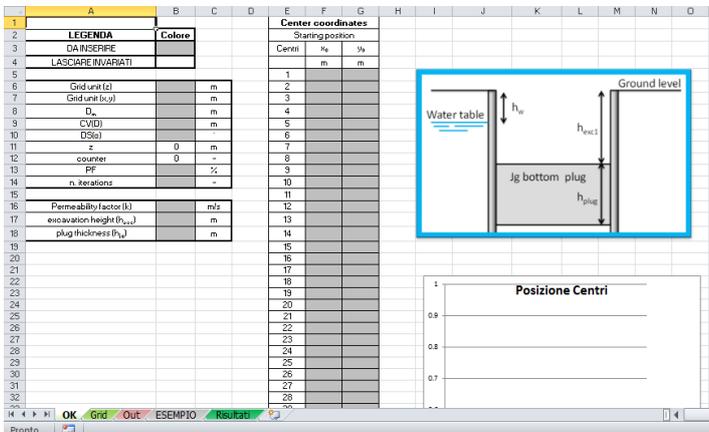


Figura 3

Diametro medio delle colonne di Jet, calcolato con la formula riportata in Fig.1, coefficiente di variazione del diametro medio delle colonne, deviazione standard dell’inclinazione delle colonne. Altezza di scavo, coefficiente di permeabilità del terreno non trattato, altezza del tampone. Infine bisogna inserire la probabilità di insuccesso per la quale si vuole eseguire la stima dei parametri di Interesse e il numero di iterazioni da generare con la procedura Montecarlo a tale scopo.

Bisogna inoltre inserire le coordinate dell’area in pianta del tampone (che può essere di forma qualsiasi) e le coordinate dei centri delle colonne a piano campagna (esportabili da una rappresentazione delle colonne in software di tipo Cad).

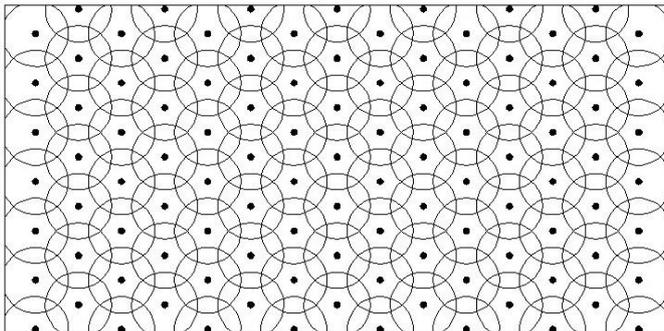


Figura 4

Si individua in questo modo la disposizione delle colonne scelta dal progettista, al piano campagna che, per effetto delle incertezze mostrate, differirà dalla disposizione alla profondità di inizio del tampone.

Quindi bisogna eseguire il codice Matlab, il quale genera un numero di realizzazioni di Diametro, inclinazione α e azimut β delle colonne, pari al numero di iterazioni scelto.

Le realizzazioni dei parametri di interesse sono generate in modo che tali parametri siano distribuiti secondo le distribuzioni osservate in sito. La valutazione dei vuoti viene effettuata attraverso una griglia di controllo che discretizza l’intera area in pianta del tampone di fondo, generando una serie di punti, su ciascuno dei quali viene effettuata una verifica per valutare se il punto rappresenti un punto trattato o non trattato mediante verifica della condizione di appartenenza di un punto ad una circonferenza.

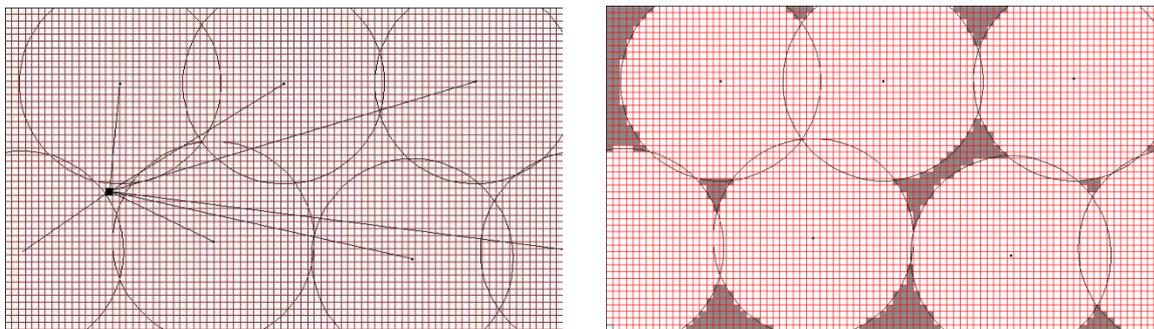


Figura 5

In questo modo viene calcolata l’area dei vuoti presenti alla profondità indagata. Lo stesso calcolo viene eseguito per ogni profondità. Quindi le iterazioni vengono ordinate in senso decrescente rispetto all’area dei

vuoti e viene selezionata l'iterazione che corrisponde alla probabilità di insuccesso ammessa. Grazie all'area dei vuoti viene calcolato infine, per ogni profondità indagata, il volume dei vuoti.

Il codice di calcolo restituisce una rappresentazione della situazione che si presenta alla profondità alla quale si trova la testa del tampone di fondo come mostrato in figura 6.

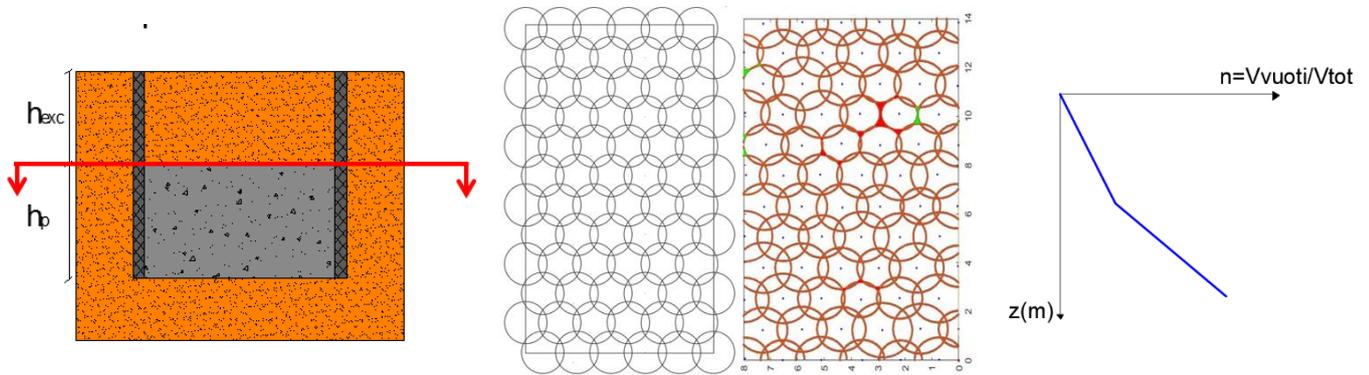


Figura 6

Viene inoltre calcolata la portata affluente da fondo scavo come $Q = K * J * A_{un,Top}$ in cui K è il coefficiente di permeabilità del terreno non trattato, J il gradiente idraulico attraverso il volume non trattato e $A_{un,Top}$ è l'area di vuoti di materiale non trattato presente alla testa del tampone. Viene inoltre restituito l'andamento, sia grafico che numerico, del rapporto tra volume dei vuoti e volume totale del tampone per ogni profondità, utile per effettuare valutazioni circa la rigidità del tampone di fondo.

Per valutare fenomeni di sifonamento locali alla testa del tampone, è stato sviluppato poi un applicativo del programma JetPlug, chiamato VanTol, che consente di ricavare il numero di vuoti aggregati presenti alla testa del tampone verificando una semplice condizione di appartenenza di un punto ad un'area di controllo di cui sono definite le coordinate in pianta come mostrato in figura 7. Questo permette di valutare lo spessore di terreno non trattato da disporre al di sopra del tampone al fine di evitare fenomeni di sifonamento. Tale spessore viene calcolato con la formula di VanTol:

$$h_{s,min} = \frac{dh}{4k \tan \delta} \left(\frac{\gamma_w}{\gamma'} i - 1 \right) \left[1 - e^{-4k \tan \delta \left(\frac{h_j g}{dh} \right)} \right]$$

In cui:

- dh = diametro equivalente dell'area dei vuoti aggregati presenti nelle aree di controllo, calcolata come:

$$dh = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{V, tot, Ai}}{\pi}}$$

- k = coefficiente di spinta del terreno;
- δ = angolo di attrito all'interfaccia terreno trattato/non trattato (che può cautelativamente porsi pari all'angolo di attrito del terreno non trattato);
- i = gradiente idraulico attraverso i vuoti (h_w/h_{jg}) solitamente elevato ma non necessariamente preoccupante;

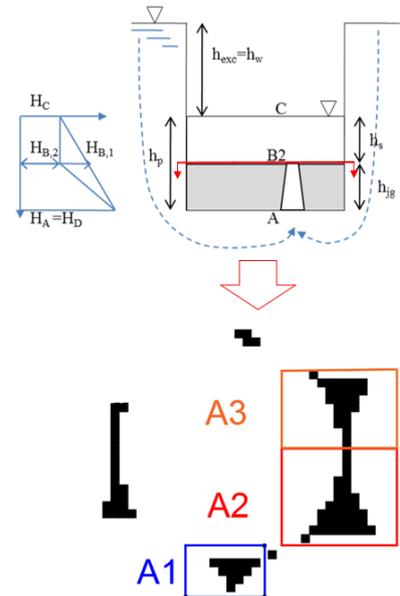


Figura 7

Grazie a tali software sviluppati è stato modellato il tampone della stazione “Tribunale” della linea 1 della metropolitana di Napoli. Il tampone è costituito da colonne di Jet di diametro pari a 1.8m disposte secondo una maglia triangolare equilatera di lato 1.45m. Lo scavo previsto per la realizzazione della stazione è di 7m dal pc e la falda si attesta a 2m da pc. Lo spessore del tampone varia tra i 3 e 4m. Il sottosuolo dell’area di stazione è costituito da terreni di natura piroclastica con un alternanza di strati di ceneri, sabbie e pozzolane del tufo giallo. Per ridurre i tempi di analisi il tampone è stato suddiviso in 8 aree che sono state analizzate singolarmente. Per effettuare una previsione delle portate affluenti sono state implementate 3 tipi di analisi, una considerando come diametro delle colonne quello misurato in sede di campo prova in prossimità del piano campagna (2.2m), una con il diametro di progetto delle colonne (1.8m) ed una con il diametro previsto alla testa del

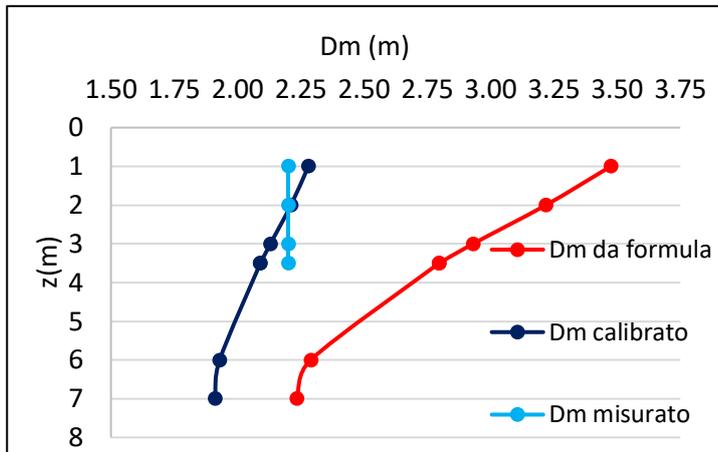


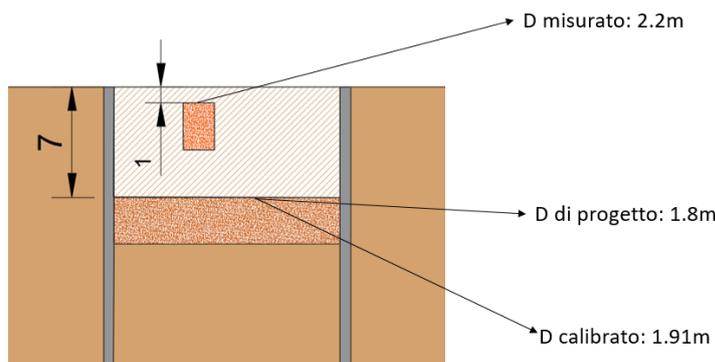
Figura 8

scavo previsto per la realizzazione della stazione è di 7m dal pc e la falda si attesta a 2m da pc. Lo spessore del tampone varia tra i 3 e 4m. Il sottosuolo dell’area di stazione è costituito da terreni di natura piroclastica con un alternanza di strati di ceneri, sabbie e pozzolane del tufo giallo. Per ridurre i tempi di analisi il tampone è stato suddiviso in 8 aree che sono state analizzate singolarmente. Per effettuare una previsione delle portate affluenti sono state implementate 3 tipi di analisi, una considerando come diametro delle colonne quello misurato in sede di campo prova in prossimità del piano campagna (2.2m), una con il diametro di progetto delle colonne (1.8m) ed una con il diametro previsto alla testa del

tampone calcolato con la formula riportata in figura 8, che è stata calibrata rispetto al caso in esame (pari a 1.9m). Come si evince dalla figura infatti la formula originaria tende a sovrastimare molto il diametro delle colonne osservato in sito. Tale diametro è stato infatti misurato solo ad 1 m dal pc, poiché le colonne sono state scoperte solo sopra il livello di falda. Trattandosi di terreni pozzolanici in condizioni di non saturazione la loro resistenza alla erosione tende ad aumentare a causa della coesione apparente che quindi fa diminuire il diametro delle colonne di Jet rispetto a quanto previsto dalla formula originale.

La calibrazione dei coefficienti di tale formula ha consentito di rendere i risultati della formula più vicini a quelli osservati in sito alla testa delle colonne e una previsione più affidabile dei diametri delle colonne alla testa del tampone.

I risultati della modellazione svolta sono riportati di seguito:

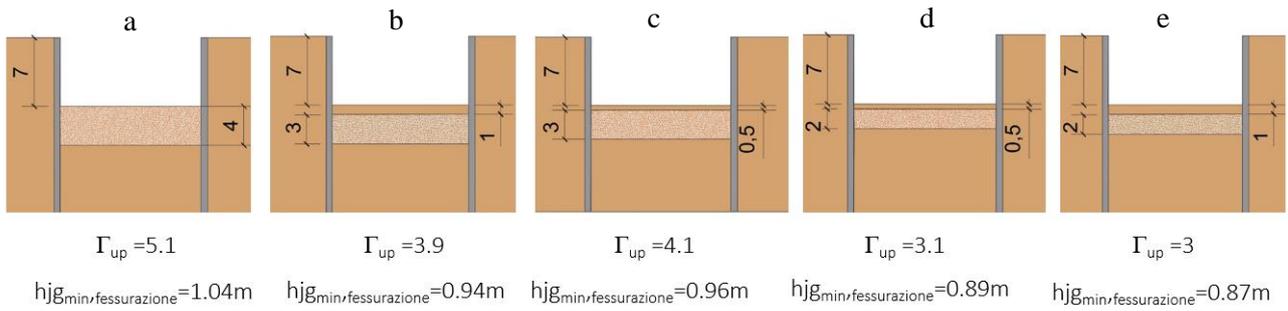


Area totale dei vuoti Interni (m ²)	0
Av,int/Atot (%)	0
h _{min,medio} (cm)	0
Qtot (l/s)	0

Area totale dei vuoti Interni (m ²)	2.655
Av,int/Atot (%)	0.029
h _{min,medio} (cm)	45.29
Qtot (l/s)	0.06969

Area totale dei vuoti Interni (m ²)	1.929
Av,int/Atot (%)	0.021
h _{min,medio} (cm)	32.79
Qtot (l/s)	0.0504

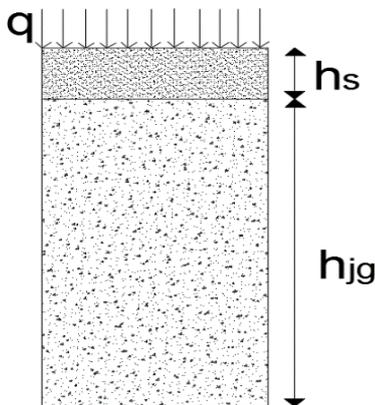
Grazie ai risultati di tale analisi è stato possibile ipotizzare diverse configurazioni ottimizzate del progetto del tampone oggetto di studio. L’ottimizzazione ha avuto lo scopo di ridurre il numero di colonne da realizzare tramite un aumento dell’interasse tra le stesse e di ridurre l’altezza del tampone in Jet, ponendo al di sopra dello stesso uno spessore variabile tra 0.5m e 1m di terreno non trattato, che nella configurazione di progetto del tampone non è previsto. Alcune delle configurazioni ipotizzate per l’ottimizzazione sono riportate di seguito:



Come si può notare nella configurazione a) di progetto, la verifica a sollevamento e quella a fessurazione risultano ampiamente soddisfatte, come accade nelle configurazioni ottimizzate che condurrebbero ad un cospicuo risparmio dei costi di lavorazione dell'opera con portate previste dell'ordine dei pochi dl/s e quindi ampiamente gestibili in cantiere.

Passando infine alle considerazioni sulla rigidità del tampone in jet è noto che il tampone di fondo agisce, nei confronti delle paratie perimetrali, come un puntone, schematizzabile come un letto di molle deformabili, esplicando un effetto benefico di confinamento che varia in funzione della rigidità del materiale trattato con la profondità. Il materiale trattato è infatti costituito da terreno consolidato e vuoti di materiale non trattato il cui volume cresce con la profondità come mostrato in precedenza. È possibile quindi definire una rigidità equivalente del materiale trattato che sia correlata al rapporto tra volume dei vuoti e volume totale fornita da JetPlug.

A tale scopo è stata ricavata una formula analitica basata sulle ipotesi di condizioni di deformazioni unidimensionali e nell'ipotesi, cautelativa, che tutti i vuoti di materiale non trattato siano concentrati in un unico spessore di altezza h_s di volume di materiale trattato.



$$E_{eq} = \left[\frac{\beta E_s^2}{E_s n (\beta - 1) + E_s} \right]$$

$$0 < n < 1$$

$$E_{jg} = \beta E_s \text{ con } \beta > 1$$

Nella formula ricavata n è il rapporto tra Volume dei vuoti e volume totale del tampone calcolato dalle analisi JetPlug, per ogni profondità del tampone. E_s è la rigidità del materiale non trattato e E_{jg} è la rigidità del terreno consolidato.

La formula ricavata è stata utilizzata per stimare la rigidità equivalente del tampone al variare della profondità in funzione dell'indice $n(z)$:

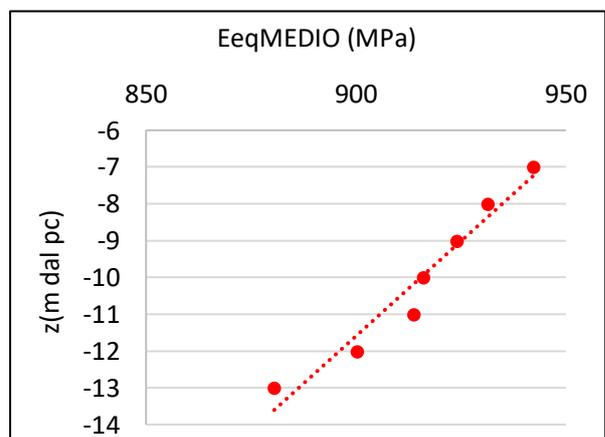
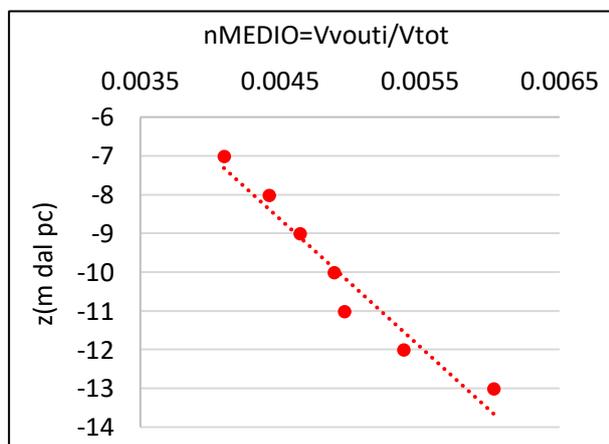


Figura 9

L'espressione mostrata per E_{eq} fornisce però una stima molto cautelativa della rigidezza E_{eq} in quanto nella realtà i vuoti di materiale non trattato sono dispersi in maniera casuale all'interno del volume consolidato. Per questo motivo sono state effettuate analisi in Plaxis in cui è stato creato un modello bidimensionale che simula un volume di terreno consolidato. In tale volume è stata simulata la presenza di vuoti in diverse disposizioni, di dimensioni proporzionali ai valori di indice n osservati dalle analisi effettuate in JetPlug. Tali provini sono stati sottoposti a prove di compressione semplice dai quali sono stati ricavati i valori di rigidezza al variare dell'indice n e abachi adimensionali per la stima di tale rigidezza come mostrato di seguito:

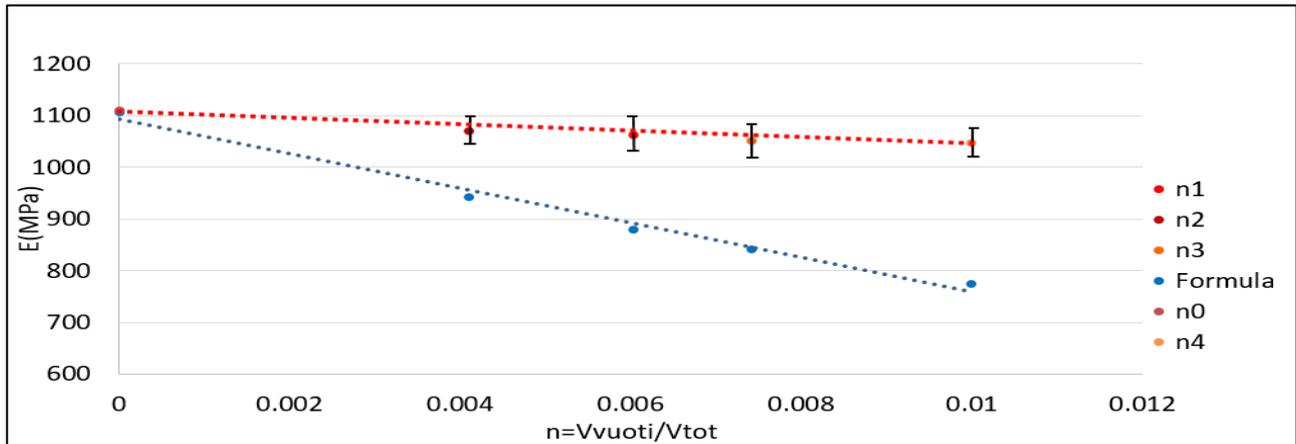


Figura 10

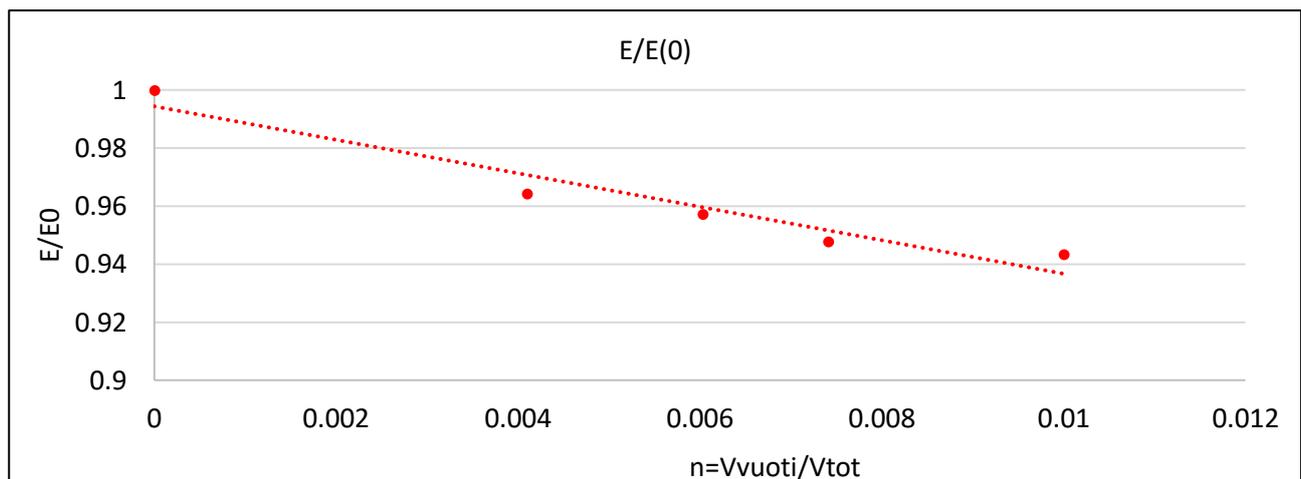


Figura 11

In conclusione si può affermare che il codice di calcolo sviluppato consente al progettista di ricavare:

- Un'area dei vuoti presente alla testa del tampone e quindi una portata affluente all'interno dello scavo;
- Valutazioni circa possibili fenomeni di sifonamento;
- Un volume dei vuoti del tampone al variare della profondità che consente di fornire delle indicazioni sulla rigidezza e resistenza del tampone, grazie alla formula ricavata e agli abachi adimensionali ricavati da un vasto numero di analisi Plaxis;
- Grazie ai risultati forniti dai programmi è possibile ottimizzare il progetto delle opere in Jet Grouting.