

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI “FEDERICO II”



SCUOLA POLITECNICA E DELLE SCIENZE DI BASE

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN

INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E TERRITORIO

(Classe delle Lauree Magistrali in Ingegneria per l'Ambiente e Territorio LM-23)

ELABORATO DI LAUREA

ANALISI NUMERICA DELLO SCAVO DI UNA GALLERIA
SUPERFICIALE IN AMBIENTE URBANO A BUCAREST

RELATORE

Prof. Ing. Alessandro Flora

CO-RELATORE

Prof. Ing. Emilio Bilotta

CANDIDATO

Andrea Mariani

Matr. 67/192

ANNO ACCADEMICO 2015/2016

La crescente domanda connessa allo sviluppo di vie di comunicazione sempre più rapide e ed efficienti ha spinto l'uomo a intraprendere nuovi orizzonti costruttivi che vede nella galleria una sua possibile espressione. L'esecuzione dello scavo, però, richiede un'elevata abilità progettuale che spesso va incontro a problematiche connesse alla realizzazione dello stesso.

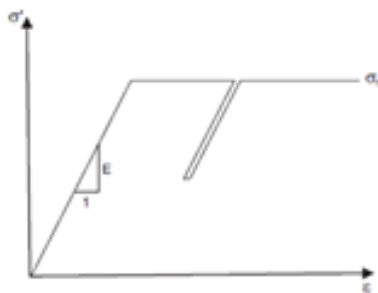
Il nostro lavoro di tesi è incentrato proprio sull'analisi numerica di uno scavo in galleria in ambiente urbano presso la città metropolitana di Bucarest. Il punto di partenza di tale lavoro è rappresentato da uno dei progetti al quale lo studio presso il quale ho svolto l'attività di tirocinio sta attualmente lavorando.

Ciò che si vuole andare a studiare è il comportamento deformativo in prossimità del piano campagna connesso alla realizzazione dello scavo per la realizzazione della Linea 5 della metropolitana di Bucarest.

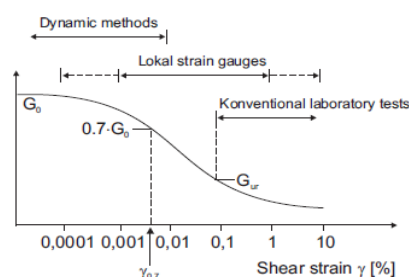
L'iter che è stato seguito ha previsto in primis una calibrazione dei parametri geotecnici sulla base delle indagini di laboratorio, successivamente è stata sviluppata un'analisi numerica con un software ampiamente utilizzato nel campo della geotecnica- PLAXIS- utilizzando due diversi modelli costitutivi del terreno in esame e infine sono stati effettuati dei confronti tra i risultati dei diversi modelli utilizzati.

La condizione a partire dalla quale è stata effettuata la nostra analisi è stata la "Greenfield Condition" ossia il terreno esaminato è stato considerato privo di edifici.

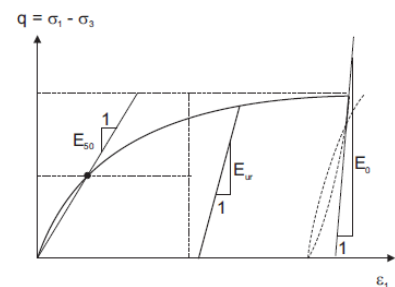
L'analisi numerica ha visto coinvolto invece un software agli elementi finiti con il quale sono stati analizzati due diversi modelli costitutivi del terreno in esame: il modello Mohr-Coulomb e il modello Hardening Soil small strain. Il primo è un modello elastico perfettamente plastico che prevede, nel piano ε - σ un primo ramo di carico lineare e successivamente, raggiunto il valore di snervamento un andamento indefinito delle deformazioni. Tale modello essendo abbastanza semplice ci restituisce una prima visione del comportamento del terreno. Il modello Hardening Soil small strain, invece, ha come punto di partenza un andamento iperbolico nel piano ε_1 - q (deformazione verticale- deviatore). Tale modello è caratterizzato da un comportamento elasto-plastico incrudente il quale riesce a mostrare l'aumento di rigidezza fin dai piccoli livelli di deformazione, come rappresentato nella figura sottostante.



Modello elastico perfettamente



Modello elasto-plastico incrudente

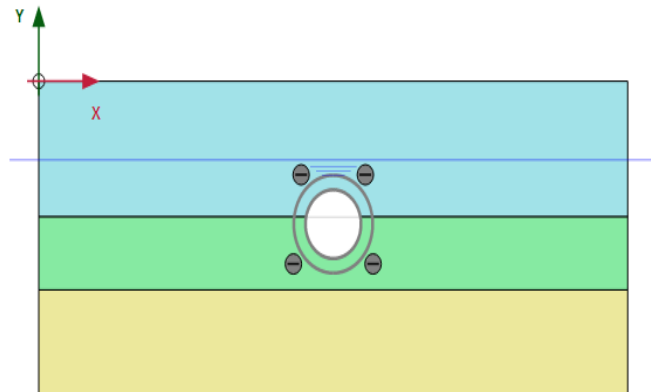


La metodologia di scavo utilizzata prevede una TBM (Tunnel Boring Machine) ossia una fresa a piena sezione che viene utilizzata per uno scavo meccanizzato per gallerie di diametro maggiore ai tre metri e una lunghezza superiore al paio di metri.

SVILUPPO DELL' ANALISI

Ciò che siamo andanti a valutare sono stati gli spostamenti orizzontali e verticali andando ad analizzare una sezione trasversale della suddetta galleria. Per far ciò si è partiti dall' analisi delle prove di laboratorio e delle indagini in sito in base alle quali si è scelto la sezione che era meglio caratterizzata dal punto di vista geotecnico. Grazie a questo si è rappresentato dapprima la stratigrafia- come mostrato in figura- e poi si è eseguita l'analisi parametrica

- 0-13 m: argille
- 13-20 m: sabbia mediamente addensata
- 13- 20 m: sabbia densa
- 7,50 m: falda



ANALISI PARAMETRICA

L' analisi parametrica ha previsto una valutazione dei **parametri di resistenza** quali angolo di attrito ϕ e coesione c' . Per l'argilla sono state sfruttate le prove triassiali C.I.U. e i valori ricavati sono valsi per entrambi i modelli di Mohr- Coulomb e Hardening Soil small strain. Per la sabbia invece si sono sfruttate delle correlazioni che vedevano coinvolte la tensione verticale e il numero di colpi della prova S.P.T. e, successivamente, una volta ricavata la densità relativa, si è valutato l'angolo di attrito relazionando questo al tipo di terreno coinvolto.

Per quanto riguarda i parametri di deformabilità è stata fatta un'analisi considerando i due diversi modelli; sono state eseguite, quindi, due diverse calibrazioni. Per l'Hardening Soil small strain in argilla sono state prese in esame le prove di laboratorio a disposizione e di queste sono state considerati gli indici di compressione, gli indici di rigonfiamento e l'indice dei vuoti iniziali. Di tali valori è stata fatta la media e attraverso la formulazione del software PLAXIS sono stati ricavati i valori dei moduli di deformabilità:

$$E_{oed}^{ref} = 2.3 \frac{(1 + e_0)}{c_c} p_{ref} \quad E_{ur}^{ref} = 2.3 \frac{(1 + e_0) * (1 - \nu) * (1 - 2\nu)}{c_s * (1 - \nu) * k_0} p_{ref} \quad E_{50}^{ref} = 1,25 E_{oed}^{ref}$$

Sempre in argilla il modulo di taglio e il corrispettivo valore di $\gamma_{0.7}$ è stato valutato attraverso l'elaborazione della prova di colonna risonante nonostante avessimo anche la prova di taglio semplice con doppio provino. Quest' ultima, però, non ci dava dei risultati soddisfacenti.

Per la calibrazione dei parametri di deformabilità nel primo strato di sabbia è stata utilizzata la formula di Meyerhof e Fellenius il cui andamento è stato confrontato con quello ricavato dalla formula del software PLAXIS $E_{50} = E_{50}^{ref} * \left(\frac{\sigma'_3}{p_{ref}}\right)^m$

E' stato fatto variare il valore di E50 fino ad ottenere un andamento confrontabile.

Il primo strato di sabbia è stato trattato oltre che con l' Hardening soil small strain anche con il modello di Mohr- Coulomb utilizzando due diverse opzioni. La prima vedeva una coincidenza del modulo di deformabilità con quello calcolato con il modello con l'analisi parametrica precedente (E = Eur) e la seconda opzione prevedeva l'utilizzo del modulo G0 nella formula del modulo edometrico: $E = 2(1+n) G_0$

L' ultimo strato infine è stato con il modello Mohr- Coulomb non essendo direttamente interessato dallo scavo.

Argilla					
g_s	g_{sat}	c'	f'	E'	n'
[KN/m ³]	[KN/m ³]	[KN/m ³]	[KN/m ³]	[KN/m ³]	[-]
19	19	10	26	13000	0,2
Sabbia mediamente addensata					
g_s	g_{sat}	c'	f'	E'	n'
[KN/m ³]	[KN/m ³]	[KN/m ³]	[KN/m ³]	[KN/m ³]	[-]
19	19	0,2	35	55000	0,2
Sabbia densa					
g_s	g_{sat}	c'	f'	E'	n'
[KN/m ³]	[KN/m ³]	[KN/m ³]	[KN/m ³]	[KN/m ³]	[-]
20	20	0,2	37	43000	0,2

Argilla								
g_s	g_{sat}	c'	f'	E_{50}	E_{oed}	Eur	G_0	$g_{0,7}$
[KN/m ³]	[KN/m ³]	[KN/m ³]	[-]	[KN/m ³]	[KN/m ³]	[KN/m ³]	[KN/m ³]	[-]
19	19	10	26	2486	1989	13000	43000	0,0003
Sabbia mediamente addensata								
g_s	g_{sat}	c'	f'	E_{50}	E_{oed}	Eur	G_0	$g_{0,7}$
[KN/m ³]	[KN/m ³]	[KN/m ³]	[-]	[KN/m ³]	[KN/m ³]	[KN/m ³]	[KN/m ³]	[-]
20	20	0,2	35	55000	55000	165000	143000	0,021

Table riassuntive dei parametri utilizzati con i due modelli costitutivi

ANALISI NUMERICA

In base all' analisi parametrica prima effettuata abbiamo analizzato tre diverse combinazioni:

Combinazione A:

Combinazione B:

Combinazione C:

Argilla: Hardenin Soil small strain

Mohr-Coulomb (Opzione 1)

Mohr-Coulomb (Opzione 2)

Sabbia 1: Hardening Soil small strain

Mohr-Coulomb (Opzione 1)

Mohr-Coulomb (Opzione 2)

Sabbia 2: Mohr Coulomb

Mohr-Coulomb

Mohr- Coulomb

Si sono andati a valutare gli spostamenti verticali Uy, gli spostamenti orizzontali Ux, gli spostamenti verticali ad una distanza pari ad un diametro dall' asse della galleria e gli spostamenti orizzontali ad una distanza pari ad un diametro dall' asse della galleria e per fare ciò si sono simulate le diverse fasi che hanno portato alla

realizzazione finale della galleria. Nella prima fase si è simulata la variazione di tensione efficace dovuta allo scavo, nella fase 2 (Contrazione) si è simulato l'extra-scavo dovuto alla conicità dello scudo utilizzando due diversi valori di coefficiente di contrazione ($C= 0,5\%$ e $C= 1\%$), nella terza fase si è simulato la pressione esercitata dal grouting per colmare il gap che si viene a creare alla coda della TBM tra il rivestimento e il terreno e infine nella fase 4 si è attivato il rivestimento esterno.

CONCLUSIONI

Dopo un'attenta analisi dei risultati delle varie prove effettuate con il software PLAXIS e dopo averle confrontate con i risultati delle prove di laboratorio è risultato che i **modelli** implementati nel software PLAXIS sono in grado di simulare ragionevolmente i risultati di laboratorio. Una buona base sperimentale consente quindi di calibrare in modo affidabile i parametri dei modelli costitutivi. Chiaramente, il modello più complesso rappresenta in modo più realistico il comportamento del terreno, non lineare e non reversibile sin dai piccoli livelli di deformazione.

Le **analisi numeriche** hanno mostrato che entrambi i modelli utilizzati colgono gli effetti deformativi al piano campagna. Tuttavia, il semplice modello Mohr-Coulomb sottostima gli spostamenti verticali, cosa a svantaggio di sicurezza.

Analogo discorso può essere fatto per gli **spostamenti orizzontali** rispetto ai quali, però, allontanandoci dalla verticale questi risultano essere più del doppio.

Dall'analisi ad una **distanza pari al diametro** dal confronto dei Δ delle varie fasi si nota come il modello di Mohr-Coulomb abbia un andamento molto variabile, a causa della sua incapacità di tenere conto della storia tensionale esperita dal terreno. Tale limite del modello si riduce se la calibrazione della rigidità viene fatta sul modulo a piccoli livelli di deformazione.

Sia il modello semplice che quello più complesso sono quindi in grado di fornire informazioni utili sugli effetti dello scavo della galleria. Tuttavia, il modello più semplice può essere insoddisfacente e a svantaggio di sicurezza se non calibrato con grande accuratezza. Il suo uso quindi richiede maturità ed esperienza (l'arte dell'ingegnere). Il modello più sofisticato è più soddisfacente, ma ha bisogno di una maggiore e più raffinata quantità di dati per essere calibrato in modo soddisfacente.