POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Civile

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

Sperimentazione in laboratorio e simulazione numerica del comportamento rigonfiante attorno ad una galleria



Relatori

Prof. Marco Barla Ing. Fabrizio Zacco

Candidata

Isabella Marquez Ramos

Ottobre 2018

Sommario

Il rigonfiamento nelle gallerie, è un fenomeno meccanico e fisico-chimico che si presenta in terreni con certi minerali come per esempio l'argilla e i solfati, che al contatto con l'acqua si rigonfiano. Durante lo scavo e eventuale rilascio tensionale delle gallerie si producono due tipi di deformazioni, immediata e tempo dipendenti. La deformazione immediata risulta di una risposta non drenata del terreno durante la fase di scavo, producendo un eccesso di pressione interstiziale negativa che con il tempo si dissipa originando così l'espansione, aumento di volume del terreno e incremento delle pressioni indotte nelle strutture di sostegno.

Per caratterizzare questo fenomeno, sia qualitativamente e quantitativamente, esistono certi procedure descritte e realizzati in questo elaborato. Per identificare il rigonfiamento, per esempio, si descrive come si individua la composizione mineralogica di un terreno, che dipendendo del contenuto di minerali di carbono o argilla, si classifica il suo potenziale al rigonfiamento. Invece, per quantificarlo, si hanno realizzato due prove di laboratorio, una prova edometrica e una prova triassiale di rigonfiamento HPTA, prove che permettono di ricavare un coefficiente di rigonfiamento e l'andamento delle deformazioni con la variazione della pressione interstiziale rispettivamente. Per fare ciò, due approcci analitici per descrivere il rigonfiamento sono stati testati in questi prove (Metodo di Wittke e di Barla).

Il creep, fenomeno dipendente dal tempo, è stato anche caratterizzato mediante tre prove triassiale effettuati sul terreno in studio.

La prova edometrica realizzata, seguendo la metodologia di Huder & Amberg, ha permesso di ricavare il coefficiente di rigonfiamento k del terreno, caricando il provino in forma graduale e in condizione asciutta fino ad arrivare al valore delle tensioni geostatiche, dopo di che si ha iniziato con la fase di rigonfiamento, aggiungendo acqua sul campione e scaricando man mano il provino, aspettando in ogni caso che le deformazioni assiali si siano equilibrati. Dalla relazione sviluppata da Wittke e i risultati

dei test, si ha ottenuto il coefficiente k di rigonfiamento come la pendenza della curva delle deformazioni contro il logaritmo delle tensioni.

La prova triassiale HPTA ha permesso di valutare l'incremento della pressione interstiziale e la deformazione volumetrica. Quindi, nella prova triassiale HPTA si hanno eseguito i seguenti passaggi, Flushing per la saturazione dei collegamenti nel sistema, Saturazione dove si aspettavano valori di B di Skempton maggiori a 0.95, Consolidazione dove si applicano le tensioni iniziali in sito sul provino, Taglio o Fase non drenata dove si carica il terreno ad un 70% del carico di rottura mantenendo costante la tensione media s e si ricava l'incremento della pressione interstiziale. E finalmente la fase di Rigonfiamento drenata dove si lascia rigonfiare/consolidare il provino fino che le deformazioni siano costanti, ricavando cosi la deformazione finale per rigonfiamento/consolidazione.

Infine, si hanno fatto 3 prove triassiale di creep, iniziando con una fase di consolidazione, poi si ha caricato il provino ad un 50% del carico di rottura mantenendo costante la tensione assiale e, fino a che si hanno raggiunto deformazioni assiali e radiali costanti, si ha caricato ad un 70% del carico di rottura, sempre con le tensioni assiali costanti. Fine prova si ha ottenuto l'andamento delle deformazioni nel tempo osservando le variazioni di velocità di deformazione.

Finalmente dai risultati delle prove sperimentali è stato possibile simulare numericamente il fenomeno di rigonfiamento in una galleria con il metodo di Wittke a partire della costruzione di un modello con il codice di calcolo FLAC2D (Fast Lagrange Analysis of Continua). Il modello sviluppato è quello di una galleria profonda, valutando diversi fasi costruttive fino ad arrivare alla fase di rigonfiamento. Nella prima fase le condizioni iniziali, prima della scavazione del cavo, sono state studiate applicando le tensioni iniziali, le proprietà del materiale e le condizioni al contorno. Dopo di che, si ha iniziato la fase di scavo della galleria fino ad un rilascio tensionale del 40%, momento in cui si installa il rivestimento. Installato il rivestimento si ha scaricato il 100% delle tensioni sul contorno della galleria e si ha iniziato con la fase di rigonfiamento, per fare ciò si ha realizzato una Fish function che permette di simulare il rigonfiamento eseguendo la metodologia di Wittke. Le deformazioni raggiunte e l'incremento delle tensioni e le sollecitazioni sul rivestimento sono oggetto di studio.

Indice

Capitolo	1 Introduzione	1
1.1.	Generalità	1
1.2.	Descrizione del problema	2
1.3.	Obiettivi della tesi	2
1.4.	Struttura generale della tesi	3
Capitolo	2 Rigonfiamento, caratteristiche e generalità	5
2.1.	Comportamento rigonfiante	5
2.1.	1. Rigonfiamento nei materiali argillosi	6
2.1.	2. Rigonfiamento nei materiali con Anidrite	6
2.2.	Deformazioni tempo dipendente	7
2.2.	1. Deformazione di creep	7
2.2.	2. Deformazione di rigonfiamento	9
2.3.	Prove per l'identificazione e quantificazione del rigonfiamento	10
2.3.	1. Prove per l'identificazione del rigonfiamento	10
2.3.	2. Quantificazione del rigonfiamento	12
2.3.	3. Prova triassiale di rigonfiamento	18
2.4.	Progettazione di una galleria soggetta a rigonfiamento	19
2.4.	1. Approccio empirico	20
2.4.	2. Approccio analitico	21
2.5.	Interventi	26
Capitolo	3 Sperimentazione di laboratorio	31
3.1.	Prova edometrica	32
3.1.	1. Attrezzatura	32
3.1.	2. Impostazione campione	33
3.1.	3. Fase di carico	36
3.1.	4. Fase di scarico	41
3.1.	5. Interpretazione delle prove e determinazione del coefficiente k di rigonfiamento	42
3.2.	Prova triassiale HPTA	45
3.2.	2. Montaggio prova HPTA	49
3.2.	3. Impostazione	51
3.2.	4. Flushing	55
3.2.	5. Saturazione	56
3.2.	6. Consolidazione	58
3.2.	7. Taglio	60

3.2.	8. Rigonfiamento	64
3.3.	Prova di creep in cella triassiale	67
3.3.	1. Consolidazione	68
3.3.2	2. Fase di carico	69
3.3.	3. Interpretazione dei risultati	73
Capitolo	4 Simulazione numerica del problema rigonfiante	77
4.1.	Codice di calcolo FLAC2D	77
4.2.	Caratteristiche della galleria modellata	78
4.2.	1. Geometria	79
4.2.2	2. Proprietà del terreno	79
4.2.	3. Sequenza di costruzione	80
4.3.	Realizzazione del modello su FLAC2D	81
4.3.	1. Impostazione della geometria	81
4.3.2	2. Generazione della mesh	82
4.3.	3. Condizioni al contorno	83
4.4.	Fasi di calcolo	84
4.4.	1. Fase 1: Condizioni iniziali geostatiche	85
4.4.2	2. Fase 2: Rilascio tensionale dovuto allo scavo della galleria	87
4.4.	3. Fase 3: Installazione del rivestimento	90
4.4.4	4. Fase 4: Rigonfiamento	92
4.5.	Interpretazione dei risultati	97
Capitolo	5 Conclusioni	103
Riferime	nti bibliografici	105
Allegati.		107
Allega	to 1: Calcolo delle tensioni al 50% e 70% del carico di rottura	107
Allega	to 2: Codice di calcolo FLAC 2D	109
Allega	to 3: Funzioni di FISH	114
Fish	1: Find mark points	114
Fish 2: Relax factor		
Fish	3: Swelling zones	115
Fish	4: Rigonfiamento	116

Indice tabelle

Tabella 1. Campioni e prove di laboratorio effettuate	
Tabella 2. Caratteristiche provini prova edometrica	
Tabella 3. Tensione geostatica iniziale	
Tabella 4. Fase di carico	
Tabella 5. Deformazione di rigonfiamento, prova Ed_262_AV	
Tabella 6. Deformazione di rigonfiamento, prova Ed_263_AV	
Tabella 7. Coefficiente k	
Tabella 8. Caratteristiche provino	52
Tabella 9. Tensioni applicati fase di Flushing	55
Tabella 10. Tensioni applicati per il recupero delle deformazioni	55
Tabella 11. Stage di saturazione	57
Tabella 12. Valori raggiunti di tensioni e deformazioni a fine Consolidazione	60
Tabella 13. Tensioni di rottura	61
Tabella 14. Valori raggiunti di tensioni e deformazioni fine Taglio	
Tabella 15. Tensioni costanti durante la fase di rigonfiamento	65
Tabella 16. Valori riferimento fase di rigonfiamento	67
Tabella 17. Prova di creep caratteristiche campioni	67
Tabella 18. Tensioni applicati per raggiungere il 50% del carico di rottura	
Tabella 19. Tensioni applicati per raggiungere il 70% del carico di rottura	
Tabella 20. Caratteristiche meccaniche del terreno	80
Tabella 21. Caratteristiche del rivestimento	80
Tabella 22. Fasi di calcolo	85
Tabella 23. Spostamenti nella fase 2 di calcolo	
Tabella 24. Sollecitazioni nel rivestimento Fase 3 di calcolo	
Tabella 25. Sollecitazioni nel rivestimento Fase 4 di calcolo	
Tabella 26. Percentuale di incremento delle sollecitazioni nell'arco rovescio	
Tabella 27. Spostamenti dovuti al rigonfiamento	
Tabella 28. Risultati andamento tensionale prove triassiale	
Tabella 29. Tensioni nel piano σ 1- σ 3	107
Tabella 30. Tensioni al 50% del carico di rottura	109
Tabella 31. Tensioni al 70% del carico di rottura	109

Indice figure

Figura 1. Fasi di creep. (Mater et al., 2011)
Figura 2. Esempio di diffrattogramma. (Barresi et al., 2003) 11
Figura 3. Diagramma del potenziale di rigonfiamento, esempio presso dall'argilla di Caneva. (Barla,
2008)
Figura 4. Evoluzione della deformazione del campione dovuta al rigonfiamento (Wittke e Ribler,
1976)
Figura 5. Apparecchiatura per la misura della tensione assiale di rigonfiamento (ISRM, 1983)15
Figura 6. Risultati ottenuti fino prova (ISRM, 1983)15
Figura 7. Apparecchiatura per la misura della deformazione di rigonfiamento(ISRM, 1983)16
Figura 8. Diagramma della tensione assiale in funzione della deformazione assiale(ISRM, 1983) 17
Figura 9. Apparecchiatura per la misura della tensione assiale di rigonfiamento(ISRM, 1983)17
Figura 10. Apparecchiatura triassiale per rocce tenere (Barla, 1999)
Figura 11. Zone di rigonfiamento con Ko=1.(M Barla, 1999)
Figura 12. Relazione tra ε_{vol} - $\Delta \mu$ determinata dai risultati esperimentali nella Argilla di Caneva (Barla,
2018)
Figura 13. Sezione e profilo geologico della galleria di Belchen ed interventi (Butscher et al., 2017) 26
Figura 14. Sezione di una galleria con i diversi interventi (De Moya, de Ágreda, Morales, & Solé,
2009)
Figura 15. Disegno di rivestimenti in terreni rigonfianti. (a) Rivestimento flessibile; (b) Sistema
combinato con rivestimento flessibile; (c) Rivestimento rigido (Rodríguez Ortiz & Jurado, 2011) 28
Figura 16. Rivestimenti flessibili (Anagnostou & Cantieni, 2007)
Figura 17. Interazione fra il rivestimento e il terreno. (a) Galleria profonda; (b) Galleria superficiale.
(Rodríguez Ortiz & Jurado, 2011)
Figura 18. Sistema modulari flessibile, galleria di Chienberg. (Kovari & Chiaverio, 2007) 30
Figura 19. Attrezzatura prova edometrica
Figura 20. Condizioni iniziali del campione PE_S02_C15 e dati di prelievo
Figura 21. Campione indisturbato PE_S02_C15
Figura 22. Realizzazione del provino e risultato
Figura 23. Carta da filtro
Figura 24. Posizionamento del provino nella cella di consolidazione
Figura 25. Posizionamento del provino nell'apparecchiatura della prova edometrica
Figura 26. Fase di carico, variazione delle deformazioni e delle tensioni, prova Ed_262_AV37
Figura 27. Fase di carico, variazione delle deformazioni e delle tensioni, prova Ed_263_AV
Figura 28. Deformazione assiale in funzione delle tensioni applicati, prova Ed_262_AV
Figura 29. Deformazione assiale in funzione delle tensioni applicati, prova Ed_263_AV39
Figura 30. Aggiunta di acqua nella cella di consolidazione
Figura 31. Deformazione verticale dopo l'aggiunta di acqua, prova Ed_262_AV 40
Figura 32. Deformazione verticale dopo l'aggiunta di acqua, prova Ed_263_AV 40
Figura 33. Fase di scarico, variazioni delle deformazioni e delle tensioni in funzione del tempo, prova
Ed_262_AV
Figura 34. Fase di scarico, variazioni delle deformazioni e delle tensioni in funzione del tempo, prova
Ed_263_AV
Figura 35. Deformazione per rigonfiamento in funzione delle tensioni, prova Ed_262_AV 43
Figura 36. Deformazione per rigonfiamento in funzione delle tensioni, prova Ed_263_AV 44
Figura 37. Parametro k di rigonfiamento, prova Ed_262_AV 44

Figura 38.	Parametro k di rigonfiamento, prova Ed_263_AV	45
Figura 39.	Cella triassiale (Barla et al., 2010)	46
Figura 40.	Connessioni nella base della cella triassiale(Barla et al., 2010)	47
Figura 41.	Sistema idraulico per la back pressure e la pressione in cella, panello di controllo e serba	toi
di olio ed a	acqua	48
Figura 42.	Serbatoio acqua e olio	49
Figura 43.	Polmone	50
Figura 44.	Panello di controllo	50
Figura 45.	Micrometro per la calibrazione dei trasduttori	51
Figura 46.	Schermata del software	51
Figura 47.	Campione PE_S02_C13	52
Figura 48.	Preparazione del provino	53
Figura 49.	Membrana	53
Figura 50.	Posizionamento nella cella triassiale	54
Figura 51.	Cella triassiale	54
Figura 52.	Variazione del parametro B di Skempton	57
Figura 53.	Deformazioni radiali e assiali nel tempo, fase di consolidazione	59
Figura 54.	Tensioni raggiunti durante la fase di consolidazione	59
Figura 55.	Tensione assiale in funzione degli spostamenti assiali, prova TX 1	60
Figura 56.	Tensione radiale in funzione degli spostamenti radiali, prova TX 1.	61
Figura 57.	Andamento tensionale raggiunto durante fase di Taglio	62
Figura 58.	Variazione delle deformazioni durante la fase di Taglio	63
Figura 59.	Variazione delle deformazioni nel tempo	64
Figura 60.	Andamento delle deformazioni nel tempo	65
Figura 61.	Deformazione volumetrica nel tempo	66
Figura 62.	Variazione della pressione interstiziale nel tempo	66
Figura 63.	Impostazione del provino nella cella triassiale	68
Figura 64.	Variazione delle tensioni e deformazioni nel tempo, fase di consolidazione, TX 3 Creep	69
Figura 65.	Variazione delle tensioni e deformazioni nel tempo, fase di consolidazione. TX 4 Creep	69
Figura 66.	Variazione delle tensioni nel tempo al 50% carico rottura. TX 3 Creep	71
Figura 67.	Variazione delle tensioni nel tempo al 50% carico rottura. TX 4 Creep	71
Figura 68.	Variazione delle tensioni nel tempo al 70% carico rottura. TX_3 Creep	72
Figura 69.	Variazione delle tensioni nel tempo al 70% carico rottura. TX 4 Creep	72
Figura 70.	Variazione delle deformazioni assiali nel tempo	73
Figura 71.	Variazione delle deformazioni radiali nel tempo	73
Figura 72.	Variazione delle deformazioni volumetriche nel tempo	74
Figura 73.	Diagramma tensioni-deformazioni fase di carico. TX 3 Creep	75
Figura 74	Diagramma tensioni-deformazioni fase di carico, Tx 4 Creen	75
Figura 75	Andamento modulo elastico TX 3 Creen	76
Figura 76	Andamento modulo elástico, TX_4 Creen	76
Figura 77	Ciclo di calcolo esplicito effettuato dal codice FLAC 2D (Damping 2015)	78
Figura 78	Geometria della galleria. Dimensioni in [m]	79
Figura 70	Modello della galleria su FLAC2D	82
Figura 80	Griglia nel contorno del cavo	82
Figura 81	Dominio di calcolo	82
Figura 87	Condizioni al contorno	84
Figura 82	Pronrietà del terreno	85
Figura 81	Applicazione delle tensioni iniziali in direzione v	86
1 iguia 04.	True for the constraint in the constraint of t	90

Figura 85. Tensioni in y	
Figura 86. Tensioni in x	
Figura 87. Deformata del cavo dopo un rilascio del 40% delle tensioni	
Figura 88. Deformazione in y dopo il rilascio tensionale del 40%	89
Figura 89. Deformazione in x dopo il rilascio tensionale del 40%	89
Figura 90. Tensioni totali in y	
Figura 91. Tensioni totali in x	
Figura 92. Pressione interstiziale fine scavo	
Figura 93. Zone di rigonfiamento individuati con il metodo di Wittke	
Figura 94. Tensioni in y per rigonfiamento	
Figura 95. Tensioni in x per rigonfiamento	
Figura 96. Spostamenti in y per rigonfiamento	
Figura 97. Spostamenti in x per rigonfiamento	
Figura 98. Deformazione del cavo per rigonfiamento	
Figura 99. Andamento vettori di spostamenti	
Figura 100. Sezioni di calcolo delle sollecitazioni e deformazioni	
Figura 101. Verifica resistenza, sezione 1	
Figura 102. Verifica resistenza sezione 2	
Figura 103. Verifica resistenza, sezione 3	
Figura 104. Criterio di rottura	

Capitolo 1 Introduzione

1.1. Generalità

Lo scavo di gallerie produce una variazione dell'equilibrio fisico-chimico dei materiali attraversati, condizioni che portano ad importanti cambi nella geometria (rigonfiamento) e proprietà meccaniche (diminuzione della resistenza) del terreno. La composizione dei terreni, condizioni di temperatura e stato tensionale attorno alla galleria controllano la variazione dei minerali presenti nei terreni, sviluppando fenomeni complessi e processi di deformazioni che variano nel tempo, difficoltando la osservazione sperimentale di questi in fase di progetto. Definire le deformazioni e pressioni che si sviluppano attorno ad una galleria dovute al rigonfiamento è un compito difficile, i modelli che descrivono il rigonfiamento non sono sufficiente a volte per definire una intervenzione strutturale del problema oppure strutture flessibile che si adattano al fenomeno.

Il rigonfiamento, aumento del volume di un terreno per l'asserzione d'acqua, è un problema geotecnico presente in vari gallerie di Europa scavati in materiali suscettibile al rigonfiamento, per esempio nella galleria ferroviaria di Upper Hauenstein costruita più di 150 anni fa in Svizzera che unisce le città di Basel e Olten, si ha osservato la chiusura progressiva del cavo dovuta all'innalzamento dell'arco rovescio e dei piedritti producendo sollevamento di 11mm per anno. La galleria di San Donato in Italia è un altro caso di studio dove la composizione mineralogica del materiale scavato e l'eccesso di pressione interstiziale hanno influenzato il rigonfiamento del terreno.

Esiste una necessità di studiare e comprendere il rigonfiamento di maniera integrale per fare fronte ai problemi a lunghi periodi di tempo che si presentano nelle gallerie in materiali suscettibili a questo

fenomeno in studio. La quantificazione del rigonfiamento e le pressioni che sviluppa attorno ad una galleria sono oggetto di studio in questo elaborato.

1.2. Descrizione del problema

I processi tempo dipendenti come il rigonfiamento e il creep sono spesso correlati e gli effetti individuali sono difficili da distinguere. Il rigonfiamento produce deformazioni tempo dipendenti che sono una combinazione di processi fisico-chimiche e presenza di acqua e rilascio tensionale, il creep causa deformazioni di squeezing caratterizzato da movimenti del terreno tempo dipendenti e aumento delle pressioni durante lunghi periodi di tempo.

I meccanismi di rigonfiamento dipendono del tipo di minerali contenuti nel terreno, dove l'incremento del volume è dovuto ad una reazione fisico chimica del terreno con l'acqua. Si possono distinguere meccanismi di rigonfiamento in terreni argillosi o con anidrite. Ma è anche influenzato dai processi di scavazioni, le fasi costruttive, la geometria della galleria e gli elementi di sostegno scelti.

Il disegno e costruzione di gallerie in queste condizioni stanno legati ad una sovrastima delle pressioni di rigonfiamento in prove di laboratorio e il mal intendimento del fenomeno, fattori che affettano l'efficienza economica del progetto.

1.3. Obiettivi della tesi

Caratterizzare e modellare il rigonfiamento attorno ad una galleria per valutare l'idoneità della sezione del rivestimento scelto sono gli scopi di questa tesi, studiare il comportamento rigonfiante, definire le diverse prove per la sua caratterizzazione e fare una simulazione numerica del rigonfiamento attorno ad una galleria sono valutati. Dal punto di vista sperimentale si sono realizzati vari prove per ricavare parametri e descrivere il comportamento rigonfiante di un terreno, in totale si hanno realizzato due prove edometriche seguendo la metodologia di Huder & Amberg e una prova triassiale HPTA di rigonfiamento, in addizione il fenomeno di creep, è stato studiato da prove triassiale per definire l'andamento delle deformazioni differite nel tempo del materiale in studio.

Conoscendo le caratteristiche rigonfianti del terreno studiato dalle prove effettuati, si ha realizzato una simulazione numerica di una galleria (utilizzo del software FLAC2D) per analizzare le deformazioni e pressioni prodotti dal rigonfiamento sul rivestimento, questo con il coefficiente di rigonfiamento (k) ricavato dalla prova edometrica seguendo il metodo di Wittke.

1.4. Struttura generale della tesi

La tesi è divisa in 5 capitoli, il presente capitolo è una introduzione generale sui diversi temi sviluppati nella tesi e una presentazione di ciò che si è fatto ai fini degli obiettivi.

Il Capitolo 2 è un capitolo bibliografico dove la definizione di concetti necessari all'intendimento sono state fatte e anche la descrizione della prova edometrica e triassiale in terreni rigonfianti.

Il Capitolo 3 ha come scopo evidenziare l'attrezzatura e metodologia utilizzata nella sperimentazione di laboratorio realizzata e i risultati ottenuti di questi, oltre all'interpretazione dei risultati.

Il Capitolo 4 presenta la simulazione numerica della galleria con i parametri ricavati dalla fase sperimentale, utilizzando il software FLAC2D.

Il Capitolo 5 sono le conclusioni sull'elaborato e finalmente si presentano gli allegati con i dati delle prove e il codice di calco utilizzato per la simulazione numerica.

Capitolo 2 Rigonfiamento, caratteristiche e generalità

2.1. Comportamento rigonfiante

Il rigonfiamento nelle gallerie è una reazione fisico-chimica dovuta alla presenza di acqua e al rilascio tensionale dovuto allo scavo. Il rigonfiamento si caratterizza da una espansione, aumento di volume del terreno, il cui non recupera la sua condizioni iniziale dopo gli interventi, il terreno rimane umido e rigonfiante.

Si deve fare una distinzione fra il rigonfiamento di tipo meccanico e quello di tipo fisico-chimico. Il rigonfiamento meccanico si riferisce alla dissipazione dell' eccesso di pressione interstiziale negativa nelle argille, argille limose e limi argillose, mentre il rigonfiamento fisico-chimico come si ha detto prima è una reazione la cui si produce al contatto di certi minerali nel terreno/rocce con l'acqua (Barla, 1999).

Il potenziale rigonfiamento di un terreno si può evidenziare in sito quando ha un aspetto morbido e tenere, anche quando il terreno superficiale è molto appiccicoso quando bagnato. Principalmente sono i terreni con certa percentuale di minerali di argilla, minerali di solfati (anidrite) o per la presenza di pirite/marcasite suscettibile al rigonfiamento, fenomeno che si riporta principalmente nell'arco rovescio delle gallerie.

2.1.1. Rigonfiamento nei materiali argillosi

L'argilla ha la capacità di assorbire grandi quantità di acqua dovuta all'esistenza di un'attrazione tra l'acqua e alcuni minerali presenti nell'argilla, portando a una variazione nella sua composizione e caratteristiche. I minerali più comuni sono la caolinite, clorite, ilite e montmorillonite (smectici), i quali formano cristalli molto piccoli ($<4\mu$ m) e hanno una certa capacità di scambio ionico che dipende della soluzione che circola nel suolo. Questi tipi di minerali hanno un'alta reattività (dall'elevata carica superficiale), per esempio, le smectici hanno una superficie specifica elevata (700 a 800m2/g) e un debole legame interstrato lo quale produce che le soluzioni nel suolo possano penetrare all'interno. Dipendendo quindi del tipo di minerale argilloso e la sua percentuale, variano le proprietà del terreno, la montmorillonite ha un'elevata plasticità e un'alta capacità di adsorbire acqua aumentando così di volume, avendo quindi una tendenza elevata al rigonfiamento.

Si identificano tre meccanismi che producono il rigonfiamento, il primo è interparticellare, l'argilla ad avere una forma piatta (2D), le particelle di acqua si incorporano fra queste particelle piatte producendo così il rigonfiamento, lo stato tensionale applicato produce un cambiamento nella distanza tra diversi strati argillosi variando così l'assorbimento dell'acqua. Il principale minerale presente nell'argilla chi causa questo fenomeno è la montmorillonite (ad esempio un campione di solo montmorillonite può gonfiarsi 15 volte il suo volume normale) (Colorado School of Mines, n.d.).

Un altro meccanismo è l'osmotico, dove l'acqua è assorbita sulla superficie esteriore delle particelle di argille, fenomeno che si può fare tornare indietro con calore oppure applicando una pressione. Nelle gallerie, il rigonfiamento nei terreni argillosi è soprattutto di natura osmotica. La concentrazione di cationi è minore nell'acqua ma maggiore nella superficie delle particelle di argilla dovuto al suo carico elettrostatico negativo. Per compensare questa differenza l'acqua entra fra gli spazi nelle particelle di argille (osmosis) producendo la sua separazione (Rodríguez Ortiz & Jurado, 2011)

L'ultimo meccanismo è l'inter cristallino che si dà per l'idratazione dei cationi, meccanismo poco rilevante nell'ingegneria geotecnica.

In generale le pressioni di rigonfiamento in questo materiale sono dell'ordine di 600kPa fino a 1500kPa.

2.1.2. Rigonfiamento nei materiali con Anidrite

Il rigonfiamento per presenza di anidrite ($CaSO_4$) è il meno comune, si produce per l'idratazione con acqua saturata di solfati di questo minerale trasformandosi in gesso ($CaSO_4$. $2H_2O$) in condizioni di temperatura, contenuto di acqua e pressioni specifiche (Steiner, 1993). I cristalli di gesso crescono man mano nelle fessure presenti nella matrice rocciosa influenzato anche dalla presenza di acqua con certo contenuto di solfati. Il rigonfiamento osservato in queste condizioni è maggiore che in altri tipi di terreni, il aumento di volume può essere del 61% (Butscher, Scheidler et al, 2017). La trasformazione dell'anidrite in gesso è reversibile a condizioni di pressione atmosferiche se la temperatura è di 200°C.

In generale nell'Equazione 2.1 si ha che la reazione chimica dell'anidrite con l'acqua è:

$$CaSO_4 + 2H_2O \rightarrow CaSO_4.2H_2O \tag{2.1}$$

Se si tiene in conto il volume specifico di ognuno dei componenti in questa reazione chimica si può valutare il cambio di volume finale. Il volume specifico dell'anidrite è di 46cm³ mentre dell'acqua è di 36cm³ e finalmente quello del gesso è di 74cm³, ottenendo così che la percentuale di variazione del volume dipende delle condizioni dove si trova l'anidrite. Per esempio, in un sistema chiuso, dove si tengono presenti le molecole di acqua, si ha una riduzione del 10% del volume iniziale, invece in un ammasso roccioso si ha un incremento del volume del 61% dove l'acqua non può essere presente ma ci sono delle fratture provocate da un rilascio tensionale dovuto allo scavo (Basile, 2010).

2.2. Deformazioni tempo dipendente

2.2.1. Deformazione di creep

Da un'altra parte il creep è un fenomeno reologico (deformazioni di tipo viscoso che provoca un cambiamento nello scheletro solido del terreno), che risulta in una deformazione che aumenta nel tempo ed è irreversibile qualunque sia il carico applicato. Questa problematica sarà studiata anche in parallelo con il fenomeno rigonfiante in quanto a che è importante per predire il comportamento in sito ed evitare problemi a futuro con deformazioni prolungati nel tempo. Ci sono numerosi fattori che influenzano il creep, per quello esistono diversi teorie che lo descrivono dipendendo del tipo di materiale. Questi equazioni relazionano le tensioni, le deformazioni e il tempo. Si possono distinguere vari approcci, come il fisicomeccanico, il fenomenologico e modelli reologici. Il primo approccio si basa sulle osservazioni e leggi che involvono proprietà fisiche del terreno come la viscosità. I modelli reologici che descrivono il comportamento viscoso del materiale, che è di seguito basato sul comportamento dei fluidi e gas, si basa sulla viscosità del fluido Newtoniano (relazione fra tensioni e

cambiamento del flusso) e relaziona il comportamento elastico del materiale (lineare con Hook) e comportamento plastico (solido di Saint Venant) (Havel, 2004).

Si parla quindi di deformazione dipendente dal tempo poiché il fenomeno di creep, legato a processi viscosi, è un comportamento reologico viscoso dove le deformazioni sono permanenti e variabili nel tempo, questo si presenta sia in terreni granulari che in terreni coesivi. Soprattutto è in terreni argillosi che questa dipendenza del tempo è più marcata. Le deformazioni viscose dipendono molto delle condizioni di drenaggio e della storia tensionale, quindi le deformazioni di creep sono maggiori all'aumentare il contenuto di acqua nel terreno, perché questa aumenta la velocità di creep. (Mater, 2011). Il tipo di deformazione che produce il fenomeno di creep dipende delle tensioni, le condizioni di temperatura e la granulometria del materiale.

Esistono diverse prove per caratterizzare la risposta nel tempo del terreno e descrivere gli effetti del creep e della velocità di deformazione nei terreni, la prova di creep in cella triassiale, la prova edometrica ad incrementi di carichi e la prova a velocità di deformazione costante in cella edometrica. Per l'obiettivi di questa tesi si è realizzata la prova di creep in cella triassiale con il fine di avere una caratterizzazione completa del terreno in studio e dei fenomeni tempo dipendente che si possono sviluppare in una galleria. Più avanti si farà quindi la descrizione della prova triassiale di creep realizzata e i risultati ricavati di questa.

La prova triassiale di creep si può realizzare in due condizioni, creep drenato o creep non drenato, nel primo caso non ci sono variazioni delle pressioni interstiziali nel provino, quindi all'essere il creep deformazioni viscose con tensioni efficaci costanti, si dice che il creep drenato rappresenta meglio la deformazione anelastica di creep. I risultati di queste prove mostrano come in un grafico di deformazione-tempo il creep ha tre stages. Nel primo c'è un creep primario o transitorio, dove la velocità di deformazione diminuisce nel tempo, il secondo stage è un creep secondario dove la velocità di deformazione è costante mentre l'ultimo stage chiamato creep terziario la velocità di deformazione delle terreno, del contenuto d'acqua e del livello tensionale (Mater et al., 2011). Nella Figura 1 si osserva la variazione delle deformazioni di un terreno nel tempo e le tre fasi di creep. Raggiunto il creep terziario si parla di perdita di resistenza del terreno, c'è collasso per creep.



Figura 1. Fasi di creep. (Mater et al., 2011)

2.2.2. Deformazione di rigonfiamento

Durante lo scavo delle gallerie c'è un cambiamento nello stato tensionale iniziale del terreno provocando così una variazione nella pressione interstiziale e permeabilità del terreno, instaurando un comportamento rigonfiante negli elementi nell'intorno della galleria soggetti a un scarico tensionale, dipendente del tipo di terreno presente.

Le deformazioni nelle gallerie sono tempo-dipendente, Nilsen (2011) ha realizzato numerosi studi su questo comportamento, nei quali osserva che la presenza di argilla rigonfiante ha un ruolo molto importante nella instabilità nel tempo della galleria. Dunque, lo sviluppo dell'instabilità varia sia per ore o per anni. Da questo si osserva che gli analisi dell'andamento delle tensioni fatti in 2-D, simulando la deformazione, è rappresentativo per periodi di tempo corti, per cui un analisi 3-D si deve realizzare per un miglior intendimento della deformazione delle gallerie (Sainoki, Atsushi, et. al, 2017). Wittke and Ribler (1976) hanno disegnato dei metodi, per caratterizzazione in laboratorio tenendo in conto lo stato di tensioni 3-D.

Si può dividere la deformazione in due tipi, dipendente dal tempo e immediata. La deformazione immediata è dovuta alla risposta non drenata del terreno durante lo scavo che risulta in una pressione interstiziale negativa nella calotta e una pressione interstiziale positiva nei piedritti; mentre la deformazione dipendente del tempo si da quando c'è dissipazione della pressione interstiziale producendo quindi consolidazione/rigonfiamento e deformazioni durante una condizione drenata. (Barla, 1999). Da un'altra parte se il rigonfiamento è impedito per un confinamento (struttura di

sostegno) si sviluppa un andamento di tensioni secondario che dipende della magnitudo del confinamento.

2.3. Prove per l'identificazione e quantificazione del rigonfiamento

Il fenomeno di rigonfiamento si può identificare oppure quantificare a traverso prove di laboratorio. Per la sua identificazione si devono valutare certi parametri caratteristiche del suolo in esame che sono correlati con il rigonfiamento del terreno, invece le prove in laboratorio sviluppati per la sua quantificazione sono di diversi tipologie e si ottengono diversi caratteristiche che descrivono la sua azione.

2.3.1. Prove per l'identificazione del rigonfiamento

Il rigonfiamento si può riconoscere da diverse prove in laboratorio. In prima battuta si può identificare un terreno rigonfiante studiando la granulometria, le proprietà fisiche e composizione mineralogica del terreno, questo dipende quindi dei minerali, dove una grande quantità di minerali di argilla significa un'elevata potenzialità al rigonfiamento. Bisogna quindi fare prima una investigazione geotecnica in situ cercando di capire, le formazioni geologiche della zona, le deformazioni prodotti dal fenomeno rigonfiante, e fare il recupero di campioni indisturbati per le diverse prove di laboratorio.

2.3.1.1. Composizione mineralogica

Come si è detto prima bisogna conoscere anche la composizione mineralogica del terreno, la diffrazione mediante raggi X è il metodo ideale per questo, consiste in un fascio di raggi X che colpisce il cristallo il cui viene rifratto in direzioni specifiche ottenendo così un diffrattogramma (permette di ricavare informazioni sulla struttura del materiale), un esempio di questo si ha nella Figura 2 dove nell'asse degli ascisse c'è l'angolo di diffrazione mentre negli ordinati c'è l'intensità corrispondente, quindi l'identificazione dei minerali si fa mettendo il diffrattogramma ottenuto in parallelo con i diffrattogrammi dei minerali conosciuti. Dà la misura della struttura reticolare è possibile classificare i minerali nel terreno (Bragg & Essi, 2013)



Figura 2. Esempio di diffrattogramma. (Barresi et al., 2003)

Dentro dell'identificazioni dei minerali si prendono in considerazione la percentuale di argilla, di quartz e di carbonati. Sapendo questi valori, con un diagramma triangolare (Figura 3) si può valutare il potenziale di rigonfiamento del terreno in studio, la scala del potenziale di rigonfiamento varia di basso, medio fino ad alto potenziale.



Figura 3. Diagramma del potenziale di rigonfiamento, esempio presso dall'argilla di Caneva. (Barla,

2008)

2.3.1.2. Parametri per la caratterizzazione del materiale

Esistono diverse proprietà fisiche che sono correlati al comportamento rigonfiante di un terreno, questi sono: i limiti di Atterberg, l'indice di plasticità, rapporto di attività (rapporto tra l'indice di plasticità e le particelle inferiori a $2\mu m$), peso specifico, contenuto di umidità, la granulometria e la conduttività idraulica.

Per esempio i terreni hanno un potenziale di rigonfiamento elevato tanto è alto l'indice di plasticità, questo parametro permette definire il potenziale di rigonfiamento di un terreno perché dipende dalla percentuale di argilla e dal tipo di minerale argilloso presente (Agneli, 2014).

Da un'altra parte la conduttività idraulica (portata specifica per unità di gradiente idraulico, esprime la facilità di un fluido di muoversi) è un buon indicatore idrologico del potenziale di rigonfiamento, questo si può determinare a partire di modelli numerici in 3D. Un valor elevato di questo parametro indica un alto potenziale di rigonfiamento, in fine si aspettano valori elevati del flusso di Darcy in zone di rigonfiamento.(Butscher et al., 2015). È importante quindi studiare il flusso di acqua e il suo cambiamento durante la scavazione della galleria per controllare il rigonfiamento.

2.3.2. Quantificazione del rigonfiamento

2.3.2.1. Prova edometrica di Huder-Amberg

Diverse prove sperimentali in laboratorio permettono di quantificare il fenomeno del rigonfiamento in un terreno, Huder e Amberg (1970) hanno proposto la prova edometrica per caratterizzare i terreni rigonfianti e per quantificare la deformazione espansiva dovuta al rigonfiamento. La procedura è descritta nel seguito.

Un campione indisturbato, il quale a seconda delle dimensioni richieste, si posiziona in un edometro, si colloca il primo carico per compensare il rilievo delle tensioni causato dalla sua estrazione, poi si satura il campione e si inizia con la fase di scarico. Si osserva con il tempo un'espansione verticale del campione e quando le deformazioni diventano costante il campione è scaricato di nuovo, riducendo il primo carico da un valor costante ogni volta, aspettando in ogni caso che la deformazione verticale sia costante per scaricare (ISRM, 1983). Finalmente si può tracciare una curva di rigonfiamento che

relaziona la tensione versus la deformazione verticale, osservando una curva a gradini, dove i tracciamenti rappresentano il rigonfiamento e la deformazione elastica (Romana, 1988).

Wittke e Ribler (1976) hanno proposto che il comportamento rigonfiante si può approssimare a una linea retta in un diagramma di deformazione versus il logaritmo della tensione con la seguente equazione:

$$\varepsilon_q = k \left(1 - \frac{\log \sigma_z}{\log \sigma_0} \right) \tag{2.2}$$

Dove:

 ε_q : Deformazione di rigonfiamento

 σ_0 : tensione iniziale dove la deformazione per rigonfiamento è zero

 σ_z : tensione finale

k: coefficiente di deformazione dovuto al rigonfiamento per un σ_z

Nella condizione 3-D l'equazione diventa:

$$I_{1\varepsilon} = k \left(1 - \frac{\log(\alpha I_{1\sigma})}{\log(\alpha I_{1\sigma o})} \right)$$
(2.3)

Dove I è il primo invariante di deformazione e di tensione, mentre α è un rapporto che dipende del coefficiente di Poisson, $\alpha = \frac{1-\nu}{1+\nu}$. Nella Figura 4 si può osservare questo diagramma.



Figura 4. Evoluzione della deformazione del campione dovuta al rigonfiamento (Wittke e Ribler,

1976)

Finalmente da questa prova si può osservare che c'è uno sviluppo di deformazione di rigonfiamento dovuto al decremento della tensione assiale nel provino.

Da un'altra parte la commissione di rocce rigonfianti della ISRM (ISRM, 1983),ha fatto delle raccomandazioni sulla prova proposta da Huder e Amberg. Questo per rocce argillosi rigonfianti, le quale hanno bisogno di trattamenti non-standard durante la preparazione dei campioni e durante le prove, il prelievo dei campioni si deve fare identificando le zone più critiche e prelevare da queste campioni aggiuntivi da utilizzare. Anche il campionamento deve provenire preferibilmente dai sondaggi fatti con aria compressa o utilizzando una miscela anti rigonfiamento.

Una volta fatto il carotaggio devono essere analizzati da un geologo per visualizzare presenza di rotture meccaniche. Finalmente i campioni devono essere coperti con materiale resistente all'acqua (paraffina), avere i dati del prelievo (come profondità e quota del piano campagna), e devono essere preservati ad una temperatura nell'ambito dei 5-30°.

In generale esistono 3 tipologie di prove edometriche per caratterizzare il rigonfiamento, in tutti i tre la forma del campione deve essere cilindrica, descritti a continuazione.

2.3.2.2. Determinazione della tensione di rigonfiamento assiale massima

Lo scopo di questa prova è misurare la tensione assiale massima necessaria per impedire il rigonfiamento di un provino confinato radialmente ed immerso in acqua (ISRM, 1983). Prima si applica un carico iniziale di 25kPa misurando lo spostamento assiale e poi si riempi la cella di acqua distillata. Si procede ad aumentare il carico assiale ottenendo dei gradini di carico, la prova si realizza fino al raggiungimento di un valore costante di rigonfiamento assiale o fino al raggiungimento del massimo carico assiale di rigonfiamento. L'attrezzatura utilizzata si può osservare nella Figura 5. E i risultati che si devono ricavare si osservano in Figura 6.



Figura 5. Apparecchiatura per la misura della tensione assiale di rigonfiamento (ISRM, 1983)



15

2.3.2.3. Determinazione della deformazione assiale e radiale in rigonfiamento libero

Si realizza con un campione indisturbato non confinato immerso in acqua, si registra l'andamento nel tempo del rigonfiamento assiale $\Delta\delta$ fino ad un valore costante, dopo di che si misura l'incremento della circonferenza ΔC al finale della prova, per poi ricavare la deformazione assiale di rigonfiamento e la deformazione radiale di rigonfiamento. L'apparecchiatura utilizzata si presenta nella Figura 7.



Figura 7. Apparecchiatura per la misura della deformazione di rigonfiamento(ISRM, 1983)

Problemi riguardando questa prova è la disintegrazione del provino e nel caso di un materiale con anidrite, la trasformazione in gesso produce la formazione di cristalli con forma di ago, la crescita di questi cristalli non è rappresentativo per la misura della deformazione per rigonfiamento (Pimentel, 2015).

2.3.2.4. Determinazione della tensione assiale di rigonfiamento in funzione della deformazione assiale di rigonfiamento

In questo caso si parla di un provino confinato radialmente ed immerso in acqua, il provino si carica fino al valore σ_a corrispondente alla tensione geostatica in sito registrando il carico agente e la deformazione corrispondente. Dopo la cella è riempita di acqua e si registrano i valori iniziali del rigonfiamento, poi si riduce il carico assiale iniziale di un 50% e questo si fa in ogni step, misurando

ogni volta il rigonfiamento finché questi stia in un valore costante (si scarica fino ad un valore di 25kPa). Poi si realizza un diagramma della relazione fra la tensione assiale e deformazione assiale totale (sommatoria tra la deformazione correlata all'incremento assiale e la deformazione di rigonfiamento causata dall'assorbimento di acqua) e da questo diagramma si può stimare il potenziale di rigonfiamento (Vedere Figura 8). Nella Figura 9 si presenta l'apparecchiatura utilizzata.



Figura 8. Diagramma della tensione assiale in funzione della deformazione assiale(ISRM, 1983)



Figura 9. Apparecchiatura per la misura della tensione assiale di rigonfiamento(ISRM, 1983)

2.3.3. Prova triassiale di rigonfiamento

La prova triassiale in terreni rigonfianti è più completa dalla prova edometrica poiché mette in relazione la variazione della pressione interstiziale e la sua influenza nel fenomeno del rigonfiamento. L'attrezzatura della prova triassiale è diversa a seconda del tipo di prova realizzata ma gli step realizzati non variano.

In generale esistono 6 step per la corretta realizzazione della prova triassiale per la caratterizzazione e quantificazione del rigonfiamento (Barla, 1999):

- <u>Impostazione</u>: In questa fase si fa la preparazione del campione in condizioni controllati, cioè dopo realizzati i provini questi si coprono con plastico e con paraffina per conservare l'umidità naturale.
- 2. <u>Flushing</u>: In questa fase il provino è posizionato nella cella triassiale con pietre porosi nella parte superiore ed inferiore, dopo di che comincia a circolare acqua nei circuiti per rimuovere l'area, ma tutto in condizioni asciutte per il provino, prevenendo cosi il rigonfiamento del provino durante questa fase. La durata di questo step dipende della permeabilità del provino, ma normalmente ha una durata di 24 ore. Mentre con l'aiuta del software si controlla l'altezza e il diametro del provino i cui devono rimanere costante durante questa fase.
- 3. <u>Saturazione</u>: Durante la saturazione c'è un incremento isotropo della pressione applicata, questa condizione si mantiene per 10 ore per permettere che l'area si dissolva in acqua. Si deve controllare il grado di saturazione con il parametro B di Skempton (se è pari ad 1 c'è saturazione totale). In generale un incremento $\Delta \sigma$ è applicato in condizioni non drenate, si misura la variazione della pressione interstiziale $\Delta \mu$ e si calcola B ($B = \frac{\Delta \mu}{\Lambda \sigma}$).
- <u>Consolidazione</u>: C'è un aumento della pressione di confinamento e della pressione assiale per ottenere le pressione geostatiche in sito, si deve portare quindi il provino alla condizione iniziale di tensioni in situ, cioè una tensione effettiva isotropica.
- 5. <u>Andamento tensionale non drenato (Taglio)</u>: Per questo step si impongono andamenti di tensioni pre definiti dove si mantiene costante la tensione media *s* e si varia *t* fino a un valore prima della rottura. In questo punto si osserva la variazione della pressione interstiziale.

6. <u>Fase drenata o di rigonfiamento:</u> Si mantengono le tensioni costanti fino a potere misurare le deformazioni per rigonfiamento, in questa fase il campione non si porta a rottura. È una fase drenata perché quando l'avanzamento passa la sezione di studio ci siamo in una condizione drenata. In fine si misura la deformazione prodotta quando questa si ha stabilizzato. Ottenendo così una grafica dell'andamento del rigonfiamento nel tempo.

Diverse attrezzature esistono per realizzare questa prova, dove dipendendo del tipo di materiale analizzato e le pressione che si vogliono raggiungere si scegli il tipo di apparecchiatura triassiale. L'apparecchiatura triassiale per rocce tenere (SRTA), nella Figura 10 è stata sviluppata nel Politecnico di Torino per rocce tenere. Esiste anche la prova triassiale HPTA la quale sarà oggetto di studio in questo elaborato, la sua descrizione dell'attrezzatura e la procedura realizzata per la realizzazione della prova si presentano nel Capitolo 3.



Figura 10. Apparecchiatura triassiale per rocce tenere (Barla, 1999)

2.4. Progettazione di una galleria soggetta a rigonfiamento

È importante definire la geometria della sezione trasversale della galleria, già che le aree soggette a rigonfiamento dipendono di questo, modellazioni realizzati nel software Phase 2 (Barla, 1999) con diversi sezione e stessi condizioni di legge costitutiva, parametri di resistenza e stato tensionale lo dimostrano. Per esempio, in una modellazione fata con Ko=1 i risultati delle zone dove si presenta le deformazioni per rigonfiamento si presentano nella Figura 11.



Figura 11. Zone di rigonfiamento con Ko=1.(M Barla, 1999)

Si osserva che le deformazioni per rigonfiamento sono maggiori nelle sezioni a forma di ferro di cavallo, essendo quindi più raccomodabile le sezioni circolari in terreni suscettibile al rigonfiamento.

Le deformazioni per rigonfiamento sono maggiori nell'arco rovescio della galleria, questo dovuto a che dopo lo scavo c'è un rilascio tensionale che conduce all'apertura di fratture aumentando la permeabilità del terreno. L'effetto di drenaggio della galleria e del terreno più permeabile sotto l'arco rovescio concentrano l'acqua in questa zona producendo quindi il rigonfiamento.

Per quantificare le pressioni e le deformazioni prodotti dal rigonfiamento diversi approcci si hanno sviluppati, i quali permettono di ricavare delle leggi che descrivono il fenomeno rigonfiante e cosi applicargli ad un modello numerico e valutare le pressioni indotte dal rigonfiamento e le deformazioni in una galleria.

2.4.1. Approccio empirico

L'approccio empirico consiste in determinare a traverso ispezioni visuali, osservazioni di parametri quantificabili o a traverso prove di indice la esistenza di un terreno rigonfiabile. Da questi dati si possono legare le dimensioni dei sostegni e i carichi agenti.

Il rigonfiamento studiato di una maniera empirica a permesso di sviluppare quindi numerosi metodi per il disegno di sostegni in queste condizioni, i metodi più utilizzati sono quelli descritte da Terzaghi (1946) e Peck (1969). È stato Terzaghi a classificare le rocce rigonfianti in una "Classe 9" nella sua classifica delle rocce, la cui equivale a una pressione corrispondente a 75m di roccia per la progettazione dei sostegni. Mentre Peck assicura che le pressioni di rigonfiamento possono superare i massimi carichi che sopporta la copertura della galleria, quindi suggerisci una pressione nel sostegno di $(\sigma_v + \sigma_h)/2$. Questi due metodi non considerano le proprietà del terreno/rocce e né le dimensioni della galleria per il disegno delle tensioni radiale. Ci sono anche altre tecniche sviluppate da Brekke e Howard (1973) e da Barton et al. (1974), i quali utilizzano le caratteristiche del terreno per determinare le dimensioni dei sostegni. È stato essenziale quindi sviluppare nuove tecniche analitiche per descrivere il comportamento dei terreni rigonfiante e la sua interazione con i sostegni.

2.4.2. Approccio analitico

La modellazione di una galleria in un terreno rigonfiante e la sua interazione con una struttura di sostegno è necessaria per capire le deformazione e pressioni raggiunte. È importante capire la legge costitutiva che governa il comportamento del terreno per così costruire un modello, modello che deve considerare la geometria della galleria, i parametri di resistenza del terreno e lo stato di tensione iniziale.

Per la modellazione numerica di qualsiasi problema ingegneristico bisogna prima definire un modello che sia adatto alle proprietà del materiale. Un approccio analitico permette modellare le proprietà della roccia rigonfiante e la sua interazione con i sostegni partendo sia da un modello che segue una legge di rigonfiamento, un modello reologico o modelli meccanici.

2.4.2.1. Modelli che seguono una legge di rigonfiamento

Sono dei modelli lineari elastici, i cui assumono che un materiale aumenta di volume quando le tensioni applicati diminuiscono. Diversi autori hanno sviluppato modelli basati su questa legge, per esempio Wittke e Ribler (1976) a traverso la prova edometrica hanno ricavato una relazione fra la tensione di rigonfiamento e la deformazione, anche Barla (1999), attraverso la prova triassiale ha ricavato una relazione fra la deformazione di rigonfiamento e la variazione delle pressioni interstiziali per poi determinare l'incremento delle tensioni dovuti al rigonfiamento.

I due metodi menzionati prima si basano sui risultati di prove in laboratorio che descrivono qualitativamente e quantitativamente il rigonfiamento, quindi attraverso l'interpretazione di questi dati si costruisce la legge di rigonfiamento corrispondente al terreno studiato. Si farà una descrizione in dettaglio dei metodi di Wittke e di Barla.

2.4.2.1.1. Metodo di Wittke

Wittke e Ribler si sono basati nella prova edometrica proposta da Huder e Amberg per la caratterizzazione del rigonfiamento e dalle prove multiassiale di Pregl e al. (1980) per descrivere un modello tensione-deformazione. Nel capitolo 2.3.2.1. si ha descritto l'equazione proposta da loro per determinare la deformazione dovuta al rigonfiamento, dipendente delle tensioni agenti. In generale la legge di rigonfiamento monodimensionale descritta da Grob (1972) è:

$$\varepsilon_{z\infty}^{q} = \begin{cases} 0 & per \, \sigma_{z} > \sigma_{0} \\ k \cdot \log\left(\frac{\sigma_{z}}{\sigma_{0}}\right) & per \, \sigma_{c} \le \sigma_{z} \le \sigma_{0} \\ k \cdot \log\left(\frac{\sigma_{c}}{\sigma_{0}}\right) & per \, \sigma_{z} < \sigma_{0} \end{cases}$$
(2.4)

Dove:

 $\varepsilon_{z\infty}^{q}$: Deformazione di rigonfiamento σ_{0} : tensione iniziale dove la deformazione per rigonfiamento è zero σ_{z} : tensione finale k: coefficiente di deformazione dovuto al rigonfiamento per un σ_{z}

Allora la generalizzazione di questa formulazione nello spazio 3D fu realizzata da Wittke e Ribler dove descrivono che la deformazione è approssimabile ad un cambio di volume, con l'aiuta del tensore del primo invariante delle deformazioni:

$$I_{1,\epsilon} = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z \tag{2.5}$$

Il cui deve essere legato al tensore del primo invariante delle tensioni:

$$I_{1,\sigma} = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \tag{2.6}$$

Quindi c'è una dipendenza nella variazione del volume alle tensioni agenti, come questo modello è basato da una prova monodimensionale, la prova edometrica, si ha che:

$$I_{1,\epsilon} = \varepsilon_z \tag{2.7}$$

$$I_{1,\sigma} = \sigma_z \frac{1+\nu}{1-\nu} \tag{2.8}$$

Rimpiazzando quindi le equazioni (2.7) e (2.8) nella (2.4) si ottiene la relazione fra la variazione di volume dovuta al rigonfiamento e lo stato tensionale tridimensionale:

$$I_{1,\epsilon q} = k \cdot \log \left(\frac{I_{1,\sigma} \frac{1-\nu}{1+\nu}}{I_{1,\sigma 0} \frac{1-\nu}{1+\nu}} \right)$$
(2.9)

2.4.2.1.2. Metodo di Barla

Il metodo di Barla si basa sui risultati di prove triassiali che permettono di ricavare l'andamento delle deformazioni rigonfiante con il cambiamento delle sovrappressione interstiziale.

Simulare il comportamento rigonfiante è quindi possibile utilizzando l'equazione caratteristica del rigonfiamento, questo basandosi nella variazione della pressione interstiziale che si osserva durante la fase di taglio e nella deformazione volumetrica ottenuta nel tempo durante la fase di rigonfiamento. L'andamento tensionale applicato nel provino sottoposto a prova nella fase non drenata si porta fino un valore prima della rottura pari a $f=t/r_{ottura}$, dopo di che all'aprire il drenaggio si osserva il rigonfiamento nel tempo del provino il quale è dipendente dell'eccesso di pressione interstiziale ($\Delta\mu$) ottenuto al finale della fase non drenata, quindi la dissipazione di $\Delta\mu$ si fa in condizioni di tensione costante (Barla, 2008). Utilizzando questi risultati si può trovare una relazione tra $\Delta\mu$ presente nel provino alla fine della fase non drenata e la deformazione totale volumetrica ε_{vol} .

Lo studio realizzato nella cava di Caneva-Stevenà (Barla, 2008) e dalle prove triassiale eseguiti hanno permesso di osservare come un $\Delta\mu$ positivo porta ad una ε_{vol} che diminuisce ma che non è dipendente dell'eccesso di pressione interstiziale. Invece quando $\Delta\mu$ è negativo, la ε_{vol} aumenta per il comportamento rigonfiante del terreno. Si è osservato anche come per valori molti elevati di $\Delta\mu$, la deformazione totale volumetrica si mantiene costante ad un valore paragonabile alla massima deformazione ottenuta nella prova edometrica di Huder e Amberg. Questo comportamento descritto fu generalizzato attraverso un'equazione che legga la deformazione volumetrica e la sovrappressione interstiziale, il cui andamento è descritto nel caso della cava di Caneva-Stevenà nella Figura 12. Questo andamento è possibile di trovare a partire di vari prove triassiali, ogni punto presente nella Figura 16 rappresenta una prova triassiale realizzata con i corrispondenti valori finali di $\Delta\mu$ e ε_{vol} .

$$\varepsilon_{vol} = -2 + 1.5 \arctan(\frac{\Delta \mu}{38} + 4)$$
 (2.10)



Figura 12. Relazione tra ε_{vol} - $\Delta \mu$ determinata dai risultati esperimentali nella Argilla di Caneva (Barla, 2018)

In generale la relazione proposta da Barla dipende anche dello stato tensionale a cui è sottoposto il materiale (p').

$$\varepsilon_{vol} = a + b \arctan\left(c \cdot \frac{\Delta \mu}{p'} + d\right)$$
(2.11)

Dove a, b, c e d sono costanti.

Valutata la relazione tra questi due parametri, la simulazione numerica del rigonfiamento si realizza tenendo in conto la fase non drenata e la fase drenata. La fase non drenata si fa con un'analisi di pressioni effettive con flusso dell'acqua impedito analisi che permette di ricavare $\Delta\mu$, invece la relazione ricavata dall'sperimentazione in laboratorio è valida per simulare la fase drenata nella galleria.

Per simulare l'incremento delle tensioni dovuti alla deformazione per rigonfiamento si applicano la corrispondente variazioni delle tensioni:

$$\Delta \sigma_{\chi} = -\left[K + \frac{G}{3}\right] \cdot \varepsilon_{vol} \tag{2.12}$$

$$\Delta \sigma_y = -\left[K + \frac{G}{3}\right] \cdot \varepsilon_{vol}$$

$$\Delta \sigma_z = -\left[K - \frac{2G}{3}\right] \cdot \varepsilon_{vol}$$
(2.13)

Dove K è il modulo di volume e G è il modulo di taglio del terreno.

2.4.2.2. Modelli reologici

Sono rappresentazioni del comportamento del materiale indipendentemente dall'effetto scala. Questi modelli tengono in conto la dipendenza del tempo del fenomeno del rigonfiamento, le tensioni e le deformazioni, ma i modelli reologici trattano solo la componente deviatorica della tensione totale, quindi non c'entra la componente volumetrica, assunzione che fa sì che i modelli reologici descrivano bene il fenomeno del creep e non del rigonfiamento.

2.4.2.3. Modelli meccanici

Questo modello tiene in conto il contributo dell'acqua nel rigonfiamento, in questo caso si assume solo un rigonfiamento meccanico ma non fisico-chimico. Secondo Anagnostou la deformazione per rigonfiamento, che è dipendente dal tempo, è associata alla dissipazione della pressione interstiziale negativa (condizione drenata). In questo caso si fa la modellazione della roccia rigonfiante seguendo una legge costitutiva elastica non-lineare anisotropica, perfettamente plastica arrivando così ad una previsione della deformazione dovuta al rigonfiamento.

Un nuovo concetto sviluppato è la combinazione di modelli meccanici di rigonfiamento con modelli di creep, nei quali c'è uno sviluppo di sovrappressioni interstiziali negative dovuto all'incremento di volume del terreno seguito di una dissipazione di questa sovrappressione, facendo che lo stato tensionale si avvicina alla rottura, presentandosi il fenomeno di creep (Basile, 2010).

2.5. Interventi

La progettazione di una galleria e in conseguenza dei sostegni in terreni rigonfianti è difficile perché non c'è un modello che permetta predire esattamente la pressione e la deformazione di rigonfiamento. Questo si vede limitato per il poco conoscimento sulla distribuzione del potenziale di rigonfiamento in sito e il flusso d'acqua che si può presentare. Comunque, esistono diversi misure per assicurare la stabilità e funzionalità dell'opera, questi sono di tipo idraulici e meccaniche.

Le soluzioni di tipo idraulici sono le più convenienti perché come si ha detto prima il problema del rigonfiamento è legato alla presenza di acqua, quindi risulta essenziale fare un controllo del flusso di acqua per evitare il rigonfiamento. Le condizioni idrogeologiche sono valutate in una condizione tridimensionale da Butscher et al. (2017), loro hanno studiato gli interventi di tipo idraulici nella galleria Belchen nella Svizzera, che include il disegno di opere di drenaggio nella galleria, come drenaggi con pompaggi, strutture di sostegno impermeabile in torno alla galleria e pozzi di pompaggio. In questo caso per contrastare il rigonfiamento, drenaggi di 360m di longitudine sono implementati al piede della galleria come si osserva nella Figura 13.



Figura 13. Sezione e profilo geologico della galleria di Belchen ed interventi (Butscher et al., 2017)
L'implementazione di pompe di drenaggio permette di diminuire il flusso di acqua riducendo così il potenziale di rigonfiamento. Le strutture di sostegno intorno alla galleria devono avere una conduttività idraulica bassa e normalmente si possono realizzare con bentonite e resina epoxica, questi strutture si fanno per evitare il flusso nella galleria.

I pozzi di pompaggio permettono di ridurre anche il flusso, ma le modellazioni realizzati nella galleria di Belchen hanno dimostrato che la riduzione del flusso è minore in questo caso anzi che con i drenaggi di pompaggio e le strutture di sostegno. Nella Figura 14 si presenta un esempio di una sezione trasversale di una galleria in un terreno rigonfiante con i diversi interventi.



Figura 14. Sezione di una galleria con i diversi interventi (De Moya, de Ágreda, Morales, & Solé, 2009)

Il monitoraggio delle deformazioni e pressioni nella gallerie sono anche necessari per il controllo del rigonfiamento, questi monitoraggi consistono nel posizionamento di inclinometri e "sliding micrometers" e sistemi di misura delle pressioni.

Da un'altra parte gli interventi meccanici sono un'altra alternativa per contrastare il rigonfiamento, in pratica esistono due tipi di principi costruttivi, il principio di resistenza e il principio di cedimento. Il principio di resistenza è più utilizzato in terreni con basso a medio potenziale di rigonfiamento, mentre l'altro principio è per materiale ad alto potenziale di rigonfiamento.

I rivestimenti rigidi devono avere una sufficiente capacità portante per contrastare le grandi pressioni esercitati dal terreno dovuta alle deformazioni per rigonfiamento, questa soluzione non è la più adatta per le alte pressioni che si sviluppano nel rivestimento. I rivestimenti flessibile invece, permettono la deformazione dell'arco rovescio lasciando uno spazio fra la carreggiata e la superficie del terreno, cosi l'arco rovescio della galleria può rigonfiare senza affettare l'utilità della galleria e si diminuiscono le pressioni di rigonfiamento. La diminuzione della pressione esercitata dal rigonfiamento sulle strutture di sostegno flessibili può darsi permettendo un piccolo innalzamento nell'arco rovescio della galleria. Esistono vari tipi di interventi che si bassano su questo comportamento (Figura 15).



Figura 15. Disegno di rivestimenti in terreni rigonfianti. (a) Rivestimento flessibile; (b) Sistema combinato con rivestimento flessibile; (c) Rivestimento rigido (Rodríguez Ortiz & Jurado, 2011).

I rivestimenti flessibili si basano sull'assunzione che la pressione nel terreno diminuisce con l'aumento delle deformazioni, quindi installando una struttura flessibile la pressione esercita dal terreno diminuisce. Esistono due tecniche: uno strato comprimibile fra l'estradosso del rivestimento rigido e lo scavo e l'installazione di un rivestimento flessibile a contatto con la roccia. Nel primo caso, dello strato comprimibile, c'è una convergenza del terreno mentre la rigidezza del rivestimento limita le deformazioni. Mentre nel secondo caso il rivestimento si deforma con il terreno, lo quale si dà per collegamenti che scorrono (Figura 16 b1) dove il carico si traferisce per attrito, mentre nel caso della Figura 16-b2 il carico si trasferisce per compressione. La forza assiale nel rivestimento è controllata per la resistenza all'attrito delle connessioni



Figure 2. Basic types of flexible support.

Figura 16. Rivestimenti flessibili (Anagnostou & Cantieni, 2007)

La linea caratteristica del rivestimento è relazionata con le deformazioni e le pressioni alle quale può essere soggetto. Nella Figura 17 è riportata la linea caratteristica di un rivestimento flessibile e rigido

in una galleria profonda e superficiale, la curva Y è per rivestimenti flessibili con uno strato comprimibile inserito fra il rivestimento rigido e lo scavo, in questo caso la deformazione è la somma fra la deformazione del rivestimento rigido e lo strato comprimibile. Si osserva come la pressione critica di rigonfiamento è raggiunta prima nel caso di un rivestimento rigido (ts) che per un rivestimento flessibile (ty), quindi il rivestimento flessibile ha una vita utile maggiore che il rivestimento rigido.



Figura 17. Interazione fra il rivestimento e il terreno. (a) Galleria profonda; (b) Galleria superficiale. (Rodríguez Ortiz & Jurado, 2011)

Gli strati comprimibile inseriti fra lo scavo e il rivestimento rigido hanno un'alta capacità portante, riducendo la pressione di rigonfiamento ed è possibile la sostituzione di questi elementi senza interrompere la funzionalità della galleria. Per evitare possibili esaurimento della capacità dello strato comprimibile inserito durante la vita utile della galleria, sostegni modulari cedevoli si possono installare nella base della galleria, questi sono elementi individuali (Figura 18) di forma cilindrica installati lungo l'asse della galleria realizzati con materiali inerti come sabbia, cemento, fibre di acciaio, che servono di fondazione per l'intera struttura. Si installa anche una serie di ancoraggi pre tesi per contrastare la deformazione di rigonfiamento nell'arco rovescio. Nella Figura 18 si osserva

l'implementazione di questo sistema d rivestimento flessibile e i moduli cedevoli nella galleria di Chienberg in Svizzera (Kovari & Chiaverio, 2007).



Figura 18. Sistema modulari flessibile, galleria di Chienberg. (Kovari & Chiaverio, 2007)

Capitolo 3 Sperimentazione di laboratorio

Con il fine di caratterizzare e ricavare i parametri per costruire i modelli di rigonfiamento esposti nel Capitolo 2 e di descrivere il fenomeno di creep si sono realizzati vari prove presso il laboratorio DIPLAB del Politecnico di Torino.

In totale si hanno fato due prove edometriche seguendo la metodologia di Huder e Amberg, una prova triassiale di rigonfiamento con la tipologia di prova HPTA e due prove di creep in cella triassiale. Si darà a conoscere la metodologia seguita e l'attrezzatura utilizzata per ogni prova realizzata e i risultati ottenuti. Nella Tabella 1 si riportano le diverse prove realizzati.

	Sondaggio	Codice Campione	Nome prova	Profondità [m]	Tipologia di prova
1	PE_S08	PE_S08_C16	Ed_263_AV	59.00-59.50	Edometrica
2	PE_S02	PE_S02_C15	Ed_262_AV	78.00-78.50	Edometrica
3	PE_S02	PE_S02_C14	TX_2	75.0-75.50	Triassiale HPTA
4	PE_S02	PE_S02_C17	TX_3_Creep	82.50-83.00	Triassiale di creep
5	PE_S02	PE_S02_C19	TX_4_Creep	87.00-87.50	Triassiale di creep

Tabella 1. Campioni e prove di laboratorio effettuate

3.1. Prova edometrica

In questo Capitolo si farà una descrizione dell'attrezzatura utilizzata e del procedimento eseguito per la realizzazione delle due prove edometriche, e i risultati di entrambi prove saranno anche presenti.

3.1.1. Attrezzatura

La prova edometrica si realizza in una cella edometrica tradizionale dove si colloca il provino di forma cilindrica e confinato lateralmente entro un anello metallico. Nella parte superiore ed inferiore del provino si posizionano delle piastre porose metalliche per il drenaggio, sopra la piastra si colloca una testa di carico di acciaio inossidabile di forma conica con spessore elevato. In questa testa di carico c'è una sfera che permette il trasferimento del carico al provino, il quale è sottoposto a carichi variabili con l'ausilio di un apparecchio costruito con un braccio di leva paria a 1:10. La misurazione degli spostamenti si realizza con un trasduttore di spostamento con sensibilità di 2.5micron, le misurazione sono registrate in un sistema di acquisizione di dati, dove si registra anche il tempo di misura, e gli spostamenti verticali in volts [V]. L'apparecchiatura utilizzata si riporta nella Figura 19.



Figura 19. Attrezzatura prova edometrica

3.1.2. Impostazione campione

I campioni utilizzati per la prova vengono dal cantiere coperti con plastica e paraffina negli estremi per la conservazione della sua umidità naturale, hanno anche una etichetta con le caratteristiche dell'ubicazione e profondità di prelievo. Nella Figura 20 si osservano i dati di prelievo del campione PE S02 C15 e le condizioni del campione.



Figura 20. Condizioni iniziali del campione PE_S02_C15 e dati di prelievo

L'altezza è misurata (50cm) e si osservano le caratteristiche generale del campione, si è osservato che entrambi campioni presentano molti inclusioni dovendo quindi definire una zona priva di questi per la realizzazione dei provini. Nella Figura 21 si osserva in dettaglio il campione e la sua lunghezza.



Figura 21. Campione indisturbato PE_S02_C15

Per la confezione del provino si posiziona una porzione del campione sotto l'anello di consolidazione e si taglia fino ad arrivare alla forma disiderata. Dopo di che, con la pressione esercitata dall'apparecchiatura presente nella Figura 22, e mettendo un po' d'olio all'interno dell'anello, si inserisce il terreno nell'anello avendo come risultato il provino pronto per la realizzazione della prova edometrica.



Figura 22. Realizzazione del provino e risultato

In seguito, il provino si posiziona nella cella di consolidazione, mettendo una carta da filtro (Vedere Figura 23) negli estremi di questo per evitare possibili contaminazioni del terreno, anche in contatto con la carta da filtro, si mette una pietra porosa per permettere il drenaggio nel terreno.



Figura 23. Carta da filtro

Il posizionamento del campione dentro la cella per la prova edometrica si osserva nella Figura 24.



Figura 24. Posizionamento del provino nella cella di consolidazione.

Finalmente si posiziona la cella nell'edometro e si comincia con la prima fase di carico. Nella Figura 25 si osserva tutta l'apparecchiatura della prova edometrica.



Figura 25. Posizionamento del provino nell'apparecchiatura della prova edometrica.

Nella Tabella 2 si presentano le caratteristiche generali dei provini realizzati.

Campione	PE_S02_C15	PE_S08_C16
Nome prova	Ed_262_AV	Ed_263_AV
Diametro provino [mm]	50	50
Altezza provino [mm]	19	19
Peso anello [g]	79.66	81.66
Peso anello + provino umido iniziale [g]	158.7	162.07
Peso provino umido iniziale [g]	79.04	80.41

Tabella 2. Caratteristiche provini prova edometrica

3.1.3. Fase di carico

Il provino si deve portare alle condizioni geostatiche in questa prima fase, conoscendo il peso specifico del terreno e la profondità di prelevamento del campione si può calcolare la tensione (Vedere Tabella 3).

	Ed_262_AV	Ed_263_AV
γ [kN/m3]	20	20
z [m]	78.3	59
σ [kN/m2]	1566	1180

Tabella 3. Tensione geostatica iniziale

Per arrivare a questa tensione si realizzano gradini di carico in condizioni asciutte per evitare il rigonfiamento del terreno, in totale si aggiungono i seguenti pesi per arrivare alla condizione geostatica, i primi carichi si posizionano ogni 30 minuti mentre gli altri una volta il provino arriva all'equilibrio, cioè quando non si presentano più deformazioni di cedimenti nel tempo. L'equivalenza tra le tensioni e i pesi ad aggiungere si vedono nella Tabella 4.

Ed_262_A	V	Ed_263_AV		
Pesi di piombo [g]	σv [kPa]	Pesi di piombo [g]	σv [kPa]	
22	12.3	160	8.8	
446	24.5	320	17.6	
892	49	640	35.2	
1785	98.1	1309	71.9	
3570	196.1	2647	145.4	
7140	392.3	5323	372.4	
14280	784.5	10678	586.7	
28560	1569.1	21388	1175.1	

Tabella 4. Fase di carico

In totale sono 8 gradini di carico applicati, e con aiuta del software collegato all'apparecchiatura si fanno le letture degli spostamenti assiali a certo intervallo di tempo, osservando quindi quando gli spostamenti sono costanti, in equilibrio, per aggiungere il seguente carico. Si determina le deformazioni assiali a partire della seguente relazione:

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_{ini}} * 100 \tag{3.1}$$

Dove:

 Δh : la differenza fra lo spostamento del provino a certo tempo con la deformazione a un tempo 0.

 h_{ini} : è l'altezza iniziale del provino

La variazione nel tempo delle deformazioni assiale nel provino per ogni gradino di carico si osservano nelle Figure 26 e 27.



Figura 26. Fase di carico, variazione delle deformazioni e delle tensioni, prova Ed_262_AV





Quindi un aumento delle tensioni significa una deformazione assiale positiva del provino (consolidazione), questo si può vedere nelle Figure 28 e 29.



Figura 28. Deformazione assiale in funzione delle tensioni applicati, prova Ed_262_AV



Figura 29. Deformazione assiale in funzione delle tensioni applicati, prova Ed_263_AV

Finita la fase di carico si aggiunge l'acqua nella cella edometrica per la saturazione del campione e cominciare la fase di scarico come si osserva nella Figura 30. I risultati della deformazione verticale durante questa fase si osservano nelle Figure 31 e 32.



Figura 30. Aggiunta di acqua nella cella di consolidazione



Figura 31. Deformazione verticale dopo l'aggiunta di acqua, prova Ed_262_AV





3.1.4. Fase di scarico

Raggiunta la stabilizzazione delle deformazioni nel provino dopo l'addizione dell'acqua si comincia la fase di scarico, questo si fa anche a gradini, prelevando ogni carico una volta equilibrati le deformazioni. In generale la deformazione ottenuta nel tempo in corrispondenza delle tensioni applicati si presentano nelle Figure 33 e 34.



Figura 33. Fase di scarico, variazioni delle deformazioni e delle tensioni in funzione del tempo, prova Ed_262_AV.



Figura 34. Fase di scarico, variazioni delle deformazioni e delle tensioni in funzione del tempo, prova Ed_263_AV.

Durante questa fase si osserva il rigonfiamento del provino all'ottenere spostamenti negativi ogni volta che si rimuove un carico, questi spostamenti hanno due componenti, una componente elastica (data dalla rimozione del carico) e una componente rigonfiante.

3.1.5. Interpretazione delle prove e determinazione del coefficiente k di rigonfiamento

Per caratterizzare quindi il rigonfiamento si deve togliere la componente elastica delle deformazioni durante la fase di scarico, corrispondenti ai valori ottenuti nelle prime tre letture degli spostamenti, le deformazioni per rigonfiamento sono quindi:

$$\varepsilon_q = \varepsilon_{tot \, per \, step} - \varepsilon_{elastica \, per \, step} \tag{3.2}$$

Nelle Tabelle 5 e 6 si presentano le deformazioni per rigonfiamento per ogni tensione applicata per le due prove realizzati.

Avial strong	Deformazione per	Deformazione	Deformazione	Deformazione
Axial stress	step	elastica	rigonfiamento	accumulata di swelling
[kPa]	[%]	[%]	[%]	[%]
1569.1	0	0	0	0
1569.1	1.039	0	1.039	1.039
784.5	-0.828	-0.287	-0.542	0.497
392.3	-1.030	-0.167	-0.863	-0.366
196.1	-1.489	-0.017	-1.472	-1.838
98.1	-1.561	-0.018	-1.543	-3.380
49	-1.948	-0.028	-1.920	-5.301
24.5	-1.834	-0.010	-1.824	-7.125
12.3	-1.636	-0.017	-1.618	-8.743

Tabella 5. Deformazione di rigonfiamento, prova Ed_262_AV

Axial	Deformazione per	Deformazione	Deformazione	Deformazione accumulata di
stress	step	elastica	rigonfiamento	swelling
[kPa]	[%]	[%]	[%]	[%]
1175.1	0	0	0	0
1175.1	1.671	0	1.671	1.671
586.7	-1.077	-0.190	-0.887	0.784
292.4	-1.847	-0.116	-1.731	-0.947
145.4	-4.793	-0.059	-4.734	-5.682
71.9	-3.053	-0.033	-3.021	-8.702
35.2	-4.288	-0.030	-4.258	-12.960
17.6	-4.505	-0.021	-4.485	-17.445
8.8	-4.794	-0.017	-4.776	-22.221

 Tabella 6. Deformazione di rigonfiamento, prova Ed_263_AV

Finalmente si può tracciare la grafica che relaziona le deformazioni di rigonfiamento e le tensioni, per poi ottenere il coefficiente k di rigonfiamento descritto da Wittke dalla grafica delle deformazioni di rigonfiamento in funzione del logaritmo in base 10 delle tensioni.



Figura 35. Deformazione per rigonfiamento in funzione delle tensioni, prova Ed_262_AV





Il parametro k di rigonfiamento per ogni prova realizzata si presenta nelle seguenti figure, il quale corrisponde alla pendenza della curva delle deformazioni di rigonfiamento vs il logaritmo in base 10 delle tensioni.



Figura 37. Parametro k di rigonfiamento, prova Ed_262_AV



Figura 38. Parametro k di rigonfiamento, prova Ed_263_AV

Il coefficiente di deformazione dovuto al rigonfiamento, k, e il valore medio ricavato nelle due prove si presenta in Tabella 7

Tabella 7. Coefficiente k

Nome prova	Ed_262_AV	Ed_263_AV
k	4.478	10.833
Valore medio k	7.655	

3.2. Prova triassiale HPTA

Si realizza una prova triassiale di rigonfiamento con la tipologia di prova HPTA sul terreno in studio, si descrive l'attrezzatura e la metodologia realizzata. Infine, si presenteranno i risultati ricavati e l'interpretazione di questi per il campione PE_S02_C13.

3.2.1.1. Attrezzatura per la tipologia di prova triassiale HPTA

HPTA è un'apparecchiatura triassiale disegnata per studiare il comportamento meccanico delle rocce e terreni sotto grandi pressioni di confinamento (G. Barla, Barla, & Debernardi, 2010). La compressione triassiale si realizza in condizioni controllate (carico assiale, pressione radiale, e spostamenti). La pressione di confinamento può arrivare fino a 64MPa, mentre la "back pressure", pressione dell'acqua, arriva a valori di 32MPa e il carico deviatorico assiale fino a 250kPa. Le dimensioni dei campioni di forma cilindrica possono variare, per esempio il diametro può prendere valori fra 50, 70 e 100mm e avere un'altezza di 200mm. L'apparecchiatura si compone di:

- Una cella triassiale:

È dove si posiziona il campione coperto con una membrana per evitare il movimento e isolarlo, e si applicano le pressioni di confinamento, assiali e di "back pressure". Per l'applicazione del carico assiale l'innalzamento di un piatto nella parte inferiore della cella che si sposta verticalmente permette il contatto del provino con la cella di carico interna.

Nella Figura 39 si osservano le diverse componenti di una cella triassiale per la tipologia di prova HPTA.



Figura 39. Cella triassiale (Barla et al., 2010)

Nella base della cella c'è un piedestallo che ha come funzione portare il provino, il cui deve avere sopra e sotto delle pietre porose, ed è dove si trovano le diverse connessioni necessari per l'applicazione e lettura delle diverse variabile, questi condotti sono il collegamento per l'applicazione della back pressure, per l'applicazione della pressione di confinamento, un condotto per la misura della pressione interstiziale e per la misura dell'estensione. Nella Figura 40 si osservano le diverse connessioni.



Figura 40. Connessioni nella base della cella triassiale(Barla et al., 2010)

Nella parte superiore del provino si trova un capitello che permette il contatto tra il provino e l'asta per l'applicazione del carico verticale ed evitare il movimento del campione durante la prova una volta sono a contatto. Inoltre, nel capitello si trova la connessione per l'applicazione della back-pressure. Intorno al provino si posizionano due trasduttori per la misura della deformazione assiale locale e anche con l'aiuta di un anello si posiziona nel contorno del provino un trasduttore per la misura dello spostamento radiale. Questi trasduttori stano collegati a delle connessioni nella base della cella e la misura dei dati si prende con l'aiuta di un software.

Nella parte superiore della cella si trova anche una camera che permette il controllo del volume dell'olio, il cui varia la pressione di confinamento nel provino.

- Sistema idraulico

L'applicazione dei carichi, della pressione di confinamento e della back-pressure è a traverso dell'olio e dell'acqua rispettivamente, questi due sono pressurizzate nel campione a traverso le connessioni con l'aiuta di due presse idraulici chiamati anche controlli digitale GDS, dove un pistone applica una pressione al fluido contenuto nei cilindri, il cui è connesso alla cella triassiale. Dipendendo della pressione applicata il pistone si muove piano piano fino ad arrivare al valore target, il controllo si fa direttamente nel panello di controllo dell'apparecchiatura oppure direttamente nel software collegato ad un computer.

Capitolo 3

La capacità dei sistemi idraulici è di 64MPa per la pressione in cella e di 32MPa per la back-pressure. Nella Figura 41 si presentano i sistemi idraulici. Per mantenere un contenuto specifico di acqua ed olio ci sono due serbatoi collegati ai sistemi idraulici per riempirle. Inoltre, c'è una pompa di aria per deaerare l'olio e l'acqua prima di entrare nelle presse.



Figura 41. Sistema idraulico per la back pressure e la pressione in cella, panello di controllo e serbatoi di olio ed acqua.

- Sistema di misura

Il sistema di misura è digitale, si realizza direttamente nel software caricato in un computer. I diversi sistemi collegati nell'attrezzatura sono:

Un sistema di misura del carico, per valutare il carico assiale applicato, c'è una cella di carico esterna posizionata nella parte superiore della cella triassiale con un valore massimo di carico di 250kN e una cella di carico interna all'interno della cella triassiale, la cui permette una misura più precisa del carico assiale, questa ultima con un massimo carico di 64kN.

Un sistema di misura delle pressioni, come si ha detto prima la pressione all'interno della cella (la pressione dell'olio) e anche la back-pressure applicata si fanno direttamente dalla pressa oppure dal software.

Un sistema di misura degli spostamenti, sono divisi in un sistema locale e un sistema esterno. Il sistema esterno misura lo spostamento del piatto di carico con una accuratezza di 1µm, il cui include anche la misura delle deformazioni della cella triassiale. Per questo si ha implementato la misura degli spostamenti locali incollati direttamente nel provino studiato, composto quindi di due trasduttori per la

misura delle deformazioni assiali e un trasduttore per la misura delle deformazioni radiali, ognuno con una accuratezza di 1μ m e 0.5μ m rispettivamente.

- Sistema di acquisizione dei dati:

Ci sono due livelli di acquisizione dei dati, nel primo il sistema di controllo e di misura delle pressioni è autonomo e collegato alle presse, il secondo unisce tutti i dati con l'aiuta di un software specializzato creato da G.D.S Instruments Ltd dove si possono trattare i dati ottenuti.

3.2.2. Montaggio prova HPTA

Prima di cominciare la prova si deve sistemare l'attrezzatura.

- Controlli digitali GDS:

Nella la presa idraulica che controlla l'iniezione d'olio e della back pressure si verifica il corretto funzionamento svuotando un po' d'olio e di acqua.

- Serbatoio olio e di acqua

Si riempi tanto il serbatoio di olio e di acqua deaerata per permettere un flusso con il GDS, poi si disarea l'olio nel serbatoio.



Figura 42. Serbatoio acqua e olio

- Polmone:

L'obbiettivo del polmone è una variante per l'applicazione della back-pressure, questa è più precisa nell'applicazione delle pressioni nel provino nelle fase iniziali della prova, si deve quindi riempire di acqua disareata e verificare la sua funzionalità svuotando un po' d'acqua.



Figura 43. Polmone

- Panello di controllo

Tutti i collegamenti nel panello di controllo si devono verificare.



Figura 44. Panello di controllo

- Trasduttori:

I trasduttori si devono calibrare per avere una corretta relazioni con i volts e la deformazione che si legge nel software, con un micrometro si misura la deformazione applicata nei trasduttori, valore che si compara con la misura che si legge nel software per lo stesso trasduttori, nella Figura 45 si osserva il micrometro utilizzato.



Figura 45. Micrometro per la calibrazione dei trasduttori

- Lettura software

In generale i dati che si prelevano nel software si verificano, ad esempio una lettura positiva delle deformazioni tanto assiali come radiali rappresentano la compressione del campione, invece una lettura negativa indica il rigonfiamento del campione. Un esempio dell'interfaccia del software si presenta nella Figura 46.



Figura 46. Schermata del software

3.2.3. Impostazione

Il campione PE_S02_C13 si presenta nella Figura 47 con i dettagli del suo prelievo e le condizioni iniziali.



Figura 47. Campione PE_S02_C13

Si prende una porzione priva di inclusioni per la preparazione del provino. La confezione del provino segue la stessa metodologia per la prova edometrica ma come referenza si ha una fustella la quale serve di guida per dare la forma desiderata al campione e per ricavare il peso del provino. Il provino ottenuto presenta molti pori e piccoli pieri dovuto alle condizioni del campione. I dati del provino realizzato si presentano nella Tabella 8 e la metodologia per la sua preparazione e il risultato nella Figura 48.

Campione	PE_S02_C13
Nome prova	Tx_2_2018_06_19
Altezza campione [mm]	100
Diametro campione [mm]	50
Profondità [m]	73.5-74.0
Peso provino umido iniziale [g]	412.7

Tabella 8. Caratteristiche provino



Figura 48. Preparazione del provino

Si fa poi la progettazione della membrana tenendo in conto che questa deve coprire interamente il campione, la carta da filtro, le pietre porose e permettere che sia collegato al piedistallo e al capitello. Nella Figura 49 si presenta la membrana utilizzata.



Figura 49. Membrana

Prima di coprire il provino con la membrana si mettono le pietre porose e la carta da filtro a contatto con il provino, anche nel contorno si collocano delle strisce da filtro. Posizionato il provino coperto con la membrana nella cella triassiale si mette a contatto con il capitello, e si ferma la membrana con degli elastici negli estremi. Poi per incollare i trasduttori nella membrana si mette un po' di aceto sulle zone dove si posizioneranno i trasduttori per agevolare l'operazione. Si applica quindi dell'adesivo nei porta trasduttori e nella membrana, lasciandoli all'area per qualche minuto per poi incollargli nella membrana, prima si collocano i trasduttori assiali nei laterali del provino e dopo il trasduttore radiale nel contorno. I diversi step realizzati si osservano nella Figura 50.



Figura 50. Posizionamento nella cella triassiale

Dopo di che si fanno i collegamenti della back-pressure, la pore pressure e della tensione radiale nella base della cella triassiale. I trasduttori si collegano anche al software e si rimandano ad un valore pari a 0, come valore iniziale. Finite queste operazioni si chiude la cella triassiale e l'olio viene caricato dal basso verso l'alto nella cella triassiale, poi questo olio sale verso una camera la quale permette che la pressione applicata nel provino crescano dovuto a che l'eccesso di volume di olio sale verso questa camera. La Figura 51 presenta l'impostazione finale della prova.



Figura 51. Cella triassiale

Finito il montaggio si comincia la prova triassiale con il procedimento descritto nel Capitolo 2.3.3. eseguendo ognuna delle fase descritte.

3.2.4. Flushing

Nella fase di Flushing si applica una "back-pressure" di 60kPa fino a che si abbia un flusso di acqua costante nel collegamento della "pore pressure". Per mantenere le deformazioni assiali e radiali costanti si deve anche applicare una pressione radiale, che deve essere maggiore alla "back-pressure" e così evitare anche che si rigonfie il provino. Questa operazione si fa con il provino a contatto con la presa per evitare posteriori movimenti, si applica quindi una forza assiale piccola per evitare ulteriori deformazioni del provino, la forza assiale applicata è di 0.05kN e si solleva man mano il piatto fin che questo sia a contatto e si arrivi alla forza target.

I valori scelti della "back-pressure" e della pressione radiale corrispondono a valori che mantengono le deformazioni costante, valori scelti a seconda degli osservazione durante la prova nell'interfaccia del software. Nella Tabella 9 si presentano le pressioni applicati.

Tabella 9. Tensioni applicati fase di Flushing

FLUSHING	
σ _{radiale} [kPa]	80
σ _{backpressure} [kPa]	60

Una volta si osserva il flusso nel collegamento della pore pressure, si devono recuperare le deformazioni radiali, si applica quindi un incremento della tensione radiale e si mantiene costante la "back-pressure":

Tabella 10. Tensioni applicati per il recupero delle deformazioni

RECCUPERO DEFORMAZIONI		
σ _{radiale} [kPa]	130	
σ _{backpressure} [kPa]	60	

3.2.5. Saturazione

Terminata la fase di Flushing, si chiude il drenaggio (la" back-pressure", quindi il provino si trova in condizioni non drenate), e si prende il valore ultimo misurato dal software della pressione interstiziale alla fine della fase di Flushing ($\mu_{iniziale}$ =46.1kPa) e della pressione radiale ($\sigma_{radiale}$ =112kPa), valori di riferimento per il calcolo del parametro B di Skempton. Il grado di saturazione, determinato quindi a partire di B, si deve realizzare in condizioni isotropiche, per quello si deve togliere il contatto del provino con l'asta.

Si devono realizzare vari stage, fino a che il valore di B sia maggior o uguale a 0.9. Nel primo stage, con il drenaggio chiuso, si porta la pressione radiale a $\sigma_{radiale}=310$ kPa mantenendo costante la "back-pressure" ($\sigma_{backpressure}=56$ kPa, lettura finale durante la fase di flushing). Si aspetta che si stabilizzino questi valore nei controlli digitale GDS e quindi nella cella triassiale, e si procede a fare la lettura della pressione interstiziale, che in questo caso raggiunge un valore di µ=141.44kPa con una pressione radiale raggiunta dal GDS di $\sigma_{radiale}=288$ kPa. È di notare che i valori target messi sono diversi ai valori raggiunti nella strumentazione dovuto a le variazione nel sistema G.D.S. Allora si ottiene che:

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_{radiale}}$$
(3.3)
$$B = \frac{\Delta \mu}{\Delta \mu} = \frac{\mu_{raggiunto} - \mu_{iniziale}}{\mu_{raggiunto} - \mu_{iniziale}}$$

 $\sigma_{radiale\ raggiunta} - \sigma_{radiale\ iniziale}$

 $\Delta \sigma_{radiale}$

Dove

$$\Delta u = 141.44 - 46.1 = 95.34 kPa$$
$$\Delta \sigma_{radiale} = 288 - 112 = 176 kPa$$

Quindi

$$B = \frac{95.34}{176} = 0.54$$

I diversi stage realizzati sono riassunti nella Tabella 11. È importante risaltare che finito uno stage, al non avere un valore di B vicino a 0.9 si apre il drenaggio per applicare una "back-pressure" maggiore aumentandola in ogni stage di 200kPa, raggiunto questo valore si chiude il drenaggio e si aumenta la pressione radiale di 200kPa in ogni step.

		Stage 1	Stage 2	Stage 3	Stage 4
VALORI	µ _{iniziale} [kPa]	46.1	230	407.55	606.6
INIZIALI	σ _{radiale iniziale} [kPa]	112	320	496	688
	σ _{backpressure} [kPa]	56	240	407.55	624
VALORI	σ _{radiale} raggiunta[kPa]	288	496	688	896
RAGGIUNTI	µ _{raggiunta} [kPa]	141.44	364	580.41	801.47
	Δμ [kPa]	95.34	134	172.86	194.87
SKEMPTON	$\Delta \sigma_{radiale} [kPa]$	176	176	192	208
	В	0.54	0.76	0.90	0.94

 Tabella 11. Stage di saturazione

Raggiunto un valor di B=0.94 la fase di saturazione è completa e si apre il drenaggio ottenendo come ultima lettura della "back-pressure": $\sigma_{backpressure}$ =830kPa.

L'andamento di B in funzione della sovrappressione interstiziale si presenta nella Figura 52.



Figura 52. Variazione del parametro B di Skempton

3.2.6. Consolidazione

Durante questa fase si deve portare il provino alle condizioni in situ, all'essere prelevato ad una profondità di 74m e conoscendo il peso per unità di volume del terreno si può calcolare la tensione necessaria ad applicare. Si deve considerare che questa fase si fa in condizioni isotropiche, quindi la tensione radiale e assiale sono della stessa grandezza.

 $\sigma = z * \gamma$

$$\sigma = 74m * 20kN/m^3 = 1.6MPa$$

Il valore applicato durante la prova è di 1.8MPa per allontanarci della rottura, si aumenta di 2MPa la pressione applicata per dare un fattore di sicurezza ed evitare la rottura del campione durante la fase successiva di taglio.

All'essere una tensione elevata, si deve portare il provino a contatto con la pressa per evitare spostamenti, ormai le condizioni devono essere isotropiche, si applica una piccola tensione deviatorica di 50kPa.

La "back-pressure" deve rimanere costante durante questo stage, cioè di $\sigma_{backpressure}$ =830kPa ultimo valore raggiunto dalla fase di saturazione, e si impone un limite di 12 ore dove il provino deve raggiungere le pressioni radiale e assiale di 1.8MPa.

Le letture realizzati dal software durante questa fase corrispondono agli spostamenti radiali e assiali (local axial 1 e local axial 2), per ricavare le deformazioni assiali si utilizza solo la lettura degli spostamenti della local axial 2 in tanto la local axial 1 non ha realizzato misure corretti durante l'esecuzione della prova.

Durante questo stage le deformazioni osservati si presentano nella Figura 53, si osserva che le deformazioni assiali e radiali raggiungono l'equilibrio a fine stage.



Figura 53. Deformazioni radiali e assiali nel tempo, fase di consolidazione

L'andamento delle tensioni applicati nel tempo si osserva nella seguente Figura 54.



Figura 54. Tensioni raggiunti durante la fase di consolidazione

In Tabella 12 si osservano i valori finali ottenuti affine fase di Consolidazione.

σa [kPa]	σr [kPa]	σ _{back-pressure} [kPa]	er loc [%]	ea loc [%]
1856.412	1808	843	1.6182	1.4519

Tabella 12	. Valori	raggiunti	di te	ensioni	e de	eforma	zior	ni a	fine	Consoli	dazione
------------	----------	-----------	-------	---------	------	--------	------	------	------	---------	---------

3.2.7. Taglio

Nella fase di taglio, si porta il campione ad uno stato tensionale prima della rottura, applicando un andamento tensionale nel campo *s*-*t*, con *s* costante e *t* variabile fino ad un valore pari a $t=t_{rottura} * 0.7$, questo si realizza in condizione non drenate, quindi si chiude il drenaggio della "back-pressure".

Il criterio di rottura del terreno in studio non è stato possibile determinarlo dà la mancanza di dati e prove per la sua caratterizzazione, quindi a partire dei risultati ottenuti dalla prova triassiale TX_1 di rigonfiamento effettuata sul campione PE_SO2_14, la cui è arrivata a rottura durante le sperimentazioni realizzati è stato possibile determinare il valore delle tensioni radiali e assiali corrispondenti alla rottura del campione. Questo si osserva dalle curve che relazionano la tensione radiale e assiale con le deformazioni radiali e assiali rispettivamente.



Figura 55. Tensione assiale in funzione degli spostamenti assiali, prova TX_1.



Figura 56. Tensione radiale in funzione degli spostamenti radiali, prova TX_1.

Come valori di riferimento alla rottura si prende quindi le tensioni corrispondenti ad un cambiamento di pendenza marcato durante la fase di taglio nella prova TX_1, questi valori corrispondono dunque a:

σassiale [kPa]	1858.192
σradiale[kPa]	1392
4 44 U.D.1	
t rottura [kPa]	233.096

Dove *t* ed *s* a rottura sono:

$$s_{rottura} = \frac{\sigma_{assiale\ a\ rottura} + \sigma_{radiale\ a\ rottura}}{2}$$

$$t_{rottura} = \frac{\sigma_{assiale\ a\ rottura} - \sigma_{radiale\ a\ rottura}}{2}$$

Prendendo come riferimento questi valori, e sapendo che la tensione normale media (s) si mantiene costante al valore finale raggiunto durante la fase di consolidazione (essendo condizioni isotropiche $\sigma_a = \sigma_r = s$), l'andamento tensionale applicato al campione è:

$$s = 1830kPa$$

 $t = t_{rottura} * 0.7 = 230 * 0.7$
 $t = 160kPa$

Questo andamento tensionale si applica sempre in controllo delle deformazioni, si limita quindi la massima deformazione ad un 16%. I valori di s e t applicati corrispondono ad una tensione radiale e assiale che si deve raggiungere di:

$$\sigma_a = 1990 k P a$$

 $\sigma_r = 1670 k P a$

L'andamento delle tensioni nel campo s e t ottenuto durante questa fase si presenta nella Figura 57.



Figura 57. Andamento tensionale raggiunto durante fase di Taglio
Nella Figura 57, "TSP" corrisponde al "Total Stress Path" cioè l'andamento delle tensioni *s* e *t* totali. "TSP-pore pressure" corrisponde ai valori di *s* e *t* di tensioni totali meno il valore della pressione interstiziale iniziale al cominciare la fase di taglio ($\mu_{iniziale}$ =828.71kPa).

Finalmente "ESP" corrisponde al "Effective Stress Path" quindi i valori di "TSP-porepressure" meno un $\Delta\mu$ che equivale alla variazione della pressione interstiziale durante la prova, $\mu_{raggiunto}$ - $\mu_{iniziale}$.

Si osserva quindi come c'è un aumento delle pressione interstiziali positivo durante la fase non drenata.

Dallo stress path applicato si osserva quindi che c'è una variazione delle deformazioni assiali e radiali in confronto con la tensione deviatorica ($q=\sigma_a - \sigma_r$), questi deformazioni raggiungono deformazioni più elevati man mano che cresce la tensione deviatorica.



Figura 58. Variazione delle deformazioni durante la fase di Taglio

Raggiunti i valori target della tensione media normale (s) e della tensione di taglio (t), si comincia la fase di creep non drenato, dove si mantengono chiusi i drenaggi e le tensioni rimangono costanti, si aspetta che le deformazioni raggiungano l'equilibrio, nella Figura 59 si osserva che le deformazioni assiali vanno verso valori positivi (cioè si sta consolidando) mentre la deformazione radiale va verso valori negativi (quindi si sta rigonfiando il provino lateralmente), la variazioni delle deformazione al finale dello stage sono di meno del 0.01%.



Figura 59. Variazione delle deformazioni nel tempo

I valori di tensioni e deformazione ottenuti a fine stage di Taglio si presentano nella Tabella 14. Il valore raggiunto della sovrappressione interstiziale corrisponde ad uno dei valori di riferimento per la costruzione dell'equazione che descrive il rigonfiamento dal metodo di Barla. Questo valore della pressione interstiziale è positivo lo quale può indicare che non si sarà rigonfiamento del terreno.

Tabella 14. Valori raggiunti di tensioni e deformazioni fine Taglio

σa [kPa]	σr [kPa]	B.P [kPa]	ea ext* [%]	er loc [%]	ea loc [%]	Δμ [kPa]
1069.83	1679	1136	0.322	-0.0604	0.1075	86.96

*ɛa ext: è la deformazione assiale externa (misurata con lo spostamento del piatto)

3.2.8. Rigonfiamento

L'ultima fase della prova triassiale corrisponde alla fase del rigonfiamento. In questo stage si aprono i drenaggi permettendo che la sovrappressione interstiziale si dissipi e consentire al provino di rigonfiarsi o consolidarsi liberamente, anche si mantengono costanti le tensioni assiali e radiali raggiunti al finale dello stress path applicato durante la fase di taglio, il valore della tensione della

"back-pressure" si mantiene anche costante durante questo stage al valore finale raggiunto durante la fase di consolidazione. Questi valori di tensioni si presentano nella Tabella 15.

Tabella 15. Tensioni costanti durante la fase di rigonfiamento

σa [kPa]	σr [kPa]	σ _{back-pressure} [kPa]
1990	1670	840

Queste condizioni si lasciano fino ad avere un andamento delle deformazioni radiali e assiale costanti nel tempo come si osserva nella seguente Figura 60.



Figura 60. Andamento delle deformazioni nel tempo

Dalla Figura 60 si osserva come le deformazioni radiali vanno verso valori negativi, quindi c'è un rigonfiamento durante più meno un periodo di 10 giorni, mentre assialmente si consolida il provino.

La curva della deformazione volumetrica nel tempo, dove $\varepsilon_v = \varepsilon_a - 2 * \varepsilon_r$, riporta come i valori della deformazione ε_v vanno verso i positivi, quindi in corrispondenza al valore ultimo dell'eccesso della pressione interstiziale il quale è positivo ($\Delta\mu$ =86.96kPa), c'è un comportamento di consolidazione del provino(Vedere Figura 61). Nella Figura 62, si osserva la dissipazione dell'eccesso di pressioni interstiziale poiché i valori vanno verso valori negativi.



Figura 61. Deformazione volumetrica nel tempo



Figura 62. Variazione della pressione interstiziale nel tempo

Finalmente dalla prova triassiale realizzata è stato possibile osservare come il campione si consolida e non presenta deformazione di rigonfiamento durante l'ultima fase realizzata. Questo va in linea con i risultati della fase di taglio dove si ha ottenuto un eccesso di pressione interstiziale positivo. Comunque, i valori finali ottenuti durante la fase di taglio dell'eccesso di pressione interstiziale e la deformazione volumetrica finale durante la fase di rigonfiamento, permettono di costruire l'equazione caratteristica del rigonfiamento seguendo il metodo di Barla, questo si deve complementare con altri prove triassiale di rigonfiamento per avere un andamento più reale del fenomeno rigonfiante nel terreno in studio.

Nella fine della fase di rigonfiamento i valori di tensioni e deformazioni raggiunti si presentano nella Tabella 16.

σa [kPa]	σr [kPa]	B.P [kPa]	EV [%]	er loc [%]	ea loc [%]
1990.703	1664	832	0.0691	-0.0558	0.1807

Tabella 16. Valori riferimento fase di rigonfiamento

3.3. Prova di creep in cella triassiale

La prova di creep si è realizzata in cella triassiale con l'attrezzatura HPTA descritta prima, ma in condizioni asciutte (non si applica la back pressure e non ci sono variazioni della pore pressure), con tre diversi fasi. Prima si è realizzato la fase di consolidazione, dove si arrivano alle condizioni geostatiche in condizioni drenanti per l'area, poi si realizzano due stage di carico, uno al 50% della rottura e l'altro al 70% della rottura, condizioni che si fermano quando le deformazioni diventano costanti. I dati generali dei campioni utilizzati per le due prove di creep realizzati si presentano nella Tabella 17.

Tabella 17. Prova di creep caratteristiche campioni

Campione	PE_S02_C17	PE_S02_C19
Nome prova	TX_3_Creep	TX_4_Creep
Peso provino umido iniziale [g]	418.7	430.4
Peso provino umido finale [g]	414.3	439.4
Peso provino secco [g]	368.9	406.5

La preparazione dei campioni segue la stessa metodologia dalla prova triassiale HPTA per il rigonfiamento. Comunque, l'impostazione del provino nella cella triassiale è diversa in quanto a che è in condizioni asciutte, non si collocano gli strisce laterali nel provino e si chiude la pore pressure

mentre la back pressure rimane aperta per il drenaggio dell'area nella prova. Le diversi fasi realizzati si descrivono a continuazione. L'impostazione del campione si riporta nella Figura 63.



Figura 63. Impostazione del provino nella cella triassiale

3.3.1. Consolidazione

Prima di cominciare la consolidazione il provino deve mettersi a contatto, si applica quindi una tensione radiale di 150kPa per evitare che il provino si muova durante il sollevamento del piatto, poi si applica un target di 0.05kN per assicurare che il provino sia a contatto.

Per la fase di consolidazione si mette un target di 1000kPa di tensione radiale, valore corrispondente alla tensione efficace geostatica del campione prelevato ad una profondità di più meno 85m, quindi all'essere la falda a 15m del piano campagna e conoscendo il peso specifico del terreno si ricava una tensione efficace di più meno 1000kPa, anche si applica una tensione deviatorica di 30kPa, valore che assicura il contatto del provino. Una volta applicato il carico si aspetta a che le deformazioni radiali e assiali siano costanti per eseguire la fase di carico. Nelle seguenti figure si osserva lo stato tensionale raggiunto nel tempo e la variazione delle deformazioni radiali e assiali nel tempo per entrambi prove realizzate.



Figura 64. Variazione delle tensioni e deformazioni nel tempo, fase di consolidazione, TX_3_Creep



Figura 65. Variazione delle tensioni e deformazioni nel tempo, fase di consolidazione, TX 4 Creep

3.3.2. Fase di carico

Nella fase di carico si deve portare le tensioni al 50% e 70% della rottura del campione mantenendo costante la tensione radiale (σ_r =1000kPa), per definire quindi il criterio di rottura per questa prova è

stato possibile avere dati di prove triassiali e di taglio effettuati con il terreno in studio, questi dati si riportano in allegati con il rispettivo calcolo delle tensioni assiali che si devono raggiungere.

Quindi si fanno due fasi di carico, le quali finiscono quando le deformazioni per creep sono costanti nel tempo. È importante notare il tempo nel quale si deve raggiungere il target imposto, per permettere di stabilizzare le pressioni senza portare il provino a grandi deformazioni.

Il tempo interviene dunque come una variabile indipendente nell'evolvere dello stato tensionedeformazione di fenomeni viscosi nel terreno, quindi del creep, senza variazione dello stato tensionale. Nella fase di carico si genera una pressione deviatorica che sollecita il terreno a taglio.

3.3.2.1. Tensioni al 50% del carico di rottura

Il target imposto per raggiungere il 50% del carico di rottura si presenta nella Tabella 18. Il tempo imposto per raggiungere questo target è di 120minuti.

Tabella 18. Tensioni applicati per raggiungere il 50% del carico di rottura

σr [kPa]	1000
σa [kPa]	1580

Come si ha detto prima la deformazione per creep è una deformazione tempo dipendente, quindi, si lasciano costanti le tensioni raggiunti per un periodo di tempo (Vedere Figura 66 e 67) e si lascia avanzare il processo di creep, cioè deformazioni assiali e radiali crescono nel tempo e sono permanenti. In totale la fase di carico al 50% del carico di rottura per la prova TX_3_Creep ad avuto una durata di più meno 4 giorni mentre che per la prova TX_4_Creep ad avuto una durata di 6 giorni.



Figura 66. Variazione delle tensioni nel tempo al 50% carico rottura, TX_3_Creep



Figura 67. Variazione delle tensioni nel tempo al 50% carico rottura, TX_4_Creep

3.3.2.2. Tensioni al 70% del carico di rottura

Le tensioni applicati per raggiungere il 70% del carico di rottura si riportano nella Tabella 19.

Tabella 19. Tensioni applicati per raggiungere il 70% del carico di rottura

σr [kPa]	1000
σa [kPa]	1800

Una volta raggiunto il target imposto si lasciano evolvere le deformazioni nel tempo, fino a che questi siano costanti, in questo caso per la prova TX_3_Creep l'equilibrio si ha raggiunto in 3 giorni, invece per la prova TX_4_Creep in 10 giorni.



Figura 68. Variazione delle tensioni nel tempo al 70% carico rottura, TX_3_Creep



Figura 69. Variazione delle tensioni nel tempo al 70% carico rottura, TX 4 Creep

3.3.3. Interpretazione dei risultati

Le due prove di creep realizzati in parallelo permettono di determinare l'andamento delle deformazioni nel tempo, in Figura 70 e 71 si osserva l'evolvere delle deformazione assiali e radiali di creep nel tempo, si tolgono quindi le deformazioni elastiche e si diagramma solo la deformazione dovuta al creep. Questi risultati mostrano come per un 50% del carico di rottura le deformazioni raggiunti dal provino sono maggiori che per un 70% del carico di rottura



Figura 70. Variazione delle deformazioni assiali nel tempo



Figura 71. Variazione delle deformazioni radiali nel tempo

Nella Figura 72 si riporta la deformazione volumetrica del provino nel tempo, avvendo quindi una consolidazione del provino in entrambi prove e verificando quindi come le deformazioni raggiunti nella prova TX_3_ Creep sono sempre maggiori.



Figura 72. Variazione delle deformazioni volumetriche nel tempo

Le due prove realizzati nelle stesse condizioni prendono valori di deformazione diversi e anche raggiungono l'equilibrio in diversi istanti. La prova TX_3_Creep presenta sempre deformazioni volumetriche più elevati dalla prova TX_4_Creep, anche questa prova, TX_3_Creep, arriva all'equilibrio in un tempo minore.

L'evolvere delle deformazioni con l'incremento delle tensioni si presenta nelle Figure 73 e 74, dove si osserva in primo istante l'aumento delle deformazioni elastiche e poi una volta raggiunto il valore target delle tensioni si presenta la deformazioni di creep, questo andamento si da tanto nella fase di carico del 50% come del 70% del carico di rottura.

All'applicare il carico al 70% del carico di rottura le deformazioni elastiche sono minori e il processo di creep invece continua nel tempo a tensioni costanti.



Figura 73. Diagramma tensioni-deformazioni fase di carico, TX_3_Creep



Figura 74. Diagramma tensioni-deformazioni fase di carico, Tx_4_Creep

Dal diagramma tensioni-deformazioni assiali è possibile ricavare l'andamento del modulo elastico tangente nella prima fase di carico, cioè al 50% del carico di rottura. Si determina quindi la pendenza della retta tangente a vari copie di punti nel diagramma, ottenendo così l'andamento del modulo elastico. Nella Figura 75 si presenta l'andamento del modulo Et con le deformazioni assiali.



Figura 75. Andamento modulo elastico, TX_3_Creep



Figura 76. Andamento modulo elástico, TX_4_Creep

Capitolo 4 Simulazione numerica del problema rigonfiante

Questo capitolo ha come obiettivo realizzare la simulazione numerica del fenomeno rigonfiante in una galleria mediante il metodo di Wittke. L'analisi si farà con il codice di calcolo FLAC2D (Fast Lagrange Analysis of Continua) che permette di simulare le tensioni e deformazioni prodotti dal rigonfiamento nella galleria.

4.1. Codice di calcolo FLAC2D

FLAC2D è un programma numerico in 2 dimensioni che si basa sulle differenze finiti per risolvere problemi di ingegneria meccanica e geotecnica, è stato sviluppato dal gruppo ITASCA Consulting Group nel 1986. Il software permette di rappresentare i materiali per elementi in una griglia la cui si adatta alla forma del oggetto a modellare, questi materiali seguono sia un comportamento elastico oppure plastico, con una relazione tensione-deformazione lineare o non lineare, anzi che permette di modellare grandi deformazioni e il collasso del materiale.

All'essere un programma alle differenze finite utilizza uno schema di soluzione esplicito dipendente dal tempo, dove ogni derivata nelle equazioni che governano il problema sono sostituite per una espressione algebraica scritta in termini delle variabili in gioco (spostamenti, tensioni) in punti discreti nello spazio. Si devono risolvere quindi queste espressioni algebraiche, rigenerando l'equazione alle differenze finite in ogni step di calcolo. Utilizza anche le equazioni dinamiche del moto per risolvere il problema. In generale questi equazioni del moto sono utilizzate per derivare le velocità e le tensioni dalle deformazioni, utilizza piccoli "timestep", dove in ogni step le equazioni dell'equilibrio dinamico sono convolti per ottenere le velocità e gli spostamenti dalle tensioni e le forze, dopo di che le deformazioni sono derivati dalle velocità e nuovi tensioni dalle deformazioni. Il ciclo di calcolo utilizzato in ogni step si presenta nella Figura 77.

Il codice di calcolo FLAC2D permette anche di definire nuove variabili e funzioni mediante FISH, questo programma permette all'usuario di creare nuovi funzioni e implementare leggi costitutivi che non stanno presenti in FLAC2D, vuol dire che si può adattare il software alle diverse problematiche che si presentono.



Figura 77. Ciclo di calcolo esplicito effettuato dal codice FLAC 2D (Damping, 2015)

4.2. Caratteristiche della galleria modellata

In questa sezione si intende di caratterizzare la geometria della galleria da modellare anzi che le proprietà geo meccaniche del terreno. Dopo di che si farà una descrizione del processo costruttivo della galleria il quale sarà incluso nella realizzazione del modello.

4.2.1. Geometria

La sezione della galleria in studio consiste in una sezione a ferro di cavallo, con tre diversi cavi a forma circolare. La parte superiore del cavo con un raggio di 6.45m, divide la sezione a metà secondo l'asse orizzontale, mentre nei piedritti la sezione circolare a un raggio di 11.9m misurati dall'asse orizzontale con rispetto allo spessore del rivestimento. Nella parte inferiore della galleria c'è una sezione circolare di raggio 10m misurati a 1.3m della calotta. Nella Figura 77 si presenta la geometria della galleria con dimensioni in metri.



Figura 78. Geometria della galleria. Dimensioni in [m]

Una volta definita la geometria della galleria, si costruisce la sezione in Autocad e si importa nel programma FLAC2D. All'essere simmetrica con rispetto all'asse verticale, si rappresenta la metà della sezione in FLAC2D agevolando i tempi di calcolo del software.

4.2.2. Proprietà del terreno

Per la realizzazione del modello, si ha un solo strato di suolo con le seguenti proprietà.

Proprietà del terreno		
γ [kN/m3]	20	
c' [kPa]	40	
Φ [°]	18	
k _{ox}	0.8	
k _{oz}	0.8	
Y	0.25	
E [MPa]	78	

Tabella 20. Caratteristiche meccaniche del terreno

Queste proprietà meccaniche vengono riportati nel modello con l'ausilio dell'interfaccia su FLAC2D.

4.2.3. Sequenza di costruzione

La costruzione della galleria consiste nello scavo di questa ad una profondità di 80m dal piano campagna fino al baricentro della galleria, tenendo in conto che la falda si trova a 15m dal piano campagna. Per la modellazione si considera la geometria della galleria prima descritta e la geometria del rivestimento. Quest'ultimo ha uno spessore di 1m e consiste in una sezione di calcestruzzo con un peso specifico di γ =22kN/m³, le proprietà meccaniche del rivestimento si riportano nella Tabella 21.

Proprietà del rivestimento		
Spessore [m]	1	
E [GPa]	150	
Y	0.25	
γ [kN/m3]	22	

Tabella 21. Caratteristiche del rivestimento

Il rivestimento si modella con il criterio di Mohr-Coulomb, tenendo conto che la sezione è composta di acciaio e calcestruzzo, le caratteristiche di deformabilità del rivestimento sono corrispondenti ai parametri di un materiale composito, cioè di una sezione omogenizzata. Si prendono valori di riferiemento per la coesione e l'angolo di resistenza al taglio.

$$c_0 = 9MPa$$

 $\varphi = 17^\circ$
 $\sigma_t = 13MPa$

L'installazione del rivestimento si realizza quando c'è un 40% del rilascio delle tensioni nel terreno dopo lo scavo, questo vuol dire che una volta le tensioni geostatiche arrivano al 60% del valore iniziale si fa la installazione del rivestimento. Dopo di che si ha il rilascio totale delle tensioni (100% dello scavo).

L'interfaccia terreno-rivestimento si caratterizza da una rigidezza normale e una rigidezza a taglio corrispondenti a:

$$k_n = 1e11 Pa/m$$
$$k_T = 1e10 Pa/m$$

E l'angolo d'attrito fra questi due materiale è pari a 2/3 dell'angolo di attrito del terreno, cioè:

$$\varphi = \frac{2}{3} * 18^\circ = 12^\circ$$

4.3. Realizzazione del modello su FLAC2D

Una volta descritte le caratteristiche della galleria e del terreno per la modellazione, si procede a costruire il modello considerando la galleria come profonda, significa che le tensioni iniziali sono uguali su tutto il modello, questi non variano con la profondità.

L'intero codice di calcolo realizzato per fare la modellazione si presenta nella sezione di Allegati.

4.3.1. Impostazione della geometria

La geometria della galleria costruita su Autocad si importa su FLAC2D nel comando "Virtual-Geometry builder". Si realizza quindi solo metà sezione all'essere simmetrica con rispetto all'asse verticale e si importa anche la geometria del rivestimento. Dopo di che viene definito il dominio del modello, in questo caso si costruisce un dominio di 200mx100m, dimensioni scelti per evitare che la soluzione tensione-deformazione sia diversa per le condizioni al contorno imposti. Il codice di calcolo FLAC2D lavora suddividendo il dominio in blocchi con quattro spigoli, si tracciano quindi linee secondarie per costruire questi blocchi tenendo in conto anche che questi permettono di fare enfasi nelle zone di interesse ed avere risultati più precise in queste zone (incrementando la densità della mesh). Il baricentro della galleria si trova quindi a 100m del contorno superiore ed inferiore del dominio. Nella Figura 78 si riporta il modello realizzato.



Figura 79. Modello della galleria su FLAC2D

In totale si costruiscono 16 blocchi i quali permettono anche di variare la densità e elementi della mesh.

4.3.2. Generazione della mesh

Definito il modello si imposta la mesh nell'intero dominio, per fare ciò si deve considerare una mesh più densa negli vicinanze della galleria, zona di interesse per l'analisi tensione-deformazione che si sviluppa e per lo studio del rigonfiamento. Il modello è suddiviso in regioni applicando una unione tra le diverse linee secondarie, operazione che permette di applicare manualmente moltiplicatori di elementi in ogni zona. Si applica quindi nella regione del lining una mesh di 10x10 elementi, e nelle regioni sul contorno della galleria, invece man mano che si allontana della galleria gli elementi della mesh diventano più grandi. Nella Figura 79 e 80 si osserva la mesh imposta sul modello.



Figura 80. Griglia nel contorno del cavo



Figura 81. Dominio di calcolo

4.3.3. Condizioni al contorno

Il modello costruito della galleria all'essere considerata profonda ha come condizioni al contorno le tensioni geostatiche iniziali sui bordi orizzontali e sul bordo verticale destro del modello, quindi si applica una pressione costante su questi contorni, la pressione viene applicata sui nodi di ogni elemento al bordo e corrispondono alle tensioni iniziali in direzione x per il bordo verticale destro e la tensione in y per i contorni orizzontali rispettivamente. Sul contorno sinistro, dove si trova la sezione

della galleria s'impostano carrelli che impediscono i movimenti in direzione x, questo in quanto a che al modellare solo metà sezione con rispetto all'asse verticale si deve solo permettere il movimento nella direzione y degli elementi. I valori delle tensioni applicati corrispondono alle tensioni geostatiche per una profondità di z=80m, distanza dal baricentro della galleria fino al piano campagna. I valori ricavati si presentano a continuazione:

 $\sigma_v = \gamma . z = 20 * 80 = 1600 \ kPa$

$$\sigma_x = \sigma_y \cdot k_{0x} = 1600 * 0.8 = 1280 kPa$$

In Figura 81 si presenta le condizioni al contorno applicati.



Figura 82. Condizioni al contorno

4.4. Fasi di calcolo

Costruito il modello su FLAC2D si prosegue a definire le diversi fasi di calcolo. In ogni fase si definì la procedura realizzata e i risultati ricavati sull'interfaccia di calcolo di FLAC2D. In totale si definiscono 4 fasi di calcolo che permettono di simulare la fase di scavo della galleria, l'installazione del rivestimento e il fenomeno rigonfiante. Quest'ultima fase sarà valutata solitamente col metodo di Wittke in quanto a che si conosce il parametro di rigonfiamento k del terreno ricavato dalle prove edometriche. Nella Tabella 23 si presentano le diversi fasi realizzati.

Fasi di calcolo	Descrizione
Fase 1	Condizioni iniziali, geostatiche
Fase 2	Rilascio tensionale del 40% dopo lo scavo
Fase 3	Intsallazione del lining e rilascio tensionale del 100%
Fase 4	Rigonfiamento con il metodo di Wittke

Tabella 22. Fasi di calcolo

4.4.1. Fase 1: Condizioni iniziali geostatiche

Si applicano quindi le proprietà meccaniche sul terreno (Vedere Figura 82) e condizioni iniziali di tensioni. Le tensioni iniziali corrispondono quindi alle tensioni nella direzione $x, y \in z$ che sull'ipotesi di galleria profonda sono equivalenti alle tensioni ad una profondità di 80m. Si applica questi tensioni sull'intero dominio di maniera costanti. Nella Figura 83 si osserva un esempio di applicazione delle tensioni nella direzione y. Lo stato tensionale iniziale è quindi:

 $\sigma_v = \gamma . z = 20 * 80 = 1600 \ kPa$

 $\sigma_x = \sigma_y. k_{0x} = 1600 * 0.8 = 1280 kPa$

 $\sigma_z = \sigma_y \cdot k_{0z} = 1600 * 0.8 = 1280 kPa$

lame Terreno	
Model	🗇 Elastic 💿 Mohr-Coulomb 🔿 Ubiquitous 🔘 Modified Hoek-Brown
Mass-Density	Plastic Properties
[kg/m3] 2000.0	Cohesion [Pa] 40000.0
Elastic Properties	Tension [Pa] 0.0
Bulk modulus [Pa] 5.2E7	Angles: (Degrees)
Channed due [Pa] 0.1057	Friction angle 18.0
Shear modulus [Pa] 3.12E7	Dilation angle 0.0
Alternate input	Joint Properties
Elastic modulus [Pa] 7.8E7	
Poisson's ratio 0.25	1Coberion [Da] 0.0
	Teorion [Pa]0.0
	1Dilation angle (Deg.) 0.0
	Juliation angle (Deg.) 0.0

Figura 83. Proprietà del terreno

	1111111111111	ŕ
🔡 yy-cor	nponent of stress 🛛 🔜	8
Value		þ
syy [Pa] 1	600000	P
Action	X-Y variation	t
💿 Set	Variation	
🔘 Add	x	
🔘 Mult	У	ŀ
ОК	Cancel Help	~

Figura 84. Applicazione delle tensioni iniziali in direzione y

La presenza della colonna d'acqua si modella impostando un valore costante sull'intero modello della pressione interstiziale sapendo che la falda si trova a 15m dal piano campagna e che il baricentro della galleria è a 80m del piano campagna, si calcola quindi la pressione interstiziale per un valore di $z_w=65m$.

$u = \gamma_w \cdot z_w = 10 * 65 = 650 kPa$

Si da anche la completa saturazione del dominio, impostando una saturazione fissa durante tutta la modellazione. Come l'interesse di questa modellazione è il comportamento rigonfiante, le prime fasi realizzati si devono fare in condizioni non-drenanti per permettere di sviluppare una sovrappressione interstiziale attorno alla galleria, per fare ciò si impedisce il flusso d'acqua durante le prime 3 fasi della modellazione e per l'ultima fase di rigonfiamento.

Come altra condizione si ha l'impostazione di una pressione interstiziale fissa sui bordi esteriori del modello, cioè si fissa nel bordo superiore, inferiore e destro la pressione interstiziale in quanto non si aspetta una variazione della pressione interstiziale così lontano dalla galleria.

Al risolvere l'equilibrio interno iniziale si ottengono le tensioni geostatiche sull'intero modello e deformazioni nulle.

4.4.2. Fase 2: Rilascio tensionale dovuto allo scavo della galleria

Per la simulazione dello scavo della galleria si applica in primo luogo una Fish function chiamata "Find mark points" che permette di individuare lo stato tensionale iniziale sul contorno della galleria e salvare questi valori in nuovi variabili creati sul programma.

Dopo lo scavo, si applica quindi una seconda Fish function chiamata "Relax factor" la quale applica un fattore di riduzione sulle tensioni iniziale nel contorno della galleria, permettendo così di simulare il rilascio tensionale dopo lo scavo.

Come l'installazione del lining si da quando c'è una riduzione del 40% delle tensioni, le tensioni applicati sul contorno equivalgono ad un 60% di questi. In generale si ha che le tensioni applicati dipendono dalla seguente equazione.

$\sigma_{finale} = \sigma_{iniziale}$. percentuale di tensione

La percentuale di tensione applicata è quindi pari a 0.6. Lo stato tensionale totale raggiunto nella direzione x e y si riporta in Figura 84 e 85.



Figura 85. Tensioni in *y*



Figura 86. Tensioni in x

Si osserva una diminuzione delle tensioni verticali attorno alla galleria e anche una diminuzioni delle tensioni orizzontali nei piedritti, invece si presenta un aumento delle tensioni in direzione x nella calotta ed arco rovescio della galleria.

La deformazione sul cavo della galleria ottenuta dopo il rilascio di un 40% delle tensioni si riporta in Figura 86, il massimo spostamento nel cavo prende un valore pari a 19 cm.



Figura 87. Deformata del cavo dopo un rilascio del 40% delle tensioni

La magnitudo degli spostamenti tanto in direzione x e y si presentano in Figura 87 e 88. I valori delle massime deformazioni in direzione y si presentano in calotta, mentre che in direzione x nei piedritti.



Figura 88. Deformazione in y dopo il rilascio tensionale del 40%



Figura 89. Deformazione in x dopo il rilascio tensionale del 40%

Nella Tabella 24 si presentano gli spostamenti dovuti allo scavo e rilascio delle tensioni nelle zone più sollecitate.

Sezzione	Direzione	Spostamenti [cm]
Piedritto	Direzione x	-15.22
Calotta	Direzzione y	11.12
Arco Rovescio	Direzione y	-10.59

Tabella 23. Spostamenti nella fase 2 di calcolo

4.4.3. Fase 3: Installazione del rivestimento

Raggiunto un 60% delle tensioni iniziali sul contorno del cavo, è possibile inserire il rivestimento con le caratteristiche già descritti e la geometria previamente definita nella Figura 84. Si modella il rivestimento con il criterio di Mohr Coulomb e si aggiunge l'interfaccia tra il terreno e la struttura come "unglued".

Il lining si carica di un 60% delle tensioni rimanente nel contorno della galleria.

Il rivestimento si crea impostando saturazione e pressione interstiziale nulla su di questo e fissando anche che la pressione interstiziale non varie sul rivestimento.

Una volta installato il lining, si rilasciano in un 100% le tensioni applicando di nuovo la Fish function "Relaxfactor" con un fattore di 0% sul contorno della galleria. Le tensioni sul rivestimento si presentano nelle Figure 89 e 90.



Figura 90. Tensioni totali in y



Figura 91. Tensioni totali in x

Nelle Figure 89 e 90 si osserva quindi le zone più sollecitate nel rivestimento dovuto allo scarico totale delle tensioni nel contorno della galleria. C'è un incremento delle tensioni totali in direzione y nei piedritti della galleria e un incremento nella calotta ed arco rovescio delle tensioni totali in x.

Su questi 3 fasi di calcolo realizzati si ha lavorato in condizioni non drenante, per valutare la sovrappressione interstiziale attorno alla galleria. Si osserva quindi nella Figura 91 la pressione interstiziale che si sviluppa dopo il rilascio del 100% delle tensioni. Nel contorno della galleria si ha una diminuzione della pressione interstiziale iniziale μ_0 , quindi c'è una sovrappressione negativa che secondo il metodo di Barla indica una zona di rigonfiamento di tipo meccanico. I valori raggiunti di pressioni interstiziali in questa fase nel contorno della galleria sono approssimatamene di 250kPa, quindi la sovrappressione interstiziale $\Delta \mu$ è di:

 $\Delta \mu = \mu_{raggiunto} - \mu_{iniziale}$

$$\Delta \mu = 250 kPa - 650 kPa$$
$$\Delta \mu = -400 kPa$$



Figura 92. Pressione interstiziale fine scavo

Comunque, al solo valutare il rigonfiamento con il metodo di Wittke, l'indicatore della sovrappressione interstiziale non entrerà in gioco per calcolare le deformazioni dovute per rigonfiamento con questo metodo, ma si spetterebbe che le deformazioni per rigonfiamento nel rivestimento siano maggiori in queste zone.

4.4.4. Fase 4: Rigonfiamento

Seguendo il metodo di Wittke spiegato nel Capitolo 2 sezione 2.4.2., il rigonfiamento si da quando il primo invariante delle tensioni iniziali e maggiore al primo invariante delle tensioni raggiunto dopo lo scavo. Questo vuol dire che si presentano delle deformazioni di rigonfiamento e dunque un incremento delle tensioni quando c'è una diminuzione delle tensioni dopo lo scavo. La relazione che permette di calcolare le deformazioni per rigonfiamento è:

$$I_{1,\epsilon q} = K_q \cdot \log\left(\frac{I_{1,\sigma} \frac{1-v}{1+v}}{I_{1,\sigma 0} \frac{1-v}{1+v}}\right)$$

Dove k è il coefficiente di rigonfiamento che è pari a 7.655, valore ricavato delle prove edometriche. Questa condizioni si presenta, come si ha detto prima quando:

$$I_{1,\sigma 0} > I_{1,\sigma}$$

$\left|\sigma_{y0} + \sigma_{x0} + \sigma_{z0}\right| > \left|\sigma_{y} + \sigma_{x} + \sigma_{z}\right|$

$$|1600kPa + 1280kPa + 1280kPa| > |\sigma_y + \sigma_x + \sigma_z|$$

$$4160kPa > \left|\sigma_y + \sigma_x + \sigma_z\right|$$

Per determinare le aree dove si può avere rigonfiamento e applicare le deformazioni rispettivi e l'aumento delle tensioni, si crea una fish function chiamata "Wittke" dove si impongono questi condizioni nell'intero dominio del modello, senza considerare il rivestimento, quindi nelle zone dove questa ipotesi sia vera, si calcola un aumento delle deformazioni dovute al rigonfiamento. Questo aumento fa si che si producano degli incrementi delle tensioni, una volta identificate le aree dove si abbia rigonfiamento, si aumentano le tensioni seguendo le equazioni già descritte nel Capitolo 2.

$$\Delta \sigma_x = -\left[K + \frac{G}{3}\right] \cdot \varepsilon_{vol}$$
$$\Delta \sigma_y = -\left[K + \frac{G}{3}\right] \cdot \varepsilon_{vol}$$
$$\Delta \sigma_z = -\left[K - \frac{2G}{3}\right] \cdot \varepsilon_{vol}$$

Le zone dove si producono questi deformazioni per rigonfiamento si presentano in Figura 92. Si osserva una corrispondenza con le zone dove si ha una sovrappressione interstiziale negativa, comunque le zone individuate con il metodo di Wittke risultano molto maggiori e estense.



Figura 93. Zone di rigonfiamento individuati con il metodo di Wittke

Come risultato si ha un incremento delle tensioni nel rivestimento (Vedere Figura 93 e 94) soprattutto localizzate nel piedritto e nella base della galleria. Si ha anche l'aumento delle deformazioni in x e y in queste zone dove si presenta l'incremento delle tensioni.



Figura 94. Tensioni in y per rigonfiamento



Figura 95. Tensioni in x per rigonfiamento



Figura 96. Spostamenti in y per rigonfiamento



Figura 97. Spostamenti in *x* per rigonfiamento

Infine, la deformata del cavo si presenta in Figura 97, si ha l'innalzamento dell'arco rovescio della galleria prodotto dal rigonfiamento del terreno. Questo va in corrispondenza con le zone dove si ha individuato il rigonfiamento e con l'andamento dei vettori di spostamenti presenti in Figura 98.



Figura 98. Deformazione del cavo per rigonfiamento



Figura 99. Andamento vettori di spostamenti

4.5. Interpretazione dei risultati

In questa sezione si farà una comparazione fra i risultati della Fase 3 e 4 di calcolo nel software FLAC2D con lo scopo di avere un ordine di grandezza delle deformazioni e sollecitazioni indotti nel rivestimento prodotti dal rigonfiamento. Per fare ciò si ricavano i momenti, forze normale e di taglio nelle zone di interesse del rivestimento.

Le sollecitazioni e gli spostamenti si valutano nelle punti presenti in Figura 99.



Figura 100. Sezioni di calcolo delle sollecitazioni e deformazioni

Per determinare sollecitazioni parte dalla relazione fra lo sforzo normale le si forza normale e il momento. Anche dalla relazione fra lo sforzo σ_{xx} e la σ_{xy} con la forza di taglio.

$$N = \sum_{i=1}^{10} \sigma_{xx_i} \cdot l_i$$
$$M = \sum_{i=1}^{10} N_i \cdot b_i$$
$$T = \sum_{i=1}^{10} \sigma_{xy_i} \cdot l_i$$

Dove *i* è il numero di elementi che compongono la sezione analizzata, in questo sono 10 elementi.

 l_i è lo spessore dell'elemento analizzato, il cui è costante è pari a 0.1m, in quanto a che lo spessore del rivestimento è 1m.

 b_i è il braccio di ogni forza normale di ciascun elemento per calcolare il momento totale della sezione in analisi.

Quindi con l'ausilio del software FLAC2D si ricavano le tensioni in ogni elemento per finalmente calcolare le sollecitazioni. Prima si presentarono i valori delle sollecitazioni per la fase di calcolo 3, cioè quando s'installa il rivestimento e si ha il rilascio del 100% delle tensioni, e poi in Tabella 26 le sollecitazioni in fase di rigonfiamento.

Sezion 1: Calotta					
Elemento	σxx [Pa]	σxy [Pa]	N[kN/m]	M[kN.m/m]	T [kN/m]
1	-1.94E+07	-3.80E+06	-1939	-872.55	-379.7
2	-2.29E+07	3.82E+06	-2289	-801.15	381.5
3	-6.11E+06	1.85E+06	-611.4	-152.85	185.1
4	-8.05E+05	4.06E+05	-80.48	-12.072	40.58
5	-5.31E+05	3.34E+05	-53.09	-2.6545	33.44
6	-4.43E+05	2.49E+05	-44.31	2.2155	24.91
7	-3.80E+05	1.80E+05	-38.01	5.7015	18
8	-3.48E+05	1.25E+05	-34.79	8.6975	12.46
9	-3.30E+05	7.34E+04	-32.98	11.543	7.337
10	-3.08E+05	2.48E+04	-30.77	13.8465	2.476
		TOTALE	-5153.83	-1799.27	326.103

 Tabella 24. Sollecitazioni nel rivestimento Fase 3 di calcolo
Sezione 2: Piedrito					
Elemento	σxx [Pa]	σxy [Pa]	N[kN/m]	M[kN.m/m]	T [kN/m]
1	-2.01E+05	8.01E+05	-20.07	-9.0315	80.07
2	-3.88E+05	2.58E+05	-38.81	-13.5835	25.81
3	-4.38E+05	1.23E+05	-43.84	-10.96	12.34
4	-6.14E+05	5.14E+04	-61.37	-9.2055	5.14
5	-8.08E+05	5.36E+04	-80.77	-4.0385	5.361
6	-9.54E+05	1.22E+05	-95.4	4.77	12.24
7	-1.05E+06	2.11E+05	-105	15.75	21.1
8	-1.04E+06	2.86E+05	-103.7	25.925	28.58
9	-9.88E+05	2.27E+05	-98.77	34.5695	22.74
10	-1.01E+06	2.53E+05	-101.1	45.495	25.25
		TOTALE	-748.83	79.6905	238.631

Sezione 3: Arco rovescio					
Elemento	σxx [Pa]	σxy [Pa]	N[kN/m]	M[kN.m/m]	T [kN/m]
1	-1.60E+06	-2.48E+05	-159.9	-71.955	-24.8
2	-2.71E+06	-2.46E+04	-270.8	-94.78	-2.464
3	-1.91E+06	-1.35E+04	-191.3	-47.825	-1.349
4	-1.04E+06	5.01E+03	-104.1	-15.615	0.5014
5	-5.02E+05	5.86E+03	-50.23	-2.5115	0.5863
6	-2.71E+05	-1.66E+04	-27.07	1.3535	-1.66
7	-1.99E+05	-7.80E+03	-19.93	2.9895	-0.7796
8	-2.30E+05	8.40E+03	-23.04	5.76	0.8403
9	-1.73E+07	-2.50E+06	-1728	604.8	-250.2
10	-2.00E+07	1.63E+06	-2002	900.9	162.8
		TOTALE	-4576.37	1283.1165	-116.525

Tabella 25. Sollecitazioni nel rivestimento Fase 4 di calcolo

Sezion 1: Calotta					
Elemento	σxx [Pa]	σxy [Pa]	N[kN/m]	M[kN.m/m]	T [kN/m]
1	-2.28E+07	9.76E+05	-2276	-1024.2	97.64
2	-2.30E+07	1.01E+06	-2304	-806.4	100.8
3	-1.21E+07	7.95E+05	-1208	-302	79.47
4	-1.61E+04	-3.29E+03	-1.605	-0.24075	-0.3288
5	-1.30E+03	6.57E+01	-0.1297	-0.00649	0.006573
6	-2.03E+03	1.29E+02	-0.2034	0.01017	0.01285
7	-3.39E+03	1.55E+02	-0.3393	0.050895	0.01548
8	-5.11E+03	2.35E+02	-0.5107	0.127675	0.02346
9	-7.00E+03	4.77E+02	-0.7	0.245	0.04772
10	-9.22E+03	5.43E+02	-0.9224	0.41508	0.05431
		TOTALE	-5792.4	-2132	277.742

Sezione 2: Piedritto					
Elemento	σxx [Pa]	σxy [Pa]	N[kN/m]	M[kN.m/m]	T [kN/m]
1	-2.35E+05	8.88E+05	-23.53	-10.5885	88.8
2	-4.66E+05	-9.67E+04	-46.58	-16.303	-9.668
3	-6.99E+05	-6.37E+05	-69.9	-17.475	-63.73
4	-8.08E+05	-8.23E+05	-80.82	-12.123	-82.26
5	-7.76E+05	-7.48E+05	-77.62	-3.881	-74.82
6	-6.47E+05	-5.14E+05	-64.71	3.2355	-51.43
7	-6.29E+05	-1.23E+05	-62.9	9.435	-12.26
8	-6.37E+05	3.12E+05	-63.73	15.9325	31.19
9	-7.60E+05	6.88E+05	-75.97	26.5895	68.83
10	-1.08E+06	9.25E+05	-108.3	48.735	92.53
		TOTALE	-674.06	43.557	-12.818

Sezione 3: Arco rovescio					
Elemento	σxx [Pa]	σxy [Pa]	N[kN/m]	M[kN.m/m]	T [kN/m]
1	-1.62E+04	-3.22E+03	-1.621	-0.72945	-0.3215
2	-1.88E+04	-2.85E+03	-1.88	-0.658	-0.2846
3	-1.80E+04	-5.88E+03	-1.803	-0.45075	-0.5878
4	-2.40E+04	-1.37E+04	-2.395	-0.35925	-1.367
5	-4.95E+04	-3.47E+04	-4.948	-0.2474	-3.473
6	-1.53E+05	-1.08E+05	-15.28	0.764	-10.78
7	-8.52E+05	-4.86E+05	-85.18	12.777	-48.61
8	-1.11E+07	-2.44E+06	-1110	277.5	-244.3
9	-2.25E+07	-3.02E+06	-2247	786.45	-301.8
10	-2.32E+07	3.48E+06	-2323	1045.35	347.7
		TOTALE	-5793.107	2120.396	-263.824

Si osserva come le sollecitazioni nella calotta ed arco rovescio aumentano considerabilmente per il rigonfiamento della galleria. Questo va in corrispondenza con l'andamento dei vettori degli spostamenti dove la deformazione per rigonfiamento si presenta in questi due zone. Ad esempio il momento nella zona 3 (arco rovescio) nella fase di installazione del lining e rilascio tensionale ha un valore di 1283kN.m/m e arriva a 2120kN.m/m nella fase di rigonfiamento. Nella Tabella 27 si osserva ad esempio l'incremento delle sollecitazioni sull'arco rovescio durante la fase di rigonfiamento.

Tabella 26. Percentuale di incremento delle sollecitazioni nell'arco rovescio

Sezione 3	Fase 3	Fase 4	Incremento [%]
N [kN/m]	-4576.37	-5793.107	21
M [kN.m/m]	1283.1165	2120.396	39
T [kN/m]	-116.525	-263.824	56

Adesso i momenti resistenti della sezione del rivestimento si calcolano conoscendo che la spaziatura dell'armatura usata è pari ad 1m e che l'area totale dell'armatura è di 25.13cm² equivalente a 8 barre di diametro 20mm. Con il software VCASLU si ha effettuato la verifica analizzando la sezione con un metro di larghezza e 1m di spessore del rivestimento. Nel software si ha distribuito l'acciaio simmetricamente nel bordo superiore ed inferiore della sezione. Nella Figura 101 si osserva il dominio di resistenza della sezione. Con le sollecitazioni nell'arco rovescio e nella calotta la verifica non viene soddisfatta quindi il rivestimento si trova a rottura in queste zone.



Figura 101. Verifica resistenza, sezione 1



Figura 102. Verifica resistenza sezione 2



Figura 103. Verifica resistenza, sezione 3

La geometria della sezione utilizzata e le caratteristiche del rivestimento risultano non verificati rispetto ai carichi dovuti al rigonfiamento.

In fine le deformazioni dovute solitamente al rigonfiamento nelle tre zone individuati sono dell'ordine di:

Sezione	Direzione	Spostamenti [cm]
Piedritto	Direzione x	-4.113
Calotta	Direzione y	-4.687
Arco Rovescio	Direzione y	13.01

Tabella 27. Spostamenti dovuti al rigonfiamento

Come era di aspettarsi lo spostamento massimo è di 13.01cm nell'arco rovescio dovuto al rigonfiamento.

Capitolo 5 Conclusioni

Il rigonfiamento si sviluppa in materiali con certi tipi di minerali, come i minerali di argilla, al contatto con l'acqua e al procedere dello scavo. I meccanismi che lo producono possono essere di diversa natura, questo porta a che il comportamento rigonfiante sia diverso e non facile da predire, dovuto alle variazioni nella composizione del terreno e le condizioni in sito lungo la galleria. Le leggi di rigonfiamento studiati in questo elaborato, come il metodo di Wittke e il metodo di Barla, si basano su risultati empirici, su prove sperimentale, facendo si che siano specifiche del terreno studiato e abbiano molta variabilità.

Lo studio del rigonfiamento nel terreno selezionato ha permesso attraverso prove di laboratorio definire la sua magnitudo ma non la sua natura. Le due prove edometriche, realizzati seguendo la metodologia di Huder e Amberg, si sono realizzati con il fine di ottenere il coefficiente k di rigonfiamento descritto nel metodo di Wittke, per fare ciò, si ha portato il terreno in condizioni asciutte allo stato tensionale in sito e poi man mano si ha scaricato lasciandolo rigonfiare assialmente in ogni step (questo aggiungendo l'acqua a fine carico). Dalla relazione sviluppata da Wittke si ha trovato un coefficiente k di rigonfiamento pari a 7.655%, è importante notare la variabilità trovata nel valore del coefficiente nelle due prove realizzati (4.4% e 10.8%), la differenza si può spiegare per l'utilizzo di due campioni diversi per la realizzazione dei provini sottoposti a prova.

Da un'altra parte la prova triassiale di rigonfiamento eseguita, con i diversi passaggi di flushing, saturazione, consolidazione, taglio e rigonfiamento, ha avuto come risultato la consolidazione del provino durante la fase drenata del rigonfiamento, questo comportamento si aspettava già che durante la fase di taglio-non drenata, si ha sviluppato un eccesso di pressione interstiziale positivo (86.96 kPa), cioè un incremento di questa pressione, lo quale posteriormente durante la fase drenata si dissipa e produce la consolidazione del provino, trovando come valore finale della deformazione volumetrica una deformazione di consolidazione di 0.185%.

Il creep, anche studiato in maniera aggiuntiva nel terreno, ha permesso di osservare la deformazione nel tempo del materiale, con una prima fase o creep primario e poi una seconda fase con una velocità più meno uniforme durante le due fasi di carico.

La simulazione numerica attorno ad una galleria del comportamento rigonfiante è stata eseguita con il metodo di Wittke. Il codice di calcolo FLAC2D, il quale utilizza il metodo alle differenze finite, ci ha permesso di modellare il rigonfiamento mediante una Fish function creata specificamente per il metodo di Wittke e con le caratteristiche della galleria analizzata. Per fare ciò si sono definiti diversi stage di calcolo, compresi l'installazione di un rivestimento in calcestruzzo attorno la galleria dopo il rilascio tensionale di un 40% dovuto allo scavo. Nei risultati ottenuti è stato possibile osservare che all'applicare la fish function di rigonfiamento, c'è un aumento delle sollecitazioni nel rivestimento, sollecitazioni che sono maggiori nel arco rovescio della galleria e producono la rottura di quest'ultimo. Questo è in corrispondenza con quello che si aspettava, dove una maggiore deformazione per rigonfiamento si deve produrre nell'arco rovescio della galleria. Quindi la geometria del rivestimento utilizzata non è risultata essere adatta alle condizioni del terreno. Per evitare le deformazioni nel lining dovuto al rigonfiamento del terreno si dovrebbe quindi realizzare una sezione più bassa nell'arco rovescio della galleria, cioè più circolare e così ridurre le sollecitazioni in queste zone.

Per ridurre il potenziale di rigonfiamento in un terreno si deve quindi prevenire il flusso di acqua, questo scegliendo sezioni favorevoli per prevenire la formazioni di flussi di acqua (per esempio sezioni circolari) e fare attenzione al tipo di scavo utilizzato il quale è legato a questo fenomeno. I rivestimenti di tipo flessibile sono quindi i più adeguati in questi condizioni.

Riferimenti bibliografici

- Agneli, A. (2014). Considerazioni sui problemi legati ai terreni di fondazioni costituiti da argille rigonfianti.
- Anagnostou, G., & Cantieni, L. (2007). Design and analysis of yielding support in squeezing ground. *11th ISRM Congress*, 4.
- Barla, G., Barla, M., & Debernardi, D. (2010). New triaxial apparatus for rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 43(2), 225–230. http://doi.org/10.1007/s00603-009-0076-7
- Barla, M. (1999). *Tunnels in swelling ground: simulation of 3D stress paths by triaxial laboratory testing*. Politecnico di Torino. Retrieved from http://porto.polito.it/2504404/1/Marco Barla.pdf
- Barla, M. (2008). Numerical simulation of the swelling behaviour around tunnels based on special triaxial tests. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(5), 508–521. http://doi.org/10.1016/j.tust.2007.09.002
- Barresi, A., Caiolo, M., & Ambrino, P. (2003). Mineralogia delle Valli di Lanzo (Piemonte). Retrieved from http://www.gminromano.it/Cercapietre/rivista03/testo/03A03.html
- Basile, A. (2010). *Modellazione numerica del fenomeno di rogonfiamento della galleria idroelettrica di La Higuera, Cile*. Politecnico di Torino.
- Bragg, H., Bragg, L., & Essi, X. (2013). Identificare i minerali con i raggi X, 1-2.
- Butscher, C., Einstein, H. H., & Huggenberger, P. (2015). Darcy flux as hydrological indicator for the swelling potential of clay-sulfate rocks in tunneling. *Engineering Geology*, 197, 11–19. http://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.08.007
- Butscher, C., Scheidler, S., Farhadian, H., Dresmann, H., & Huggenberger, P. (2017). Swelling potential of clay-sulfate rocks in tunneling in complez geological setings and impact measures assessed by groundwater modeling. *Engineering Geology*, 11.
- Chiarelli, M. (2016). Gallerie realizzate in ammassi rigonfianti e/o spingenti. *Ingenio Informazione Tecnica E Progettuale*, 1–6.
- Colorado School of Mines. (n.d.). Swelling Soils. Retrieved from

http://coloradogeologicalsurvey.org/geologic-hazards/swelling-soils/definition/

Damping, R. (2015). FLAC 8 Basics.

- De Moya, I. R. B., de Ágreda, E. A. P., Morales, E. R., & Solé, A. G. (2009). Tunnelling and swelling in triassic sulphate-bearing rocks: Part I: case studies from Baden-Württemberg. *Revista Epsilon*, (June 2009), 13–37. Retrieved from http://upcommons.upc.edu/eprints/handle/2117/9594
- Havel, F. (2004). Creep in soft soils, (34), 210.
- ISRM. (1983). Raccomandazioni ISRM. RIVISTA ITALIANA DI GEOTECNICA 2/2000.
- Kovari, K., & Chiaverio, F. (2007). Modular yielding support for tunnels in heavily swelling rock (FR). Stuva Conference, Köln, 1–7. Retrieved from http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Modular+yielding+support+fo r+tunnels+in+heavily+swelling+rock#0
- Mater, A., Università, S., Bologna, D. I., & Ingegneria, F. D. I. (2011). Effetti del creep dei terreni coesivi sulla stabilità delle torri.
- Pimentel, E. (2015). Exisiting methods for swelling tests- a critical review. Energy Procedia, 10.
- Rodríguez Ortiz, J. M., & Jurado, J. R. (2011). Túneles en terrenos salinos y expansivos. *Revista de Obras Publicas*, *158*(3525), 7–44.
- Romana, M., & Serón, J. . (1988). Characterization of swelling materials by Huder-Amberg oedometric test. *Millpress Science Publishers*, (4), 591–594. http://doi.org/10.3233/978-1-61499-656-9-591
- Sainoki, Atsushi, Shingo, Tabata, Hani S., Mitri, Daisuke, Fukuda, Jun-ichi, K. (2017). Timedependent tunnel deformations in homogeneous and heterogeneous weak rock formations. *ScienceDirect*.
- Steiner, W. (1993). Swelling rock in tunnels: Rock characterization, effect of horizontal stresses and construction procedures. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and*, 30(4), 361–380. http://doi.org/10.1016/0148-9062(93)91720-4

Allegati

Allegato 1: Calcolo delle tensioni al 50% e 70% del carico di rottura

Calcolo del criterio di rottura:

t [kPa]	s [kPa]
308.6	765
467	1217
219.3	706
130.6	397
159.1	491

Tabella 28. Risultati andamento tensionale prove triassiale

Dai risultati precedenti si ricavano le tensioni sul piano $\sigma_1 e \sigma_3$, sapendo che:

$$\sigma_3 = s - t$$
$$\sigma_1 = 2t + \sigma_3$$

Tabella 29. Tensioni nel piano σ 1- σ 3

σ1 [kPa]	σ3 [kPa]
1073.6	456.4
1684	750
925.3	486.7
527.6	266.4
650.1	331.9

Costruendo l'andamento di queste tensioni e tracciando la linea di tendenza è possibile determinare il criterio di rottura del terreno. Nella Figura 100 si presenta il criterio di rottura ricavato.



Figura 104. Criterio di rottura

Il criterio di resistenza di Mohr-Coulomb rappresentato è della forma:

$$\sigma_1 = C_0 + N_{\varphi}.\sigma_3$$
$$\sigma_1 = 2.1531.\sigma_3$$

Dove:

$$N_{\varphi} = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)$$

Quindi l'angolo di attrito è:

$$\varphi = 21.45^{\circ}$$

Come il carico ad applicare è con la tensione radiale costante $\sigma_r = 1000 kPa$, il valore della tensione assiale corrispondente alla rottura è:

$$\sigma_1 = 2.1531. \sigma_3 = 2.1531 * 1000$$

Conoscendo la tensione assiale a rottura corrispondente ad una tensione radiale di 1000kPa si può determinare la tensione assiale ad applicare per raggiungere il 50% e 70% della rottura. Nelle Tabelle 30 e 31 si presentano questi valori.

50% Rottura		
t50	288.275	
σ3 [kPa]	1000	
σ1 [kPa]	1576.55	
s50	1288.275	

Tabella 30. Tensioni al 50% del carico di rottura

	Tabella 31.	. Tensioni al	70% del	carico di	rottura
--	-------------	---------------	---------	-----------	---------

70% Rottura		
t70 403.585		
σ3 [kPa]	1000	
σ1 [kPa]	1807.17	
S70	1403.585	

Allegato 2: Codice di calcolo FLAC 2D

```
1 ; CONDIZIONI INIZIALI
2 config gwflow extra 9
3 grid 152,20
4 gen 0.0,-100.0 0.0,-30.0 30.0,-30.0 100.0,-100.0 i=1,11 j=1,11
5 gen 30.0,-30.0 30.0,30.0 100.0,100.0 100.0,-100.0 i=22,32 j=1,11
6 gen 0.0,-30.0 0.0,-11.450001 11.45,-11.45 30.0,-30.0 i=1,11 j=11,21
7 gen 11.45,-11.45 11.45,11.45 30.0,30.0 30.0,-30.0 i=12,22 j=1,11
8 gen 0.0,-11.450001 0.0,-4.8399305 6.1147985,-2.7555723 11.45,-11.45
i=33,43 j=1,11
9 gen 6.1147985,-2.7555723 4.857311,4.243705 11.45,11.45 11.45,-11.45
i=44,54 j=1,11
10 gen 0.0,-4.8399305 0.0,-3.8409379 5.2242813,-2.167747 6.1147985,-
2.7555723 i=55,65
j=1,11
11 gen 0.0,-3.8409379 0.0,-0.9999995 2.0,-1.0 5.2242813,-2.167747 i=66,76
j=1,11
12 gen 2.0,-1.0 2.0,2.0 4.1042395,3.5857658 5.2242813,-2.167747 i=77,87
j=1,11
13 gen 5.2242813,-2.167747 4.1042395,3.5857658 4.857311,4.243705
6.1147985,-2.7555723
```

i=88,98 j=1,11 14 gen 0.0,-0.9999995 0.0,2.0 2.0,2.0 2.0,-1.0 i=99,109 j=1,11 15 gen 0.0,2.0 0.0,5.444513 4.1042395,3.5857658 2.0,2.0 i=110,120 j=1,11 16 gen 0.0,5.444513 0.0,6.430505 4.857311,4.243705 4.1042395,3.5857658 i=121,131 j=1,11 17 gen 0.0,6.430505 0.0,11.450001 11.45,11.45 4.857311,4.243705 i=132,142 j=1,11 18 gen 0.0,11.450001 0.0,30.0 30.0,30.0 11.45,11.45 i=143,153 j=1,11 19 gen 0.0,30.0 0.0,100.0 100.0,100.0 30.0,30.0 i=143,153 j=11,21 20 ; Define nonlinear edges and interpolate subgrids 21 gen row 34,11 0.65728414 -4.8211527 1.3127621 -4.762159 1.9606708 -4.647286 2.6004496 -4.4957194 3.2306976 -4.307824 3.8468595 -4.076575 4.442953 -3.798373 5.021879 -3.4867558 5.5823627 -3.1424093 22 gen col 44,2 6.2713566 -2.03185 6.3707952 -1.2977624 6.4248686 -0.5595919 6.433808 0.17990898 6.3674035 0.91771877 6.2117643 1.6393348 5.999527 2.3477411 5.6781096 3.0151715 5.2927375 3.644391 23 gen row 56,11 0.55720365 -3.8271294 1.1127818 -3.7771266 1.6627939 -3.6860328 2.2074127 -3.567851 2.7451339 -3.419449 3.268424 -3.2266326 3.7811308 -3.008291 4.2828217 -2.7646034 4.7616844 -2.4784958 24 gen row 56,1 0.65728414 -4.8211527 1.3127621 -4.762159 1.9606708 -4.647286 2.6004496 -4.4957194 3.2306976 -4.307824 3.8468595 -4.076575 4.442953 -3.798373 5.021879 -3.4867558 5.5823627 -3.1424093 25 gen row 67,1 0.55720365 -3.8271294 1.1127818 -3.7771266 1.6627939 -3.6860328 2.2074127 -3.567851 2.7451339 -3.419449 3.268424 -3.2266326 3.7811308 -3.008291 4.2828217 -2.7646034 4.7616844 -2.4784958 26 gen col 87,2 5.3261604 -1.5673542 5.406742 -0.96321 5.4340897 -0.35427442 5.438563 0.25466093 5.3776636 0.86057675 5.251454 1.4564974 5.0523853 2.0321949 4.7927694 2.5830379 4.4755383 3.1028447 27 gen col 88,2 5.3261604 -1.5673542 5.406742 -0.96321 5.4340897 -0.35427442 5.438563 0.25466093 5.3776636 0.86057675 5.251454 1.4564974 5.0523853 2.0321949 4.7927694 2.5830379 4.4755383 3.1028447 28 gen col 98,2 6.2713566 -2.03185 6.3707952 -1.2977624 6.4248686 -0.5595919 6.433808 0.17990898 6.3674035 0.91771877 6.2117643 1.6393348 5.999527 2.3477411 5.6781096 3.0151715 5.2927375 3.644391 29 gen row 111,11 0.46368945 5.4247856 0.9240385 5.3657484 1.3777306 5.2678223 1.821496 5.131708 2.2521358 4.9583807 2.6665454 4.749081 3.0617332 4.5053077 3.4348469 4.2288065 3.783189 3.9215584 30 gen row 122,11 0.5486536 6.4058676 1.0917304 6.34006 1.6271673 6.2178497 2.1529753 6.066006 2.657986 5.850154 3.1531532 5.61601 3.611506 5.3134537 4.0633836 5.002777 4.460346 4.6232414

```
31 gen row 122,1 0.46368945 5.4247856 0.9240385 5.3657484 1.3777306
5.2678223 1.821496
5.131708 2.2521358 4.9583807 2.6665454 4.749081 3.0617332 4.5053077
3.4348469
4.2288065 3.783189 3.9215584
32 gen row 133,1 0.5486536 6.4058676 1.0917304 6.34006 1.6271673 6.2178497
2.1529753
6.066006 2.657986 5.850154 3.1531532 5.61601 3.611506 5.3134537 4.0633836
5.002777
4.460346 4.6232414
33 gen bilinear i=33,43 j=1,11
34 gen bilinear i=44,54 j=1,11
35 gen bilinear i=55,65 j=1,11
36 gen bilinear i=66,76 j=1,11
37 gen bilinear i=77,87 j=1,11
38 gen bilinear i=88,98 j=1,11
39 gen bilinear i=110,120 j=1,11
40 gen bilinear i=121,131 j=1,11
41 gen bilinear i=132,142 j=1,11
42 model elastic i=1, 10 j=1, 10
43 model elastic i=22,31 j=1,10
44 model elastic i=1,10 j=11,20
45 model elastic i=12,21 j=1,10
46 model elastic i=33,42 j=1,10
47 model elastic i=44,53 j=1,10
48 model elastic i=55,64 j=1,10
49 model elastic i=66,75 j=1,10
50 model elastic i=77,86 j=1,10
51 model elastic i=88,97 j=1,10
52 model elastic i=99,108 j=1,10
53 model elastic i=110,119 j=1,10
54 model elastic i=121,130 j=1,10
55 model elastic i=132,141 j=1,10
56 model elastic i=143,152 j=1,10
57 model elastic i=143,152 j=11,20
58 ; Attach grids
59 attach aside from 22,1 to 32,1 bside from 11,11 to 11,1
60 attach aside from 153,11 to 153,21 bside from 22,11 to 32,11
61 attach aside from 33,1 to 43,1 bside from 1,21 to 11,21
62 attach aside from 12,1 to 22,1 bside from 11,21 to 11,11
63 attach aside from 54,1 to 54,11 bside from 12,1 to 12,11
64 attach aside from 153,1 to 153,11 bside from 12,11 to 22,11
65 attach aside from 55,1 to 65,1 bside from 33,11 to 43,11
66 attach aside from 44,1 to 54,1 bside from 43,11 to 43,1
67 attach aside from 98,1 to 98,11 bside from 44,1 to 44,11
68 attach aside from 142,1 to 142,11 bside from 44,11 to 54,11
69 attach aside from 66,1 to 76,1 bside from 55,11 to 65,11
70 attach aside from 88,1 to 98,1 bside from 65,11 to 65,1
71 attach aside from 99,1 to 109,1 bside from 66,11 to 76,11
72 attach aside from 77,1 to 87,1 bside from 76,11 to 76,1
73 attach aside from 109,1 to 109,11 bside from 77,1 to 77,11
74 attach aside from 120,1 to 120,11 bside from 77,11 to 87,11
75 attach aside from 88,1 to 88,11 bside from 87,1 to 87,11
76 attach aside from 131,1 to 131,11 bside from 88,11 to 98,11
77 attach aside from 110,1 to 120,1 bside from 99,11 to 109,11
78 attach aside from 121,1 to 131,1 bside from 110,11 to 120,11
79 attach aside from 132,1 to 142,1 bside from 121,11 to 131,11
80 attach aside from 143,1 to 153,1 bside from 132,11 to 142,11
81 group 'User:terreno' notnull
82 model mohr notnull group 'User:terreno'
```

```
83 prop density=2000.0 bulk=5.2E7 shear=3.12E7 cohesion=40000.0
friction=18.0
dilation=0.0 tension=0.0 notnull group 'User:terreno'
84 apply pressure 1280000.0 from 32,1 to 32,11
85 apply pressure 1600000.0 from 1,1 to 11,1
86 apply pressure 1600000.0 from 143,21 to 153,21
87 initial pp 650000.0
88 initial sxx -1280000.0
89 initial syy -1600000.0
90 initial szz -1280000.0
91 fix x i 1 j 1 20
92 fix x i 143 j 3 21
93 fix x i 143 j 2
94 fix x i 143 j 1
95 fix x i 132 j 3 10
96 fix x i 1 j 21
97 fix x i 33 j 2 10
98 fix x i 33 j 11
99 fix x i 55 j 2 10
100 fix x i 66 j 1
101 fix x i 66 j 2 11
102 fix x i 66 j 2
103 fix x i 66 j 1
104 fix x i 99 j 2 11
105 fix x i 110 j 2 10
106 fix x i 121 j 2 9
107 fix x i 121 j 1
108 fix x i 121 j 1
109 fix x i 110 j 10
110 fix x i 121 j 10 11
111 fix x i 132 j 2
112 fix x i 121 j 1
113 fix saturation
114 set flow=off
115 fix pp i 1 11 j 1
116 fix pp i 11 j 1
117 fix pp i 11 j 1
118 fix pp i 32 j 2 11
119 fix pp i 143 152 j 21
120 fix pp i 32 j 11
121 solve
122 ;RILASCIO DEL 40%
123 group 'User: lining' region 128 7
124 group 'User: lining' region 92 7
125 group 'User: lining' region 61 2
126 model mohr notnull group 'User: lining'
127 prop density=2500.0 bulk=1E11 shear=6E10 cohesion=8700000.0
friction=17.0
dilation=0.0 tension=1.3E7 notnull group 'User: lining'
128 model null region 102 5
129 group 'null' region 102 5
130 group delete 'null'
131 model null region 69 7
132 group 'null' region 69 7
133 group delete 'null'
134 model null region 80 4
135 group 'null' region 80 4
136 group delete 'null'
137 model null region 113 7
138 group 'null' region 113 7
139 group delete 'null'
```

```
140 model null group 'User: lining'
141 mark i 33 43 j 11
142 mark i 132 142 j 1
143 mark i 44 j 2 10
144 water bulk=2.0E9
145 water density=1000.0
146 water tension=9.999998E12
147 prop por=0.3 perm=1.0E-9 notnull
148 initial xdisp 0 ydisp 0
149 initial xvel 0 yvel 0
150 call 'Findmarkpoints.txt'
151 fix x y mark
152 step 1
153 FIND RF
154 free x y mark
155 call 'RelaxFactor.txt'
156 set perc car=0.6
157 APP RF
158 solve
159 ;LINING
160 initial xdisp 0 ydisp 0
161 initial xvel 0 yvel 0
162 model mohr group 'User: lining'
163 prop density=2200.0 bulk=9.9999998E10 shear=6.0000002E10
cohesion=8700000.0
friction=17.0 dilation=0.0 tension=0.0 porosity 0.5 group 'User: lining'
164 interface 1 aside from 132,1 to 142,1 bside from 132,1 to 142,1
165 interface 1 glued kn=9.9999998E10 ks=1.0E10
166 interface 2 aside from 44,11 to 44,1 bside from 44,11 to 44,1
167 interface 2 glued kn=9.9999998E10 ks=1.0E10
168 interface 3 aside from 65,1 to 55,1 bside from 65,1 to 55,1
169 interface 3 glued kn=9.9999998E10 ks=1.0E10
170 initial saturation 0.0 region 129 1
171 initial saturation 0.0 region 92 7
172 initial saturation 0.0 region 61 7
173 fix pp mark
174 initial pp 0.0 region 125 5
175 initial pp 0.0 region 92 8
176 initial pp 0.0 region 61 4
177 solve
178 ;RILASCIO100%
179 call 'RelaxFactor.txt'
180 set perc car=0
181 APP RF
182 solve
183 ; RIGONFIAMENTO
184 fix pp
185 call 'SwellingZones.txt'
186 swellingzones
187 solve
188 call 'WittkeFinal2.txt'
```

Allegato 3: Funzioni di FISH

Fish 1: Find mark points

```
1 set echo off
2 def FIND_RF
4 loop i(1,izones)
6 loop j(1,jzones)
8 if and (flags(i,j), 128) = 128 then
10 ex_4(i,j)=xforce(i,j)
12 ex_5(i,j)=yforce(i,j)
14 end_if
16 end_loop
18 end_loop
20 end
```

Fish 2: Relax factor

```
1 set echo off
2 def APP_RF
4 loop ii(1,izones)
6 loop jj(1,jzones)
8 if and (flags(ii,jj), 128) = 128 then
10 xaf=-ex_4(ii,jj) * perc_car
12 yaf=-ex_5(ii,jj) * perc_car
14 command
16 apply xforce xaf yforce yaf i=ii j=jj
18 end_command
20 end_if
22 end_loop
24 end_loop
26 end
```

Fish 3: Swelling zones

```
1 def swellingzones
2
3 loop i(1,10)
4 loop j (1,20)
5 inv ini= 4160000
6 inv_sec= abs(szz(i,j)+sxx(i,j)+syy(i,j))
7 if inv_ini>inv_sec
8 ex_9(i,j)=inv_sec
9 end if
10 end loop
11 end_loop
12
13
14 loop i(12,31)
15 loop j (1,10)
16 inv ini= 4160000
17 inv_sec= abs(szz(i,j)+sxx(i,j)+syy(i,j))
18 if inv_ini>inv_sec
19 ex_9(i,j)=inv_sec
20 end if
21 end loop
22 end_loop
23
24 loop i(33,42)
25 loop j (1,10)
26 inv_ini= 4160000
27 inv_sec= abs(szz(i,j)+sxx(i,j)+syy(i,j))
28 if inv_ini>inv_sec
29 ex_9(i,j)=inv_sec
30 end if
31 end loop
32 end loop
33
34 loop i(44,53)
35 loop j (1,10)
36 inv ini= 4160000
37 inv_sec= abs(szz(i,j)+sxx(i,j)+syy(i,j))
38 if inv_ini>inv_sec
39 ex_9(i,j)=inv_sec
40 end if
41 end loop
42 end loop
43
44 loop i(132,141)
45 loop j (1,10)
46 inv_ini= 4160000
47 inv_sec= abs(szz(i,j)+sxx(i,j)+syy(i,j))
48 if inv_ini>inv_sec
49 ex_9(i,j)=inv_sec
50 end if
51 end loop
52 end_loop
53
54 loop i(143,152)
55 loop j (1,20)
56 inv_ini= 4160000
57 inv_sec= abs(szz(i,j)+sxx(i,j)+syy(i,j))
```

58 if inv_ini>inv_sec

```
59 ex_9(i,j)=inv_sec
60 end if
61 end_loop
62 end loop
63
64
65 end
Fish 4: Rigonfiamento
1 ;parametri inizio analisi
2 def parametri
3 m_k=7.655 ;coeff. di rigonfiamento
4 m v=0.25 ;Poisson
5 end
6 parametri
7
8 ; fase di simulazione del rigonfiamento
9 ini xv 0 yv 0 xd 0 yd 0
10 water bulk=0
11
12 def valori
13 ; numero di intervalli di applicazione della tensione
14 \text{ tol} 1 = 100
15 end
16 valori
17
18 ;fish rigonfiamento
19 def incr
20
21
22
23 loop i (33,42)
24 loop j (1,10)
25 inc=float(tol1)
26 ex_1(i,j)= 4160000 ;valore in Pa
27 ;ex_1 = invariante dello stato tensionale primario
28 ex 2(i,j) = abs(sxx(i,j)+ syy(i,j)+ szz(i,j)) ;valore in Pa
29 ;ex 2 = invariante dello stato tensionale secondario
30 if ex_1(i,j)>ex_2(i,j)
31 ex_3(i,j)=(m_k*log(ex_1(i,j)/ex_2(i,j))/log(ex_1(i,j)*(1-m_v)/(1+m_v))) ;valore
non percentuale
32 ;ex_3 = deformazione vol dovuta a rigonfiamento
33 al1=bulk_mod(i,j)+shear_mod(i,j)/3.0
34 al2=bulk_mod(i,j)-shear_mod(i,j)*2.0/3.0
35 ex_6(i,j)=al1*ex_3(i,j)/inc
36 ex_7(i,j)=al2*ex_3(i,j)/inc
37 ;ex_6=incremento da dare a sxx e syy
38 ;ex_7=incremento da dare a szz
39 \text{ sxx}(i,j) = \text{sxx}(i,j) - (\text{ex } 6(i,j))
40 syy(i,j)=syy(i,j)-(ex_6(i,j))
41 szz(i,j)=szz(i,j)-(ex_7(i,j))
42 endif
43 endloop
44 endloop
45
46 loop i (44,53)
47 loop j (1,10)
```

```
48 inc=float(tol1)
49 ex 1(i,j)= 4160000 ;valore in Pa
50 ;ex 1 = invariante dello stato tensionale primario
51 ex_2(i,j)= abs(sxx(i,j)+ syy(i,j)+ szz(i,j)) ;valore in Pa
52 ; ex^2 = invariante dello stato tensionale secondario
53 if ex 1(i,j) > ex 2(i,j)
54 ex_3(i,j)=(m_k*log(ex_1(i,j)/ex_2(i,j))/log(ex_1(i,j)*(1-m_v)/(1+m_v))) ;valore
non percentuale
55 ;ex 3 = deformazione vol dovuta a rigonfiamento
56 al1=bulk_mod(i,j)+shear_mod(i,j)/3.0
57 al2=bulk_mod(i,j)-shear_mod(i,j)*2.0/3.0
58 ex_6(i,j)=al1*ex_3(i,j)/inc
59 ex_7(i,j)=al2*ex_3(i,j)/inc
60 ;ex 6=incremento da dare a sxx e syy
61 ;ex_7=incremento da dare a szz
62 \operatorname{sxx}(i,j) = \operatorname{sxx}(i,j) - (\operatorname{ex} 6(i,j))
63 \text{ syy}(i,j) = \text{syy}(i,j) - (\text{ex } 6(i,j))
64 \text{ szz}(i,j)=\text{szz}(i,j)-(\text{ex } 7(i,j))
65 endif
66 endloop
67 endloop
68 loop i (132,141)
69 loop j (1,10)
70 inc=float(tol1)
71 ex_1(i,j)= 4160000 ;valore in Pa
72 ;ex 1 = invariante dello stato tensionale primario
73 ex 2(i,j) = abs(sxx(i,j)+ syy(i,j)+ szz(i,j));valore in Pa
74 ;ex 2 = invariante dello stato tensionale secondario
75 if ex 1(i,j) > ex 2(i,j)
76 ex_3(i,j)=(m_k*log(ex_1(i,j)/ex_2(i,j))/log(ex_1(i,j)*(1-m_v)/(1+m_v))) ;valore
non percentuale
77 ;ex_3 = deformazione vol dovuta a rigonfiamento
78 al1=bulk mod(i,j)+shear mod(i,j)/3.0
79 al2=bulk_mod(i,j)-shear_mod(i,j)*2.0/3.0
80 ex 6(i,j)=al1*ex 3(i,j)/inc
81 ex 7(i,j)=al2*ex 3(i,j)/inc
82 ;ex 6=incremento da dare a sxx e syy
83 ;ex 7=incremento da dare a szz
84 sxx(i,j)=sxx(i,j)-(ex 6(i,j))
85 syy(i,j)=syy(i,j)-(ex_6(i,j))
86 szz(i,j)=szz(i,j)-(ex_7(i,j))
87 endif
88 endloop
89 endloop
90
91 end
92
93 ;resol calcola gli spostamenti indotti dal rigonfiamento
94 def resol
95 loop ii(1,tol1)
96 incr
97 num step=ii
98 command
99 pr num step
100 solve sratio 1e-3
101 end command
102 endloop
103 end
104 resol
105
```