

## Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile A.a. 2020/2021 Sessione di Laurea Luglio 2021

# Influenza dei tempi e delle condizioni di invecchiamento sul comportamento idromeccanico di miscele Cemento-Bentonite

Relatore: Prof. Guido Musso Candidato: Andrea Deruda

Correlatore Ing. Luca Flessati (Politecnico di Milano)

## Sommario

Le miscele Cemento - Bentonite sono comunemente utilizzate per la costruzione di diaframmi plastici, realizzati per cinturare dei siti inquinati e proteggere la falda acquifera. Nonostante il largo impiego nella pratica ingegneristica, la caratterizzazione questi materiali è normalmente limitata alla determinazione della permeabilità e della resistenza a compressione uniassiale. La tesi propone un contributo allo studio dell'influenza dei tempi e delle condizioni di maturazione sul comportamento idro-meccanico. A partire da una sperimentazione di laboratorio, condotta mediante prove edometriche e prove triassiali su tre miscele caratterizzate da un diverso rapporto di cemento - bentonite, si sono valutati gli effetti legati alla composizione della miscela, all'invecchiamento e al contatto con un idrocarburo. Successivamente è stata eseguita una simulazione delle prove con due modelli costitutivi elastoplastici. Il primo modello utilizzato è il Modified Cam Clay model (MCCM, Roscoe & Burland, 1968), proposto originariamente per le argille e di larga diffusione nella pratica ingegneristica, mentre il secondo è una recente modifica del MCCM, sviluppato appositamente per le miscele Cemento -Bentonite (CBC model, Flessati et al., 2020). Inoltre, nella tesi è stata parallelamente valutata la possibilità di automatizzare l'interpretazione dei risultati delle prove edometriche mediante un nuovo software di recente realizzazione.

## Indice

| 1. | Introduzione  | 13            |
|----|---|---------------|
|    | .1 Modalità costruttive dei diaframmi cemento bentonite   | 14            |
|    | .2 Struttura della Tesi   | 14            |
| 2. | Miscele Cemento-Bentonite: stato dell'arte  | 15            |
|    | 2.1 Carreto et al. (2015)   | 16            |
|    | 2.1.2 Risultati della fase di compressione isotropa   | 16            |
|    | 2.1.3 Risultati prove Triassiali  | 19            |
|    | 2.1.3.1 Provini consolidati a una pressione di confinamento minore di que preconsolidazione     | ella di<br>20 |
|    | 2.1.3.2 Provini consolidati a una pressione di confinamento maggiore di qu<br>preconsolidazione | ella di<br>21 |
|    | 2.1.4 Test di permeabilità  | 22            |
|    | 2.2 Tarzia (2019)   | 23            |
|    | 2.2.1 Prove triassiali  | 24            |
|    | 2.2.2 Prove edometriche   | 25            |
|    | 2.2.3 Prove di permeabilità   | 28            |
|    | 2.3 Flessati et al. (2020)  | 29            |
|    | 2.3.1 Indagini microstrutturali   | 29            |
|    | 2.3.2 Modellazione delle prove  | 30            |
|    | 2.4 Evans e Opdyke (2006)   | 32            |
|    | 2.5 Royal et al. (2018)   | 36            |
|    | 2.6 Fratalocchi et al. (2005)   | 37            |
| 3. | Interpretazione delle prove di laboratorio  | 39            |
|    | 3.1 Descrizione delle miscele   | 40            |
|    | 3.2 Descrizione della prova edometrica  | 40            |
|    | 3.3 Interpretazione delle prove edometriche   | 45            |
|    | 3.3.1. Miscela 1, C/B=4   | 45            |
|    | 3.3.2. Miscela 2, C/B=5   | 55            |
|    | 3.3.3 Miscela 3, C/B=6  | 63            |
|    | 3.4 Confronto della conducibilità idraulica per le tre miscele                                  | 71            |
|    | 3.4.1 Conducibilità idraulica per carico $\sigma'_v$ di 196.1 kPa                               | 71            |
|    | 3.4.2 Conducibilità idraulica per carico $\sigma'_v$ di 784.5 kPa                               | 73            |
|    | 3.5 Confronto della tensione di preconsolidazione $\sigma'_p$ per le tre miscele                | 75            |

| 3.6 Prova triassiale   | 77  |  |  |  |  |
|--|-----|--|--|--|--|
| 3.7 Interpretazione delle prove triassiali CIU                           | 78  |  |  |  |  |
| 3.7.1 Miscela 1  | 78  |  |  |  |  |
| 3.7.2 Miscela 2  | 85  |  |  |  |  |
| 3.7.3 Miscela 3  | 91  |  |  |  |  |
| 3.8 Confronto dei parametri di resistenza delle tre miscele              | 99  |  |  |  |  |
| 3.9 Prove triassiali non consolidate non drenate UU                      | 103 |  |  |  |  |
| 3.9.1 Miscela 1  | 104 |  |  |  |  |
| 3.9.2 Miscela 2  | 107 |  |  |  |  |
| 3.9.3 Miscela 3  | 110 |  |  |  |  |
| 3.10 Confronto della resistenza al taglio non drenata delle tre miscele  | 114 |  |  |  |  |
| 4. Software "Laboratorio di Geotecnica"                                  | 116 |  |  |  |  |
| 4.1 Presentazione del software.  | 117 |  |  |  |  |
| 4.2 Confronto dei risultati  | 119 |  |  |  |  |
| 5. Modellazione costitutiva  | 127 |  |  |  |  |
| 5.1 Modelli elasto-plastici con incrudimento                             | 128 |  |  |  |  |
| 5.2 Modified Cam Clay model  | 129 |  |  |  |  |
| 5.3 Modello CBC  | 133 |  |  |  |  |
| 5.4 Codice numerico DRIVER EP per la simulazione costitutiva delle prove | 134 |  |  |  |  |
| 5.5 Simulazione delle prove con il Cam Clay modificato                   | 135 |  |  |  |  |
| 5.6 Simulazione delle prove con il modello CBC                           | 143 |  |  |  |  |
| 6. Conclusioni   | 152 |  |  |  |  |
| Appendice  |     |  |  |  |  |
| Bibliografia   | 234 |  |  |  |  |
| Ringraziamenti   |     |  |  |  |  |

## Elenco delle figure

Figura 1. 1 Esempio di incapsulamento con diaframma plastico, Zibisco (2019).....13

| Figura 2. 1 Prove di compressione per la miscela di composizione A (C/B di 5,7), Carro  | eto et  |
|---|---------|
| $E_{i} = 2 2 P_{i} = 4 i e_{i} = 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1$   | 10      |
| Figura 2. 2 Prove di compressione per le tre composizioni con maturazione di 8 settin<br>Carrete et al. (2015)  | nane,   |
| Eigune 2, 2 Andemente delle mesue trigogieli non le composizione A meturate non 8 setti   |         |
| ( $n' < n'$ ) Correcte et al. (2015)  |         |
| $(p_c > p_y)$ , Carreto et al. (2013)   |         |
| Figura 2. 4 Andamento delle prove triassiali per la composizione A ( $p_c < p_y$ ), Carreto (2015)  | et al.  |
| $\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} \sum_{i$ |         |
| ( $r > r$ ). Compared at al. (2015)   |         |
| $(\mathbf{p}_{c} > \mathbf{p}_{y})$ , Carreto et al. (2015)   | ·····ZZ |
| Figura 2. 6. Influenza del tempo sulla conducibilita idraulica della miscela di composizio:   | ne A,   |
| Carreto et al. $(2015)$   | 23      |
| Figura 2. / Andamento della tensione deviatorica, Tarzia (2019)   | 25      |
| Figura 2. 8 Curve di compressibilità, Tarzia (2019)   | 26      |
| Figura 2. 9 Conducibilità idraulica in funzione dell'indice dei vuoti, Tarzia (2019)  | 27      |
| Figura 2. 10 Immagine SEM miscela CB5: (a) ingrandimento di 400 volte; (b) ingrandim  | nento   |
| di 800 volte; (c) ingrandimento di 5000 volte; (d) ingrandimento di 20000 volte; Flessati   | et al.  |
| (2020)  | 30      |
| Figura 2. 11. Simulazione prove edometriche MCCM, Flessati et al. (2020)  | 31      |
| Figura 2. 12 Simulazione delle prove triassiali CB4, Flessati et al. (2020)   | 31      |
| Figura 2. 13 Calibrazione dei parametri h1, h2 e g1, Flessati et al (2015)  | 32      |
| Figura 2. 14 Influenza sulla conducibilità della percentuale di rimpiazzo nelle miscele   | a 28    |
| giorni, Evans & Opdyke (2006)   | 34      |
| Figura 2. 15 Andamento della conducibilità idraulica in funzione del tempo di maturaz   | zione,  |
| Evans & Opdyke (2006)   | 35      |
| Figura 2. 16. Prove di compressione non confinata per miscele maturate per 28 giorni, E   | Evans   |
| & Opdyke (2006)   | 35      |
| Figura 2. 17 Curva di compressione edometrica: (a) 7 giorni; (b) 14 giorni; (c) 28 giorni; (  | (d) 60  |
| giorni, Royal et al.(2018).   |         |
| Figura 2. 18 Andamento della conducibilità idraulica in funzione dei carichi a diversi ten  | npi di  |
| maturazione, Royal et al. (2018)  |         |
| Figura 2. 19 Andamento della conducibilità, Fratalocchi et al. (2005)   |         |
| <b>6</b> ( <b>1 1 1 1 1 1 1 1 1 1</b>   |         |
| Figura 3. 1 Schema di un edometro, Lancellotta (2012)   | 41      |
| Figura 3. 2 Metodo di Casagrande, Lancellotta (2012)  | 42      |
| Figura 3. 3 Metodo di Taylor. Lancellotta (2012)  | 43      |
| Figura 3. 4 Curva di compressibilità. Tarzia (2019)   |         |
| Figura 3, 5 Curve di compressione edometrica, per la miscela 1 maturata in acqua  | 50      |
| Figura 3, 6 Curve di compressione edometrica per la miscela 1 maturata in olio  | 50      |
| Figura 3, 7 Conducibilità idraulica per la miscela 1 in acqua [niano e-log <sub>10</sub> (k)]   | 51      |
| Figura 3. 8 Conducibilità idraulica per la miscela 1 in olio. [piano e-logo(k)]   | 52      |
| Figure 3. 9 Andamento nel tempo della tensione di precomsolidazione per la miscola 1  | 52      |
| rigura 5. 7 Andamento nel tempo dena tensione di precomsondazione per la miscela 1  |         |

| Figura 3. 10 Indice di compressione C <sub>c</sub> per la miscela 1                                  | .54  |
|--|------|
| Figura 3. 11 Indice di rigonfiamento C <sub>s</sub> per la miscela 1                                 | .54  |
| Figura 3. 12. Curve di compressione edometrica per la miscela 2 maturata in acqua                    | .58  |
| Figura 3. 13 Curve di compressione edometrica per la miscela 2 maturata in olio                      | .59  |
| Figura 3. 14 Conducibilità idraulica per la miscela 2 in acqua [piano e-log <sub>10</sub> (k)]       | .59  |
| Figura 3. 15 Conducibilità idraulica per la miscela 2 in olio [piano e-log10(k)].                    | .60  |
| Figura 3. 16 Andamento nel tempo della tensione di preconsolidazione media per la miscel             | a 2  |
|  | .61  |
| Figura 3. 17 Indice di compressione Cc per la miscela 2  | .62  |
| Figura 3. 18 Indice di rigonfiamento Cs per la miscela 2   | .62  |
| Figura 3. 19. Curve di compressione edometrica per la miscela 3 maturata in acqua                    | .66  |
| Figura 3. 20 Curve di compressione edometrica per la miscela 3 maturata in olio                      | .66  |
| Figura 3. 21 Conducibilità idraulica per la miscela 3 in acqua [piano e-log <sub>10</sub> (k)]       | .67  |
| Figura 3. 22 Conducibilità idraulica per la miscela 3 in olio [piano e-log <sub>10</sub> (k)]        | .68  |
| Figura 3. 23 Andamento nel tempo della tensione di preconsolidazione media per la miscel             | .a 3 |
|  | .69  |
| Figura 3. 24. Indice di compressione Cc per la miscela 3   | .70  |
| Figura 3. 25 Indice di rigonfiamento Cs per la miscela 3   | .70  |
| Figura 3. 26 Conducibilità idraulica per $\sigma'_{v}$ di 196.1 kPa., maturazione in acqua           | .71  |
| Figura 3. 27 Conducibilità idraulica per $\sigma$ 'v di 196.1 kPa., maturazione in olio              | .72  |
| Figura 3. 28 Conducibilità idraulica per $\sigma'_v$ di 196.1 kPa                                    | .72  |
| Figura 3. 29 Andamento della conducibilità idraulica per $\sigma'_v$ di 784.5 kPa., maturazione      | e in |
| acqua.   | .73  |
| Figura 3. 30 Andamento della conducibilità idraulica per $\sigma'_v$ di 784.5 kPa., maturazione in o | lio. |
| -  | .74  |
| Figura 3. 31 Andamento della conducibilità idraulica nel tempo per $\sigma'_v$ di 784.5 kPa          | .74  |
| Figura 3. 32 Andamento nel tempo della tensione di preconsolidazione media, miscele in acc           | qua  |
|  | .75  |
| Figura 3. 33 Andamento nel tempo della tensione di preconsolidazione media, miscele in c             | olio |
|  | .76  |
| Figura 3. 34 Andamento nel tempo della tensione di preconsolidazione                                 | .76  |
| Figura 3. 35 Schema di un apparecchio triassiale, Lancellotta (2012)                                 | .77  |
| Figura 3. 36 Andamento della tensione deviatorica al variare della deformazione assiale per          | r la |
| miscela 1 in acqua   | .78  |
| Figura 3. 37 Andamento della sovrapressione interstiziale al variare della deformazione assi         | iale |
| per la miscela 1 in acqua  | .79  |
| Figura 3. 38 Percorso dei carichi con inviluppo di rottura per la miscela 1 maturata per 28 gio      | orni |
| in acqua   | .80  |
| Figura 3. 39 Percorso dei carichi con inviluppo di rottura per la miscela 1 maturata per 3           | 360  |
| giorni in acqua.   | .80  |
| Figura 3. 40 Andamento della tensione deviatorica al variare della deformazione assiale per          | r la |
| miscela 1 in olio  | .81  |
| Figura 3. 41 Andamento della sovrapressione interstiziale al variare della deformazione assi         | ale  |
| per la miscela 1 in olio   | .82  |
| Figura 3. 42 Percorso dei carichi con inviluppo di rottura per la miscela 1 maturata per 28 gio      | orni |
| in olio  | .82  |

| Figura 3. 43 Percorso dei carichi con inviluppo di rottura per la miscela 1 maturata per 360   |
|--|
| giorni in olio83   |
| Figura 3. 44 Evoluzione nel tempo dell'angolo di resistenza al taglio per la miscela 1   |
| Figura 3. 45 Evoluzione nel tempo della coesione per la miscela 1  |
| Figura 3. 46 Andamento della tensione deviatorica al variare della deformazione assiale per la   |
| miscela 2 in acqua   |
| Figura 3. 47 .Andamento della sovrapressione interstiziale al variare della deformazione assiale   |
| per la miscela 2 in acqua  |
| Figura 3. 48 Percorso dei carichi con inviluppo di rottura per la miscela 2 maturata per 28 giorni   |
| in acqua   |
| Figura 3. 49 Percorso dei carichi con inviluppo di rottura per la miscela 2 maturata per 360   |
| giorni in acqua  |
| Figura 3. 50 Andamento della tensione deviatorica al variare della deformazione assiale per la   |
| miscela 2 in olio  |
| Figura 3. 51 Andamento della sovrapressione interstiziale al variare della deformazione assiale  |
| Eigune 2, 52 Demonree dei conichi con invilume di netture nen le miccele 2 meturete nen 28 cierni  |
| in olio  |
| Figura 3, 53 Percorso dei carichi con inviluppo di rottura per la miscela 2 maturata per 360   |
| giorni in olio   |
| Figura 3. 54 Evoluzione nel tempo dell'angolo di resistenza al taglio per la miscela 290   |
| Figura 3. 55 Evoluzione nel tempo della coesione per la miscela 2  |
| Figura 3. 56 Andamento della tensione deviatorica al variare della deformazione assiale per la   |
| miscela 3 in acqua   |
| Figura 3. 57 Andamento della sovrapressione interstiziale al variare della deformazione assiale  |
| per la miscela 3 in acqua  |
| Figura 3. 58 Percorso dei carichi con inviluppo di rottura per la miscela 3 maturata per 28  |
| giorni in acqua  |
| Figura 3. 59 Percorso dei carichi con inviluppo di rottura per la miscela 3 maturata per 360   |
| giorni in acqua94  |
| Figura 3. 60 Andamento della tensione deviatorica al variare della deformazione assiale per la   |
| miscela 3 in olio95  |
| Figura 3. 61 Andamento della sovrapressione interstiziale al variare della deformazione assiale  |
| per la miscela 3 in olio96   |
| Figura 3. 62 Percorso dei carichi con inviluppo di rottura per la miscela 3 maturata per 28  |
| giorni in olio   |
| Figura 3. 63 Percorso dei carichi con inviluppo di rottura per la miscela 3 maturata per 360   |
| giorni in olio   |
| Figura 3. 64 Evoluzione nel tempo dell'angolo di resistenza al taglio per la miscela 3   |
| Figura 3. 65 Evoluzione nel tempo della coesione per la miscela 3  |
| Figura 3. 66 Evoluzione nel tempo dell'angolo di resistenza al taglio per le miscele maturate in   |
| $E_{\text{result}} = 2 - 67  Evolutions and terms of all second results are in the second results$ |
| Figura 5. 0/ Evoluzione nei tempo della coesione per le miscele maturate in acqua  |
| rigura 5. 08 Evoluzione nei tempo dell'angolo di resistenza al taglio per le miscele maturate in   |
| Figure 2, 60 Evolutions not temps della accesione nor la missale maturate in alia  |
| Figura 5. 07 Evoluzione nel tempo della coesione per le miscele maturate m ono   |
| Figura 5. 70 Evoluzione nei tempo dell'angolo di resistenza al tagno   |

| Figura 3. 71 Evoluzione nel tempo della coesione103   | 3 |
|---|---|
| Figura 3. 72 Andamento della tensione deviatorica al variare della deformazione assiale per la  | а |
| miscela 1 in acqua, prova TX-UU104  | 4 |
| Figura 3. 73 Andamento della tensione deviatorica al variare della deformazione assiale per la  | a |
| miscela 1 in olio, prova TX-UU105   | 5 |
| Figura 3. 74. Evoluzione nel tempo della resistenza non drenata normalizzata Cu / p'o per la    | a |
| miscela 1   | 6 |
| Figura 3. 75. Percorso dei carichi prova TX UU miscela 1 28 giorni acqua10'                     | 7 |
| Figura 3. 76. Andamento della tensione deviatorica al variare della deformazione assiale per la | a |
| miscela 2 in acqua, prova TX-UU108  | 8 |
| Figura 3. 77. Andamento della tensione deviatorica al variare della deformazione assiale per la | a |
| miscela 2 in olio, prova TX-UU108   | 8 |
| Figura 3. 78. Evoluzione nel tempo della resistenza non drenata normalizzata Cu / p'o per la    | a |
| miscela 2   | 9 |
| Figura 3. 79. Percorso dei carichi prova TX UU miscela 2 28 giorni acqua110                     | 0 |
| Figura 3. 80. Andamento della tensione deviatorica al variare della deformazione assiale per la | a |
| miscela 3 in acqua, prova TX-UU   | 1 |
| Figura 3. 81. Andamento della tensione deviatorica al variare della deformazione assiale per la | a |
| miscela 3 in olio, prova TX-UU  | 2 |
| Figura 3. 82. Evoluzione nel tempo della resistenza non drenata normalizzata Cu / p'o per la    | a |
| miscela 3   | 3 |
| Figura 3. 83 . Percorso dei carichi prova TX UU miscela 3 28 giorni acqua113                    | 3 |
| Figura 3. 84. Evoluzione nel tempo della resistenza non drenata normalizzata Cu / p'o per la    | e |
| miscele maturate in acqua   | 4 |
| Figura 3. 85 Evoluzione nel tempo della resistenza non drenata normalizzata $C_u / p'_0$ per la | e |
| miscele maturate in olio  | 5 |
|   |   |
| Figura 4. 1 Schermata principale del software "Laboratorio di geotecnica"118                    | 8 |
| Figura 4. 2 Confronto delle curve di compressione edometrica per la miscela 1 maturata in       | n |
| acqua per 240 giorni119   | 9 |
| Figura 4. 3 Confronto delle curve di compressione edometrica per la miscela 1 maturata in olic  | С |
| per 240 giorni  | 0 |
| Figura 4. 4 Confronto del coefficiente di consolidazione cv per la miscela 1 maturata in acqua  | а |
| per 240 giorni  | 1 |
| Figura 4. 5 Confronto del coefficiente di consolidazione verticale cv per la miscela 1 maturata | a |
| in olio per 240 giorni  | 1 |
| Figura 4. 6 Confronto della conducibilità idraulica per la miscela 1 maturata in acqua per 240  | 0 |
| giorni  | 2 |
| Figura 4. 7 Confronto della conducibilità idraulica per la miscela 1 maturata in olio per 240   | 0 |
| giorni  | 2 |
| Figura 4. 8 Metodo di Casagrande per ricavare la tensione di preconsolidazione125               | 5 |
|   |   |
| Figura 5. 1 Superficie di snervamento per il modello Cam Clay, modificata da Nova (2002         | ) |
|   | 0 |
| Figura 5. 2 Piano di compressione isotropa, . Lancellotta (2012)13                              | 1 |
| Figura 5. 3 Superficie di snervamento per il Cam Clay modificato, modificata da . Muir Wood     | d |
| (2004)  | 2 |
|   |   |

Figura 5. 4 Simulazione prova edometrica con Cam Clay modificato miscela 1: (a) 28 giorni Figura 5. 5. Simulazione prova edometrica con Cam Clay modificato miscela 1: (a) 28 giorni Figura 5. 6 Simulazione prova triassiale CIU con Cam Clay modificato miscela 1 28 giorni acqua: (a) p'c=20 kPa; (b) p'c=100 kPa......138 Figura 5. 7. Simulazione prova triassiale CIU con Cam Clay modificato miscela 1 28 giorni olio: (a) p'c=20 kPa; (b) p'c=100 kPa; (c) p'c=300 kPa.....139 Figura 5. 8 Simulazione prova triassiale CIU con Cam Clay modificato miscela 1 360 giorni acqua: (a) p'<sub>c</sub>=20 kPa; (b) p'<sub>c</sub>=100 kPa; (c) p'<sub>c</sub>=300 kPa.....140 Figura 5.9 Simulazione prova triassiale CIU con Cam Clay modificato miscela 1 360 giorni olio: (a) p'<sub>c</sub>=20 kPa; (b) p'<sub>c</sub>=100 kPa; (c) p'<sub>c</sub>=300 kPa.....141 Figura 5. 11 Andamento della pendenza M della linea di stato critico in funzione del tempo Figura 5. 12 Simulazione prova edometrica con modello CBC miscela 1: (a) 28 giorni acqua Figura 5. 13 Simulazione prova edometrica con modello CBC miscela 1: (a) 28 giorni olio (b) Figura 5. 14 Simulazione prova triassiale CIU con modello CBC miscela 1 28 giorni acqua: (a) p'c=20 kPa; (b) p'c=100 kPa.....146 Figura 5. 15 Simulazione prova triassiale CIU con modello CBC miscela 1 28 giorni olio: (a) p'c=20 kPa; (b) p'c=100 kPa; ......147 Figura 5. 16 Simulazione prova triassiale CIU con modello CBC miscela 1 360 giorni acqua: (a)  $p'_c=20 \text{ kPa}$ ; (b)  $p'_c=100 \text{ kPa}$ ; (c)  $p'_c=300 \text{ kPa}$ .....148 Figura 5. 17 Simulazione prova triassiale CIU con modello CBC miscela 1 360 giorni olio: (a) p'c=20 kPa; (b) p'c=100 kPa; (c) p'c=300 kPa.....149 Figura 5. 19 Andamento di h<sub>1</sub> nel tempo......151

## Elenco delle tabelle

| Tabella 2. 1 Composizione delle miscele studiate da Carreto et (2015)                        | 16     |
|--|--------|
| Tabella 2. 2 Risultati della compressione isotropica, Carreto et al. (2015)                  | 17     |
| Tabella 2. 3. Risultati delle prove triassiali non drenate, Carreto et al. (2015)            | 20     |
| Tabella 2. 4. Caratteristiche della bentonite sodica, Tarzia (2019)                          | 23     |
| Tabella 2. 5 Composizione delle miscele analizzate, Tarzia (2019)                            | 24     |
| Tabella 2. 6. Parametri delle tre miscele, Tarzia (2019)                                     | 24     |
| Tabella 2. 7 Paramentri di resistenza, Tarzia (2019)   | 25     |
| Tabella 2. 8 Riepilogo risultati prove edometriche, Tarzia (2019)                            | 26     |
| Tabella 2. 9 Indici C <sub>r</sub> , C <sub>c</sub> e C <sub>s</sub> ottenuti, Tarzia (2019) | 27     |
| Tabella 2. 10 Tensione di preconsolidazione, Tarzia (2019)                                   | 27     |
| Tabella 2. 11 Conducibilità con permeametro a pareti rigide, Tarzia (2019)                   | 28     |
| Tabella 2. 12 Variazione dei gradienti utilizzati con permeametro a pareti flessibili,       | Tarzia |
| (2019)   | 28     |
| Tabella 2. 13 Conducibilità con permeametro a pareti flessibili, Tarzia (2019)               | 29     |
| Tabella 2. 14 Parametri Cam Clay modificato, Flessati et al. (2020)                          | 30     |
| Tabella 2. 15 Parametri utilizzati per la simulazione con il modello CBC, Flessati et al.    | (2020) |
| -  | 32     |
| Tabella 2. 16 Miscele analizzate, Evans & Opdyke (2005)                                      | 33     |
| Tabella 2. 17 Composizione miscela, Royal et al.(2018)                                       | 36     |
| Tabella 2. 18 Composizione della miscela, Fratalocchi et al. (2018)                          | 37     |
|  |        |
| Tabella 3. 1 Caratteristiche della bentonite   | 40     |
| Tabella 3. 2 Miscele utilizzate nelle prove  | 40     |
| Tabella 3. 3 Indici dei vuoti iniziali per la miscela 1                                      | 46     |
| Tabella 3. 4 Risultati prove edometriche miscela1 con maturazione in acqua                   | 47     |
| Tabella 3. 5 Risultati prove edometriche miscela1 con maturazione in olio                    | 48     |
| Tabella 3. 6 Tensione di preconsolidazione per a miscela 1                                   | 52     |
| Tabella 3. 7 Indice di compressione e indice di rigonfiamento per la miscela 1               | 53     |
| Tabella 3. 8 Indice dei vuoti iniziali per la miscela 2                                      | 55     |
| Tabella 3. 9 Risultati prove edometriche miscela 2 in acqua                                  | 56     |
| Tabella 3. 10 Risultati prove edometriche miscela 2 in olio                                  | 57     |
| Tabella 3. 11 Tensione di preconsolidazione media per la miscela 2                           | 60     |
| Tabella 3. 12 Indici di compressione Cc e indici di rigonfiamento Cs per la miscela 2        | 61     |
| Tabella 3. 13. Indice dei vuoti iniziali per la miscela 3                                    | 63     |
| Tabella 3. 14 Risultati prove edometriche per la miscela 3 in acqua                          | 64     |
| Tabella 3. 15 Risultati prove edometriche per la miscela 3 in olio                           | 65     |
| Tabella 3. 16 Tensione di preconsolidazione media per la miscela 3                           | 68     |
| Tabella 3. 17 Indici di compressione Cc e indici di rigonfiamenti Cs per la miscela 3        | 69     |
| Tabella 3. 18. Conducibilità idraulica per $\sigma'_v$ di 196.1 kPa                          | 71     |
| Tabella 3. 19 Conducibilità idraulica per $\sigma'_v$ di 784.5 kPa                           | 73     |
| Tabella 3. 20 Parametri di resistenza della miscela 1  | 83     |
| Tabella 3. 21 Parametri di resistenza della miscela 2  | 90     |
| Tabella 3. 22 Parametri di resistenza della miscela 3  | 97     |
| Tabella 3. 23 Resistenza non drenata Cu/ p'o miscela 1                                       | 105    |

| Tabella 3. 24. Resistenza non drenata Cu/p'0 della miscela 2109   |
|---|
| Tabella 3. 25. Resistenza non drenata $C_u/p'_0$ della miscela 3112   |
| Tabella 4. 1 Risultati dell'interpretazione della prova edometrica per la miscela 1 e la miscela                                  |
| 2, maturate per 240 giorni sia in acqua che in olio123  |
| Tabella 4. 2 Risultati dell'interpretazione della prova edometrica per le tre miscele maturate in                                 |
| olio per 360 giorni   |
| Tabella 4. 3 Tensioni di preconsolidazione ottenute con le due modalità di interpretazione.125                                    |
| Tabella 4. 4 Indici di compressione Cc e indici di rigonfiamento Cs ottenuti con le due modalità                                  |
| di interpretazione  |
|   |
| Tabella 5. 1. Parametri Cam Clay modificato miscela 1 maturata in acqua135  |
| Tabella 5. 2 Parametri Cam Clay modificato miscela 1 maturata in olio135  |
| Tabella 5. 3 Parametri Cam Clay modificato miscela 2 maturata in acqua  |
| Tabella 5. 4 Parametri Cam Clay modificato miscela 2 maturata in olio136  |
| Tabella 5. 5 Parametri Cam Clay modificato miscela 3 maturata in acqua136   |
| Tabella 5. 6 Parametri Cam Clay modificato miscela 3 maturata in olio136  |
| Tabella 5. 7 Parametri $\Gamma$ , $h_1$ , $g_1$ e $h_2$ per modello CBC miscela 1 maturata in acqua144                            |
| Tabella 5. 8 Parametri $\Gamma$ , $h_1$ , $g_1$ e $h_2$ per modello CBC miscela 1 maturata nell'olio144                           |
| Tabella 5. 9 Parametri $\Gamma$ , h <sub>1</sub> , g <sub>1</sub> e h <sub>2</sub> per modello CBC miscela 2 maturata in acqua144 |
| Tabella 5. 10 Parametri Γ, h <sub>1</sub> , g <sub>1</sub> e h <sub>2</sub> per modello CBC miscela 2 maturata nell'olio144       |
| Tabella 5. 11. Parametri $\Gamma$ , $h_1$ , $g_1$ e $h_2$ per modello CBC miscela 3 maturata in acqua144                          |
| ÷ 1   |

## 1. Introduzione

Nella geotecnica ambientale, l'incapsulamento è una pratica utilizzata per evitare la migrazione dell'inquinante e proteggere la falda acquifera, e consiste nel realizzare un confinamento laterale con dei diaframmi plastici verticali a bassa permeabilità mentre sul fondo si fa affidamento a una formazione geologica impermeabile (Figura 1). Il confinamento sul fondo può essere ottenuto anche realizzando un diaframma orizzontale, ma il costo e la difficoltà di costruzione non la rendono una strada conveniente (De Paoli et al. 1991). La realizzazione di un diaframma verticale avviene mediante lo scavo di una trincea nella quale viene colato un materiale a bassa permeabilità come una miscela di Cemento-Bentonite. Un aspetto fondamentale da tenere in considerazione nella loro realizzazione sono le prestazioni a lungo termine e il contatto del diaframma con l'agente inquinante che potrebbe danneggiarlo, rendendo inefficace l'intervento.



Figura 1. 1 Esempio di incapsulamento con diaframma plastico, Zibisco (2019)

### 1.1 Modalità costruttive dei diaframmi cemento bentonite

L'asportazione del terreno avviene con una benna su fune o con sistemi a fresa che permettono di raggiungere profondità di oltre 100 metri, mantenendo una buona verticalità dello scavo e dando la possibilità di correggerla durante la perforazione (De Paoli et al., 1991). La costruzione del diaframma può avvenire in monofase o in bifase. Con la costruzione in monofase si utilizza la miscela Cemento- Bentonite finale già nella fase di scavo. Inizialmente ha la funzione di stabilizzare le pareti dello scavo, e successivamente grazie alla presa del cemento si ha la solidificazione della miscela. Nella costruzione in bifase durante la fase di scavo si utilizzano dei fanghi bentonitici, che grazie alla pressione idrostatica esercitata sulle pareti trincea ne garantisco la sua stabilità e solo una volta terminata la fase di scavo si sostituiscono con la miscela di cemento e bentonite che costituirà il diaframma. La modalità bifase prevede di utilizzare una miscela Cemento-Bentonite con una densità maggiore, che pompata lentamente dal fondo dello scavo per evitare la miscelazione tra i due materiali, permetta la risalita dei fanghi bentonitici utilizzati durante lo scavo. Con la costruzione in bifase permette di raggiungere profondità minori rispetto a quella in monofase, e la sua realizzazione risulta più complessa perché la sostituzione dei fanghi bentonitici risulta essere un'operazione delicata. Infatti, una sostituzione incompleta comprometterebbe la funzione del diaframma.

### 1.2 Struttura della Tesi

Nel capitolo 2 si darà un breve revisione bibliografica sul comportamento idro-meccanico delle miscele cemento bentonite

Nel capitolo 3 si procederà all'interpretazione di prove di laboratorio (prove edometriche e prove triassiali), svolte nel corso di una sperimentazione su tre miscele con diverso rapporto di Cemento-Bentonite. In particolare, si presterà attenzione all'evoluzione dei parametri idromeccanici nel tempo. Tali miscele, oltre che in acqua, sono state fatte maturare anche a contatto con un idrocarburo non tossico per cercare di simulare le condizioni di esercizio del diaframma plastico, e in particolare l'effetto del contatto con liquidi non polari.

Il capitolo 4 sarà dedicato alla verifica del corretto funzionamento del software " Laboratorio di geotecnica", sviluppato dall'Ing. P. Rapino, per l'automatizzazione dell'interpretazione delle prove realizzate presso il laboratorio di Geotecnica del Politecnico di Torino. In particolare, verranno confrontati i risultati di alcune prove edometriche ottenuti nel capitolo 3 con quelli provenienti da un'interpretazione "automatizzata" con il software.

Nel capitolo 5 verrà eseguita una modellazione costitutiva delle prove con due modelli elastoplastici con incrudimento. Il primo modello utilizzato è il Modified Cam Clay (MCCM, Roscoe & Burland, 1968), originariamente proposto per le argille e di larga diffusione nella pratica ingegneristica. Il secondo modello è una recente modifica al MCCM appositamente formulata per le miscele cemento – bentonite (CBC model, Flessati et al., 2020)

Nel capitolo 6 verranno mostrate le conclusioni alle quali si è giunti dall'elaborazione dei dati raccolti nel corso della sperimentazione sulle tre miscele cemento – bentonite e dalla loro modellazione costitutiva.

## 2. Miscele Cemento-Bentonite: stato dell'arte

Il presente capitolo presenta una succinta revisione bibliografica inerente al comportamento idraulico e meccanico delle miscele Cemento-Bentonite. Nonostante il loro largo impiego, la caratterizzazione del comportamento meccanico è stata finora relativamente limitata: in particolare, la maggior parte degli studi si limita alla determinazione del valore di resistenza a compressione uniassiale, eventualmente studiando l'effetto del tempo di maturazione. Alcuni casi, particolarmente quelli che fanno riferimento a miscele additivate con cemento di alto forno, si sono concentrati sull'effetto dell'invecchiamento e/o della interazione con contaminanti sul comportamento idraulico. Tali studi sono brevemente riassunti nel seguito.

### 2.1 Carreto et al. (2015)

L'obiettivo della ricerca era quello di valutare l'effetto del tempo di maturazione su campioni di miscele Cemento-Bentonite, caratterizzate da diversi rapporti di massa tra i due componenti solidi. Una delle miscele (indicata come composizione A nella Tabella 2.1) ha la stessa composizione di quella utilizzata per realizzare un diaframma nel Monastero di Santa Clara a Velha (Portogallo). I provini sono stati realizzati con cemento Portland tipo CEMII-32.5N prodotto dalla SECIL (Lisbona, Portogallo) e una bentonite sodica attiva (Bentonil CM10) prodotta dalla SUD-CHEMIE (Monaco, Germania).

| C | omposizione  | water volume/1 m <sup>3</sup><br>of slurry (L/m <sup>3</sup> ) | Bentonite mass/1<br>m <sup>3</sup> of slurry<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Cement mass/1 m <sub>3</sub><br>of slurry (kg/m <sup>3</sup> ) |
|---|--|--|--|--|
| A | 1 m <sup>3</sup> acqua+35 kg bentonite+200kg cemento (C/B 5.7) | 929  | 32.5   | 186  |
| B | 1 m <sup>3</sup> acqua+35 kg bentonite+200kg cemento (C/B 4)   | 925  | 46.2   | 185  |
| С | 1 m <sup>3</sup> acqua+35 kg bentonite+200kg cemento (C/B 4.3) | 943  | 33.0   | 141  |

Tabella 2. 1 Composizione delle miscele studiate da Carreto et (2015)

Il comportamento meccanico e idraulico è stato studiato mediante l'esecuzione di prove triassiali non drenate CIU su tre miscele di differente composizione. I provini della miscela denominata A hanno un rapporto Cemento-Bentonite di 5,7 e sono stati fatti maturare per 4, 8, 12 e 16 settimane, i provini della miscela denominata B hanno un rapporto Cemento-Bentonite di 4 e i provini della miscela denominata C hanno un rapporto Cemento-Bentonite di 4,3. Le composizioni B e C sono state fatte maturare per 8 settimane. Poiché i provini erano già saturi, è stato sufficiente applicare una 'backpressure' di 300 kPa per saturare il sistema e ottenere una B di 0.95. I provini sono stati consolidati sotto un carico isotropo. Dopo la consolidazione è stato impostato un gradiente idraulico pari a 10 tra la parte inferiore e quella superiore di ogni provino per determinarne la permeabilità. Durante il test è stata utilizzata dell'acqua di rubinetto poiché l'acqua distillata crea una riduzione della conducibilità idraulica. Dopo aver determinato la permeabilità, la fase di rottura è stata ottenuta imponendo una velocità di spostamento costante pari a 0.02 mm/min e la prova si è ritenuta conclusa dopo aver raggiunto il 20% di deformazione assiale.

#### 2.1.2 Risultati della fase di compressione isotropa

Nella tabella 2.2 sono presenti alcuni risultati della compressione isotropa. Nonostante le reazioni di idratazione del cemento, i provini mostrano un alto contenuto di acqua e questo spiega l'elevato valore di volume specifico.

|             | Curing time |                    |                      | Height | Diameter |         |                  |          |
|-------------|-------------|--------------------|----------------------|--------|----------|---------|------------------|----------|
| Composition | (weeks)     | Specimen           | $Z \text{ (mm)}^{a}$ | (mm)   | (mm)     | $ u_0 $ | $\lambda_{\max}$ | $\kappa$ |
| A           | 4           | A14-1              | 119-259              | 140    | 70       | 9.12    | 1.69             | _        |
|             |             | A19-1              | 130-260              | 130    | 70       | 9.48    | 1.64             | _        |
|             | 8           | A21-1              | 130-260              | 130.5  | 70       | 9.56    | 1.85             | _        |
|             |             | A21-2              | 0-128                | 128.5  | 70       | 9.27    | 1.80             | _        |
|             |             | A22-1              | 105-260              | 140    | 70       | 9.11    |                  |          |
|             |             | A37-2              | 10-150               | 140    | 70       | 9.09    | _                | _        |
|             |             | A38-1              | 50-250               | 200    | 99       | 9.32    | 1.40             | 0.10     |
|             |             | A39-1              | 50-250               | 200    | 99       | 9.23    | 1.63             | 0.06     |
|             |             | A40-1 <sup>b</sup> | 0-159.5              | 159.5  | 101.5    | 8.27    | 1.59             | 0.13     |
|             |             | A42-1 <sup>b</sup> | 0-159                | 159    | 101.5    | 8.74    | 1.54             | 0.07     |
|             |             | A42A-1             | 72-262               | 188    | 97.5     | 9.59    | 1.43             | 0.06     |
|             | 12          | A12-4              | 5-145                | 140    | 70       | 9.08    | 1.72             | _        |
|             |             | A18-1              | 145-289              | 130.5  | 70       | 9.53    | 1.69             |          |
|             |             | A18-2              | 0-145                | 140    | 70       | 9.04    | 1.79             | _        |
|             |             | A24-1              | 150-280              | 131    | 70       | 9.60    | _                | _        |
|             |             | A27-1              | 100-240              | 140    | 70       | 9.19    | _                | _        |
|             | 16          | A25-1              | 20-220               | 180    | 99       | 9.52    | 1.71             | 0.06     |
|             |             | A26-1              | 20-220               | 180    | 97.5     | 9.42    | 1.66             |          |
| В           | 8           | B1-2               | 95-235               | 140    | 70       | 8.71    |                  | _        |
|             |             | B2-1               | 25-225               | 200    | 97       | 8.80    | 1.22             | 0.09     |
|             |             | B3-1               | 50-250               | 200    | 97       | 8.81    | 1.59             | 0.12     |
| С           | 8           | C1-1               | 145-285              | 140    | 70       | 11.35   |                  |          |
|             |             | C2-1               | 10-210               | 200    | 99       | 11.41   | 2.11             | 0.21     |
|             |             | C3-1               | 50-250               | 200    | 99.5     | 11.77   | 2.10             | 0.21     |

<sup>a</sup>The position of the specimen in the original sample, measured from its base.

<sup>b</sup>During curing, a load was applied to the specimen to simulate self-weight consolidation in a deeper zone of the wall.

|  | Tabella 2. 2 Risultati | i della compressione | isotropica, | <i>Carreto et al.</i> | (2015) |
|--|------------------------|----------------------|-------------|-----------------------|--------|
|--|------------------------|----------------------|-------------|-----------------------|--------|

I provini durante la compressione isotropica (Figura 2.1) mostrano il comportamento tipico dei terreni sovraconsolidati nonostante i provini abbiano sperimentato solo il peso proprio prima della prova. Superata la tensione di preconsolidazione mostrano delle deformazioni volumetriche significative. La tensione di preconsolidazione della miscela di composizione A mostra valori compresi tra 29 e 52 kPa. La pendenza del ramo di ricarico ( $\kappa$ ) è dell'ordine del 4-7% la massima pendenza del ramo di compressione ( $\lambda_{max}$ ). I provini maturati per più tempo mostrano valori di preconsolidazione maggiore che possono essere spiegati dalla lenta evoluzione delle reazioni pozzolaniche che sono responsabili della formazione di prodotti cementizi secondari che incrementano il legame tra le particelle. Le curve tendono ad avvicinarsi al crescere del carico fino a sovrapporsi, fenomeno che può essere spiegato dalla rottura dello scheletro solido che di fatto rende il comportamento tra le diverse miscele del tutto simile.



Figura 2. 1 Prove di compressione per la miscela di composizione A (C/B di 5,7), Carreto et al. (2015)

La miscela di composizione B aveva un volume specifico minore rispetto alla miscela A (Figura 2.2 (a)) il che può essere spiegato con la maggior presenza di particelle solide dovute al fatto che, a parità di contenuto di cemento, il maggior contenuto di bentonite della miscela B incrementa lo sviluppo di prodotti cementizi secondari. Per tensioni medie efficaci superiori a 50 kPa le curve della miscela A e B si sovrappongono. Il maggior sviluppo dei prodotti cementizi secondari spiega anche i valori di tensione di preconsolidazione maggiori della miscela B rispetto alla A. Un confronto tra la composizione A e C (Figura 2.2 (b)), contenenti la stessa quantità di bentonite, ha mostrato che una riduzione della quantità di cemento corrisponde un aumento del volume specifico e una riduzione della tensione di preconsolidazione, dovuta ha una struttura cristallina meno densa.



Figura 2. 2 Prove di compressione per le tre composizioni con maturazione di 8 settimane, Carreto et al. (2015)

#### 2.1.3 Risultati prove Triassiali

I risultati delle prove triassiali non drenate CIU sono mostrati nella tabella 2.3. I provini hanno mostrato due comportamenti distinti in base alla pressione di confinamento  $p'_c$  imposta all'inizio della fase di rottura. Il confine tra questi due comportamenti è definito dalla tensione di preconsolidazione p'y, determinata durante la compressione isotropa. Si hanno quindi due casi:

- provini consolidati a una pressione p'c minore a p'y (p'c<p'y);

provini consolidati a una pressione p'c maggiore a p'y (p'c>p'y).

| Specimen           | Curing<br>time<br>(weeks) | Diameter<br>(mm) | Height (mm) | $p_c'$ (kPa) | q <sub>max</sub><br>(kPa) | q <sub>ult</sub><br>(kPa) | $(q/p')_{\rm max}$ | $(q/p')_{ult}$ | $G_i$<br>(MN/m <sup>2</sup> ) | $G_{ m peak}$<br>(MN/m <sup>2</sup> ) | Observations                              |
|--------------------|---------------------------|------------------|-------------|--------------|---------------------------|---------------------------|--------------------|----------------|-------------------------------|---------------------------------------|---|
| A36-1 <sup>a</sup> | 8                         | 99               | 200         |              | 54                        |                           | 3                  |                | 8.3                           | 2.4                                   | Test concluded at $\varepsilon_1 = 1.1\%$ |
| A37-1              |                           | 69.5             | 140         | 25           | 35                        | 26                        | 3                  | 2.46           | 7.0                           | 0.9                                   | Test concluded at $\varepsilon_1 = 3.6\%$ |
| A37-2              |                           | 70               | 140         | 25           | 31                        | 24                        | 3                  | 3              | 13.0                          | 0.9                                   |   |
| A38-1              |                           | 67               | 104.5       | 100          | 100                       | 68                        | 2.47               | 2.37           | 12.3                          | 1.1                                   | _   |
| A39-1 <sup>b</sup> |                           | 70               | 123.5       | 410          | 370                       | 244                       | 2.40               | 2.17           | 74.0                          | 5.4                                   | _   |
| A40-1 <sup>c</sup> |                           | 66.2             | 71.9        | 200          | 225                       | 217                       | 2.29               | 2.25           | 25.7                          | 2.7                                   | Test concluded at $\varepsilon_1 = 5\%$   |
| A41-1 <sup>c</sup> |                           | 69.5             | 140         | _            | 80                        | 74                        | 3                  | 2.58           | 24.0                          | 0.8                                   |   |
| A42-1 <sup>c</sup> |                           | 66.5             | 129.5       | 194          | 181                       | 114                       | 2.14               | 1.84           | 15.7                          | 2.5                                   |   |
| A42A-1             |                           | 66.7             | 131.4       | 190          | 190                       | 122                       | 2.50               | 2.36           | 26.3                          | 3.2                                   | _   |
| A24-1              | 12                        | 70               | 130         | 27           | 43                        | 38                        | 3                  | 2.77           | 16.7                          | 2.0                                   | Test concluded at $\varepsilon_1 = 4.4\%$ |
| A24-2              |                           | 70               | 116         | 400          | 367                       | 228                       | 2.26               | 2.11           | 20.3                          | 3.6                                   |   |
| A26-1              | 16                        | 70               | 136.5       | 400          | 372                       | 236                       | 2.18               | 2.08           | 34.0                          | 3.6                                   | _   |
| B1-2               | 8                         | 70               | 139.7       | 25           | 36                        | 28                        | 3                  | 2.27           | 9.0                           | 1.2                                   | _   |
| B2-1               |                           | 69.6             | 137.5       | 100          | 96                        | 70                        | 2.33               | 2.04           | 11.3                          | 1.5                                   | _   |
| B3-1               |                           | 70               | 124.5       | 400          | 388                       | 279                       | 2.29               | 2.04           | 35.3                          | 6.1                                   | Test concluded at $\varepsilon_1 = 14\%$  |
| C1-1               | 8                         | 70               | 140         | 10           | 8.5                       | 7.0                       | 1.71               | 1.30           | 0.5                           | 0.3                                   |   |
| C2-1               |                           | 70               | 138.7       | 96           | 95                        | 65                        | 2.39               | 2.19           | 10.3                          | 1.5                                   | _   |
| C3-1               |                           | 68.9             | 106         | 200          | 195                       | 131                       | 2.35               | 2.27           | 22.7                          | 2.2                                   | _   |

<sup>a</sup>Sample fabricated with deteriorated cement. <sup>b</sup>This test was executed with a radial pressure of 385 kPa, less than the stress at which the sample was consolidated (specimen slightly overconsolidated). <sup>c</sup>During curing, these samples were subjected to a consolidation stress higher than their self-weight.



#### 2.1.3.1 Provini consolidati a una pressione di confinamento minore di quella di preconsolidazione

I provini maturati per 8 settimane (Figura 2.3) mostrano una tensione deviatorica  $(q_{max})$ maggiore rispetto alla tensione media efficace a cui sono stati consolidati, associata a una deformazione assiale del 1-2%. La tensione di snervamento, che corrisponde alla tensione deviatorica massima, varia tra 29 e 32 kPa. Raggiunto il picco di resistenza i valori si riducono, stabilizzandosi su dei valori costanti al crescere della deformazione.



Figura 2. 3 Andamento delle prove triassiali per la composizione A maturata per 8 settimane  $(p_c < p'_y)$ , Carreto et al. (2015)

Tempi di maturazione più lunghi mostrano una un incremento della tensione deviatorica massima (Figura 2.4). Tale comportamento è da attribuire alla produzione di prodotti cementizi secondari che rafforzano la struttura cristallina, che a sua volta governa il comportamento quando si consolida a pressioni inferiori a quella di preconsolidazione.



Figura 2. 4 Andamento delle prove triassiali per la composizione  $A(p'_c < p'_y)$ , Carreto et al. (2015)

# 2.1.3.2 Provini consolidati a una pressione di confinamento maggiore di quella di preconsolidazione

Quando la miscela viene consolidata a una pressione di confinamento superiore a quella di preconsolidazione, la risposta sforzo-deformazione è pressoché simile tra le differenti composizioni poiché viene distrutta la struttura cristallina del materiale. Durante la fase di rottura, il comportamento del materiale è quasi elastico per piccole deformazioni assiali, seguito da una graduale deformazione elastoplastica fino alla tensione deviatorica di picco associata a deformazioni tra l'1 e il 3%. La tensione deviatorica raggiunge valori massimi che sono compresi tra 0.92 e 1 volte la pressione di confinamento. Nel post picco i valori si sono ridotti in modo più o meno brusco (Figura 2.5). I campioni con le composizioni, indipendentemente dalla composizione, hanno mostrato un aumento della tensione deviatorica al crescere della pressione di confinamento. Un altro aspetto evidenziato dallo studio è che imponendo una pressione di confinamento superiore a quella di preconsolidazione, i campioni delle 3 composizioni non mostrano differenze nel comportamento a rottura, che può essere spiegato ancora una volta dalla rottura dello scheletro solido del materiale.



Figura 2. 5 Andamento delle prove triassiali per le tre composizioni maturate per 8 settimane  $(p'_c > p'_y)$ , Carreto et al. (2015)

#### 2.1.4 Test di permeabilità

Quando si aggiunge il cemento alla sospensione di bentonite c'è un aumento a breve termine della conducibilità idraulica dovuto all'aggregazione delle particelle con conseguente creazione di vuoti. Le successive reazioni chimiche creano una riduzione dei vuoti che vengono riempiti dai prodotti di idratazione provocando una riduzione della permeabilità. Le prove di permeabilità effettuate da Carreto et al (2015) sono state eseguite a pressioni di confinamento p'c maggiori della tensione di preconsolidazione p'y. Nonostante avvenga la rottura dello scheletro solido, si ha comunque una riduzione della permeabilità dovuta alla riduzione dei vuoti. Aumentando la pressione di confinamento da 50 a 200 kPa si è ridotta la conducibilità di un ordine di grandezza (Figura 2.6). Nonostante ci si aspettasse una riduzione della permeabilità al crescere del tempo di maturazione, tale aspetto non è stato riscontrato nello studio e una delle cause potrebbe essere per il fatto che i provini sono stati fatti maturare per un massimo di 12 settimane, un tempo troppo breve per apprezzare gli effetti della maturazione.



Figura 2. 6. Influenza del tempo sulla conducibilità idraulica della miscela di composizione A, Carreto et al. (2015)

#### 2.2 Tarzia (2019)

Di seguito vengono illustrati i risultati di una sperimentazione su tre miscele Cemento-Bentonite svolte in un lavoro di tesi di Laurea Magistrale al Politecnico di Torino. Le tre miscele indagate hanno rispettivamente un rapporto di cemento-bentonite di 4, 5 e 6 (denominate CB4-0, CB5-0 e CB6-0) e sono state fatte maturare in acqua per 28 giorni. Lo 0 nel codice CBx-0 sta ad indicare la percentuale di rimpiazzo del cemento, che nelle miscele analizzate non c'è stato. Nel corso della sperimentazione sono state eseguite prove edometriche, prove triassiali e prove di permeabilità. Per la realizzazione dei provini è stato utilizzato del cemento CEM I 32,5 N (Portland 325) e della bentonite sodica, le cui caratteristiche sono riportate nella seguente tabella 2.4.

| Bentonite |        |         |  |  |  |  |  |
|-----------|--------|---------|--|--|--|--|--|
| Gs        | 2,952  | [g/cm³] |  |  |  |  |  |
| WL        | 534,51 | [%]     |  |  |  |  |  |
| WP        | 74,85  | [%]     |  |  |  |  |  |
| P.I.      | 459,66 | [%]     |  |  |  |  |  |

Tabella 2. 4. Caratteristiche della bentonite sodica, Tarzia (2019)

La composizione delle miscele analizzate da Tarzia si differenzia per il contenuto di cemento e la loro composizione è riportata di seguito nella tabella 2.5:

| Codice | Bentonite [g] | Cemento [g] | Acqua [g] |
|--------|---------------|-------------|-----------|
| CB-4-0 | 50            | 200         | 900       |
| CB-5-0 | 50            | 250         | 900       |
| CB-6-0 | 50            | 300         | 900       |

Tabella 2. 5 Composizione delle miscele analizzate, Tarzia (2019)

I provini sono stati confezionati come segue:

- Idratazione della bentonite: è avvenuta miscelando la bentonite con un contenuto d'acqua di 18 volte il suo peso. La miscelazione è stata effettuata con una centrifuga meccanica ed è perdurata fino all'ottenimento di una miscela omogenea. Il processo ha richiesto una durata di almeno 24 ore, vista la bassa permeabilità del materiale.
- Aggiunta del cemento: è stata eseguita una seconda miscelazione con una centrifuga meccanica. Si è assistito ad una falsa presa del cemento, dovuta ad una prima idratazione del cemento. Si è mescolato fino ad ottenere una miscela fluida e omogenea. Ottenuto il composto finale, si è dovuto mescolare manualmente per eliminare eventuali bolle d'aria.
- Colata negli stampi: si è proceduto a saturare la carta filtro, che permette il drenaggio dell'acqua, ma non il passaggio del materiale solido. I provini vengono riposti nelle vasche di maturazione, ancorati sul fondo con della colla a caldo.

Nella tabella 2.6 di seguito sono riportati i parametri delle tre miscele, e come ci si aspetta, c'è stata una riduzione dell'indice dei vuoti al crescere del rapporto Cemento-Bentonite.

| Miscela      | Cemento/Bentonite | <b>G</b> <sub>s</sub> [-] | Indice dei vuoti<br>iniziale, e0 [-] |
|--------------|-------------------|---------------------------|--------------------------------------|
| CB4-0        | 4                 | 2.72                      | 8.8                                  |
| CB5-0        | 5                 | 2.76                      | 7.29                                 |
| <b>CB6-0</b> | 6                 | 2.88                      | 6.25                                 |

Tabella 2. 6. Parametri delle tre miscele, Tarzia (2019)

#### 2.2.1 Prove triassiali

Sono state eseguite delle prove triassiali consolidate non drenate (CIU) e le pressioni di confinamento utilizzate sono state 20, 100 e 300 kPa. Per ciascuna miscela sono stati ricavati i parametri di resistenza di picco in termini di angolo di resistenza al taglio  $\varphi'_p$  e coesione c'<sub>p</sub>. I risultati ottenuti sono riportati nella tabella 2.7 e si può vedere che il valore dell'angolo di resistenza al taglio si riduce al crescere del rapporto Cemento-Bentonite, mentre la coesione cresce con il rapporto Cemento Bentonite.

|                    | c <sub>p</sub> [kra] |
|--------------------|----------------------|
| <b>CB4-0</b> 49.11 | 2.77                 |
| <b>CB5-0</b> 47.18 | 5.02                 |
| <b>CB6-0</b> 44.99 | 8.98                 |

Tabella 2. 7 Paramentri di resistenza, Tarzia (2019)

Diagrammando la tensione deviatorica q in funzione della deformazione assiale, è stato ricavato che il valore massimo di tensione deviatorica raggiunto cresce con la pressione di confinamento. Ai confinamenti più bassi (20kPa e 100 kPa) la tensione deviatorica cresce asintoticamente con la deformazione, mentre al confinamento di 300 kPa il materiale mostra un comportamento rammollente ('softening'). A titolo di esempio è stato riportato l'andamento della tensione deviatorica nei confronti della deformazione assiale  $\varepsilon_a$  per la miscela CB5-0 (Figura 2.7).



Figura 2. 7 Andamento della tensione deviatorica, Tarzia (2019)

#### 2.2.2 Prove edometriche

Nella tabella 2.8 sono riportati i risultati delle prove edometriche mentre nella figura 2.8 sono riportate le curve di compressibilità delle tre miscele. Dalla figura 2.8 si nota come l'indice dei vuoti si riduca al crescere del rapporto Cemento-Bentonite, ma tale dipendenza scompare superata la tensione verticale di 392.3 kPa, con le tre curve di compressibilità che si sovrappongono.

| CB-4-0   |       |          |          | CB-5-0 |          |  | CB-6-0   |       |          |
|----------|-------|----------|----------|--------|----------|--|----------|-------|----------|
| σ' [Kpa] | e [-] | k [m/s]  | σ' [Kpa] | e [-]  | k [m/s]  |  | σ' [Kpa] | e [-] | k [m/s]  |
|          |       |          |          |        |          |  |          |       |          |
| 3.075    | 8.8   | 3.6E-07  | 3.075    | 7.2    | 1.86E-07 |  | 3.075    | 6.1   | 1.23E-07 |
| 12.275   | 8.7   | 2.01E-07 | 12.275   | 7.2    | 1.34E-07 |  | 12.275   | 6.1   | 1.09E-07 |
| 27.575   | 8.4   | 1.38E-07 | 27.575   | 7.1    | 1.01E-07 |  | 27.575   | 6.0   | 1.18E-07 |
| 55.15    | 7.5   | 7.89E-08 | 55.15    | 6.8    | 9.27E-08 |  | 55.15    | 5.9   | 9.97E-08 |
| 110.325  | 6.5   | 4.22E-08 | 110.325  | 6.1    | 5.03E-08 |  | 110.325  | 5.7   | 7.14E-08 |
| 220.65   | 5.2   | 2.64E-08 | 220.65   | 5.1    | 3.09E-08 |  | 220.65   | 4.9   | 4.80E-08 |
| 441.3    | 4.1   | 1.9E-09  | 441.3    | 4.0    | 1.3E-08  |  | 441.3    | 4.1   | 9.83E-09 |
| 882.6    | 2.9   | 9.71E-10 | 882.6    | 3.0    | 3.72E-09 |  | 882.6    | 3.1   | 3.70E-09 |
| 1765.2   | 2.0   | 1.58E-10 | 1765.2   | 2.1    | 7.71E-10 |  | 1765.2   | 2.3   | 3.37E-10 |

Tabella 2. 8 Riepilogo risultati prove edometriche, Tarzia (2019)



Figura 2. 8 Curve di compressibilità, Tarzia (2019)

Nella figura 2.9 è mostrato l'andamento delle conducibilità idrauliche che sono state ottenute in funzione dell'indice dei vuoti, evidenziando, a parità di indice dei vuoti, che la conducibilità si riduce riducendo il contenuto di cemento.



Figura 2. 9 Conducibilità idraulica in funzione dell'indice dei vuoti, Tarzia (2019).

Nella tabella 2.9 sono riportati l'indice di ricarico  $C_r$ , l'indice di compressione  $C_c$  e l'indice di rigonfiamento  $C_s$ , mentre nella tabella 2.10 sono riportate le tensioni di preconsolidazione  $\sigma'_p$  determinate per le diverse prove. Si può notare come la tensione di preconsolidazione cresca con il rapporto Cemento-Bentonite.

|    | CB-4-0 | CB-5-0 | CB-6-0 |
|----|--------|--------|--------|
| Cr | 0.12   | 0.12   | 1.12   |
| Cc | 2.69   | 3.07   | 3.28   |
| Cs | 0.09   | 0.09   | 0.09   |

Tabella 2. 9 Indici Cr, Cc e Cs ottenuti, Tarzia (2019)

| Miscela | σ 'p [KPa] |
|---------|------------|
| CB-4-0  | 49,0       |
| CB-5-0  | 98,1       |
| CB-6-0  | 196,1      |

Tabella 2. 10 Tensione di preconsolidazione, Tarzia (2019)

#### 2.2.3 Prove di permeabilità

Sono state eseguite delle prove di permeabilità utilizzando sia un permeametro a pareti rigide che un permeametro a pareti flessibili.

Per la prova con il permeametro a parete rigida ogni provino è stato consolidato a una tensione efficace di 150 kPa. Il processo di flusso è stato instaurato imponendo una differenza di pressione tra la base superiore e inferiore del provino. Pei provini CB4-0 e CB6-0 è stata imposta una differenza di pressione di 6 kPa e un gradiente idraulico pari a 25, mentre per il provino CB5-0 è stata imposta una differenza di pressione di 20 kPa e un gradiente idraulico pari a 90. I risultati ottenuti sono stati riportati nella tabella 2.11.

| Miscela | Conducibilità idraulica [m/s] |
|---------|-------------------------------|
| CB-4-0  | 7,28E-08                      |
| CB-5-0  | 5,24E-08                      |
| CB-6-0  | 1,60E-07                      |

Tabella 2. 11 Conducibilità con permeametro a pareti rigide, Tarzia (2019)

I provini utilizzati per la prova con il peremeametro a pareti flessibili sono stati consolidati isotropicamente con una tensione efficace di 150 kPa. Le modalità utilizzate sono le stesse per il permeametro a pareti rigide a meno dei gradienti idraulici che sono riportati nella tabella 2.12.

| Miscela | Range di variazione del gradiente idraulico |  |  |  |  |  |  |  |  |
|---------|---|--|--|--|--|--|--|--|--|
| CB-4-0  | 13 - 19                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |
| CB-5-0  | 63 - 90                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |
| CB-6-0  | 15 - 45                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |

Tabella 2. 12 Variazione dei gradienti utilizzati con permeametro a pareti flessibili, Tarzia (2019)

Nella tabella 2.13 sono riportati i risultati ottenuti da Tarzia (2019) con il permeametro a pareti flessibili. La conducibilità idraulica ottenuta con il permeametro a pareti flessibili è considerata più affidabile. I risultati tra le tre miscele differiscono di un valore di 2E-8, mostrando un comportamento simile nonostante la differenza del contenuto di cemento.

| Miscela | Conducibilità idraulica [m/s] |
|---------|-------------------------------|
| CB-4-0  | 3,72E-08                      |
| CB-5-0  | 6.00E-08                      |
| CB-6-0  | 2.94E-08                      |

Tabella 2. 13 Conducibilità con permeametro a pareti flessibili, Tarzia (2019)

### 2.3 Flessati et al. (2020)

Flessati et al. (2020) hanno proposto una modellazione elastoplastica mirata a riprodurre il comportamento sperimentale osservato nelle prove edometriche e triassiali CIU delle tre miscele studiate da Tarzia (2019), facendo uso di due modelli costituitivi elastoplastici con incrudimento. Il primo modello è il Cam Clay modificato (MCCM, Roscoe & Burland, 1968), proposto originariamente per le argille, mentre il secondo è un modello appositamente proposto per le miscele Cemento-Bentonite da Flessati et al (2020) da una modifica del MCCM e denominato CBC. Una descrizione dei modelli elastoplastici con incrudimento sarà introdotta nel capitolo 5.

#### 2.3.1 Indagini microstrutturali

Sono state eseguite delle indagini sulla microstruttura del materiale per mezzo di immagini al microscopio elettronico a scansione (SEM) con ingrandimenti da 400 volte a 20000 volte l'immagine originale. La differenza in termini di immagine tra le varie miscele è risultata essere modesta, ed è stato scelto come campione rappresentativo la miscela CB5. Ad un ingrandimento di 400 volte si è visto che il materiale è costituito da elementi approssimativamente sferici abbastanza densamente collegati tra loro. L'alto pH dell'acqua dei pori, dovuto alle reazioni di idratazione del cemento, favorisce l'aggregazione delle particelle di bentonite e quindi le particelle osservate sono probabilmente aggregati di bentonite rivestite da cemento. Questo spiegherebbe i grandi pori, insoliti in materiale argilloso come la bentonite. Nella figura 2.10 è riportata l'immagine SEM per la miscela CB5.



Figura 2. 10 Immagine SEM miscela CB5: (a) ingrandimento di 400 volte; (b) ingrandimento di 800 volte; (c) ingrandimento di 5000 volte; (d) ingrandimento di 20000 volte; Flessati et al. (2020)

### 2.3.2 Modellazione delle prove

I parametri necessari alla simulazione delle prove con il modello Cam Clay modificato sono riportati nella tabella 2.14.

| Mixture               | $e_0$ | ν    | $\kappa$ | λ    | М    | $p'_{s0}$ (kPa) |
|-----------------------|-------|------|----------|------|------|-----------------|
| CB4                   | 8.8   | 0.25 | 0.06     | 1.5  | 2    | 30              |
| CB5                   | 7.29  | 0.25 | 0.06     | 1.35 | 1.96 | 65              |
| CB6                   | 6.25  | 0.25 | 0.06     | 1.2  | 1.84 | 110             |
| Mixture A             | 8.58  | 0.25 | 0.09     | 1.45 | 2    | 25              |
| (Carreto et al. 2016) |       |      |          |      |      |                 |

Tabella 2. 14 Parametri Cam Clay modificato, Flessati et al. (2020)

Il valore della pendenza di stato critico M è stato tarato cercando di simulare la parte finale del percorso in tensioni efficaci ottenuto dalle prove triassiali. Il coefficiente di Poisson è stato assunto costante e pari a 0.25. I parametri  $\lambda$  e  $\kappa$  cosi come il parametro di incrudimento p'<sub>0</sub> sono stati tarati sulle prove edometriche. Nella figura 2.11 è mostrata la simulazione delle prove edometriche delle tre miscele con il modello MCCM.



Figura 2. 11. Simulazione prove edometriche MCCM, Flessati et al. (2020)

Nella figura 2.12 è mostrata la simulazione delle prove triassiali per la miscela CB4 e si può notare come il modello MCCM non sia in grado di riprodurre il comportamento post picco alle pressioni di confinamento più alte.



Figura 2. 12 Simulazione delle prove triassiali CB4, Flessati et al. (2020)

Per la simulazione con il modello CBC, oltre ai parametri del modello MCCM, sono richiesti i parametri seguenti parametri:

- h<sub>1</sub> parametro costitutivo adimensionale e di valore positivo;
- h<sub>2</sub> parametro costitutivo adimensionale e di valore positivo;
- g<sub>1</sub> parametro costitutivo adimensionale e di valore positivo;
- Γ indice a stato critico in corrispondenza di p'ref.

I parametri utilizzati nella simulazione con il modello CBC sono riportati nella tabella 2.15.

| Mixture                            | $e_0$ | ν    | $\kappa$ | λ    | М    | $p'_{s0}$ (kPa) | $g_1$ | $h_1$ | $h_2$ | Г    |
|------------------------------------|-------|------|----------|------|------|-----------------|-------|-------|-------|------|
| CB4                                | 8.8   | 0.25 | 0.06     | 1.5  | 2    | 30              | 0.05  | 0.75  | 0.1   | 12.8 |
| CB5                                | 7.29  | 0.25 | 0.06     | 1.35 | 1.96 | 65              | 0.05  | 0.75  | 0.1   | 11.5 |
| CB6                                | 6.25  | 0.25 | 0.06     | 1.2  | 1.84 | 110             | 0.05  | 0.75  | 0.1   | 10.2 |
| Mixture A of Carreto et al. (2016) | 8.58  | 0.25 | 0.09     | 1.45 | 2    | 25              | 0.05  | 0.75  | 0.1   | 11   |

Tabella 2. 15 Parametri utilizzati per la simulazione con il modello CBC, Flessati et al. (2020)

Nella figura 2.13 è mostrato come il modello CBC riesca a simulare il post-picco della prova. I parametri  $h_1 h_2 e g_1$  sono stati assunti uguali e costanti per tutte e tre le miscele e nella figura 2.15 è mostrato come sono stati calibrati per la miscela CB5. Il parametro  $h_1$  è tarato indipendentemente dagli altri sulle prove edometriche e controlla la pendenza del ramo di compressione. I parametri  $h_2 e g_1$  sono stati calibrati sulle prove triassiali nel piano  $\varepsilon_{a}$ -q.



Figura 2. 13 Calibrazione dei parametri h<sub>1</sub>, h<sub>2</sub> e g<sub>1</sub>, Flessati et al (2015)

#### 2.4 Evans e Opdyke (2006)

Evans & Opdyke (2006) hanno condotto uno studio sul comportamento idraulico considerando il contenuto di cemento della miscela, la percentuale di rimpiazzo del cemento con scorie di alto forno e il tempo di maturazione del materiale. Sono state condotte delle prove mediante permeametro a pareti flessibili. Sono state considerate tre diverse percentuali di cemento, rispettivamente del 10%, 15% e 20%. Sono state usate le seguenti percentuali di rimpiazzo del cemento con scorie d'alto forno: 0%, 20%, 40%, 60%, 70%, 80% e 90%. Le prove di conducibilità sono state fatte su campioni fatti maturare per due, tre, sei e dodici mesi. Le miscele sono state fatte maturare a contatto con l'acqua. Il riepilogo dei campioni esaminati è riportato nella tabella 2.16. La sigla CBG sta ad indicare una miscela in cui il cemento è stato rimpiazzato con scorie di altoforno.

| Codice   | Cemento [%] | Cemento [g] | GGBS [g] | Bentonite[g] | Rimpiazzo % |
|----------|-------------|-------------|----------|--------------|-------------|
| CB-2-0   | 10          | 105         | 0        | 53           | 0           |
| CBG-2-20 | 10          | 84          | 21       | 53           | 20          |
| CBG-2-40 | 10          | 63          | 42       | 53           | 40          |
| CBG-2-60 | 10          | 42          | 63       | 53           | 60          |
| CBG-2-70 | 10          | 32          | 74       | 53           | 70          |
| CBG-2-80 | 10          | 21          | 84       | 53           | 80          |
| CBG-2-90 | 10          | 11          | 95       | 53           | 90          |
| CB-3-0   | 15          | 158         | 0        | 53           | 0           |
| CBG-3-20 | 15          | 126         | 32       | 53           | 20          |
| CBG-3-40 | 15          | 95          | 63       | 53           | 40          |
| CBG-3-60 | 15          | 63          | 95       | 53           | 60          |
| CBG-3-70 | 15          | 47          | 111      | 53           | 70          |
| CBG-3-80 | 15          | 32          | 126      | 53           | 80          |
| CBG-3-90 | 15          | 16          | 142      | 53           | 90          |
| CB-4-0   | 20          | 210         | 0        | 53           | 0           |
| CBG-4-20 | 20          | 168         | 42       | 53           | 20          |
| CBG-4-40 | 20          | 126         | 84       | 53           | 40          |
| CBG-4-60 | 20          | 84          | 126      | 53           | 60          |
| CBG-4-70 | 20          | 63          | 147      | 53           | 70          |
| CBG-4-80 | 20          | 42          | 168      | 53           | 80          |
| CBG-4-90 | 20          | 21          | 189      | 53           | 90          |

Tabella 2. 16 Miscele analizzate, Evans & Opdyke (2005)

Durante la prova di conducibilità idraulica è stata mantenuta una backpressure di 376 kPa e una pressione in cella di 479 kPa, in modo da avere una tensione efficace di 103 kPa. Nella figura 2.14 è mostrata la conducibilità idraulica in funzione del rimpiazzo di provini con tre differenti percentuali di cemento e tempo di maturazione di 28 giorni. La conducibilità idraulica rimane costante per rimpiazzi compresi tra il 20% e il 60 %, mentre per rimpiazzi maggiori del 70 % si nota un forte decadimento. La scelta migliore risulta essere un rimpiazzo del 80 % in cui, indipendentemente dal contenuto di cemento, si ottengono delle conducibilità idrauliche con ordine di grandezza di  $10^{-9}$  [m/s].



Figura 2. 14 Influenza sulla conducibilità della percentuale di rimpiazzo nelle miscele a 28 giorni, Evans & Opdyke (2006)

È stata testata anche la conducibilità per tempi di maturazione fino a 12 mesi. Nel grafico in figura 2.15 sono mostrati i risultati per le miscele con contenuto di cemento del 20% e un rimpiazzo compreso tra il 60% e il 90%. Si ha una riduzione per tutte le percentuali della conducibilità idraulica nel tempo, tranne che per il rimpiazzo del 90%, che dopo il terzo mese ha dei valori che tendono a stabilizzarsi.



Figura 2. 15 Andamento della conducibilità idraulica in funzione del tempo di maturazione, Evans & Opdyke (2006)

Nella figura 2.16 è mostrata la resistenza a compressione monoassiale non confinata in funzione del rimpiazzo dei campioni aventi differenti percentuali di cemento. Si ha un incremento della resistenza con il cemento, mentre il rimpiazzo che massimizza la resistenza è compreso tra il 70% e l'80%.



Figura 2. 16. Prove di compressione non confinata per miscele maturate per 28 giorni, Evans & Opdyke (2006)

### 2.5 Royal et al. (2018)

Royal et al. (2018) ha condotto una sperimentazione mediante delle prove edometriche su una miscela con rimpiazzo del cemento con scorie di altoforno (GGBS), realizzata mediante 200g di cemento 40g di bentonite e 1000g di acqua. La composizione è indicata nella tabella 2.17 riportata di seguito.

| Codice   | Cemento [g] | Bentonite [g] | Rimpiazzo [%] |
|----------|-------------|---------------|---------------|
| CBG-5-80 | 200         | 40            | 80            |

| Tabella 2. | 17 | Composizione . | miscela, . | Royal | et al. | (2018) | ) |
|------------|----|----------------|------------|-------|--------|--------|---|
|            |    |                |            |       |        |        | / |

Dalle prove edometriche sono state ricavate informazioni sulla deformabilità e sulla conducibilità idraulica del materiale in funzione del tempo di maturazione. Nella figura 2.17 sono mostrate le curve di compressione edometrica per differenti tempi di maturazione. Il materiale mostra una sovraconsolidazione attribuibile all'effetto legante del cemento. La tensione di preconsolidazione cresce con il tempo di maturazione.



Figura 2. 17 Curva di compressione edometrica: (a) 7 giorni; (b) 14 giorni; (c) 28 giorni; (d) 60 giorni, Royal et al. (2018)
Nella figura 2.18 è riportato l'andamento della conducibilità idraulica con le tensioni verticali e si nota che superati i 14 giorni di invecchiamento e la tensione verticale di 100 kPa non c'è più dipendenza della conducibilità idraulica dal tempo di maturazione della miscela. Superati i 100 kPa si hanno conducibilità idrauliche di 10<sup>-9</sup> [m/s].



Figura 2. 18 Andamento della conducibilità idraulica in funzione dei carichi a diversi tempi di maturazione, Royal et al. (2018)

#### 2.6 Fratalocchi et al. (2005)

Fratalocchi et al. (2005) hanno svolto una sperimentazione al fine di valutare gli effetti di un contaminante nel tempo sulla conducibilità idraulica delle miscele Cemento-Bentonite. Gli autori hanno voluto mostrare le differenze di conducibilità idraulica del materiale posto a contatto di acqua e fluido contaminante. La miscela è stata realizzata miscelando la bentonite con l'acqua e dopo 24 ore è stata aggiunto il cemento. È stato utilizzato un cemento III/A che è un cemento caratterizzato dall'aggiunta di scorie di altoforno. Per migliorare la lavorabilità finale per ogni litro di acqua sono stati aggiunti 5 g di additivo. Le caratteristiche della miscela studiata sono riportate nella tabella 2.18 riportata di seguito. La maturazione è avvenuta in acqua o nel percolato.

| Codice | Cemento [g] | Bentonite [g] | Acqua [g] |
|--------|-------------|---------------|-----------|
| CB-4-0 | 240         | 60            | 80        |

Tabella 2. 18 Composizione della miscela, Fratalocchi et al. (2018)

I campioni fatti maturare nell'inquinante non hanno mostrato delle cricche o dei danni nei primi 4 mesi, mentre per invecchiamenti superiori a 6 mesi sono comparse delle cricche sulla superficie. A parità di invecchiamento, non è stata rilevata una variazione della resistenza tra i due fluidi di maturazione. Le prove di conducibilità idraulica sono stata effettuate facendo permeare attraverso i campioni sia acqua che percolato. Per instaurare il moto di filtrazione è stato assunto un gradiente idraulico di 20 per i campioni permeati con acqua e un gradiente di 200 per quelli permeati con il percolato. Nella figura 2.19 è mostrata l'evoluzione nel tempo della conducibilità idraulica per un campione permeato con l'acqua e uno permeato con il percolato. Il provino permeato con acqua mostra conducibilità idrauliche inferiori a 10<sup>-8</sup> [cm/s] già dal primo mese di maturazione, con valori che si riducono nel tempo. Il provino permeato con il percolato mostra valori di conducibilità idraulica che si riducono nei primi 300 giorni di invecchiamento per poi mostrare valori con una ridotta variazione fino ai 700 giorni, mentre per tempi oltre i 700 giorni si ha un incremento di conducibilità idraulica. Il provino permeato con il percolato mostra valori di conducibilità idraulica maggiori rispetto a quello permeato con acqua.



Figura 2. 19 Andamento della conducibilità, Fratalocchi et al. (2005)

# 3. Interpretazione delle prove di laboratorio

Questo capitolo ha come oggetto l'interpretazione delle prove di laboratorio di tre diverse miscele al fine di mostrare come evolvono i parametri idro-meccanici variando il rapporto cemento bentonite, il tempo e il fluido di maturazione. Sono state eseguite delle prove edometriche e delle prove triassiali. Le tre miscele sono caratterizzate da un rapporto di cemento e bentonite rispettivamente di 4, 5 e 6. Sono state fatte maturare per un intervallo di tempo che va da un minimo di 28 ad un massimo 360 giorni, sia in acqua che in olio.

## 3.1 Descrizione delle miscele

I provini sono stati realizzati con una miscela di cemento e bentonite non additivate. Il cemento utilizzato è di tipo commerciale CEM I 32,5 N Portland 325, mentre la bentonite è una bentonite commerciale mista sodico-calcica fornita dalla Laviosa Chimica Mineraria (Livorno, Italia). Le caratteristiche della bentonite sono riportate nella tabella 3.1.

|                         | Bentonite |     |  |  |  |  |  |  |  |  |
|-------------------------|-----------|-----|--|--|--|--|--|--|--|--|
| G <sub>s</sub> 2.95 [-] |           |     |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Wl                      | 616       | [%] |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Wp                      | 42        | [%] |  |  |  |  |  |  |  |  |
| IP                      | 574       | [%] |  |  |  |  |  |  |  |  |

Tabella 3. 1 Caratteristiche della bentonite

Sono state preparate tre differenti miscele che si differenziano per i diversi rapporti in massa di cemento e bentonite (Tabella 3.2).

| Miscela              | M1  | M2  | M3  |
|----------------------|-----|-----|-----|
| Rapporto             | 4:1 | 5:1 | 6:1 |
| [Massa cemento/massa |     |     |     |
| bentonite]           |     |     |     |

Tabella 3. 2 Miscele utilizzate nelle prove

Nella preparazione dei provini la bentonite è stata miscelata con acqua di rubinetto, con rapporto di massa acqua/bentonite di 18:1, fino ad ottenere una miscela fluida e omogenea. È stata poi ricoperta con un foglio impermeabile per 24 ore al fine di garantire la completa idratazione della bentonite. Si è poi aggiunta la polvere di cemento secondo i rapporti di massa riportati in tabelle 3.2. e si è nuovamente mescolato per ottenere una miscela omogena. La miscela è stata poi versata negli stampi cilindrici, le cui dimensioni hanno permesso di realizzare provini delle dimensioni richieste per realizzare le prove (dimensioni inziali dei provini per le prove edometriche diametro D=50mm e altezza H=20mm, mentre per le prove triassiali CIU e UU diametro D=38mm e altezza H=76mm). I provini sono stati fatti maturare in un bagno d'acqua o in un bagno d'olio (paraffina liquida) per 28, 60, 120, 240 e 360 giorni. È stata utilizzata della paraffina perché non è tossica e riproduce la presenza di un idrocarburo apolare.

### 3.2 Descrizione della prova edometrica

Con la prova edometrica si vuole ricreare in laboratorio l'andamento della consolidazione monodimensionale di un campione confinato lateralmente e soggetto ad una serie di incrementi di carico verticale, in cui ogni step di carico risulta doppio rispetto a quello precedente. Ogni carico imposto è mantenuto costante per un intervallo di tempo tale da permettere la consolidazione del provino, durante il quale è misurata l'evoluzione dei cedimenti e da cui è possibile ricavare il coefficiente di consolidazione verticale e coefficiente di compressibilità edometrica per il carico imposto, da cui si ricava in forma indiretta la permeabilità.

L'apparecchiatura di prova è costituita da due pietre porose che garantiscono il drenaggio nella sola direzione verticale , da un anello rigido che garantisce il confinamento laterale e una cella contenente dell'acqua per evitare l'essicamento del provino. Il provino generalmente ha un diametro di 50 mm e un rapporto tra diametro e altezza non inferiore a 2.5. Nella figura 3.1 è presente una schematizzazione dell'attrezzatura di prova.



Figura 3. 1 Schema di un edometro, Lancellotta (2012)

#### Interpretazione del gradino di carico

Per ogni gradino di carico viene determinato il coefficiente di consolidazione verticale che può essere ricavato attraverso due tipi di interpretazione: quella di Casagrande e quella di Taylor.

- *Metodo di Casagrande*: prevede di diagrammare i cedimenti di un gradino di carico in funzione della scala logaritmica del tempo. Ai fini dell'analisi interessa solo l'assestamento del provino, indicata come compressione primaria, in cui si ha la dissipazione delle sovrapressioni interstiziali, rappresentato dal punto B ( $\Delta H_{100}$ ,  $t_{100}$ ) (Figura 3.2). Il punto B è ricavato dalla retta tangente al punto di flesso F e la retta corrispondete alla parte finale della curva sperimentale. Il coefficiente di consolidazione verticale c<sub>v</sub> è riferito a una consolidazione del 50% ed è ricavato dalla (3.1):

$$c_{v} = \frac{T_{v\,50} \cdot H^2}{t_{50}} \ (3.1)$$

Dove :

- T<sub>v50</sub>, pari a 0.196, è il fattore di tempo adimensionalizzato riferito a un grado di consolidazione media U<sub>m</sub> del 50%;
- $t_{50}$  è il tempo corrispondente al 50% della consolidazione primaria.



Figura 3. 2 Metodo di Casagrande, Lancellotta (2012)

- *Metodo di Taylor*: consiste nel rappresentare i dati di un gradino di carico della prova nel piano  $\sqrt{t} - \delta$  e nel tracciare la retta che interpola la parte lineare della curva. Successivamente si traccia una nuova retta, incrementando l'ascissa della retta interpolante del 15%, la cui intersezione con la curva dei dati rappresenta il t<sub>90</sub>. Il metodo è rappresentato graficamente nella figura 3.3. Dopo aver trovato il t<sub>90</sub>, con è possibile ricavare il coefficiente di consolidazione verticale (3.2)

$$c_{\nu} = \frac{T_{\nu \, 90} \cdot H^2}{t_{90}} \qquad (3.2)$$

Dove  $T_{v90}$ , pari a 0.848, è il fattore di tempo adimensionalizzato riferito a un grado di consolidazione media  $U_m$  del 90%.

Nel presente elaborato di tesi è stato utilizzato il metodo di Taylor per l'interpretazione della prova edometrica.



Figura 3. 3 Metodo di Taylor, Lancellotta (2012)

Ricavato il coefficiente di compressibilità verticale  $c_v$ , dalla relazione (3.3) è possibile ricavare la conducibilità idraulica:

$$k = \frac{c_{v} \cdot \gamma_{w}}{m_{v}} \tag{3.3}$$

Dove:

- $\gamma_w \dot{e}$  il peso specifico dell'acqua;
- $m_v = \frac{\Delta \varepsilon_v}{\Delta \sigma_v}$ , coefficiente di compressibilità edometrica.

L'indice dei vuoti inziale  $e_0$  viene determinato come rapporto tra il volume dei vuoti  $V_v$  e il volume delle particelle solide  $V_s$  (3.4):

$$e_0 = \frac{V_v}{V_s} \qquad (3.4)$$

In una prova edometrica la deformazione assiale e quelle volumetrica coincidono e dall'uguaglianza delle due relazioni è possibile ricavare la variazione dell'indice di dei vuoti come segue (3.5):

$$\Delta e = (1+e_0) \cdot \frac{\Delta H}{H_0} \quad (3.5)$$

In cui:

- e<sub>0</sub> è l'indice dei vuoti iniziale;
- $\Delta H$  è la variazione dell'altezza del provino;
- H<sub>0</sub> è l'altezza iniziale del provino.

#### Curva di compressione edometrica

Avendo ricavato l'indice dei vuoti per ogni gradino di carico, si rappresenta la curva di compressibilità nel piano di compressione  $[\log \sigma'_v - e]$  (Figura 3.4). È possibile ricavare gli indici di compressibilità ovvero l'indice di ricompressione C<sub>r</sub>, l'indice di compressione C<sub>c</sub> e l'indice di rigonfiamento C<sub>r</sub> (in generale C<sub>c</sub>≈C<sub>s</sub>), che risultano essere i coefficienti angolari dei corrispondenti tratti nella curva di compressibilità. Possono essere calcolati come la variazione di pendenza dei corrispondenti tratti, con la seguente relazione (3.6):



Figura 3. 4 Curva di compressibilità, Tarzia (2019)

La tensione di preconsolidazione  $\sigma'_p$ , come indicato da Lancellotta (2012), deve essere compresa all'interno di un intervallo i cui valori estremi sono ricavati come segue. Il valore minimo è dato dall'intersezione delle rette ottenute prolungando il ramo di ricarico e quello di compressione, mentre il valore massimo è dato dal punto in cui inizia il tratto lineare di compressione. Nella presente tesi è stato utilizzato un valore di tensione di precosolidazione che è la media del valore minimo e del valore massimo.

#### 3.3 Interpretazione delle prove edometriche

#### 3.3.1. Miscela 1, C/B=4

La miscela 1 ha un rapporto cemento bentonite pari a 4 e i provini sono stati fatti maturare sia in acqua che in olio Attraverso alcune misurazioni sui provini è stato possibile ricavare l'indice dei vuoti iniziale e<sub>0</sub>. Le quantità misurate sono le seguenti:

- Altezza iniziale H<sub>0</sub>;
- Diametro provino D<sub>0</sub>;
- Massa del provino umido M<sub>u</sub> (misurata sia in condizioni di fine prova che di inizio prova);
- Massa del provino secco M<sub>s</sub>.

Il contenuto di acqua può essere ricavato dalla (3.7):

$$w = \frac{M_u - M_s}{M_s} \cdot 100 \ [\%] \ (3.7)$$

Considerando il provino saturo, il contenuto d'acqua e l'indice dei vuoti sono legati dalla relazione (3.8):

$$e = G_s \cdot \frac{w}{100} \quad (3.8)$$

Dove  $G_s$  è la densità specifica delle particelle e il suo valore per la miscela 1, pari a 2.72, è stato misurato a 28 giorni e poi assunto costante nel tempo, poiché misure effettuare dopo 360 giorni non hanno mostrato variazioni rilevanti.

Conoscendo la massa umida iniziale e la massa secca si può calcolare il contenuto di acqua iniziale dalla (3.7) e di conseguenza l'indice dei vuoti iniziale  $e_0$  con la (3.8). Tuttavia, la misura della massa secca è eseguita alla fine della prova e per maggiore coerenza si è deciso di procedere come segue per il calcolo dell'indice dei vuoti iniziale. Con la (3.7) facendo riferimento alla massa umida finale, è stato ricavato il contenuto di acqua finale e con la (3.8) l'indice dei vuoti finale  $e_{fin}$ . Sfruttando l'uguaglianza tra deformazione assiale (3.9) e la deformazione volumica (3.10) è possibile calcolare l'indice dei vuoti iniziale  $e_0$ .

$$\varepsilon_z = -\frac{(H_0 - H_{fin})}{H_0}$$
 (3.9)  
 $\varepsilon_v = -\frac{(e_0 - e_{fin})}{(1 + e_0)}$  (3.10)

Dall'uguaglianza tra la (3.9) e la (3.10) si ottiene che l'indice dei vuoti iniziale e<sub>0</sub> può essere ricavato dalla (3.11):

$$e_{0} = \frac{\left[\frac{(H_{0} - H_{fin})}{H_{0}} + e_{fin}\right]}{\left[1 - \frac{(H_{0} - H_{fin})}{H_{0}}\right]} \quad (3.11)$$

Nella tabella 3.3 sono gli indici dei vuoti iniziali ottenuti.

| Miscela 1, e <sub>0</sub> |       |      |  |  |  |  |  |  |  |  |
|---------------------------|-------|------|--|--|--|--|--|--|--|--|
| tempo                     | acqua | olio |  |  |  |  |  |  |  |  |
| [gg]                      |       |      |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 28                        | 9.22  | 8.26 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 60                        | 8.69  | 8.20 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 120                       | 9.30  | 8.06 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 240                       | 10.39 | 8.17 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 360                       | 10.06 | 7.87 |  |  |  |  |  |  |  |  |

Tabella 3. 3 Indici dei vuoti iniziali per la miscela 1

I risultati delle prove edometriche sulla miscela 1 sono riportati nelle tabelle 3.4 e 3.5, riportate di seguito.

| M1 Acqua | a 28gg |      |       | M1 Acq | ua 60gg |       |       | M1 Ac   | M1 Acqua 120gg |      |       | M1 Acqua 240gg |          |       |      |       | M1 Acq | ua 360gg |      |       |
|----------|--------|------|-------|--------|---------|-------|-------|---------|----------------|------|-------|----------------|----------|-------|------|-------|--------|----------|------|-------|
|          |        |      |       |        |         |       |       |         |                |      |       |                |          |       |      |       |        |          |      |       |
| σ' [kPa] | e [-]  | εv   | k     | σ'     | e [-]   | εv    | k     | σ' [kPa | e [-]          | EV   | k     |                | σ' [kPa] | e [-] | εv   | k     | σ'     | e [-]    | εv   | k     |
|          |        | [-]  | [m/s] | [kPa]  |         | [-]   | [m/s] |         |                | [-]  | [m/s] |                |          |       | [-]  | [m/s] | [kPa]  |          | [-]  | [m/s] |
| 12.3     | 9.1    | 0.01 | 1.74E | 12.3   | 8.68    | 0.00  | -     | 12.3    | 9.28           | 0.00 | 4.39E |                | 12.3     | 10.28 | 0.01 | 2.33E | 12.3   | 10.03    | 0.00 | 5.87E |
|          | 4      |      | -07   |        |         |       |       |         |                |      | -08   |                |          |       |      | -07   |        |          |      | -08   |
| 24.5     | 9.0    | 0.02 | -     | 24.5   | 8.65    | 0.00  | 6.38E | 24.5    | 9.26           | 0.00 | 4.74E |                | 24.5     | 10.26 | 0.01 | 4.23E | 24.5   | 10.01    | 0.00 | 4.41E |
|          | 6      |      |       |        |         |       | -08   |         |                |      | -08   |                |          |       |      | -08   |        |          |      | -08   |
| 49       | 8.7    | 0.05 | 1.39E | 49     | 8.52    | 0.02  | 8.39E | 49      | 9.20           | 0.01 | 6.23E |                | 49       | 10.22 | 0.01 | 3.69E | 49     | 9.92     | 0.01 | 8.97E |
|          | 5      |      | -07   |        |         |       | -08   |         |                |      | -08   |                |          |       |      | -08   |        |          |      | -08   |
| 98.1     | 8.0    | 0.11 | 4.54E | 98.1   | 8.10    | 0.06  | -     | 98.1    | 8.92           | 0.04 | 9.72E |                | 98.1     | 9.99  | 0.04 | 4.84E | 98.1   | 9.65     | 0.04 | 8.8E- |
|          | 9      |      | -08   |        |         |       |       |         |                |      | -08   |                |          |       |      | -08   |        |          |      | 08    |
| 196.1    | 7.1    | 0.20 | 2.92E | 196.1  | 7.34    | 0.14  | 3.58E | 196.1   | 8.18           | 0.11 | 7.55E |                | 196.1    | 9.31  | 0.09 | 5.84E | 196.1  | 9.01     | 0.09 | 8.99E |
|          | 9      |      | -08   |        |         |       | -08   |         |                |      | -08   |                |          |       |      | -08   |        |          |      | -08   |
| 392.3    | 6.2    | 0.29 | 1.43E | 392.3  | 6.33    | 0.24  | 2.06E | 392.3   | 7.07           | 0.22 | 5.21E |                | 392.3    | 8.12  | 0.20 | 4.18E | 392.3  | 7.93     | 0.19 | 3.96E |
|          | 1      |      | -08   |        |         |       | -08   |         |                |      | -08   |                |          |       |      | -08   |        |          |      | -08   |
| 784.5    | 5.0    | 0.41 | 6.61E | 784.5  | 5.21    | 0.36  | 7.50E | 784.5   | 5.83           | 0.34 | 1.34E |                | 784.5    | 6.78  | 0.32 | 1.8E- | 784.5  | 6.65     | 0.31 | 2.45E |
|          | 6      |      | -09   |        |         |       | -09   |         |                |      | -08   |                |          |       |      | 08    |        |          |      | -08   |
| 1569.1   | 3.9    | 0.52 | 1.81E | 1569.1 | 4.09    | 0.48  | 2.12E | 1569.1  | 4.59           | 0.46 | 2.13E |                | 1569.1   | 5.32  | 0.45 | 6.47E | 1569.1 | 5.27     | 0.43 | 5.75E |
|          | 4      |      | -09   |        |         |       | -09   |         |                |      | -09   |                |          |       |      | -09   |        |          |      | -09   |
| 3138.1   | 2.8    | 0.62 | 4.23E | 3138.1 | 3.10    | 0.58  | 3.68E | 3138.1  | 3.39           | 0.57 | 4.86E |                | 3138.1   | 3.98  | 0.56 | 1.2E- | 3138.1 | 3.92     | 0.55 | 1.02E |
|          | 7      |      | -10   |        |         |       | -10   |         |                |      | -10   |                |          |       |      | 09    |        |          |      | -09   |
| 784.5    | 2.9    | 0.61 | -     | 784.5  | 3.17    | 0.570 | -     | 784.5   | 3.47           | 0.57 | -     |                | 784.5    | 4.07  | 0.55 | -     | 784.5  | 4.00     | 0.55 | -     |
|          | 4      |      |       |        |         |       |       |         |                |      |       |                |          |       |      |       |        |          |      |       |
| 98.1     | 3.0    | 0.61 | -     | 98.1   | 3.21    | 0.57  | -     | 98.1    | 3.51           | 0.56 | -     |                | 98.1     | 4.13  | 0.55 | -     | 196.1  | 4.04     | 0.54 | -     |
|          | 0      |      |       |        |         |       |       |         |                |      |       |                |          |       |      |       |        |          |      |       |
| 12.3     | 3.0    | 0.61 | -     | 12.3   | 3.24    | 0.56  | -     | 12.3    | 3.59           | 0.55 | -     |                | 12.3     | 4.17  | 0.55 | -     | 49     | 4.07     | 0.54 | -     |
|          | 2      |      |       |        |         |       |       |         |                |      |       |                |          |       |      |       |        |          |      |       |
|          |        |      |       |        |         |       | I T   |         |                | 1    |       |                |          |       |      |       | 12.3   | 4.08     | 0.54 | -     |
|          | 1      |      |       |        | 1       |       |       |         |                |      |       |                |          |       |      |       |        |          | 1    |       |

Tabella 3. 4 Risultati prove edometriche miscela1 con maturazione in acqua

|             | M1 Oli | o 28gg    |             | Ι        | M1 Olio | o 60gg    |              | M1 Olio 120gg |       |           | N            | 11 Olio  | 240gg |           | N            | 11 Olio  | 360gg |           |              |
|-------------|--------|-----------|-------------|----------|---------|-----------|--------------|---------------|-------|-----------|--------------|----------|-------|-----------|--------------|----------|-------|-----------|--------------|
|             |        |           |             |          |         |           |              |               |       |           |              |          |       |           |              |          |       |           |              |
| σ'<br>[kPa] | e [-]  | εv<br>[-] | k<br>[m/s]  | σ' [kPa] | e [-]   | εv<br>[-] | k<br>[m/s]   | σ' [kPa]      | e [-] | εv<br>[-] | k<br>[m/s]   | σ' [kPa] | e [-] | εv<br>[-] | k<br>[m/s]   | σ' [kPa] | e [-] | εv<br>[-] | k<br>[m/s]   |
| 12.3        | 7.93   | 0.89      | 1.8E-<br>08 | 12.3     | 8.12    | 0.01      | 1.52E<br>-07 | 12.3          | 8.04  | 0.00      | 3.99E        | 12.3     | 8.14  | 0.00      | 6.4E-<br>08  | 12.3     | 7.85  | 0.00      | 2.91E        |
| 24.5        | 7.89   | 0.89      | 5.3E-<br>08 | 24.5     | 8.10    | 0.01      | 4.2E-<br>08  | 24.5          | 8.03  | 0.00      | 2.19E<br>-08 | 24.5     | 8.13  | 0.00      | 3.69E<br>-08 | 24.5     | 7.84  | 0.00      | 1.6E-<br>08  |
| 49          | 7.69   | 0.89      | 8.8E-<br>08 | 49       | 8.01    | 0.02      | 6.68E<br>-08 | 49            | 8.00  | 0.01      | 2.69E<br>-08 | 49       | 8.11  | 0.01      | 1.95E<br>-08 | 49       | 7.81  | 0.01      | 2.69E<br>-08 |
| 98.1        | 7.10   | 0.89      | 1.4E-<br>07 | 98.1     | 7.79    | 0.04      | 9.78E<br>-08 | 98.1          | 7.93  | 0.02      | -            | 98.1     | 8.07  | 0.01      | 2.79E<br>-08 | 98.1     | 7.77  | 0.01      | 1.87E<br>-08 |
| 196.1       | 5.35   | 0.89      | 8.6E-<br>08 | 196.1    | 7.23    | 0.11      | 7.24E<br>-08 | 196.1         | 7.58  | 0.05      | 6.51E<br>-08 | 196.1    | 7.90  | 0.03      | 2.71E<br>-08 | 196.1    | 7.62  | 0.03      | 2.97E<br>-08 |
| 392.3       | 2.64   | 0.89      | 1.8E-<br>08 | 392.3    | 6.25    | 0.21      | 5.89E<br>-08 | 392.3         | 6.68  | 0.15      | 4.39E<br>-08 | 392.3    | 7.16  | 0.11      | 3.09E<br>-08 | 392.3    | 7.00  | 0.10      | 1.7E-<br>08  |
| 784.5       | 4.87   | 0.89      | 5.2E-<br>09 | 784.5    | 5.09    | 0.34      | 6.83E<br>-09 | 784.5         | 5.46  | 0.29      | 1.01E<br>-08 | 784.5    | 6.04  | 0.23      | 1.28E<br>-08 | 784.5    | 5.93  | 0.22      | 8.56E<br>-09 |
| 1569.1      | 6.47   | 0.89      | 1.4E-<br>09 | 1569.1   | 3.93    | 0.46      | 2.21E<br>-09 | 1569.1        | 4.25  | 0.42      | 2.97E<br>-09 | 1569.1   | 4.74  | 0.37      | 4E-09        | 1569.1   | 4.65  | 0.36      | 3.98E<br>-09 |
| 3138.1      | 7.54   | 0.89      | 3.1E-<br>10 | 3138.1   | 2.89    | 0.58      | 3.46E<br>-10 | 3138.1        | 3.07  | 0.55      | 3.1E-<br>10  | 3138.1   | 3.56  | 0.50      | 8.82E<br>-10 | 3138.1   | 3.45  | 0.50      | 7.86E<br>-10 |
| 784.5       | 4.81   | 0.89      | -           | 784.5    | 2.96    | 0.57      | -            | 784.5         | 3.13  | 0.54      | -            | 784.5    | 3.61  | 0.50      |              | 784.5    | 3.50  | 0.49      |              |
| 98.1        | 4.93   | 0.89      | -           | 98.1     | 3.01    | 0.56      | -            | 98.1          | 3.18  | 0.54      | -            | 98.1     | 3.66  | 0.49      |              | 196.1    | 3.54  | 0.49      |              |
| 12.3        | 5.00   | 0.89      | -           | 12.3     | 3.04    | 0.56      | -            | 12.3          | 3.20  | 0.54      | -            | 12.3     | 3.69  | 0.49      |              | 49       | 3.56  | 0.49      |              |
|             |        |           |             |          |         |           |              |               |       |           |              |          |       |           |              | 12.3     | 3.57  | 0.48      |              |

Tabella 3. 5 Risultati prove edometriche miscela1 con maturazione in olio

Nelle figure 3.5 e 3.6 sono riportate le curve di compressibilità nel piano sforzo-indice dei vuoti  $[\log_{10}(\sigma'_v)-e]$ , e mostrano come le curve di compressibilità tendano a traslare verso l'alto e verso destra al crescere del tempo di maturazione e tale tendenza è maggiore nei provini maturati in acqua. Nella figura 5, si vede che le curve dei provini maturati nell'acqua sono simili per i 28 e 60 giorni e per i 240 e 360 giorni.



Figura 3. 5 Curve di compressione edometrica per la miscela 1 maturata in acqua



Figura 3. 6 Curve di compressione edometrica per la miscela 1 maturata in olio

Nelle figure 3.7 e 3.8 è mostrata l'evoluzione della conducibilità idraulica per la miscela maturata in acqua e in olio e come ci si aspetta si ha una sua riduzione con l'indice dei vuoti. Nella figura 3.7 si vede che per i provini maturati in acqua le conducibilità idrauliche sono molto simili nonostante i diversi tempi di maturazione. Con indice dei vuoti compreso tra 4 e 5.5 i provini mostrano una conducibilità idraulica con ordine di grandezza di  $10^{-9}$  [m/s], mentre per indice dei vuoti maggiori sia hanno ordini di grandezza di  $10^{-8}$  [m/s] o di poco superiori come accade in alcuni casi. Anche i provini maturati in olio (Figura 3.8) mostrano una conducibilità con valori simili nonostante i diversi tempi di maturazione. Per indice dei vuoti compreso tra 4 e 6, i provini mostrano una conducibilità idraulica con ordine di grandezza di  $10^{-9}$  [m/s], mentre per indice dei vuoti mostrano una conducibilità idraulica con ordine di grandezza di  $10^{-9}$  [m/s], mentre per indice dei vuoti simili nonostante i diversi tempi di maturazione. Per indice dei vuoti compreso tra 4 e 6, i provini mostrano una conducibilità idraulica con ordine di grandezza di  $10^{-9}$  [m/s], mentre per indice dei vuoti maggiori di 6 si hanno conducibilità con un ordine di grandezza si  $10^{-8}$  [m/s].



Figura 3. 7 Conducibilità idraulica per la miscela 1 in acqua [piano e-log10(k)].



Figura 3. 8 Conducibilità idraulica per la miscela 1 in olio [piano e-log10(k)]

Nella tabella 3.6 sono riportati i valori della tensione di preconsolidazione  $\sigma'_p$  per la miscela 1, determinata con la procedura del valor medio descritta nella sezione precedente. Nel grafico in figura 3.9, è possibile notare che tende a crescere con il tempo di maturazione e provini maturati in olio mostrano un valore più grande rispetto a quelli maturati in acqua.

| MISCELA 1            |                       |           |  |  |  |  |  |  |  |
|----------------------|-----------------------|-----------|--|--|--|--|--|--|--|
|                      | Acqua                 | Olio      |  |  |  |  |  |  |  |
| tempo di maturazione | σ' <sub>p</sub> [kPa] | σ'p [kPa] |  |  |  |  |  |  |  |
| [gg]                 |                       |           |  |  |  |  |  |  |  |
| 28                   | 84.90                 | 164.36    |  |  |  |  |  |  |  |
| 60                   | 146.08                | 162.25    |  |  |  |  |  |  |  |
| 120                  | 162.51                | 292.38    |  |  |  |  |  |  |  |
| 240                  | 169.97                | 324.03    |  |  |  |  |  |  |  |
| 360                  | 171.80                | 334.91    |  |  |  |  |  |  |  |

Tabella 3. 6 Tensione di preconsolidazione per a miscela 1



Figura 3.9 Andamento nel tempo della tensione di precomsolidazione per la miscela 1

Nella tabella 3.7 riportata di seguito sono indicati gli indici di compressione  $C_c$  e di rigonfiamento  $C_s$  per la miscela 1 e nei grafici in figura 3.10 e 3.11 la loro evoluzione nel tempo. Far maturare il provino in olio o in acqua così come il tempo di maturazione apporta una minima variazione del  $C_c$  e del  $C_s$ . Come si mostra nel grafico in figura 3.10, per  $C_c$  si hanno maggiori differenze per i tempi 28, 240 e 360 giorni. A 28 giorni la miscela maturata nell'olio mostra un valore maggiore, mentre a 240 e 360 giorni avviene il contrario. Nella figura 3.11, il  $C_s$  mostra valori maggiori per i provini maturati in acqua, ad eccezione per il tempo di maturazione di 60 giorni. I valori di  $C_s$ , soprattutto per i provini maturati in olio, sono comunque molto vicini tra loro al progredire del tempo di maturazione.

| MISCELA 1                 |                    |                    |                    |                    |  |  |  |  |  |
|---------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--|--|--|--|--|
|                           | Acqua              |                    | Olio               |                    |  |  |  |  |  |
| Tempo di maturazione [gg] | C <sub>c</sub> [-] | C <sub>s</sub> [-] | C <sub>c</sub> [-] | C <sub>s</sub> [-] |  |  |  |  |  |
| 28                        | 3.43               | 0.062              | 3.65               | 0.052              |  |  |  |  |  |
| 60                        | 3.52               | 0.057              | 3.60               | 0.063              |  |  |  |  |  |
| 120                       | 3.97               | 0.082              | 3.99               | 0.053              |  |  |  |  |  |
| 240                       | 4.43               | 0.080              | 3.99               | 0.057              |  |  |  |  |  |
| 360                       | 4.22               | 0.065              | 3.94               | 0.053              |  |  |  |  |  |

Tabella 3. 7 Indice di compressione e indice di rigonfiamento per la miscela 1



Figura 3. 10 Indice di compressione  $C_c$  per la miscela 1



Figura 3. 11 Indice di rigonfiamento Cs per la miscela 1

#### 3.3.2. Miscela 2, C/B=5

La miscela 2 è caratterizzata da un rapporto Cemento-Bentonite pari 5. L'indice dei vuoti inziale è stato ricavato come fatto per la miscela (vedi 3.2.1). La densità specifica delle particelle  $G_s$  per la miscela 2, pari a 2.76, è stata misurata a 28 giorni e assunta costante nel tempo, poiché misure ripetute dopo 360 giorni non hanno mostrato variazioni rilevanti. Gli indici dei vuoti iniziali sono riportati nella tabella 3.8, riportata di seguito.

|               | Miscela | 2, e <sub>0</sub> |
|---------------|---------|-------------------|
| tempo<br>[gg] | acqua   | olio              |
| 28            | 6.45    | 6.57              |
| 60            | 6.98    | 6.79              |
| 120           | 8.00    | 6.65              |
| 240           | 8.10    | 6.74              |
| 360           | 6.47    | 6.39              |

Tabella 3. 8 Indice dei vuoti iniziali per la miscela 2

Nelle tabelle 3.9 e 3.10 sono riportati i risultati ottenuti dalle prove edometriche per la miscela 2

|              | M2 Acq  | ua 28g    | g       | Ι             | M2 Acq | qua 60g | g          | M2 Acqua 120gg |       |        | M2 Acqua 240gg |  |              |       |        | N            | M2 Acqua 360gg |       |       |              |  |
|--------------|---------|-----------|---------|---------------|--------|---------|------------|----------------|-------|--------|----------------|--|--------------|-------|--------|--------------|----------------|-------|-------|--------------|--|
| σ'<br>(IrBel | e<br>[] | ЕV<br>Г 1 | k [m/s] | σ'<br>[lrPo]  | e [-]  | εv[-]   | k<br>[m/s] | σ'<br>[LPa]    | e [-] | εv [-] | k<br>[m/s]     |  | σ'<br>[L/Dol | e [-] | εv [-] | k<br>[m/s]   | σ'<br>[ltPo]   | e [-] | εv[-] | k<br>[m/s]   |  |
| 123          | 6.45    | 1-1       | 2 27E-  | <b>[KF a]</b> | 6.98   | 0.00    | 1 2E-      | 123            | 7 99  | 0.00   | 4 36E          |  | 123          | 8.09  | 0.00   | 2.62E        | 123            | 6.51  | 0.00  | 2 9E-        |  |
| 12.5         | 0.45    | 0.0       | 08      | 12.5          | 0.78   | 0.00    | 08         | 12.5           | 1.))  | 0.00   | -08            |  | 12.5         | 0.07  | 0.00   | -08          | 12.5           | 0.51  | 0.00  | 08           |  |
| 24.5         | 6.44    | 0.0       | 3.95E-  | 24.5          | 6.97   | 0.00    | 2.45E      | 24.5           | 7.98  | 0.00   | 2.18E          |  | 24.5         | 8.08  | 0.00   | 1.94E        | 24.5           | 6.51  | 0.00  | 1.47E        |  |
| -            | -       | 0         | 08      | -             |        |         | -08        | -              |       |        | -08            |  | -            |       |        | -08          | -              |       |       | -08          |  |
| 49           | 6.39    | 0.0       | 6.79E-  | 49            | 6.95   | 0.00    | 2.87E      | 49             | 7.96  | 0.00   | 2.16E          |  | 49           | 8.07  | 0.00   | 1.53E        | 49             | 6.50  | 0.00  | 1.46E        |  |
|              |         | 1         | 08      |               |        |         | -08        |                |       |        | -08            |  |              |       |        | -08          |                |       |       | -08          |  |
| 98.1         | 6.22    | 0.0       | 6.70E-  | 98.1          | 6.88   | 0.01    | 4.16E      | 98.1           | 7.90  | 0.01   | 3.25E          |  | 98.1         | 8.02  | 0.01   | 2.51E        | 98.1           | 6.47  | 0.01  | 1.31E        |  |
|              |         | 3         | 08      |               |        |         | -08        |                |       |        | -08            |  |              |       |        | -08          |                |       |       | -08          |  |
| 196.1        | 5.80    | 0.0       | 2.58E-  | 196.1         | 6.60   | 0.05    | 4.28E      | 196.1          | 7.65  | 0.04   | 3.62E          |  | 196.1        | 7.81  | 0.03   | 1.82E        | 196.1          | 6.36  | 0.02  | 1.24E        |  |
|              |         | 9         | 08      |               |        |         | -08        |                |       |        | -08            |  |              |       |        | -08          |                |       |       | -08          |  |
| 392.3        | 5.11    | 0.1       | 1.91E-  | 392.3         | 5.85   | 0.14    | 4.34E      | 392.3          | 6.91  | 0.12   | 1.35E          |  | 392.3        | 7.17  | 0.10   | 2.06E        | 392.3          | 5.89  | 0.08  | 1.5E-        |  |
| 704.5        | 1.00    | 8         | 08      | 704.5         | 5.07   | 0.04    | -08        | 704.5          | 5.02  | 0.24   | -08            |  | 704.5        | 6.02  | 0.00   | -08          | 704.5          | 4.00  | 0.00  | 08           |  |
| 784.5        | 4.29    | 0.2       | 8.15E-  | 784.5         | 5.07   | 0.24    | -          | 784.5          | 5.83  | 0.24   | 1E-08          |  | 784.5        | 6.03  | 0.23   | 1.6/E        | 784.5          | 4.98  | 0.20  | 1.64E        |  |
| 1560         | 3 / 8   | 9         | 2.08E   | 2252.5        | 3 50   | 0.44    | 1 70F      | 1560           | 1.64  | 0.37   | 43E            |  | 1560         | 1.84  | 0.36   | -08<br>6 28E | 1560           | 3.06  | 0.34  | -00<br>6.80E |  |
| 1309.        | 5.40    | 0.4       | 09      | 2333.3        | 5.50   | 0.44    | -09        | 1309.          | 4.04  | 0.57   | 4.5E-<br>09    |  | 1309.        | 4.04  | 0.30   | -09          | 1309.          | 5.90  | 0.54  | -09          |  |
| 3138         | 2.73    | 0.5       | 3.68E-  | 3138.1        | 3.21   | 0.47    | 8.88E      | 3138           | 3.51  | 0.50   | 6.04E          |  | 3138         | 3.63  | 0.49   | 1.38E        | 3138           | 3.00  | 0.47  | 1.52E        |  |
| 1            | 2175    | 0         | 10      | 515011        | 0.21   | 0117    | -12        | 1              | 0.01  | 012 0  | -10            |  | 1            | 5.05  | 0.1.2  | -09          | 1              | 2.00  | 0117  | -09          |  |
| 784.5        | 2.78    | 0.4       | -       | 784.5         | 3.26   | 0.47    | -          | 1569.          | 3.54  | 0.50   | -              |  | 784.5        | 3.70  | 0.48   |              | 784.5          | 3.72  | 0.37  |              |  |
|              |         | 9         |         |               |        |         |            | 1              |       |        |                |  |              |       |        |              |                |       |       |              |  |
| 98.1         | 2.81    | 0.4       | -       | 98.1          | 3.30   | 0.46    | -          | 196.1          | 3.62  | 0.49   | -              |  | 196.1        | 3.74  | 0.48   |              | 196.1          | 3.75  | 0.37  |              |  |
|              |         | 9         |         |               |        |         |            |                |       |        |                |  |              |       |        |              |                |       |       |              |  |
| 12.3         | 2.83    | 0.4       | -       | 12.3          | 3.31   | 0.46    | -          | 12.3           | 3.64  | 0.48   | -              |  | 49           | 3.76  | 0.48   |              | 49             | 3.76  | 0.37  |              |  |
|              |         | 9         |         |               |        | ļ       |            |                | L     | ļ      |                |  |              |       |        |              | <br>           |       |       | ļ            |  |
|              |         |           |         |               |        |         |            |                |       |        |                |  | 12.3         | 3.76  | 0.48   |              | 12.3           | 3.77  | 0.37  |              |  |

Tabella 3. 9 Risultati prove edometriche miscela 2 in acqua

|             | M2 Ol | io 28 gg | g            |             | M2 O  | lio 60gg |              | M2 Olio 120gg |       |        | M2 Olio 240gg |  |             |       |        | M2 Olio 360gg |             |       |        |              |
|-------------|-------|----------|--------------|-------------|-------|----------|--------------|---------------|-------|--------|---------------|--|-------------|-------|--------|---------------|-------------|-------|--------|--------------|
| σ'<br>[kPa] | e [-] | εv [-]   | k<br>[m/s]   | σ'<br>[kPa] | e [-] | εv [-]   | k<br>[m/s]   | σ' [kPa]      | e [-] | εv [-] | k<br>[m/s]    |  | σ'<br>[kPa] | e [-] | εv [-] | k<br>[m/s]    | σ'<br>[kPa] | e [-] | εv [-] | k<br>[m/s]   |
| 12.3        | 6.53  | 0.00     | 9.92E<br>-08 | 12.3        | 6.76  | 0.00     | 8.41E<br>-08 | 12.3          | 6.62  | 0.00   | 7.94E<br>-08  |  | 12.3        | 6.72  | 0.00   | 4.25E<br>-08  | 12.3        | 6.62  | 0.00   | 9.44E<br>-08 |
| 24.5        | 6.51  | 0.01     | 6.28E<br>-08 | 24.5        | 6.75  | 0.01     | 3.79E<br>-08 | 24.5          | 6.60  | 0.01   | 2.59E<br>-08  |  | 24.5        | 6.70  | 0.00   | 3.34E<br>-08  | 24.5        | 6.60  | 0.01   | 6.44E<br>-08 |
| 49          | 6.45  | 0.02     | 6.89E<br>-08 | 49          | 6.71  | 0.01     | 5.39E<br>-08 | 49            | 6.58  | 0.01   | 2.6E-<br>08   |  | 49          | 6.69  | 0.01   | 2.87E<br>-08  | 49          | 6.56  | 0.01   | 5.37E<br>-08 |
| 98.1        | 6.32  | 0.03     | 8.02E<br>-08 | 98.1        | 6.62  | 0.02     | 6.24E<br>-08 | 98.1          | 6.53  | 0.02   | 3E-08         |  | 98.1        | 6.62  | 0.02   | 3.13E<br>-08  | 98.1        | 6.52  | 0.02   | 3.12E<br>-08 |
| 196.1       | 5.95  | 0.08     | 8.04E<br>-08 | 196.1       | 6.32  | 0.06     | 9.57E<br>-08 | 196.1         | 6.31  | 0.04   | 5.51E<br>-08  |  | 196.1       | 6.40  | 0.04   | 3.62E<br>-08  | 196.1       | 6.42  | 0.03   | 2.35E<br>-08 |
| 392.3       | 5.24  | 0.18     | 5.49E<br>-08 | 392.3       | 5.64  | 0.15     | 6.71E<br>-08 | 392.3         | 5.69  | 0.13   | 5.32E<br>-08  |  | 392.3       | 5.85  | 0.12   | 2.47E<br>-08  | 392.3       | 5.98  | 0.09   | 1.94E<br>-08 |
| 784.5       | 4.39  | 0.29     | 1.01E<br>-08 | 784.5       | 4.75  | 0.26     | 3.05E<br>-08 | 784.5         | 4.85  | 0.23   | 8.97E<br>-09  |  | 784.5       | 5.01  | 0.22   | 1.47E<br>-08  | 784.5       | 5.16  | 0.20   | 1.78E<br>-08 |
| 1569.<br>1  | 3.55  | 0.40     | 2.52E<br>-09 | 2353.<br>5  | 3.27  | 0.45     | 8.59E<br>-09 | 1569.1        | 3.93  | 0.36   | 3.82E<br>-09  |  | 1569.<br>1  | 4.08  | 0.34   | 3.81E<br>-09  | 1569.<br>1  | 4.16  | 0.33   | 6.85E<br>-09 |
| 3138.<br>1  | 2.77  | 0.50     | 5.31E<br>-10 | 3138.<br>1  | 2.99  | 0.49     | 3.1E-<br>12  | 3138.1        | 3.03  | 0.47   | 4.45E<br>-10  |  | 3138.<br>1  | 3.16  | 0.46   | 1.71E<br>-09  | 3138.<br>1  | 3.21  | 0.45   | 1.77E<br>-09 |
| 784.5       | 2.82  | 0.50     |              | 784.5       | 3.04  | 0.48     | -            | 1569.1        | 3.05  | 0.47   | -             |  | 784.5       | 3.20  | 0.46   |               | 784.5       | 3.27  | 0.44   |              |
| 98.1        | 2.85  | 0.49     |              | 98.1        | 3.08  | 0.48     | -            | 196.1         | 3.11  | 0.46   | -             |  | 196.1       | 3.23  | 0.45   |               | 196.1       | 3.30  | 0.44   |              |
| 12.3        | 2.87  | 0.49     |              | 12.3        | 3.09  | 0.48     | -            | 12.3          | 3.13  | 0.46   | -             |  | 49          | 3.25  | 0.45   |               | 49          | 3.31  | 0.44   |              |
|             |       |          |              |             |       |          |              |               |       |        |               |  | 12.3        | 3.26  | 0.45   |               | 12.3        | 3.32  | 0.43   |              |

Tabella 3. 10 Risultati prove edometriche miscela 2 in olio

Nelle figure 3.12 e 3.13 sono riportate le curve di compressibilità nel piano di compressione. Per quanto riguarda i provini maturati in acqua (Figura 3.12), le curve tendono a spostarsi verso destra e verso l'alto all'avanzare del tempo di maturazione, ad eccezione del provino con tempo di maturazione di 360 giorni che nel primo tratto di ricarico mostra un andamento mostra valori di indice dei vuoti minori rispetto ai provini maturati per 120 e 240 giorni, ma maggiori al provino maturato per 60 giorni . Le curve con tempo di 120 e 240 giorni mostrano un andamento molto simile.

Anche le curve dei provini maturati in olio (Figura 3.13) al crescere del tempo di maturazione tendono a traslare verso destra e verso l'alto, ma a differenza di quelle dei provini maturati in acqua (Figura 12) risultano tutte molto vicine tra loro.



Figura 3. 12. Curve di compressione edometrica per la miscela 2 maturata in acqua



Figura 3. 13 Curve di compressione edometrica per la miscela 2 maturata in olio

Nella figura 3.14 e 3.15 è riportato l'andamento della conducibilità idraulica per la miscela 2 in funzione dell'indice dei vuoti per la miscela maturata in acqua e in olio e nonostante i diversi tempi di maturazione, i provini mostrano conducibilità simili. Per i provini maturati in acqua (Figura 3.14) e indice dei vuoti compreso tra 3.5 e 5 si hanno valori con ordine di grandezza di 10<sup>-9</sup> [m/s], mentre per indice dei vuoti superiore a 5 si hanno ordini di grandezza di 10<sup>-8</sup> [m/s]. Per i provini maturati in olio (Figura 3.15) con indice dei vuoti compreso tra 3 e 4.5 si hanno valori con ordine di grandezza di 10<sup>-9</sup> [m/s], mentre per valori dell'indice dei vuoti superiore a 4.5 si hanno conducibilità con ordine di grandezza di 10<sup>-8</sup> [m/s].



Figura 3. 14 Conducibilità idraulica per la miscela 2 in acqua [piano e-log10(k)].



Figura 3. 15 Conducibilità idraulica per la miscela 2 in olio [piano e-log10(k)].

Nella tabella 3.11 sono riportati i valori di tensione di preconsolidazione  $\sigma'_p$  per la miscela 2. Il grafico nella figura 3.16 mostra una crescita della  $\sigma'_p$  nel tempo, con un maggiore incremento nei primi 60 giorni. Invece, i due fluidi di maturazione, a parità di tempo di maturazione, mostrano valori di tensione di preconsolidazione del tutto simili.

| MISCELA 2            |                       |                       |  |  |  |  |  |  |  |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|--|--|--|--|--|--|--|
|                      | Acqua                 | Olio                  |  |  |  |  |  |  |  |
| tempo di maturazione | σ' <sub>p</sub> [kPa] | σ' <sub>p</sub> [kPa] |  |  |  |  |  |  |  |
| [gg]                 | -                     |                       |  |  |  |  |  |  |  |
| 28                   | 167.54                | 172.30                |  |  |  |  |  |  |  |
| 60                   | 181.97                | 181.64                |  |  |  |  |  |  |  |
| 120                  | 305.80                | 312.71                |  |  |  |  |  |  |  |
| 240                  | 327.74                | 321.45                |  |  |  |  |  |  |  |
| 360                  | 336.37                | 341.53                |  |  |  |  |  |  |  |

Tabella 3. 11 Tensione di preconsolidazione media per la miscela 2



Figura 3. 16 Andamento nel tempo della tensione di preconsolidazione media per la miscela 2

Nella tabella 3.12 sono riportati gli indici di compressione  $C_c$  e l'indice di rigonfiamento  $C_s$ . Il grafico in figura 3.17 mostra che il  $C_c$  a 28 e 60 giorni risulta molto simile tra i due fluidi di maturazione, mentre a 120 e 240 giorni è maggiore per i provini maturati in acqua, così come a 360 giorni, ma con differenza meno evidente rispetto alla maturazione in olio. I provini maturati in olio mostrano una crescita dell'indice di compressibilità nel tempo con un effetto maggiore nei primi 120 giorni. Anche i provini maturati in acqua mostrano una crescita del  $C_c$  nei primi 120 giorni (maggiore rispetto a quelli in olio) che prosegue fino ai 240 giorni. Si nota che il provino maturato in acqua per 360 giorni mostra un valore inferiore rispetto a quello in acqua per 120 e 240 giorni.

Nella figura 3.18 è rappresentato l'andamento dell'indice di rigonfiamento  $C_s$  nel tempo, in cui si nota che al passare tempo il  $C_s$  cresce molto lentamente, soprattutto per i provini maturati nell'idrocarburo. Il fluido di maturazione influenza maggiormente il  $C_s$  ai 120 e 240 giorni, in cui i provini maturati nell'acqua hanno un valore maggiore, e ai 360 giorni dove risulta maggiore per il provino in olio. Comunque, tutti i valori di  $C_s$  sono molto prossimi tra loro sia variando il fluido che il tempo di maturazione, ad eccezione del provino maturato in acqua per 360 giorni che mostra un valore inferiore rispetto agli altri.

| MISCELA 2                 |        |        |        |        |  |  |  |  |  |  |
|---------------------------|--------|--------|--------|--------|--|--|--|--|--|--|
|                           | Acqua  |        | Olio   |        |  |  |  |  |  |  |
| tempo di maturazione [gg] | Cc [-] | Cs [-] | Cc [-] | Cs [-] |  |  |  |  |  |  |
| 28                        | 2.55   | 0.042  | 2.64   | 0.040  |  |  |  |  |  |  |
| 60                        | 2.82   | 0.044  | 2.77   | 0.043  |  |  |  |  |  |  |
| 120                       | 3.77   | 0.055  | 2.94   | 0.042  |  |  |  |  |  |  |
| 240                       | 3.92   | 0.056  | 2.98   | 0.045  |  |  |  |  |  |  |
| 360                       | 3.20   | 0.028  | 3.06   | 0.046  |  |  |  |  |  |  |

Tabella 3. 12 Indici di compressione Cc e indici di rigonfiamento Cs per la miscela 2



Figura 3. 17 Indice di compressione Cc per la miscela 2



Figura 3. 18 Indice di rigonfiamento Cs per la miscela 2

#### 3.3.3 Miscela 3, C/B=6

La miscela 3 è caratterizzata da un rapporto Cemento-Bentonite pari 6. L'indice dei vuoti inziale  $e_0$  è stato ricavato come per la miscela 1 (vedi 3.3.1). La densità specifica delle particelle  $G_s$  per la miscela 3, pari a 2.88, è stata misurata a 28 giorni ed è stata assunta costante nel tempo, poiché misure effettuare dopo 360 giorni non hanno mostrato variazioni rilevanti. Gli indici dei vuoti iniziali sono riportati nella tabella 3.13, riportata di seguito.

| Miscela 3, e <sub>0</sub> |       |      |  |  |  |  |  |  |
|---------------------------|-------|------|--|--|--|--|--|--|
| tempo                     | acqua | olio |  |  |  |  |  |  |
| [gg]                      |       |      |  |  |  |  |  |  |
| 28                        | 6.08  | 6.15 |  |  |  |  |  |  |
| 60                        | 6.55  | 6.38 |  |  |  |  |  |  |
| 120                       | 6.69  | 6.32 |  |  |  |  |  |  |
| 240                       | 6.79  | 6.30 |  |  |  |  |  |  |
| 360                       | 6.47  | 6.39 |  |  |  |  |  |  |

Tabella 3. 13. Indice dei vuoti iniziali per la miscela 3

I risultati delle prove edometriche per la miscela 3 sono riportati nelle tabelle 3.14 e 3.15, riportate di seguito.

| M3 Acqua 28gg |       |        | M3 Acqua 60gg |         |       |        | M3 Acqua 120gg |             |       |        | M3 Acqua 240gg |             |       |        |              | M3 Acqua 360gg |             |       |        |              |
|---------------|-------|--------|---------------|---------|-------|--------|----------------|-------------|-------|--------|----------------|-------------|-------|--------|--------------|----------------|-------------|-------|--------|--------------|
| σ' [kPa]      | e [-] | εv [-] | k<br>[m/s]    | σ' [ka] | e [-] | εv [-] | k<br>[m/s]     | σ'<br>[kPa] | e [-] | εv [-] | k<br>[m/s]     | σ'<br>[kPa] | e [-] | εv [-] | k<br>[m/s]   |                | σ'<br>[kPa] | e [-] | εv [-] | k<br>[m/s]   |
| 12.3          | 6.07  | 0.00   | 2.68E-<br>08  | 12.3    | 6.53  | 0.00   | 6.03E-<br>08   | 12.3        | 6.67  | 0.00   | 4.17E-<br>08   | 12.3        | 6.79  | 0.00   | 2.25E-<br>08 |                | 12.3        | 6.46  | 0.00   | 2.78E-<br>09 |
| 24.5          | 6.06  | 0.00   | 1.51E-<br>08  | 24.5    | 6.53  | 0.00   | 3.06E-<br>08   | 24.5        | 6.66  | 0.00   | 2.29E-<br>08   | 24.5        | 6.78  | 0.00   | 1.39E-<br>08 |                | 24.5        | 6.46  | 0.00   | 1.27E-<br>08 |
| 49            | 6.05  | 0.00   | 1.77E-<br>08  | 49      | 6.51  | 0.01   | 2.25E-<br>08   | 49          | 6.66  | 0.00   | 1.16E-<br>08   | 49          | 6.77  | 0.00   | 1.9E-<br>08  |                | 49          | 6.45  | 0.00   | 8.56E-<br>09 |
| 98.1          | 6.01  | 0.01   | 3.21E-<br>08  | 98.1    | 6.47  | 0.01   | 2.72E-<br>08   | 98.1        | 6.64  | 0.01   | 1.05E-<br>08   | 98.1        | 6.74  | 0.01   | 8.88E-<br>09 |                | 98.1        | 6.44  | 0.00   | 6.12E-<br>09 |
| 196.1         | 5.79  | 0.04   | 6.6E-<br>08   | 196.1   | 6.32  | 0.03   | 3.64E-<br>08   | 196.1       | 6.58  | 0.01   | 2.09E-<br>08   | 196.1       | 6.66  | 0.02   | 1.73E-<br>08 |                | 196.1       | 6.39  | 0.01   | 1.04E-<br>08 |
| 392.3         | 5.29  | 0.11   | 7.43E-<br>08  | 392.3   | 5.91  | 0.09   | 1.53E-<br>08   | 392.3       | 6.28  | 0.05   | 6.73E-<br>09   | 392.3       | 6.36  | 0.06   | 1.22E-<br>08 |                | 392.3       | 6.14  | 0.04   | 9.21E-<br>09 |
| 784.5         | 4.56  | 0.21   | 1.13E-<br>08  | 784.5   | 5.04  | 0.20   | 1.29E-<br>08   | 784.5       | 5.51  | 0.15   | 8.1E-<br>09    | 784.5       | 5.61  | 0.15   | 1.22E-<br>08 |                | 784.5       | 5.45  | 0.14   | 1.16E-<br>08 |
| 2353.5        | 3.25  | 0.40   | 1.25E-<br>09  | 1569.1  | 4.09  | 0.33   | 6.17E-<br>09   | 1569.1      | 4.50  | 0.28   | 4.35E-<br>09   | 1569.1      | 4.61  | 0.28   | 5.49E-<br>09 |                | 1569.1      | 4.51  | 0.26   | 6.07E-<br>09 |
| 3138.1        | 2.99  | 0.44   | 8.56E-<br>12  | 3138.1  | 3.12  | 0.45   | -              | 3138.1      | 3.43  | 0.42   | 1.64E-<br>09   | 3138.1      | 3.58  | 0.41   | 1.42E-<br>09 |                | 3138.1      | 3.48  | 0.40   | 1.82E-<br>09 |
| 784.5         | 3.03  | 0.43   | -             | 784.5   | 3.18  | 0.45   | -              | 784.5       | 3.50  | 0.41   | -              | 784.5       | 3.63  | 0.41   |              |                | 784.5       | 3.53  | 0.39   |              |
| 98.1          | 3.06  | 0.43   | -             | 98.1    | 3.22  | 0.44   | -              | 98.1        | 3.54  | 0.41   | -              | 196.1       | 3.66  | 0.40   |              |                | 196.1       | 3.56  | 0.39   |              |
| 12.3          | 3.07  | 0.42   | -             | 12.3    | 3.23  | 0.44   | -              | 12.3        | 3.56  | 0.41   | -              | 49          | 3.67  | 0.40   |              |                | 49          | 3.58  | 0.39   |              |
|               |       |        |               |         |       |        |                |             |       |        |                | 12.3        | 3.68  | 0.40   |              |                | 12.3        | 3.58  | 0.39   |              |

Tabella 3. 14 Risultati prove edometriche per la miscela 3 in acqua

| 14      | 1110  | Ono    |       |       | M3    | Oho    |       |       | M3    | Olio   |       |       | M3    | Olio   |       |       | M3    | Olio   |       |
|---------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|
| 2       | 28gg  |        |       |       | 60gg  |        |       |       | 120gg |        |       |       | 240gg |        |       |       | 360gg |        |       |
| σ' e    | e [-] | εv [-] | k     | σ'    | e [-] | εv [-] | k     | σ'    | e [-] | εv [-] | k     | σ'    | e [-] | εv [-] | k     | σ'    | e [-] | εv [-] | k     |
| [kPa]   |       |        | [m/s] | [kPa] |       |        | [m/s] | [kPa] |       |        | [m/s] | [kPa] |       |        | [m/s] | [kPa] |       |        | [m/s] |
| 12.3 6  | 6.12  | 0.00   | 8.6E- | 12.3  | 6.33  | 0.01   | 1.12E | 12.3  | 6.30  | 0.00   | 1.88E | 12.3  | 6.29  | 0.00   | -     | 12.3  | 6.36  | 0.00   | 9.9E- |
|         |       |        | 08    |       |       |        | -07   |       |       |        | -08   |       |       |        |       |       |       |        | 08    |
| 24.5 6  | 6.11  | 0.01   | 2.77E | 24.5  | 6.29  | 0.01   | 1.09E | 24.5  | 6.29  | 0.00   | 2.72E | 24.5  | 6.29  | 0.00   | 1.23E | 24.5  | 6.33  | 0.01   | 7.51E |
|         |       |        | -08   |       |       |        | -07   |       |       |        | -08   |       |       |        | -08   |       |       |        | -08   |
| 49 6    | 6.09  | 0.01   | 3.56E | 49    | 6.23  | 0.02   | 7.1E- | 49    | 6.28  | 0.01   | 2.3E- | 49    | 6.26  | 0.00   | 2.12E | 49    | 6.29  | 0.01   | 6.55E |
|         |       |        | -08   |       |       |        | 08    |       |       |        | 08    |       |       |        | -08   |       |       |        | -08   |
| 98.1 6  | 6.03  | 0.02   | 4.26E | 98.1  | 6.15  | 0.03   | 4.49E | 98.1  | 6.25  | 0.01   | 1.9E- | 98.1  | 6.21  | 0.01   | 2.81E | 98.1  | 6.22  | 0.02   | 5.33E |
|         |       |        | -08   |       |       |        | -08   |       |       |        | 08    |       |       |        | -08   |       |       |        | -08   |
| 196.1 5 | 5.81  | 0.05   | 7.61E | 196.1 | 5.98  | 0.05   | 4.45E | 196.1 | 6.09  | 0.03   | 4.53E | 196.1 | 6.05  | 0.03   | 3.63E | 196.1 | 6.00  | 0.05   | 8.27E |
|         |       |        | -08   |       |       |        | -08   |       |       |        | -08   |       |       |        | -08   |       |       |        | -08   |
| 392.3 5 | 5.29  | 0.12   | 6.55E | 392.3 | 5.43  | 0.13   | 6.7E- | 392.3 | 5.63  | 0.10   | 5.71E | 392.3 | 5.67  | 0.09   | 2.53E | 392.3 | 5.62  | 0.10   | 2.94E |
|         |       |        | -08   |       |       |        | 08    |       |       |        | -08   |       |       |        | -08   |       |       |        | -08   |
| 784.5 4 | 4.54  | 0.22   | 4.34E | 784.5 | 4.65  | 0.23   | 3.55E | 784.5 | 4.90  | 0.20   | 3.59E | 784.5 | 5.00  | 0.18   | 1.76E | 784.5 | 4.92  | 0.20   | 1.68E |
|         |       |        | -08   |       |       |        | -08   |       |       |        | -08   |       |       |        | -08   |       |       |        | -08   |
| 2353. 3 | 3.27  | 0.40   | 4.92E | 1569. | 3.82  | 0.35   | 5.52E | 1569. | 4.04  | 0.31   | 1.61E | 1569. | 4.15  | 0.29   | 9.04E | 1569. | 4.01  | 0.32   | 7.19E |
| 5       |       |        | -09   | 1     |       |        | -09   | 1     |       |        | -08   | 1     |       |        | -09   | 1     |       |        | -09   |
| 3138. 3 | 3.03  | 0.44   | 8.51E | 3138. | 2.94  | 0.47   | 8.89E | 3138. | 3.17  | 0.43   | 1.37E | 3138. | 3.17  | 0.43   | 1.88E | 3138. | 3.08  | 0.45   | 1.64E |
| 1       |       |        | -12   | 1     |       |        | -10   | 1     |       |        | -09   | 1     |       |        | -09   | 1     |       |        | -09   |
| 784.5 3 | 3.07  | 0.43   | -     | 784.5 | 2.99  | 0.46   | -     | 784.5 | 3.21  | 0.43   | -     | 784.5 | 3.21  | 0.42   |       | 784.5 | 3.13  | 0.44   |       |
| 08.1 3  | 3 10  | 0.43   |       | 08.1  | 3.03  | 0.45   |       | 08.1  | 3.26  | 0.42   |       | 106.1 | 3.24  | 0.42   |       | 106.1 | 3.16  | 0.44   |       |
| 70.1 3  | 5.10  | 0.45   | -     | 70.1  | 5.05  | 0.45   | -     | 70.1  | 5.20  | 0.42   | -     | 190.1 | 3.24  | 0.42   |       | 190.1 | 5.10  | 0.44   |       |
| 12.3 3  | 3.11  | 0.43   | -     | 12.3  | 3.05  | 0.45   | -     | 12.3  | 3.27  | 0.42   | -     | 49    | 3.26  | 0.42   |       | 49    | 3.18  | 0.43   |       |
|         |       |        |       |       |       |        |       |       |       |        |       | 12.3  | 3.27  | 0.42   |       | 12.3  | 3.18  | 0.43   |       |

Tabella 3. 15 Risultati prove edometriche per la miscela 3 in olio

Nella figura 3.19 sono riportate le curve di compressibilità per la miscela 3 maturata in acqua. La tendenza delle curve a spostarsi verso destra e verso l'alto è più evidente tra i 28 e 60 giorni, mentre per i successivi tempi di maturazione tale comportamento è meno evidente. Infatti, le curve comprese tra i 120 e 360 giorni presentano un andamento molto simile.

Anche per la maturazione in olio (Figura 3.20) si rileva la stessa tendenza delle curve a traslare verso destra e verso l'alto con l'avanzare del tempo di maturazione, anche se con minore evidenza rispetto a quelle della maturazione in acqua (Figura 3.19).



Figura 3. 19. Curve di compressione edometrica per la miscela 3 maturata in acqua



Figura 3. 20 Curve di compressione edometrica per la miscela 3 maturata in olio

Nella figura 3.21 e 3.22 è mostrato l'andamento della conducibilità idraulica per la miscela 3 in funzione dell'indice dei vuoti per la miscela 3 maturata in acqua e in olio. I provini maturati in acqua (Figura 3.21) con indice dei vuoti compreso tra 3 e 4.5 mostrano valori di conducibilità con ordine di grandezza di  $10^{-9}$  [m/s], mentre con indice dei vuoti superiore a 5 si hanno conducibilità di  $10^{-8}$  [m/s], ad eccezione di quanto accade nell'intervallo dell'indice dei vuoti 6 - 6.5 con i provini maturati per 120 e 360 giorni che mostrano valori minori (ordine di grandezza  $10^{-9}$  [m/s]). I provini maturati in olio (Figura 3.22) mostrano una conducibilità di  $10^{-9}$  [m/s] per indice dei vuoti compreso tra 3 e 4, mentre per valori superiori a 4.5 si hanno conducibilità con ordine di grandezza di  $10^{-8}$  [m/s].



Figura 3. 21 Conducibilità idraulica per la miscela 3 in acqua [piano e-log10(k)].



Figura 3. 22 Conducibilità idraulica per la miscela 3 in olio [piano e-log10(k)].

Nella tabella 3.16 sono riportati i valori della tensione di preconsolidazione media  $\sigma'_p$  per la miscela 3. Nel grafico in figura 3.23 è mostrata l'evoluzione della  $\sigma'_p$  e si nota una crescita dei valori nel tempo. La miscela maturata in acqua mostra valori leggermente superiori rispetto a quella maturata in olio.

| MISCELA 3            |          |           |  |  |  |  |  |  |
|----------------------|----------|-----------|--|--|--|--|--|--|
|                      | Acqua    | olio      |  |  |  |  |  |  |
| tempo di maturazione | σ'p[kPa] | σ'p [kPa] |  |  |  |  |  |  |
| [gg]                 |          |           |  |  |  |  |  |  |
| 28                   | 316.79   | 311.92    |  |  |  |  |  |  |
| 60                   | 339.78   | 321.15    |  |  |  |  |  |  |
| 120                  | 362.35   | 329.17    |  |  |  |  |  |  |
| 240                  | 362.12   | 346.45    |  |  |  |  |  |  |
| 360                  | 369.00   | 344.84    |  |  |  |  |  |  |

Tabella 3. 16 Tensione di preconsolidazione media per la miscela 3



Figura 3. 23 Andamento nel tempo della tensione di preconsolidazione media per la miscela 3

Nella tabella 3.17 sono riportati gli indici di compressibilità  $C_c$  e gli indici di rigonfiamento  $C_s$  per la miscela 3. Nel grafico in figura 3.24 è rappresentata l'evoluzione nel tempo del  $C_c$  e si nota che nei primi 60 giorni c'è un maggiore incrementi per entrambi i tipi di fluido di maturazione. Per tempi successivi ai 60 giorni il tempo di maturazione ha minore influenza e i provini maturati in acqua mostrano un valore maggiore dell'indice di compressibilità. Nel grafico in figura 3.25 è rappresentato l'andamento del  $C_s$  nel tempo e anche qui si nota che l'incremento è maggiore nei primi 60 giorni. Si hanno valori simili per i due tipi di fluido di maturazione, ad eccezione del tempo di maturazione di 120 giorni in cui il provino maturato in acqua ha un indice di rigonfiamento maggiore.

| MISCELA 3                 |        |        |        |        |  |  |  |  |  |  |
|---------------------------|--------|--------|--------|--------|--|--|--|--|--|--|
|                           | Acqua  |        | Olio   |        |  |  |  |  |  |  |
| tempo di maturazione [gg] | Cc [-] | Cs [-] | Cc [-] | Cs [-] |  |  |  |  |  |  |
| 28                        | 2.55   | 0.034  | 2.50   | 0.033  |  |  |  |  |  |  |
| 60                        | 3.08   | 0.044  | 2.76   | 0.046  |  |  |  |  |  |  |
| 120                       | 3.15   | 0.053  | 2.72   | 0.041  |  |  |  |  |  |  |
| 240                       | 3.08   | 0.043  | 2.78   | 0.042  |  |  |  |  |  |  |
| 360                       | 2.94   | 0.042  | 2.81   | 0.040  |  |  |  |  |  |  |

Tabella 3. 17 Indici di compressione Cc e indici di rigonfiamenti Cs per la miscela 3



Figura 3. 24. Indice di compressione Cc per la miscela 3



Figura 3. 25 Indice di rigonfiamento Cs per la miscela 3

# 3.4 Confronto della conducibilità idraulica per le tre miscele

Per confrontare l'evoluzione nel tempo della conducibilità idraulica k tra le tre miscele si è deciso di far riferimento a due step di carico della prova edometrica, scegliendo la  $\sigma'_v$  di 196.1 kPa e di 784.5 kPa. Si è optato per tali valori considerando i possibili carichi che potrebbe subire il diaframma nelle condizioni di esercizio.

#### Conducibilità idraulica k, $\sigma'_{y}$ =196.1 kPa **M2 M3 M1** M2 **M3 M1** Olio Olio Olio Acqua Acqua acqua tempo di maturazione [gg] k [m/s] k [m/s] k [m/s] k [m/s] k [m/s] k [m/s] 2.92E-08 2.58E-08 6.60E-08 8.62E-08 8.04E-08 7.61E-08 28 3.58E-08 4.28E-08 7.24E-08 4.45E-08 3.64E-08 9.57E-08 60 7.55E-08 3.62E-08 2.09E-08 6.51E-08 5.51E-08 4.53E-08 120 240 5.84E-08 1.82E-08 1.73E-08 2.71E-08 3.62E-08 3.63E-08 360 8.99E-08 1.24E-08 1.04E-08 2.97E-08 2.35E-08 8.27E-08

#### 3.4.1 Conducibilità idraulica per carico $\sigma'_v$ di 196.1 kPa

Nella tabella 3.18 sono riportate le conducibilità per le 3 miscele per il carico di 196.1 kPa.

Tabella 3. 18. Conducibilità idraulica per  $\sigma'_{v}$  di 196.1 kPa.

Nel grafico in figura 3.26 è mostrato l'andamento nel tempo della conducibilità per i provini maturati in acqua. Si nota che indipendentemente dal tempo di maturazione o dal rapporto cemento bentonite, l'ordine di grandezza della conducibilità è di 10<sup>-8</sup> [m/s] per tutte e tre le miscele. Per tempi successivi ai 60 giorni di maturazione la miscela 1 mostra valori maggiori rispetto alle altre due che hanno un rapporto di cemento bentonite superiore.



*Figura 3. 26 Conducibilità idraulica per*  $\sigma'_{v}$  *di 196.1 kPa., maturazione in acqua.* 

Nel grafico in figura 3.27 è rappresentato l'andamento della conducibilità nel tempo per i provini maturati in olio. Per tutte e tre le miscele la conducibilità ha dei valori simili e con un



ordine di grandezza di 10<sup>-8</sup> [m/s], indipendentemente dal tempo di maturazione o dal rapporto di cemento bentonite.

Figura 3. 27 Conducibilità idraulica per  $\sigma$ 'v di 196.1 kPa., maturazione in olio.

Nel grafico in figura 3.28 si sono messe a confronto le conducibilità idraulica dei provini maturati in acqua e in olio. Il tipo di fluido non influenza l'ordine di grandezza che è di  $10^{-8}$  [m/s]. Per tempi di maturazione superiori ai 60 giorni la miscela 1 maturata in acqua mostra i valori più alti di conducibilità, mentre le restanti due miscele maturate in acqua mostrano la conducibilità minore .



Figura 3. 28 Conducibilità idraulica per  $\sigma'_{\nu}$  di 196.1 kPa.
## 3.4.2 Conducibilità idraulica per carico $\sigma'_v$ di 784.5 kPa

| Conducibilità idraulica k, σ' <sub>v</sub> =784.5 kPa |             |             |             |            |            |            |
|---|-------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|
|   | M1<br>Acqua | M2<br>Acqua | M3<br>Acqua | M1<br>Olio | M2<br>Olio | M3<br>Olio |
| tempo di maturazione                                  | k [m/s]     | k [m/s]     | k [m/s]     | k [m/s]    | k [m/s]    | k [m/s]    |
| [gg]  |             |             |             |            |            |            |
| 28  | 6.61E-09    | 8.15E-09    | 1.13E-08    | 5.22E-09   | 1.01E-08   | 4.34E-08   |
| 60  | 7.50E-09    | -           | 1.29E-08    | 6.83E-09   | 3.05E-08   | 3.55E-08   |
| 120   | 1.34E-08    | 1.00E-08    | 8.10E-09    | 1.01E-08   | 8.97E-09   | 3.59E-08   |
| 240   | 1.80E-08    | 1.67E-08    | 1.22E-08    | 1.28E-08   | 1.47E-08   | 1.76E-08   |
| 360   | 2.45E-08    | 1.64E-08    | 1.16E-08    | 8.56E-09   | 1.78E-08   | 1.68E-08   |

Nella tabella 3.19 sono riportate le conducibilità per le 3 miscele per il carico di 784.5 kPa.

Tabella 3. 19 Conducibilità idraulica per  $\sigma'_{v}$  di 784.5 kPa.

Nel grafico in figura 3.29 è mostrata l'evoluzione nel tempo della conducibilità per i provini maturati in acqua. Tutte e tre le miscele mostrano conducibilità molto simili indipendentemente dal rapporto cemento bentonite e non mostra una significativa variazione con il tempo di maturazione. I valori di conducibilità tendenzialmente mostrano valori con ordine di grandezza di 10<sup>-8</sup> [m/s], con alcune eccezioni nei primi 120 giorni, come ad esempio accade per la miscela 1 a 28 giorni o la miscela 3 a 120 giorni.



*Figura 3. 29 Andamento della conducibilità idraulica per*  $\sigma$  '<sub>v</sub> *di 784.5 kPa., maturazione in acqua.* 

Nel grafico in figura 3.30 è mostrata l'evoluzione nel tempo della conducibilità per i provini maturati in olio. I provini mostrano una conducibilità nell'ordine di grandezza di 10<sup>-8</sup> [m/s] o di poco inferiori come ad esempio accade nella miscela 1 nei primi 60 giorni.



Figura 3. 30 Andamento della conducibilità idraulica per  $\sigma'_{v}$  di 784.5 kPa., maturazione in olio.

Nella figura 3.31 è mostrato un grafico in cui si sono messe a confronto le conducibilità idrauliche dei provini maturati sia nell'olio che in acqua per  $\sigma'_v$  di 784.5 kPa. La miscela 3 in olio è quella che mostra una conducibilità maggiore rispetto a tutte le altre nei primi 120 giorni, mentre le altre mostrano un comportamento molto simile. Tutte le miscele hanno una conducibilità molto simile per tempi superiori ai 120 giorni. Hanno tutte ordini di grandezza di 10<sup>-8</sup> [m/s] o di poco inferiori in alcuni casi .



Figura 3. 31 Andamento della conducibilità idraulica nel tempo per  $\sigma'_{v}$  di 784.5 kPa

# **3.5** Confronto della tensione di preconsolidazione $\sigma'_p$ per le tre miscele

I valori di tensione di preconsolidazione  $\sigma'_p$  per ciascuna miscela sono riportati nelle tabelle 3.6, 3.11 e 3.16. Nel grafico in figura 3.32 è mostrato l'andamento della tensione di preconsolidazione nel tempo per i provini maturati in acqua. Si nota come la  $\sigma'_p$  cresca con il rapporto cemento bentonite, anche se per tempi successivi ai 60 giorni la differenza tra miscela 2 e 3 è meno marcata. In tutte e tre le miscele l'incremento della tensione di preconsolidazione è più marcato nei primi 120 giorni, con effetto maggiore nella miscela 1 nel passare da 28 a 60 giorni e per la miscela 2 nel passare da 60 a 120 giorni di maturazione, per poi stabilizzarsi nei tempi successivi.



Figura 3. 32 Andamento nel tempo della tensione di preconsolidazione media, miscele in acqua

Nel grafico in figura 3.33 è mostrato l'andamento della tensione di preconsolidazione  $\sigma'_p$  nel tempo per i provini maturati in olio. Per la miscela 1 e la miscela 2 la  $\sigma'_p$  tende a crescere maggiormente tra i 60 e 120 giorni per poi stabilizzarsi per tempi successivi di maturazione, mentre la miscela 3 non mostra grosse variazioni nel tempo. Fino ai 60 giorni di maturazione la miscela 3 mostra una tensione di preconsolidazione maggiore rispetto alle altre due, mentre per i tempi successivi i valori sono pressoché simili tra loro.



Figura 3. 33 Andamento nel tempo della tensione di preconsolidazione media, miscele in olio

Nel grafico in figura 3.34 è rappresentato l'andamento delle tensioni di preconsolidazione nel tempo per i due fluidi di maturazione. La miscela 2 e 3 mostrano lo stesso comportamento nel tempo e valori simili sia con la maturazione in olio che in acqua, a differenza della miscela 1 in olio che mostra valori superiori rispetto a quella in acqua, e simili a quella della miscela 2.



Figura 3. 34 Andamento nel tempo della tensione di preconsolidazione

## 3.6 Prova triassiale

La prova triassiale permette di controllare le condizioni di drenaggio e di imporre sforzo e deformazione uniformi. Il provino è avvolto da una membrana di gomma che lo isola dall'acqua contenuta nella camera della cella, che serve per imporre il confinamento, mentre per incrementare lo sforzo deviatorico si incrementa il carico assiale. Le estremità superiore e inferiore del provino sono a contatto con una pietra porosa collegate all'esterno da dei tubicini, attraverso i quali per mezzo di una valvola è possibile controllare le condizioni di drenaggio. Mediante dei trasduttori di pressione, è possibile misurare la pressione dell'acqua interstiziale, aspetto particolarmente rilevante se la prova è condotta in condizioni non drenate, tali per cui la pressione interstiziale non è costante. Il campione impiegato solitamente ha un rapporto tra altezza e diametro pari a 2. Uno schema dell'apparecchio triassiale è mostrato nella figura 3.35.



Figura 3. 35 Schema di un apparecchio triassiale, Lancellotta (2012)

La prima fase della prova consiste nel consolidare il provino e generalmente avviene applicando in cella un carico isotropo in condizioni drenate. La seconda fase consiste nel portare a rottura incrementando lo sforzo deviatorico e può avvenire in condizioni drenate o non drenate. Una prova consolidata isotropicamente drenata è indicata come CID, mentre quella non drenata è indicata come CIU. Invece, l'acronimo UU indica una prova non consolidata e non drenata. I risultati delle prove sono interpretati utilizzando la tensione media p (3.12) e la tensione deviatorica q (3.13).

$$p = \frac{\sigma_z + 2\sigma_r}{3} \quad (3.12)$$

$$q = \sigma_z - \sigma_r \quad (3.13)$$

Dove la  $\sigma_z$  e la  $\sigma_r$  sono rispettivamente la tensione assiale e la tensione radiale. Le corrispondenti variabili di deformazione sono quella volumica  $\varepsilon_v$  (3.14) e quella deviatorica  $\varepsilon_s$  (3.15):

$$\varepsilon_{v} = \varepsilon_{a} + 2\varepsilon_{r}$$
 (3.14)  
 $\varepsilon_{s} = \frac{2}{3}(\varepsilon_{a} - \varepsilon_{r})$  (3.15)

dove  $\varepsilon_a$  e  $\varepsilon_r$  sono rispettivamente la deformazione assiale e la deformazione radiale.

#### 3.7 Interpretazione delle prove triassiali CIU

Nel corso della sperimentazione condotta sono state eseguite delle prove triassiali consolidate isotropicamente non drenate per tutte e tre le miscele disponibili e per tempi di maturazione dei provini di 28 e 360 giorni, sia in acqua che in olio. Le pressioni di confinamento utilizzate sono state 20, 100 e 300 kPa.

#### 3.7.1 Miscela 1

Nella figura 3.36 è riportato l'andamento della tensione deviatorica in funzione della deformazione assiale per la miscela 1 maturata in acqua. Il valore della tensione deviatorica di picco cresce all'aumentare della pressione di confinamento e con il tempo di maturazione. Il ruolo dell'invecchiamento è particolarmente evidente a bassi valori di confinamento (20 kPa). Alla pressione di confinamento di 20 kPa e 100 kPa la tensione deviatorica cresce asintoticamente con le deformazioni. Per il confinamento a 300 kPa raggiunta la resistenza di picco il valore della tensione deviatorica tende ridursi, mostrando un comportamento rammollente ('softening'). Per la miscela 1 maturata in acqua per 28 giorni la prova è fallita.



Figura 3.36 Andamento della tensione deviatorica al variare della deformazione assiale per la miscela 1 in acqua

Nel grafico in figura 3.37 è mostrato l'andamento delle sovrapressioni interstiziali in funzione della deformazione assiale che si sono sviluppate durante le cinque prove condotte sulla miscela M1.



Figura 3. 37 Andamento della sovrapressione interstiziale al variare della deformazione assiale per la miscela 1 in acqua

Nelle figure 3.38 e 3.39 sono mostrati i percorsi di carico per la miscela 1 maturata in acqua in termini di Total Stress Path (TSP) a meno della pressione iniziale ('backpressure') u<sub>0</sub> (piano p-u<sub>0</sub>, q) e di Effective Stress Path (ESP) (piano p',q). Attraverso la rappresentazione della prova nel piano degli invarianti p'-q è possibile ricavare i parametri di resistenza. Per ciascuna pressione di confinamento è stato ricavato il massimo rapporto q/p'. Da tale rapporto è possibili individuare un punto definito dalle coordinate  $q_{picco} e p'_{picco}$ . Interpolando linearmente i tre punti ricavati da ciascuna pressione di confinamento si ottiene l'inviluppo di rottura, e dalla sua pendenza M e dalla sua intercetta q<sub>c</sub>, attraverso le relazioni (3.16) e (3.17) è possibile ricavare l'angolo di resistenza al taglio di picco  $\varphi'_p$  e la coesione c'<sub>p</sub>. I parametri di resistenza sono riportati nella tabella 1.

$$\varphi'_p = \arcsin(\frac{3M}{6+M}) \quad (3.16)$$
$$c'_p = \frac{q_c}{2\sqrt{K_a}} \cdot \frac{(1+2Ka)}{(3+2Ka)} \quad (3.17)$$

Dove  $K_a$  è il coefficiente di spinta attiva, ricavato dalla relazione (3.18).

$$K_a = \frac{1 - sen\varphi'_p}{1 + sen\varphi'_p} \quad (3.18)$$



Figura 3. 38 Percorso dei carichi con inviluppo di rottura per la miscela 1 maturata per 28 giorni in acqua.



Figura 3. 39 Percorso dei carichi con inviluppo di rottura per la miscela 1 maturata per 360 giorni in acqua.

Nella figura 3.40 è mostrata l'evoluzione della tensione deviatorica q in funzione della deformazione assiale per la miscela 1 maturata in olio. Alle pressioni di confinamento di 20 kPa e 100 kPa, i provini maturati per 360 giorni mostrano una resistenza maggiore rispetto a quelli maturati per 28 giorni. Il provino con pressione di confinamento di 20 kPa e maturazione di 360 giorni mostra valori di resistenza maggiori rispetto a quello maturati per 28 giorni e pressione di confinamento di 20 kPa e 100 kPa la tensione deviatorica cresce asintoticamente con le deformazioni. Per la pressione di confinamento di 300 kPa, il provino con tempo di maturazione di 360 giorni mostra un picco di resistenza maggiore (di circa 20 kPa) rispetto a quello maturato per 28 giorni e per entrambi i provini si segnala un comportamento rammollente ('softening').



Figura 3. 40 Andamento della tensione deviatorica al variare della deformazione assiale per la miscela 1 in olio

Nella figura 3.41 è mostrato l'andamento della sovrapressione interstiziale in funzione della deformazione assiale. Il provino maturato per 360 giorni alla pressione di confinamento di 20 kPa, una volta raggiunto il picco, tende a ridurre le sue sovrapressioni. Negli altri provini le sovrapressioni interstiziali mostrano una crescita asintotica con la deformazione assiale e un andamento simile tra i due tempi di maturazione.



Figura 3. 41 Andamento della sovrapressione interstiziale al variare della deformazione assiale per la miscela 1 in olio

Nelle figure 3.42 e 3.43 sono rappresentati i percorsi di carico per la miscela 1 maturata in olio. I parametri di resistenza sono stati ricavati come indicato in precedenza e riportati nella tabella 1.



Figura 3. 42 Percorso dei carichi con inviluppo di rottura per la miscela 1 maturata per 28 giorni in olio.



Figura 3. 43 Percorso dei carichi con inviluppo di rottura per la miscela 1 maturata per 360 giorni in olio.

|       | M1 acqua                   |                       | M1 olio                    |                       |
|-------|----------------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|
| tempo | <b>φ'</b> <sub>p</sub> [°] | c' <sub>p</sub> [kPa] | <b>φ'</b> <sub>p</sub> [°] | c' <sub>p</sub> [kPa] |
| 28 gg | 39.73                      | 5.21                  | 44.22                      | 5.62                  |
| 360gg | 43.77                      | 8.31                  | 42.20                      | 19.62                 |

Tabella 3. 20 Parametri di resistenza della miscela 1

Nella figura 3.44 è riportata l'evoluzione nel tempo dell'angolo di resistestanza al taglio  $\varphi'_p$  per la miscela 1. Si mostra come tale parametro per la miscela maturata in acqua abbia un valore maggiore con il progredire del tempo di maturazione mentre per la miscela maturata in olio tenda a ridursi passando dai 28 ai 360 giorni di maturazione. A 28 giorni il provino maturato in acqua mostra un valore di resistenza al taglio minore rispetto a quello maturato in olio, mentre a 360 giorni la miscela maturata in acqua mostra un valore di resistenza in acqua mostra un valore di resistenza in acqua mostra un valore di resistenza naggiore rispetto a quello maturato in olio, mentre a 360 giorni la miscela maturata in acqua mostra un valore di resistenza maggiore rispetto a quella maturata in olio.



Figura 3. 44 Evoluzione nel tempo dell'angolo di resistenza al taglio per la miscela 1.

Nella figura 3.45 è mostrata l'evoluzione nel tempo della coesione c'<sub>p</sub>. Tale parametro mostra dei valori maggiori con l'avanzare del tempo di maturazione, con effetto maggiore sulla miscela maturata in olio. A 28 giorni la miscela maturata in acqua e quella maturata in olio mostrano valori simili di coesione, mentre a 360 giorni si ha un valore maggiore per il provino maturato in olio.



Figura 3. 45 Evoluzione nel tempo della coesione per la miscela 1.

#### 3.7.2 Miscela 2

Nella figura 3.46 è mostrato l'andamento della tensione deviatorica in funzione della deformazione assiale per la miscela 2 maturata in acqua. Il provino maturato per 360 giorni, alla pressione di confinamento di 20 kPa mostra una resistenza simile a quello con pressione di confinamento di 100 kPa maturato per 28 giorni. Alla pressione di confinamento di 20 kPa e 100 kPa la tensione deviatorica cresce asintoticamente con la deformazione. Con un confinamento di 300 kPa i provini mostrano lo stesso andamento fino alla resistenza di picco e per entrambi si ha un comportamento rammollente ('softening'), più marcato per il provino maturato per 360 giorni.



Figura 3. 46 Andamento della tensione deviatorica al variare della deformazione assiale per la miscela 2 in acqua

Nella figura 3.47 è mostrata l'evoluzione della sovrapressione per la miscela 2 maturata in acqua. Ad un confinamento di 20 kPa i provini mostrano lo stesso andamento fino al raggiungimento di una pressione massima, mentre nel post picco il provino maturato per 360 giorni tende a ridurre la sua sovrapressione interstiziale maggiormente rispetto a quello maturato per 28 giorni. Per le altre pressioni di confinamento l'andamento è del tutto simile per entrambi i tempi di maturazione.



Figura 3. 47 .Andamento della sovrapressione interstiziale al variare della deformazione assiale per la miscela 2 in acqua

Nella figura 3.48 e 3.49 sono rappresentati i percorsi di carico e l'inviluppo di rottura per la miscela 2 maturata in acqua. I parametri di resistenza sono stati ricavati come indicato in precedenza e riportati nella tabella 2.



Figura 3. 48 Percorso dei carichi con inviluppo di rottura per la miscela 2 maturata per 28 giorni in acqua.



Figura 3. 49 Percorso dei carichi con inviluppo di rottura per la miscela 2 maturata per 360 giorni in acqua

Nella figura 3.50 è mostrato l'andamento della tensione deviatorica in funzione della deformazione assiale per la miscela 2 maturata in olio. Con le pressioni di confinamento più basse (20 kPa e 100 kPa), la tensione deviatorica cresce asintoticamente con la deformazione per entrambi i tempi di maturazione. Alle pressioni di confinamento di 20 kPa e 100 kPa le resistenze sono simili per i provini maturati per 360 giorni. Il provino maturato per 28 giorni e con confinamento di 100 kPa mostra una resistenza inferiore rispetto a quello maturato per 360 giorni e con confinamento di 20 kPa. Con una pressione di confinamento di 300 kPa la resistenza è la medesima per entrambi i tempi di maturazione e una volta raggiunta la resistenza di picco il materiale mostra un comportamento rammollente ('softening').



Figura 3. 50 Andamento della tensione deviatorica al variare della deformazione assiale per la miscela 2 in olio

Nella figura 3.51 è mostrato l'evoluzione delle sovrapressioni interstiziali al variare della deformazione assiale per la miscela 2 in olio. Con un confinamento di 20 kPa il provino maturato per 360 giorni una volta raggiunto il picco mostra una riduzione della sovrapressione con valori negativi una volta raggiunto il 6% di deformazione assiale. Per gli altri confinamenti l'andamento delle sovrapressioni è molto simile tra i due tempi di maturazione.



Figura 3. 51 Andamento della sovrapressione interstiziale al variare della deformazione assiale per la miscela 2 in olio

Nelle figure 3.52 e 3.53 è mostrato l'andamento del percorso dei carichi totali (TSP) a meno della pressione iniziale  $u_0$  ('backpressure'), il percorso dei carichi efficace (ESP) e l'inviluppo di rottura per la miscela 2 in olio. I parametri di resistenza sono stati ricavati come indicato in precedenza e riportati nella tabella 2.



Figura 3. 52 Percorso dei carichi con inviluppo di rottura per la miscela 2 maturata per 28 giorni in olio



Figura 3. 53 Percorso dei carichi con inviluppo di rottura per la miscela 2 maturata per 360 giorni in olio

|       | M2 acqua                   |                       | M2 olio                    |                       |  |
|-------|----------------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|--|
| tempo | <b>φ'</b> <sub>p</sub> [°] | c' <sub>p</sub> [kPa] | <b>φ'</b> <sub>p</sub> [°] | c' <sub>p</sub> [kPa] |  |
| 28 gg | 44.35                      | 7.95                  | 42.87                      | 13.85                 |  |
| 360gg | 41.45                      | 16.83                 | 37.01                      | 37.85                 |  |

Nella tabella 3.21 sono riportati i parametri di resistenza della miscela 2.

Tabella 3. 21 Parametri di resistenza della miscela 2

Nella figura 3.54 è mostrata l'evoluzione nel tempo dell'angolo di resistenza al taglio  $\varphi'_p$  per la miscela 2, che ha una riduzione al crescere del tempo di maturazione, con effetto maggiore per i provini maturati in olio. La miscela maturata in acqua mostra un valore maggiore di  $\varphi'_p$  rispetto a quella maturata in olio.



Figura 3. 54 Evoluzione nel tempo dell'angolo di resistenza al taglio per la miscela 2.

Nella figura 3.55 è mostrata l'evoluzione nel tempo della coesione c'<sub>p</sub> per la miscela 2. La coesione ha dei valori che crescono con il tempo di maturazione, con incrementi maggiori per la miscela maturata in olio nel passare da 28 a 360 giorni. I valori di c'<sub>p</sub> sono maggiori i provini maturati in olio.



Figura 3. 55 Evoluzione nel tempo della coesione per la miscela 2

### 3.7.3 Miscela 3

Nella figura 3.56 è mostrato l'andamento della tensione deviatorica q in funzione della deformazione assiale per la miscela 3 maturata in acqua. La miscela maturata per 360 giorni mostra una resistenza maggiore rispetto a quella maturata per 28 giorni ad ogni pressione di confinamento. Il provino con pressione di confinamento di 20 kPa e maturazione di 360 giorni mostra una resistenza maggiore rispetto al provino maturato per 28 giorni e con pressione di confinamento di 100 kPa. Con un confinamento di 20 kPa e 100 kPa la tensione deviatorica mostra una crescita asintotica con la deformazione assiale. Alla pressione di confinamento di 300 kPa il provino maturato per 360 giorni mostra una resistenza di picco maggiore (di circa 30 kPa) rispetto a quello maturato per 28 giorni e per entrambi si evidenzia un comportamento rammollente ('softening').



Figura 3. 56 Andamento della tensione deviatorica al variare della deformazione assiale per la miscela 3 in acqua

Nella figura 3.57 è mostrato l'andamento delle sovrapressioni interstiziali in funzione delle deformazioni assiali per la miscela 2 maturata in acqua. Alla pressione di confinamento di 20 kPa la sovrapressione interstiziale tende a ridursi al crescere delle deformazioni, con il provino che maturato per 360 giorni mostra valori di sovrapressione negativi quando si raggiunge il 4% di deformazione. Anche il provino con pressioni di confinamento di 100 kPa e maturazione di 360 giorni mostra una riduzione delle sovrapressioni dopo il raggiungimento di una sovrappressione massima. Per il confinamento di 300 kPa entrambi i tempi di maturazione mostrano andamenti e valori simili di sovrappressione.



Figura 3. 57 Andamento della sovrapressione interstiziale al variare della deformazione assiale per la miscela 3 in acqua

Nelle figure 3.58 e 3.59 è mostrato l'andamento dei percorsi di carico ( TSP a meno della pressione iniziale  $u_0$  (backpressure) e ESP) e l'inviluppo di rottura per la miscela 3 in acqua. I parametri di resistenza sono stati ricavati come indicato in precedenza e riportati nella tabella 3.



Figura 3. 58 Percorso dei carichi con inviluppo di rottura per la miscela 3 maturata per 28 giorni in acqua



Figura 3. 59 Percorso dei carichi con inviluppo di rottura per la miscela 3 maturata per 360 giorni in acqua

Nella figura 3.60 è mostrata l'evoluzione della tensione deviatorica q in funzione della deformazione assiale per la miscela 3 maturata in olio. A parità di pressione di confinamento i provini maturati per 360 giorni mostrano una resistenza maggiore rispetto a quelli maturati per 28 giorni. Il provino maturato per 28 giorni e con pressione di confinamento di 100 kPa mostra una resistenza inferiore a quello maturato per 360 giorni e con pressione di confinamento di 20 kPa. Con confinamento di 20 kPa e 100 kPa la tensione deviatorica cresce asintoticamente con la deformazione, mentre alla pressione di confinamento di 300 kPa i provini hanno un comportamento rammollente ('softening').



Figura 3. 60 Andamento della tensione deviatorica al variare della deformazione assiale per la miscela 3 in olio

Nella figura 3.61 è mostrata l'evoluzione della sovrapressione interstiziale in funzione della deformazione assiale per la miscela 3 in olio. Alla pressione di confinamento di 20 kPa, raggiunto il picco la pressione tende a ridursi, con il provino maturato per 360 giorni che a partire dal 4% di deformazione assiale mostra una sovrapressione negativa. Con confinamento di 100 kPa fino al 2% di deformazione assiale entrambi i tempi di maturazione mostrano un andamento simile della sovrapressione, mentre oltre tale valore di deformazione il provino maturato per 360 giorni mostra un decremento maggiore rispetto a quello maturato per 28 giorni. Alla pressione di confinamento di 300 kPa l'andamento della sovrapressione interstiziale è molto simile per i due tempi di maturazione.



Figura 3. 61 Andamento della sovrapressione interstiziale al variare della deformazione assiale per la miscela 3 in olio

Nelle figure 3.62 e 3.63 e mostrato l'andamento del percorso dei carichi totale (TSP) a meno della pressione inziale  $u_0$  (backpressure), del percorso dei carichi efficace (ESP) e dell'inviluppo di rottura. I parametri di resistenza sono stati ricavati come mostrato per la miscela 1 in precedenza e sono riportati nella tabella 3.



Figura 3. 62 Percorso dei carichi con inviluppo di rottura per la miscela 3 maturata per 28 giorni in olio



Figura 3. 63 Percorso dei carichi con inviluppo di rottura per la miscela 3 maturata per 360 giorni in olio

|       | M3 acqua                   |                       | M3 olio                    |                       |
|-------|----------------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|
| tempo | <b>φ'</b> <sub>p</sub> [°] | c' <sub>p</sub> [kPa] | <b>φ'</b> <sub>p</sub> [°] | c' <sub>p</sub> [kPa] |
| 28 gg | 39.69                      | 16.79                 | 39.05                      | 16.99                 |
| 360gg | 34.47                      | 39.87                 | 36.82                      | 35.19                 |

Nella tabella 3 sono riportati i parametri di resistenza della miscela 3.22.

Tabella 3. 22 Parametri di resistenza della miscela 3.

Nella figura 3.64 è riportata l'evoluzione dell'angolo di resistenza al taglio  $\varphi'_p$  nel tempo per la miscela 3 e per entrambi i fluidi di maturazione tende a ridursi nel tempo, con maggiore riduzione nella miscela maturata in acqua. A 28 giorni il provino maturato in acqua mostra un valore di angolo di resistenza maggiore rispetto a quello in olio, mentre a 360 giorni il provino maturato in olio mostra un valore maggiore.



Figura 3. 64 Evoluzione nel tempo dell'angolo di resistenza al taglio per la miscela 3

Nella figura 3.65 è mostrata l'evoluzione della coesione c'<sub>p</sub> nel tempo per la miscela 3 e per entrambi i fluidi di maturazione si evidenzia un incremento nel tempo, con effetto maggiore per la miscela maturata in acqua. A 28 giorni il provino maturato in acqua e quello in olio mostrano un valore simile di coesione, mentre a 360 giorni quello maturato in acqua mostra un valore maggiore rispetto a quello maturato in olio.



Figura 3. 65 Evoluzione nel tempo della coesione per la miscela 3

# 3.8 Confronto dei parametri di resistenza delle tre miscele

I valori dei parametri di resistenza delle tre miscele sono riportati nelle tabelle 1, 2 e 3. Nella figura 3.66 è mostrata l'evoluzione nel tempo dell'angolo di resistenza al taglio  $\varphi'_p$  delle tre miscele maturate in acqua. La miscela 1 mostra dei valori di  $\varphi'_p$  che tendono a crescere nel tempo, mentre la miscela 2 e 3 mostrano una riduzione nel tempo. A 28 giorni la miscela 1 e 3 hanno dei valori di angolo di resistenza al taglio simili, mentre la miscela 2 ha dei valori maggiori rispetto alle altre due miscele. A 360 giorni il valore dell'angolo di resistenza al taglio tende a ridursi al crescere del rapporto cemento bentonite.



Figura 3. 66 Evoluzione nel tempo dell'angolo di resistenza al taglio per le miscele maturate in acqua.

Nella figura 3.67 è mostrata l'evoluzione nel tempo della coesione  $c'_p$  delle tre miscele maturate in acqua. Il valore della coesione cresce nel tempo, con un maggiore incremento per la miscela 3. Inoltre, mostra valori che crescono con il rapporto cemento bentonite.



Figura 3. 67 Evoluzione nel tempo della coesione per le miscele maturate in acqua

Nella figura 3.68 è mostrata l'evoluzione dell'angolo di resistenza al taglio  $\varphi'_p$  per le miscele maturate in olio, il quale mostra una riduzione al crescere del tempo di maturazione e al crescere del rapporto cemento bentonite. A 28 giorni la miscela 2 mostra valori più vicini alla miscela 1, mentre a 360 giorni mostra un valore molto simile alla miscela 3.



Figura 3. 68 Evoluzione nel tempo dell'angolo di resistenza al taglio per le miscele maturate in olio.

Nella figura 3.69 è mostrata l'evoluzione nel tempo della coesione c'<sub>p</sub> per le tre miscele maturate in olio e si nota come cresca con il tempo di maturazione. Per una maturazione d 28

giorni la coesione tende a crescere con il rapporto cemento bentonite. Per una maturazione di 360 giorni la miscela 1 mostra un valore di c'<sub>p</sub> inferiore, mentre la miscela 2 mostra un valore superiore rispetto alle altre due miscele.



Figura 3. 69 Evoluzione nel tempo della coesione per le miscele maturate in olio

Nella figura 3.70 si è messo a confronto l'evoluzione nel tempo dell'angolo di resistenza al taglio  $\varphi'_p$  per le miscele maturate sia in acqua che in olio . Si nota come il valore di  $\varphi'_p$  tenda a ridursi al crescere del tempo di maturazione, ad eccezione della miscela 1 maturata in acqua in cui tende a crescere nel passare da 28 a 360 giorni di maturazione. Per una maturazione di 28 giorni, gli angoli di picco della miscela 1 maturata in acqua e della miscela 3 maturata sia in olio che in acqua sono molto simili tra di loro, e sono inferiori spetto a quelli della miscela 1 maturata in olio per 28 giorni mostra valori di  $\varphi'_p$  leggermente inferiori alla miscela 2 maturata in acqua. Per un tempo di maturazione di 28 giorni la miscela il cui valore di angolo di resistenza al taglio risulta maggiormente condizionato dal tipo di fluido, sembra essere la miscela 1. Per un tempo di 360 giorni la miscela 1 maturata in olio e la miscela 1 maturata in acqua mostra valori simili cosi come la miscela 1 maturata in olio e la miscela 2 maturata in olio e la miscela 2 maturata in valore maggiore di  $\varphi'_p$  e la miscela 3 maturata in acqua mostrano valori simili cosi come la miscela 2 in olio e la miscela 3 in olio.



Figura 3. 70 Evoluzione nel tempo dell'angolo di resistenza al taglio

Nella figura 3.71 è mostrata l'evoluzione nel tempo della coesione  $c'_p$  per le miscele maturate sia in olio che in acqua. A 28 giorni si nota che la coesione cresce con il rapporto Cemento-Bentonite e per la miscela 1 e la miscela 3 non c'è una differenza tra i due fluidi di maturazione, mentre la miscela 2 maturata in acqua mostra un valore di coesione inferiore rispetto alla miscela 2 maturata in olio. Per un tempo di 360 giorni la miscela 1 matura in acqua mostra il minore valore di coesione mentre la miscela 3 maturata in acqua quello maggiore. La miscela 2 maturata in acqua ha un valore di c'<sub>p</sub> compreso tra quello della miscela 1 in acqua e quello della miscela 3 maturata in olio, mentre la miscela 2 maturata in olio ha un valore compreso tra la miscela 3 maturata in olio ha un valore compreso tra la miscela 3 maturata in olio ha un valore compreso tra la miscela 3 maturata in olio ha un valore compreso tra la miscela 3 maturata in olio ha un valore compreso tra la miscela 3 maturata in olio ha un valore compreso tra la miscela 3 maturata in olio ha un valore compreso tra la miscela 3 maturata in olio ha un valore compreso tra la miscela 3 maturata in olio ha un valore compreso tra la miscela 3 maturata in acqua.



Figura 3. 71 Evoluzione nel tempo della coesione

#### 3.9 Prove triassiali non consolidate non drenate UU.

Sono state effettuate delle prove UU che posso essere definite "UU modificate" in quanto c'è stata una prima fase di saturazione con il controllo del parametro B di Skempton. Inoltre, a differenza delle UU tradizionali è stata misurata la pressione interstiziale che ha permesso di poter rappresentare il percorso dei carichi totali ed efficaci che consente poi un confronto con gli inviluppi di resistenza. Per il controllo della saturazione del campione si è applicato un aumento di tensione totale  $\Delta \sigma$  aumentando la pressione in cella a drenaggio chiuso, a cui corrisponde l'applicazione di una 'contropressione'  $\Delta u_0$  ('backpressure') dell'acqua interstiziale del campione. In ogni fase si misura l'incremento delle pressioni  $\Delta u$  dell'acqua interstiziale. Il valore di B è ricavato con la (3.19):

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma} \quad (3.19)$$

Il provino è considerato saturo quando B≥0.95.

Durante la fase di rottura del provino è stata misurata la pressione interstiziale e questo ha permesso di ricavare il percorso dei carichi efficace (ESP) e fare un confronto con gli inviluppi di rottura ricavati in precedenza con le prove triassiali CIU. La resistenza al taglio non drenata  $C_u$  è ricavata con la (3.20):

$$C_u = \frac{q_{picco}}{2} \quad (3.20)$$

La tensione deviatorica  $q_{picco}$  è stata ricavata ricercando il massimo rapporto q/p'. La resistenza non drenata  $C_u$  dipende dalle condizioni iniziali ed è stata per questo normalizzata con la tensione media efficace iniziale p'<sub>0</sub>, essendo le condizioni tensionali di partenza diverse da prova a prova.

#### 3.9.1 Miscela 1

Nella figura 3.72 è mostrato l'andamento della tensione deviatorica q in funzione della deformazione assiale per la miscela 1 maturata in acqua. Fino a 60 giorni mostra una crescita della resistenza nel tempo. I provini maturati per 120 e 360 giorni mostrano una tensione deviatorica simile fino al 10% di deformazione, mentre oltre tale valore di deformazione la miscela maturata per 360 giorni mostra valori di resistenza superiori. La miscela maturata per 240 giorni in acqua ha fallito la prova.



Figura 3. 72 Andamento della tensione deviatorica al variare della deformazione assiale per la miscela 1 in acqua, prova TX-UU

Nella figura 3.73 è mostrato l'andamento della tensione deviatorica per la miscela 1 maturata in olio e si vede come la resistenza cresca con il tempo di maturazione.



Figura 3. 73 Andamento della tensione deviatorica al variare della deformazione assiale per la miscela 1 in olio, prova TX-UU

Nella tabella 3.23 sono riportati i valori di resistenza al taglio non drenata  $C_u/p'_0$  per la miscela 1, che sono stati ricavati come esposto in precedenza.

|                | M1 acqua               | M1 olio                |
|----------------|------------------------|------------------------|
| tempo [giorni] | Cu/p' <sub>0</sub> [-] | Cu/p' <sub>0</sub> [-] |
| 28             | 1.70                   | 1.58                   |
| 60             | 2.85                   | 1.67                   |
| 120            | 5.04                   | 3.36                   |
| 240            |                        | 12.62                  |
| 360            | 6.51                   | 3.52                   |

Tabella 3. 23 Resistenza non drenata Cu/ p'o miscela 1

Nella figura 3.74 è mostrata l'evoluzione nel tempo dei valori di resistenza non drenata per la miscela 1 maturata sia in acqua che in olio. Si nota come  $C_u/p'_0$  tenda a crescere con il tempo di maturazione. Per una maturazione di 28 giorni i provini maturati sia in olio che in acqua mostrano valori simili, mentre per tempi di maturazione successivi la miscela maturata in olio mostra valori minori. Il valore di resistenza per la miscela maturata in olio per 240 giorni ha un valore anomalo rispetto agli altri, ma è stato riportato per completezza. Una delle cause di tale valore anomalo è possibile attribuirlo al valore di p'\_0 che si discosta maggiormente dagli altri. La prova in acqua maturata per 240 giorni è fallita.



*Figura 3.* 74. *Evoluzione nel tempo della resistenza non drenata normalizzata*  $C_u / p'_0$  *per la miscela 1* 

Nella figura 3.75 è mostrato il percorso dei carichi totali (TSP) a meno della pressione iniziale  $u_0$  e il percorso dei carichi efficace (ESP) della prova UU con tempo di maturazione di 28 giorni in acqua a cui è stato sovrapposto l'inviluppo di rottura ricavato dalla prova triassiale CIU della miscela 1 maturata per 28 giorni in acqua. Lo stesso è stato fatto per il provino maturato in olio per 28 giorni e per quelli maturati per 360 giorni in acqua e in olio e i risultati sono riportati nell'appendice. Se ne deduce che l'ESP della miscela 1 maturata va oltre l'inviluppo di rottura ricavato a 28 giorni con la prova triassiale CIU, mostrando quindi una resistenza maggiore.



Figura 3. 75. Percorso dei carichi prova TX UU miscela 1 28 giorni acqua.

#### 3.9.2 Miscela 2

Nella figura 3.76 è mostrata l'evoluzione della tensione deviatorica in funzione della deformazione assiale per la miscela 2 maturata in acqua e si nota che la resistenza tende a crescere con il tempo di maturazione. I provini maturati per 240 e 360 giorni mostrano un andamento simile della tensione deviatorica fino al 4% di deformazione, mente oltre tale valore di deformazione la tensione si incrementa maggiormente per il provino maturato per 360 giorni.



Figura 3. 76. Andamento della tensione deviatorica al variare della deformazione assiale per la miscela 2 in acqua, prova TX-UU

Nella figura 3.77 è mostrata l'evoluzione della tensione deviatorica q al variare della deformazione assiale per la miscela 2 maturata in olio. Si nota un incremento di resistenza al crescere del tempo, con un incremento maggiore nel passare da 240 a 360 giorni e con un incremento minore nel passare da 120 a 240 giorni di maturazione.



Figura 3. 77. Andamento della tensione deviatorica al variare della deformazione assiale per la miscela 2 in olio, prova TX-UU
| Nella tabella 3.24 | 4 sono riportati | i valori di re | sistenza al taglio | o non drenata ( | C <sub>u</sub> /p' <sub>0</sub> per 1 | la miscela |
|--------------------|------------------|----------------|--------------------|-----------------|---------------------------------------|------------|
| 2.                 |                  |                |                    |                 |                                       |            |

|                | M2 acqua               | M2 olio                 |
|----------------|------------------------|-------------------------|
| tempo [giorni] | Cu/p' <sub>0</sub> [-] | Cu/ p' <sub>0</sub> [-] |
| 28             | 2.62                   | 2.39                    |
| 60             | 3.63                   | 2.65                    |
| 120            | 2.55                   | 4.78                    |
| 240            | 3.66                   | 3.20                    |
| 360            | 3.05                   | 7.91                    |

Tabella 3. 24. Resistenza non drenata  $C_u/p'_0$  della miscela 2

Nella figura 3.78 è mostrata l'evoluzione nel tempo della resistenza non drenata per la miscela 2. La miscela maturata in acqua mostra valori di resistenza che oscillano tra 2.55 e 3.66. Nei primi 60 giorni tende a crescere. A 120 giorni si ha una riduzione con valori simili ai 28 giorni di maturazione. Passando ai 240 giorni di maturazione si ha un nuovo incremento, con un valore simile ai 60 giorni di maturazione La miscela maturata in olio mostra una crescita della resistenza non drenata nel tempo, ad eccezione del provino maturato per 240 giorni che mostra una resistenza inferiore al provino maturato per 120 giorni. A parità di tempo di maturazione, la miscela maturata in olio mostra un valore di resistenza non drenata superiore a quella maturata in acqua solo per i tempi di 120 e 360 giorni.



Figura 3. 78. Evoluzione nel tempo della resistenza non drenata normalizzata  $C_u/p'_0$  per la miscela 2

Nella figura 3.79 è mostrato il percorso dei carichi totali (TSP) e il percorso dei carichi efficaci (ESP) della prova triassiale UU del provino maturato per 28 giorni in acqua e il corrispondente inviluppo di rottura ricavato dalle prove triassiali CIU, mostrando come il l'ESP vada oltre l'inviluppo di rottura. Quelli del provino maturato per 28 giorni in olio e per 360 giorni sia in acqua che olio sono riportati in appendice.



Figura 3. 79. Percorso dei carichi prova TX UU miscela 2 28 giorni acqua

#### 3.9.3 Miscela 3

Nella figura 3.80 è mostrato l'andamento della tensione deviatorica q al variare della deformazione assiale per la miscela 3 in maturata in acqua e come si può vedere si ha un incremento della resistenza con il tempo di maturazione. Il provino maturato per 240 giorni e quello maturato per 360 giorni mostrano un andamento simile fino al 2% di deformazione assiale, mentre oltre tale valore di deformazione il provino maturato per 360 giorni mostra un incremento maggiore dei valori di tensione deviatorica q.



Figura 3. 80. Andamento della tensione deviatorica al variare della deformazione assiale per la miscela 3 in acqua, prova TX-UU

Invece, nella figura 3.81 è mostrato l'andamento della tensione deviatorica al variare della deformazione assiale per la miscela 3 maturata in olio. Si nota come il provino maturato per 240 giorni abbia una resistenza inferiore a quello maturato per 120 giorni e un comportamento del tutto simile a quello maturato per 60 giorni. Da segnalare che per il per il provino maturato a 240 giorni in olio c'è stato un problema nella lettura della pressione interstiziale e per tanto non è stato possibile ricavare la resistenza non drena  $C_u$  normalizzata rispetto alla tensione media efficace iniziale p'0.



Figura 3. 81. Andamento della tensione deviatorica al variare della deformazione assiale per la miscela 3 in olio, prova TX-UU

Nella tabella 3.25 sono riportati i valori della resistenza al taglio non drenata  $C_u/p'_0$  per la miscela 3.

|                | M3 acqua               | M3 olio                |
|----------------|------------------------|------------------------|
| tempo [giorni] | Cu/p' <sub>0</sub> [-] | Cu/p' <sub>0</sub> [-] |
| 28             | 4.24                   | 4.60                   |
| 60             | 6.13                   | 2.37                   |
| 120            | 8.69                   | 9.55                   |
| 240            | 6.92                   | -                      |
| 360            | 6.18                   | 8.34                   |

Tabella 3. 25. Resistenza non drenata  $C_u/p'_0$  della miscela 3

Nella figura 3.82 è mostra l'evoluzione nel tempo della resistenza al taglio non drenata. La miscela maturata in acqua mostra valori crescenti nel tempo fino ai 120 giorni, mentre per tempi successivi si vede un decremento del valore di  $C_u/p'_0$ . La miscela maturata in olio mostra un valore anomalo di resistenza al taglio per la maturazione di 60 giorni, dato da un valore p' $_0$  molto diverso rispetto agli altri, e tale valore è stato riportato per completezza. La miscela maturata in olio mostra lo stesso comportamento della miscela maturata in acqua (trascurando il valore a 60 giorni), con valori di resistenza che si incrementano nei primi 120 giorni e con una riduzione nei tempi successivi. I provini maturati in olio a parità di tempo di maturazione mostrano valori di  $C_u/p'_0$  maggiori.



*Figura 3.* 82. *Evoluzione nel tempo della resistenza non drenata normalizzata*  $C_u / p'_0$  *per la miscela 3* 

Nella figura 3.83 è riportato il percorso dei carichi della miscela 3 maturata in acqua per 28 giorni con il corrispondente inviluppo ricavato dalla prova triassiale CIU, mentre quello per la miscela 3 maturata in olio per 28 giorni e per 360 giorni in acqua e olio è riportato in appendice.



Figura 3. 83. Percorso dei carichi prova TX UU miscela 3 28 giorni acqua

# 3.10 Confronto della resistenza al taglio non drenata delle tre miscele

I valori di resistenza al taglio non drenata  $C_u$  sono riportati nelle tabelle 4, 5 e 6. Nella figura 3.84 è mostrata l'evoluzione della resistenza nel tempo per le tre miscele maturate in acqua. La miscela 3 mostra valori maggiori rispetto alle altre due miscele fino a 240 giorni di maturazione, mentre a 360 giorni mostra valori simili alla miscela 1. La resistenza non drenata cresce con il rapporto cemento bentonite, ad eccezione dei tempi di maturazione di 120 giorni e di 360 giorni, in cui la miscela 2 mostra il valore più basso. A 240 giorni manca il valore per la miscela 1.



Figura 3. 84. Evoluzione nel tempo della resistenza non drenata normalizzata  $C_u / p'_0$  per le miscele maturate in acqua

Nella figura 3.85 è mostrata l'evoluzione della resistenza al taglio non drenata per la miscela maturata in olio. Al crescere del rapporto cemento bentonite si ha un incremento della resistenza non drenata. Il valore della miscela 1 per un tempo di maturazione di 240 giorni è stato riportato per completezza, come già segnalato in precedenza.



Figura 3. 85. . Evoluzione nel tempo della resistenza non drenata normalizzata  $C_u / p'_0$  per le miscele maturate in olio

# 4. Software "Laboratorio di Geotecnica"

Lo scopo di questo capitolo è quello di verificare il corretto funzionamento del software "Laboratorio di Geotecnica", sviluppato di recente dall'Ing. P. Rapino in ambiente Matlab per l'automatizzazione dell'interpretazione delle prove realizzate presso il laboratorio di Geotecnica del Politecnico di Torino. A tale scopo si è verificata la corrispondenza tra i risultati di alcune prove edometriche ottenuti con il software e quelli ottenuti nel capitolo 3 in modo tradizionale utilizzando come strumento un foglio Excel.

#### 4.1 Presentazione del software.

Il pannello principale del software in cui viene eseguita l'interpretazione della prova edometrica è mostrato in figura 4.1. Tramite il bottone "carica file" è possibile caricare i files di acquisizione della prova edometrica in formato txt di ciascun gradino di carico. Una volta caricati i dati si apre un secondo pannello in cui vengono inserite le caratteristiche del provino, tra le quali la densità specifica delle particelle G<sub>s</sub>, la densità  $\gamma$  e la densità secca  $\gamma_d$  per permettere al software di calcolare l'indice dei vuoti iniziale e<sub>0</sub> e il contenuto di acqua iniziale w<sub>0</sub>. Se non viene inserito una delle due densità, il software apre un pannello aggiuntivo in cui è possibile calcolare l'indice dei vuoti iniziale e<sub>0</sub> a partire dalla massa umida a inizio prova e dalla massa secca, oppure a partire dalla massa umida finale e dalla massa secca. Per coerenza con quanto fatto nel capitolo precedente si è scelto di operare con la seconda opzione ovvero utilizzare la massa umida finale e la massa secca. Una volta inserite le informazioni sul provino e dato conferma, è possibile visualizzare i dati di ciascun gradino di carico nella finestra "Files" a sinistra nella schermata principale del software (Figura 4.1). È possibile interpretare ciascun gradino di carico della prova con il metodo di Casagrande oppure con il metodo di Taylor, selezionando i punti su quali effettuare la regressione. Sulla parte destra della schermata principale (Figura 4.1) è possibile vedere diagrammate informazioni quali la curva di compressione, l'andamento delle deformazioni volumetriche in funzione delle tensioni verticali  $\sigma'_{v}$  o l'andamento delle conducibilità idraulica in funzione dell'indice dei vuoti. Il software offre la possibilità di esportare i grafici e i risultati dell'interpretazione della prova tramite l'apposito bottone "Esporta".





Figura 4. 1 Schermata principale del software "Laboratorio di geotecnica"

### 4.2 Confronto dei risultati

Nelle tabelle 4.1 e 4.2 sono riportati i risultati dell'interpretazione delle prove edometriche a fine consolidazione, ottenuti utilizzando il software. Nello specifico sono state intrepretate le prove per la miscela 1 e la miscela 2 maturate per 240 giorni (sia in olio che in acqua) e la miscela 1, 2 e 3 maturate per 360 giorni in olio. Ogni gradino di carico è stato interpretato utilizzando il metodo di Taylor, come già fatto nel capitolo 3 con l'interpretazione tradizionale. Per avere dei risultati confrontabili sono stati scelti gli stessi punti su cui effettuare la regressione lineare. Nelle figure 4.2 e 4.3 è mostrato il confronto tra le curve di compressione edometrica ottenute con il software e quelle ottenute in precedenza per la miscela 1 maturata per 240 giorni e come si può vedere sono perfettamente sovrapposte. Le restanti curve di compressione sono riportate nell'appendice.



Figura 4. 2 Confronto delle curve di compressione edometrica per la miscela 1 maturata in acqua per 240 giorni



Figura 4. 3 Confronto delle curve di compressione edometrica per la miscela 1 maturata in olio per 240 giorni

Nelle figure 4.4 e 4.5 è mostrato il confronto del coefficiente di consolidazione verticale  $c_v$  in funzione dell'indice dei vuoti per miscela 1 maturata per 240 giorni. In questo caso non c'è una perfetta sovrapposizione come accade con le curve di compressione. Nell'interpretazione effettuata nel capitolo precedente la lettura del t<sub>90</sub> è stata effettuata manualmente sul grafico e, data la soggettività, tale operazione potrebbe aver creato delle differenze. Di conseguenza sono presenti delle differenze sulla conducibilità idraulica (Figure 4.6 e 4.7), essendo direttamente dipendente dal coefficiente di consolidazione verticale  $c_v$ . I grafici delle restanti prove sono riportati nell'appendice.



Figura 4. 4 Confronto del coefficiente di consolidazione c<sub>v</sub> per la miscela 1 maturata in acqua per 240 giorni



Figura 4. 5 Confronto del coefficiente di consolidazione verticale c<sub>v</sub> per la miscela 1 maturata in olio per 240 giorni



Figura 4. 6 Confronto della conducibilità idraulica per la miscela 1 maturata in acqua per 240 giorni



Figura 4. 7 Confronto della conducibilità idraulica per la miscela 1 maturata in olio per 240 giorni

| M1 240 Acqua Software M1 240 Olio Software |       |           |              | M2 240 Acqua Software |              |       |        |              |              | M2 240 Olio Software |              |       |           |              |              |              |       |           |              |              |
|--|-------|-----------|--------------|-----------------------|--------------|-------|--------|--------------|--------------|----------------------|--------------|-------|-----------|--------------|--------------|--------------|-------|-----------|--------------|--------------|
| σ'v<br>[kPa]                               | e [-] | εv<br>[%] | k<br>[m/s]   | cv<br>[m2/s]          | σ'v<br>[kPa] | e [-] | EV [%] | k<br>[m/s]   | cv<br>[m2/s] |                      | σ'v<br>[kPa] | e [-] | еv<br>[%] | k<br>[m/s]   | cv<br>[m2/s] | σ'v<br>[kPa] | e [-] | εv<br>[%] | k [m/s]      | cv<br>[m2/s] |
| 12.3                                       | 10.26 | 1.08      |              |                       | 12.3         | 8.14  | 0.27   |              |              |                      | 12.3         | 8.09  | 0.11      |              |              | 12.3         | 6.72  | 0.34      |              |              |
| 24.5                                       | 10.24 | 1.26      | 9.51E-<br>09 | 2.88E-05              | 24.5         | 8.13  | 0.42   | 3.22E-<br>08 | 2.95E-05     |                      | 24.5         | 8.08  | 0.18      | 4.24E-<br>09 | 2.93E-<br>05 | 24.5         | 6.71  | 0.46      | 2.33E-<br>08 | 2.91E-<br>05 |
| 49   | 10.2  | 1.6       | 2.95E-<br>08 | 2.72E-05              | 49           | 8.11  | 0.59   | 1.79E-<br>08 | 2.81E-05     |                      | 49           | 8.07  | 0.32      | 1.28E-<br>08 | 2.85E-<br>05 | 49           | 6.69  | 0.72      | 2.01E-<br>08 | 2.80E-<br>05 |
| 98.1                                       | 9.98  | 3.58      | 3.18E-<br>08 | 1.06E-05              | 98.1         | 8.07  | 1.02   | 1.63E-<br>08 | 2.76E-05     |                      | 98.1         | 8.02  | 0.82      | 1.11E-<br>08 | 1.70E-<br>05 | 98.1         | 6.62  | 1.56      | 1.97E-<br>08 | 1.74E-<br>05 |
| 196.1                                      | 9.3   | 9.55      | 4.66E-<br>08 | 8.36E-06              | 196.1        | 7.9   | 2.94   | 1.64E-<br>08 | 0.000014     |                      | 196.1        | 7.81  | 3.1       | 1.23E-<br>08 | 7.64E-<br>06 | 196.1        | 6.4   | 4.45      | 2.44E-<br>08 | 1.17E-<br>05 |
| 392.3                                      | 8.1   | 20.06     | 2.91E-<br>08 | 5.83E-06              | 392.3        | 7.16  | 10.98  | 1.99E-<br>08 | 6.64E-06     |                      | 392.3        | 7.17  | 10.21     | 1.43E-<br>08 | 5.06E-<br>06 | 392.3        | 5.85  | 11.55     | 1.74E-<br>08 | 5.92E-<br>06 |
| 784.5                                      | 6.76  | 31.82     | 1.05E-<br>08 | 3.65E-06              | 784.5        | 6.04  | 23.17  | 8.46E-<br>09 | 2.96E-06     |                      | 784.5        | 6.05  | 22.52     | 1.08E-<br>08 | 3.90E-<br>06 | 784.5        | 5.02  | 22.28     | 9.21E-<br>09 | 3.87E-<br>06 |
| 1569.1                                     | 5.3   | 44.65     | 2.93E-<br>09 | 1.94E-06              | 1569.1       | 4.74  | 37.38  | 2.18E-<br>09 | 1.27E-06     |                      | 1569.1       | 4.84  | 35.83     | 3.65E-<br>09 | 2.28E-<br>06 | 1569.1       | 4.08  | 34.35     | 2.3E-09      | 1.54E-<br>06 |
| 3138.1                                     | 3.96  | 56.41     | 4.51E-<br>10 | 6.03E-07              | 3138.1       | 3.56  | 50.29  | 4.08E-<br>10 | 4.97E-07     |                      | 3138.1       | 3.63  | 49.1      | 6.52E-<br>10 | 7.60E-<br>07 | 3138.1       | 3.16  | 46.31     | 8.15E-<br>10 | 1.17E-<br>06 |
| 784.5                                      | 4.06  | 55.58     |              |                       | 784.5        | 3.61  | 49.65  |              |              |                      | 784.5        | 3.7   | 48.35     |              |              | 784.5        | 3.2   | 45.76     |              |              |
| 98.1                                       | 4.12  | 55.05     |              |                       | 98.1         | 3.66  | 49.14  |              |              |                      | 196.1        | 3.74  | 47.94     |              |              | 196.1        | 3.23  | 45.42     |              |              |
| 12.3                                       | 4.15  | 54.77     |              |                       | 12.3         | 3.69  | 48.83  |              |              |                      | 49           | 3.76  | 47.72     |              |              | 49           | 3.25  | 45.13     |              |              |
|  |       |           |              |                       |              |       |        |              |              |                      | 12.3         | 3.76  | 47.62     |              |              | 12.3         | 3.26  | 44.91     |              |              |

Tabella 4. 1 Risultati dell'interpretazione della prova edometrica per la miscela 1 e la miscela 2, maturate per 240 giorni sia in acqua che in olio

| M1 360 Oli | M1 360 Olio Software |                    |          |                                    | M2 360 Ol             | io Softw | are                |          |               | M3 360 Ol             | io Softw | are                |          |               |
|------------|----------------------|--------------------|----------|------------------------------------|-----------------------|----------|--------------------|----------|---------------|-----------------------|----------|--------------------|----------|---------------|
| σ'v [kPa]  | e [-]                | ε <sub>v</sub> [%] | k [m/s]  | c <sub>v</sub> [m <sup>2</sup> /s] | σ' <sub>v</sub> [kPa] | e [-]    | ε <sub>v</sub> [%] | k [m/s]  | $c_v [m^2/s]$ | σ' <sub>v</sub> [kPa] | e [-]    | ε <sub>v</sub> [%] | k [m/s]  | $c_v [m^2/s]$ |
| 12.3       | 7.85                 | 0.22               |          |                                    | 12.3                  | 6.62     | 0.39               |          |               | 12.3                  | 6.36     | 0.42               |          |               |
| 24.5       | 7.83                 | 0.38               | 1.60E-08 | 1.24E-05                           | 24.5                  | 6.6      | 0.65               | 4.62E-08 | 2.98E-05      | 24.5                  | 6.34     | 0.69               | 4.12E-08 | 2.86E-05      |
| 49         | 7.81                 | 0.62               | 2.22E-08 | 2.82E-05                           | 49                    | 6.56     | 1.09               | 4.62E-08 | 2.92E-05      | 49                    | 6.29     | 1.32               | 5.59E-08 | 2.75E-05      |
| 98.1       | 7.77                 | 1.1                | 1.30E-08 | 1.76E-05                           | 98.1                  | 6.53     | 1.59               | 2.06E-08 | 2.76E-05      | 98.1                  | 6.22     | 2.3                | 3.95E-08 | 2.69E-05      |
| 196.1      | 7.63                 | 2.73               | 1.92E-08 | 1.63E-05                           | 196.1                 | 6.42     | 2.97               | 1.49E-08 | 1.60E-05      | 196.1                 | 6        | 5.22               | 6.83E-08 | 2.61E-05      |
| 392.3      | 7.01                 | 9.7                | 1.10E-08 | 4.07E-06                           | 392.3                 | 5.98     | 8.7                | 1.3E-08  | 6.08E-06      | 392.3                 | 5.63     | 10.3               | 1.93E-08 | 9.54E-06      |
| 784.5      | 5.93                 | 21.82              | 5.85E-09 | 2.04E-06                           | 784.5                 | 5.16     | 19.5               | 1.15E-08 | 5.00E-06      | 784.5                 | 4.93     | 19.76              | 1.11E-08 | 5.32E-06      |
| 1569.1     | 4.67                 | 36.11              | 2.07E-09 | 1.26E-06                           | 1569.1                | 4.18     | 32.32              | 3.98E-09 | 2.63E-06      | 1569.1                | 4.01     | 32.11              | 4.15E-09 | 3.05E-06      |
| 3138.1     | 3.45                 | 49.87              | 3.54E-10 | 4.08E-07                           | 3138.1                | 3.21     | 44.92              | 9.12E-10 | 1.19E-06      | 3138.1                | 3.08     | 44.72              | 8.63E-10 | 1.07E-06      |
| 784.5      | 3.5                  | 49.26              |          |                                    | 784.5                 | 3.27     | 44.22              |          |               | 784.5                 | 3.13     | 44.09              |          |               |
| 196.1      | 3.54                 | 48.86              |          |                                    | 196.1                 | 3.3      | 43.82              |          |               | 196.1                 | 3.16     | 43.68              |          |               |
| 49         | 3.56                 | 48.6               |          |                                    | 49                    | 3.31     | 43.63              |          |               | 49                    | 3.18     | 43.45              |          |               |
| 12.3       | 3.57                 | 48.47              |          |                                    | 12.3                  | 3.32     | 43.53              |          |               | 12.3                  | 3.19     | 43.35              |          |               |

Tabella 4. 2 Risultati dell'interpretazione della prova edometrica per le tre miscele maturate in olio per 360 giorni

Il software permette anche di ricavare la tensione di preconsolidazione  $\sigma'_p$ . Nella tabella 4.3 sono riportati sia i valori ottenuti dalla precedente interpretazione sia quelli ottenuti con il software. I risultati sono stati riportati per completezza, ma sono stati ricavati con differenti modalità. Il software effettua il calcolo utilizzando il metodo di Casagrande. Tale metodo (Figura 4.8) prevede di individuare il punto di massima curvatura sulla curva di compressibilità e di tracciare la retta "r" tangente ad esso. Si traccia poi la retta orizzontale "o" e quindi la bisettrice "b" dell'angolo formato da "r" ed "o". La tensione di preconsolidazione  $\sigma'_p$  è ricavata dall'intersezione tra il prolungamento del ramo di compressione e della bisettrice "b". Data la soggettività dell'operazione, come raccomandato da Lancellotta (2012) e indicato anche nel capitolo precedente, il valore di tensione di preconsolidazione deve essere compreso tra due valori limite. Invece, nel capitolo precedente si è preferito far riferimento al valore medio tra i due valori limite.

|                | Software              | Tradizionale                   |
|----------------|-----------------------|--------------------------------|
|                | σ' <sub>p</sub> [kPa] | σ' <sub>p,media</sub><br>[kPa] |
| M1 240gg acqua | 193.7                 | 170.0                          |
| M1 240gg olio  | 393.7                 | 324.0                          |
| M2 240gg acqua | 412.2                 | 327.7                          |
| M2 240gg olio  | 378.2                 | 321.5                          |
| M1 360gg olio  | 413.1                 | 334.9                          |
| M2 360gg olio  | 473.2                 | 341.5                          |
| M3 360gg olio  | 484.7                 | 344.8                          |

Tabella 4. 3 Tensioni di preconsolidazione ottenute con le due modalità di interpretazione



Figura 4. 8 Metodo di Casagrande per ricavare la tensione di preconsolidazione

Nella tabella 4.4 di seguito sono riportati gli indici di compressione  $C_c$  e di rigonfiamento  $C_s$  per entrambe le modalità di interpretazione. I valori ottenuti sono del tutto simili, indipendentemente dalle modalità con cui sono stati ricavati.

|                | Software |                    | Tradizionale |                    |  |
|----------------|----------|--------------------|--------------|--------------------|--|
|                | Cc [-]   | C <sub>s</sub> [-] | Cc [-]       | C <sub>s</sub> [-] |  |
| M1 240gg acqua | 4.49     | 0.072              | 4.43         | 0.080              |  |
| M1 240gg olio  | 4.10     | 0.062              | 3.99         | 0.057              |  |
| M2 240gg acqua | 4.01     | 0.042              | 3.92         | 0.056              |  |
| M2 240gg olio  | 2.98     | 0.044              | 2.98         | 0.045              |  |
| M1 360gg olio  | 3.99     | 0.055              | 3.94         | 0.053              |  |
| M2 360gg olio  | 3.10     | 0.042              | 3.06         | 0.046              |  |
| M3 360gg olio  | 2.82     | 0.043              | 2.81         | 0.040              |  |

Tabella 4. 4 Indici di compressione  $C_c$  e indici di rigonfiamento  $C_s$  ottenuti con le due modalità di interpretazione

# 5. Modellazione costitutiva

Questo capitolo ha come oggetto la modellazione costitutiva delle miscele cemento bentonite. La finalità della modellazione è stata quella di evidenziare gli aspetti principali di comportamento, così come possono essere presi in considerazione da due differenti modelli elasto-plastici con incrudimento. Il primo modello è di larga diffusione nella pratica ingegneristica ed è stato originariamente proposto per le argille (Modified Cam Clay, MCCM, Roscoe & Burland, 1968), l'altro è una recente modifica al MCCM formulata appositamente per le miscele Cemento – Bentonite (CBC model, Flessati et al., 2020). La modellazione è stata effettuata simulando i risultati delle prove edometriche e delle prove triassiali CIU esposti nei capitoli precedenti.

#### 5.1 Modelli elasto-plastici con incrudimento

I modelli elasto-plastici incrudenti sono un'estensione di quelli perfettamente plastici e sono in grado di simulare il comportamento non elastico e l'accumulo irreversibile di deformazione anche lontano dalla rottura. A differenza dei perfettamente plastici, nei modelli con incrudimento la funzione di snervamento non è solo funzione dello stato tensionale, ma anche di un parametro aggiuntivo di incrudimento che caratterizza la dimensione della superfice. Il parametro di incrudimento cambia quando ci sono deformazioni plastiche e si incrementa la dimensione della regione elastica del materiale.

Per definire un modello elastoplastico incrudente sono necessari i seguenti ingredienti:

- Proprietà elastiche: serve una relazione che leghi la variazione della tensione  $\delta \sigma'$  e alla variazione di deformazione elastica  $\delta \epsilon^{e}$  (5.1).

$$\delta \boldsymbol{\sigma}' = \boldsymbol{D} \delta \boldsymbol{\varepsilon}^e \quad (5.1)$$

Dove **D** è la matrice di rigidezza elastica.

- Criterio di snervamento: è necessario definire una superficie che delimiti il comportamento elastico. La funzione di snervamento f che definisce tale superficie dipende sia dallo stato tensionale che da un parametro di incrudimento  $\chi$  e la sua dimensione non è fissa e dipende dalla storia di carico del materiale (5.2).

$$f(\boldsymbol{\sigma}',\boldsymbol{\chi})$$
 (5.2)

Si ha un incremento di deformazioni plastiche  $\delta \epsilon^{p}$  quando la relazione (5.3), nota come condizione di consistenza, è uguale a 0. In questa condizione si ha un comportamento elasto-plastico del materiale, in cui le deformazioni sono date dalla somma di quelle elastiche e quelle plastiche.

$$f(\boldsymbol{\sigma}', \chi) = 0; \quad \delta f = \frac{\partial f^T}{\partial \boldsymbol{\sigma}'} \delta \boldsymbol{\sigma}' + \frac{\partial f}{\partial \chi} \delta \chi = 0$$
 (5.3)

Quando  $f(\sigma',\chi) < 0$  il materiale si trova nella condizione di comportamento elastico, mentre la condizione  $f(\sigma',\chi) > 0$  non è ammessa perché lo stato tensionale non può trovarsi al di fuori della superficie di snervamento. Si è in condizioni elasto-plastiche quando la funzione di snervamento  $f(\sigma',\chi)$  e la condizone di consistenza  $\delta f$  sono uguali a 0.

- Legge di flusso: è necessario definire la direzione delle deformazioni plastiche ed è possibile farlo utilizzando il potenziale plastico g (5.4).

$$\delta \boldsymbol{\varepsilon}^{\boldsymbol{p}} = \mu \frac{\partial g}{\partial \boldsymbol{\sigma}'} \quad (5.4)$$

Dove  $\mu$  è un moltiplicatore scalare da determinarsi caso per caso. A volte si può assumere di essere in condizioni di flusso associato cioè la funzione di snervamento e quella di potenziale coincidono. In questo caso, rappresentando la direzione degli incrementi di deformazione plastica in uno spazio sui cui assi sono riportate sia le componenti tensionali che le corrispondenti componenti deformative, si ha

l'ortogonalità tra la direzione delle deformazioni plastiche e la superficie di snervamento.

- Legge di incrudimento: definisce l'entità dell'incremento delle deformazioni plastiche e come varia la dimensione della superficie di snervamento.

#### 5.2 Modified Cam Clay model

Il Cam Clay è un modello elasto-plastico incrudente elaborato nella sua forma originale da Schofield e Wroth (1968). Partendo dall'ipotesi di Taylor (1948) sulla dissipazione, in cui la resistenza mobilitata è somma di una componente attritiva e della dilatanza e introducendo le variabili di tensione media efficace p' (5.5) di tensione deviatorica q (5.6) e le variabili di deformazione volumica  $\varepsilon_v$  (5.7) e di deformazione deviatorica  $\varepsilon_s$  (5.8) :

$$p' = \frac{1}{3} (\sigma'_z + 2\sigma'_r) (5.5)$$
$$q = \sigma'_z - \sigma'_r (5.6)$$
$$\varepsilon_v = \varepsilon_z + 2\varepsilon_r (5.7)$$
$$\varepsilon_s = \frac{2}{3} (\varepsilon_z - \varepsilon_r) (5.8)$$

Dove  $\sigma'_z$  è la tensione efficace assiale,  $\sigma'_r$  è la tensione efficace radiale,  $\varepsilon_z$  è la deformazione assiale,  $\varepsilon_r$  è la deformazione radiale.

Si può scrivere la seguente relazione che rappresenta la legge di flusso (5.9):

$$d = \frac{\delta \varepsilon_v^p}{\delta \varepsilon_s^p} = M - \frac{q}{p'} = M - \eta \quad (5.9)$$

Dove d è la dilatanza, M è la pendenza della linea di stato critico,  $\eta$  è il rapporto tra la tensione deviatorica q e la tensione media efficace p'. Introducendo la condizione di ortogonalità tra deformazioni plastiche e funzione potenziale  $\frac{\delta \varepsilon_v^p}{\delta \varepsilon_s^p} = -\frac{\delta p'}{\delta q}$  e integrando si ottiene la (5.10):

$$f = g = q + Mp' \ln\left(\frac{p'}{p'_0}\right)$$
 (5.10)

dove p'<sub>0</sub> rappresenta la variabile di incrudimento. Essendo in condizioni di flusso associato ovvero c'è ortogonalità tra superficie di snervamento e direzione delle deformazioni plastiche, la funzione di snervamento e la funzione potenziale plastico sono coincidenti. Un esempio di superfici di snervamento che possono essere ottenute dalla (5.6), sono rappresentate nella figura 5.1, dove i vettori rappresentano le direzioni degli incrementi di deformazione plastica.



Figura 5. 1 Superficie di snervamento per il modello Cam Clay, modificata da Nova (2002)

La legge di incrudimento può essere ricavata dall'osservazione di una compressione isotropa (Figura 5.2). Nel tratto normal-consolidato (tratto OA) si hanno sia deformazioni volumiche elastiche che plastiche e possono essere ricavate con la (5.11):

$$\delta \varepsilon_{\nu} = \frac{\lambda}{\nu} \cdot \frac{\delta p_0'}{p_0'} \quad (5.11)$$

Effettuando uno scarico (tratto AB) si hanno le sole deformazioni elastiche (5.12):

$$\delta \varepsilon_{v}^{e} = \frac{\kappa}{v} \cdot \frac{\delta p'}{p'} \quad (5.12)$$

Dalla differenza tra la relazione (5.11) e la (5.12) si ottiene la (5.13) che rappresenta la componente plastica delle deformazioni, fornendo una relazione tra la variazione di p'<sub>0</sub> e le deformazioni plastiche (legge di incrudimento):

$$\frac{\delta p_0'}{\delta \varepsilon_v^p} = \frac{v}{(\lambda - \kappa)} p_0' \quad (5.13)$$



Figura 5. 2 Piano di compressione isotropa, . Lancellotta (2012)

Le deformazioni elastiche sono valute con la seguente relazione (5.14):

$$\begin{pmatrix} \delta \varepsilon_{\nu}^{e} \\ \delta \varepsilon_{s}^{e} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1/K' & 0 \\ 0 & 1/3G' \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \delta p' \\ \delta q \end{pmatrix} (5.14)$$

Dove K' (15) rappresenta il modulo di deformazione volumica mentre G' (5.16) rappresenta il modulo taglio.

$$K' = \frac{vp'}{\kappa} (5.15)$$
$$G' = \frac{3(1-2\nu)}{2(1+\nu)} K' (5.16)$$

Dove *v* rappresenta il coefficiente di Poisson. Le deformazioni plastiche sono ricavate dalla (5.17):

$$\begin{pmatrix} \delta \varepsilon_{\nu}^{p} \\ \delta \varepsilon_{s}^{p} \end{pmatrix} = \frac{\lambda - \kappa}{M p' \nu} \begin{bmatrix} M - \frac{q}{p'} & 1 \\ 1 & \left( M - \frac{q}{p'} \right)^{-1} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \delta p' \\ \delta q \end{pmatrix}$$
(5.17)

In condizioni elastiche (f<0) le deformazioni sono date dalla (5.14), mentre in condizioni elastoplastiche (f=0,  $\delta$ f=0) le deformazioni sono date dalla somma della (5.14) e della (5.17). Tuttavia, nel presente elaborato di tesi è stata utilizzata una riformulazione del Cam Clay originale, chiamata Cam Clay modificato (Modified Cam Clay Model, MCCM). Le principali differenze stanno nella definizione della superfice di snervamento e della legge di flusso. La nuova formulazione della funzione di snervamento, indicata nella (5.18), rappresenta una superficie di forma ellittica (Figura 5.3):

$$f = g = \frac{q^2}{M^2} - p'(p'_0 - p') \quad (5.18)$$



Figura 5. 3 Superficie di snervamento per il Cam Clay modificato, modificata da . Muir Wood (2004)

La legge di flusso del Cam Clay modificato è indicata nella (5.19):

$$d = \frac{\partial \varepsilon_{\nu}^{p}}{\partial \varepsilon_{s}^{p}} = \frac{M^{2} - \eta^{2}}{2\eta} \quad (5.19)$$

È possibile definire il modulo di incrudimento H con la seguente relazione (5.20):

$$H = -\frac{\partial f}{\partial p'_0} \cdot \frac{\partial p'_0}{\partial \varepsilon_{\nu}^p} \cdot \frac{\partial g}{\partial p'} = -(-p') \left(\frac{\nu p'_0}{\lambda - \kappa}\right) (2p' - p'_0) \quad (5.20)$$

Le deformazioni plastiche per il Cam Clay modificato sono ricavate dalla (5.21):

$$\begin{pmatrix} \delta \varepsilon_{\nu}^{p} \\ \delta \varepsilon_{s}^{p} \end{pmatrix} = \frac{\lambda - \kappa}{p' \nu (M^{2} + \eta^{2})} \begin{bmatrix} M^{2} - \eta^{2} & 2\eta \\ 2\eta & \frac{4\eta^{2}}{M^{2} - \eta^{2}} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \delta p' \\ \delta q \end{pmatrix}$$
(5.21)

In condizioni elasto-plastiche le deformazioni sono somma di quelle elastiche, ricavate con la relazione (5.14), e di quelle plastiche, ricavate con la (5.21).

Per calibrare il modello sono quindi necessarie le seguenti informazioni:

- $\lambda$ : pendenza del tratto Normal-consolidato (vedi figura 5.2);
- κ: pendenza del tratto di scarico (vedi figura 5.2);
- v: coefficiente di Poisson;
- M: pendenza della linea di stato critico, legata all'angolo di stato critico  $\varphi'_{cv}$  dalla relazione (5.22);
- N: valore del volume specifico in corrispondenza della tensione media di riferimento p'ref:
- p'<sub>0</sub>: parametro di incrudimento.

$$M = \frac{6sen(\varphi'_{cv})}{3-sen(\varphi'_{cv})}$$
(5.22)

#### 5.3 Modello CBC

Si è osservato che nella simulazione delle prove triassiali non drenate CIU, il modello Cam Clay modificato si presta bene a simulare il comportamento delle miscele cemento bentonite fino al picco di resistenza, ma non è in grado di riprodurre il post picco. Tale comportamento si è evidenziato in particolare alle pressioni di confinamento più elevate e potrebbe avere un ruolo rilevante qualora i diaframmi plastici si trovassero in condizioni di rottura. Si è reso quindi necessario introdurre un modello più avanzato, chiamato Cement-Bentonite costitutive model (CBC model, Flessati et al., 2020). Nel modello CBC sono state applicate delle modifiche alla legge di flusso e al modulo di incrudimento del Cam Clay modificato, ispirate a relazioni esistenti per i materiali granulari, in accordo con quanto visto da un'indagine sulla microstruttura del materiale.

La funzione della superficie di snervamento è la stessa del MCCM, ma non si è più in condizioni di flusso associato quindi la funzione di snervamento e quella di potenziale plastico non coincidono. La nuova legge di flusso (5.23) non dipende più solo da M e  $\eta$ , ma anche da una quantità scalare  $\psi$ .

$$d = Mexp(g_1\psi) - \eta \quad (5.23)$$

La quantità scalare  $\psi$  (5.24), nota come parametro di stato (Been & Jefferies, 1985), indica la distanza tra l'indice dei vuoti corrente e quello di stato critico in corrispondenza di un determinato stato tensionale mentre  $g_1$  è un parametro costitutivo di valore positivo e adimensionale.

$$\psi = e - \left(\Gamma - \lambda ln \frac{p'}{p'_{ref}}\right) \quad (5.24)$$

dove:

- e: indice dei vuoti dello stato corrente;
- p': pressione dello stato corrente
- Γ: indice a stato critico nel piano in corrispondenza di p'ref;
- $\lambda$ : pendenza della linea di stato critico (stessa pendenza della NCL, vedi figura 2);
- p'<sub>ref</sub>: pressione di riferimento di 1 kPa.

Il modulo di incrudimento è indicato nella relazione (5.25):

$$H = \left(p'_0 \cdot \frac{1+e_0}{\lambda-\kappa}\right) \cdot h_1 \cdot \left[\frac{M}{\eta} - \exp(h_2\psi\right] \quad (5.25)$$

Come  $g_1$ , anche  $h_1$  e  $h_2$  sono dei parametri costitutivi di valore positivo e adimensionali. Il parametro  $h_1$  è calibrato sulle prove edometriche e influenza la pendenza del ramo normal consolidato, mentre  $g_1$  e  $h_2$  sono calibrati sulle prove triassiali. In conclusione, per calibrare il modello CBC, ai parametri del MCCM, si devono aggiungere  $\Gamma$ ,  $g_1$ ,  $h_1$  e  $h_2$ .

# **5.4 Codice numerico DRIVER EP per la simulazione costitutiva delle prove** Le simulazioni con i modelli costitutivi sono state eseguite su Matlab con il codice numerico DRIVER EP, basato sulla tecnica di linearizzazione delle equazioni costitutive proposto da Bardet & Choucair (1991). La maggior parte delle equazioni costitutive che descrivono il comportamento non lineare e irreversibile dei materiali sono complicate e non permettono una simulazione analitica della risposta sforzo deformazione e per questo devono essere integrate numericamente per simulare le curve di sforzo-deformazione comparabili con quelle sperimentali ottenute in laboratorio. Il metodo proposto linearizza i vincoli dei carichi di laboratorio, li collega alle relazioni costitutive e forma un sistema lineare di equazioni differenziali ordinarie, che integrate aggirano la difficoltà nella soluzione dei problemi dovute alla non linearità. I dati di input dati richiesti e da calibrare sul DRIVER per la simulazione con il modello MCCM sono i seguenti $\lambda$ , $\kappa$ , coefficiente di Poisson (v), M, indice dei vuoti iniziale $e_0$ e il parametro di incrudimenti p'<sub>0</sub>. Per la simulazione con il modello CBC, ai precedenti parametri del modello MCCM, si devono aggiungere i parametri h<sub>1</sub>, g<sub>1</sub>, h<sub>2</sub> e $\Gamma$ .

#### 5.5 Simulazione delle prove con il Cam Clay modificato

Nel presente paragrafo sono illustrati i risultati delle simulazioni delle prove edometriche e delle prove triassiali CIU effettuate con il Cam Clay modificato Sono riportati i casi relativi alla miscela 1 con tempo di maturazione di 28 e 360 giorni, sia in olio che in acqua. Le simulazioni per le restanti due miscele sono riportate nell'appendice. Il coefficiente di Poisson v è stato assunto costante e pari a 0.25. I parametri  $\kappa e \lambda$ , sono stati ricavati dagli indici di rigonfiamento C<sub>s</sub> e di compressibilità C<sub>c</sub> delle prove edometriche, come mostrato dalla relazione (5.26), e modificati all'occorrenza, considerando che rappresentano lo stesso processo fisico, ma espresso in termini di il logaritmo naturale e il logaritmo in base 10. Il valore della pendenza di stato critico M è stato scelto partendo da un valore che approssimasse la parte finale della prova triassiale alle tre pressioni di confinamento ed è poi stato calibrato confrontando le simulazioni con i risultati delle prove triassiali.

Il valore di p' $_0$  è stato calibrato in modo da avere delle buone simulazioni sia per le prove edometriche che per le prove triassiali.

$$\kappa = 0.404C_s ; \qquad \lambda = 0.404C_c \quad (5.26)$$

Nelle seguenti tabelle (Tabelle 5.1-5.6), sono riportati i parametri utilizzati. Le simulazioni delle prove edometriche per i tempi di maturazione intermedi (60, 120 e 240 giorni) sono riportate nell'appendice. Per tali prove si è utilizzato un valore di M eseguendo un'interpolazione logaritmica tra i valori ottenuti a 28 e 360 giorni. I confronti riportati nelle figure 5.4 e 5.5 mostrano come il Cam Clay modificato consenta una buona riproduzione delle prove edometriche. Per le prove triassiali, alla pressione di confinamento più bassa di 20 kPa, nel piano deformazione assiale-tensione deviatorica ( $\varepsilon_a$ -q) si nota una tendenza del MCCM alla sovrastima della resistenza del materiale (Figure 5.7(a), 5.8(a) e 5.9(a)). Alle pressioni di confinamento maggiori invece si nota come non sia in grado di riprodurre il comportamento di post-picco, in accordo con quanto mostrato anche da Flessati et al. (2020).

|                    | M1_28_A | M1_60_A | M1_120_A | M1_240_A | M1_360_A |
|--------------------|---------|---------|----------|----------|----------|
| k [-]              | 0.02656 | 0.02463 | 0.03552  | 0.03471  | 0.02831  |
| λ[-]               | 1.52603 | 1.52778 | 1.72426  | 1.92321  | 1.83294  |
| M [-]              | 1.8     | 1.82    | 1.83     | 1.84     | 1.85     |
| p'0 [kPa]          | 45      | 70      | 85       | 90       | 105      |
| e <sub>0</sub> [-] | 9.22    | 8.69    | 9.30     | 10.39    | 10.06    |

Tabella 5. 1. Parametri Cam Clay modificato miscela 1 maturata in acqua

|           | M1_28_0 | M1_60_0 | M1_120_0 | M1_240_O | M1_360_O |
|-----------|---------|---------|----------|----------|----------|
| k [-]     | 0.02205 | 0.02731 | 0.02299  | 0.02493  | 0.02198  |
| λ[-]      | 1.60871 | 1.56338 | 1.73324  | 1.73170  | 1.62000  |
| M [-]     | 1.81    | 1.85    | 1.89     | 1.93     | 1.95     |
| p'0 [kPa] | 105     | 90      | 140      | 160      | 160      |
| $e_0[-]$  | 8.26    | 8.20    | 8.06     | 8.17     | 7.87     |

Tabella 5. 2 Parametri Cam Clay modificato miscela 1 maturata in olio

|                    | M2_28_A | M2_60_A | M2_120_A | M2_240_A | M2_360_A |
|--------------------|---------|---------|----------|----------|----------|
| k [-]              | 0.01832 | 0.01893 | 0.02379  | 0.02420  | 0.01203  |
| λ[-]               | 1.10732 | 1.22179 | 1.63453  | 1.69956  | 1.38989  |
| M [-]              | 1.8     | 1.83    | 1.86     | 1.88     | 1.9      |
| p'o [kPa]          | 115     | 130     | 155      | 165      | 165      |
| e <sub>0</sub> [-] | 6.45    | 6.98    | 8.00     | 8.10     | 6.52     |

Tabella 5. 3 Parametri Cam Clay modificato miscela 2 maturata in acqua

|                        | M2_28_O | M2_60_0 | M2_120_0 | M2_240_O | M2_360_O |
|------------------------|---------|---------|----------|----------|----------|
| k [-]                  | 0.01722 | 0.01881 | 0.01812  | 0.01949  | 0.01984  |
| λ[-]                   | 1.14478 | 1.20062 | 1.27646  | 1.29297  | 1.33019  |
| M [-]                  | 2       | 1.98    | 1.96     | 1.94     | 1.93     |
| <b>p'</b> <sub>0</sub> | 110     | 120     | 160      | 170      | 180      |
| [kPa]                  |         |         |          |          |          |
| e <sub>0</sub> [-]     | 6.57    | 6.79    | 6.65     | 6.74     | 6.65     |

Tabella 5. 4 Parametri Cam Clay modificato miscela 2 maturata in olio

|                    | M3_28_A | M3_60_A | M3_120_A | M3_240_A | M3_360_A |
|--------------------|---------|---------|----------|----------|----------|
| k [-]              | 0.01488 | 0.01894 | 0.02293  | 0.01863  | 0.01812  |
| λ[-]               | 1.10846 | 1.33703 | 1.36663  | 1.33639  | 1.27715  |
| M [-]              | 1.78    | 1.82    | 1.85     | 1.88     | 1.9      |
| p'o [kPa]          | 150     | 195     | 240      | 240      | 230      |
| e <sub>0</sub> [-] | 6.08    | 6.55    | 6.69     | 6.79     | 6.47     |

Tabella 5. 5 Parametri Cam Clay modificato miscela 3 maturata in acqua

|                | M3_28_O | M3_60_0 | M3_120_O | M3_240_O | M3_360_O |
|----------------|---------|---------|----------|----------|----------|
| k              | 0.01414 | 0.02009 | 0.01784  | 0.01830  | 0.01757  |
| lambda         | 1.08435 | 1.19946 | 1.18093  | 1.20491  | 1.21768  |
| М              | 1.8     | 1.83    | 1.86     | 1.88     | 1.9      |
| p'o [kPa]      | 145     | 165     | 200      | 200      | 220      |
| e <sub>0</sub> | 6.15    | 6.38    | 6.32     | 6.30     | 6.39     |

Tabella 5. 6 Parametri Cam Clay modificato miscela 3 maturata in olio



Figura 5. 4 Simulazione prova edometrica con Cam Clay modificato miscela 1: (a) 28 giorni acqua e (b) 360 giorni acqua



Figura 5. 5. Simulazione prova edometrica con Cam Clay modificato miscela 1: (a) 28 giorni olio e (b) 360 giorni olio



Figura 5. 6 Simulazione prova triassiale CIU con Cam Clay modificato miscela 1 28 giorni acqua: (a)  $p'_c=20$  kPa; (b)  $p'_c=100$  kPa.



Figura 5. 7. Simulazione prova triassiale CIU con Cam Clay modificato miscela 1 28 giorni olio: (a)  $p'_c=20 kPa$ ; (b)  $p'_c=100 kPa$ ; (c)  $p'_c=300 kPa$ .



Figura 5. 8 Simulazione prova triassiale CIU con Cam Clay modificato miscela 1 360 giorni acqua: (a) p'c=20 kPa; (b) p'c=100 kPa; (c) p'c=300 kPa.



Figura 5. 9 Simulazione prova triassiale CIU con Cam Clay modificato miscela 1 360 giorni olio: (a)  $p'_c=20 kPa$ ; (b)  $p'_c=100 kPa$ ; (c)  $p'_c=300 kPa$ .

Nella figura 5.10 è rappresentato l'andamento della variabile di incrudimento  $p'_0$  in funzione del tempo e si può notare come tenda a crescere con il rapporto cemento bentonite. L'incremento è più marcato nei primi 120 giorni rispetto ai tempi successi, in cui si ha una certa stabilizzazione. La miscela 1 maturata nell'olio mostra un comportamento più simile a quello della miscela 2 e con valori maggiori alla miscela 1 maturata in acqua. Per la miscela 2 l'andamento di p'\_0 è praticamente simile per entrambi i fluidi di maturazione, mentre la miscela 3 mostra valori maggiori per quella maturata in olio. Tuttavia, le differenze tra i due fluidi di maturazione sono meno marcate nella miscela 2 e nella miscela 3 rispetto alla miscela 1.



Figura 5. 10 Andamento della variabile di incrudimento p'o nel tempo

Nel grafico in figura 5.11 è rappresentato l'andamento della pendenza M della linea di stato critico in funzione del tempo. Questo tende a crescere con il tempo di maturazione ad eccezione della miscela 2 maturata in olio, in cui il valore di M decrescere all'avanzare del tempo. La miscela 1 e la miscela 2 mostrano valori di pendenza superiori per i provini maturati nell'olio, mentre per la miscela 3 si hanno valori simili a prescindere dal tipo di fluido di maturazione. Si nota quindi una maggiore influenza del fluido di maturazione sulle miscele 1 e 2 rispetto alla 3. Invece, non è ben chiara l'influenza del rapporto cemento bentonite sull'andamento della pendenza della linea di stato critico. Da notare che la miscela 2 maturata in acqua e la miscela 3 maturata in olio presentano i medesimi valori di M.



Figura 5. 11 Andamento della pendenza M della linea di stato critico in funzione del tempo

#### 5.6 Simulazione delle prove con il modello CBC

Dopo aver simulato le prove con il Cam Clay modificato, si è proceduto alla simulazione con il modello CBC delle prove edometriche e delle prove triassiali CIU con tempo di maturazione di 28 e 360 giorni. Nel presente paragrafo sono presentati i risultati per la miscela 1, mentre per le restanti due miscele sono riportati nell'appendice. Sono stati usati i medesimi parametri usati in precedenza e riportati nelle tabelle 5.1-5.6 e si è calibrato il parametro h<sub>1</sub> sulle edometriche, mentre il parametro  $\Gamma$  è stato calibrato sulle triassiali. Per quanto riguarda i parametri g<sub>1</sub> e h<sub>2</sub>, richiesti dal modello, si sono presi dei valori costanti, rispettivamente di 0.05 e 0.1, come fatto da Flessati et al. (2020). Per quanto riguarda le prove edometriche ai tempi intermedi (60, 120 e 240 giorni) i parametri  $\Gamma$  e h<sub>1</sub> sono stati ricavati eseguendo un'interpolazione logaritmica, come già fatto in precedenza per M, tra i valori ottenuti dalle simulazioni a 28 e 360 giorni, ed eventualmente modificati per ottenere delle buone simulazioni. I parametri h<sub>1</sub>, g<sub>1</sub> e h<sub>2</sub> utilizzati nelle simulazioni sono riepilogati nelle seguenti tabelle (Tabelle 5.7-5.12). Nelle figure 5.12 e 5.13 sono riportate le simulazioni delle prove edometriche per la miscela 1 per i tempi di maturazione di 28 e 360 giorni e come si può vedere anche con il modello CBC si ha una buona simulazione delle prove. Da notare che per la miscela 2 maturata in acqua, ai tempi di 120 e 240 giorni non si è ottenuta una buona simulazione della prova edometrica. Per migliorarle è necessario forzare i parametri  $\Gamma$  e h<sub>1</sub> rispetto a quelli dell'intervallo compreso tra i 28 e 360 giorni (Appendice, Figura 82 e 83). Per quanto riguardo le prove triassiali si può osservare come il modello CBC, a differenza del Cam Clay modificato, sia in grado di riprodurre il post picco della prova e in particolare, lo si può apprezzare al meglio alla pressione di confinamento di 300 kPa nelle figure 5.15(c) e 5.16(c).

|                    | M1_28_A | M1_60_A | M1_120_A | M1_240_A | M1_360_A |
|--------------------|---------|---------|----------|----------|----------|
| Γ[-]               | 15.3    | 15.5    | 16.6     | 17.5     | 17.5     |
| h <sub>1</sub> [-] | 0.3     | 0.3     | 0.41     | 0.6      | 0.5      |
| g <sub>1</sub> [-] | 0.05    | 0.05    | 0.05     | 0.05     | 0.05     |
| h <sub>2</sub> [-] | 0.1     | 0.1     | 0.1      | 0.1      | 0.1      |

Tabella 5. 7 Parametri  $\Gamma$ ,  $h_1$ ,  $g_1$  e  $h_2$  per modello CBC miscela 1 maturata in acqua

|                           | M1_28_O | M1_60_0 | M1_120_0 | M1_240_O | M1_360_O |
|---------------------------|---------|---------|----------|----------|----------|
| Γ[-]                      | 13.8    | 14.1    | 14.8     | 15       | 14.8     |
| h <sub>1</sub> [-]        | 0.55    | 0.55    | 0.7      | 0.8      | 0.7      |
| <b>g</b> <sub>1</sub> [-] | 0.05    | 0.05    | 0.05     | 0.05     | 0.05     |
| h <sub>2</sub> [-]        | 0.1     | 0.1     | 0.1      | 0.1      | 0.1      |

Tabella 5. 8 Parametri  $\Gamma$ ,  $h_1$ ,  $g_1$  e  $h_2$  per modello CBC miscela 1 maturata nell'olio

|                           | M2_28_A | M2_60_A | M2_120_A | M2_240_A | M2_360_A |
|---------------------------|---------|---------|----------|----------|----------|
| Γ[-]                      | 10.8    | 11.3    | 12.5     | 12.5     | 12.5     |
| h1 [-]                    | 0.4     | 0.5     | 0.75     | 0.75     | 0.75     |
| <b>g</b> <sub>1</sub> [-] | 0.05    | 0.05    | 0.05     | 0.05     | 0.05     |
| h <sub>2</sub> [-]        | 0.1     | 0.1     | 0.1      | 0.1      | 0.1      |

Tabella 5. 9 Parametri  $\Gamma$ ,  $h_1$ ,  $g_1 e h_2 per modello CBC miscela 2 maturata in acqua.$ 

|                    | M2_28_O | M2_60_O | M2_120_O | M2_240_O | M2_360_O |
|--------------------|---------|---------|----------|----------|----------|
| Γ[-]               | 10.8    | 11.1    | 11.4     | 11.6     | 11.8     |
| h <sub>1</sub> [-] | 0.65    | 0.69    | 0.74     | 0.78     | 0.8      |
| g1 [-]             | 0.05    | 0.05    | 0.05     | 0.05     | 0.05     |
| h <sub>2</sub> [-] | 0.1     | 0.1     | 0.1      | 0.1      | 0.1      |

Tabella 5. 10 Parametri  $\Gamma$ ,  $h_1$ ,  $g_1 e h_2 per modello CBC miscela 2 maturata nell'olio.$ 

|                    | M3_28_A | M3_60_A | M3_120_A | M3_240_A | M3_360_A |
|--------------------|---------|---------|----------|----------|----------|
| Γ[-]               | 10.2    | 11      | 11.5     | 11.5     | 11.5     |
| h1 [-]             | 0.5     | 0.8     | 0.85     | 0.85     | 0.85     |
| g <sub>1</sub> [-] | 0.05    | 0.05    | 0.05     | 0.05     | 0.05     |
| h <sub>2</sub> [-] | 0.1     | 0.1     | 0.1      | 0.1      | 0.1      |

Tabella 5. 11. Parametri  $\Gamma$ ,  $h_1$ ,  $g_1$  e  $h_2$  per modello CBC miscela 3 maturata in acqua.

|                    | M3_28_O | M3_60_0 | M3_120_0 | M3_240_O | M3_360_O |
|--------------------|---------|---------|----------|----------|----------|
| Γ[-]               | 10.3    | 11      | 11.4     | 11.4     | 11.6     |
| h <sub>1</sub> [-] | 0.5     | 0.52    | 0.54     | 0.54     | 0.55     |
| g <sub>1</sub> [-] | 0.05    | 0.05    | 0.05     | 0.05     | 0.05     |
| h <sub>2</sub> [-] | 0.1     | 0.1     | 0.1      | 0.1      | 0.1      |

Tabella 5. 12. Parametri  $\Gamma$ ,  $h_1$ ,  $g_1$  e  $h_2$  per modello CBC miscela 3 maturata nell'olio.


Figura 5. 12 Simulazione prova edometrica con modello CBC miscela 1: (a) 28 giorni acqua e (b) 360 giorni acqua



Figura 5. 13 Simulazione prova edometrica con modello CBC miscela 1: (a) 28 giorni olio (b) 360 giorni olio

145



Figura 5. 14 Simulazione prova triassiale CIU con modello CBC miscela 1 28 giorni acqua: (a) p'c=20 kPa; (b) p'c=100 kPa.



Figura 5. 15 Simulazione prova triassiale CIU con modello CBC miscela 1 28 giorni olio: (a)  $p'_c=20$  kPa; (b)  $p'_c=100$  kPa; (c)  $p'_c=300$  kPa.



Figura 5. 16 Simulazione prova triassiale CIU con modello CBC miscela 1 360 giorni acqua: (a) p'c=20 kPa; (b) p'c=100 kPa; (c) p'c=300 kPa. 148



Figura 5. 17 Simulazione prova triassiale CIU con modello CBC miscela 1 360 giorni olio: (a)  $p'_c=20 kPa$ ; (b)  $p'_c=100 kPa$ ; (c)  $p'_c=300 kPa$ .

Nella figura 5.18 è mostrato l'andamento della  $\Gamma$  in funzione del tempo di maturazione e si nota una tendenza alla crescita, più marcata nei primi 120 giorni per poi stabilizzarsi ai tempi successivi. Al crescere del rapporto cemento-bentonite il valore di  $\Gamma$  tende a ridursi: tale valore è influenzato dal tipo di fluido di maturazione per le miscele con i rapporti cemento-bentonite più bassi, particolarmente per miscela 1 (C/B=4) e in maniera minore per la miscela 2 (C/B=5). Invece, la miscela 3 (C/B=6) non è praticamente influenzata dal tipo di fluido di maturazione. Da notare come la miscela 2 maturata in olio abbia un comportamento molto simile alla miscela 3.



Figura 5. 18. Andamento del parametro  $\Gamma$  in funzione del tempo di maturazione.

Nella figura 5.19 è riportato l'andamento del parametro  $h_1$  in funzione del tempo. La miscela 1 maturata in olio mostra dei valori superiori rispetto a quella in acqua. Per entrambi i fluidi di maturazione si osserva un picco di  $h_1$  in corrispondenza dei 240 giorni. Per la miscela 2 maturata in acqua si segnalano valori inferiori nei primi 120 giorni rispetto a quella in olio, mentre per tempi successivi l'andamento è pressoché simile. La miscela 3 maturata in olio mostra un andamento di  $h_1$  quasi costante nel tempo e con valori inferiori rispetto a quella maturata in acqua. Nell'intervallo [120; 360] giorni, la miscela 1 maturata in acqua e la miscela 3 maturata in olio mostrano valori che si discostano maggiormente dagli altri. Considerando la sola maturazione in acqua,  $h_1$  cresce con il rapporto cemento bentonite, mentre se si considera la sola maturazione nell' olio,  $h_1$  è simile per la miscela 1 e la miscela 2, soprattutto dopo i 120 giorni. Invece, la miscela 3 in olio mostra valori inferiori rispetto alle altre due sempre in olio e maggiormente simili alla miscela 1 in acqua.



Figura 5. 19 Andamento di h<sub>1</sub> nel tempo.

## 6. Conclusioni

L'obiettivo del presente elaborato è stato quello di analizzare il comportamento idro-meccanico di tre miscele Cemento-Bentonite, utilizzate per la realizzazione di diaframmi plastici. La miscela 1 è caratterizzata da un rapporto Cemento-Bentonite pari a 4, la miscela 2 da un rapporto pari a 5 e la miscela 3 da un rapporto pari a 6. I provini sono stati fatti maturare, sia in bagno d'acqua che in bagno d'olio (paraffina), per tempi che vanno da un minimo di 28 a un massimo di 360 giorni, allo scopo di mostrare come il diverso contenuto di cemento, il contatto con un agente contaminante e il tempo di maturazione potessero influenzare in comportamento del materiale. È stata utilizzata della paraffina perché non è tossica e riproduce la presenza di un idrocarburo non polare.

Per ciascuna miscela è stata eseguita una misura della densità specifica delle particelle Gs a 28 giorni. Misure ripetute dopo 360 giorni non hanno mostrato variazioni rilevanti.

Sono state eseguite delle prove edometriche in cui ogni gradino di carico è stato interpretato con il metodo di Taylor ed è stato possibile ricavare i coefficienti di consolidazione verticale e il coefficiente di compressione edometrica, da cui in modo indiretto è stato possibile ricavare la permeabilità. L'indice dei vuoti inziale ha mostrato una riduzione al crescere del contenuto di cemento, mentre a parità di contenuto di cemento si è avuto un loro incremento nel tempo. Per tutte e tre le miscele c'è stata una traslazione della curva di compressione edometrica verso l'alto e verso destra con l'invecchiamento. I valori di tensione di preconsolidazione sono cresciuti con il rapporto Cemento-Bentonite, mentre il fluido di maturazione ha influenzato in modo evidente solo la miscela 1, che con la maturazione in olio ha avuto dei valori maggiori e simili alla miscela 2. L'indice di compressione Cc ha mostrato dei valori che si riducono al crescere del contenuto di cemento e una crescita con il tempo di maturazione. La conducibilità idraulica, come ci si aspettava, ha mostrato dei valori che si riducono con l'indice dei vuoti. A parità di composizione della miscela, si è rilevata una minima variazione della conducibilità idraulica nel tempo, come accaduto a Carreto et al. (2015), nonostante in questo caso studio si avessero tempi di maturazione superiori alle 12 settimane. È stato fatto un confronto della permeabilità alle tensioni verticali di 196 kPa e 784 kPa, ipotizzando dei carichi a cui potrebbe essere soggetto il diaframma nelle condizioni di esercizio. Per tali tensioni verticali non si è rilevata un'apprezzabile variazione della conducibilità idraulica nel tempo, aspetto in accordo con quanto illustrato da Royal et al. (2018), i quali segnalano un'indipendenza della conducibilità idraulica dall'invecchiamento per tempi maggiori di 14 giorni e carichi superiori a 100 kPa. Un aspetto da sottolineare è che materiale studiato da Royal et al. (2018) è una miscela ternaria costituita da cemento bentonite e scorie d'alto forno che ha mostrato una conducibilità idraulica con ordine di grandezza di 10<sup>-9</sup> [m/s], mentre quelle studiate in questa tesi sono delle miscele binarie costituite da Cemento e Bentonite che hanno mostrato una conducibilità idraulica di 10<sup>-8</sup> [m/s]. L'aggiunta di scorie d'alto forno crea quindi un beneficio, riducendo la conducibilità idraulica. La maturazione dei provini a contatto con l'idrocarburo o il contenuto di cemento non hanno mostrato grandi differenze delle caratteristiche di conducibilità idraulica nel materiale.

Sono state eseguite delle prove triassiali CIU con pressioni di confinamento di 20, 100 e 300 kPa. I campioni hanno evidenziato un incremento della tensione deviatorica con la pressione di

confinamento e con il tempo di maturazione. Ad un confinamento di 300 kPa le miscele hanno mostrato un comportamento rammollente ('softening'), mentre alle pressioni di confinamento minori (20 kPa e 100 kPa) la tensione deviatorica ha mostrato una crescita asintotica con la deformazione assiale. Le tre miscele hanno evidenziato un valore di angolo di resistenza al taglio che si riduce all'avanzare del tempo di maturazione (ad eccezione della miscela 1 maturata in acqua) e al crescere del contenuto di cemento, mentre la coesione ha mostrato valori che crescono con il contenuto di cemento e il tempo di maturazione. La coesione è stata maggiormente condizionata dal tipo di fluido di maturazione al tempo di 360 giorni.

A ogni invecchiamento, si sono realizzate prove triassiali non consolidate e non drenate (UU), in cui si è misurata anche la pressione interstiziale che ha permesso di tracciare i percorsi di carico efficace (ESP). Gli ESP sono poi stati confrontati con gli inviluppi di rottura ottenuti nelle prove CIU, mostrando come i percorsi di carico efficaci andassero oltre tali inviluppi, mostrando quindi una resistenza leggermente maggiore. Questo risultato è probabilmente dovuto alla dipendenza della resistenza dallo stato tensionale. Poiché le UU sono state eseguite a basse tensioni efficaci, i risultati suggeriscono la non linearità dell'inviluppo di rottura. È stata anche ricavata la resistenza non drenata  $C_u$ , i cui valori sono stati normalizzati rispetto alla tensione media efficace p'<sub>0</sub>, poiché le condizioni di partenza di ciascuna prova erano differenti. Tali valori hanno mostrato una crescita con il contenuto di cemento.

Il confronto tra i risultati delle prove edometriche ottenuti con un software per l'interpretazione automatizzata, in fase di realizzazione nel laboratorio di Geotecnica del Politecnico di Torino, e quelle effettuate in precedenza in modo tradizionale, ha mostrato una perfetta coincidenza tra le curve di compressione edometrica ottenute. I valori di conducibilità non sono del tutto identici, ma hanno dei valori confrontabili tra loro, così come i valori degli indici di compressione  $C_c$  e di rigonfiamento  $C_s$ . I valori di tensione di preconsolidazione ottenuti hanno valori diversi per la differente metodologia con cui sono stati ricavati.

I risultati delle prove edometriche e triassiali CIU sono stati simulati con due modelli elastoplastici incrudenti: il Cam Clay modificato (MCCM, Roscoe & Burland, 1968), formulato in origine per le argille e un modello sviluppato appositamente per le miscele Cemento-Bentonite (CBC, Flessati et al., 2020). Il modello MCCM e il modello CBC hanno mostrato una buona riproduzione delle prove edometriche. Nella simulazione delle prove triassiali CIU, il modello MCCM non è stato in grado di simulare il comportamento rammollente del materiale alla pressione di confinamento di 300 kPa, aspetto riprodotto dal modello CBC. Entrambi i modelli, poiché condividono la stessa superficie di snervamento, hanno avuto la tendenza a sovrastimare la resistenza del materiale alla pressione di 20 kPa. Nello studio condotto da Flessati et al. (2020) sono state utilizzate le tre composizioni delle miscele di Tarzia (2019) con rapporto Cemento-Bentonite rispettivamente di 4, 5 e 6 e maturate per 28 giorni in acqua. In tale studio i parametri h<sub>1</sub>, h<sub>2</sub> e g<sub>1</sub> del modello CBC sono stati assunti costanti indipendentemente dal rapporto Cemento-Bentonite. Le tre miscele utilizzate nei casi studiati in questa tesi, pur avendo lo stesso rapporto Cemento-Bentonite della miscela di Tarzia (2019), sono state realizzate con una differente tipologia di bentonite. Sono stati usati gli stessi valori di h<sub>2</sub> e g<sub>1</sub> utilizzati da Flessati et al. (2020), assunti costati anche per tempi di maturazione differenti da 28 giorni. Ciò non è accaduto con il parametro h<sub>1</sub>, che è stato assunto differente per tutte e tre le miscele e con variazioni legate al tempo di maturazione, soprattutto nei primi 120 giorni.

## Appendice



Appendice, Figura 1 Percorso dei carichi prova TX UU miscela 1 28 giorni olio



Appendice, Figura 2 Percorso dei carichi prova TX UU miscela 1 360 giorni acqua



Appendice, Figura 3 Percorso dei carichi prova TX UU miscela 1 360 giorni olio



Appendice, Figura 4 Percorso dei carichi prova TX UU miscela 2 28 giorni olio



Appendice, Figura 5 Percorso dei carichi prova TX UU miscela 2 360 giorni acqua



Appendice, Figura 6 Percorso dei carichi prova TX UU miscela 2 360 giorni olio



Appendice, Figura 7 Percorso dei carichi prova TX UU miscela 3 28 giorni olio



Appendice, Figura 8 Percorso dei carichi prova TX UU miscela 3 360 giorni acqua



Appendice, Figura 9 Confronto delle curve di compressione edometrica per la miscela 2 maturata in acqua per 240 giorni



Appendice, Figura 10 Confronto del coefficiente di consolidazione  $c_v$  per la miscela 2 maturata in acqua per 240 giorni



Appendice, Figura 11 Confronto della conducibilità idraulica per la miscela 2 maturata in acqua per 240 giorni



Appendice, Figura 12 Confronto delle curve di compressione edometrica per la miscela 2 maturata in olio per 240 giorni



Appendice, Figura 13 Confronto del coefficiente di consolidazione cy per la miscela 2 maturata in olio per 240 giorni



Appendice, Figura 14 Confronto della conducibilità idraulica per la miscela 2 maturata in olio per 240 giorni



Appendice, Figura 15 Confronto delle curve di compressione edometrica per la miscela 1 maturata in olio per 360 giorni



Appendice, Figura 16 Confronto del coefficiente di consolidazione c<sub>v</sub> per la miscela 1 maturata in olio per 360 giorni



Appendice, Figura 17 Confronto della conducibilità idraulica per la miscela 1 maturata in olio per 360 giorni



Appendice, Figura 18 Confronto delle curve di compressione edometrica per la miscela 2 maturata in olio per 360 giorni



Appendice, Figura 19 Confronto del coefficiente di consolidazione c<sub>v</sub> per la miscela 2 maturata in olio per 360 giorni



Appendice, Figura 20 Confronto della conducibilità idraulica per la miscela 2 maturata in olio per 360 giorni



Appendice, Figura 21 Confronto delle curve di compressione edometrica per la miscela 3 maturata in olio per 360 giorni



Appendice, Figura 22 Confronto del coefficiente di consolidazione c<sub>v</sub> per la miscela 3 maturata in olio per 360 giorni



Appendice, Figura 23 Confronto della conducibilità idraulica per la miscela 3 maturata in olio per 360 giorni



Appendice, Figura 24 Simulazione prova edometrica con Cam Clay modificato miscela 1 60 giorni in acqua



Appendice, Figura 25 Simulazione prova edometrica con Cam Clay modificato miscela 1 120 giorni in acqua



Appendice, Figura 26 Simulazione prova edometrica con Cam Clay modificato miscela 1 240 giorni in acqua



Appendice, Figura 27 Simulazione prova edometrica con Cam Clay modificato miscela 1 60 giorni in olio



Appendice, Figura 28 Simulazione prova edometrica con Cam Clay modificato miscela 1 120 giorni in olio



Appendice, Figura 29 Simulazione prova edometrica con Cam Clay modificato miscela 1 240 giorni in olio



Appendice, Figura 30 Simulazione prova edometrica con Cam Clay modificato miscela 2 28 giorni in acqua



Appendice, Figura 31 Simulazione prova edometrica con Cam Clay modificato miscela 2 60 giorni in acqua



Appendice, Figura 32 Simulazione prova edometrica con Cam Clay modificato miscela 2 120 giorni in acqua



Appendice, Figura 33 Simulazione prova edometrica con Cam Clay modificato miscela 2 240 giorni in acqua



Appendice, Figura 34 Simulazione prova edometrica con Cam Clay modificato miscela 2 360 giorni in acqua



Appendice, Figura 35. Simulazione prova triassiale CIU con Cam Clay modificato miscela 2 28 giorni acqua (p'c=20 kPa)



Appendice, Figura 36 Simulazione prova triassiale CIU con Cam Clay modificato miscela 2 28 giorni acqua (p'c=100 kPa)



Appendice, Figura 37 Simulazione prova triassiale CIU con Cam Clay modificato miscela 2 28 giorni acqua (p'c=300 kPa)



Appendice, Figura 38 Simulazione prova triassiale CIU con Cam Clay modificato miscela 2 360 giorni acqua (p'c=20 kPa)



Appendice, Figura 39 Simulazione prova triassiale CIU con Cam Clay modificato miscela 2 360 giorni acqua (p'c=100 kPa)



Appendice, Figura 40 Simulazione prova triassiale CIU con Cam Clay modificato miscela 2 360 giorni acqua (p'c=300 kPa)



Appendice, Figura 41 Simulazione prova edometrica con Cam Clay modificato miscela 2 28 giorni in olio



Appendice, Figura 42 Simulazione prova edometrica con Cam Clay modificato miscela 2 60 giorni in olio



Appendice, Figura 43 Simulazione prova edometrica con Cam Clay modificato miscela 2 120 giorni in olio


Appendice, Figura 44 Simulazione prova edometrica con Cam Clay modificato miscela 2 240 giorni in olio



Appendice, Figura 45 Simulazione prova edometrica con Cam Clay modificato miscela 2 360 giorni in olio



Appendice, Figura 46 Simulazione prova triassiale CIU con Cam Clay modificato miscela 2 28 giorni in olio (p'c=20 kPa)



Appendice, Figura 47 Simulazione prova triassiale CIU con Cam Clay modificato miscela 2 28 giorni in olio (p'c=100 kPa)



Appendice, Figura 48 Simulazione prova triassiale CIU con Cam Clay modificato miscela 2 28 giorni in olio (p'c=300 kPa)



Appendice, Figura 49 Simulazione prova triassiale CIU con Cam Clay modificato miscela 2 360 giorni in olio (p'c=20 kPa)



Appendice, Figura 50 Simulazione prova triassiale CIU con Cam Clay modificato miscela 2 360 giorni in olio (p'c=100)



Appendice, Figura 51 Simulazione prova triassiale CIU con Cam Clay modificato miscela 2 360 giorni in olio (p'c=300)



Appendice, Figura 52 Simulazione prova edometrica con Cam Clay modificato miscela 3 28 giorni in acqua



Appendice, Figura 53 Simulazione prova edometrica con Cam Clay modificato miscela 3 60 giorni in acqua



Appendice, Figura 54 Simulazione prova edometrica con Cam Clay modificato miscela 3 120 giorni in acqua



Appendice, Figura 55 Simulazione prova edometrica con Cam Clay modificato miscela 3 240 giorni in acqua



Appendice, Figura 56 Simulazione prova edometrica con Cam Clay modificato miscela 3 360 giorni in acqua



Appendice, Figura 57 Simulazione prova triassiale CIU con Cam Clay modificato miscela 3 28 giorni in acqua (p'c=20 kPa)



Appendice, Figura 58 Simulazione prova triassiale CIU con Cam Clay modificato miscela 3 28 giorni in acqua (p'c=100 kPa)



Appendice, Figura 59 Simulazione prova triassiale CIU con Cam Clay modificato miscela 3 28 giorni in acqua (p'c=300 kPa)



Appendice, Figura 60 Simulazione prova triassiale CIU con Cam Clay modificato miscela 3 360 giorni in acqua (p'c=20kPa)



Appendice, Figura 61 Simulazione prova triassiale CIU con Cam Clay modificato miscela 3 360 giorni in acqua (p'c=100kPa)



Appendice, Figura 62 Simulazione prova triassiale CIU con Cam Clay modificato miscela 3 360 giorni in acqua (p'c=300kPa)



Appendice, Figura 63 Simulazione prova edometrica con Cam Clay modificato miscela 3 28 giorni in olio



Appendice, Figura 64 Simulazione prova edometrica con Cam Clay modificato miscela 3 60 giorni in olio



Appendice, Figura 65 Simulazione prova edometrica con Cam Clay modificato miscela 3 120 giorni in olio



Appendice, Figura 66 Simulazione prova edometrica con Cam Clay modificato miscela 3 240 giorni in olio



Appendice, Figura 67 Simulazione prova edometrica con Cam Clay modificato miscela 3 360 giorni in olio



Appendice, Figura 68 Simulazione prova triassiale CIU con Cam Clay modificato miscela 3 28 giorni in olio (p'c=20kPa)



Appendice, Figura 69 Simulazione prova triassiale CIU con Cam Clay modificato miscela 3 28 giorni in olio (p'c=100kPa)



Appendice, Figura 70 Simulazione prova triassiale CIU con Cam Clay modificato miscela 3 28 giorni in olio (p'c=300kPa)



Appendice, Figura 71 Simulazione prova triassiale CIU con Cam Clay modificato miscela 3 360 giorni in olio (p'c=20kPa)



Appendice, Figura 72 Simulazione prova triassiale CIU con Cam Clay modificato miscela 3 360 giorni in olio (p'c=100kPa)



Appendice, Figura 73 Simulazione prova triassiale CIU con Cam Clay modificato miscela 3 360 giorni in olio (p'c=300kPa)



Appendice, Figura 74 Simulazione prova edometrica con modello CBC miscela 1 60 giorni in acqua



Appendice, Figura 75 Simulazione prova edometrica con modello CBC miscela 1 120 giorni in acqua



Appendice, Figura 76 Simulazione prova edometrica con modello CBC miscela 1 240 giorni in acqua



Appendice, Figura 77 Simulazione prova edometrica con modello CBC miscela 1 60 giorni in olio



Appendice, Figura 78 Simulazione prova edometrica con modello CBC miscela 1 120 giorni in olio



Appendice, Figura 79 Simulazione prova edometrica con modello CBC miscela 1 240 giorni in olio



Appendice, Figura 80 Simulazione prova edometrica con modello CBC miscela 2 28 giorni in acqua



Appendice, Figura 81 Simulazione prova edometrica con modello CBC miscela 2 60 giorni in acqua



Appendice, Figura 82 Simulazione prova edometrica con modello CBC miscela 2 120 giorni in acqua



Appendice, Figura 83 Simulazione prova edometrica con modello CBC miscela 2 240 giorni in acqua



Appendice, Figura 84 Simulazione prova edometrica con modello CBC miscela 2 360 giorni in acqua



Appendice, Figura 85 Simulazione prova triassiale CIU con modello CBC miscela 2 28 giorni acqua (p'c=20kPa)



Appendice, Figura 86 Simulazione prova triassiale CIU con modello CBC miscela 2 28 giorni acqua (p'c=100kPa)



Appendice, Figura 87 Simulazione prova triassiale CIU con modello CBC miscela 2 28 giorni acqua (p'c=300kPa)



Appendice, Figura 88 Simulazione prova triassiale CIU con modello CBC miscela 2 360 giorni acqua (p'c=20kPa)



Appendice, Figura 89 Simulazione prova triassiale CIU con modello CBC miscela 2 360 giorni acqua (p'c=100kPa)



Appendice, Figura 90 Simulazione prova triassiale CIU con modello CBC miscela 2 360 giorni acqua (p'c=300kPa)



Appendice, Figura 91 Simulazione prova edometrica con modello CBC miscela 2 28 giorni in olio



Appendice, Figura 92 Simulazione prova edometrica con modello CBC miscela 2 60 giorni in olio



Appendice, Figura 93 Simulazione prova edometrica con modello CBC miscela 2 120 giorni in olio



Appendice, Figura 94 Simulazione prova edometrica con modello CBC miscela 2 240 giorni in olio



Appendice, Figura 95 Simulazione prova edometrica con modello CBC miscela 2 360 giorni in olio



Appendice, Figura 96 Simulazione prova triassiale CIU con modello CBC miscela 2 28 giorni olio (p'c=20kPa)


Appendice, Figura 97 Simulazione prova triassiale CIU con modello CBC miscela 2 28 giorni olio (p'c=100kPa)



Appendice, Figura 98 Simulazione prova triassiale CIU con modello CBC miscela 2 28 giorni olio (p'c=300kPa)



Appendice, Figura 99 Simulazione prova triassiale CIU con modello CBC miscela 2 360 giorni olio (p'c=20kPa)



Appendice, Figura 100 Simulazione prova triassiale CIU con modello CBC miscela 2 360 giorni olio (p'c=100kPa)



Appendice, Figura 101 Simulazione prova triassiale CIU con modello CBC miscela 2 360 giorni olio (p'c=300kPa)



Appendice, Figura 102 Simulazione prova edometrica con modello CBC miscela 3 28 giorni in acqua



Appendice, Figura 103 Simulazione prova edometrica con modello CBC miscela 3 60 giorni in acqua



Appendice, Figura 104 Simulazione prova edometrica con modello CBC miscela 3 120 giorni in acqua



Appendice, Figura 105 Simulazione prova edometrica con modello CBC miscela 3 240 giorni in acqua



Appendice, Figura 106 Simulazione prova edometrica con modello CBC miscela 3 360 giorni in acqua



Appendice, Figura 107 Simulazione prova triassiale CIU con modello CBC miscela 3 28 giorni in acqua (p'c=20kPa)



Appendice, Figura 108 Simulazione prova triassiale CIU con modello CBC miscela 3 28 giorni in acqua (p'c=100kPa)



Appendice, Figura 109 Simulazione prova triassiale CIU con modello CBC miscela 3 28 giorni in acqua (p'c=300kPa)



Appendice, Figura 110 Simulazione prova triassiale CIU con modello CBC miscela 3 360 giorni in acqua (p'c=20kPa)



Appendice, Figura 111 Simulazione prova triassiale CIU con modello CBC miscela 3 360 giorni in acqua (p'c=100kPa)



Appendice, Figura 112 Simulazione prova triassiale CIU con modello CBC miscela 3 360 giorni in acqua (p'c=300kPa)



Appendice, Figura 113 Simulazione prova edometrica con modello CBC miscela 3 28 giorni in olio



Appendice, Figura 114 Simulazione prova edometrica con modello CBC miscela 3 60 giorni in olio



Appendice, Figura 115 Simulazione prova edometrica con modello CBC miscela 3 120 giorni in olio



Appendice, Figura 116 Simulazione prova edometrica con modello CBC miscela 3 240 giorni in olio



Appendice, Figura 117 Simulazione prova edometrica con modello CBC miscela 3 360 giorni in olio



Appendice, Figura 118 Simulazione prova triassiale CIU con modello CBC miscela 3 28 giorni in olio (p'c=20kPa)



Appendice, Figura 119 Simulazione prova triassiale CIU con modello CBC miscela 3 28 giorni in olio (p'c=100kPa)



Appendice, Figura 120 Simulazione prova triassiale CIU con modello CBC miscela 3 28 giorni in olio (p'c=300kPa)



Appendice, Figura 121 Simulazione prova triassiale CIU con modello CBC miscela 3 360 giorni in olio (p'c=20kPa)



Appendice, Figura 122 Simulazione prova triassiale CIU con modello CBC miscela 3 360 giorni in olio (p'c=100kPa)



Appendice, Figura 123 Simulazione prova triassiale CIU con modello CBC miscela 3 360 giorni in olio (p'c=300kPa)

## **Bibliografia**

Bardet J. P. and Choucair (1991) W. "A linearized integration technique for incremental constitutive equations." in *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics* v.15.

Carreto J. M. R., Caldeira L. M. M. S. and Neves E. J. L. M. (2015) "Hydromechanical characterization of Cement-Bentonite slurries in the context of cutoff wall applications." in *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering* 2016, 28(2): 04015093 pp.1-13

De Paoli V., Marcellino P., Mascardi C., and Paviani A. (1991) "Le applicazioni dei diaframmi nella difesa naturale." In XV CICLO Conferenze di Geotecnica di Torino - "La ingegneria geotecnica nella salvaguardia e recupero del territorio".

Evans J. and Opdyke S. (2006) "Strength, permeability, and compatibility of slag-Cement-Bentonite slurry wall mixtures for constructing vertical barriers" in 5th ICEG Environmental Geotechnics: Opportunities, Challenges and Responsibilities for Environmental Geotechnics: Proceedings of the ISSMGE's fifth international congress organized by the Geoenvironmental Research Centre, Cardiff University and held at Cardiff City Hall on 26–30th June 2006 Thomas Telford Publishing, pp. 118-125.

Fratalocchi E., Pasqualini E., Balboni P. and Thomas H.R. (2005) "Performance of a cementbentonite cut-off wall in an acidic sulphate environment" in 5th ICEG Environmental Geotechnics: Opportunities, Challenges and Responsibilities for Environmental Geotechnics: Proceedings of the ISSMGE's fifth international congress organized by the Geoenvironmental Research Centre, Cardiff University and held at Cardiff City Hall on 26–30th June 2006, Thomas Telford Publishing, pp. 133-139.

Flessati L., Della Vecchia G. and Musso G. (2020) "Mechanical behavior and costitutive modelling of Cement-Bentonite mixtures for cutoff walls" in *ASCE*, *Journal of Materials in Civil Engineering 2021*, 33(3): 04020483 pp.1-12.

Lancellotta R. (2012) "Geotecnica", 4 ed., Zanichelli.

Muir Wood D. (2004) "Geotechnical modelling", 1 ed., Routledge, pp.133-166.

Nova R. (2002) "Fondamenti di meccanica delle terre", McGraw-Hill Education pp.218-297

Roscoe K. H. and Burland J. B. (1968)."On the generalized stress-strain behaviour of 'wet clay'." Engineering plasticity (eds J. Heyman and F. A.Leckie), pp.535–609.Cambridge University Press.

Royal A. C. D., Opukumo A. W., Qadar C. S., Perkins L. M. and Walenna M. A. (2018) "Deformation and compression behaviour of a cement–bentonite slurry for groundwater control applications" in *Springer, Geotechnical and Geological Engineering 36*, pp.835-853

Tarzia S. (2019) "Comportamento idraulico delle miscele cemento bentonite", Tesi di Laurea Magistrale, DISEG, Politecnico di Torino.

Zibisco A. (2019) "Messa in sicurezza permanente di siti contaminati da idrocarburi leggeri: studio del processo di desaturazione di miscele cemento-bentonite tramite tecnica ERT", Tesi di Laurea Magistrale, DISEG, Politecnico di Torino.

## Ringraziamenti

Vorrei spendere alcune parole per rivolgere un ringraziamento a tutte le persone che mi sono state vicine lungo questo percorso.

Vorrei ringraziare il relatore prof. Guido Musso che è riuscito a fornirmi tutto il supporto necessario alla stesura dell'elaborato, nonostante le problematiche e le difficoltà dovute alla pandemia. Un particolare ringraziamento va anche all'Ing. Luca Flessati (Politecnico di Milano) e all'Ing. Paolo Rapino.

Ai miei genitori che mi hanno sempre supportato e soprattutto "sopportato" nelle mie scelte.

Ai miei nonni per il loro costante e incondizionato supporto. In particolare, mio nonno che ha sempre creduto nel percorso scelto e mi ha sempre spronato ad andare avanti.

Agli amici di sempre, per tutti i bei momenti passati e per quelli che passeremo ancora insieme. Loro che nei periodi di lontananza hanno sempre cercato e trovato il modo per far sentire la loro presenza e alleviare la malinconia di "casa".

Ai miei coinquilini di "Casa Serena", con i quali ho condiviso le difficoltà e le gioie di questo percorso e passato dei momenti che resteranno indimenticabili.