

POLITECNICO DI TORINO



Collegio di Ingegneria Civile

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

# **Comportamento idraulico delle miscele cemento bentonite**

**Relatore**

Prof. Guido Musso

**Candidato**

Simone Tarzia

Aprile 2019



## Sommario

Indice delle figure .....	7
Indice appendice delle figure .....	12
1. Introduzione .....	15
1.1 Diaframmi verticali cemento-bentonite.....	17
1.2 Tipologia costruttiva bifase .....	18
2. Prestazioni idrauliche e meccaniche delle miscele cemento bentonite: stato dell'arte.....	21
2.1 Evans e Opdyke (2005) .....	22
2.1.1 Materiali .....	22
2.1.2 Procedure .....	23
2.1.3 Risultati.....	24
2.1.3.1 Prove di conducibilità .....	24
2.1.3.2 Prove di compressione monoassiale .....	25
2.2 Carreto et al. (2015) .....	27
2.2.1 Materiali .....	27
2.2.2 Procedure .....	28
2.2.3 Risultati.....	29
2.2.3.1 Compressione isotropa.....	29
2.2.3.2 Effetto del tempo di maturazione .....	30
2.2.3.3 Effetto della composizione .....	31
2.2.3.4 Risultati prove triassiali .....	32
2.2.3.4.1 Campioni consolidati con una tensione efficace minore di quella di snervamento .....	33
2.2.3.4.2 Campioni consolidati ad una tensione efficace maggiore di quella di snervamento.....	34
2.2.3.5 Risultati prove di conducibilità .....	36
2.3 Fratolocchi et al. (2005).....	38
2.3.1 Materiali .....	38
2.3.2 Procedure .....	38
2.3.3 Risultati.....	39
2.4 Garvin and Hayes (1999) .....	40
2.4.1 Materiali .....	40
2.4.2 Procedure di preparazione della miscela .....	41
2.4.3 Prove.....	41
2.4.3.1 Prova di immersione.....	42
2.4.3.2 Attacco chimico su campione confinato .....	43
2.4.4 Risultati.....	44
2.5 Joshi et al. (2010).....	47

2.5.1	Materiali .....	47
2.5.2	Prove di laboratorio.....	48
2.5.3	Prove in sito .....	48
2.5.3.1	CPTU .....	48
2.5.3.2	Packer Test .....	49
2.5.3.3	SBT .....	50
2.6	Soga et al. (2013).....	54
2.6.1	Materiali .....	54
2.6.2	Conducibilità idraulica .....	54
2.6.2.1	Prove di laboratorio.....	54
2.6.2.2	Prove in sito .....	56
2.6.3	Durabilità .....	57
2.6.3.1	Effetti chimici.....	57
2.6.3.2	Cicli di essiccazione e saturazione .....	58
2.6.4	Comportamento meccanico .....	58
2.6.4.1	Prove triassiali in condizioni drenate .....	59
2.6.4.2	Prove triassiali non drenate.....	61
2.6.4.3	UCS.....	63
2.6.4.4	Resistenza a trazione .....	64
2.7	Pasqualini e Fratalocchi (2000).....	65
2.7.1	Materiali .....	65
2.7.2	Conducibilità idraulica .....	65
2.7.3	Compatibilità chimica .....	67
2.8	Opdyke and Evans (2006) .....	69
2.8.1	Materiali .....	69
2.8.2	Procedure .....	69
2.8.3	Risultati.....	70
2.8.3.1	Conducibilità idraulica .....	70
2.8.3.2	Compressione monoassiale.....	71
2.8.3.3	Prova edometrica .....	73
2.9	Royal (2018).....	75
2.9.1	Materiali .....	75
2.9.2	Procedure .....	75
2.9.3	Prove Triassiali ed UCS.....	76
2.9.4	Prove Edometriche .....	79
2.9.4.1	Compressibilità .....	79

2.9.4.2	Conducibilità idraulica .....	80
2.10	Veràstegui et al. (2013) .....	81
2.10.1	Materiali .....	81
2.10.2	Procedure .....	81
2.10.3	Risultati .....	83
2.10.3.1	Modulo di taglio a piccole deformazioni .....	83
2.10.3.2	Conducibilità idraulica .....	84
2.11	Analisi stato dell'arte .....	85
2.11.1	Proprietà meccaniche .....	85
2.11.1.1	Materiali .....	85
2.11.1.2	Prove triassiali non drenate ed UCS .....	86
2.11.1.3	Prove edometriche .....	89
2.11.2	Proprietà idrauliche .....	91
2.11.2.1	Materiali .....	91
2.11.2.2	Prove di conducibilità .....	92
3.	Attrezzatura di laboratorio e metodi sperimentali .....	96
3.1	Prova di compressione Triassiale .....	96
3.1.1	Prove triassiali consolidate: modalità d'esecuzione .....	96
3.1.1.1	Saturazione .....	99
3.1.1.2	Consolidazione .....	99
3.1.1.3	Rottura .....	100
3.1.2	Elaborazione dei risultati .....	101
3.2	Prove edometriche .....	105
3.2.1	Descrizione dell'apparecchiatura .....	105
3.2.2	Procedura di prova .....	106
3.2.3	Elaborazione dei risultati .....	107
3.2.3.1	Coefficiente di consolidazione e conducibilità idraulica .....	107
3.2.3.2	Curva di compressibilità .....	108
3.2.3.3	Indice dei vuoti (e) .....	109
3.3	Prove mediante permeametri .....	110
3.3.1	Permeometro a pareti rigide .....	110
3.3.2	Permeometro a pareti flessibili .....	111
3.3.3	Fasi di prova .....	113
3.3.3.1	Saturazione .....	113
3.3.3.2	Consolidazione .....	113
3.3.3.3	Prova .....	113

3.3.4 Elaborazione dei dati .....	113
4. Modalità di preparazione dei campioni cemento/bentonite studiati.....	115
4.1 Moduli di contenimento per la maturazione dei campioni.....	115
4.1.1 Formina per la prova triassiale .....	116
4.1.2 Formina per la prova di conducibilità.....	119
4.1.3 Formina per la prova edometrica .....	121
4.2 Preparazione delle miscele e fase di colata.....	123
4.2.1 Idratazione della bentonite .....	124
4.2.2 Aggiunta del cemento.....	125
4.2.3 Colata negli stampi .....	125
4.3 Maturazione della miscela.....	127
4.4 Studio preliminare delle miscele .....	128
4.4.1 Miscela CB-5-0 .....	128
4.4.2 Miscela CB-4-0 .....	133
4.4.3 Miscela CB-6-0 .....	134
4.4.4. Confronto fra le miscele .....	135
5. Comportamento meccanico dei campioni di miscela cemento/bentonite.....	137
5.1 Montaggio prova triassiale .....	137
5.2.1 Esecuzione prova triassiale.....	140
5.3 Risultati prove triassiali: .....	141
5.3.1 Risultati della miscela CB-5-0 .....	141
5.3.2 Risultati della miscela CB-4-0: .....	148
5.3.3 Risultati della miscela CB-6-0: .....	154
5.4 Analisi dei risultati e confronto con i dati presenti in letteratura .....	161
6. Comportamento sotto carichi edometrici e conducibilità idraulica.....	167
6.1 Prove in permeametro a parete rigida .....	167
6.2 Prove in permeametro a parete flessibile .....	170
6.3 Prove edometriche .....	173
6.4 Prove triassiali.....	177
6.5 Confronto dei risultati ottenuti .....	178
7. Analisi mediante il microscopio elettronico, SEM, e maturazione in olio di paraffina.....	183
7.1 Analisi mediante SEM .....	183
7.2 Maturazione in olio di paraffina .....	183
8. Conclusioni .....	185
Appendice figure .....	187
BIBLIOGRAFIA: .....	221

## Indice delle figure

Figura 1 Sezione verticale di un sistema di isolamento completo (Daniel & Bowders, 1994). .....	15
Figura 2 Sezione della fase di stabilizzazione di uno scavo verticale .....	18
Figura 3 Sezione della fase di sostituzione dei fanghi bentonitici.....	19
Figura 4 Sezione della fase finale della procedura di messa in opera bifase. ....	20
Figura 5. Influenza della percentuale di rimpiazzo di scorie nella miscela (Evans e Opdyke, 2005).....	24
Figura 6. Andamento conducibilità idraulica in funzione della maturazione (Evans e Opdyke, 2005).....	25
Figura 7. Prove di compressione non confinate per campioni avente maturazione di un mese (Evans e Opdyke, 2005) .....	26
Figura 8. Campione dopo la consolidazione mediante una pressione di 854 KPa (Carreto et al., 2015).....	28
Figura 9. Prove di compressione (Carreto et al., 2015).....	30
Figura 10. Prove di compressibilità (Carreto et al., 2015).....	31
Figura 11. Andamento prove triassiali (Carreto et al., 2015).....	33
Figura 12. Andamento prove triassiali (Carreto et al., 2015).....	34
Figura 13. Prove triassiali su campioni consolidati a tensioni elevate (Carreto et al., 2015).....	35
Figura 14. Risultati della prova triassiale su $q/p' - p'/p'c$ (Carreto et al., 2015).....	35
Figura 15. Valutazione conducibilità idraulica al variare del carico e del tempo (Carreto et al., 2015). .....	36
Figura 16. Andamento della conducibilità per differenti liquidi di permeazione (Fratolocchi et al., 2005). .	39
Figura 17. Campione soggetto alla prova d'immersione (Fratolocchi et al., 2005).....	42
Figura 18. Attacco chimico su campione confinato, schema di prova (Fratolocchi et al., 2005). .....	43
Figura 19. Soluzioni utilizzate (Fratolocchi et al., 2005). .....	44
Figura 20. Campioni sottoposti all'attacco chimico con campione confinato (Fratolocchi et al., 2005). .....	45
Figura 21. Riscontro delle fibre di ettringite mediante SEM (Fratolocchi et al., 2005). .....	46
Figura 22. Procedura di prova mediante Packer test (Joshi et al., 2010).....	49
Figura 23. Risultato delle prove di laboratorio effettuate a diverse stagionature (Joshi et al., 2010). .....	50
Figura 24. Variazione di conducibilità idraulica in funzione della profondità per Block field invecchiati 11 anni (Joshi et al., 2010).....	51
Figura 25. Campione soggetto ad attacco chimico da solfati (Joshi et al., 2010). .....	52
Figura 26. (a) Prove Packer Test, (b) prove Packer Test confrontate con le prove SBT (Joshi et al., 2010)....	53
Figura 27. Sostituzione mediante scorie per campioni aventi 28 giorni di maturazione (Evans e Opdyke, 2005).....	55
Figura 28. Andamento della conducibilità idraulica in funzione della maturazione (Evans e Opdyke, 2005). 55	
Figura 29. Dissipazioni delle sovrappressioni in funzione della profondità di prova (Soga et al., 2013). .....	56
Figura 30. Conducibilità a lungo termine mediante permeazione di anilina (Soga et al., 2013). .....	57
Figura 31. Conducibilità idraulica prima e dopo i cicli di saturazione-essiccazione (Soga et al., 2013). .....	58
Figura 32. Prova triassiale drenata con invecchiamento del campione pari a 35 giorni (Soga et al., 2013)...	59
Figura 33. Prova triassiale drenata con invecchiamento del campione pari a 90 giorni (Soga et al., 2013)...	60
Figura 34. Prova triassiale drenata con invecchiamento del campione pari a 4,25 anni (Soga et al., 2013)..	60
Figura 35. $p'$ -deformazione volumetrica per confinamento radiale di 100KPa (Soga et al., 2013). .....	61
Figura 36. Pressione interstiziale- deformazione assiale per campioni maturati 3,25 anni (Soga et al., 2013). .....	62
Figura 37. Prove triassiali non drenate su campioni invecchiati 3,25 anni. (Soga et al., 2013). .....	62
Figura 38. Aumento di resistenza del materiale al crescere dell'invecchiamento (Soga et al., 2013).....	63
Figura 39. Andamento della resistenza in funzione della maturazione del materiale (Soga et al., 2013).....	63
Figura 40. Andamento prova brasiliana (Soga et al., 2013). .....	64

Figura 41. Riduzione della conducibilità nel tempo per una tipica miscela ternaria (Opdyke and Evans, 2006).	66
Figura 42. Andamento della conducibilità idraulica dovuta alla variazione di bentonite in miscela (Pasqualini and Fratolocchi,2000).	66
Figura 43. Andamento della conducibilità idraulica dovuta alla variazione di cemento in miscela (Pasqualini and Fratolocchi,2000).	67
Figura 44. Conducibilità in funzione dell'ambiente di maturazione (Pasqualini and Fratolocchi,2000).	68
Figura 45. Conducibilità idraulica per campioni con periodo di maturazione pari ad un mese (Opdyke and Evans, 2006).	70
Figura 46. Andamento della conducibilità nel tempo per campioni contenenti il 20% di cemento (Opdyke and Evans, 2006).	71
Figura 47. Compressione monoassiale per campioni maturati per un mese (Opdyke and Evans, 2006).	72
Figura 48. Influenza della percentuale di rimpiazzo sulla deformazione a rottura (Opdyke and Evans, 2006).	72
Figura 49. Consolidazione per un campione invecchiato quindici mesi (Opdyke and Evans, 2006).	73
Figura 50. Curva di consolidazione (Opdyke and Evans, 2006).	74
Figura 51. Resistenza media dei campioni in funzione del confinamento radiale (Royal 2018).	76
Figura 52. Deformazioni assiali medie a rottura (Royal 2018).	77
Figura 53. Andamento prove UCS e triassiali su campioni aventi un tempo di maturazione di 28 giorni (Royal 2018).	77
Figura 54. Rottura per taglio di un campione (Royal 2018).	78
Figura 55. Prove di compressione su campioni invecchiati 90 giorni (Royal 2018).	78
Figura 56. Prova edometrica su campione invecchiato 28 giorni (Royal 2018).	79
Figura 57. Curve di consolidamento di un campione invecchiato 28 giorni (Royal 2018).	80
Figura 58. Andamento della conducibilità idraulica in funzione dell'invecchiamento e dei carichi subiti (Royal 2018).	80
Figura 59. Strumentazione di prova (Veràstegui et al., 2013).	82
Figura 60. Andamento del G <sub>0</sub> nel materiale permeato dall'acqua o dalla miscela a base di solfati (Veràstegui et al., 2013).	83
Figura 61. Andamento conducibilità idraulica (Veràstegui et al., 2013).	84
Figura 62. Andamento della tensione di snervamento in miscele cemento-bentonite.	86
Figura 63. Andamento della tensione di snervamento in miscele cemento-bentonite-scorie d'altoforno.	87
Figura 64. Variazione della tensione di snervamento in funzione del confinamento.	87
Figura 65. Valori di picco dello sforzo deviatorico Prove triassiali non drenate con confinamento di 100KPa.	88
Figura 66. Prove edometriche su campioni costituiti da bentonite e cemento.	89
Figura 67. Prove edometriche su campioni costituiti da bentonite, cemento e ggbs.	90
Figura 68. Confronto tra miscele cemento-bentonite e cemento-bentonite-ggbs.	90
Figura 69. Conducibilità in funzione del confinamento per miscele cemento-bentonite, in scala logaritmica.	92
Figura 70. Andamento della conducibilità in funzione del rapporto Cemento/Bentonite, in scala logaritmica.	93
Figura 71. Conducibilità idraulica in funzione della tensione di consolidazione per campioni contenenti scorie d'altoforno, in scala logaritmica.	94
Figura 72. Andamento della conducibilità idraulica per miscele aventi sostituzione di scorie d'altoforno, per una tensione di consolidazione di 100KPa.	94
Figura 73. Confronto delle miscele analizzate in funzione di una tensione di consolidazione pari a 100KPa.	95
Figura 74. Apparecchiatura triassiale, Lancellotta (2014).	96

Figura 75. Prescrizioni AGI .....	97
Figura 76. Montaggio carte da filtro e pietre porose .....	97
Figura 77. Montaggio membrana in lattice .....	98
Figura 78. Fase di riempimento della cella triassiale.....	98
Figura 79. Campione dopo la fase di rottura .....	100
Figura 80. Esempio di prova CIU sul piano $q-\varepsilon_a$ .....	101
Figura 81. Esempio di inviluppo di rottura. ....	102
Figura 82. Esempio di rappresentazione sul piano $\Delta u-\varepsilon_a$ .....	103
Figura 83. Tracciamento rette tangenti per la ricerca del $t_{100}$ . ....	104
Figura 84. Schema di prova di un edometro, Lancellotta (2014) .....	105
Figura 85. Apparecchiatura edometrica (laboratorio di geotecnica, DISEG, Polito).....	106
Figura 86. Determinazione di $c_v$ con il metodo di Taylor (Lancellotta, 2004).....	107
Figura 87. Curva edometrica con indici. ....	109
Figura 88. Schema semplificato della prova di permeazione.....	110
Figura 89. Allocazione dell'anello contenente il campione nella sede di prova (laboratorio di geotecnica, DISEG, Polito).....	110
Figura 90. Chiusura dell'attrezzatura di prova (laboratorio di geotecnica, DISEG, Polito).....	111
Figura 91. Montaggio permeametro a pareti flessibili (laboratorio di geotecnica, DISEG, Polito).....	112
Figura 92. Montaggio ultimato di un permeametro a pareti flessibili (laboratorio di geotecnica, DISEG, Polito).....	112
Figura 93. Andamento nel tempo del volume in uscita dal campione.....	114
Figura 94. Assonometria matrice per la maturazione del campione adibito alla prova triassiale.....	116
Figura 95. Geometria a 'v' per la perfetta aderenza. ....	117
Figura 96. Blocchi adibiti al blocco dello spostamento tra i due blocchi. ....	117
Figura 97. Dettaglio costruttivo delle finestre per la fase di scassero. ....	118
Figura 98. Elemento dopo la fase di stampa. ....	118
Figura 99. Cassero ultimato e montato.....	119
Figura 100. Sezione cassaforma provino.....	120
Figura 101. Cassaforma per provino per la prova di conducibilità.....	120
Figura 102. Elemento di fondo del cassero per la prova di conducibilità.....	121
Figura 103. Fase di miscelazione bentonite-acqua.....	124
Figura 104. Unione del cemento alla miscela.....	125
Figura 105. Posizionamento degli stampi sul fondo della vasca di maturazione.....	126
Figura 106. Fine della fase di colata. ....	126
Figura 107. Vasca di maturazione.....	127
Figura 108. Prima reazione d'idratazione della celite. ....	128
Figura 109. Seconda reazione d'idratazione della celite. ....	128
Figura 110. Prova penetrometrica.....	129
Figura 111. Andamento resistenza alla penetrazione per la miscela CB-5-0 .....	129
Figura 112. Provino umido. ....	130
Figura 113. Campione secco.....	130
Figura 114. Andamento della resistenza alla penetrazione in funzione del tempo di CB-4-0. ....	134
Figura 115. Andamento resistenza alla penetrazione in funzione del tempo di CB-6-0. ....	135
Figura 116. Confronto della resistenza alla penetrazione delle tre miscele analizzate. ....	136
Figura 117. Andamento di 'e' al variare della miscela esaminata .....	136
Figura 118. Campione con cassero dopo la fase di maturazione.....	137
Figura 119. Provino scasserato.....	138
Figura 120. Fase di montaggio pietre porose e carte da filtro. ....	139

Figura 121. Montaggio della prova ultimato.....	139
Figura 122. Miscela CB-5-0 portata a rottura con confinamenti di 20, 100 e 300KPa.....	141
Figura 123. Andamento del modulo di taglio per la miscela CB-5-0.....	142
Figura 124. Confronto dell'evoluzione delle pressioni interstiziali per i tre confinamenti diversi, per le miscele CB-5-0.....	143
Figura 125. Inviluppo di rottura di picco del materiale CB-5-0.....	143
Figura 126. Inviluppo di rottura residuo del materiale CB-5-0.....	144
Figura 127. Inviluppo di rottura della miscela CB-5-0, tramite l'utilizzo dei cerchi mi Mohr.....	145
Figura 128. Curva di stato critico della miscela CB-5-0.....	145
Figura 129. Comportamento a botte in fase di rottura del campione CB-5-0 (20KPa).....	146
Figura 130. Comportamento a botte in fase di rottura del campione CB-5-0 (100KPa).....	146
Figura 131. Rottura per taglio del campione CB-5-0 (300KPa).....	147
Figura 132. Risultato della disgregazione della carta stagnola a contatto con il campione.....	147
Figura 133. Miscela CB-4-0 portata a rottura con confinamenti di 20, 100 e 300KPa.....	148
Figura 134. Andamento del modulo di taglio per la miscela CB-4-0.....	149
Figura 135. Confronto dell'evoluzione delle pressioni interstiziali per i tre confinamenti diversi, per le miscele CB-4-0.....	149
Figura 136. Inviluppo di rottura di picco del materiale CB-4-0.....	150
Figura 137. Inviluppo di rottura residuo del materiale CB-4-0.....	151
Figura 138. Inviluppo di rottura della miscela CB-4-0, tramite l'utilizzo dei cerchi mi Mohr.....	151
Figura 139. Curva di stato critico della miscela CB-4-0.....	152
Figura 140. Rottura del campione CB-4-0 (20KPa).....	153
Figura 141. Rottura del campione CB-4-0 (100KPa).....	153
Figura 142. Rottura del campione CB-4-0 (300KPa).....	153
Figura 143. Miscela CB-6-0 portata a rottura con confinamenti di 20, 100 e 300KPa.....	154
Figura 144. Andamento del modulo di taglio per la miscela CB-6-0.....	155
Figura 145. Valori del modulo di taglio della miscela CB-6-0.....	155
Figura 146. Confronto dell'evoluzione delle pressioni interstiziali per i tre confinamenti diversi, per le miscele CB-6-0.....	155
Figura 147. Inviluppo di rottura di picco del materiale CB-6-0.....	156
Figura 148. Inviluppo di rottura residuo del materiale CB-6-0.....	157
Figura 149. Inviluppo di rottura della miscela CB-6-0, tramite l'utilizzo dei cerchi mi Mohr.....	157
Figura 150. Curva di stato critico della miscela CB-6-0.....	158
Figura 151. Rottura del campione CB-6-0 (20KPa).....	159
Figura 152. Rottura del campione CB-6-0 100KPa).....	159
Figura 153. Rottura del campione CB-6-0 300KPa).....	159
Figura 154. Prova sul campione CB-6-0 (300 KPa) fallita.....	160
Figura 155. Confronto fra le tre miscele esaminate in funzione della quantità di cemento e della tensione deviatorica di picco.....	161
Figura 156. Confronto fra le tre miscele esaminate in funzione della quantità di cemento e della deformazione associata alla tensione deviatorica di picco.....	162
Figura 157. Variazione dell'angolo d'attrito in funzione della quantità di cemento presente in miscela.....	162
Figura 158. Variazione della coesione in funzione della quantità di cemento presente in miscela.....	163
Figura 159. Confronto tra le CSL delle tre miscele analizzate.....	163
Figura 160. Riassunto modalità di rottura dei campioni in funzione della tensione di confinamento.....	164
Figura 161. Confronto fra le miscele analizzate in questa ricerca e quella analizzata da Carreto et al. (2015).....	165
Figura 162. Andamento del modulo di taglio per le miscele CB-4-0, CB-5-0 e CB-6-0.....	165

Figura 163. Confronto con lo studio eseguito da Carreto et al. (2015).....	166
Figura 164. Confronto fra le miscele esaminate, aventi un gradiente idraulico pari a 25. ....	168
Figura 165. Andamento del volume uscente dal campione nel tempo, mediante l'utilizzo di un gradiente idraulico pari a 90. ....	168
Figura 166. Conducibilità idraulica in funzione del tempo ricavata per mezzo di permeametri a parete rigida. ....	169
Figura 167. Variazione del volume uscente dal campione in funzione del tempo, CB-5-0.....	170
Figura 168. Variazione del gradiente idraulico in funzione del tempo, CB-5-0.....	171
Figura 169. Variazione del volume uscente dal campione in funzione del tempo, CB-4-0.....	171
Figura 170. Variazione del gradiente idraulico in funzione del tempo, CB-4-0.....	171
Figura 171. Variazione del volume uscente dal campione in funzione del tempo, CB-6-0.....	172
Figura 172. Variazione del gradiente idraulico in funzione del tempo, CB-6-0.....	172
Figura 173. Conducibilità idraulica in funzione del tempo, ricavata per mezzo di permeametri a parete flessibile. ....	172
Figura 174. Curve edometriche delle miscele analizzate. ....	173
Figura 175. Raffigurazione della dipendenza della conducibilità idraulica dalla tensione di compressione applicata. ....	175
Figura 176. Raffigurazione della dipendenza della conducibilità idraulica dall'indice dei vuoti. ....	175
Figura 177. Variazione della conducibilità idraulica in funzione della tensione di consolidazione.....	177
Figura 178. Valori di conducibilità idraulica ricavati mediante edometri e permeametri. ....	178
Figura 179. Variazione del valore di conducibilità in funzione della prova utilizzata. ....	179
Figura 180. Calcolo della conducibilità idraulica attraverso prove triassiali, edometriche e permeametri. ....	180
Figura 181. Variazione della conducibilità idraulica in funzione della tensione di consolidazione, CB-5-0..	181
Figura 182. Variazione della conducibilità idraulica in funzione della tensione di consolidazione, CB-4-0..	181
Figura 183. Variazione della conducibilità idraulica in funzione della tensione di consolidazione, CB-6-0..	182
Figura 184. Confronto tra i risultati ottenuti in questo studio e quelli presenti in letteratura.....	182
Figura 185. Maturazione della miscela CB-4-0 a 7 e 28 giorni. ....	183
Figura 186. Maturazione della miscela CB-5-0 a 7 e 28 giorni. ....	184
Figura 187. Maturazione della miscela CB-6-0 a 7 e 28 giorni. ....	184

## Indice appendice delle figure

Appendice, Fig. 1. Grafico della fase di rottura della miscela CB-5-0, con confinamento di 20KPa. ....	187
Appendice, Fig. 2. Grafico della fase di rottura della miscela CB-5-0, con confinamento di 100KPa. ....	187
Appendice, Fig. 3. Grafico della fase di rottura della miscela CB-5-0, con confinamento di 300KPa. ....	187
Appendice, Fig. 4. Ricerca del modulo di taglio per la miscela CB-5-0 (20 KPa). ....	188
Appendice, Fig. 5. Ricerca del modulo di taglio per la miscela CB-5-0 (100 KPa). ....	188
Appendice, Fig. 6. Ricerca del modulo di taglio per la miscela CB-5-0 (300 KPa). ....	188
Appendice, Fig. 7. Grafico della variazione della pressione interstiziale della miscela CB-5-0, con confinamento di 20KPa. ....	189
Appendice, Fig. 8. Grafico della variazione della pressione interstiziale della miscela CB-5-0, con confinamento di 100KPa. ....	189
Appendice, Fig. 9. Grafico della variazione della pressione interstiziale della miscela CB-5-0, con confinamento di 300KPa. ....	189
Appendice, Fig. 10. Grafico della fase di rottura della miscela CB-5-0, con confinamento di 20KPa. ....	190
Appendice, Fig. 11. Grafico della fase di rottura della miscela CB-5-0, con confinamento di 100KPa. ....	190
Appendice, Fig. 12. Grafico della fase di rottura della miscela CB-5-0, con confinamento di 300KPa. ....	190
Appendice, Fig. 13. Cerchio di Mohr della miscela CB-5-0 (20 KPa).....	191
Appendice, Fig. 14. Cerchio di Mohr della miscela CB-5-0 (100 KPa).....	191
Appendice, Fig. 15. Cerchio di Mohr della miscela CB-5-0 (300 KPa).....	191
Appendice, Fig. 16. Grafico della fase di rottura della miscela CB-4-0, con confinamento di 20KPa. ....	192
Appendice, Fig. 17. Grafico della fase di rottura della miscela CB-4-0, con confinamento di 100KPa. ....	192
Appendice, Fig. 18. Grafico della fase di rottura della miscela CB-4-0, con confinamento di 300KPa. ....	192
Appendice, Fig. 19. Ricerca del modulo di taglio per la miscela CB-4-0 (20 KPa). ....	193
Appendice, Fig. 20. Ricerca del modulo di taglio per la miscela CB-4-0 (100 KPa). ....	193
Appendice, Fig. 21. Ricerca del modulo di taglio per la miscela CB-4-0 (300 KPa). ....	193
Appendice, Fig. 22. Grafico della variazione della pressione interstiziale della miscela CB-4-0, con confinamento di 20KPa. ....	194
Appendice, Fig. 23. Grafico della variazione della pressione interstiziale della miscela CB-4-0, con confinamento di 100KPa. ....	194
Appendice, Fig. 24. Grafico della variazione della pressione interstiziale della miscela CB-4-0, con confinamento di 300KPa. ....	194
Appendice, Fig. 25. Grafico della fase di rottura della miscela CB-4-0, con confinamento di 20KPa. ....	195
Appendice, Fig. 26. Grafico della fase di rottura della miscela CB-4-0, con confinamento di 100KPa. ....	195
Appendice, Fig. 27. Grafico della fase di rottura della miscela CB-4-0, con confinamento di 300KPa. ....	195
Appendice, Fig. 28. Cerchio di Mohr della miscela CB-4-0 (20 KPa).....	196
Appendice, Fig. 29. Cerchio di Mohr della miscela CB-4-0 (100 KPa).....	196
Appendice, Fig. 30. Cerchio di Mohr della miscela CB-4-0 (300 KPa).....	196
Appendice, Fig. 31. Grafico della fase di rottura della miscela CB-6-0, con confinamento di 20KPa. ....	197
Appendice, Fig. 32. Grafico della fase di rottura della miscela CB-6-0, con confinamento di 100KPa. ....	197
Appendice, Fig. 33. Grafico della fase di rottura della miscela CB-6-0, con confinamento di 300KPa. ....	197
Appendice, Fig. 34. Ricerca del modulo di taglio per la miscela CB-6-0 (20 KPa). ....	198
Appendice, Fig. 35. Ricerca del modulo di taglio per la miscela CB-6-0 (100 KPa). ....	198
Appendice, Fig. 36. Ricerca del modulo di taglio per la miscela CB-6-0 (300 KPa). ....	198
Appendice, Fig. 37. Grafico della variazione della pressione interstiziale della miscela CB-6-0, con confinamento di 20KPa. ....	199
Appendice, Fig. 38. Grafico della variazione della pressione interstiziale della miscela CB-6-0, con confinamento di 100KPa. ....	199

Appendice, Fig. 39. Grafico della variazione della pressione interstiziale della miscela CB-6-0, con confinamento di 300KPa. ....	199
Appendice, Fig. 40. Grafico della fase di rottura della miscela CB-6-0, con confinamento di 20KPa. ....	200
Appendice, Fig. 41. Grafico della fase di rottura della miscela CB-6-0, con confinamento di 100KPa. ....	200
Appendice, Fig. 42. Grafico della fase di rottura della miscela CB-6-0, con confinamento di 300KPa. ....	200
Appendice, Fig. 43. Cerchio di Mohr della miscela CB-6-0 (20 KPa).....	201
Appendice, Fig. 44. Cerchio di Mohr della miscela CB-6-0 (100 KPa).....	201
Appendice, Fig. 45. Cerchio di Mohr della miscela CB-6-0 (300 KPa).....	201
Appendice, Fig. 46. Prova di conducibilità idraulica sulla miscela CB-5-0 effettuate mediante un permeametro a parete rigida, conducibilità idraulica in funzione del tempo. ....	202
Appendice, Fig. 47. Prova di conducibilità idraulica sulla miscela CB-4-0 effettuate mediante un permeametro a parete rigida, conducibilità idraulica in funzione del tempo. ....	202
Appendice, Fig. 48. Prova di conducibilità idraulica sulla miscela CB-6-0 effettuate mediante un permeametro a parete rigida, conducibilità idraulica in funzione del tempo. ....	202
Appendice, Fig. 49. Prova di conducibilità idraulica sulla miscela CB-5-0 effettuate mediante un permeametro a parete flessibile, conducibilità idraulica in funzione del tempo. ....	203
Appendice, Fig. 50. Prova di conducibilità idraulica sulla miscela CB-4-0 effettuate mediante un permeametro a parete flessibile, conducibilità idraulica in funzione del tempo. ....	203
Appendice, Fig. 51. Prova di conducibilità idraulica sulla miscela CB-6-0 effettuate mediante un permeametro a parete flessibile, conducibilità idraulica in funzione del tempo. ....	203
Appendice, Fig. 52. Curva di consolidazione della miscela CB-5-0 per uno step di carico di 12,3 KPa. ....	204
Appendice, Fig. 53. Curva di consolidazione della miscela CB-5-0 per uno step di carico di 24,5 KPa. ....	204
Appendice, Fig. 54. Curva di consolidazione della miscela CB-5-0 per uno step di carico di 49,0 KPa. ....	204
Appendice, Fig. 55. Curva di consolidazione della miscela CB-5-0 per uno step di carico di 98,1 KPa. ....	205
Appendice, Fig. 56. Curva di consolidazione della miscela CB-5-0 per uno step di carico di 196,1 KPa. ....	205
Appendice, Fig. 57. Curva di consolidazione della miscela CB-5-0 per uno step di carico di 392,3 KPa. ....	205
Appendice, Fig. 58. Curva di consolidazione della miscela CB-5-0 per uno step di carico di 784,5 KPa. ....	206
Appendice, Fig. 59. Curva di consolidazione della miscela CB-5-0 per uno step di carico di 1569,1 KPa. ....	206
Appendice, Fig. 60. Curva di consolidazione della miscela CB-5-0 per uno step di carico di 3138,1 KPa. ....	206
Appendice, Fig. 61. Curva di rigonfiamento della miscela CB-5-0 per uno step di carico di 784,5 KPa. ....	207
Appendice, Fig. 62. Curva di rigonfiamento della miscela CB-5-0 per uno step di carico di 196,1 KPa. ....	207
Appendice, Fig. 63. Curva di rigonfiamento della miscela CB-5-0 per uno step di carico di 49,0 KPa. ....	207
Appendice, Fig. 64. Curva di rigonfiamento della miscela CB-5-0 per uno step di carico di 12,35 KPa. ....	208
Appendice, Fig. 65. Curva di consolidazione della miscela CB-4-0 per uno step di carico di 12,3 KPa. ....	208
Appendice, Fig. 66. Curva di consolidazione della miscela CB-4-0 per uno step di carico di 24,5 KPa. ....	208
Appendice, Fig. 67. Curva di consolidazione della miscela CB-4-0 per uno step di carico di 49,0 KPa. ....	209
Appendice, Fig. 68. Curva di consolidazione della miscela CB-4-0 per uno step di carico di 98,1 KPa. ....	209
Appendice, Fig. 69. Curva di consolidazione della miscela CB-4-0 per uno step di carico di 196,1KPa. ....	209
Appendice, Fig. 70. Curva di consolidazione della miscela CB-4-0 per uno step di carico di 392,3 KPa. ....	210
Appendice, Fig. 71. Curva di consolidazione della miscela CB-4-0 per uno step di carico di 784,5 KPa. ....	210
Appendice, Fig. 72. Curva di consolidazione della miscela CB-4-0 per uno step di carico di 1569,1 KPa. ....	210
Appendice, Fig. 73. Curva di consolidazione della miscela CB-4-0 per uno step di carico di 3138,1 KPa. ....	211
Appendice, Fig. 74. Curva di rigonfiamento della miscela CB-5-0 per uno step di carico di 784,5 KPa. ....	211
Appendice, Fig. 75. Curva di rigonfiamento della miscela CB-5-0 per uno step di carico di 196,1 KPa. ....	211
Appendice, Fig. 76. Curva di rigonfiamento della miscela CB-5-0 per uno step di carico di 49,0 KPa. ....	212
Appendice, Fig. 77. Curva di rigonfiamento della miscela CB-5-0 per uno step di carico di 12,3 KPa. ....	212
Appendice, Fig. 78. Curva di consolidazione della miscela CB-6-0 per uno step di carico di 12,3 KPa. ....	212
Appendice, Fig. 79. Curva di consolidazione della miscela CB-6-0 per uno step di carico di 24,5 KPa. ....	213

Appendice, Fig. 80. Curva di consolidazione della miscela CB-6-0 per uno step di carico di 49,0 KPa. ....	213
Appendice, Fig. 81. Curva di consolidazione della miscela CB-6-0 per uno step di carico di 98,1 KPa. ....	213
Appendice, Fig. 82. Curva di consolidazione della miscela CB-6-0 per uno step di carico di 196,1 KPa. ....	214
Appendice, Fig. 83. Curva di consolidazione della miscela CB-6-0 per uno step di carico di 392,3 KPa. ....	214
Appendice, Fig. 84. Curva di consolidazione della miscela CB-6-0 per uno step di carico di 784,5 KPa. ....	214
Appendice, Fig. 85. Curva di consolidazione della miscela CB-6-0 per uno step di carico di 1569,1 KPa. ...	215
Appendice, Fig. 86. Curva di consolidazione della miscela CB-6-0 per uno step di carico di 3138,1 KPa. ...	215
Appendice, Fig. 87. Curva di rigonfiamento della miscela CB-6-0 per uno step di carico di 784,5 KPa. ....	215
Appendice, Fig. 88. Curva di rigonfiamento della miscela CB-6-0 per uno step di carico di 196,1 KPa. ....	216
Appendice, Fig. 89. Curva di rigonfiamento della miscela CB-6-0 per uno step di carico di 49,0 KPa. ....	216
Appendice, Fig. 90. Curva di rigonfiamento della miscela CB-6-0 per uno step di carico di 12,3 KPa. ....	216
Appendice, Fig. 91. Curva edometrica della miscela CB-5-0. ....	217
Appendice, Fig. 92. Curva edometrica della miscela CB-4-0. ....	217
Appendice, Fig. 93. Curva edometrica della miscela CB-6-0. ....	217
Appendice, Fig. 94. Ricerca del t100 per la miscela CB-5-0 (20 KPa). ....	218
Appendice, Fig. 95. Ricerca del t100 per la miscela CB-5-0 (100 KPa). ....	218
Appendice, Fig. 96. Ricerca del t100 per la miscela CB-5-0 (300 KPa). ....	218
Appendice, Fig. 97. Ricerca del t100 per la miscela CB-4-0 (20 KPa). ....	219
Appendice, Fig. 98. Ricerca del t100 per la miscela CB-4-0 (100 KPa). ....	219
Appendice, Fig. 99. Ricerca del t100 per la miscela CB-4-0 (300 KPa). ....	219
Appendice, Fig. 100. Ricerca del t100 per la miscela CB-6-0 (20 KPa). ....	220
Appendice, Fig. 101. Ricerca del t100 per la miscela CB-6-0 (100 KPa). ....	220
Appendice, Fig. 102. Ricerca del t100 per la miscela CB-6-0 (300 KPa). ....	220

## 1. Introduzione

I censimenti dei siti inquinati nei paesi più industrializzati stanno mostrando una situazione molto critica in relazione sia all'estensione, al numero ed alla gravità dei fenomeni di inquinamento in atto.

Nonostante le ricerche e gli studi mirati a migliorare le attuali tecnologie di intervento, in gran parte delle situazioni l'unico intervento praticabile a difesa della falda è l'incapsulamento, in quanto le altre soluzioni hanno un peso economico molto maggiore o una efficacia finale non adeguata (Shackelford, 1999). Tali opere prevedono una copertura, diaframmi laterali e sistemi di isolamento di fondo per poter evitare fenomeni di filtrazione e migrazione dell'inquinante verso siti non contaminati. Di seguito viene riportata una sezione dell'opera completata, all'interno della quale si possono individuare i principali elementi strutturali:

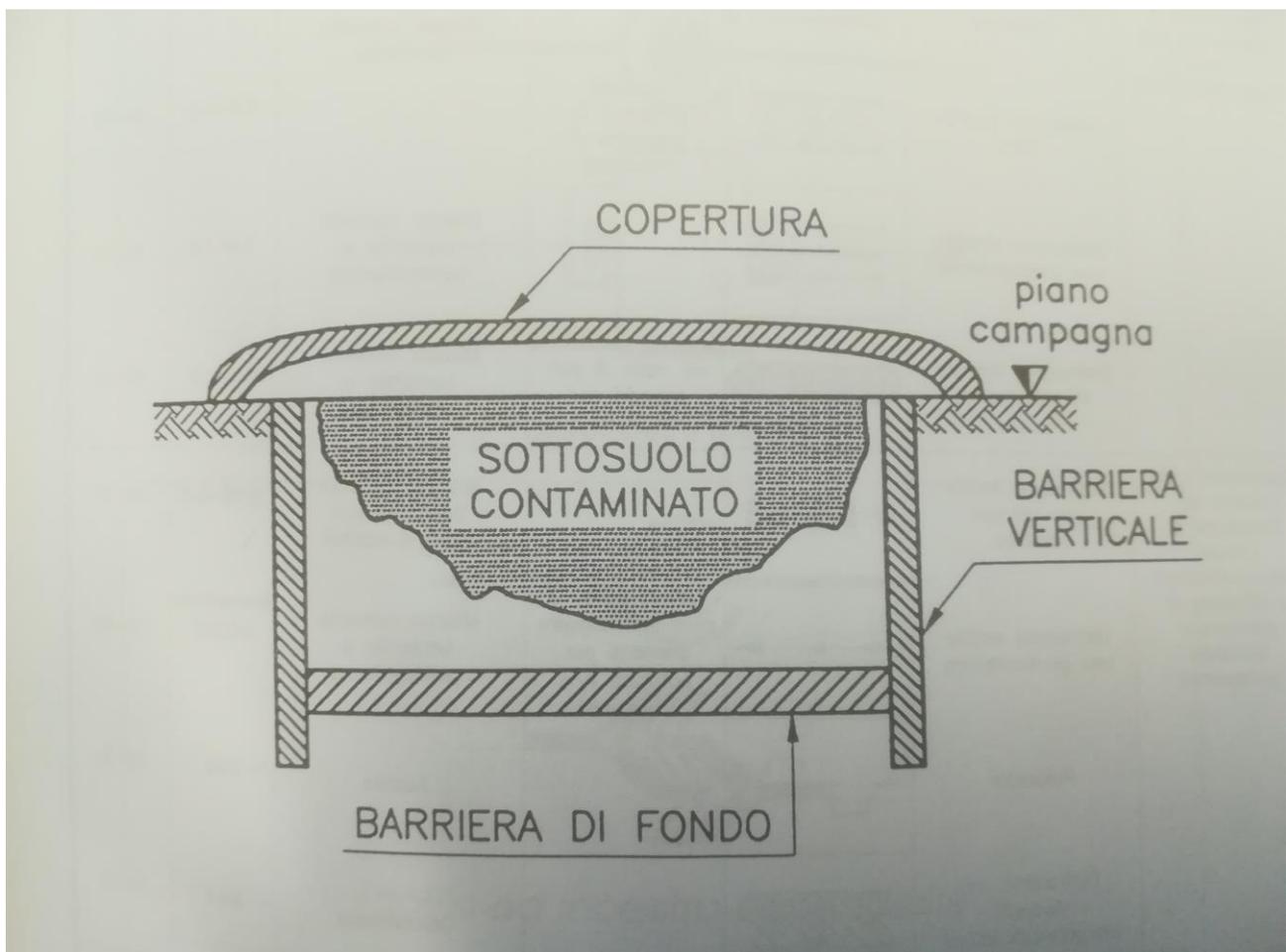


Figura 1 Sezione verticale di un sistema di isolamento completo (Daniel & Bowders, 1994).

La copertura dell'opera viene realizzata mediante un materiale impermeabile, susseguentemente ricoperto mediante un manto erboso. La funzione principale di questo elemento è la captazione dell'acqua piovana, in quanto se dovesse entrare all'interno del sottosuolo contaminato contribuirebbe all'istaurarsi di un moto di filtrazione. In aggiunta, l'assenza di questo elemento nelle discariche potrebbe causare la formazione di percolato, infatti, la filtrazione dell'acqua piovana tra i rifiuti ha come risultato la formazione di questo fluido contaminante.

La barriera di fondo e le barriere verticali sono utilizzate per bloccare o comunque diminuire sensibilmente il fenomeno della filtrazione. Senza questi elementi, il contaminante migrerebbe dalla zona dove ha una concentrazione più alta verso le zone meno contaminate. Questi elementi devono presentare una bassa conducibilità idraulica e una forte resistenza agli attacchi chimici, infatti queste barriere subiscono un attacco chimico continuo per tutto l'arco della vita dell'opera. Dal punto di vista meccanico, il materiale utilizzato deve avere un comportamento plastico, in quanto si vuole evitare che a causa di spostamenti o rotture del terreno circostante le barriere vadano a rottura o si fessurino. Infatti la fessurazione di un solo elemento comporterebbe una via preferenziale per la migrazione dell'agente contaminante al di fuori della struttura, che quindi, perderebbe di efficacia.

Gli studi condotti sulle barriere per le cinturazioni perimetrali hanno portato ad una evoluzione della fase di progetto, infatti si è passati da una fase di realizzazione dell'opera in completa assenza di pianificazione e specifiche, ad un piano di lavoro ben strutturato ed al dimensionamento ingegneristico di geometrie e procedure costruttive, con precisi riferimenti per il controllo di qualità ed il collaudo delle opere. (Daniel, 1993; Manassero et al.,1995). Ciononostante, il comportamento a lungo termine di queste opere non è ancora completamente noto

In generale, le operazioni che si devono eseguire per la messa in sicurezza di un sito contaminato mediante incapsulamento prevedono la valutazione del dell'inquinamento del sito mediante indagini di sito e di laboratorio, questo per determinare il tipo di inquinante e la sua possibile propagazione nel tempo. Una volta identificato l'agente contaminante si può procedere con la definizione della miglior tipologia costruttiva e del materiale da utilizzare per la creazione delle barriere. Il passo successivo è la progettazione geometrica delle barriere e del loro posizionamento sul territorio. Come ultime fasi operative si andranno ad effettuare delle prove in situ dell'opera, con le quali si valideranno i risultati ottenuti in fase di progettazione e dimensionamento, quindi si procederà con un la progettazione e la stesura di un piano di monitoraggio a lungo termine.

## 1.1 Diaframmi verticali cemento-bentonite

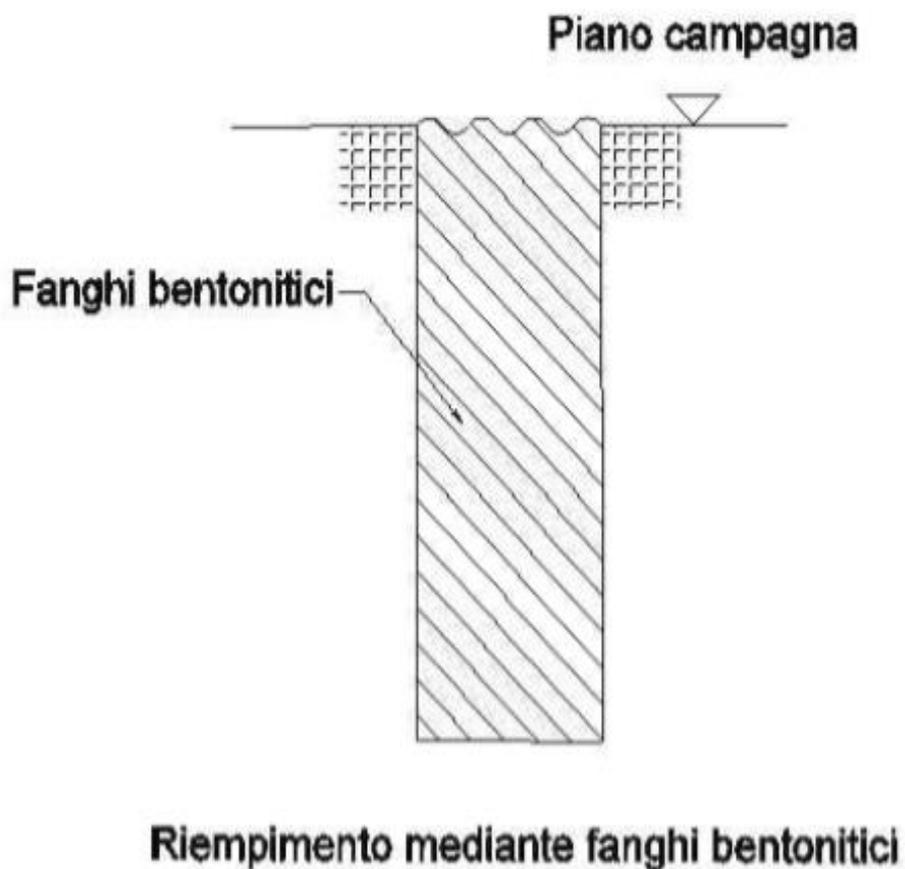
In Europa le miscele cemento-bentonite sono il materiale più utilizzato per l'isolamento dei siti inquinati. L'incapsulamento laterale viene realizzato mediante lo scavo di pannelli alternati o di una trincea continua. La scelta di una delle due tipologie costruttive è dettata solo dal parco macchine presente in situ, in quanto questo materiale non necessita di giunti speciali tra un pannello ed il successivo ad esso affiancato. Infatti la consistenza plastica del materiale consente un perfetto immorsamento reciproco tra i pannelli adiacenti.

La messa in opera di questi diaframmi può essere effettuata in monofase o in bifase. Per entrambe le procedure andrà gestita la problematica legata al terreno di risulta che si otterrà dallo scavo della trincea. Infatti questo materiale dovrà dapprima trovare un luogo di stoccaggio all'interno del cantiere, e susseguentemente dovrà essere smaltito o riutilizzato. Le due tipologie costruttive si differiscono per la metodologia e la tempistica di messa in opera del materiale finale. La prima soluzione vede l'utilizzo della miscela finale durante lo scavo, dunque si procede con la stabilizzazione delle pareti della trincea direttamente mediante la miscela cemento-bentonite. Dopo la colata del materiale si attende la maturazione della miscela. In questo lasso di tempo si svilupperà la fase di presa del cemento, andando a far solidificare la miscela. Per quanto riguarda la soluzione bifase, differisce nel fatto che l'operazione di stabilizzazione dello scavo è adibito ad una miscela bentonitica (acqua-bentonite), susseguentemente rimossa e sostituita con la miscela cemento-bentonite. Questa seconda soluzione presenta alcuni limiti e complessità aggiuntive, la scelta della miscela da utilizzare per l'impermeabilizzazione dovrà essere caratterizzata da una densità ed una viscosità maggiore dei fanghi bentonitici impiegati per sostenere lo scavo. Per via di queste considerazioni le miscele a base cemento bentonite vengono completate con l'immissione di filler o inerti di varia pezzatura per aumentarne la densità. Mediante questa variazione della miscela il materiale finale che si otterrà dopo l'indurimento sarà riconducibile ad un calcestruzzo plastico. Un'altra problematica riconducibile alla messa in opera bifase è la profondità raggiungibile. Infatti mediante questa tipologia costruttiva, le altezze massime dei diaframmi vengono ridotte rispetto a quelle raggiunte mediante la tipologia monofase. Questo perché le operazioni di rimpiazzo dei fanghi bentonitici con la miscela cemento-bentonite definitiva sono molto delicate, infatti se ci fosse una persistenza del materiale da rimpiazzare all'interno del foro, il comportamento meccanico ed idraulico dell'intero diaframma verrebbe compromesso.

## 1.2 Tipologia costruttiva bifase

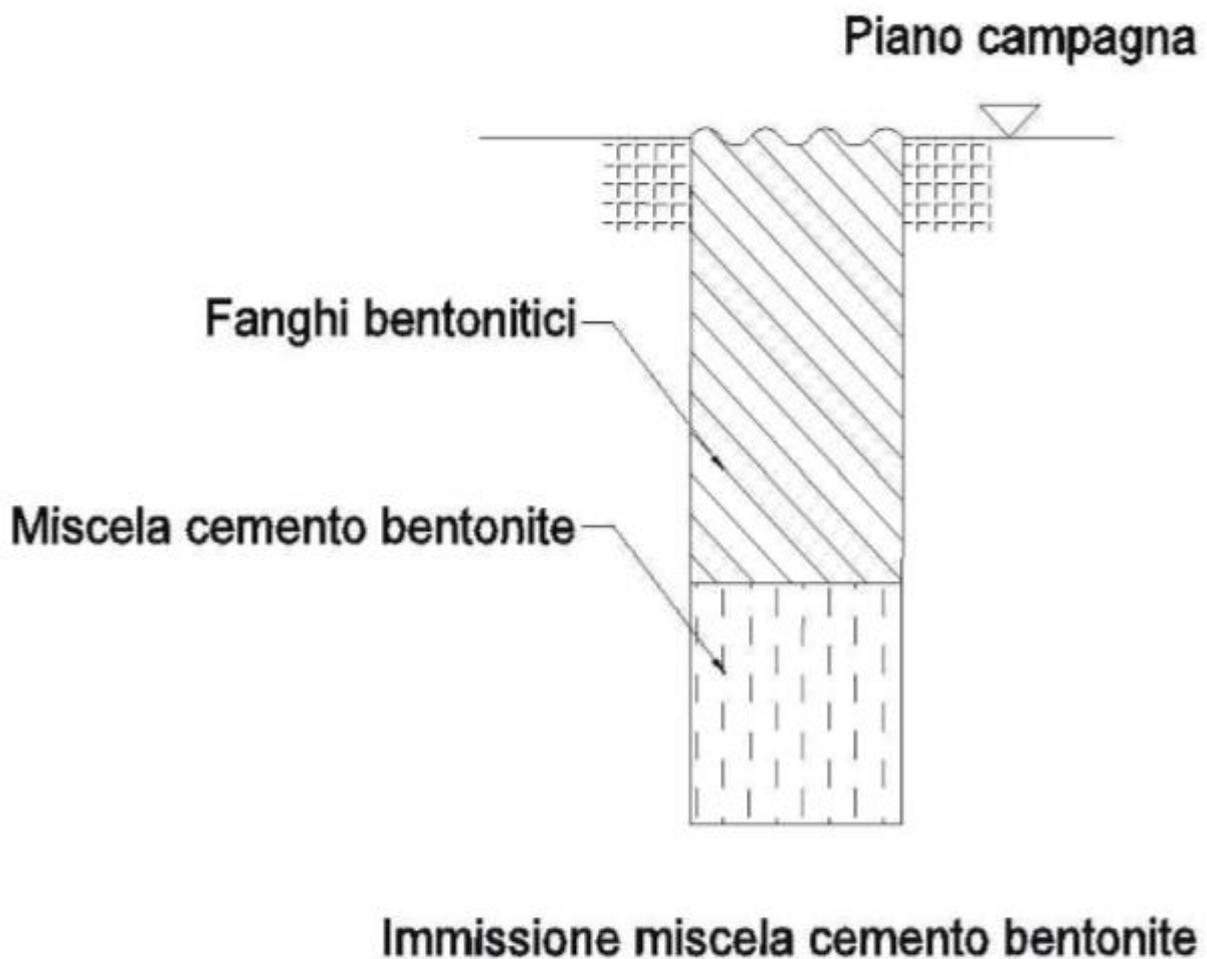
Essendo la modalità costruttiva bifase più complessa rispetto alla monofase, si vuole andare a distinguere le varie fasi per la realizzazione di un diaframma in cemento-bentonite realizzato con questa modalità.

La prima fase è la stabilizzazione dello scavo, nella quale si procede mediante l'immissione all'interno del foro dei fanghi bentonitici. Questa operazione viene effettuata affinché non avvenga il collasso della parete durante l'avanzamento dello scavo, in quanto senza la pressione idrostatica indotta dal fango sulle pareti del foro il terreno potrebbe andare a rottura.



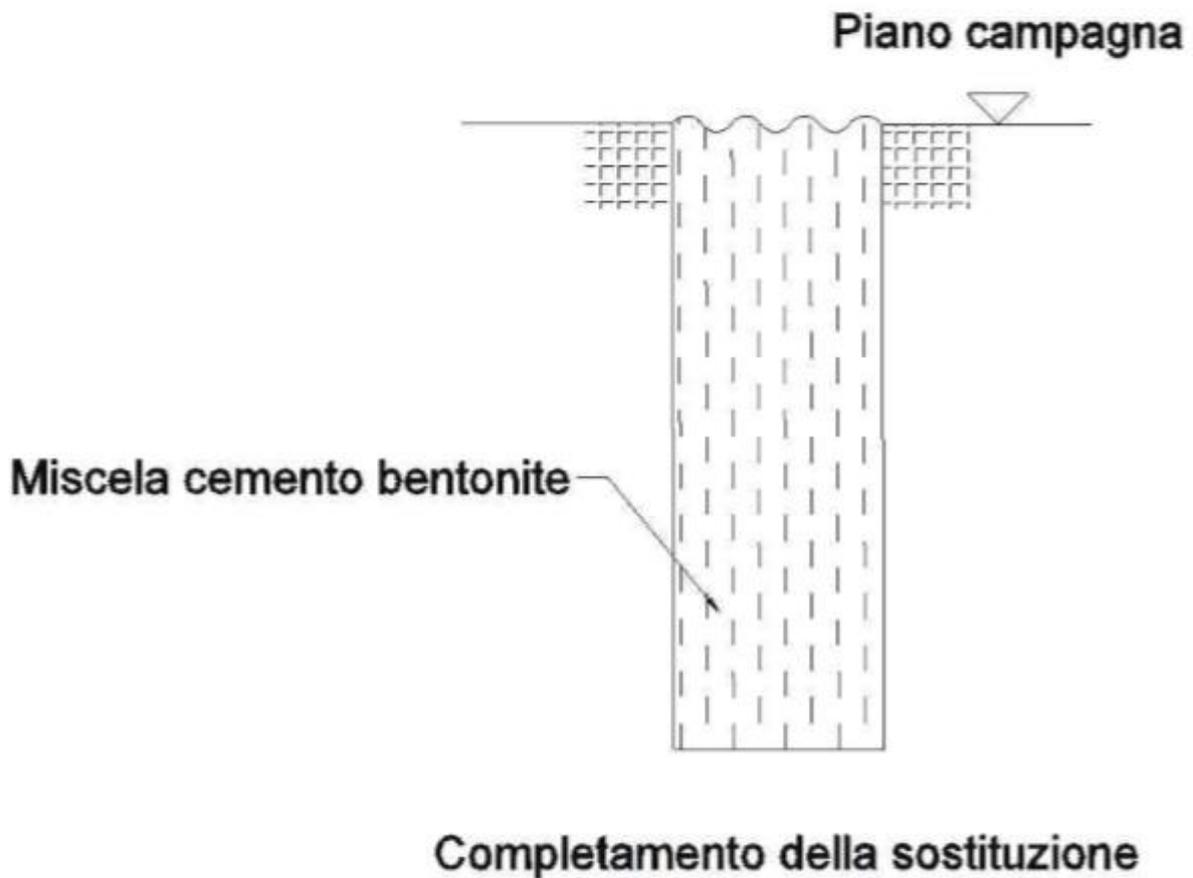
*Figura 2 Sezione della fase di stabilizzazione di uno scavo verticale*

Il passo successivo è il rimpiazzo dei fanghi bentonitici mediante la miscela cemento-bentonite. Questa operazione viene eseguita mediante il pompaggio della miscela sul fondo dello scavo, in tal modo si cerca di preservare le caratteristiche del materiale di riempimento. La sostituzione con il nuovo materiale sarà facilitata dal fatto che la densità del materiale che comporrà la barriera sarà maggiore dei fanghi bentonitici, per tale ragione si avrà una segregazione delle due miscele e non una miscelazione fra di esse. Durante questa fase in superficie si andrà a captare la fuoriuscita dei fanghi bentonitici e li si convoglierà in una unità di stoccaggio. Durante la risalita dei fanghi, si dovrà porre attenzione alla presenza di terreno nella miscela, perché potrebbe essere dovuta alla rottura di una parete dello scavo. Questo evento potrebbe portare ad una miscelazione del terreno con la miscela cemento-bentonite che comprometterebbe le caratteristiche meccaniche e di conducibilità del materiale finale, facendolo risultare diverso da quello studiato in fase di progetto e dimensionamento dell'opera.



*Figura 3 Sezione della fase di sostituzione dei fanghi bentonitici.*

La terza ed ultima fase prevede il completo riempimento dello scavo mediante la miscela finale. La velocità di risalita del materiale deve essere abbastanza lenta affinché non vi sia una forte miscelazione tra i fanghi bentonitici e la miscela cemento bentonite, in quanto si vuole preservare le caratteristiche del materiale finale.



*Figura 4 Sezione della fase finale della procedura di messa in opera bifase.*

## **2. Prestazioni idrauliche e meccaniche delle miscele cemento bentonite: stato dell'arte**

Essendo la miscela cemento-bentonite un materiale molto utilizzato sono state condotte molte ricerche per la determinazione del comportamento sia dal punto di vista meccanico/idraulico che dalla resistenza da attacco chimico. I dati di maggior interesse riguardano la resistenza a rottura del materiale, la conducibilità all'acqua e la resistenza del materiale sottoposto ad un attacco chimico. In particolare, la sperimentazione mediante prove di compressione e prove di filtrazione effettuata nel 2005 su miscele bentonite-cemento con il rimpiazzo di scorie d'alto forno da Evans e Opdyke, rappresenta uno studio completo e rappresentativo riguardo la resistenza e la conducibilità tra quelli analizzati.

Oltre a questo si ritrovano in letteratura numerosi lavori su tale tematica tra cui (Fratolocchi et al., 2005; Garvin and Hayes, 1999; Joshi et al., 2010; Soga et al., 2013; Reddy et al., 2017; Pasqualini e Fratolocchi, 2000; Jefferis, 1981; Carreto et al. 2015; Royal, 2018 e Veràstegui et al., 2013. Si riporta nel seguito una descrizione delle sperimentazioni da loro eseguite e delle conclusioni raggiunte.

Viste le diverse denominazioni delle miscele utilizzate nei seguenti articoli si introduce una codifica, in tal modo risulterà più facile effettuare un'identificazione univoca della composizione dei materiali analizzati:

Vengono identificate con sigla CB le miscele composte esclusivamente da bentonite e cemento, mentre con CBG si denominano le miscele composte da bentonite e cemento aventi una percentuale di rimpiazzo di scorie d'altoforno al posto del cemento. Per quanto riguarda le miscele contenenti rimpiazzo di cenere di combustibile la sigla utilizzata è CBF. Il primo numero dopo la sigla identifica il rapporto cemento/bentonite. Il secondo numero rappresenta la percentuale di rimpiazzo, calcolata come rapporto (materiale di rimpiazzo) / cemento in percentuale. Ad esempio il codice CBG-4-40 rappresenta una miscela cemento-bentonite con rimpiazzo di scorie (CBG), avente 4 unità di cemento per ogni unità di bentonite e una sostituzione del 40% del cemento mediante slag.

## **2.1 Evans e Opdyke (2005)**

In questo articolo si descrivono le indagini condotte su miscele costituite da cemento, bentonite e scorie di altoforno. Principalmente Evans e Opdyke (2005) hanno studiato le variabili da cui dipende il comportamento idraulico e meccanico del materiale. Queste includono: il contenuto di cemento in miscela, la percentuale del rimpiazzo di cemento con scorie di altoforno ed il tempo di maturazione del materiale. Il contenuto di cemento in miscela è espresso come percentuale di cemento e/o rimpiazzo di scorie rispetto alla quantità in peso di acqua e bentonite. La sostituzione delle scorie è la quantità, in peso percentuale, di scorie nel materiale cementizio. Susseguentemente hanno analizzato il materiale dal punto di vista della conducibilità idraulica a lungo termine, mediante prove triassiali e prove mediante permeometro a pareti flessibili.

### **2.1.1 Materiali**

Per lo studio della resistenza e la conducibilità sono state studiate tre percentuali diverse di cemento Portland 10%, 15% e 20%. Le percentuali di rimpiazzo con scorie studiate sono state di 0%, 20%, 40%, 60%, 70%, 80%, 90%. Ad esempio una miscela contenente il 10% di cemento con l'80% di rimpiazzo in percentuale sarà costituita dal 90% di bentonite+acqua, l'8% di scorie d'altoforno ed il 2% di cemento. Prima di testare i campioni così creati si è atteso un periodo di maturazione di 28 giorni ad una umidità del 100%. Le prove a rottura e di conducibilità sono state effettuate su campioni invecchiati per due, tre, sei e dodici mesi. Durante il periodo di stagionatura i campioni sono stati conservati in acqua. Un riassunto dei campioni esaminati è riportato nella tabella 1.

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 1. Miscele analizzate da Evans e Opdyke (2005).

### 2.1.2 Procedure

Per quanto riguarda le analisi sulla conducibilità, immediatamente prima del test di conducibilità idraulica, i campioni sono stati sottoposti ad una saturazione utilizzando una backpressure di 276 KPa. La fase di saturazione è stata mantenuta per un periodo non inferiore a 24 ore. Durante la fase di prova si è mantenuta una backpressure di 376 KPa ed una pressione in cella di 479 KPa in tal modo si è ottenuta una tensione efficace di 103 KPa. Per quanto riguarda i campioni contenenti un rimpiazzo di scorie tra 0% e 70%, la fase di permeazione è stata ottenuta utilizzando il gradiente idraulico dovuto alla forza di gravità tra top e bottom del campione (20 cm). Ai campioni con una bassa conducibilità idraulica ( $1 \times 10^{-7}$  a  $1 \times 10^{-8}$  [ $m/sec$ ]) è stato applicato un gradiente idraulico di 25. Prima di raggiungere un equilibrio tra fluido entrante ed uscente dal campione si è dovuto attendere per un periodo che varia tra i 5 ed i 7 giorni. Tutte le miscele studiate sono state testate mediante prove di compressione non confinate (UC). I campioni che hanno subito la permeazione sono stati portati a rottura il giorno stesso della fine della prova di permeazione. Per quanto riguarda i provini che non hanno subito prove di conducibilità sono stati testati a 28 giorni di maturazione. La prova è stata condotta in controllo di deformazione con un valore di 3.0 mm/min (2%/min).

## 2.1.3 Risultati

### 2.1.3.1 Prove di conducibilità

I risultati delle prove di conducibilità condotte sui materiali con le tre percentuali differenti di cemento e con le annesse percentuali di rimpiazzo tramite scorie d'alto forno sono illustrati nella figura 5. I risultati sono stati ottenuti analizzando campioni con una maturazione di 28 giorni.

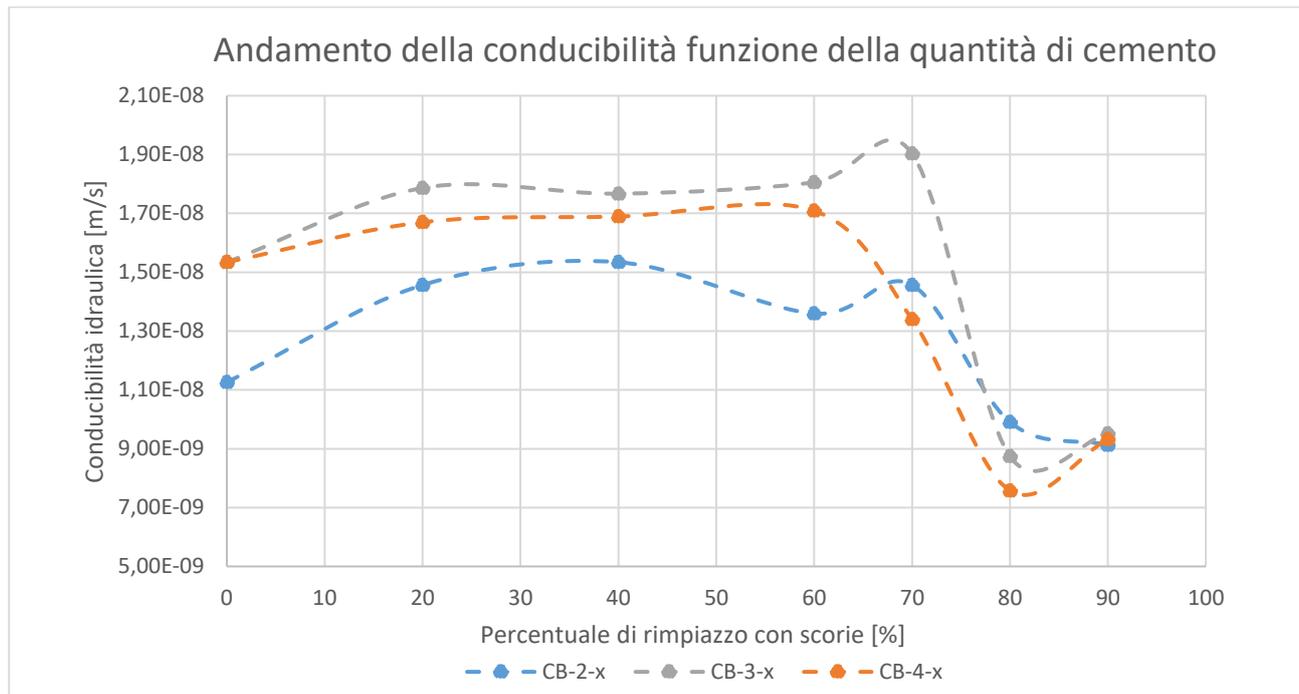


Figura 5. Influenza della percentuale di rimpiazzo di scorie nella miscela (Evans e Opdyke, 2005).

Si può notare che la conducibilità idraulica rimane pressochè costante per i campioni aventi una percentuale di rimpiazzo tra il 20% ed il 60%. In oltre si può osservare un forte decadimento del valore di  $k$  per un rimpiazzo superiore al 70%. Si evidenzia come la percentuale di cemento utilizzata dà una influenza minore sul risultato finale rispetto alla variabilità data dalla percentuale di rimpiazzo. Ancora una volta riferendoci alla figura 5, si evince che la percentuale migliore di rimpiazzo è dell'80%, infatti il valore di conducibilità idraulica oltre ad essere il più basso ricavato non è più in funzione della percentuale di cemento inserita in miscela. In ogni caso il range di valori di conducibilità idraulica che si possono ricavare sono dei valori compresi tra  $1 \times 10^{-7}$  e  $1 \times 10^{-8}$  [m/s].

Per quanto riguarda la conducibilità idraulica a lungo termine, si sono analizzate delle miscele aventi il 20% di cemento ed un rimpiazzo variabile tra il 60% ed il 90%. I campioni sono stati testati per tempi di maturazione fino a 12 mesi. I risultati ottenuti sono raccolti nel seguente grafico:

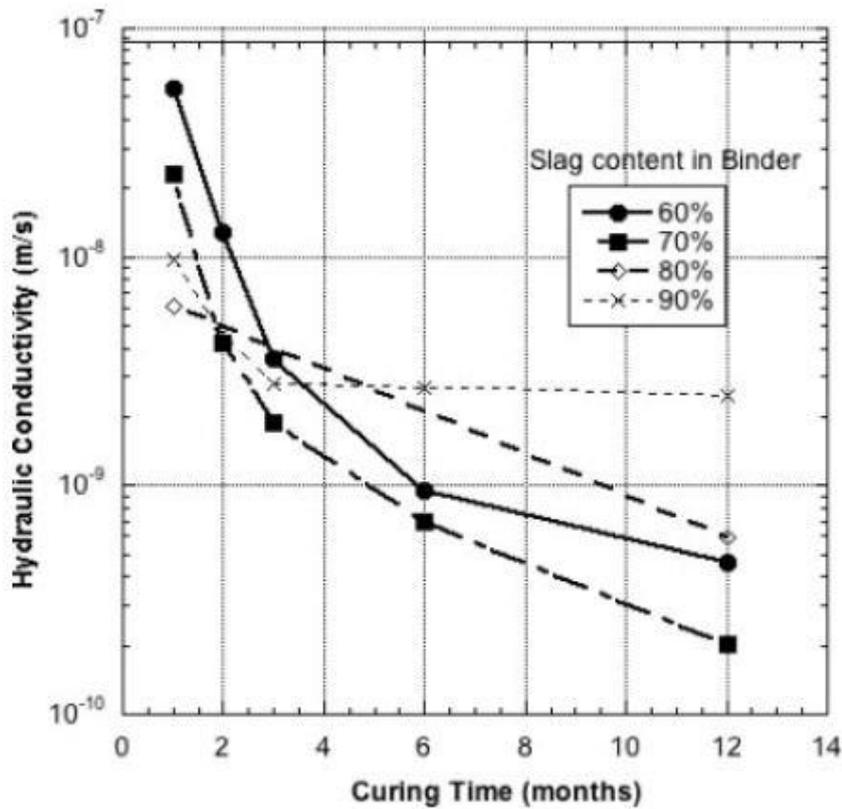


Figura 6. Andamento conducibilità idraulica in funzione della maturazione (Evans e Opdyke, 2005)

I risultati mostrano una diminuzione della conducibilità idraulica al crescere del tempo di maturazione. Risultati condivisi da tutte le miscele tranne che per quella avente un rimpiazzo del 90%, che nei mesi susseguenti al terzo ha una stabilizzazione del valore.

### 2.1.3.2 Prove di compressione monoassiale

Le prove non confinate sono state effettate su campioni aventi maturazione di un mese e che non hanno subito una precedente permeazione. I risultati ottenuti sono mostrarti nella figura 7:

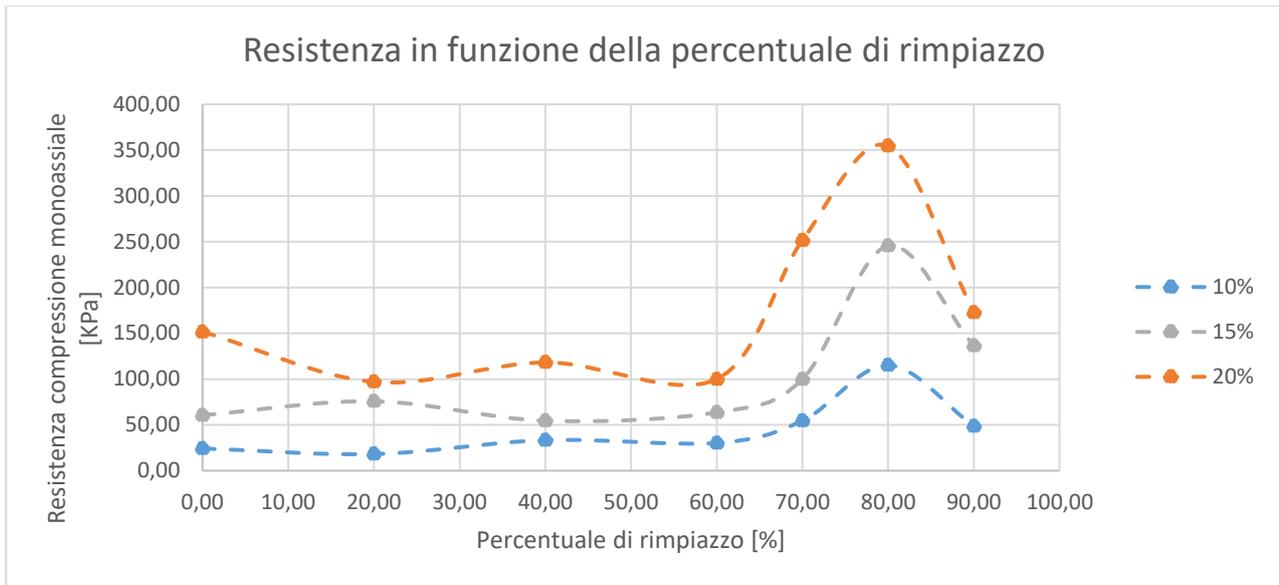


Figura 7. Prove di compressione non confinate per campioni avente maturazione di un mese (Evans e Opdyke, 2005)

La percentuale di cemento contenuta all'interno del campione avente un rimpiazzo del 60% non apporta una grande variazione di resistenza. Per tutte e tre le percentuali di cemento studiate, la massimizzazione della resistenza si ha per una percentuale di rimpiazzo contenuta tra il 70% e l'80%. Questo range è simile a quello che va a minimizzare la conducibilità idraulica come mostra la figura 7. La deformazione a rottura per i campioni analizzati è bassa, 3%, ma generalmente aumenta all'aumentare dell'ottimizzazione della resistenza.

## 2.2 Carreto et al. (2015)

L'obiettivo è quello di prevedere le prestazioni a lungo termine dei diaframmi di cemento bentonite. Sulla base dei risultati dei test di laboratorio si vuole definire la composizione ottimale del materiale per ogni specifica applicazione. A tale scopo si è testato in laboratorio il materiale usato a Santa Clara-a-Velha onastery (Portogallo) per la creazione di una barriera verticale. Lo studio è stato condotto con l'utilizzo di prove triassiali e test di conducibilità. Si sono valutate diverse miscele, diversi invecchiamenti e percorsi di carico per poter capire il comportamento del materiale.

### 2.2.1 Materiali

Lo studio verte su tre miscele differenti, le composizioni sono riassunte nella tabella seguente:

Composition	Water volume/1 m <sup>3</sup> of slurry (L/m <sup>3</sup> )	Bentonite mass/1 m <sup>3</sup> of slurry (kg/m <sup>3</sup> )	Cement mass/1 m <sup>3</sup> of slurry (kg/m <sup>3</sup> )
CB-5.7-0 1 m <sup>3</sup> water + 35 kg bentonite + 200 kg cement ⇒	929	32.5	186
CB-4.0-0 1 m <sup>3</sup> water + 50 kg bentonite + 200 kg cement ⇒	925	46.2	185
CB-4.3-0 1 m <sup>3</sup> water + 35 kg bentonite + 150 kg cement ⇒	943	33.0	141

Tabella 2. Composizioni delle miscele studiate (Carreto et al., 2015).

Il cemento utilizzato è un portland tipo CEMII-32.5N, mentre la bentonite è una bentonil CM10.

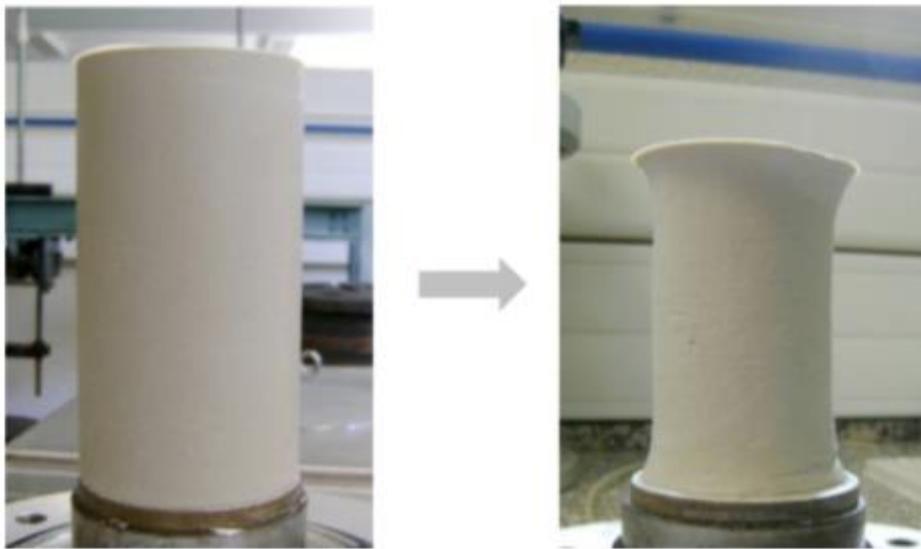
La costruzione dei provini è stata effettuata per step, il primo passo è stato l'idratazione della bentonite. E' stata mescolata acqua e bentonite usando un miscelatore ad alta velocità, la velocità di miscelazione è stata di 4.000 giri / min per un tempo di 5 minuti. Dopo il periodo di 24 ore richiesto per l'idratazione della bentonite, il cemento è stata aggiunto e miscelato con la sospensione di bentonite. Anche in questo caso è stato utilizzato il miscelatore ad alta velocità.

Come stampi sono stati utilizzati dei tubi acrilici cilindrici con un diametro interno di 100 mm e un'altezza di 300 mm. Dopo la disaerazione della miscela, gli stampi sono stati lentamente riempiti dal fondo con l'aiuto di un imbuto e un tubo, riducendo al minimo l'inglobamento d'aria. I tubi sono stati quindi tappati e posizionati su una superficie orizzontale. Durante la stagionatura, i campioni sono stati consolidati sotto il loro peso proprio. I campioni induriti in provette sigillate sono stati estrusi immediatamente prima del test. I campioni triassiali sono stati quindi ottenuti da campioni di 300 mm di altezza tagliando la lunghezza desiderata o fustellando mediante un tubo di diametro più piccolo.

## 2.2.2 Procedure

Le proprietà meccaniche ed idrauliche del materiale sono state analizzate mediante prove triassiali. Essendo le analisi effettuate basate sulla totale saturazione del campione è stata adottata una backpressure di 300KPa, che è stata sufficiente ad ottenere un valore di  $B$  pari a 0,95. Il campione è stato consolidato mediante una compressione isotropa.

Quando sono state applicate elevate pressioni di confinamento durante la consolidazione, i campioni sono stati deformati in modo non uniforme, come mostrato nella figura 8:



*Figura 8. Campione dopo la consolidazione mediante una pressione di 854 KPa (Carreto et al., 2015).*

Per ovviare a questo problema, la procedura adottata è stata la seguente: la fase di consolidamento è stata eseguita con un campione del diametro di 100 mm, che è stato poi rimosso dalla cella triassiale e rifinito per ottenere un campione cilindrico regolare con un diametro ( $D$ ) di 70 mm e un'altezza ( $H$ ) di circa due volte il diametro. Il campione più piccolo è stato quindi collocato all'interno della cella triassiale e susseguentemente saturato e riconsolidato.

Dopo la consolidazione, la conducibilità è stata determinata impostando un gradiente idraulico di 10 tra il fondo e la parte superiore del campione. Questi test sono stati eseguiti con acqua di rubinetto deaerata in quanto l'acqua distillata riduce significativamente la conducibilità del materiale.

La fase di rottura è stata indotta tramite una deformazione imposta di 0,02 [mm/min], la prova è proseguita fino al raggiungimento di una deformazione assiale del 20%.

## 2.2.3 Risultati

### 2.2.3.1 Compressione isotropa

Alcuni risultati rappresentativi della compressione isotropa sono inclusi nella Tabella 1. Un'analisi di questi risultati rivela che nonostante le reazioni di idratazione del cemento, il contenuto di acqua nella miscela è rimasto molto alto. Dunque dopo la solidificazione del materiale, si è ricavato un volume specifico molto elevato (9,12 – 11,77).

Composition	Curing time (weeks)	Specimen	Z (mm) <sup>a</sup>	Height (mm)	Diameter (mm)	$\nu_0$	$\lambda_{max}$	$\kappa$
CB-5.7-0	4	CB-5.7-0 (1)	119–259	140	70	9.12	1.69	—
		CB-5.7-0 (2)	130–260	130	70	9.48	1.64	—
	8	CB-5.7-0 (3)	130–260	130.5	70	9.56	1.85	—
		CB-5.7-0 (4)	0–128	128.5	70	9.27	1.80	—
		CB-5.7-0 (5)	105–260	140	70	9.11	—	—
		CB-5.7-0 (6)	10–150	140	70	9.09	—	—
		CB-5.7-0 (7)	50–250	200	99	9.32	1.40	0.10
		CB-5.7-0 (8)	50–250	200	99	9.23	1.63	0.06
		CB-5.7-0 (9) <sup>b</sup>	0–159.5	159.5	101.5	8.27	1.59	0.13
		CB-5.7-0 (10) <sup>b</sup>	0–159	159	101.5	8.74	1.54	0.07
		CB-5.7-0 (11)	72–262	188	97.5	9.59	1.43	0.06
	12	CB-5.7-0 (12)	5–145	140	70	9.08	1.72	—
		CB-5.7-0 (13)	145–289	130.5	70	9.53	1.69	—
		CB-5.7-0 (14)	0–145	140	70	9.04	1.79	—
		CB-5.7-0 (15)	150–280	131	70	9.60	—	—
		CB-5.7-0 (16)	100–240	140	70	9.19	—	—
16	CB-5.7-0 (17)	20–220	180	99	9.52	1.71	0.06	
	CB-5.7-0 (18)	20–220	180	97.5	9.42	1.66	—	
CB-4.0-0	8	CB-4.0-0 (19)	95–235	140	70	8.71	—	—
		CB-4.0-0 (20)	25–225	200	97	8.80	1.22	0.09
		CB-4.0-0 (21)	50–250	200	97	8.81	1.59	0.12
CB-4.3-0	8	CB-4.3-0 (22)	145–285	140	70	11.35	—	—
		CB-4.3-0 (23)	10–210	200	99	11.41	2.11	0.21
		CB-4.3-0 (24)	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 3. Dati delle miscele testate (Carreto et al., 2015).

I risultati dei test di compressione illustrati in Fig. 9 mostrano che il comportamento sforzo-deformazione della miscela cemento-bentonite è simile a quello dei terreni sovraconsolidati, avente in scala logaritmica dei tempi, due tratti lineari e un valore di snervamento. Il valore di snervamento non è imputabile ad un eventuale preconsolidazione meccanica, in quanto il campione ha sperimentato solo il suo piccolo peso proprio. Dopo aver superato questa tensione di snervamento, il materiale si è rivelato estremamente deformabile, con notevoli deformazioni volumetriche.

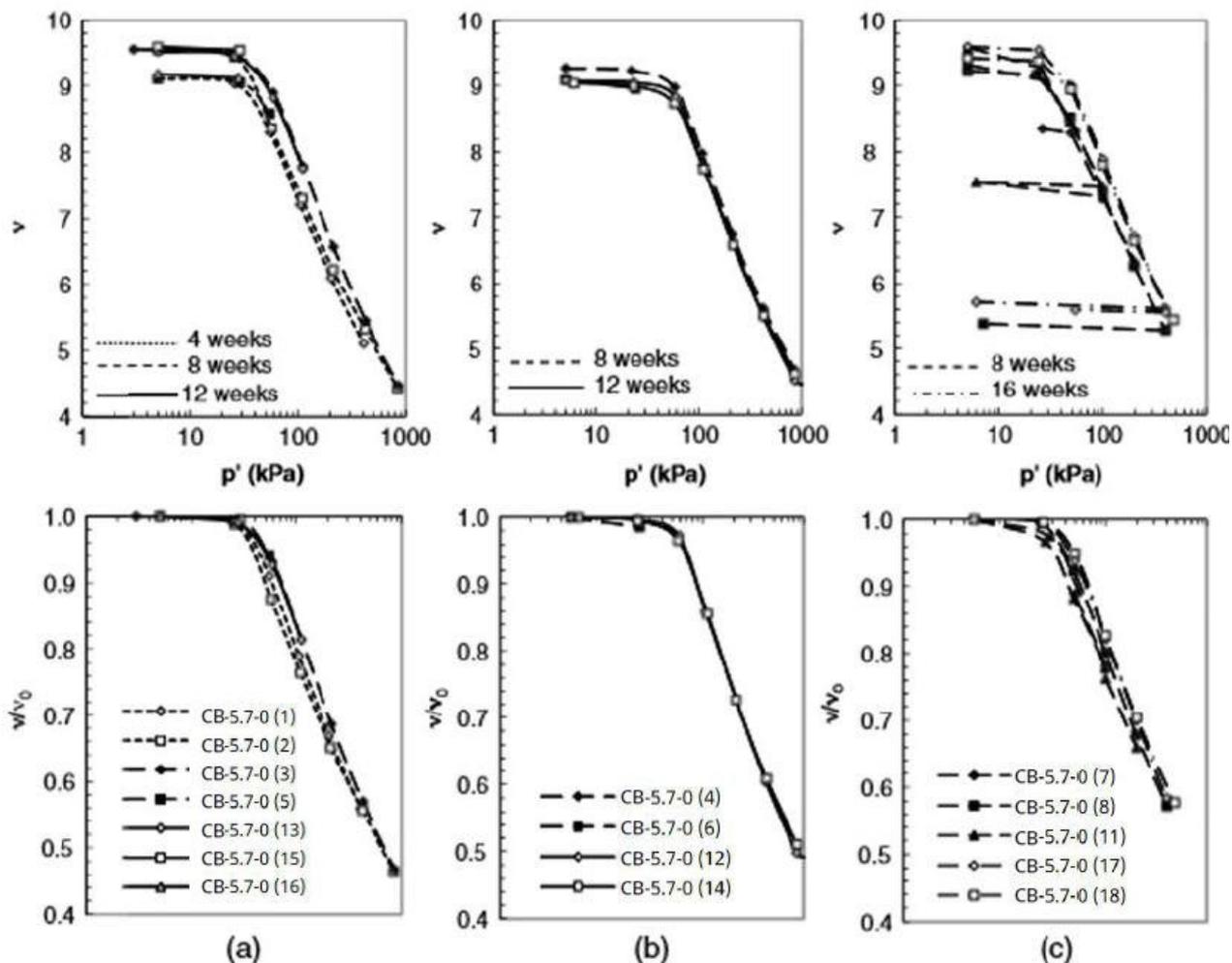


Figura 9. Prove di compressione (Carreto et al., 2015).

Per quanto riguarda le tensioni di snervamento delle miscele CB-5.7-0 mostrano dei valori contenuti nel range 29-52 KPa. Analizzando la figura 9. si può concludere che la pendenza del ramo di scarico è circa il 4-7% della pendenza massima del ramo di carico. Il rapporto tra l'indice di rigonfiamento e quello di compressibilità è significativamente minore di quello riscontrato per i terreni, che generalmente sono compresi fra dei valori di 1: 10 e 1: 5, mentre questo materiale ha valori medi nell'ordine di 1: 9 e 1: 0.5.

### 2.2.3.2 Effetto del tempo di maturazione

Per valutare l'effetto del tempo di maturazione sulla comprimibilità della miscela di cemento-bentonite, sono stati eseguiti test dopo diversi periodi di indurimento dei campioni. Come si può concludere osservando la figura 9, il tempo di maturazione ha avuto una certa influenza sulla tensione di snervamento dei campioni, indipendentemente dalla loro composizione e dimensione. Gli elementi induriti per periodi più lunghi ottengono rigidzze maggiori. La spiegazione del più

alto valore di resistenza è legata alla lenta evoluzione delle reazioni pozzolaniche, che sono responsabili della formazione di prodotti cementizi secondari che aumentano ulteriormente il legame tra le particelle. All'aumentare del carico applicato, le curve di compressione si sono avvicinate e alla fine si sono sovrapposte. Questo fenomeno si può ricondurre al fatto che una volta distrutto lo scheletro solido del campione, il materiale che ne risulta è circa il medesimo per tutte le miscele.

### 2.2.3.3 Effetto della composizione

Quando si analizza l'effetto della composizione sulla compressibilità, si può notare come i campioni di composizione B hanno un volume specifico iniziale inferiore, questo fenomeno è riconducibile alla loro maggiore quantità di particelle solide. Ma per tensioni efficaci superiori a 50 KPa questa differenza tende a scomparire, cosicché le curve di compressione delle composizioni CB-5.7-0 e CB-4.0-0 si vengano a sovrapporre, come illustrato nella Figura 10.

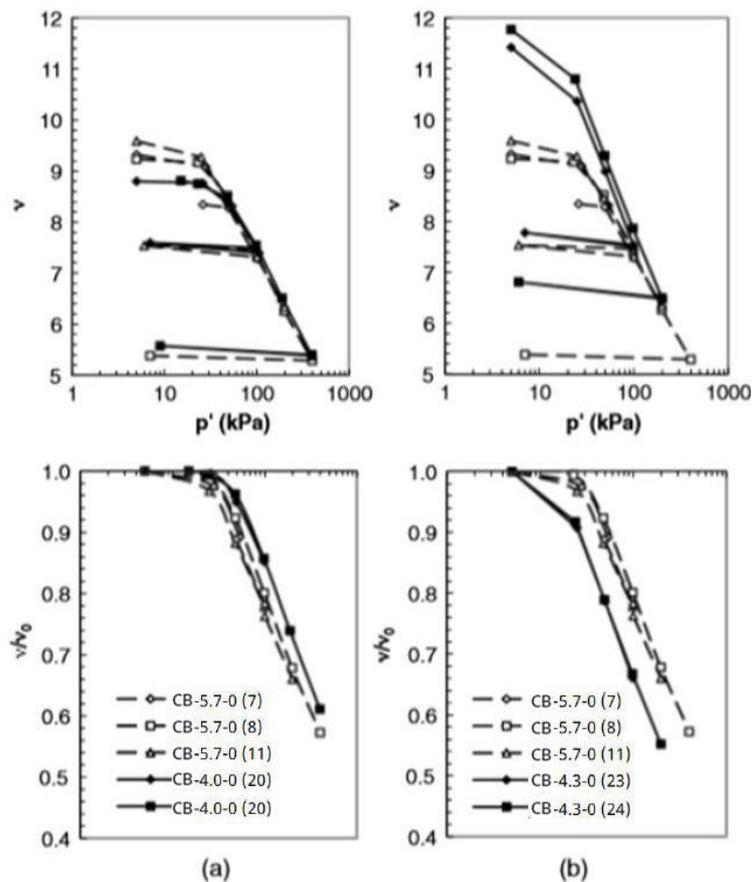


Figura 10. Prove di compressibilità (Carreto et al., 2015).

Il confronto tra i risultati del test di campioni con la stessa quantità di bentonite ma diversi contenuti di cemento rivela che una diminuzione della quantità di cemento aumenta il volume specifico iniziale della miscela, ma a discapito tensione di snervamento. In quanto diminuisce la tensione di snervamento e si ha un aumentato della comprimibilità, conseguenza dovuta alla formazione di una struttura cristallina meno densa.

### 2.2.3.4 Risultati prove triassiali

La Tabella 4 mostra alcuni risultati rappresentativi delle prove triassiali non drenate:

Specimen	Curing time (weeks)	Diameter (mm)	Height (mm)	$p'_c$ (kPa)	$q_{max}$ (kPa)	$q_{ult}$ (kPa)	$(q/p')_{max}$	$(q/p')_{ult}$	$G_i$ (MN/m <sup>2</sup> )	$G_{peak}$ (MN/m <sup>2</sup> )	Observations
CB-5.7-0 (25)a	8	99	200	—	54	—	3	—	8.3	2.4	Test concluded at $\varepsilon_1 = 1.1\%$
CB-5.7-0 (26)		69.5	140	25	35	26	3	2.46	7.0	0.9	Test concluded at $\varepsilon_1 = 3.6\%$
CB-5.7-0 (6)		70	140	25	31	24	3	3	13.0	0.9	—
CB-5.7-0 (7)		67	104.5	100	100	68	2.47	2.37	12.3	1.1	—
CB-5.7-0 (27)b		70	123.5	410	370	244	2.40	2.17	74.0	5.4	—
CB-5.7-0 (28)c		66.2	71.9	200	225	217	2.29	2.25	25.7	2.7	Test concluded at $\varepsilon_1 = 5\%$
CB-5.7-0 (29)c		69.5	140	—	80	74	3	2.58	24.0	0.8	—
CB-5.7-0 (30)c		66.5	129.5	194	181	114	2.14	1.84	15.7	2.5	—
CB-5.7-0 (11)		66.7	131.4	190	190	122	2.50	2.36	26.3	3.2	—
CB-5.7-0 (31)	12	70	130	27	43	38	3	2.77	16.7	2.0	Test concluded at $\varepsilon_1 = 4.4\%$
CB-5.7-0 (32)		70	116	400	367	228	2.26	2.11	20.3	3.6	—
CB-5.7-0 (33)	16	70	136.5	400	372	236	2.18	2.08	34.0	3.6	—
CB-4.0-0 (19)	8	70	139.7	25	36	28	3	2.27	9.0	1.2	—
CB-4.0-0 (20)		69.6	137.5	100	96	70	2.33	2.04	11.3	1.5	—
CB-4.0-0 (21)		70	124.5	400	388	279	2.29	2.04	35.3	6.1	Test concluded at $\varepsilon_1 = 14\%$
CB-4.3-0 (22)	8	70	140	10	8.5	7.0	1.71	1.30	0.5	0.3	—
CB-4.3-0 (23)		70	138.7	96	95	65	2.39	2.19	10.3	1.5	—
CB-4.3-0 (24)		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.

Tabella 4. Risultati prove triassiali (Carreto et al., 2015).

L'analisi dei dati ha rivelato due comportamenti distinti associati alla pressione alla quale i campioni sono stati consolidati ( $p'_c$ ). Il confine tra questi diversi comportamenti è determinato dalla tensione di snervamento determinato nella compressione isotopa ( $p'_y$ ).

### 2.2.3.4.1 Campioni consolidati con una tensione efficace minore di quella di snervamento

I campioni con maturazione di otto settimane consolidati con pressioni inferiori a  $p'_y$  (CB-5.7-0 (26) e CB-5.7-0 (6)) hanno mostrato uno sforzo deviatorico massimo maggiore dello sforzo medio effettivo a cui sono stati consolidati. Il picco di resistenza si ha per livelli deformativi compresa tra 1-2% (Figura 11). La tensione di snervamento dei campioni CB-5.7-0 (26) e CB-4.0-0 (19) varia da 29 a 32 KPa, che equivale al massimo sforzo deviatorico raggiunto. Nel post picco, lo sforzo è diminuito, stabilizzandosi ad un valore costante.

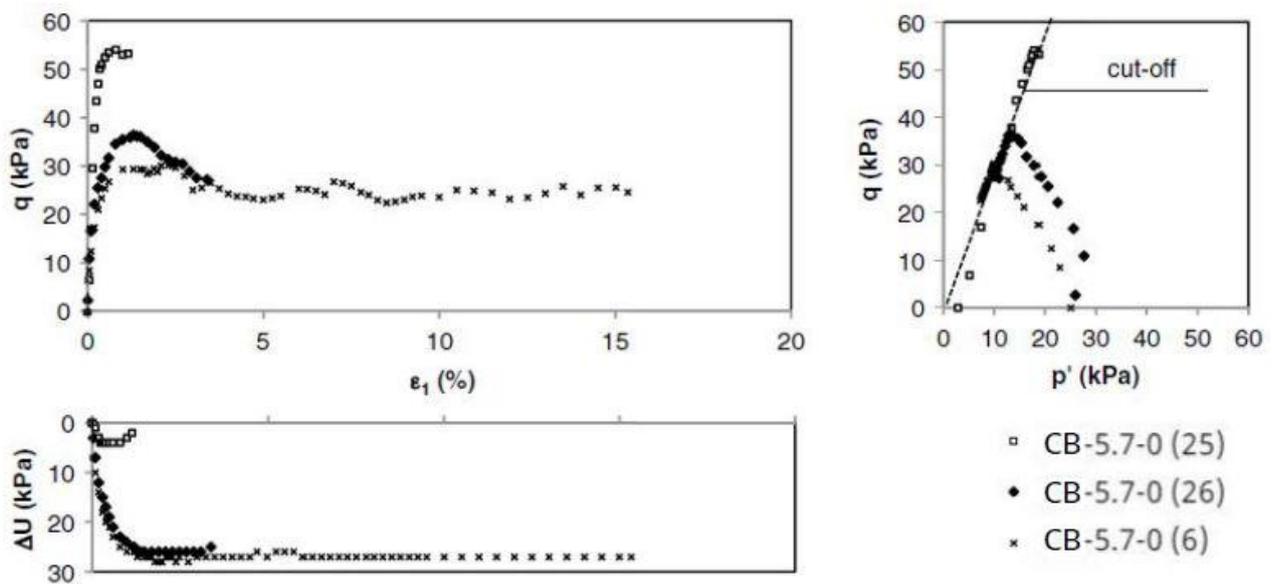


Figura 11. Andamento prove triassiali (Carreto et al., 2015).

In termini di percorso di tensioni efficaci (diagramma  $p'$ - $q$ ), i campioni hanno mostrato un accumulo di sovrappressione interstiziale tipica di campioni normalmente o leggermente sovraconsolidati.

lo sforzo deviatorico e le deformazioni assiali associate sono dello stesso ordine di grandezza di quelle ottenute con prove di compressione monoassiale su provini con la stessa composizione e tempo di maturazione. Per quanto riguarda il modulo di taglio, esso è paragonabile a quello dei terreni.

Il confronto tra i risultati delle prove triassiali condotte sui campioni con diverso contenuto di bentonite ma la stessa quantità di cemento e lo stesso tempo di maturazione (Composizioni A e B) ha rivelato differenze quasi trascurabili nel comportamento a rottura (Fig. 12).

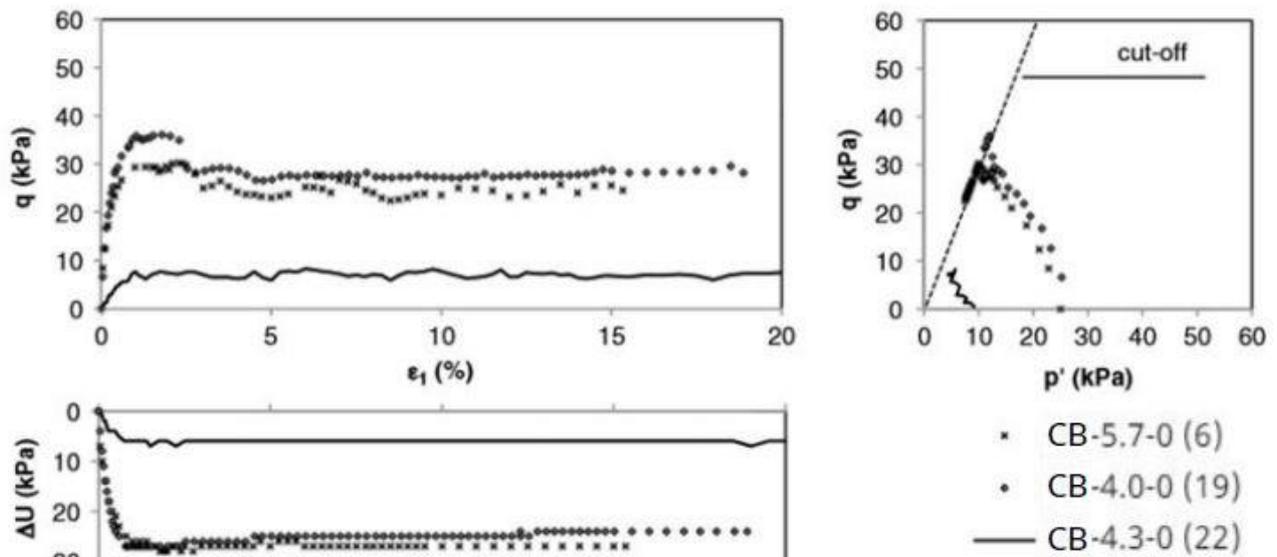


Figura 12. Andamento prove triassiali (Carreto et al., 2015).

Si può notare come il comportamento a rottura del campione CB-4.0-0 (19) sia simile a quello ottenuto per il campione CB-5.7-0 (6), sebbene  $q_{max}$  fosse leggermente più alto. Per quanto riguarda l'influenza del contenuto di cemento, è stato osservato che anche per carichi molto bassi, i campioni aventi la composizione C mostrano un comportamento meno rigido rispetto alle altre composizioni.

#### 2.2.3.4.2 Campioni consolidati ad una tensione efficace maggiore di quella di snervamento

Quando la miscela indurita viene consolidata ad uno sforzo di confinamento superiore alla tensione di precompressione, la risposta, in termini di comportamento sforzo-deformazione, viene modificata a causa della distruzione della struttura solida formata grazie all'indurimento del cemento. Durante la prova a rottura, è stato osservato un comportamento quasi-elastico per piccole deformazioni assiali, seguito da un comportamento elastoplastico associato ad una deformazione tra 1 e 3% (Figura.13).

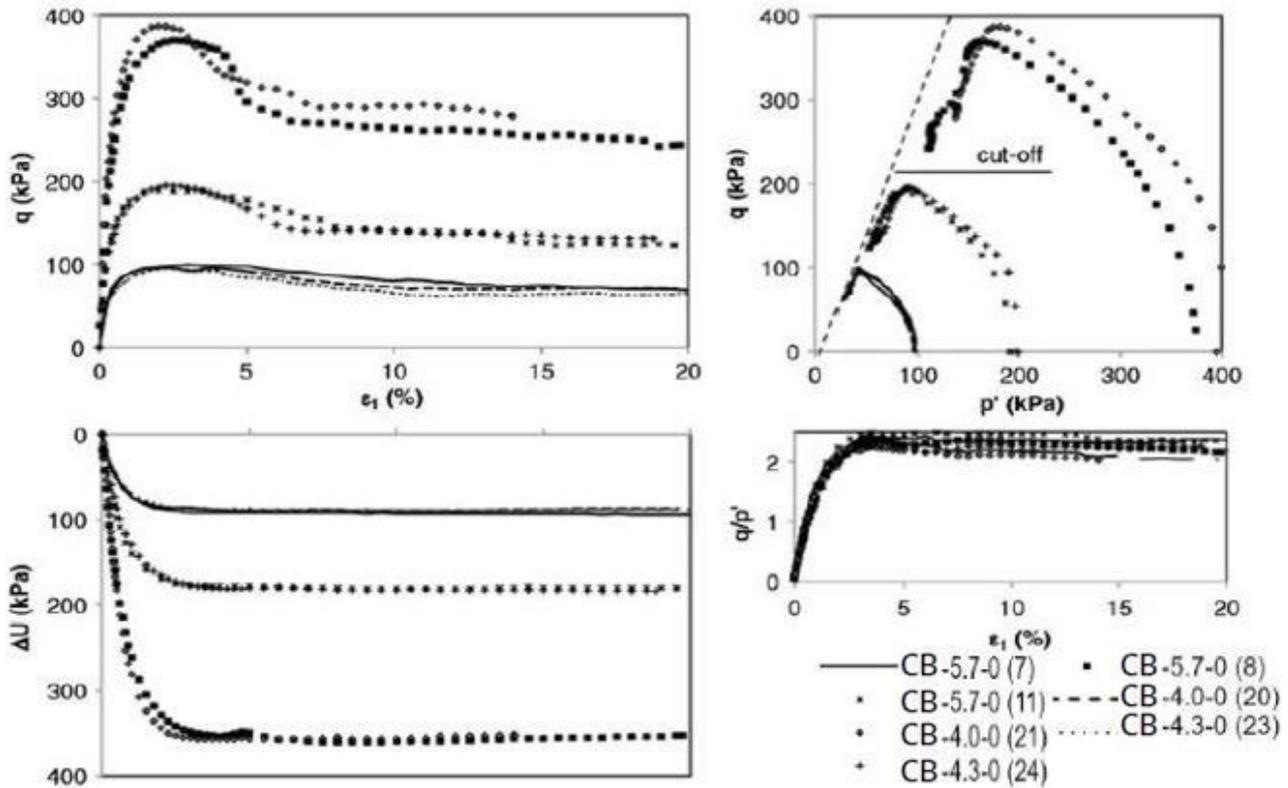


Figura 13. Prove triassiali su campioni consolidati a tensioni elevate (Carreto et al., 2015).

Lo sforzo deviatorico è aumentato fino a raggiungere un valore compreso tra 0,92 e 1 volte  $p'_c$ , indipendentemente dalla composizione del materiale. Dopo il raggiungimento della tensione di snervamento è seguita una brusca riduzione del valore dello sforzo deviatorico, che ha continuato a diminuire con un andamento asintotico. In questo caso il percorso di carico è riconducibile ad un materiale normal consolidato o leggermente sovraconsolidato. Andando a diagrammare i risultati sul piano  $q/p' - p'/p'_c$ , si può riscontrare che dopo aver raggiunto il valore di picco, il percorso di sollecitazione si sviluppa lungo una linea discendente con una pendenza di circa 3:1 (Fig. 14).

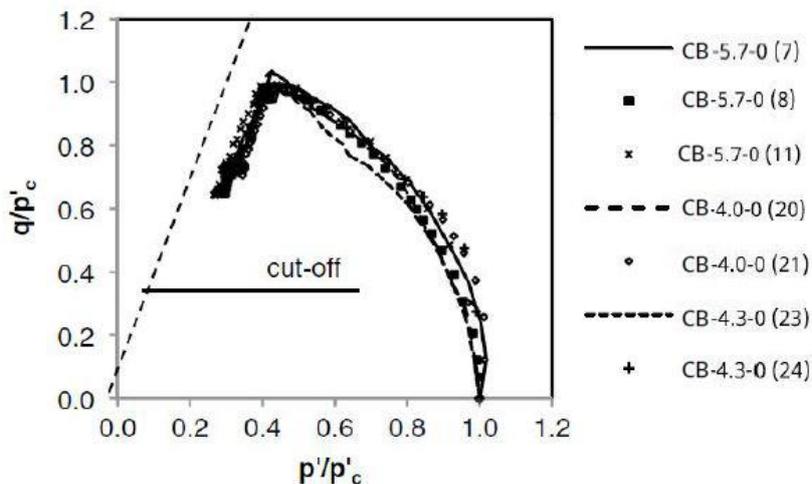


Figura 14. Risultati della prova triassiale su  $q/p' - p'/p'_c$  (Carreto et al., 2015).

Un'altra conclusione tratta da questa sperimentazione è che i cambiamenti nella composizione, sia nel contenuto di bentonite che nel contenuto di cemento, non si riflettono sul comportamento a rottura. Questa considerazione è valida fintanto che si è effettuato una consolidazione con una tensione efficace maggiore della tensione di rottura del materiale. Questo fenomeno è dovuto alla completa rottura dello scheletro solido in fase di consolidazione, che causa un cambiamento nel comportamento meccanico del materiale, causando una risposta simile per tutte e tre le composizioni.

### 2.2.3.5 Risultati prove di conducibilità

Quando il cemento viene aggiunto alla miscela di acqua e bentonite, vi è un aumento a breve termine della conducibilità dovuto all'aggregazione delle particelle e alla conseguente creazione di vuoti. Attraverso questi vuoti, può instaurarsi una filtrazione. Le reazioni chimiche successive sono responsabili di una diminuzione della conducibilità, in quanto i vuoti presenti nel materiale vengono progressivamente chiusi dai prodotti della reazione di idratazione del cemento. A lungo termine, la comunicazione tra i vuoti viene diminuita facendo raggiungere al materiale valori di bassa conducibilità.

Carreto et al. (2015) hanno condotto prove di conducibilità solo su campioni consolidati ad una tensione efficace maggiore di quella di snervamento. Sebbene fosse prevedibile una diminuzione della conducibilità con un tempo di maturazione crescente, ciò non è stato confermato durante questo programma sperimentale (Fig. 15).

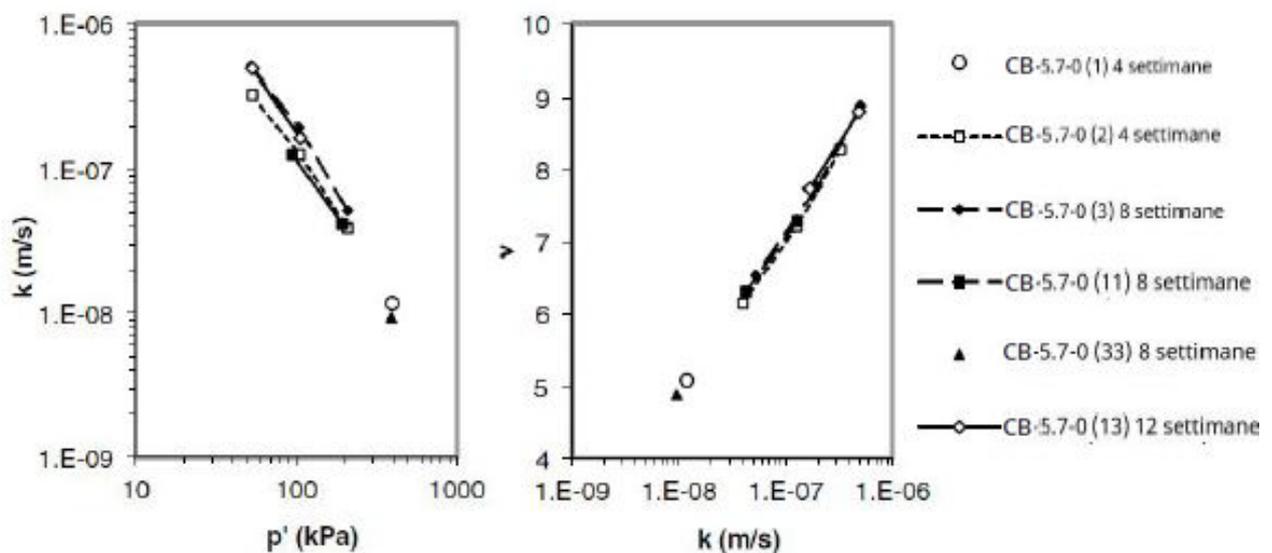


Figura 15. Valutazione conducibilità idraulica al variare del carico e del tempo (Carreto et al., 2015).

Il fatto che i campioni siano stati testati solo dopo 4 e 12 settimane di maturazione, può spiegare l'incapacità di rilevare potenziali differenze della conducibilità per differenti periodi di maturazioni. Per quanto riguarda il legame tra la tensione di consolidazione e la conducibilità, è stata rilevata una diminuzione della conducibilità all'aumentare tensione efficace applicata. L'aumento della sollecitazione media effettiva da 50 a 200 KPa ha ridotto la conducibilità del materiale di un ordine di grandezza, e l'ulteriore aumento della pressione di consolidazione a 400 KPa ha ridotto questo parametro di circa 50 volte, il che è in accordo con la riduzione del volume specifico.

## 2.3 Fratalocchi et al. (2005)

Fratalocchi et al. (2005) hanno svolto un programma di sperimentazione per valutare le performance delle miscele cemento-bentonite all'interno di un ambiente aggressivo, in particolare valutando l'effetto dell'esposizione ad un fluido contaminato sulla conducibilità. Per tale ragione sono state eseguite delle prove in ambienti molto aggressivi, per un tempo sufficientemente lungo, con le quali si sono potuti manifestare i cambiamenti chimici e fisici della miscela. Gli autori hanno voluto mostrare la differenza in termini di conducibilità idraulica del materiale permeato da acqua e fluido contaminato.

### 2.3.1 Materiali

Fratalocchi et al. (2005) hanno utilizzato un composto di cemento-bentonite, preparata in laboratorio in accordo con le procedure raccomandate dal ETC8(1993). Per la creazione del materiale è stata miscelata la bentonite con l'acqua. Le proporzioni seguite sono state 60 parti di bentonite e 1000 di acqua. Dopo ventiquattro ore di idratazione è stato aggiunto il cemento. È stato utilizzato un cemento III/A (cemento con aggiunta di scorie d'altoforno), le proporzioni utilizzate sono state 240 parti ogni 1000 di acqua. Per migliorare la lavorabilità e le performance del materiale finale è stato aggiunto un additivo (5g ogni litro di acqua). Di seguito si riporta una tabella riassuntiva della miscela studiata:

Codice	Cemento [g]	Bentonite [g]	Acqua [g]
CB-4-0	240	60	1000

Tabella 5. Miscela studiata da Fratalocchi et al. (2005).

I campioni sono stati realizzati in cilindri di 7 cm di diametro e 10cm di altezza. La maturazione è avvenuta o in acqua o all'interno di percolato. Per ottenere più velocemente i risultati di durabilità, si è proceduto con un ricambio giornaliero del percolato a contatto con il campione. Mediante questa procedura il pH e la composizione chimica dell'inquinante non sono variati nel tempo a causa delle reazioni con il materiale testato.

### 2.3.2 Procedure

Le prove di conducibilità idraulica sono state effettuate sia mediante permeazione di acqua che con percolato. Per quanto riguarda il campione analizzato con l'acqua, per l'istaurarsi del moto di filtrazione è stato impostato un gradiente idraulico ( $i$ ) di 20. Nel caso della permeazione mediante l'inquinante è stato impostato un gradiente molto più elevato ( $i=200$ ), in questo modo si è potuto ridurre i tempi d'esecuzione della prova.

### 2.3.3 Risultati

Per quanto riguarda i campioni immersi in percolato non ci sono danni o cricche visibili durante i primi 4 mesi di stagionatura in ambiente chimicamente attivo. Solo dopo sei-sette mesi sono apparse sulle superfici esterne dei campioni delle cricche. Lo stato di degrado dei campioni così trovato è sovrastimato rispetto alla realtà, in quanto l'attacco chimico in sito è minore. Per quanto riguarda la resistenza meccanica, le prove fatte su campioni maturati in acqua e quelli maturati in percolato le resistenze per medesimi tempi di maturazione sono risultate uguali.

La figura 16 mostra l'evoluzione della conducibilità idraulica di due campioni, uno permeato con acqua ed uno mediante percolato:

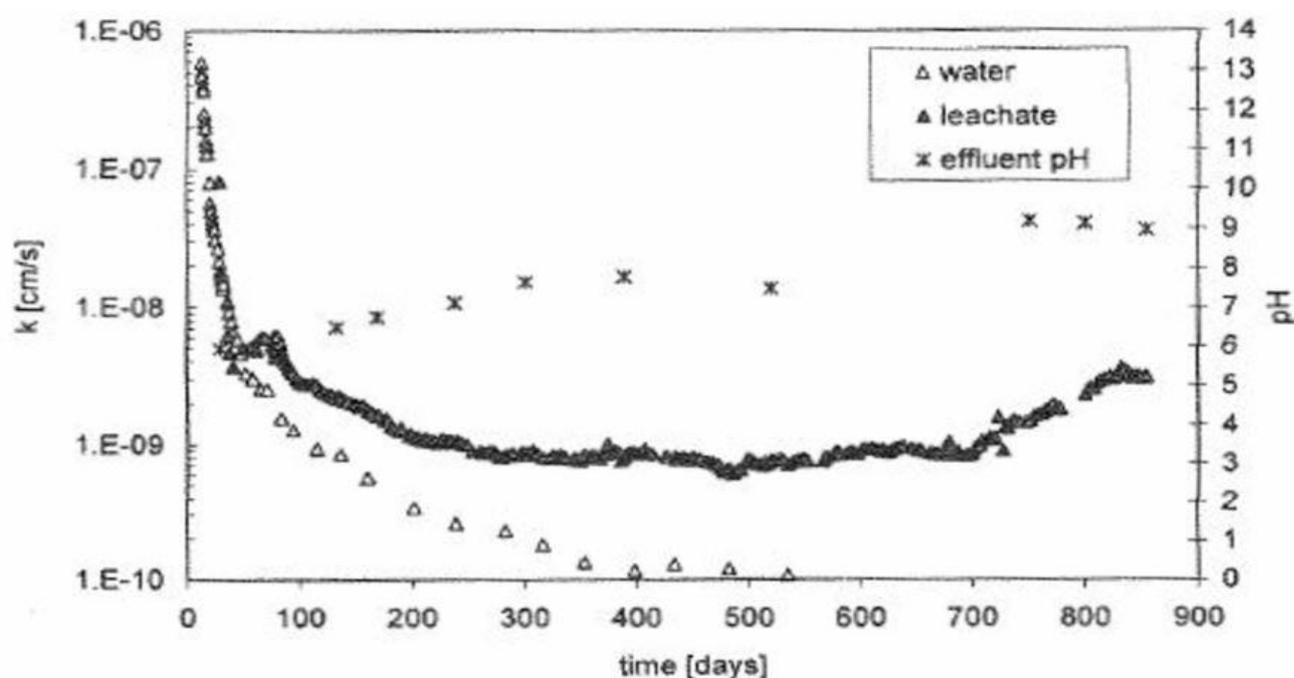


Figura 16. Andamento della conducibilità per differenti liquidi di permeazione (Fratolocchi et al., 2005).

L'andamento della conducibilità idraulica del campione permeato con acqua mostra dei valori molto bassi fin dal primo mese di maturazione (meno di  $1E-8$  cm/s), questo fenomeno si può ricondurre al grande contenuto di additivi in miscela. Mentre con l'avanzare del tempo si nota un aumento di  $k$  nel materiale avente come liquido irrorante il percolato. Questo andamento è imputabile alle reazioni secondarie. Per via dei solfati contenuti nel percolato, si manifesta la creazione di ettringite secondaria. Essendo una reazione espansiva ed essendo il campione lateralmente vincolato, questa reazione manda a rottura porzioni del campione facendo aumentare l'indice dei vuoti e quindi la conducibilità. Un altro fattore che influisce negativamente sulla conducibilità è il fenomeno della dissoluzione del carbonato, in quanto l'acidità della soluzione acquosa discioglie la matrice solida del materiale.

## 2.4 Garvin and Hayes (1999)

Anche lo studio di Garvin and Hayes (1999) ha come oggetto la compatibilità chimica tra le miscele di cemento-bentonite ed i principali contaminanti. A tal fine si vuole migliorare la conoscenza della risposta del materiale e migliorare le prescrizioni sulle percentuali da utilizzare a seconda dell'inquinante presente. Le miscele studiate contengono rimpiazzati con cenere di combustibile, anche se meno utilizzate rispetto a quelle con rimpiazzo di scorie di altoforno, gli autori hanno voluto valutare la migliore compatibilità chimica di tale materiale.

### 2.4.1 Materiali

I materiali principalmente utilizzati da Garvin and Hayes (1999) sono stati cemento portland e bentonite sodica. Le principali miscele preparate in laboratorio contengono un rimpiazzo di cenere di combustibile, mentre la miscela CBG-5-50 contiene scorie d'altoforno e CB-5-0 è priva di rimpiazzo. Un riassunto delle miscele utilizzata è presente nella tabella 3:

Mix no.	Bentonite	ggbs	pfa	PC	Total cement
CBF-3-30	40	n/a	36	84	120
CBF-5-30	40	n/a	60	140	200
CB-3-0	40	n/a	n/a	200	200
CBG-5-50	40	40	100	60	200
CBF-3.75-25	40	n/a	37.5	112.5	150
CBF-3.75-40	40	n/a	60	90	150
CBF-7.5-25	40	n/a	75	225	300
CBF-7.5-40	40	n/a	120	180	300

Tabella 6. Miscele studiate, parti per un litro d'acqua (Fratalocchi et al., 2005).

Il peso di ogni materiale è espresso in Kg ed è riferito ad un litro d'acqua. Le analisi chimiche dei materiali utilizzati per la creazione delle miscele sono riportati nella tabella 4:

Oxide	pfa (%)	ggbs (%)	PC (%)	Bogue equivalent (%)
CaO	1.88	42.78	63.57	C <sub>3</sub> S 52
SiO <sub>2</sub>	49.41	33.09	22.08	C <sub>2</sub> S 20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24.21	12.59	5.15	C <sub>3</sub> A 10
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.99	0.4	3.55	C <sub>4</sub> AF 8
NaO <sub>2</sub>	0.57	0.21	0.22	CS <sub>2</sub> 5
MgO	1.62	7.59	2.4	
K <sub>2</sub> O	3.21	0.38	0.7	
SO <sub>3</sub>	0.76		3.12	
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.07			
LOI	2.89	0.4		
Insolubles		0.07		
Free CaO		0		

Tabella 7. Analisi chimiche dei materiali (Fratalocchi et al., 2005).

Con ggbs si intendono le scorie di alto forno, pfa rappresenta la sigla per indicare le polveri di combustibile e PC e il cemento portland.

## 2.4.2 Procedure di preparazione della miscela

Le procedure di creazione della miscela e della maturazione sono state eseguite per step:

1. Miscelazione della bentonite con l'acqua per una durata di cinque minuti utilizzando un miscelatore meccanico.
2. Idratazione della bentonite per un periodo di 24h
3. Unione del cemento con le dovute sostituzioni di polvere o scorie alla miscela
4. Miscelazione dell'impasto mediante un miscelatore meccanico
5. Controllo dell'omogeneità del composto e susseguente colata all'interno degli stampi

## 2.4.3 Prove

Le tipologie di prove che si sono effettuate sono state: prove ad immersione, attacco chimico su campione confinato e SEM.

### 2.4.3.1 Prova di immersione

Per la preparazione del campione per il test di immersione la miscela è stata colata all'interno di un modulo cilindrico di diametro pari a 100 mm ed una altezza di 350 mm. Dopo ventotto giorni di maturazione in acqua il campione è stato rimosso dal cassero ed inserito all'interno di una miscela chimicamente aggressiva per un minimo di sei mesi. La miscela è stata cambiata mensilmente per tutta la durata della prova. I dati riguardanti la prova sono stati raccolti mensilmente e riguardano il peso e le condizioni del campione. Si riporta di seguito la foto di un campione soggetto ad attacco chimico:

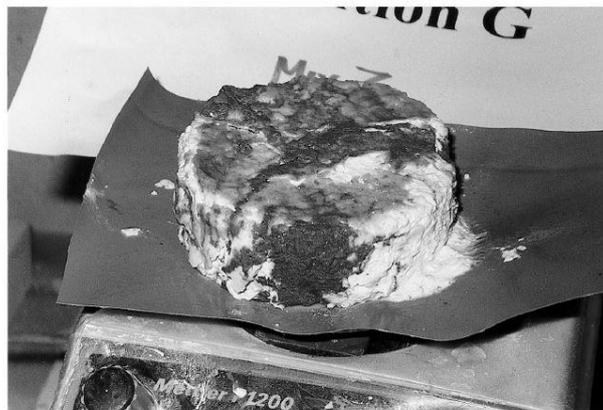


Figura 17. Campione soggetto alla prova d'immersione (Fratolocchi et al., 2005).

Al termine dei sei mesi di prova si è stimata una classifica basata sulla resistenza dimostrata dalla miscela. Si riportano i criteri di valutazione utilizzati:

- Molto debole (VP)    Campione viene distrutto entro il primo mese di immersione. Le variazioni di peso dopo 1 mese, fintanto che il campione era in grado di essere pesato, erano generalmente 50%.
- Povero (P)            Il campione ha una resistenza molto bassa all'attacco chimico ed è durato meno della metà del periodo sperimentale. Il danno visivo era evidente. La variazione di peso è del 50%.
- Moderato (M)        Il campione ha una certa resistenza all'attacco chimico. Il campione riesce a non degradarsi completamente entro la fine del test. Visivamente l'attacco chimico è evidente ed il peso del campione varia tra il 15% ed il 50%.
- Buono (G)            Il campione presenta una resistenza all'attacco chimico. Il peso del campione alla fine della prova varia di circa il 15%.
- Molto buono (VG)   Forte resistenza chimica. Il peso del campione al termine dei sei mesi presentava una variazione di peso del 5%.

### 2.4.3.2 Attacco chimico su campione confinato

Per questa tipologia di prova si è colato il campione all'interno di un cilindro di diametro 100mm, questo tubo conferisce un confinamento radiale al campione. Dopo la maturazione della miscela si è messe a contatto la faccia superiore del campione con una sostanza chimicamente attiva e si instaura un moto di filtrazione. Il gradiente è dettato dalla geometria della prova, in questo caso la colonna è alta 2,5 m. Si riporta di seguito lo schema utilizzato per la prova:

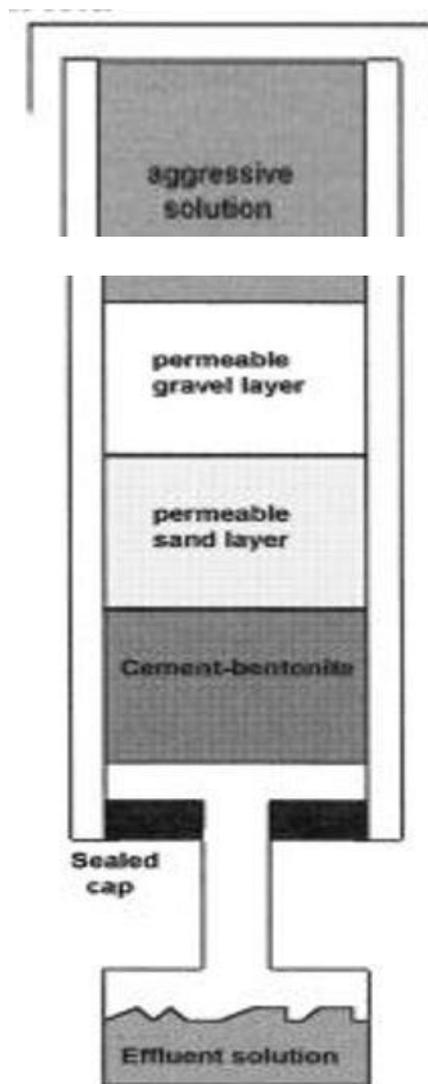


Figura 18. Attacco chimico su campione confinato, schema di prova (Fratolocchi et al., 2005).

Questa tipologia di prova è rappresentativa del materiale in sito, in quanto ricrea le modalità di attraversamento del fluido attraverso la barriera verticale. Questo tipo di prova è stato utilizzato per testare le miscele CBF-3-30, CBF-5-50, CB-3-0 e CBG-5-50. Le condizioni dei campioni sono state

testate dopo 3, 6 e 12 mesi. I dati raccolti riguardano l'osservazione di eventuali crepe, indebolimento e colore della miscela, a cui sono seguite delle analisi mediante il SEM (analisi mediante microscopio elettronico).

Le soluzioni utilizzate sono riportate nella figura 19:

- Solution A: sodium sulphate,  $[\text{SO}_4^{2-}] = 4200 \text{ mg/l}$ ;
- Solution B: sodium sulphate,  $[\text{SO}_4^{2-}] = 4200 \text{ mg/l}$  (pH = 2);
- Solution C: sodium sulphate,  $[\text{SO}_4^{2-}] = 1000 \text{ mg/l}$ ;
- Solution D: magnesium sulphate,  $[\text{SO}_4^{2-}] = 1000 \text{ mg/l}$ ;
- Solution E: phenol = 10 000 mg/l; and
- Solution F: sulphuric acid (pH = 2).

*Figura 19. Soluzioni utilizzate (Fratalocchi et al., 2005).*

## 2.4.4 Risultati

I risultati dei test di immersione sono riportati nella tabella 3:

Mix no.	A	B	C	D	E	G
CBF-3-30	VP	VP	VP	VP	M	VP
CBF-5-30	VP	VP	M	M	M	VP
CB-3-0	M	P	P	VP	M	
CBG-5-50	G	VP	VP	G	M	VP
CBF-3.75-25	VP	VP	P	P	M	VP
CBF-3.75-40	P	VP	P	P	P	VP
CBF-7.5-25	G	P	G	VP	G	P
CBF-7.5-40	VP	P	G	G	G	P

*Tabella 8. Risultati prove di immersione (Fratalocchi et al., 2005).*

Per quanto riguarda la soluzione A, è stato osservato un deterioramento di tutti i campioni, particolarmente accentuato per i campioni contenenti PC/pfa. Anche per quanto riguarda la

soluzione B si è riscontrato una rapida deteriorazione dei campioni. La soluzione C causa la rottura dei campioni per reazioni espansive, i campioni con alto contenuto di pfa hanno reagito meglio a questo tipo di attacco. I risultati dell'utilizzo della miscela D sono analoghi a quelli riscontrati per la C. La deteriorazione provocata dalla soluzione E ha provocato una caduta di rigidità del materiale, senza però la presenza di fratture disintegrazione del campione. La soluzione G ha deteriorato molto velocemente i campioni, tutti i campioni hanno riportato una bassa resistenza per attacco chimico dei solfati.

Le seguenti foto mostrano il deterioramento di alcuni campioni sottoposti alla prova su campione confinato:

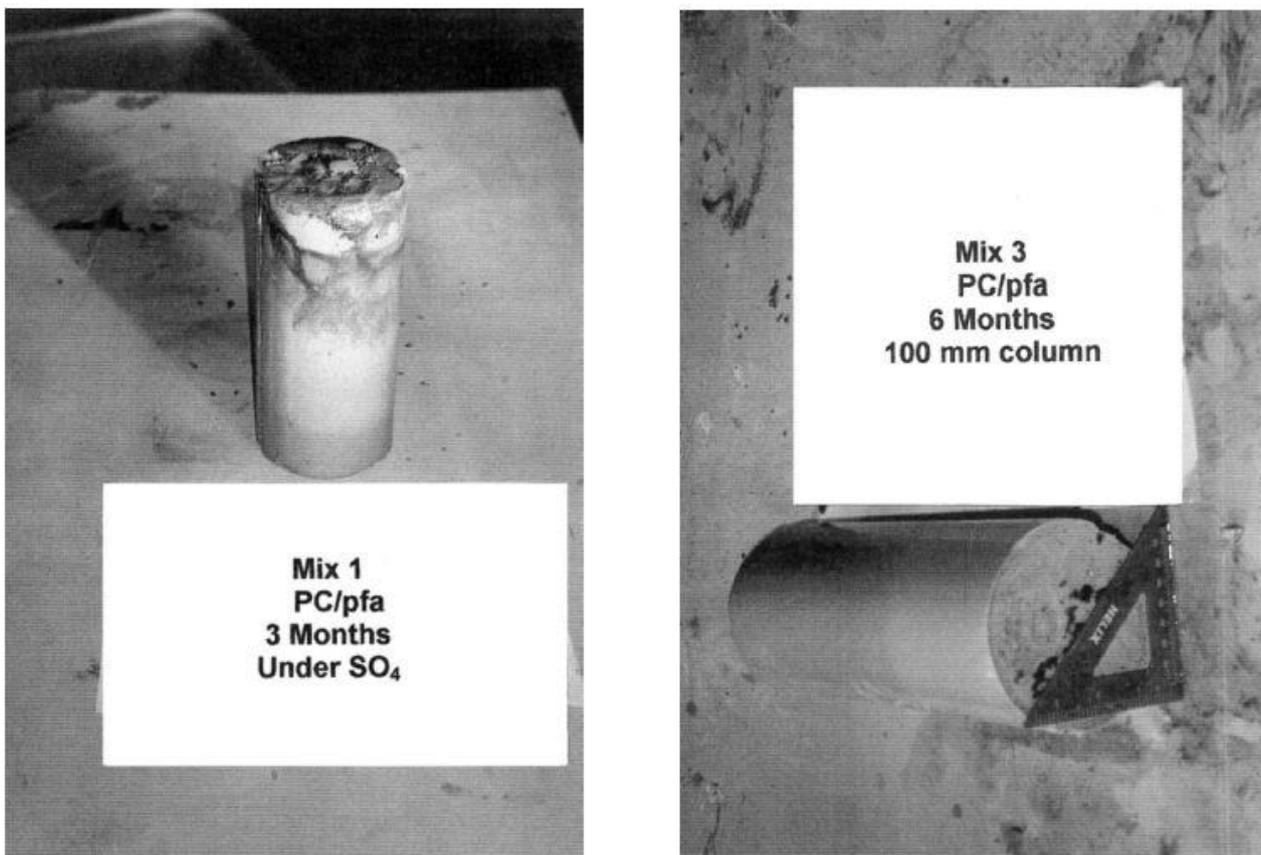


Figura 20. Campioni sottoposti all'attacco chimico con campione confinato (Fratolocchi et al., 2005).

Tutti i campioni al termine della prova si presentano in buone condizioni. Dopo tre mesi dall'inizio della prova non si vedono reazioni particolari dei campioni alla soluzione chimicamente attiva. Trascorsi sei mesi dalla partenza del test, le facce superiori dei campioni CBF-3-30, CBF-5-30 e CB-3-0 presentano una piccola perdita di rigidità. Trascorsi i dodici mesi, si è riscontrata una

accelerazione del deterioramento delle miscele, mentre si è riscontrata una forte resistenza della miscela CBG-5-50.

Le analisi mediante il SEM sono state rivolte all'individuazione dell'ettringite ed alla determinazione della loro deteriorazione da parte dell'attacco dei solfati. Gli elementi riscontrati dalle analisi sono riassunti nella seguente tabella:

Feature	Mix BCF-3-30	Mix BCF-5-30	Mix BC-3-0	Mix BCG-5-50
Talc CSH	X	X	X	X
Fibres Aft/AFm	X			
Hexagonal Aft/AFm				
Clinker/slag grains				
pfa	X			X
CaOH				
Ca-Al-H			X	
SEM analysis for ettringite in chemically attacked samples (X)				
Depth (mm)	Mix BCF-3-30	Mix BCF-5-30	Mix BC-3-0	Mix BCG-5-50
10	X	X	X	X
50	X	X		X

Tabella 9. Analisi mediante il SEM (Fratolocchi et al., 2005).

Si riportano di seguito alcune fotografie riguardanti le analisi:

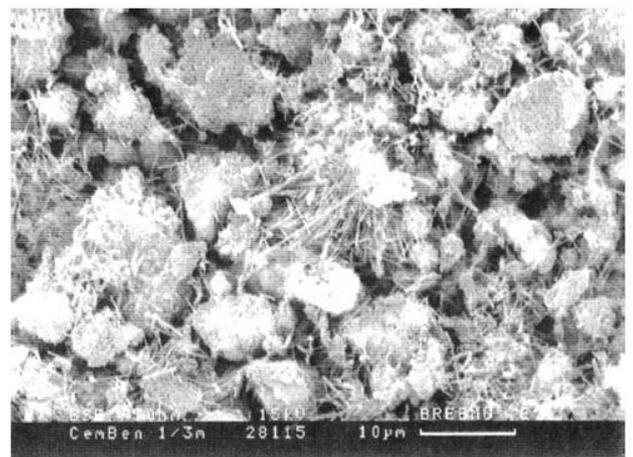
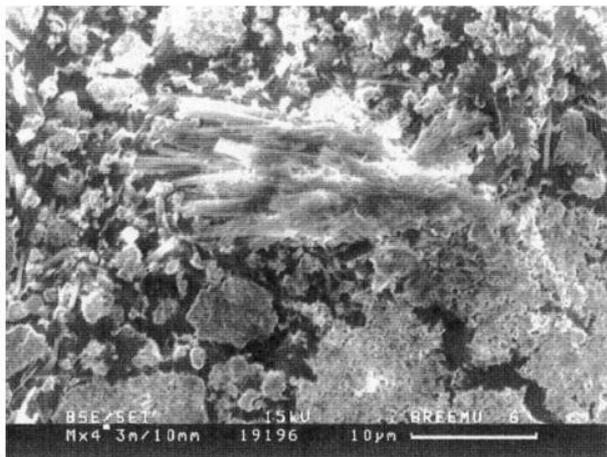


Figura 21. Riscontro delle fibre di ettringite mediante SEM (Fratolocchi et al., 2005).

## 2.5 Joshi et al. (2010)

La ricerca eseguita da Joshi et al. (2010) verte sul recepire informazioni sulla conducibilità delle miscele cemento-bentonite esposte a contaminanti per differenti periodi d'invecchiamento. Il primo obiettivo che hanno perseguito è quello di stimare le performance del materiale andando ad investigare l'influenza del tempo di maturazione, l'eterogeneità del materiale ed i cambiamenti chimico fisici del materiale dovuti all'attacco chimico. I risultati di questa sperimentazione derivano da prove di laboratorio ed in sito. Il tempo di curing che si va ad analizzare va da un minimo di quattro settimane ad un massimo di undici anni. Le prove di conducibilità in laboratorio sono state effettuate tramite una permeometro a parete flessibile, mentre in sito si sono utilizzate prove CPT, SBT e Packer Test.

### 2.5.1 Materiali

Joshi et al. (2010) hanno studiato tre tipi di miscele diverse, Mixer-cast, Trench-cast e Block field. Le tre miscele hanno la stessa composizione ma tre tipologie di invecchiamento diverse. In generale il materiale analizzato ha una composizione in peso del 3,4% di bentonite, 2,5% di cemento portland, 10,1% di scorie di altoforno e l'84% di acqua. Ai fini della classificazione, tale miscela può essere ricondotta al codice CBG-3.7-80. I dettagli delle miscele sono mostrati nella tabella 5:

Sample type	Slurry mixing condition	Curing/setting condition	Nature of sample	Age of sample (numbers of specimen tested)	
				Hydraulic conductivity	Sulfate immersion
Mixer-cast	Laboratory	Laboratory in mold	Uncontaminated, homogeneous	4 weeks <sup>a</sup> (2), 7/8 week (4), 14/16 week (3), 2 years <sup>b</sup> (3), 8 years (1), 10.7 years (3)	0.5 week (2), 6 weeks (2), 8 weeks (2), 1 year (2), 2.5 years (2), 11 years (2)
Trench-cast	Field in wall	Laboratory in mold	Moderately contaminated, heterogeneous	4 weeks (1), 7/8 week (4), 14/16 week (7), 8 years (1), 10.7 years (3)	11 years (2)
Block field	Field in wall	Field in wall	Contaminated, heterogeneous	8 years (2), 11 years (15+4 <sup>c</sup> )	11 years (10+2 <sup>c</sup> )

Tabella 10. Tipologia di miscele esaminate (Joshi et al., 2010).

I campioni prodotti con la miscela Mixer-cast sono stati preparati in laboratorio ed indurito mediante stagionatura all'interno di casseri di plastica, mentre i provini creati con la miscela trench-cast sono stati preparati utilizzando il medesimo materiale utilizzato per la creazione delle barriere verticali durante la messa in opera in sito. I campioni provenienti dalla miscela Block field sono

stati ricavati mediante l'estrazione di blocchi della barriera, dopo otto anni di maturazione in sito, e susseguentemente fustellati delle dimensioni necessarie all'esecuzione delle prove.

Le principali differenze fra le tre tipologie di campioni testati sono le esposizioni ad agenti contaminanti subite e le impurità contenute in miscela. In quanto, la miscela Block field ha subito un processo di maturazione in ambiente aggressivo e durante la messa in opera del materiale sono state inglobate impurità nella miscela (terreno, aria, rocce). Mentre le altre miscele testate non hanno subito attacchi chimici e non si ritrova la presenza di inclusioni di materiale estraneo alla miscela.

### **2.5.2 Prove di laboratorio**

La conducibilità idraulica è stata misurata mediante un permeometro a parete flessibile. Ai campioni è stata applicata un back pressure di 100 KPa e la consolidazione è stata effettuata per una tensione efficace di 100 KPa. Per via della rigidità relativamente elevata e della bassa conducibilità idraulica del materiale, è stato ritenuto accettabile un valore di B uguale a 0,9. La pressione dell'acqua durante la prova è stata fatta variare in modo tale da ottenere i risultati della prova per dei valori del gradiente idraulico compresi tra 5 e 30.

Per studiare gli effetti dell'attacco dei solfati sul materiale cemento-bentonite è stata utilizzata una prova di immersione, ed il campione è lasciato maturare in una sostanza chimicamente attiva. Questa tipologia di prova è stata fatta per tutte e tre le miscele analizzate e per tempi che vanno da una settimana fino a undici anni.

### **2.5.3 Prove in sito**

Queste tipologie di prove sono state condotte su barriere verticali aventi le stesse proporzioni di bentonite-cemento delle miscele analizzate in laboratorio. Durante la fase di prova è stato evidente che la composizione dei muri di contenimento non erano le stesse degli elementi ricreati in laboratorio, in quanto si presentavano all'interno del materiale inclusioni di terreno e rocce. È stato quindi necessario fare una caratterizzazione geotecnica per ricercare il valore di conducibilità idraulica. A tal fine si è proceduto mediante prove CPT, SBT e Pocker Test:

#### **2.5.3.1 CPTU**

Mediante questa prova si può valutare la conducibilità idraulica in una posizione specifica del muro. L'apparecchiatura di prova viene infissa nel terreno fin che non si raggiunge la profondità voluta, in tale posizione si raccolgono i dati di dissipazione delle pressioni interstiziali nel tempo. Ricavato il

tempo necessario a dimezzare la pressione interstiziale, prodotta dall'infissione della strumentazione di prova, attraverso correlazioni empiriche si può dedurre la conducibilità del materiale.

### 2.5.3.2 Packer Test

La metodologia di prova è mostrata nella figura 22:

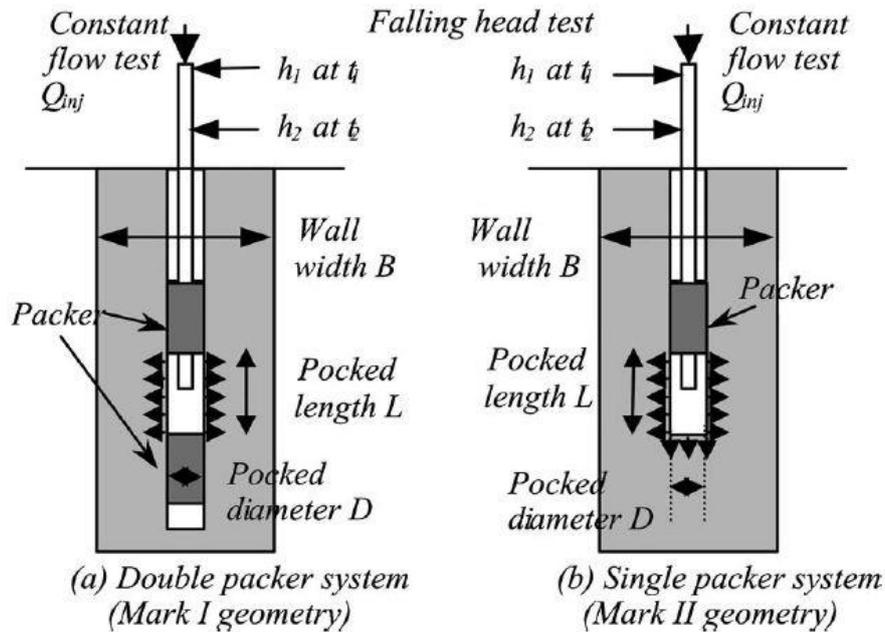


Figura 22. Procedura di prova mediante Packer test (Joshi et al., 2010).

Una volta immesso l'apparecchiatura all'interno del materiale da analizzare si procede con il pompaggio di una portata d'acqua costante. Grazie a questo afflusso d'acqua che permea all'interno del terreno è possibile quantificare la conducibilità idraulica. L'equazione seguente è utilizzata per l'interpretazione dei dati:

$$k = \frac{Q_{in}}{F \cdot (h_{ss} - nh_{ss})}$$

Equazione 1

Dove:

$Q_{in}$  = Volume d'acqua in ingresso nell'attrezzatura di prova

F = Fattore di forma

$h_{ss}$  e  $nh_{ss}$  dipendono dallo stato tensionale del problema

### 2.5.3.3 SBT

Per questa tipologia di prova si procede con un foro verticale mediante l'inserimento di un tubo tramite rotazione. In tal modo si ha un disturbo minimo del materiale che si vorrà analizzare. Terminato il foro di prova si immette acqua in pressione all'interno di esso, registrando i dati inerenti il volume d'acqua immessa e la quantità d'acqua drenata dal materiale. Per l'interpretazione dei dati viene utilizzata una formulazione analoga a quella presentata per la prova Pocker Test.

### 2.5.4 Risultati

La figura 23 mostra l'andamento della conducibilità idraulica per le tre tipologie di campione creati:

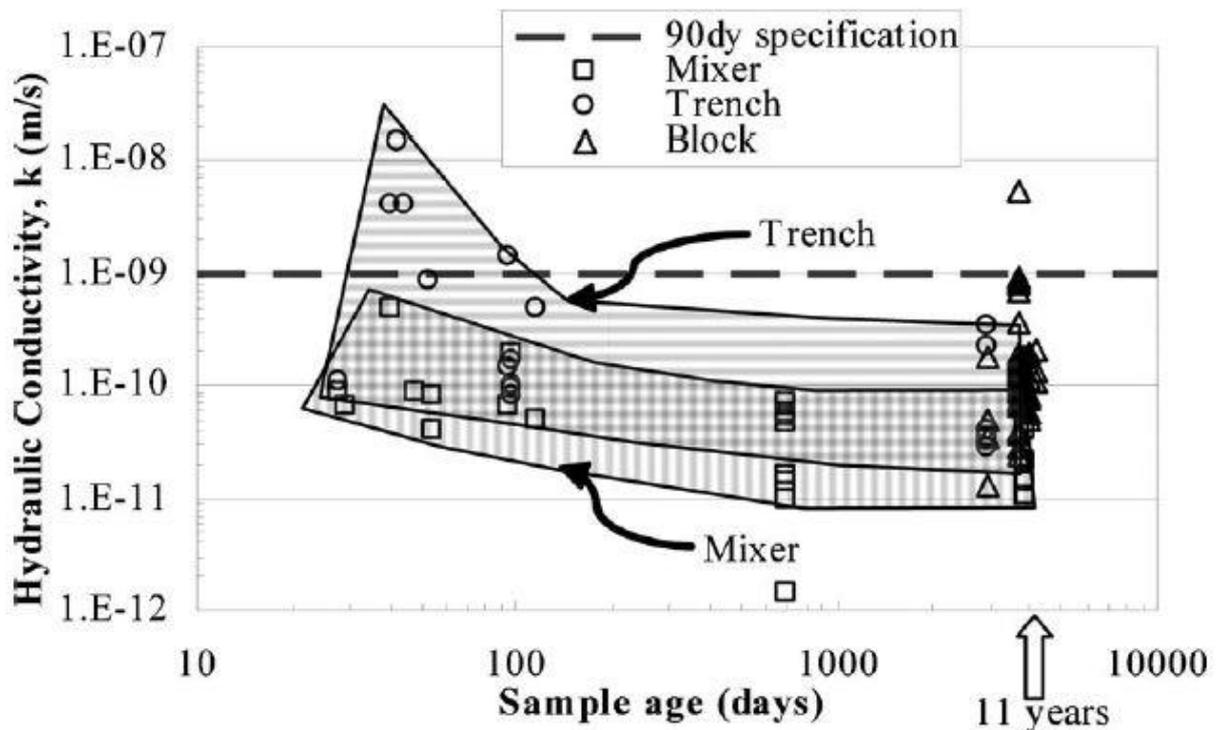


Figura 23. Risultato delle prove di laboratorio effettuate a diverse stagionature (Joshi et al., 2010).

I risultati mostrano che la conducibilità tende a ridursi fino ai tre anni di maturazione, questa riduzione è molto pronunciata nei primi novanta giorni di stagionatura. Questo dato è riconducibile alla progressiva idratazione del cemento e alle scorie d'alto forno. Dopo undici anni di curing si riscontrano valori più bassi di  $k$  tra  $1.1 \times 10^{-11}$  e  $8 \times 10^{-11}$  [m/s] per la miscela Mixer-cast, seguiti dai campioni Trench-cast con valori tra  $5,8 \times 10^{-11}$  e  $1,7 \times 10^{-10}$  [m/s] ed i valori dei campioni creati con la

miscela Block field con valori compresi tra  $2,4E-11$  e  $5,6E-9$  [m/s]. Le grandi differenze dei valori ricavati fra le prime due miscele e la terza sono da imputare all'eterogeneità del materiale prelevato dalle barriere verticali ed alle inclusioni al suo interno. In tutti i casi i valori di conducibilità idraulica dopo undici anni di maturazione sono risultati più bassi di quelli consigliati dalle specificazioni nazionali (ICE1999) che impongono un valore minimo di  $1E-9$  [m/s]. Nella figura seguente si mostra la variazione di conducibilità idraulica in funzione della profondità di prelievo del campione dalla barriera:

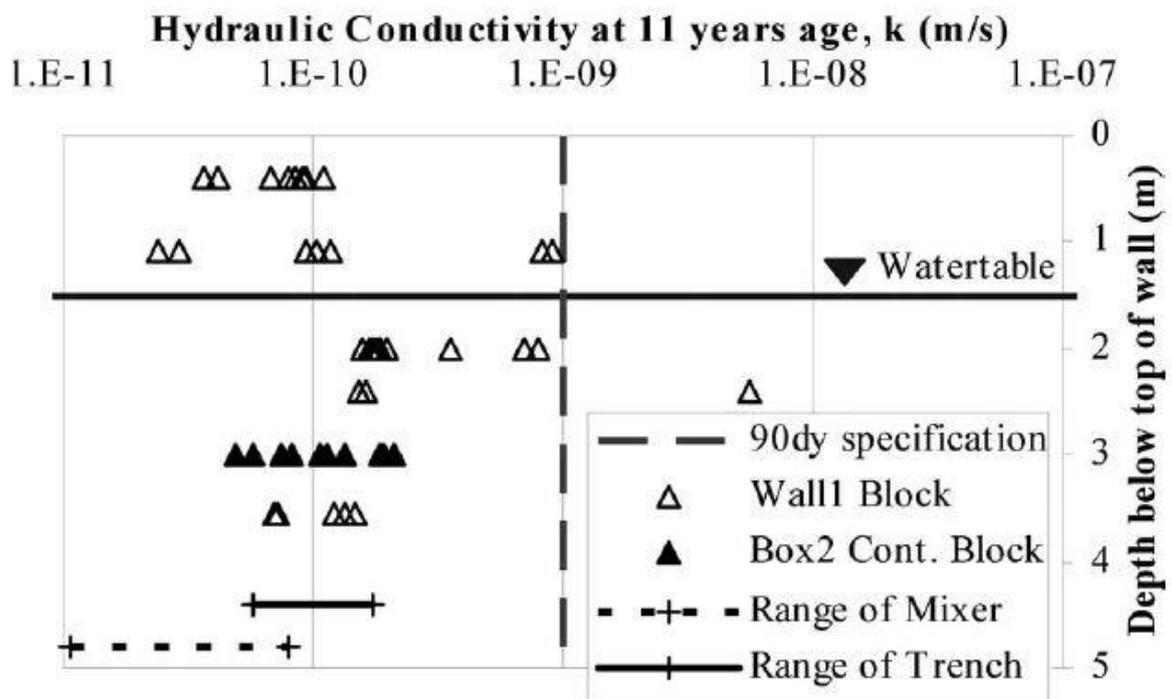
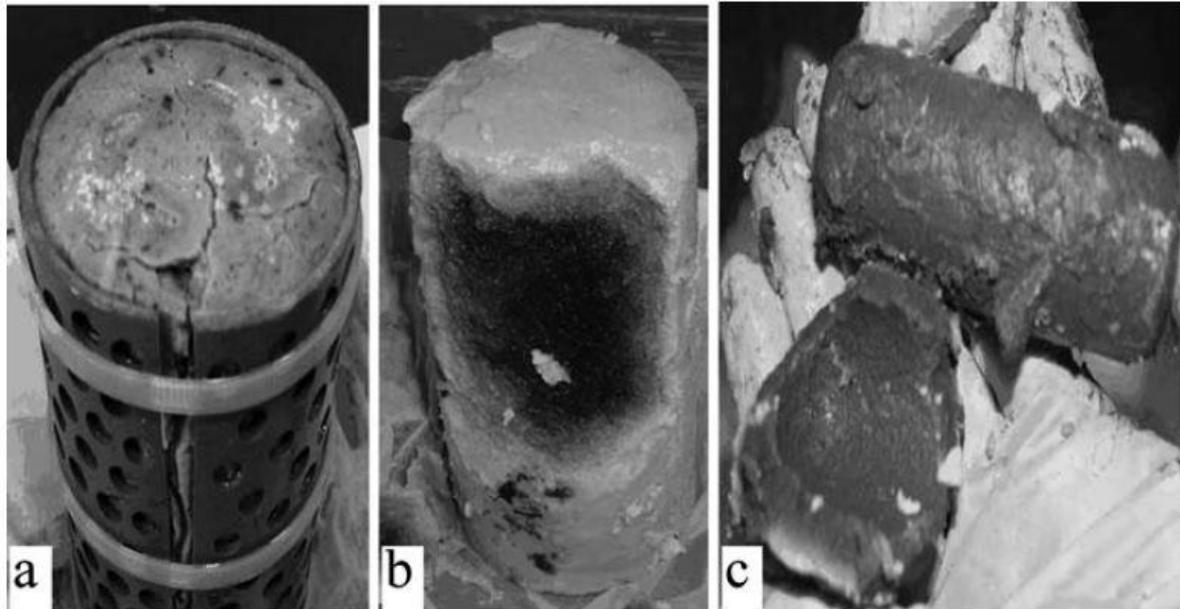


Figura 24. Variazione di conducibilità idraulica in funzione della profondità per Block field invecchiati 11 anni (Joshi et al., 2010).

I valori ricavati per profondità tra 0 e 1,5 m sono mediamente più bassi rispetto a quelli ricavati per profondità maggiori. Tale fenomeno può essere imputabile al fatto che il materiale situatosi sopra il livello di falda tende a disidratarsi e quindi si ha la formazione di cricche e rotture, che vanno ad aumentare il valore di conducibilità idraulica.

Il test d'immersione nella soluzione con solfati ha mostrato una forte risposta chimica del materiale, infatti il campione dopo la prova si presenta fratturato (a), rigonfiato (b) e friabile (c). Le foto dei risultati della prova vengono mostrati nella figura 25:



*Figura 25. Campione soggetto ad attacco chimico da solfati (Joshi et al., 2010).*

La figura 26(a) mostra conducibilità idraulica misurata mediante le prove Packer Test. I risultati non mostrano un grosso cambiamento di conducibilità in funzione della profondità, a meno della parte di materiale situata sopra falda, che è stata assoggettata a disidratazione e quindi alla nascita di fessure. Le traslazioni dei punti, rappresentati dalle frecce, rappresentano le correzioni effettuate per mitigare gli effetti di scala. In quanto per via di questi effetti non si prende in conto la variazione di eterogeneità del materiale.

In figura FIG 26(b) vengono mostrati i risultati delle prove SBT e dei Packer test in funzione della profondità di prova. I valori di  $k$  misurati mediante le prove SBT sono circa i medesimi calcolati con i Packer test, ma il vantaggio è la velocità di esecuzione ed il basso disturbo creato dalle prove SBT.

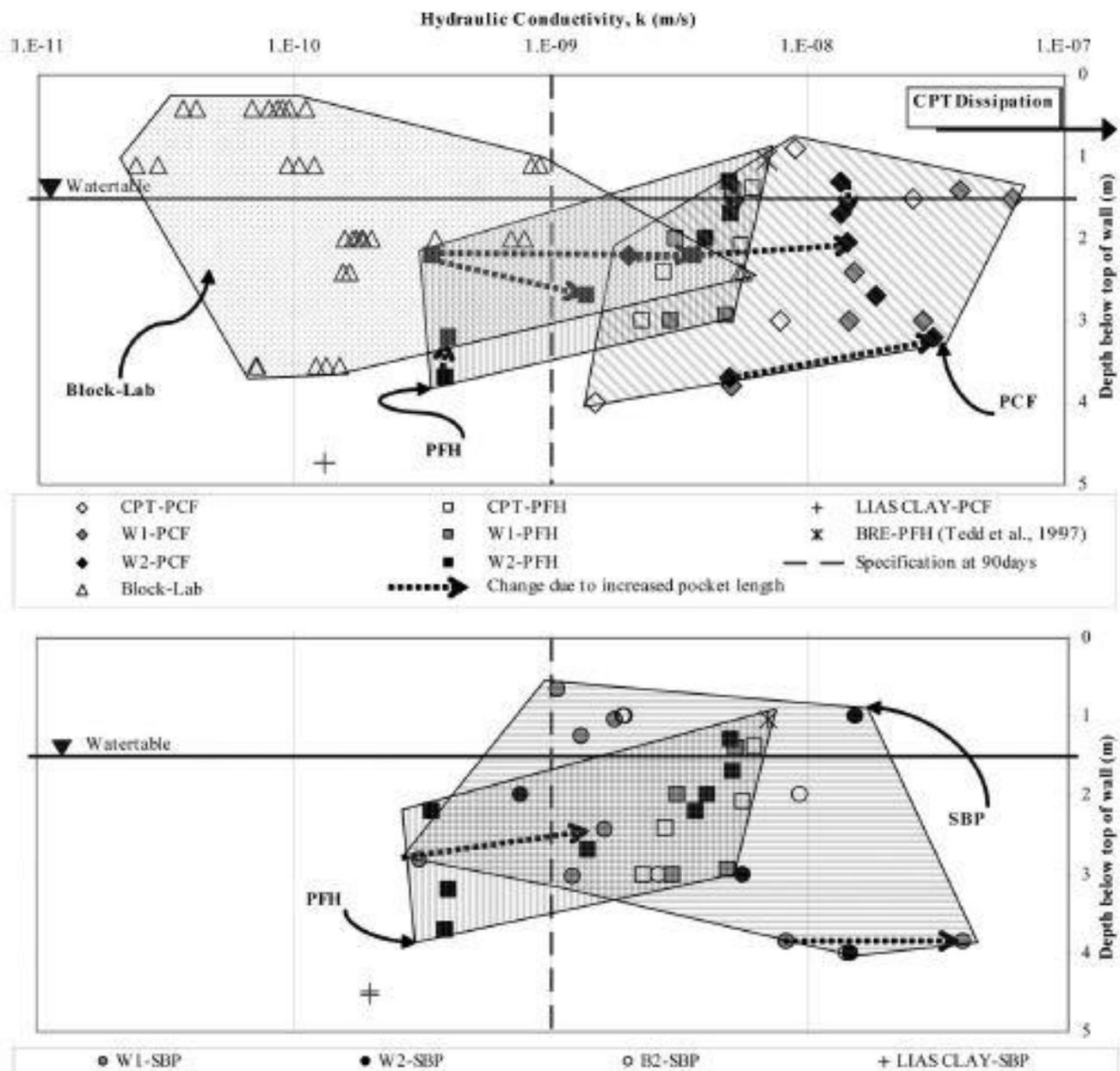


Figura 26. (a) Prove Packer Test, (b) prove Packer Test confrontate con le prove SBT (Joshi et al., 2010).

## **2.6 Soga et al. (2013)**

Soga et al. (2013) presentano un report generale sulle miscele cemento-bentonite. Andando ad analizzare le principali caratteristiche meccaniche, idrauliche e di resistenza agli attacchi chimici del materiale.

### **2.6.1 Materiali**

I ricercatori non forniscono dati riguardanti la creazione delle miscele esaminate, vengono riportati i range del quantitativo di materiale usualmente utilizzato. Le miscele cemento bentonite generalmente utilizzate contengono una percentuale di bentonite variabile tra il 3% ed il 6%, saturata mediante acqua pulita. L'aggiunta di cemento varia tra il 10 ed il 35%, si dovrà comunque mantenere un rapporto acqua cemento all'interno del range 2,87 e 10. Il cemento può essere sostituito mediante scorie d'alto forno o polvere di combustibile.

### **2.6.2 Conducibilità idraulica**

Generalmente le miscele cemento bentonite presentano una conducibilità idraulica ( $k$ ) variabili tra  $1 \cdot 10^{-7}$  e  $1 \cdot 10^{-9}$ , ma con aggiunta di additivi si possono ottenere valori nell'ordine del  $1 \cdot 10^{-10}$ . Di seguito si riportano le prove di laboratorio e in sito presentate dagli autori.

#### **2.6.2.1 Prove di laboratorio**

Gli studi riportati da Soga et al. (2013) riguardante la conducibilità idraulica, ricavata mediante prove di laboratorio, fanno riferimento alle ricerche di (Evans e Opdyke, 2005), pertanto i materiali utilizzati sono presentati nella tabella 1.

La figura 27 mostra l'effetto della sostituzione del cemento mediante scorie d'alto forno:

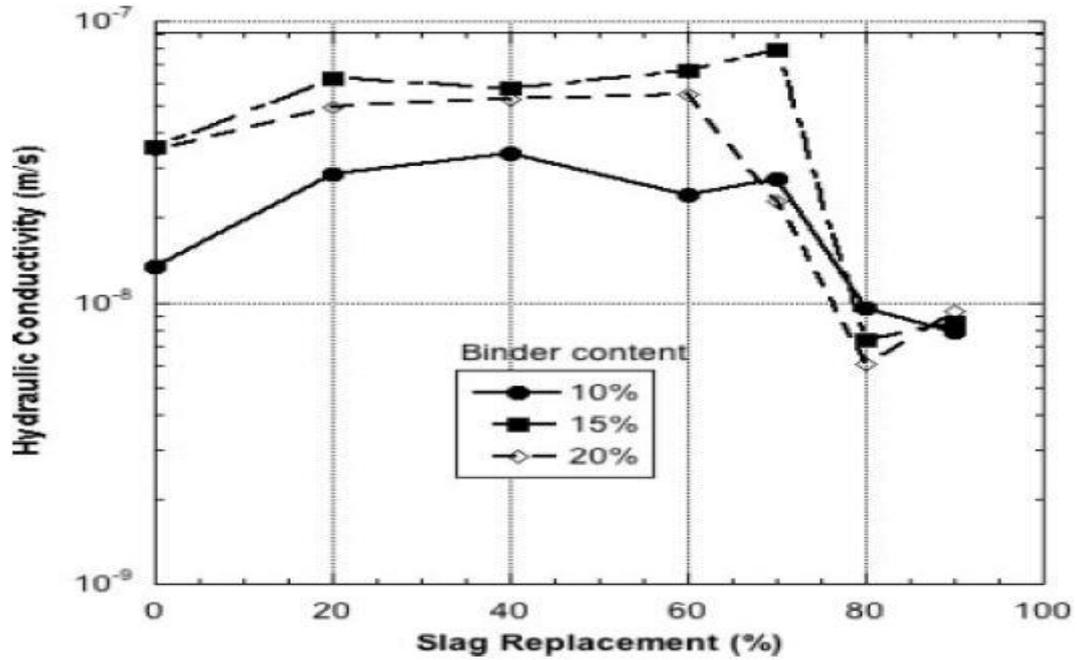


Figura 27. Sostituzione mediante scorie per campioni aventi 28 giorni di maturazione (Evans e Opdyke, 2005).

Mediante le misurazioni in laboratorio il più basso valore di  $k$  è stato riscontrato per un rimpiazzo contenuto tra il 60 e 80%. Un altro fattore che influenza la conducibilità è il tempo di maturazione del campione. Si mostra di seguito l'andamento del decadimento di tale grandezza:

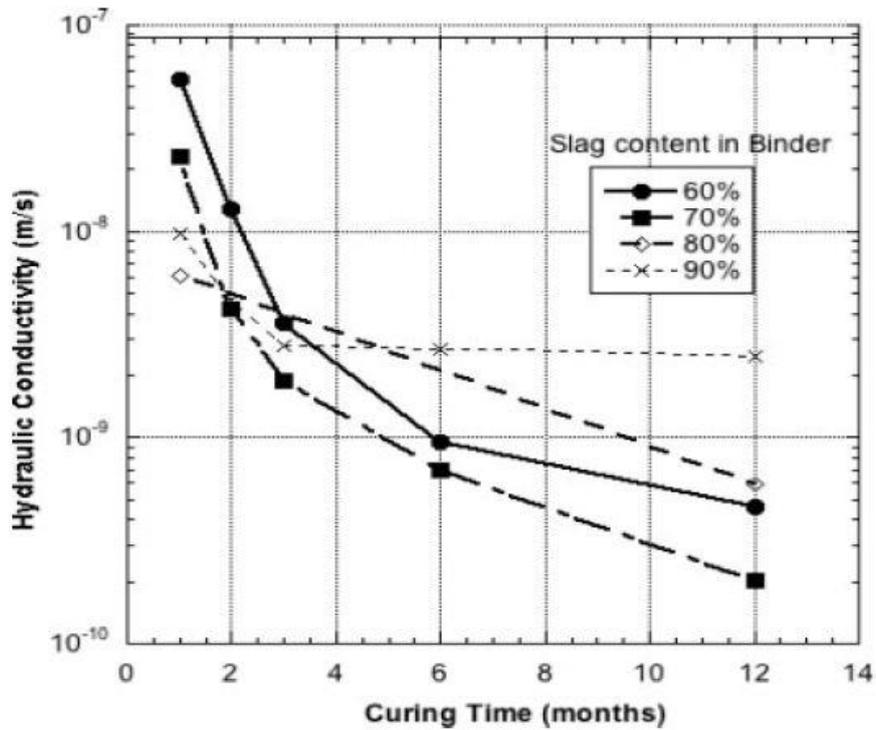


Figura 28. Andamento della conducibilità idraulica in funzione della maturazione (Evans e Opdyke, 2005).

Per le miscele con la percentuale di rimpiazzo tra il 60-70% si nota un forte decremento del valore di  $k$  nei primi due anni di maturazione. Le restanti due miscele dopo un anno di maturazione ottengono una conducibilità idraulica nell'ordine del  $5 \cdot 10^{-8}$ , ma a dodici mesi di curing la diminuzione ed il valore di tale quantità risulta maggiore rispetto ai valori ottenuti dalle due miscele con minor rimpiazzo.

### 2.6.2.2 Prove in sito

Mediante l'utilizzo di un piezocono si è in grado di calcolare la dissipazione delle sovrappressioni interstiziali indotte dall'inserimento dell'attrezzatura di prova nel materiale. Registrati i dati in funzione del tempo viene ricavato il  $t_{50}$ , tempo al quale il materiale ha dissipato il 50% delle sovrappressioni, e mediante relazioni empiriche si ricava la conducibilità idraulica del terreno.

Vengono di seguito mostrati i dati ricavati da prove effettuate a diverse profondità di una barriera verticale:

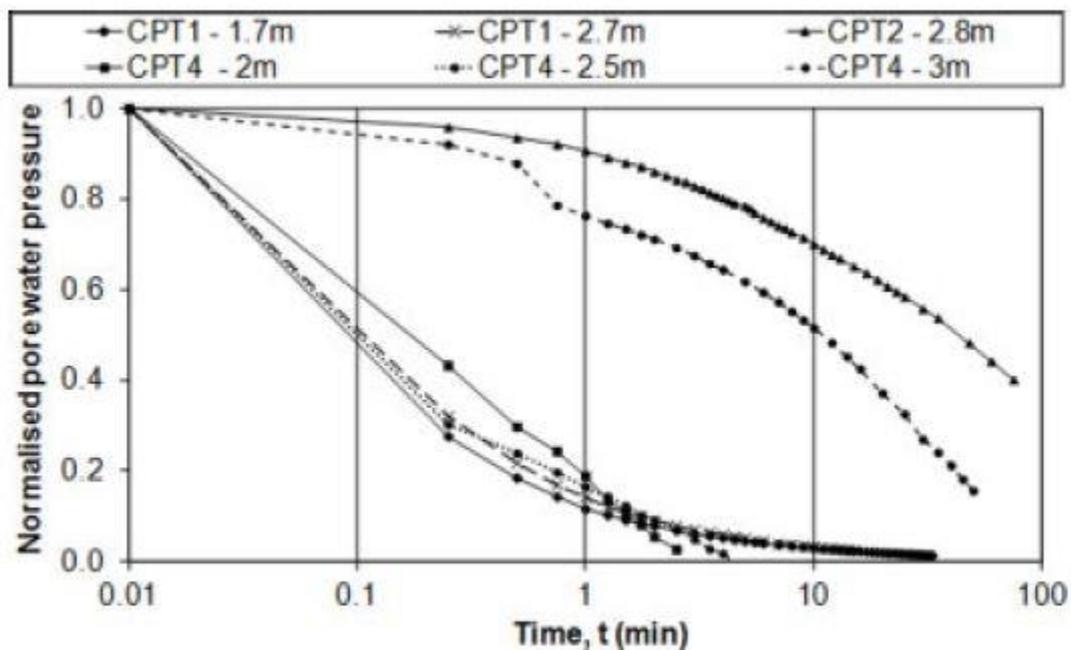


Figura 29. Dissipazioni delle sovrappressioni in funzione della profondità di prova (Soga et al., 2013).

La dissipazione più rapida nelle prove effettuate tra i 2,7 e 1,7 m sono imputabili ad una conducibilità idraulica maggiore. Tale fenomeno è dovuto al basso confinamento radiale del materiale, il cui risultato è stata la fessurazione del materiale durante l'avanzamento del cono di penetrazione.

### 2.6.3 Durabilità

Durabilità è il termine usato per descrivere gli effetti a lungo termine riguardanti il comportamento del materiale per effetto di attacchi chimici o cicli di saturazione ed essiccazione.

#### 2.6.3.1 Effetti chimici

Sono state effettuate delle prove a lungo termine della conducibilità in celle triassiali. Per queste analisi il materiale è stato permeato mediante dell'anilina, in quanto è un contaminante organico, velenoso e con possibili effetti cancerogeni. I risultati delle analisi sono mostrati nella figura 30.

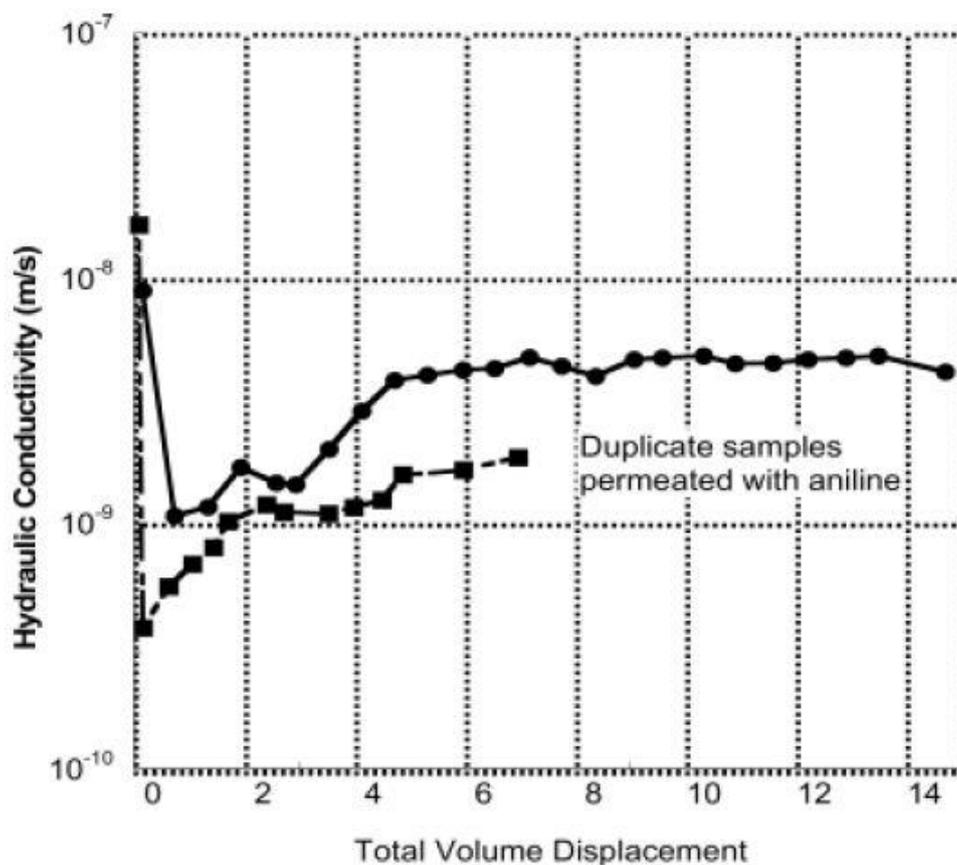


Figura 30. Conducibilità a lungo termine mediante permeazione di anilina (Soga et al., 2013).

Un fattore importante da tener conto nell'analisi di questi dati è il cambio di densità e viscosità dell'anilina rispetto all'acqua. Infatti si ha un aumento della conducibilità intrinseca del 35% dovuta all'utilizzo di anilina.

### 2.6.3.2 Cicli di essiccazione e saturazione

Le miscele cemento-bentonite hanno un alto contenuto d'acqua, infatti si può notare come il materiale dopo otto ore di permanenza all'aria incominci a fratturarsi, per poi fratturarsi completamente dopo ventiquattro ore. Mentre l'esposizione all'aria produce gravi lesioni al materiale, un esperimento più rappresentativo è stato eseguito ricoprendo completamente i campioni mediante della sabbia. La sabbia ed i campioni sono stati assoggettati a dei cicli di essiccazione e saturazione. Ogni ciclo è composto da tre giorni di saturazione e quindici giorni di essiccazione. Dopo dodici cicli sono state ricalcolate le conducibilità del materiale. I risultati sono diagrammati nell'immagine seguente:

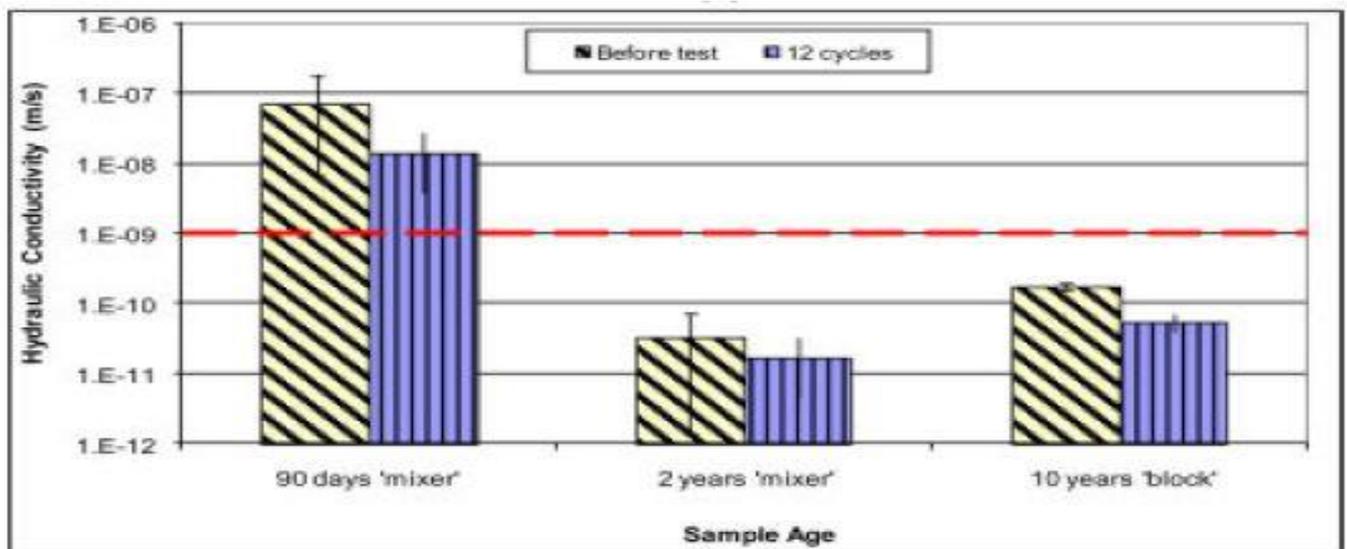


Figura 31. Conducibilità idraulica prima e dopo i cicli di saturazione-essiccazione (Soga et al., 2013).

Da questi risultati si può assumere che i cicli di saturazione-essiccazione hanno effetto sulla conducibilità idraulica. In quanto i campioni che hanno subito il processo hanno sempre una conducibilità idraulica maggiore.

### 2.6.4 Comportamento meccanico

Le specifiche sulle performance finale del materiale (ICE1999) richiedono che a ventotto giorni di maturazione il materiale abbia una resistenza a compressione monoassiale (UCS) di almeno 100KPa, ed una deformazione assiale a rottura di almeno 5%. Tale limitazione sulla deformabilità è imputata alla ricerca di un materiale plastico, che anche se soggetto a spostamenti imposti non si

fessuri fortemente. Questo materiale dispone di una rigidità legata allo scheletro solido di cemento, che quando collassa dà origine a ampie deformazioni volumetriche. La miscela analizzata nelle seguenti prove triassiali ed UCS è stata creata con le seguenti proporzioni:

Codice	Cemento [g]	Bentonite [g]	GGBS [g]	Rimpiazzo [%]
CBG-4-80	30	40	128	80

Tabella 11. Miscela analizzata nello studio sul comportamento meccanico da (Soga et al., 2013).

La differenza fra i campioni Mixer ed i campioni Block è il differente invecchiamento subito. Il primo tipo di campioni è maturato in laboratorio, mentre i campioni denominati Block sono maturati in sito e potrebbero avere al loro interno delle inclusioni di terra, rocce e aria.

### 2.6.4.1 Prove triassiali in condizioni drenate

Le prove condotte sono state condotte con due confinamenti diversi, 100KPa e 500KPa. Le figure 32, 33 e 34 mostra l'andamento dello sforzo deviatorico in funzione della deformazione assiale ed il relativo grafico deformazione volumetrica-deformazione assiale. La differenza fra le tre figure sta nel diverso invecchiamento del campione, rispettivamente, 35 giorni, 90 giorni e 4,25 anni:

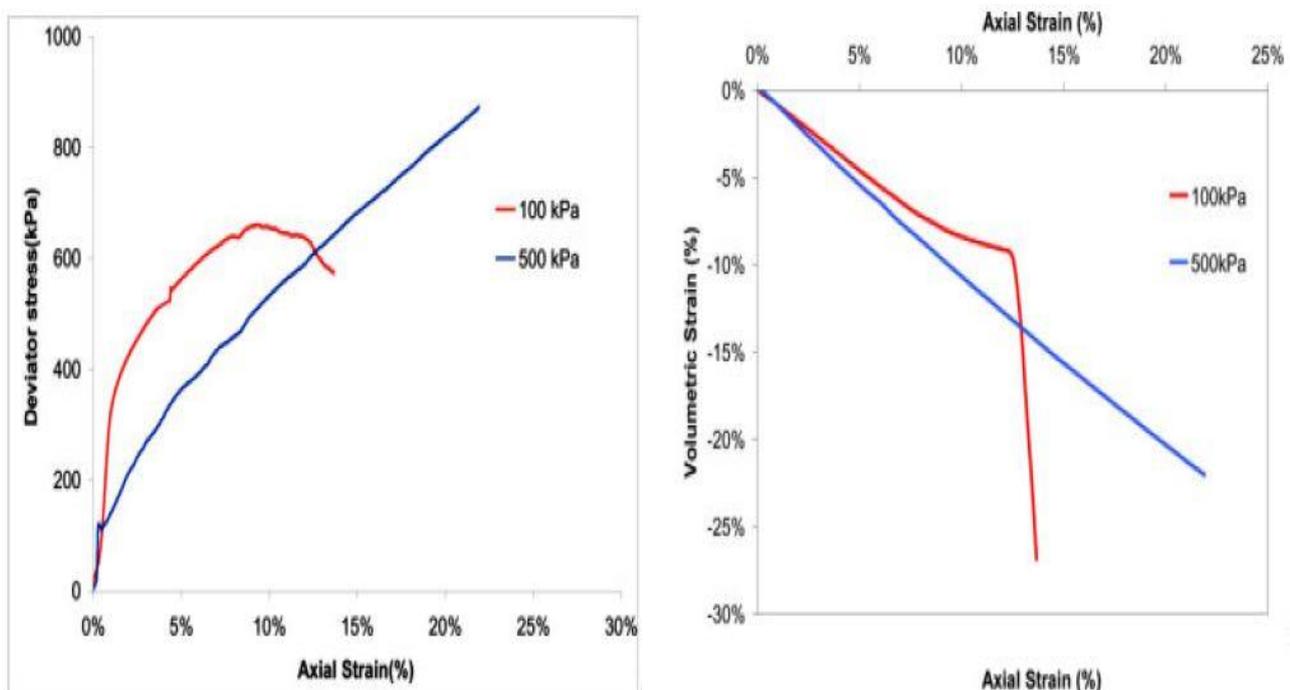


Figura 32. Prova triassiale drenata con invecchiamento del campione pari a 35 giorni (Soga et al., 2013).

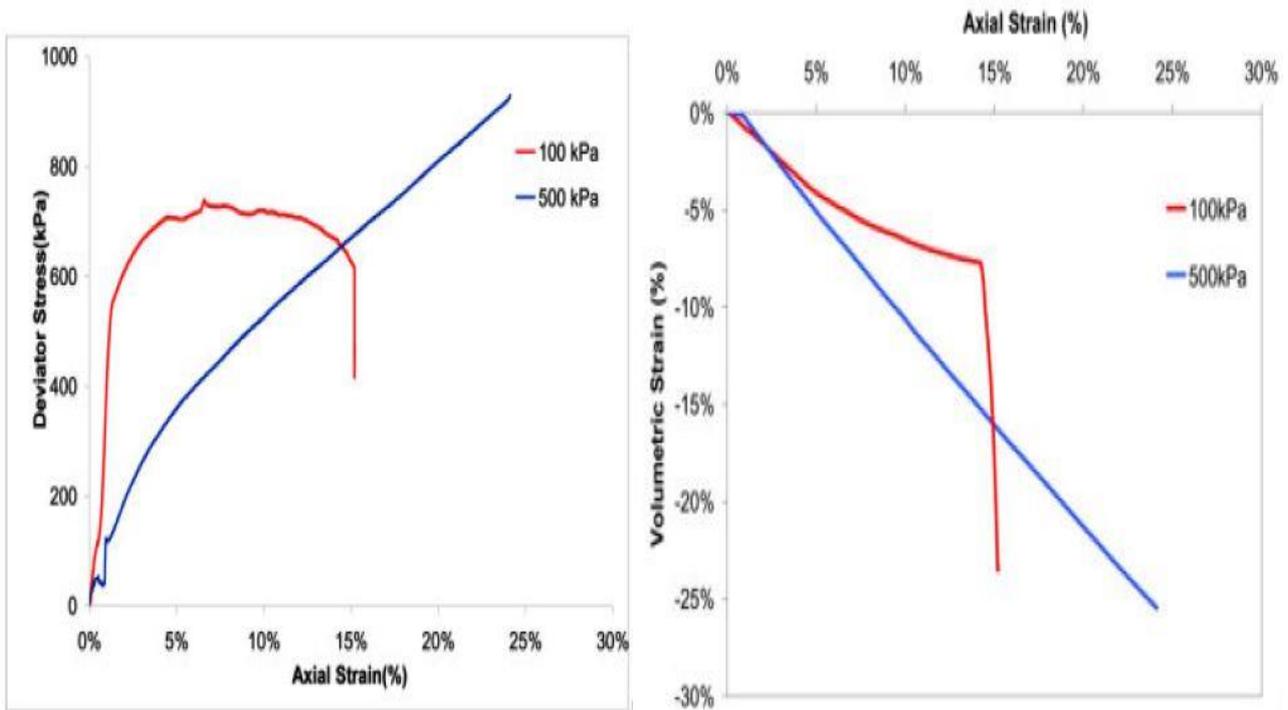


Figura 33. Prova triassiale drenata con invecchiamento del campione pari a 90 giorni (Soga et al., 2013).

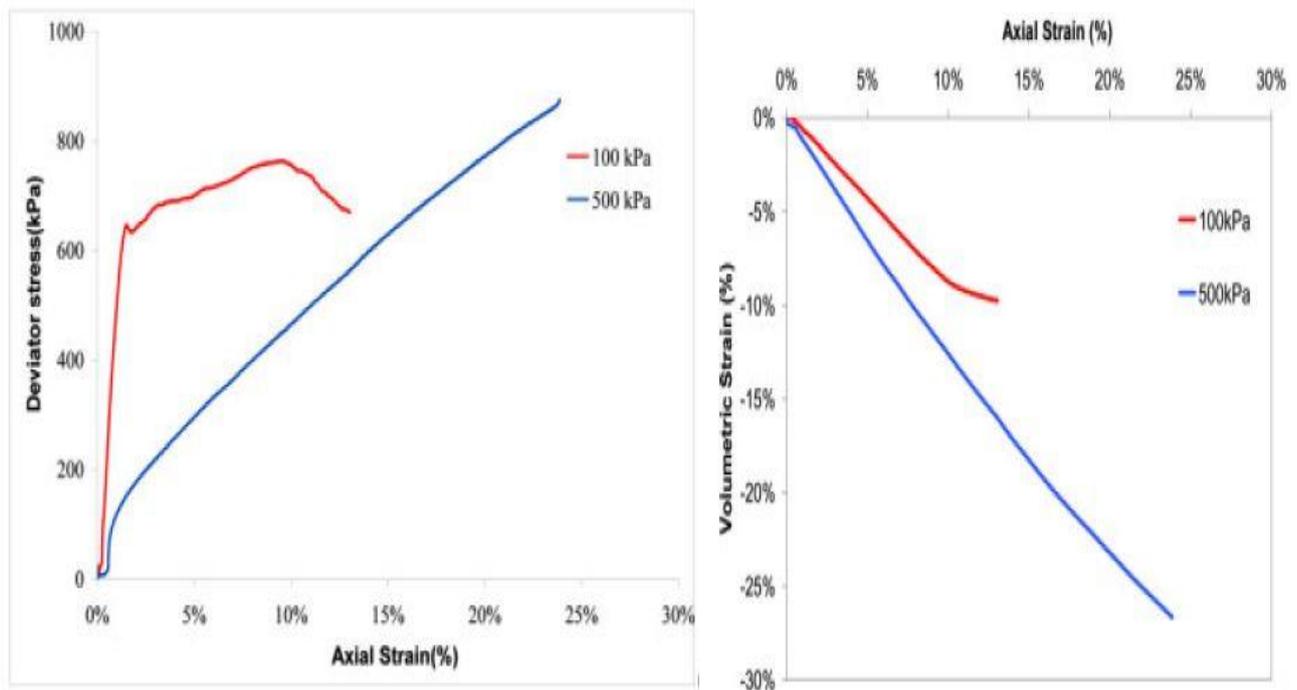


Figura 34. Prova triassiale drenata con invecchiamento del campione pari a 4,25 anni (Soga et al., 2013).

Le prove effettuate con un confinamento di 100KPa presentano una resistenza drenata di picco compresa fra 660-850KPa associata ad una deformazione assiale del 5-10%. Mentre mediante un confinamento di 500KPa, il campione presenta una forte resistenza, la prova si è arrestata dopo il 20-

25% di deformazione per limitazioni date dall'apparecchiatura triassiale. Per tutte le prove effettuate si presentano delle grandi deformazioni volumetriche.

Nella figura 35 si può vedere come i campioni con invecchiamento superiore ai 35 giorni mostrano piccole deformazioni volumetriche fino al valore di snervamento. Sorpassato questo valore di rottura si ha una rapida crescita delle deformazioni dovute al collasso della matrice solida del materiale:

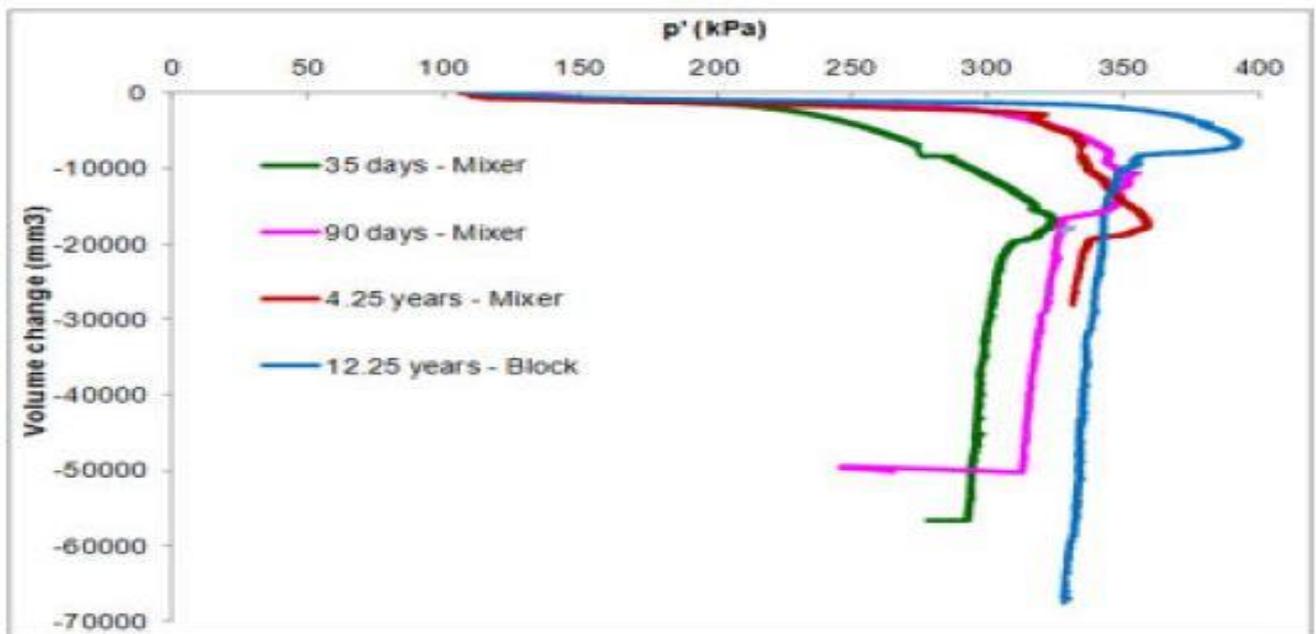


Figura 35.  $p'$ -deformazione volumetrica per confinamento radiale di 100KPa (Soga et al., 2013).

#### 2.6.4.2 Prove triassiali non drenate

Sono state eseguite delle prove triassiali non drenate su campioni avente un invecchiamento di 3,25 anni. Si è ricercato l'involuppo di rottura andando a variare il confinamento radiale tra una prova e l'altra. Di seguito vengono riportati i grafici raffiguranti le prove:

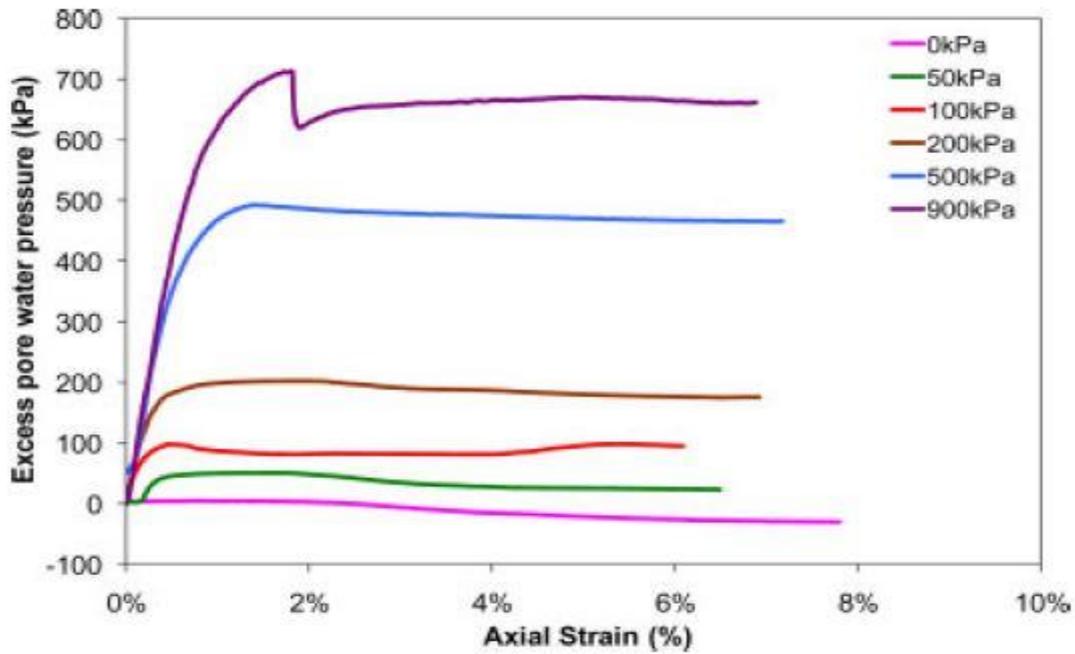


Figura 36. Pressione interstiziale- deformazione assiale per campioni maturati 3,25 anni (Soga et al., 2013).

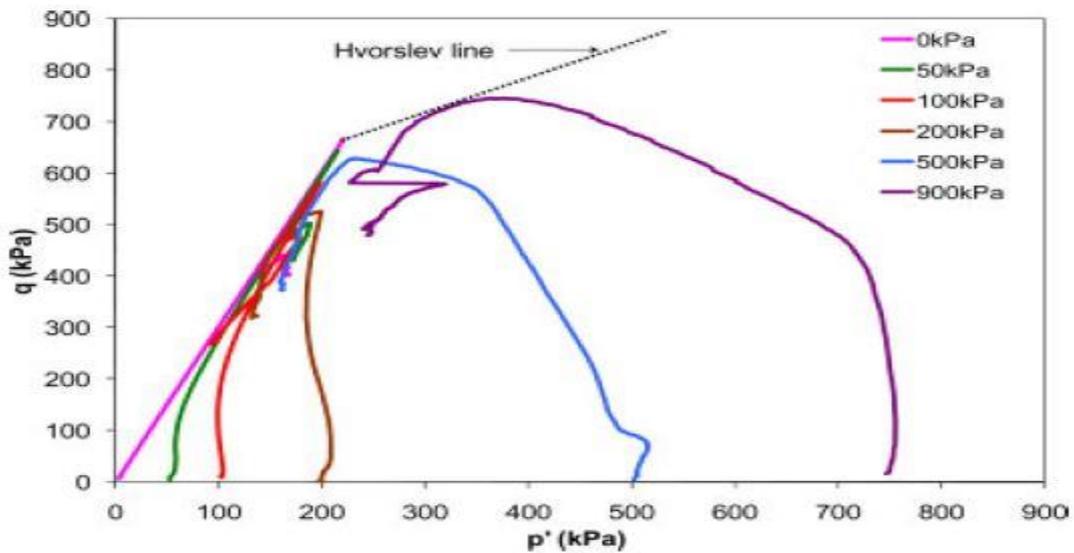


Figura 37. Prove triassiali non drenate su campioni invecchiati 3,25 anni. (Soga et al., 2013).

La resistenza non drenata del materiale varia fra un valore di 535 e 745 KPa, per una variazione di deformazione assiale compresa fra lo 0,5 e il 2%. Il valore di resistenza massimo viene individuato per il confinamento più elevato di 900KPa.

### 2.6.4.3 UCS

Mediante questa prova si può ottenere la resistenza del materiale per una compressione non confinata. La resistenza mostrata dal materiale aumenta all'aumentare della maturazione. Nella figura seguente vengono presentati i risultati di prove UCS effettuate su campioni a maturazioni diverse:

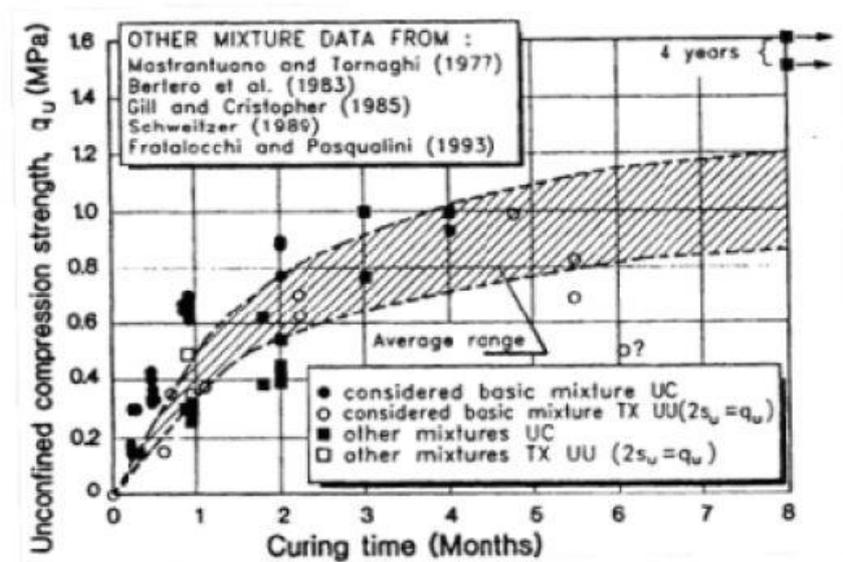


Figura 38. Aumento di resistenza del materiale al crescere dell'invecchiamento (Soga et al., 2013).

Il fenomeno è simile a quello per il comportamento indurente del cemento, per tale ragione l'ICE(1999) consiglia una resistenza minima del materiale di 100KPa a 28 per questo tipo di prove.

La figura seguente mostra l'aumento di resistenza del materiale soggetto ad anni di maturazione:

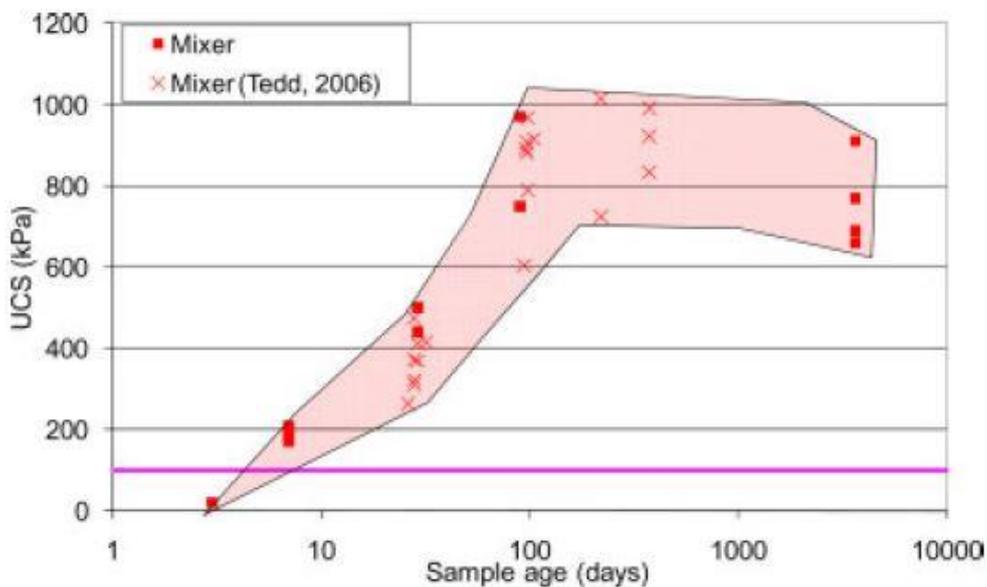


Figura 39. Andamento della resistenza in funzione della maturazione del materiale (Soga et al., 2013).

In questo caso si passa da una resistenza non confinata di 360KPa per 28 giorni di maturazione a 890KPa per un campione invecchiati per 90 giorni.

#### 2.6.4.4 Resistenza a trazione

Mediante la prova brasiliana si è ricavato al valore di resistenza al taglio del materiale maturato per 10 anni. Il provino è stato realizzato in forma cilindrica con un diametro di 100 mm ed una altezza di 150 mm. La figura 38 mostra l'andamento della prova nel piano sforzi-deformazioni:

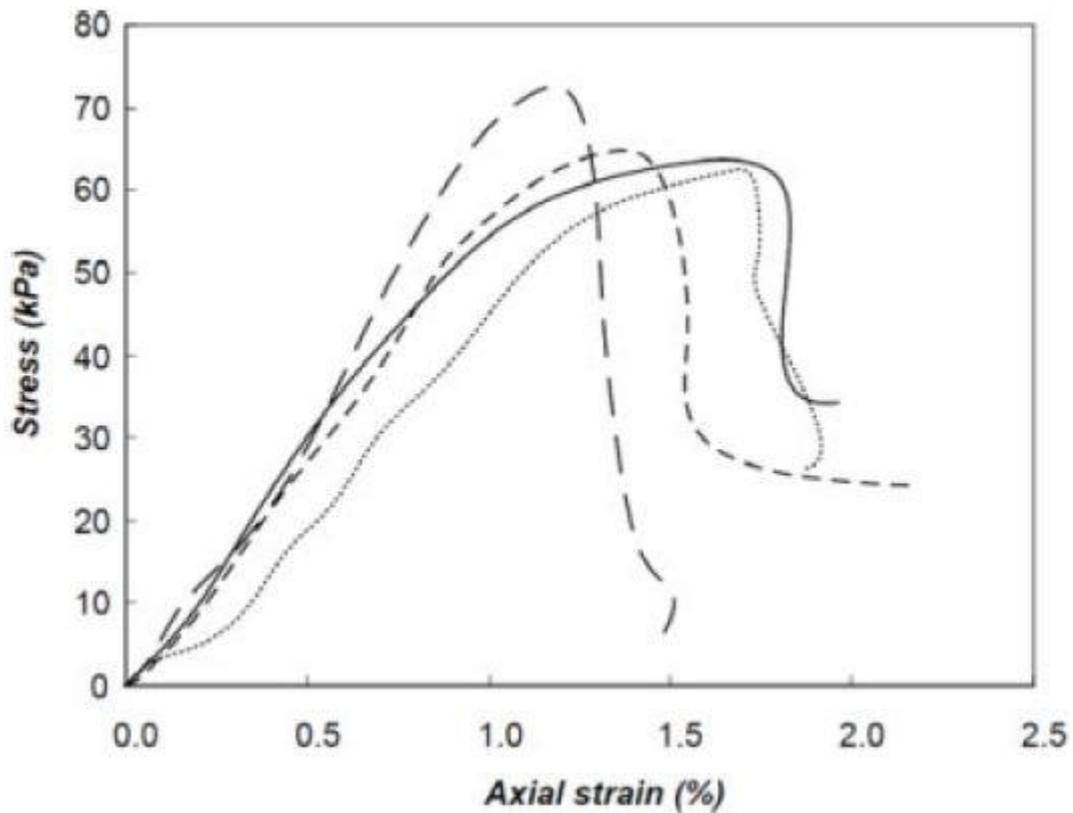


Figura 40. Andamento prova brasiliana (Soga et al., 2013).

Il campione mostra una resistenza al taglio di 65KPa. Questo valore rappresenta il 7,8% del valore di resistenza a compressione monoassiale. Questo valore risulta molto minore rispetto a quello mostrato dal cemento, per il quale si ha una resistenza al taglio nell'ordine del 10/15% della resistenza a compressione monoassiale.

## 2.7 Pasqualini e Fratalocchi (2000)

In questo articolo vengono trattati i muri verticali di isolamento dei siti inquinati, per tali opere si ricorre a miscele ternarie di cemento, bentonite e acqua. Tale materiale comporta numerosi vantaggi, quali la velocità d'esecuzione per scavo monofase, la versatilità al variare delle tipologie di inquinanti e di terreno e l'efficienza. Pasqualini e Fratalocchi (2000) presentano i dati principali caratterizzanti il materiale sotto il punto di vista della conducibilità idraulica e della compatibilità chimica.

### 2.7.1 Materiali

Le miscele utilizzate da Pasqualini e Fratalocchi (2000) per le prove riguardanti la conducibilità sono riassunte nella tabella seguente:

<b>Codice</b>	<b>Cemento [g]</b>	<b>Acqua [g]</b>	<b>Bentonite [g]</b>
CB-3.2-0	256	1000	80
CB-3.7-0	206	1000	56
CB-3.9-0	219	1000	56
CB-4.2-0	234	1000	56
CB-4.4-0	256	1000	58
CB-4.9-0	256	1000	53

*Tabella 12. Miscele utilizzate da Pasqualini e Fratalocchi (2000).*

Gli autori non hanno riportato nè il tipo di cemento utilizzato nè le caratteristiche della bentonite presente in miscela.

### 2.7.2 Conducibilità idraulica

Nelle specifiche tecniche si fa riferimento alla conducibilità a 28 giorni, ma tale valore non è rappresentativo delle prestazioni del diaframma, in quanto è stato accertato sperimentalmente che durante i primi mesi di maturazione si può avere un decadimento della conducibilità anche di due ordini di grandezza (Opdyke and Evans, 2006):

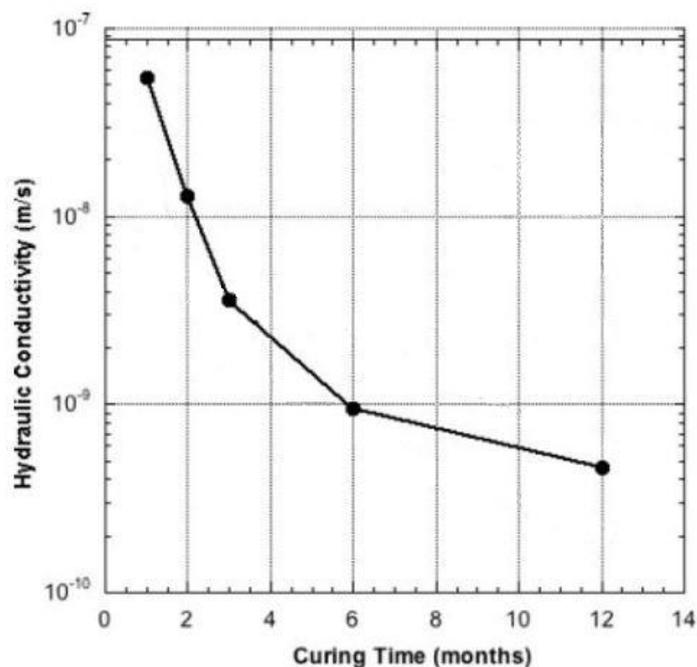


Figura 41. Riduzione della conducibilità nel tempo per una tipica miscela ternaria (Opdyke and Evans, 2006).

Grazie a prove in laboratorio è stato potuto accertare che la conducibilità è governata dal quantitativo di cemento, piuttosto che di bentonite, come dimostrato dalla figura 42 e 43:

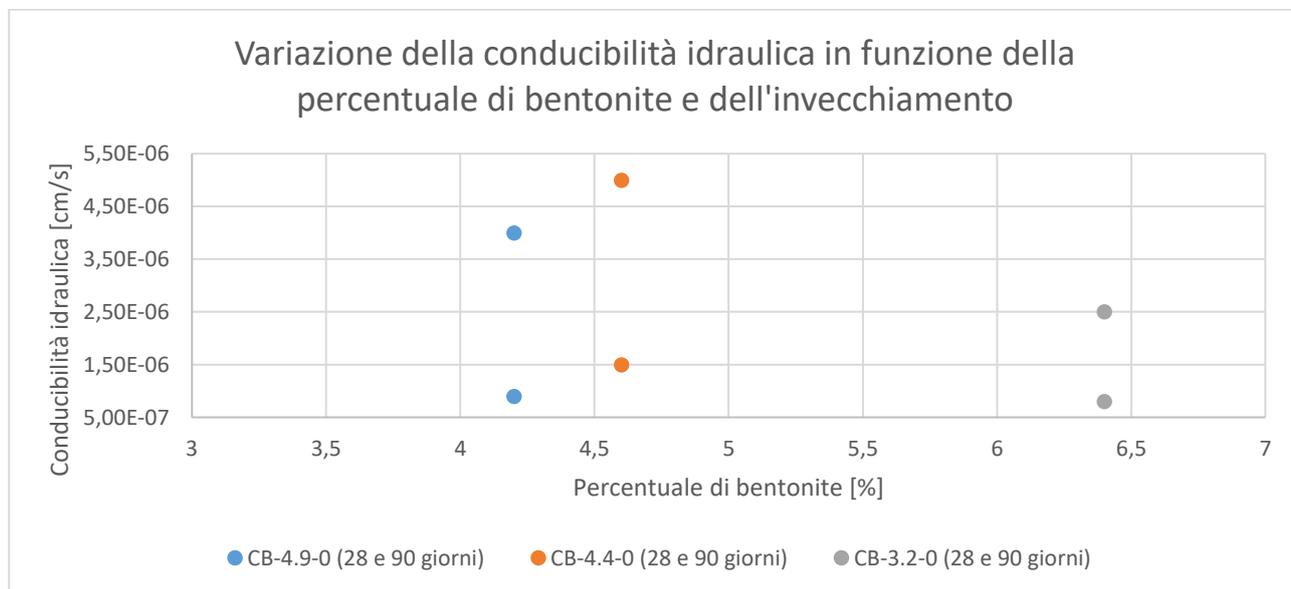


Figura 42. Andamento della conducibilità idraulica dovuta alla variazione di bentonite in miscela (Pasqualini and Fratolocchi, 2000).

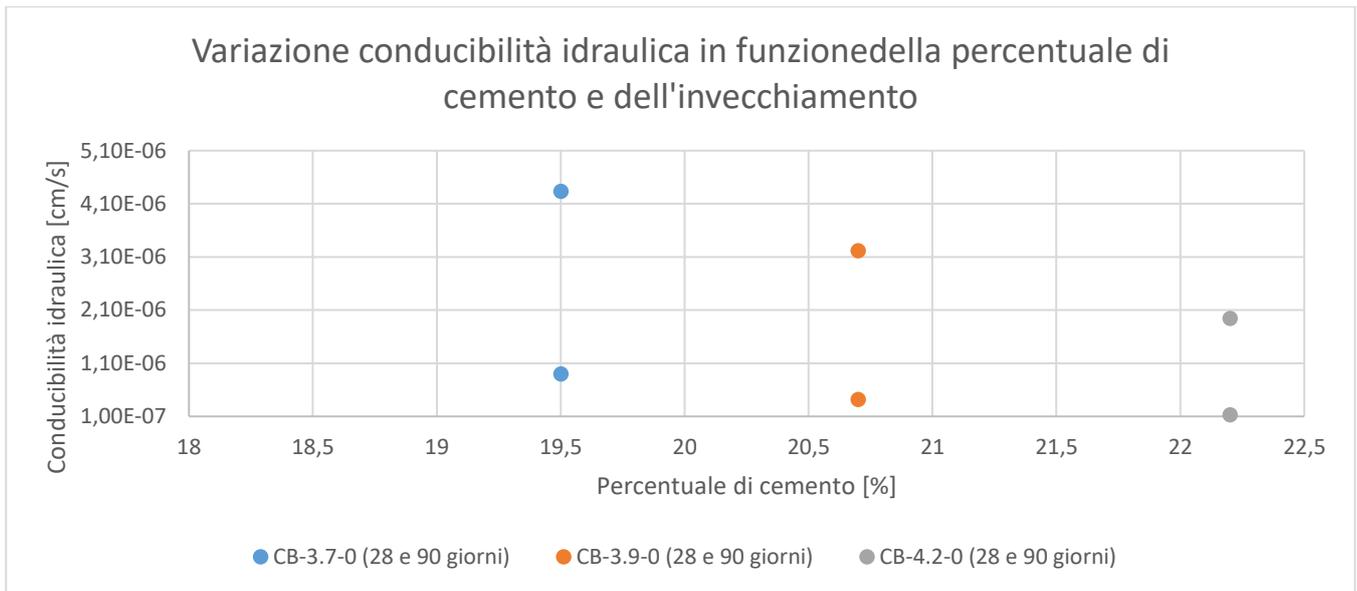


Figura 43. Andamento della conducibilità idraulica dovuta alla variazione di cemento in miscela (Pasqualini and Fratolocchi, 2000).

Tutta via un aumento troppo marcato della percentuale di cemento in miscela potrebbe provocare problemi nell'ambito della lavorabilità della miscela e della fragilità del materiale finale.

### 2.7.3 Compatibilità chimica

Un importante punto analizzato in questo articolo è la compatibilità chimica del materiale con gli inquinanti da confinare, in quanto la miscela cemento-bentonite è soggetta a degrado in ambienti acidi o in presenza di sostanze che possano interagire con le reazioni di idratazione del cemento. Una prova che si può effettuare è colare la miscela in una apposita fustella munita di fori, circondata da terreno ed immersa nella miscela chimicamente attiva. In questo modo la maturazione del materiale avverrà a contatto con la sostanza chimicamente attiva.

Dopo tre mesi di maturazione del campione in ambiente contaminato è stata eseguita una prova di conducibilità, e confrontata con un'altra prova eseguita su un campione con curing avvenuto in acqua. La figura 42 mostra i risultati ottenuti:

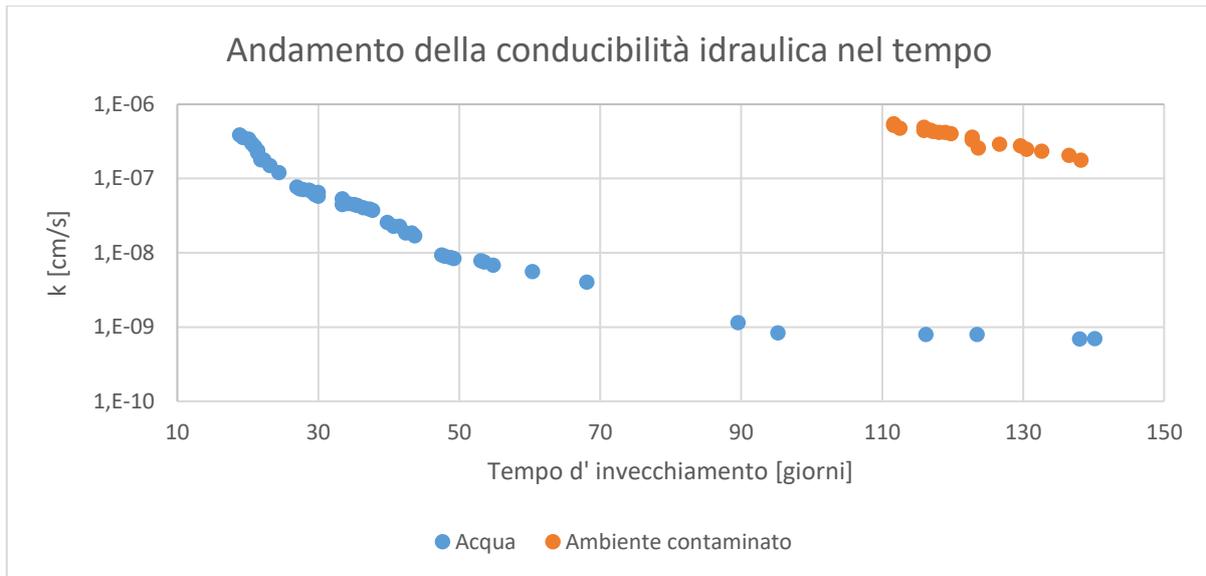


Figura 44. Conducibilità in funzione dell'ambiente di maturazione (Pasqualini and Fratolocchi, 2000).

Come si può vedere il materiale maturato in ambiente aggressivo presenta una conducibilità idraulica molto maggiore del medesimo campione maturato in acqua.

## 2.8 Opdyke and Evans (2006)

L'obiettivo dello studio svolto da Opdyke and Evans (2006) è quello di caratterizzare la conducibilità idraulica e la resistenza meccanica delle miscele cemento-bentonite. A tale proposito, gli autori hanno indagato le variazioni di comportamento in funzione delle proporzioni di cemento contenuto in miscela e del tempo di invecchiamento.

### 2.8.1 Materiali

Per questo studio sono state analizzate le medesime miscele analizzate nel capitolo 2.1 Opdyke and Evans (2005). Si riporta di seguito una tabella riassuntiva delle miscele indagate:

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 13. Miscele studiate da Opdyke and Evans (2006).

### 2.8.2 Procedure

Tutti i campioni sono stati creati partendo da una base di bentonite e acqua, tale composto è stato miscelato per cinque minuti e lasciato idratare per 24 ore. Dopo l'aggiunta del cemento e del

rispettivo rimpiazzo, le miscele sono state colate in appositi casseri aventi una altezza di 14,3 cm ed un diametro di 6,9 cm. La maturazione è avvenuta in condizione di umidità pari al 100% ed una temperatura di 20°.

Le prove di conducibilità sono state condotte mediante una cella triassiale, per la saturazione del campione è stata impostata una back pressure di 275 KPa ed è stata applicata per le 24 ore precedenti la prova. Le miscele aventi un rimpiazzo minore o uguale al 60% sono state testate mediante un gradiente idraulico pari a 2. I materiali derivanti da un rimpiazzo del 80 e 90%, presentano una conducibilità molto minore, per tale ragione si è proceduto incrementando il gradiente idraulico a 25. Tutte le prove di conducibilità hanno avuto una durata minima di quattro giorni e massima di sette giorni.

Le prove di compressione monoassiali sono state eseguite sia su campioni che hanno subito una precedente permeazione che campioni appena estrusi dalle fustelle. Le prove sono state condotte in controllo di deformazione con una velocità di avanzamento del pistone di carico di 3,0 [mm/min]. Le prove sono state effettuate per campioni aventi periodi di maturazione pari a due, tre sei e venti mesi.

## 2.8.3 Risultati

### 2.8.3.1 Conducibilità idraulica

I risultati delle prove di permeazione sono mostrati nella figura 45. I campioni testati da Opdyke e Evans (2006) hanno tutti lo stesso tempo di maturazione, la variazione tra le miscele è dovuta ad una differente percentuale di rimpiazzo del cemento da parte di scorie d'altoforno.

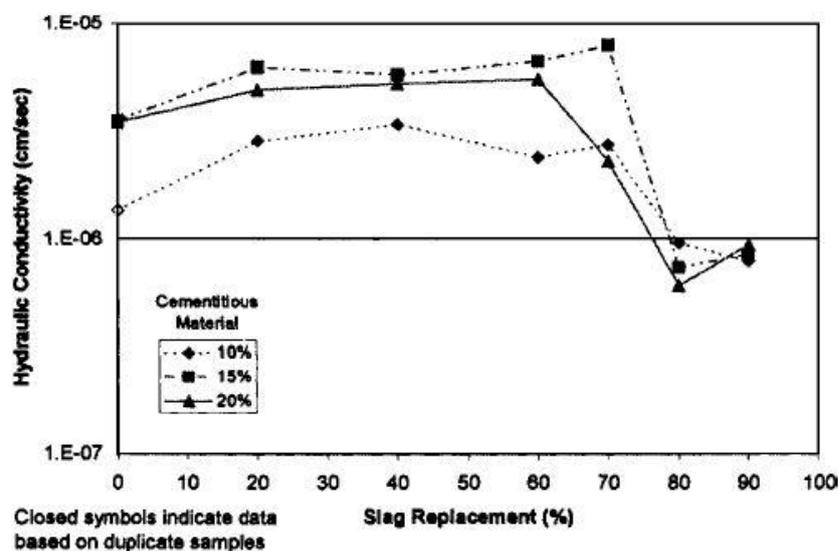


Figura 45. Conducibilità idraulica per campioni con periodo di maturazione pari ad un mese (Opdyke and Evans, 2006).

Le miscele aventi un rimpiazzo minore del 70% presentano una conducibilità idraulica compresa in un range tra  $1 \cdot 10^{-5}$  e  $1 \cdot 10^{-6}$  [cm/sec], tale grandezza subisce una forte diminuzione per valori di rimpiazzo del 70 ed 80% per poi stabilizzarsi per quantità di scorie pari al 90%.

Si riportano in seguito i dati riguardanti le prove di conducibilità su campioni aventi il 20% di cemento presente in miscela e testati per differenti tempi di maturazione al fine di valutare il decremento della conducibilità idraulica all'aumentare del tempo di maturazione.

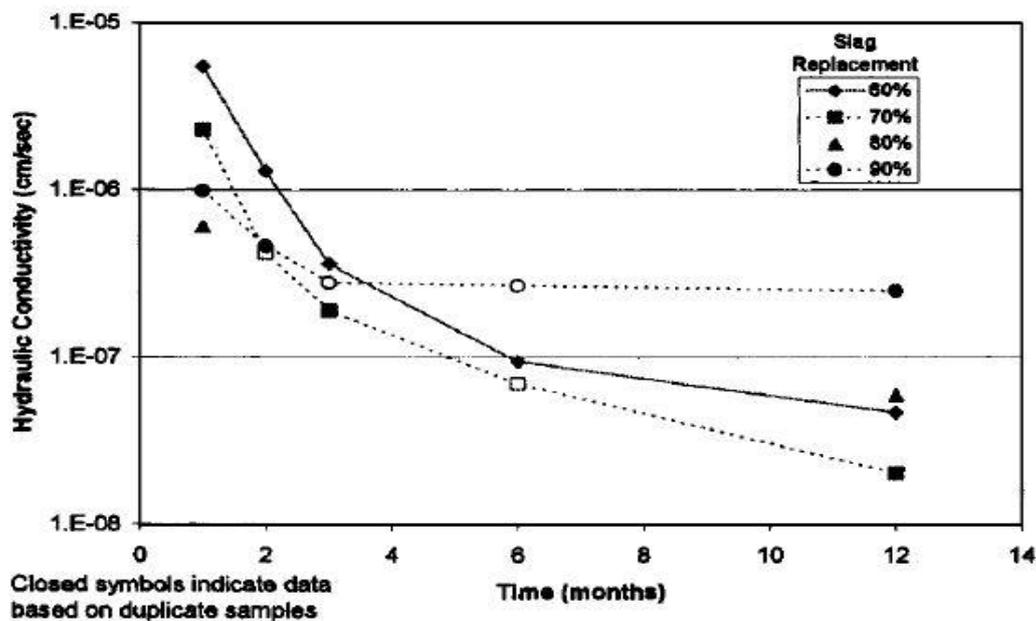


Figura 46. Andamento della conducibilità nel tempo per campioni contenenti il 20% di cemento (Opdyke and Evans, 2006).

I campioni con percentuali di rimpiazzo tra il 60% ed il 90% dopo venti mesi di maturazione presentano un valore di conducibilità idraulica minore di  $1 \cdot 10^{-7}$  [ $\frac{m}{s}$ ]. I campioni analizzati in questo grafico sono il CBG-20-60, CBG-20-70, CBG-20-80 e il CBG-20-90.

In questo studio si è ricavato che le miscele contenenti il 15-20% di cemento con il 70-80% di rimpiazzo presentano i valori di conducibilità più bassi, sia a breve che a lungo termine.

### 2.8.3.2 Compressione monoassiale

Le prove di laboratorio hanno rivelato una relazione tra la resistenza del materiale calcolata mediante la compressione monoassiale e la percentuale di rimpiazzo mediante scorie di alto forno:

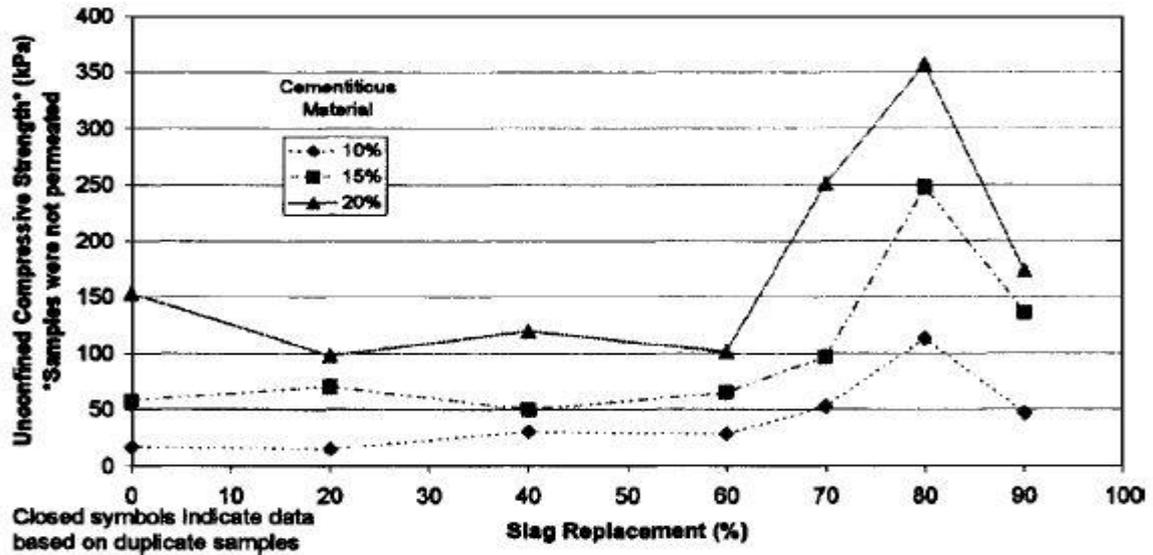


Figura 47. Compressione monoassiale per campioni maturati per un mese (Opdyke and Evans, 2006).

La resistenza del materiale incrementa al crescere della percentuale di cemento contenuta in miscela. Il rimpiazzo mediante scorie ha un piccolo effetto sulla resistenza fino ad una percentuale del 60%. Superata questa soglia il valore della resistenza monoassiale vede un forte incremento per percentuali di rimpiazzo contenute fra il 70% e l'80%. Andando ancora ad aumentare la presenza di slag si ha un abbattimento della resistenza.

Si è rilevata una forte correlazione fra la deformazione ultima del materiale e la percentuale di rimpiazzo mediante scorie.

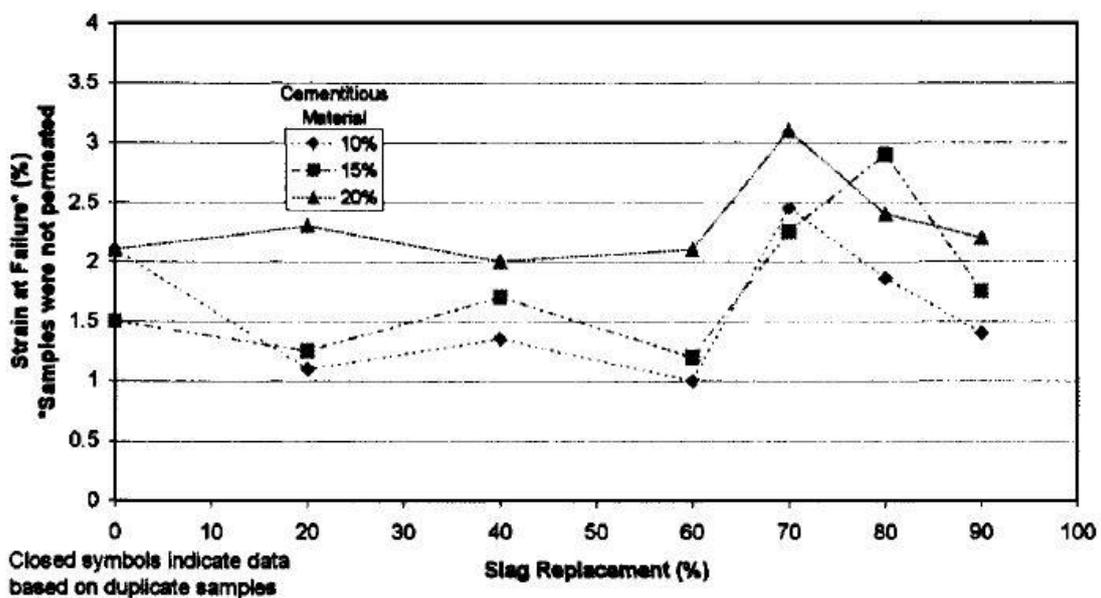


Figura 48. Influenza della percentuale di rimpiazzo sulla deformazione a rottura (Opdyke and Evans, 2006).

Fino ad un valore di sostituzione del 60% si ha un andamento relativamente costante della deformazione, che oscilla fra 1 e 2,5%. Con l'incremento di rimpiazzo anche la deformazione a rottura aumenta, per arrivare ad i massimi valori raggiunti con una presenza di scorie in miscela tra il 70% e l'80%. Si può notare come questi valori di rimpiazzo sono i medesimi che riducono al minimo la conducibilità idraulica del materiale.

### 2.8.3.3 Prova edometrica

E' stato testato un campione invecchiato quindici mesi, avente una percentuale di cemento del 15% ed un rimpiazzo del 75% di scorie, classificato come CBG-3-75. La figura 49 rappresenta la relazione che intercorre tra il carico applicato e l'indice dei vuoti del materiale.

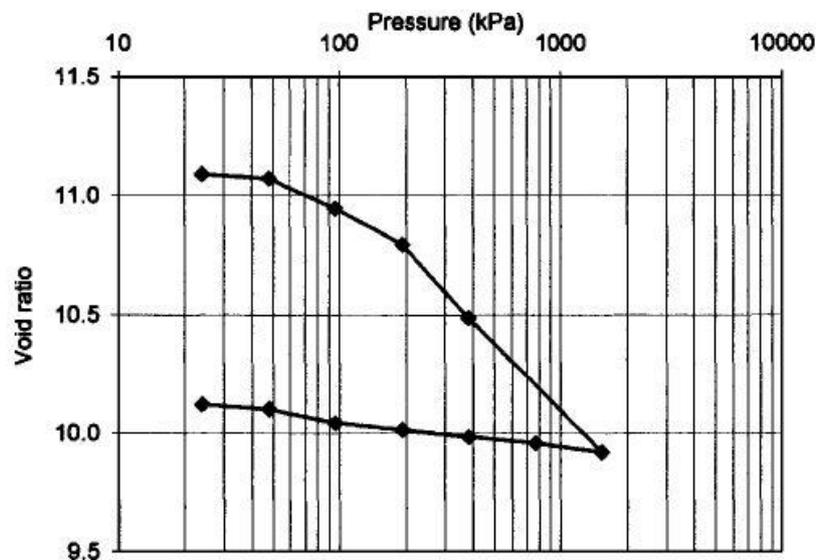


Figura 49. Consolidazione per un campione invecchiato quindici mesi (Opdyke and Evans, 2006).

Il comportamento della miscela cemento-bentonite è assimilabile ad un terreno sovraconsolidato. Da tale grafico si è ricavato un indice di compressione di 0,97 ed un indice di ricomprensione di 0,10. Si può notare come ad un così alto valore di indice dei vuoti corrisponda un contenuto solido del materiale molto basso. Questo fenomeno è dovuto alla grande quantità d'acqua contenuta all'interno della matrice solida del campione.

Opdyke and Evans (2006) hanno valutato la consolidazione in funzione della radice del. I dati analizzati sono stati ricavati per un incremento di carico da 765 a 1530 KPa:

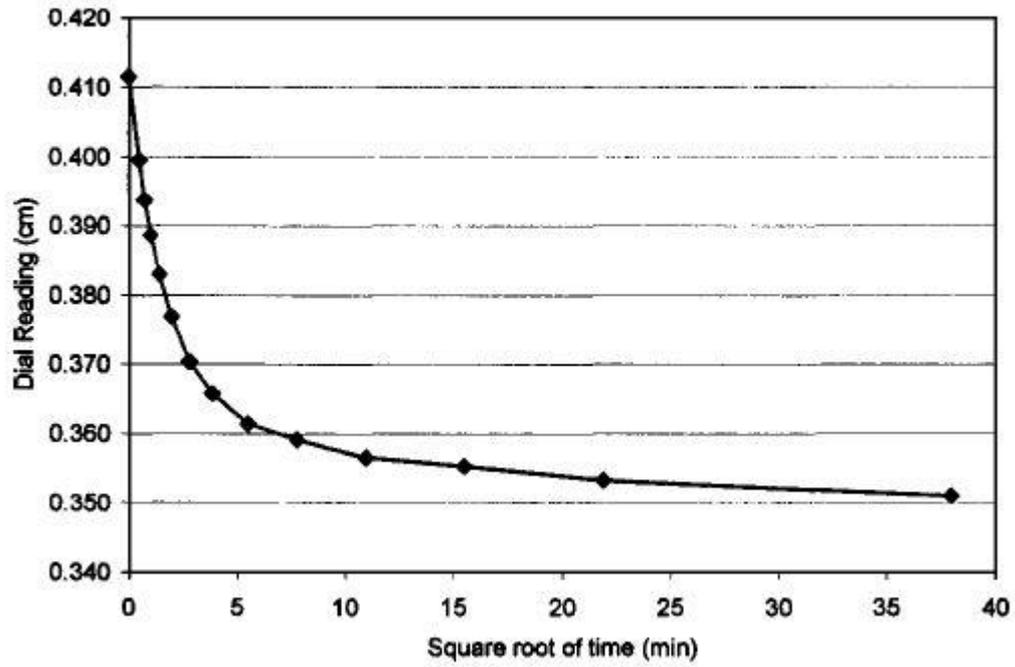


Figura 50. Curva di consolidazione (Opdyke and Evans, 2006).

Mediante tale rappresentazione è stato ricavato il valore del coefficiente di consolidazione  $C_v = 9,4 \cdot 10^{-3} [cm^2/sec]$ .

## 2.9 Royal (2018)

L'obiettivo di questo articolo è lo studio delle proprietà meccaniche delle miscele cemento-bentonite, andando a studiare la variazione di tali proprietà qualora vi fosse una sostituzione del cemento in miscela mediante scorie di altoforno (GGBS). Royal (2018) ha condotto lo studio mediante prove di compressione monoassiali, prove triassiali non drenate e prove edometriche.

### 2.9.1 Materiali

La miscela analizzata è stata realizzata mediante 40g di bentonite, 200g di cemento e 1000g d'acqua, con una sostituzione dell'80% di cemento mediante GGBS. Di seguito si riporta una tabella riassuntiva:

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

Tabella 14. Miscela utilizzata da Royal (2018).

### 2.9.2 Procedure

Il materiale è stato preparato miscelando acqua e bentonite per 5 minuti all'interno di un impastatore meccanico, dopo 24 ore di idratazione della bentonite, sono stati aggiunti il cemento e le scorie. La fase di colata è stata effettuata all'interno di cilindri di plastica,  $d=50$  [mm] e  $h=150$  [mm] per quanto riguarda le prove UCS e le triassiali,  $d=75$  [mm] e  $h=150$  [mm] per i campioni destinati agli edometri. Mediante le grandi altezze così ottenute è possibile eseguire un rimodellamento del campione a maturazione ultimata, che permette di eliminare le imperfezioni della faccia superiore venutesi a creare. La maturazione del materiale è stata condotta in acqua.

Le prove UCS e triassiali sono state condotte in controllo di deformazione, con un avanzamento del pistone di compressione di  $1,2$  [mm/min], i campioni testati hanno subito una maturazione di 7, 14, 28, 60, 90 giorni. Il numero di campioni testati ed i confinamenti radiali applicati durante le prove sono mostrati nella tabella 15:

	7 days	14 days	28 days	60 days	90 days
<i>0 kPa confinement</i>					
	6	5	9	5	3
<i>50 kPa confinement</i>					
	6	6	4	5	4
<i>100 kPa confinement</i>					
	5	6	4	4	3
<i>200 kPa confinement</i>					
	5	5	5	5	4

Tabella 15. Numero di campioni, maturazione e confinamento dei campioni testati (Royal 2018).

Le prove di consolidazione sono state eseguite mediante edometri, su campioni con tempo di curing di 7, 14, 28 e 60 giorni. I carichi per le prove di consolidazione sono arrivati ad un valore massimo di 3200KPa. I risultati delle prove di conducibilità sono stati ottenute per lo step di carico tra 800 e 1600KPa.

### 2.9.3 Prove Triassiali ed UCS

La miscela CBG-5-80 mostra un aumento del valore di snervamento sia all'aumentare del confinamento radiale che del tempo di maturazione. Si registrano variazioni di 500KPa del valore del deviatore a rottura tra campioni invecchiati 7 e 90 giorni, risultati delle prove sono mostrati nella figura seguente:

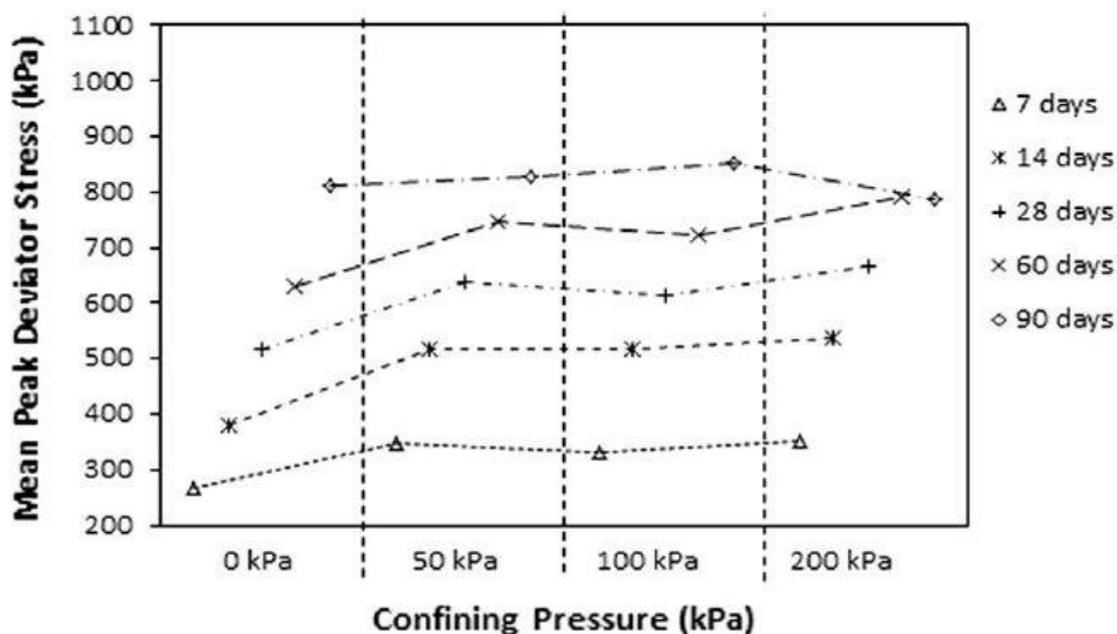


Figura 51. Resistenza media dei campioni in funzione del confinamento radiale (Royal 2018).

A tali picchi sono associati le seguenti deformazioni assiali medie:

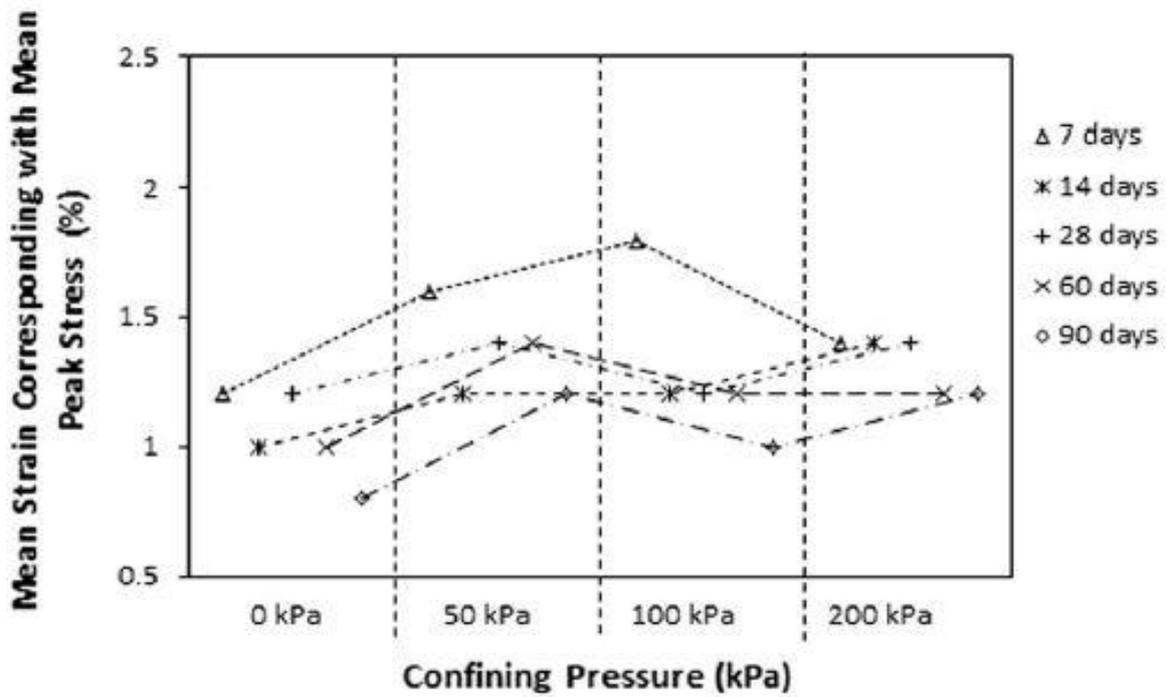


Figura 52. Deformazioni assiali medie a rottura (Royal 2018).

Si seguito si riportano le prove eseguite su campioni aventi 28 giorni di maturazione:

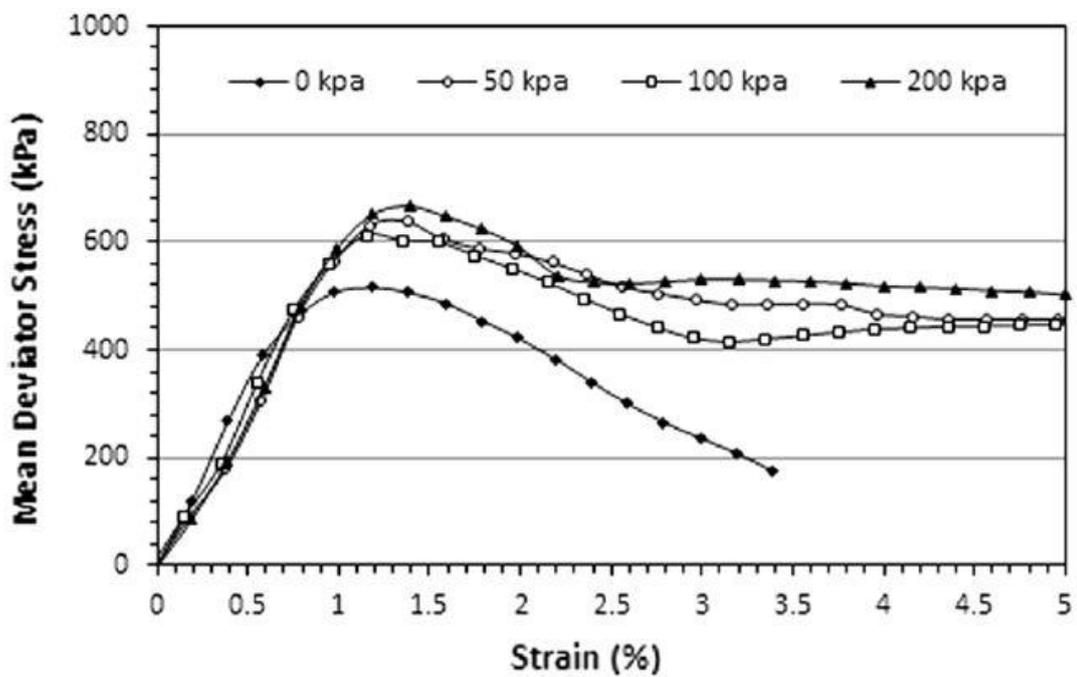


Figura 53. Andamento prove UCS e triassiali su campioni aventi un tempo di maturazione di 28 giorni (Royal 2018).

Si può notare come per valori di confinamento radiale superiore a 50KPa i picchi tendono a sovrapporsi, esibendo una fase di softening post picco. Dopo aver raggiunto una deformazione del 1,5% i campioni vanno a rottura mostrando una rottura per taglio come mostrato in figura 54:



Figura 54. Rottura per taglio di un campione (Royal 2018).

I campioni invecchiati 90 giorni esibiscono resistenze molto più elevate di quelle esposte fin ora, si riportano i risultati medi delle prove di compressione eseguite su tali campioni:

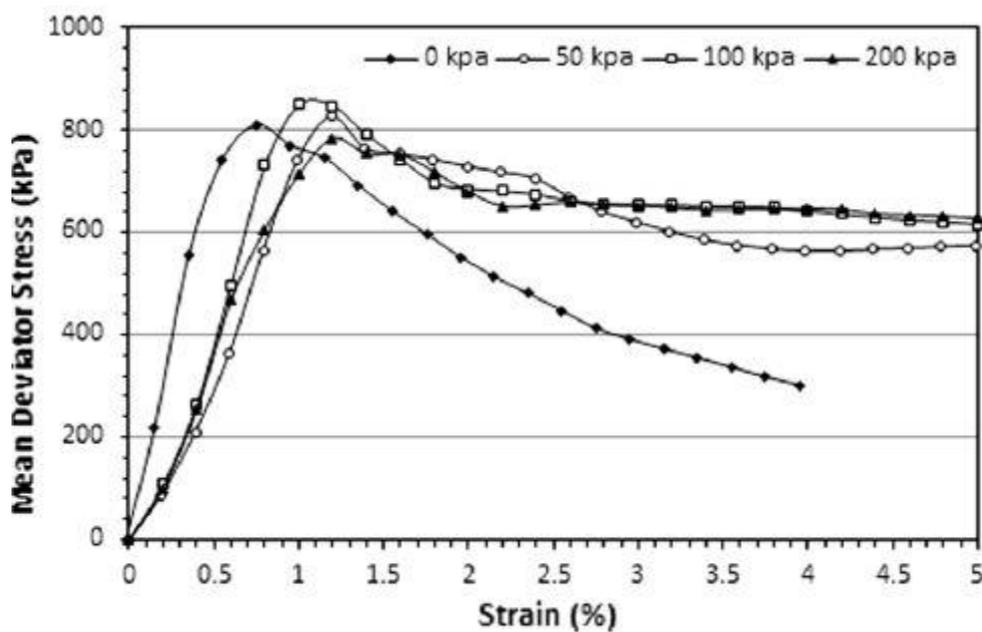


Figura 55. Prove di compressione su campioni invecchiati 90 giorni (Royal 2018).

## 2.9.4 Prove Edometriche

Mediante queste prove si vogliono reperire informazione sulla deformabilità assiale e la conducibilità idraulica del materiale in funzione del tempo di maturazione.

### 2.9.4.1 Compressibilità

Il materiale mostra un apparente sovraconsolidazione, questo comportamento è attribuito all'effetto legante del cemento. Una volta mandato a rottura lo scheletro di cemento il materiale subisce delle deformazioni molto marcate. Si riporta di seguito una curva edometrica ricavata mediante una prova condotta su un campione maturato 28 giorni:

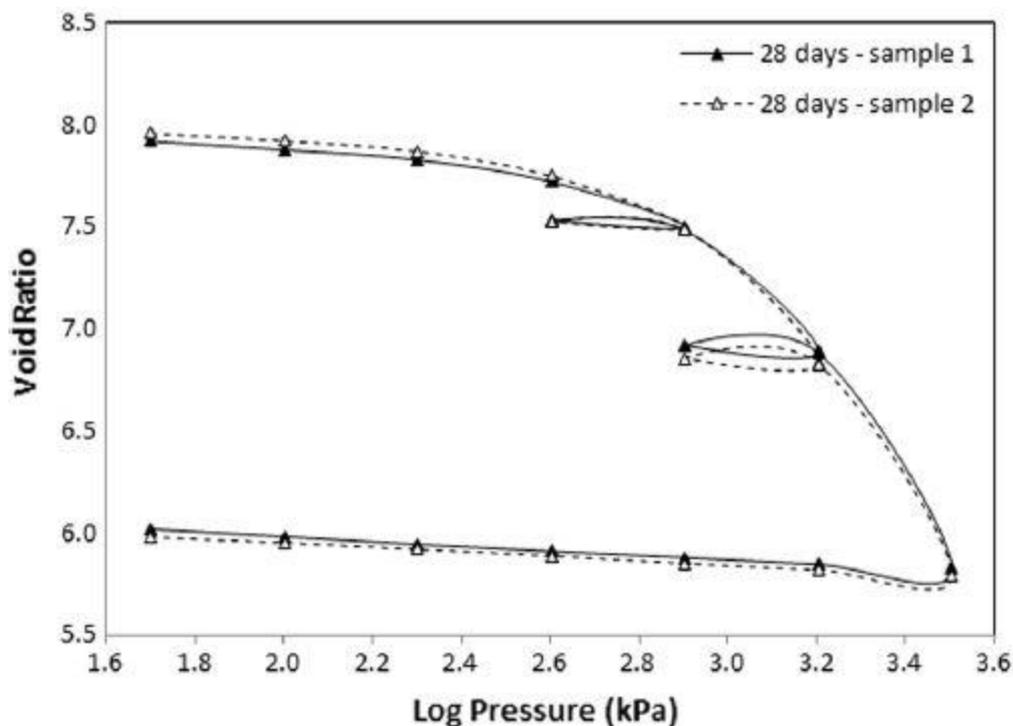


Figura 56. Prova edometrica su campione invecchiato 28 giorni (Royal 2018).

Si riportano di seguito le curve di consolidazione eseguite su un campione avente un invecchiamento di 28 giorni. Come si può notare, durante il carico da 800 KPa si è superata la soglia di resistenza del cemento indurito contenuto in miscela. Una volta venuto a mancare il sostegno dello scheletro solido, per via dell'alto contenuto di vuoti, si manifestano grandi deformazioni assiali.

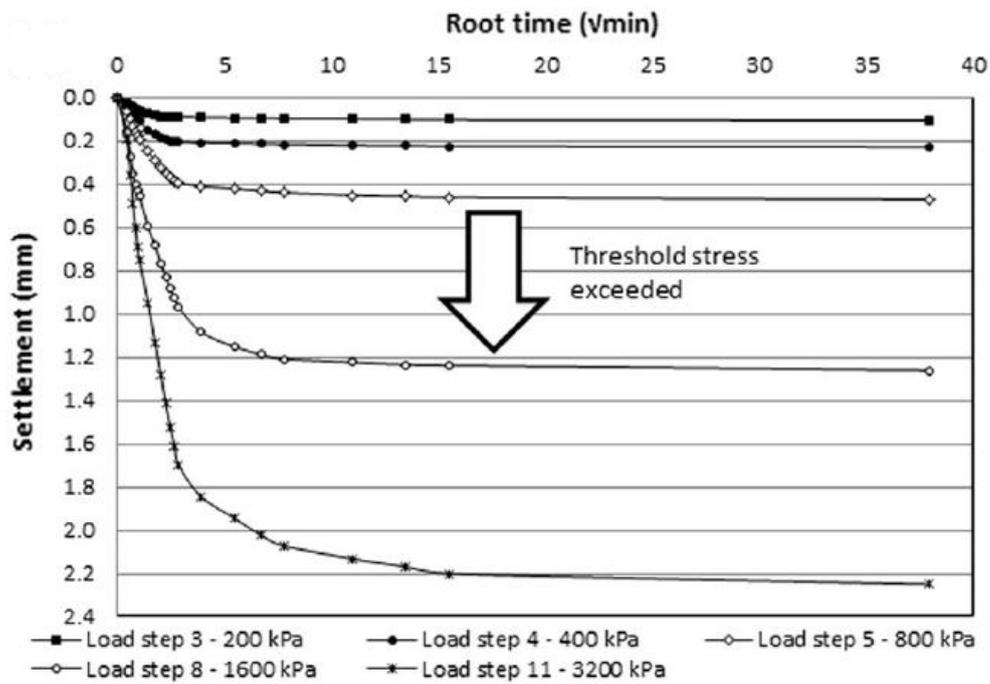


Figura 57. Curve di consolidamento di un campione invecchiato 28 giorni (Royal 2018).

### 2.9.4.2 Conducibilità idraulica

La conducibilità idraulica del materiale è in funzione sia dell'invecchiamento che dai carichi subiti dal materiale. La figura 58 mostra l'evoluzione della conducibilità in funzione del tempo di maturazione e degli step di carico assegnati:

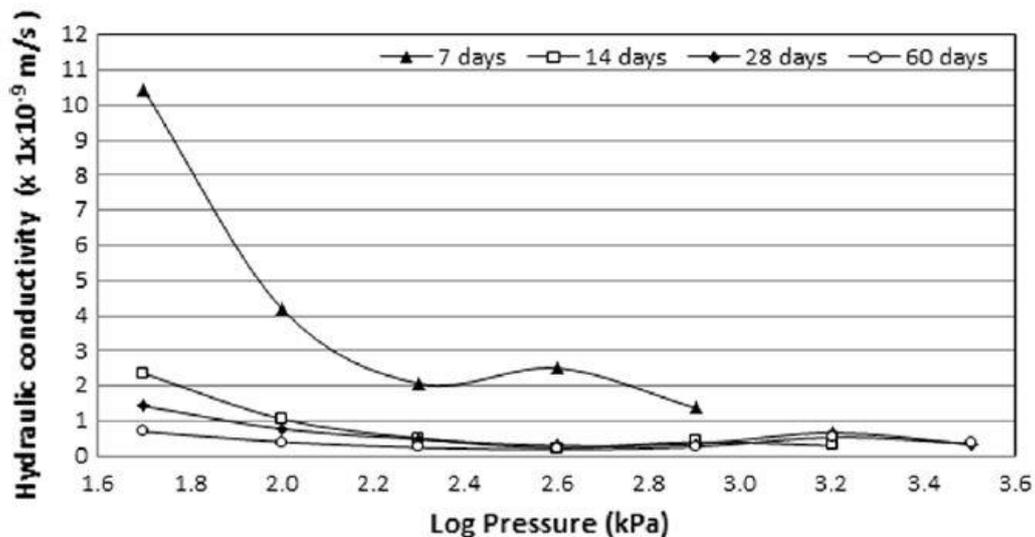


Figura 58. Andamento della conducibilità idraulica in funzione dell'invecchiamento e dei carichi subiti (Royal 2018).

Come si può notare all'aumento del carico verticale si ha una riduzione della porosità e quindi una conducibilità idraulica minore. Dopo i primi 14 giorni di maturazione e per carichi superiori ai 100 KPa le conducibilità non dipendono più dalla maturazione del campione.

## 2.10 Veràstegui et al. (2013)

In questo articolo viene analizzato il modulo di taglio a piccole deformazioni ( $G_0$ ) e la conducibilità idraulica delle miscele cemento-bentonite in contatto con acqua o una soluzione contenente solfati. Una attrezzatura in grado di valutare  $G_0$  è montato all'interno di un permeometro a pareti flessibili per avere acquisizioni simultanee di  $k$  e  $G_0$ . Veràstegui et al. (2013) hanno voluto studiare l'andamento di queste due quantità durante la permeazione con acqua o fluido chimicamente attivo.

### 2.10.1 Materiali

Il materiale studiato è una miscela cemento-bentonite, costituita dal 4% di bentonite, 16% di cemento e l'80% d'acqua (percentuali in peso). Di seguito viene riportato una tabella riassuntiva del codice e del materiale costituente la miscela:

Codice	Cemento [g]	Bentonite [g]	Acqua [g]
CB-4-0	160	40	1000

Tabella 16. Miscela studiata da Veràstegui et al. (2013).

### 2.10.2 Procedure

La miscela è stata preparata miscelando l'acqua e la bentonite per 5 minuti tramite un miscelatore meccanico, susseguentemente è stata lasciata idratare per 24 ore. Susseguentemente, è stato aggiunto il cemento e miscelato con la soluzione per 10 minuti. La miscela è stata colata in cilindri aventi un diametro di 100 mm ed una altezza di 60 mm. La maturazione è avvenuta in acqua pulita.

Il modulo di taglio a piccole deformazioni è stato ricavato mediante due elementi in grado di flettersi, allocati al top ed al bottom del campione. Uno dei due elementi flettendosi induce delle onde di taglio nel materiale che propagandosi ad una velocità  $V_s$  raggiungono l'altro elemento. Conoscendo il tempo impiegato dall'onda per attraversare il campione e la lunghezza dello stesso il  $G_0$  viene ricavato con la seguente formulazione:

$$G_0 = \rho V_s^2$$

Equazione 2

Dove  $\rho$  è la densità del campione,  $V_s^2$  è valutato come segue:

$$V_s = L/t_s$$

Equazione 3

Dove L è la distanza fra emettitore e ricevitore e  $t_s$  è il tempo trascorso tra l'immissione dell'onda dall'emettitore e la registrazione da parte del ricevitore. Si riporta di seguito un immagine della strumentazione di prova:

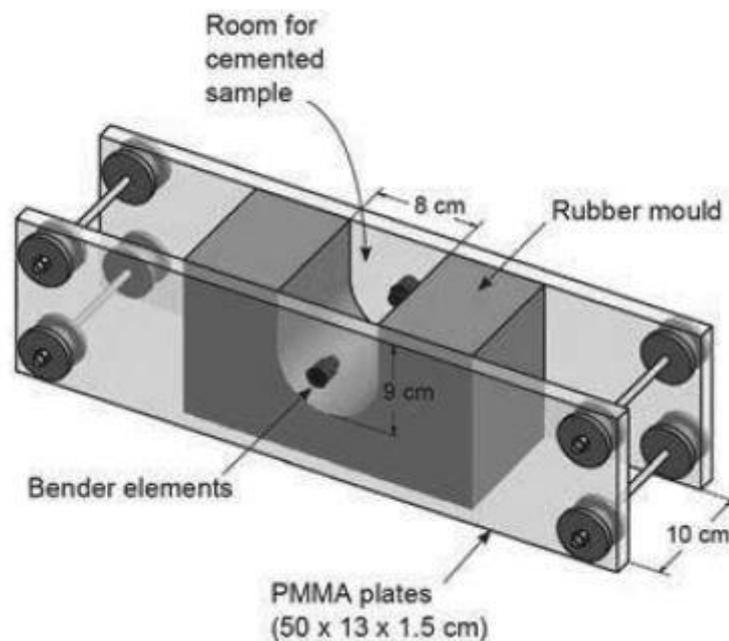


Figura 59. Strumentazione di prova (Veràstegui et al., 2013).

Prima delle prove di permeazione il campione è stato consolidato ad una pressione isotropa di 30KPa e susseguentemente permeato per un mese mediante acqua deionizzata. Terminata questa fase l'acqua deionizzata è stata sostituita mediante una soluzione di Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e la permeazione è continuata per un periodo di 250 giorni. Il processo di purificazione della bentonite mediante acqua ionizzata è stato effettuato per rimuovere gli ioni in eccesso dalla superficie delle lamelle del materiale. Con questa operazione Veràstegui et al.(2013) hanno cercato di far migrare tutti gli ioni non necessari all'equilibrio elettronico della superficie del materiale nella soluzione deionizzata. Tale processo è stato eseguito per non avere reazioni chimica indesiderate tra il materiale e la soluzione di solfato di sodio.

## 2.10.3 Risultati

### 2.10.3.1 Modulo di taglio a piccole deformazioni

La figura 58 mostra tutte le misurazioni di  $G_0$ , sia quelle eseguite sul materiale soggetto a permeazione che quelle sul materiale non soggetto a tale processo:

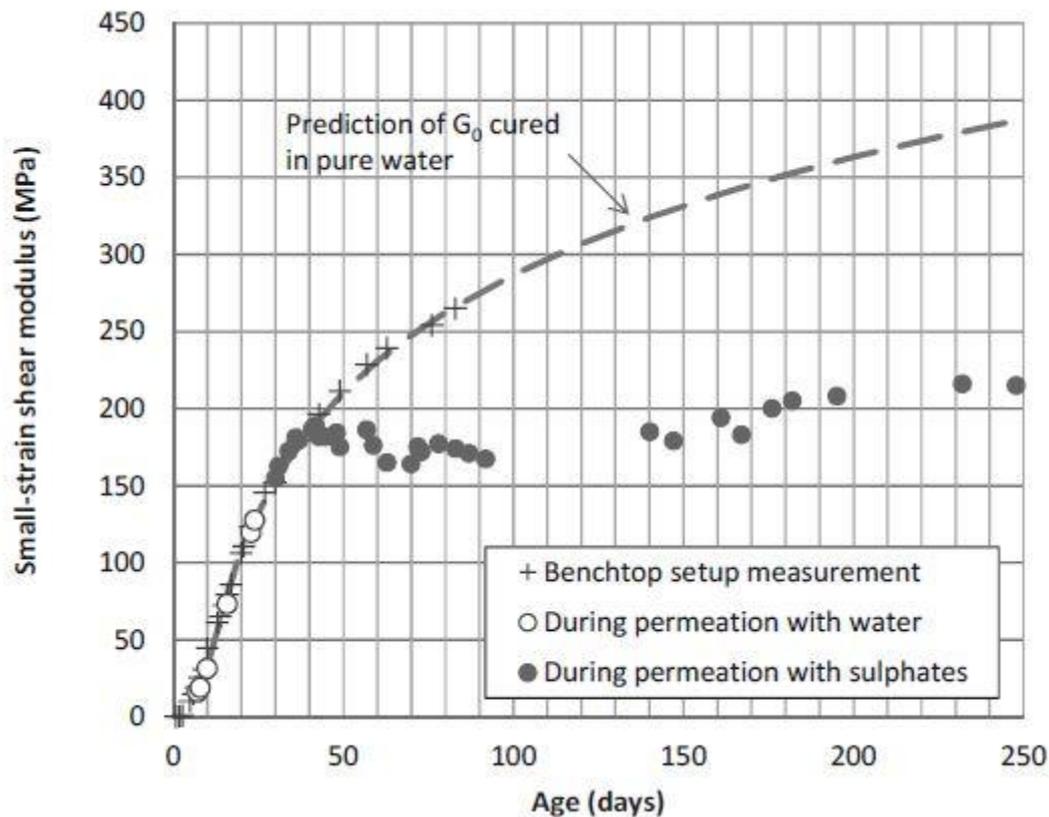


Figura 60. Andamento del  $G_0$  nel materiale permeato dall'acqua o dalla miscela a base di solfati (Veràstegui et al., 2013).

Inizialmente si può vedere una rapida crescita del modulo di taglio a piccole deformazioni. Cambiato il liquido permeante si assiste ad una caduta di tale valore, che, anche se in continua crescita, raggiungerà valori pari circa alla metà di quelli raggiungibili dal materiale non attaccato chimicamente. Questi dati mostrano le problematiche legate alla durabilità del materiale soggetto alla permeazione di solfati.

### 2.10.3.2 Conducibilità idraulica

La figura 61 mostra l'andamento della conducibilità idraulica del campione soggetto in un primo periodo alla permeazione mediante acqua deionizzata, e, susseguentemente ad una soluzione chimicamente attiva:

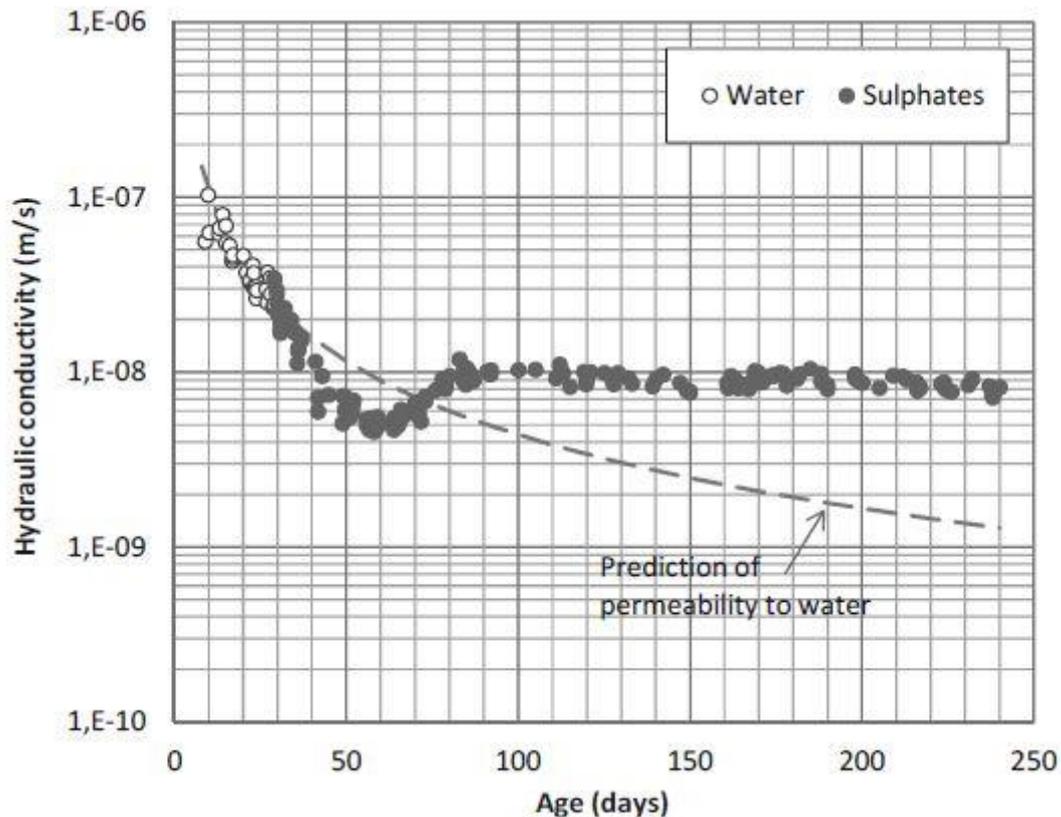


Figura 61. Andamento conducibilità idraulica (Veràstegui et al., 2013).

Durante la prima fase di permeazione con acqua si ha un graduale decremento della conducibilità. Nella seconda fase della prova, all'interno della miscela cemento-bentonite viene instaurato un moto di filtrazione con una soluzione di  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . I risultati mostrano un deterioramento immediato del campione, leggibile come un aumento della conducibilità idraulica.

## 2.11 Analisi stato dell'arte

In questa fase si vogliono analizzare i dati recepiti dalla letteratura, confrontando le ricerche precedentemente presentate. In tal modo si vuole ottenere una visione d'insieme delle proprietà della miscela che andremo ad analizzare nei seguenti capitoli. Le miscele studiate si possono dividere in due categorie, con e senza il rimpiazzo di scorie d'altoforno. A tal fine si avrà una trattazione per ognuna di queste due tipologie di materiali.

### 2.11.1 Proprietà meccaniche

La resistenza meccanica del materiale è stata ampiamente studiata tramite prove triassiali, prove di compressione monoassiale e prove edometriche.

#### 2.11.1.1 Materiali

Le composizioni delle miscele che si andranno a confrontare sono riportate nella tabella seguente:

<b>Autore</b>	<b>Codice</b>
Evans e Opdyke (2005)	CB-3-0 (EO)
	CB-4-0 (EO)
Carreto et al. (2015)	CB-4-0 (C)
Evans e Opdyke (2005)	CBG-3-80 (EO)
Evans e Opdyke (2005)	CBG-4-80 (EO)
Soga et al. (2013)	CBG-4-80 (S)
Royal (2018)	CBG-5-80 (R)

*Tabella 17. Miscele analizzate per i confronti fra gli autori.*

La scelta di queste miscele è stata dettata dalla necessità di poter confrontare materiali con caratteristiche analoghe. Come si può notare vengono analizzate delle miscele prevalentemente con un rapporto bentonite-cemento di 1:3 e 1:4. Le miscele aventi un rimpiazzo di scorie d'altoforno presentano un rimpiazzo dell'80%, questo è dovuto al gran miglioramento che apportano sia dal punto di vista meccanico che idraulico al materiale. La denominazione letteraria adiacente al codice della miscela è stata ottenuta utilizzando le iniziali degli autori che hanno precedentemente studiato quella miscela.

### 2.11.1.2 Prove triassiali non drenate ed UCS

Di seguito viene riportato un grafico raffigurante l'andamento della tensione di snervamento di picco delle miscele classificate CB (senza il rimpiazzo di scorie d'altoforno):

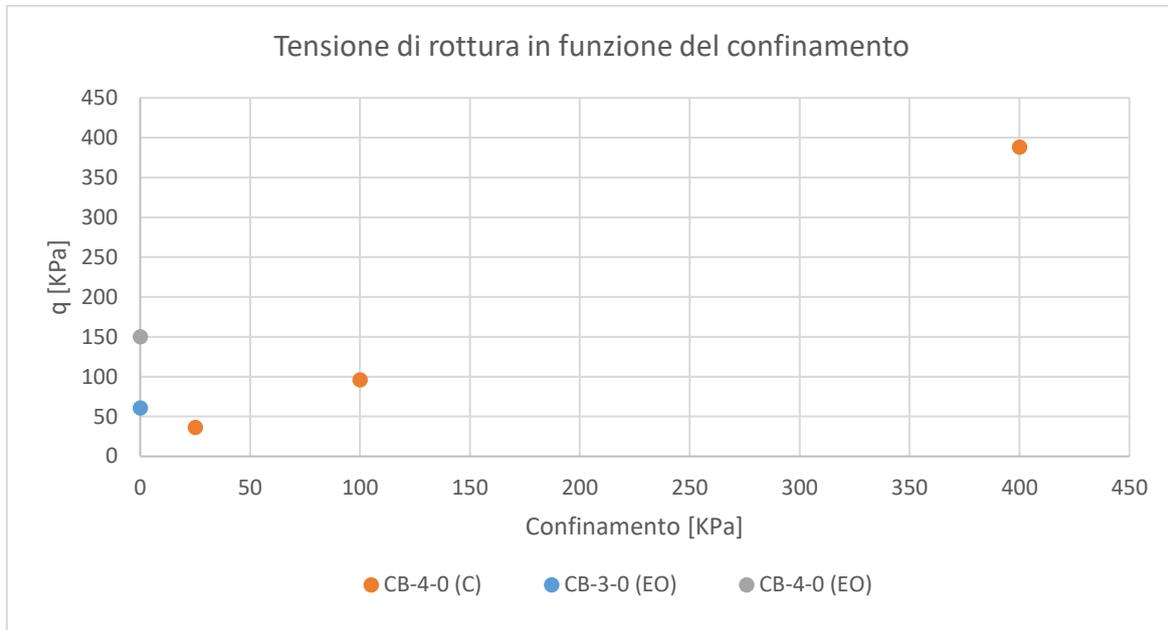


Figura 62. Andamento della tensione di snervamento in miscele cemento-bentonite

I dati a disposizione mostrano un marcato aumento della tensione di snervamento all'aumentare del confinamento, tale aumento viene anche riscontrato all'aumento del cemento in miscela.

Analizzando i dati relativi alle miscele contenenti le scorie d'altoforno si può osservare una forte dipendenza dal confinamento applicato. Infatti per alti valori di contenimento radiale, il comportamento meccanico del materiale, perde la dipendenza dal quantitativo di cemento presente in miscela. Per quanto riguarda le prove di compressione monoassiale, i dati presenti in letteratura ci esplicano una dipendenza tra la tensione di snervamento ed il quantitativo di cemento presente in miscela. In quanto passando da un rapporto cemento/ bentonite da 3 a 5, la tensione di snervamento aumenta da 250 a 525 KPa. Di seguito si riporta una rappresentazione dei dati recepiti dalle ricerche di Evans e Opdyke (2005), Soga et al. (2013) e Royal (2018).

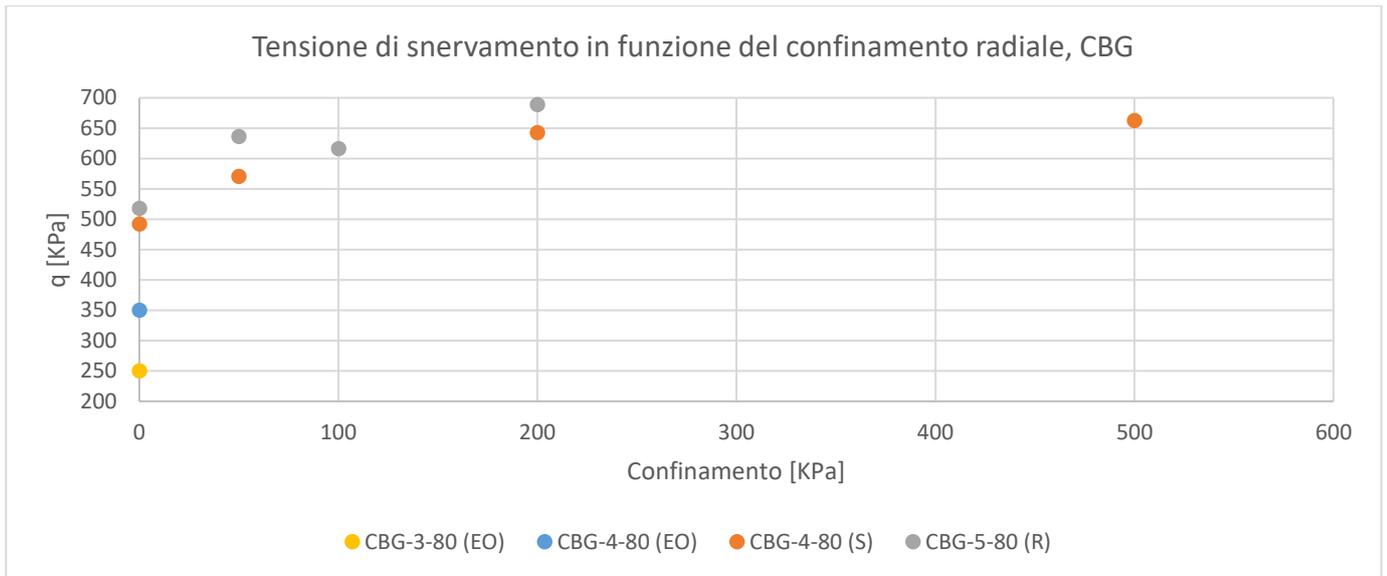


Figura 63. Andamento della tensione di snervamento in miscele cemento-bentonite-scorie d'altoforno.

Andando a confrontare i dati riguardanti le miscele con e senza presenza di rimpiazzo, si può notare il netto incremento della tensione di snervamento per miscele contenente il rimpiazzo:

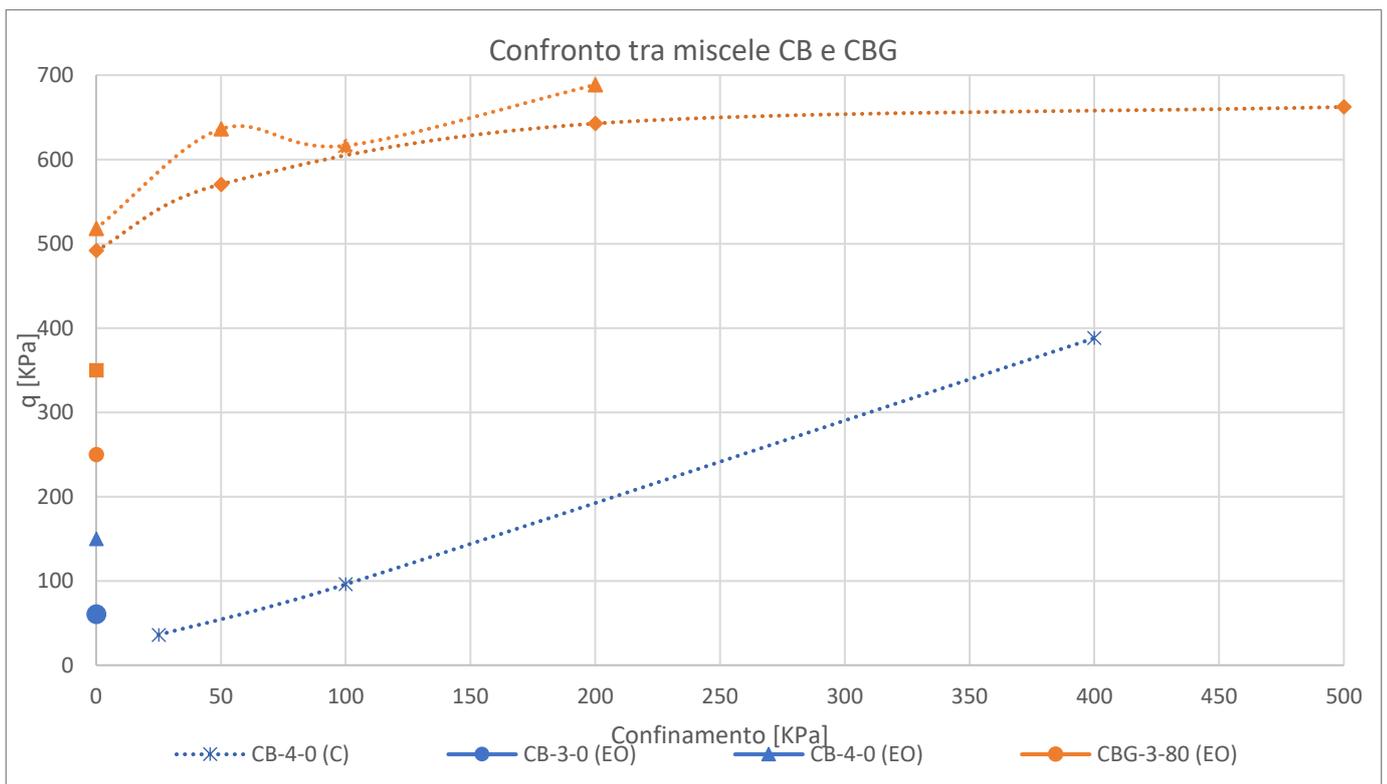


Figura 64. Variazione della tensione di snervamento in funzione del confinamento.

Le varie miscele analizzate non hanno le medesime proprietà, in quanto presentano alcune differenze tra di loro, che si presentano sotto forma di un diverso comportamento meccanico. Una differenza rilevante si riscontra nel tempo d'invecchiamento delle miscele analizzate, tutti i

campioni utilizzati presentano una stagionatura di 28 giorni, a meno dei dati recepiti da Soga et al. (2013) CBG-4-80 (S), che presentano un tempo di curing di 3,25 anni. L'aumento di resistenza dovuto al maggior invecchiamento va a compensare la più bassa quantità di cemento contenuto in miscela, facendo eguagliare la resistenza dei campioni con quelli esposti da Royal (2013) CBG-5-80 (R). La marcata inferiorità di resistenza presentata dai campioni CB-3-0 e CB-4-0 è spiegabile dalla mancanza di sostituzione del cemento mediante scorie d'altoforno, che apportano un notevole aumento di rigidità nel materiale finale. Andando ad analizzare i dati delle prove triassiali aventi un confinamento di 100KPa si evince che mediante l'aggiunta di GGBS si ha un notevole aumento di resistenza ed un aumento di deformabilità assiale a rottura:

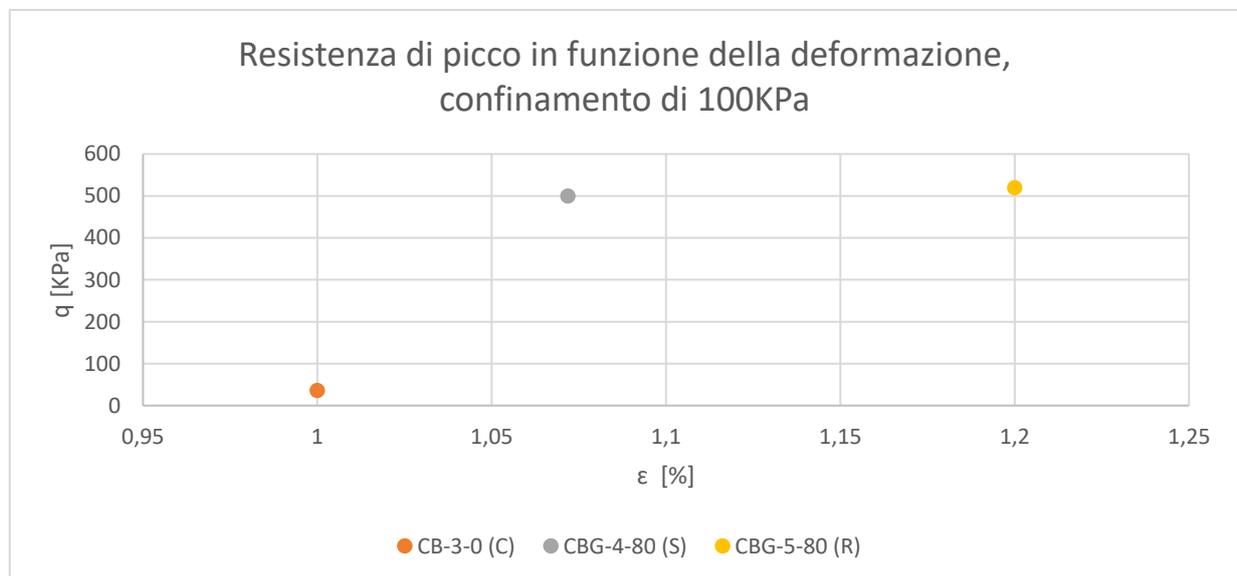


Figura 65. Valori di picco dello sforzo deviatorico Prove triassiali non drenate con confinamento di 100KPa.

### 2.11.1.3 Prove edometriche

Di seguito viene riportato l'andamento di due prove edometriche condotte da Carreto et al. (2015) su miscele di tipo CB-4-0 (C), la differenza tra le due prove è il carico verticale massimo raggiunto:

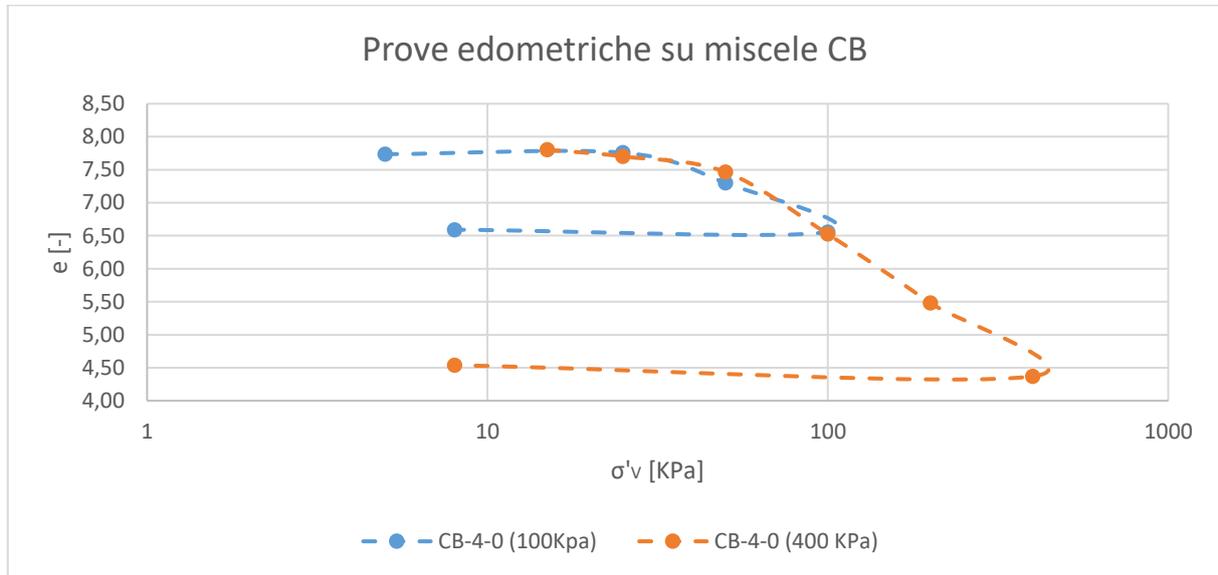


Figura 66. Prove edometriche su campioni costituiti da bentonite e cemento.

Data la rappresentazione in scala logaritmica i carichi massimi applicati sono rispettivamente per le due prove 100 e 400 KPa. Da questa rappresentazione si possono ricavare l'indice di rigonfiamento  $C_s$  e l'indice di compressibilità  $C_c$ :

Miscela	$C_c$	$C_s$
CB-4-0 (100Kpa)	1.22	0.09
CB-4-0 (400 KPa)	1.59	0.12

Tabella 18. Indici di rigonfiamento e compressibilità delle miscele cemento-bentonite.

Per quanto riguarda le miscele contenenti rimpiazzo di scorie d'altoforno, sono stati analizzati i risultati riportati da Evans and Opdyke (2005) e Royal (2018). Che vedono lo studio delle miscele CBG-3-75 (EO) e CBG-5-80 (R). Viene riportato in seguito un grafico con le curve edometriche da loro ottenute:

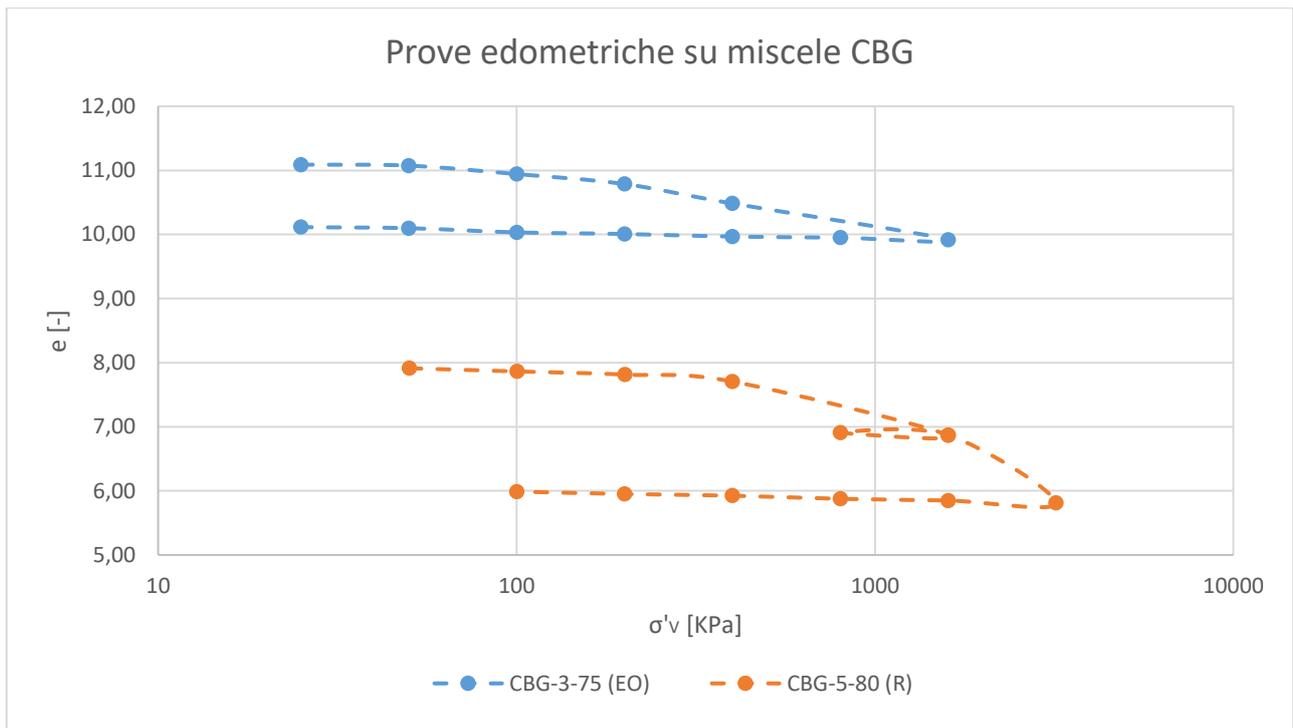


Figura 67. Prove edometriche su campioni costituiti da bentonite, cemento e ggbs.

I due materiali differiscono per due principali caratteristiche. La prima è il diverso invecchiamento, la miscela CBG-3-75 (EO) è maturata per 15 mesi a differenza dei 28 giorni della miscela CBG-5-80 (R). La seconda è il contenuto di cemento contenuto nella composizione CBG-5-80 (R), quasi il doppio rispetto all'altra. Il più alto valore di cemento in miscela fa diminuire il valore dell'indice dei vuoti iniziale del materiale. Graficamente questo fenomeno si riscontra con un abbassamento della curva edometrica. Nella figura seguente è riportato il confronto tra la miscela CB-4-0 (C) e la CBG-5-80 (R):

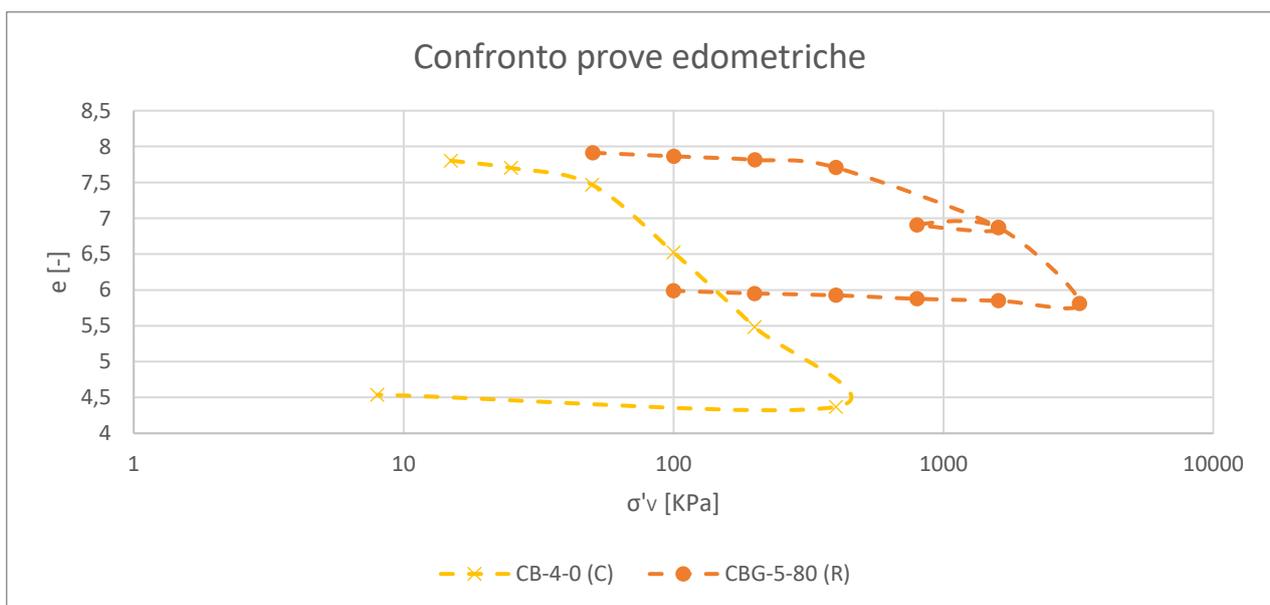


Figura 68. Confronto tra miscele cemento-bentonite e cemento-bentonite-ggbs.

Come si può notare la miscela CBG-5-80 risulta più rigida rispetto alla CB-4-0, questo fenomeno è dovuto alla presenza di rimpiazzo del cemento mediante le scorie d’altoforno. Anche se l’indice dei vuoti iniziale è confrontabile tra le due miscele, applicata una tensione verticale di 100KPa la miscela CB-4-0 vede una forte consolidazione, che comporta la diminuzione di ‘e’ di circa 1,25. Mentre applicando la medesima tensione verticale, 100 KPa, al campione costituito dalla miscela CBG-5-80, si assiste ad un decremento dell’indice dei vuoti di 0,25. Tale differenza mostra la grande differenza tra il comportamento meccanico delle due miscele. Tale fenomeno è dovuto al rimpiazzo di scorie d’altoforno presente nella miscela CB-5-80, che influenza la tensione di snervamento, facendola aumentare.

## 2.11.2 Proprietà idrauliche

I risultati seguenti vengono recepiti dalle ricerche di Evans e Opdyke (2005), Carreto et al. (2015), Pasqualini e Fratolocchi (2000), Royal (2018) e Soga et al. (2013), che fanno riferimento a misure di conducibilità da prove triassiali e prove in permeometro a pareti flessibile.

### 2.11.2.1 Materiali

Sono state analizzate sia miscele di cemento bentonite classiche sia miscele cemento bentonite con rimpiazzo del cemento presente in miscela con scorie d’altoforno. Di seguito viene riportata una tabella riassuntiva dei materiali utilizzati:

<b>Autore</b>	<b>Codice</b>
Carreto et al. (2015)	CB-3-0 (C)
Evans e Opdyke (2005)	CB-3-0 (EO)
	CB-4-0 (EO)
Fratolocchi et al. (2005)	CB-4-0 (F)
Veràstegui et al. (2013)	CB-4-0 (V)
Evans e Opdyke (2005)	CBG-3-80 (EO)
	CBG-4-80 (EO)
Soga et al. (2013)	CBG-4-80 (S)
Royal (2018)	CBG-5-80 (R)

*Tabella 19. Miscele prese in esame per la conducibilità idraulica.*

Anche in questo caso si è cercato di selezionare le molte miscele studiate dagli autori in modo tale da avere un uniformità nelle percentuali di cemento e rimpiazzo del materiale. A tal fine si sono scelte le miscele in base ai rapporti di cemento/argilla, scegliendo un range per l'indagine compreso fra 3 e 5. Per quanto riguarda le miscele aventi delle scorie d'altoforno si sono considerati solo i materiali aventi l'80% di cemento rimpiazzato.

### 2.11.2.2 Prove di conducibilità

Di seguito viene mostrato il grafico raffigurante i risultati delle prove di conducibilità su un materiale composto solo da cemento, bentonite ed acqua:

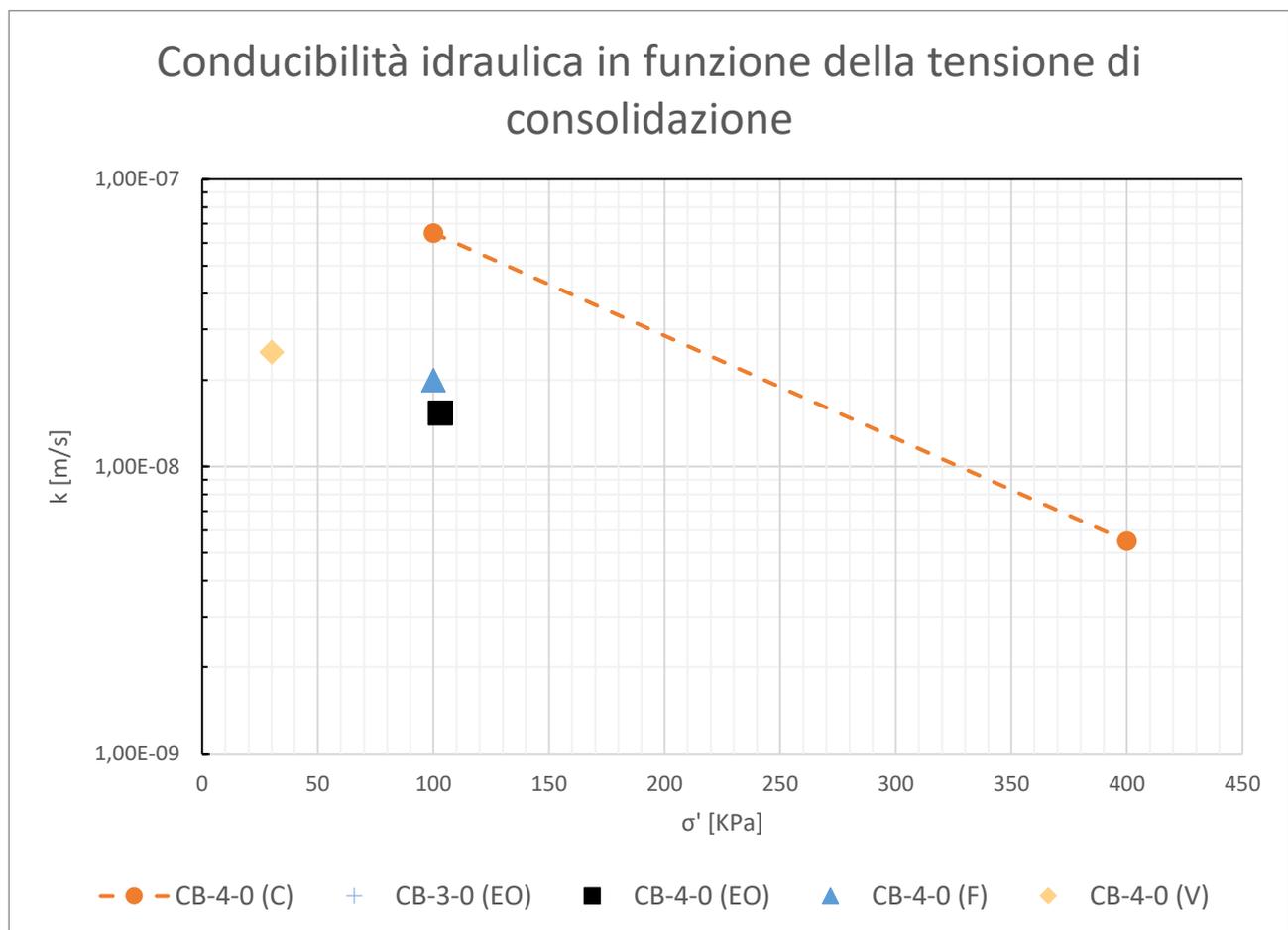


Figura 69. Conducibilità in funzione del confinamento per miscele cemento-bentonite, in scala logaritmica.

Si può notare una diminuzione della conducibilità idraulica all'aumentare della tensione di consolidazione. Questo fenomeno è dovuto alla diminuzione dell'indice dei vuoti all'aumentare delle sollecitazioni imposte al campione. Si è riscontrato che tutte le miscele analizzate hanno il medesimo comportamento, indipendentemente dalla quantità di cemento presente in miscela. A tale

proposito viene presentato di seguito un grafico raffigurante la variazione della conducibilità in funzione della quantità di cemento presente nel materiale. I campioni esaminati hanno subito un processo di consolidazione con una tensione efficace di 100KPa:

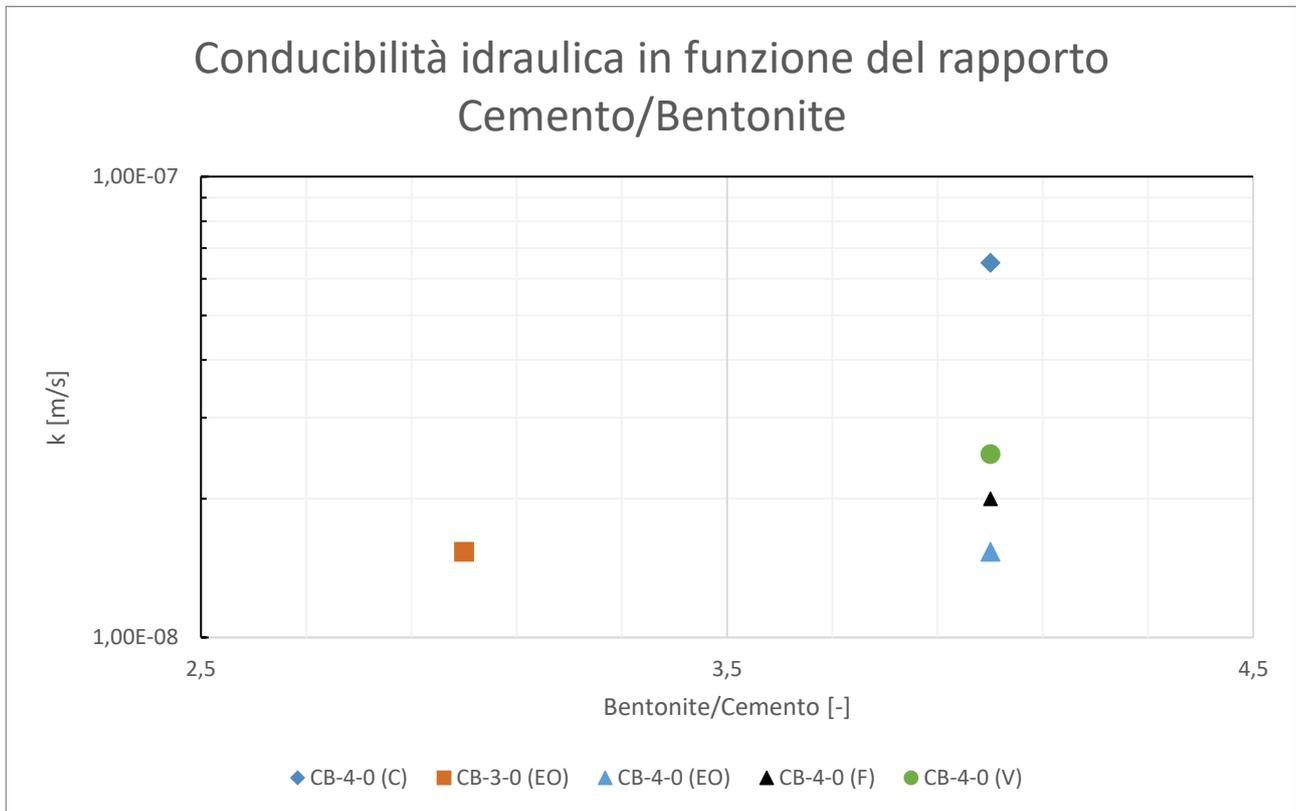


Figura 70. Andamento della conducibilità in funzione del rapporto Cemento/Bentonite, in scala logaritmica.

Per le miscele analizzate si può notare una diminuzione della conducibilità all'aumentare della quantità di cemento presente in miscela. Tale fenomeno è attribuibile alla maggior presenza di aghi di silicati nelle miscele CB-4-0, che durante la loro formazione occludono i pori del materiale.

Andando ad analizzare i dati riguardanti le miscele contenenti le scorie d'altoforno, possiamo notare come anche in questo caso, il valore di conducibilità del materiale si riduce al crescere della tensione di consolidazione.

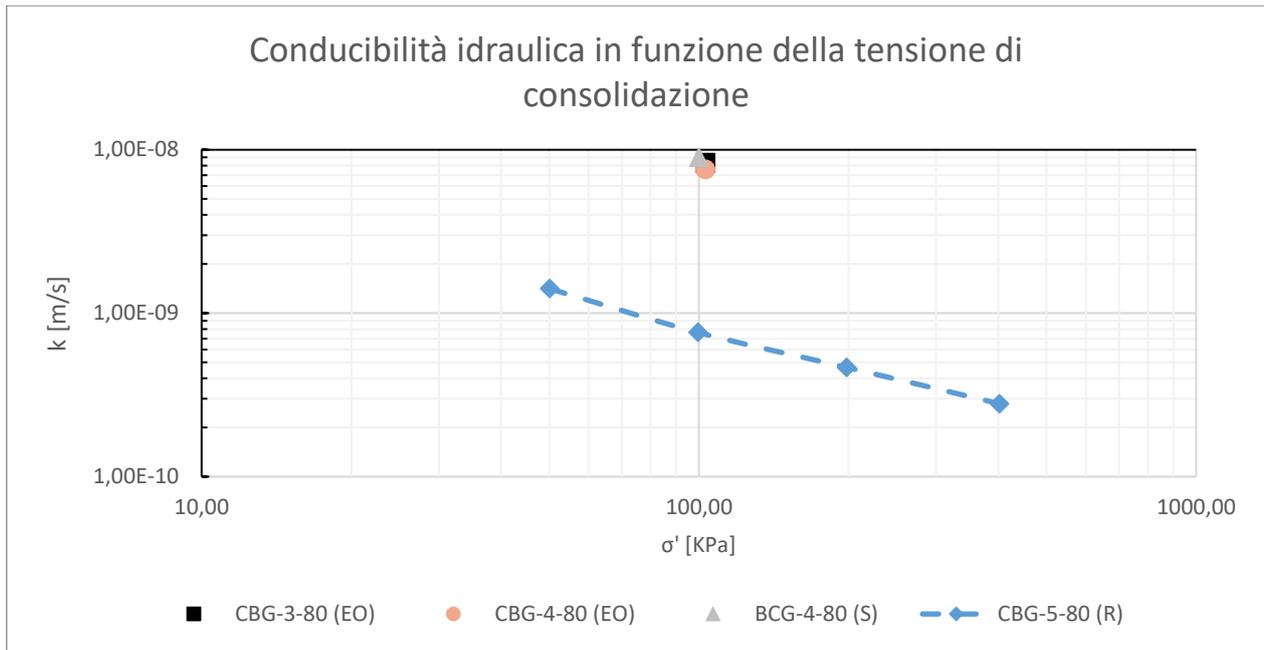


Figura 71. Conducibilità idraulica in funzione della tensione di consolidazione per campioni contenenti scorie d'altoforno, in scala logaritmica.

La variazione di quasi un ordine di grandezza del valore di  $k$  tra i campioni CBG-3-80 e CBG-4-80 a confronto con il campione CBG-5-80 è dovuta alla maggior quantità di cemento presente in quest'ultima miscela. Andando a studiare i valori di conducibilità in funzione del contenuto di cemento, ad una tensione di consolidazione di 100 KPa, si può notare come una variazione di rapporto di Cemento/Bentonite da 2 a 3 non fa variare significativamente la conducibilità idraulica. Al contrario sembra esserci una diminuzione di tale valore quando si utilizza un rapporto Cemento/Bentonite pari a 5.

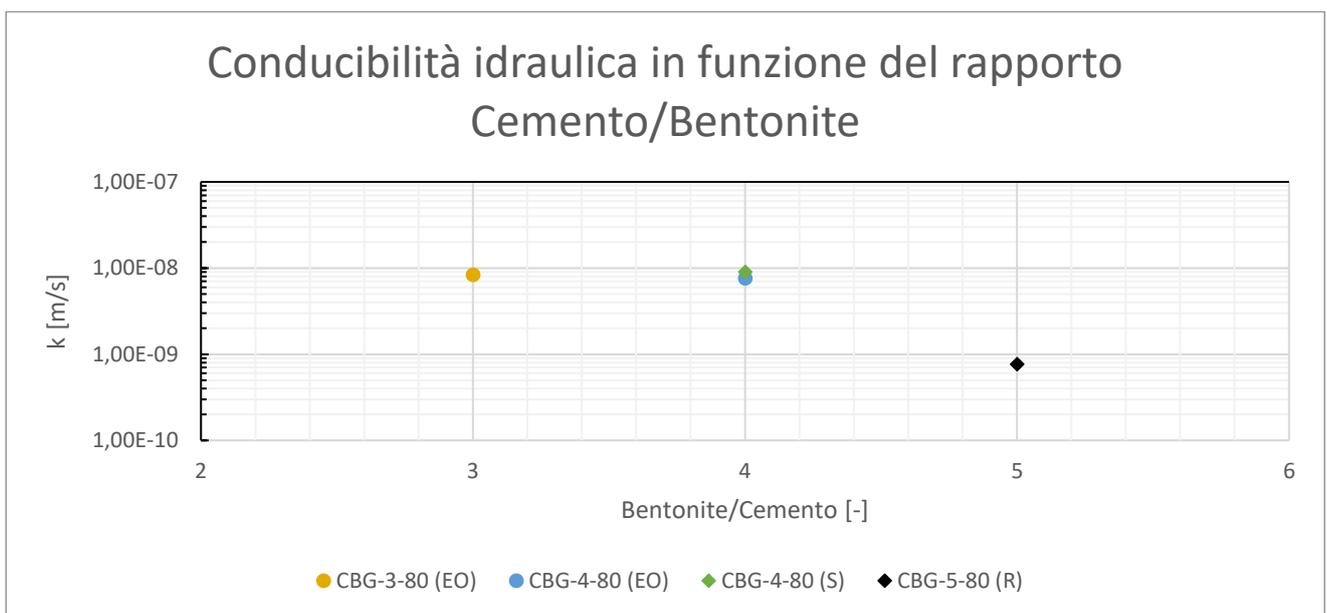


Figura 72. Andamento della conducibilità idraulica per miscele aventi sostituzione di scorie d'altoforno, per una tensione di consolidazione di 100KPa.

Di seguito viene riportato un grafico rappresentante un confronto fra miscele aventi rimpiazzo di scorie d'altoforno e miscele senza alcun tipo di rimpiazzo, tutti i campioni esaminati hanno subito una consolidazione ad una tensione efficace di 100 KPa:

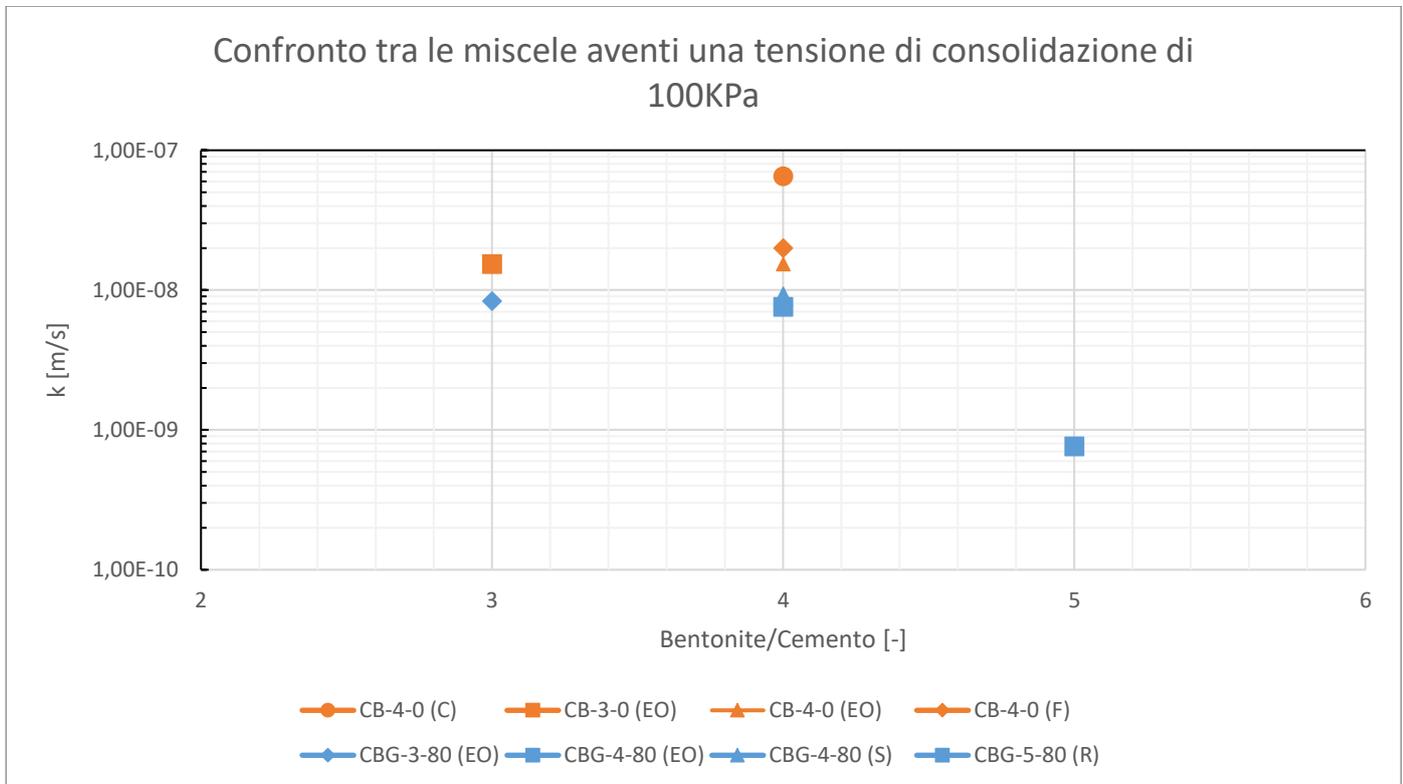


Figura 73. Confronto delle miscele analizzate in funzione di una tensione di consolidazione pari a 100KPa.

Come si può notare il rimpiazzo del cemento mediante scorie favorisce un abbassamento della conducibilità idraulica, indipendentemente dalla quantità iniziale di cemento presente in miscela.

### 3. Attrezzatura di laboratorio e metodi sperimentali

Il capitolo presente si pone l'obiettivo di descrivere le attrezzature utilizzate per le prove eseguite sulle miscele cemento-bentonite. A tal fine si analizzeranno sia il funzionamento meccanico della strumentazione, sia la metodologia con cui vengono eseguite le prove.

#### 3.1 Prova di compressione Triassiale

Mediante la prova di compressione triassiale si è in grado di determinare le caratteristiche di resistenza al taglio e deformabilità di un materiale. La prova su un terreno si divide in due fasi, il primo step è la pre-sollecitazione del campione, questa fase può avvenire con drenaggi aperti (prova consolidata) o chiusi (prova non consolidata). Il secondo passo è la fase di rottura del campione, anche in questo caso si possono avere due modalità, la rottura in condizioni drenate e quella in condizioni non drenate. Ogni prova può essere caratterizzata da un acronimo di tre lettere per identificare una precisa modalità di prova. La prima lettera caratterizza le condizioni di drenaggio nella fase di pre-sollecitazione, con 'C' si identificano le prove consolidate e mediante 'U' le prove non consolidate. Il tipo di stato tensionale applicato nella prima fase è caratterizzato dalla seconda lettera nella sigla, 'I' per una compressione isotropa, 'A' per una compressione anisotropa e 'K<sub>0</sub>' per una compressione edometrica. L'ultima lettera caratterizza le condizioni di drenaggio in fase di rottura, con 'D' si intende una condizione drenata mentre con 'U' si identifica una rottura non drenata.

#### 3.1.1 Prove triassiali consolidate: modalità d'esecuzione

Si riporta di seguito uno schema dell'apparecchiatura triassiale:

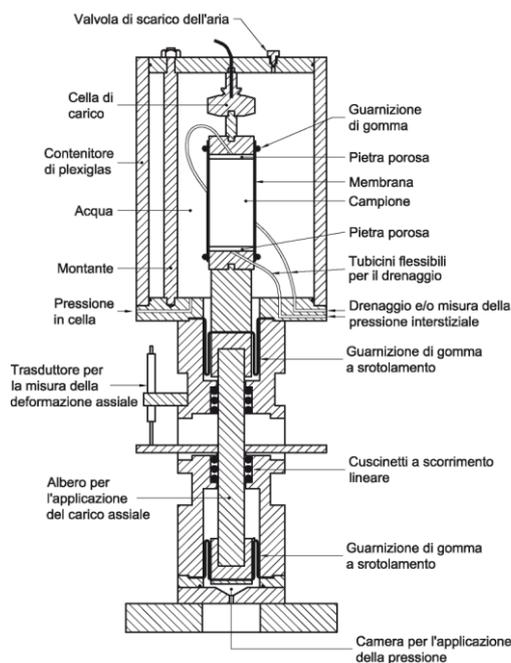


Figura 74. Apparecchiatura triassiale, Lancellotta (2014).

I provini utilizzati sono cilindrici avente un diametro di 38.1 mm, ed un altezza di 78.2mm. In quanto il rapporto H/D deve essere sufficientemente elevato per ridurre la concentrazione degli sforzi e delle deformazioni alle estremità. I requisiti dimensionali prescritti da AGI e ETC5 sono riassunti nella tabella seguente:

<b>Raccomandazioni AGI</b>	
Dmin [mm]	H/D min ÷ max
35	2 ÷ 2,5

*Figura 75. Prescrizioni AGI .*

Prima dell'inizio di ogni prova, il campione che dovrà essere analizzato deve essere pesato e misurato. Alle due estremità del campione vengono applicati i dischetti di carta da filtro e le pietre porose, preventivamente saturate. Per una più rapida saturazione e consolidazione del campione può essere montata una carta da filtro lateralmente al campione.



*Figura 76. Montaggio carte da filtro e pietre porose*

Il campione viene completamente rivestito attraverso una membrana per non permettere all'acqua contenuta nella cella di permeare all'interno del provino:



*Figura 77. Montaggio membrana in lattice*

La cella viene chiusa e riempita d'acqua per poter attuare le fasi successive di saturazione, consolidazione e rottura:



*Figura 78. Fase di riempimento della cella triassiale.*

### 3.1.1.1 Saturazione

Grazie alla strumentazione dell'apparecchiatura triassiale siamo in grado di controllare la pressione in cella e la pressione dell'acqua interstiziale del campione. Per il controllo della saturazione del campione si applica un aumento di tensione totale isotropa  $\Delta\sigma_c$  a drenaggio chiuso e successivamente un aumento di pressione dell'acqua interstiziale del campione  $\Delta u_0$ . In ogni fase di incremento di pressione in cella, si misura l'incremento di  $\Delta u$ , avendo questi valori si può ricavare il valore di B:

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta\sigma_c}$$

*Equazione 4*

Il campione si considera saturo quando il valore di B risulta  $\geq 0,95$ . Raggiunto questo valore si lascia saturare ulteriormente il campione ad una tensione efficace minore di quella che andrà impostata in fase di consolidazione.

### 3.1.1.2 Consolidazione

Dopo aver impostato la pressione in cella a  $\sigma'_c + u_0$ , dove con  $\sigma'_c$  si intende la tensione efficace di consolidazione, si aprono i drenaggi e la consolidazione ha inizio. Durante questa fase, si registra una variazione volumetrica del campione,  $\Delta V$ , in funzione del tempo. Mediante questi dati si potrà andare a diagrammare la curva di consolidazione nel piano  $\Delta V - \sqrt{t}$  e ricavare il tempo di consolidazione  $t_{100}$  e la variazione di volume finale  $\Delta V_c$ . Da qui si possono ricavare la deformazione volumetrica  $\varepsilon_{vc}$  e le dimensioni finali del campione  $H_c$  e  $A_c$ , attraverso le seguenti espressioni:

$$\varepsilon_{vc} = \frac{\Delta V_c}{V_0}$$

*Equazione 5*

$$H_c = H_0 \left(1 - \frac{\varepsilon_{vc}}{3}\right)$$

*Equazione 6*

$$A_c = \frac{V_0(1 - \varepsilon_{vc})}{H_c}$$

*Equazione 7*

### 3.1.1.3 Rottura

Terminata la fase di consolidazione, il controllo sul carico verticale viene affidato ad un a pressa meccanica, dove un motore passo-passo produce uno spostamento verticale  $\delta$  a velocità costante. La velocità di avanzamento del pistone verticale deve essere abbastanza bassa da garantire l'assenza d'incremento di pressioni interstiziali per le prove CID. In questa fase di prova si registrano dati sullo spostamento verticale e la forza assiale imposta al campione.

Per le prove drenate in questa fase grazie ai volumometri vengono raccolti dati sulle variazioni volumetriche del campione in fase di rottura.

La prova CIU è invece condotta con i rubinetti di drenaggio chiusi, allo scopo di conoscere lo stato tensionale effettivo fino a rottura. Per questa tipologia di rottura al fine di conoscere le tensioni efficaci agenti nel provino è necessario misurare le sovrappressioni interstiziali del campione. Si riporta di seguito una foto di un campione portato a rottura:



*Figura 79. Campione dopo la fase di rottura*

### 3.1.2 Elaborazione dei risultati

Nelle prove più comuni (compressione per carico), la tensione verticale viene aumentata mentre quella radiale è mantenuta costante, pertanto è possibile esprimere la tensione deviatorica  $q$  come:

$$q = \sigma_1 - \sigma_3$$

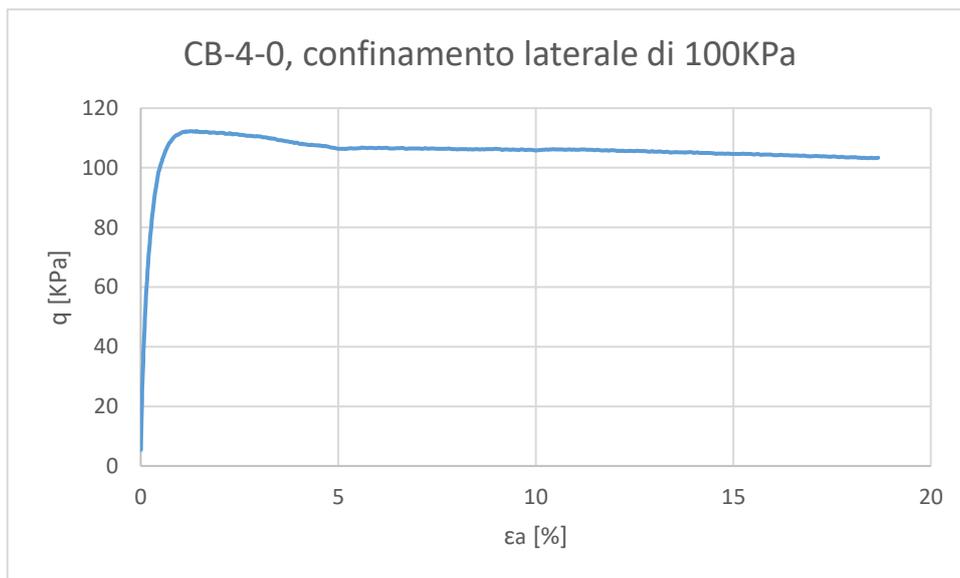
*Equazione 8*

Si può in oltre calcolare la deformazione assiale  $\varepsilon_a$  come il cedimento verticale  $\delta$  diviso l'altezza iniziale del campione  $H_c$ .

$$\varepsilon_a = \frac{\delta}{H_c}$$

*Equazione 9*

Ricavate queste quantità si può diagrammare l'andamento della prova sul piano  $q-\varepsilon_a$ , consentendo l'individuazione della tensione deviatorica di rottura in termini di resistenza di picco. Si riporta in seguito un esempio di tale rappresentazione:



*Figura 80. Esempio di prova CIU sul piano  $q-\varepsilon_a$ .*

La rappresentazione dei percorsi di sollecitazione in tensioni efficaci nel piano degli invarianti ( $p'$ ,  $q$ ) permette una completa descrizione dell'evoluzione dello stato tensionale durante la prova, e conduce ad una diretta valutazione dei parametri di resistenza a taglio, per esempio mediante regressioni lineari dei punti rappresentanti le condizioni di rottura. Si riporta di seguito l'andamento di tre prove eseguite a confinamenti diversi:

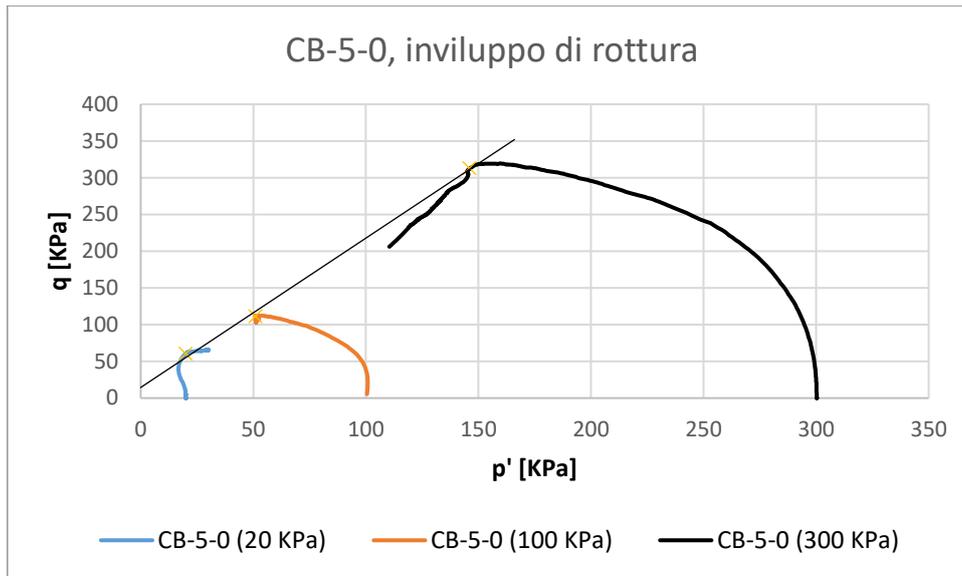


Figura 81. Esempio di involucro di rottura.

Ricavata la retta dell'involucro di rottura attraverso le funzioni riportate nella seguente tabella è possibile ricavare i parametri di resistenza di picco e residui:

	Piano (p'-q)
Ascissa	$p' = \frac{(\sigma_1 + 2\sigma_3)}{3} - u$
Ordinata	$q = \sigma_1 - \sigma_3$
Involucro	$q = M \cdot p' + q_c$
Attrito	$\varphi' = \arcsen\left(\frac{3M}{M+6}\right)$
Coesione	$c = q_c \frac{1+2K_a}{6\sqrt{K_a}}$

Tabella 20. Equazioni per il ricavo delle caratteristiche meccaniche del materiale esaminato.

Nel caso di prove CIU si ricerca l'andamento delle sovrappressioni interstiziali al crescere della deformazione assiale. Si riporta di seguito un grafico di tale rappresentazione:

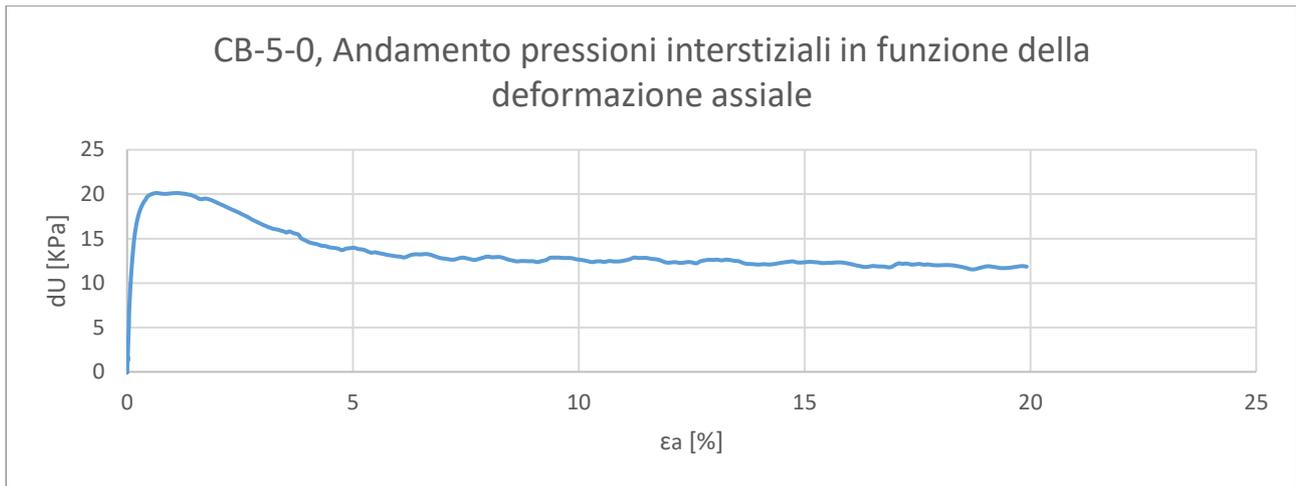


Figura 82. Esempio di rappresentazione sul piano  $\Delta u-\epsilon_a$ .

Mediante i dati raccolti durante la fase di consolidazione è possibile ricavare la conducibilità idraulica del materiale. A tal fine viene utilizzata la seguente equazione:

$$k = c_{vi} m_{vi} \cdot 0,31 \cdot 10^{-9} [m/s]$$

Equazione 10

Dove il coefficiente di consolidazione  $c_{vi}$  viene ricavato come:

$$c_{vi} = \frac{N}{t_{100}} [m^2/anno]$$

Equazione 11

Il valore di N è in funzione della geometria del campione e della presenza di dreni radiali al campione, si riporta di seguito una tabella riassuntiva per il suo calcolo:

Diametro iniziale del campione [mm]	Valore di N			
	Assenza dreni radiali		Presenza di dreni radiali	
	r = 2	r = 1	r = 2	r = 1
38	2400	9500	30	83
50	4100	16500	52	140
100	17000	66000	210	570
150	37000	150000	460	1300

Tabella 21. Calcolo del valore di N.

Anche il valore di r è in funzione della geometria del campione H e D, e viene calcolato come:

$$r = \frac{H}{D} [-]$$

Equazione 12

Il valore di  $t_{100}$  viene ricavato attraverso la curva di consolidazione ricavata per mezzo dei dati recepiti durante la fase di consolidazione. Si ricerca il punto di intersezione tra la retta tangente la porzione di curva rappresentante la consolidazione primaria e la retta tangente all'ultimo tratto di curva riguardante la consolidazione secondaria. Si riporta di seguito un immagine esplicativa di tale processo:

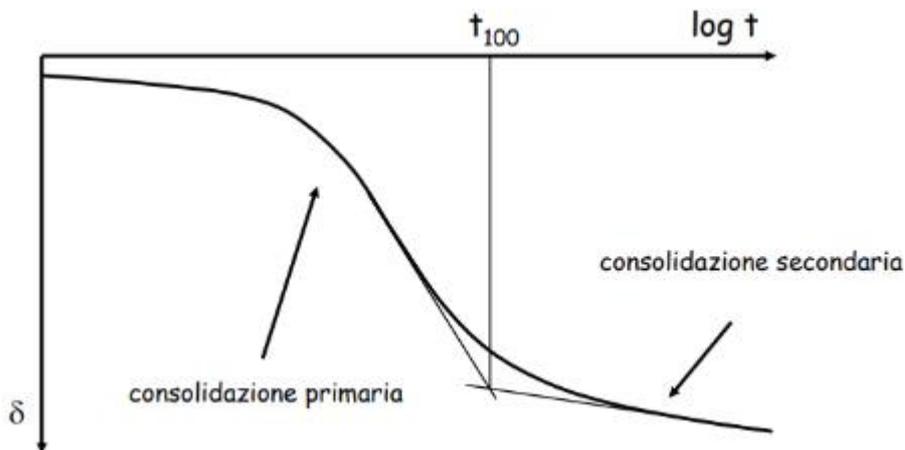


Figura 83. Tracciamento rette tangenti per la ricerca del  $t_{100}$ .

Il passo seguente è ricavare il coefficiente di compressibilità volumetrica  $m_{vi}$ :

$$m_{vi} = \frac{\Delta V_c}{V_0} \cdot \frac{1000}{\Delta \sigma'} \quad [m^2/MN]$$

Equazione 13

Dove:

$\Delta \sigma'$  = variazione della pressione dell'acqua interstiziale del campione, valutata fra l'inizio e la fine del processo di consolidazione.

$\Delta V_c$  = variazione volumetrica del campione durante la fase di consolidazione.

$V_0$  = volume iniziale del campione.

## 3.2 Prove edometriche

La prova edometrica riproduce in laboratorio le condizioni di consolidazione monodimensionale di un terreno. Un campione cilindrico viene contenuto lateralmente mentre gli si impongono dei carichi verticali. Questa operazione permette una consolidazione del materiale, ottenendo la migrazione dell'acqua contenuta nei pori verso l'esterno del campione. Il moto di filtrazione che viene così instaurato è esclusivamente verticale.

La sequenza dei carichi da imporre è predefinita, la durata di permanenza di ogni carico dipende dalla conducibilità idraulica del materiale. In quanto ogni step di carico deve perdurare fintanto che non si è ottenuta una completa dissipazione delle sovrappressioni dell'acqua interstiziale creata dall'applicazione del carico.

Durante l'intero processo di consolidazione viene rilevato il cedimento subito dal provino, e i dati così ottenuti sono utilizzati per determinare i parametri di compressibilità e di conducibilità.

### 3.2.1 Descrizione dell'apparecchiatura

L'apparecchiatura adibita al contenimento del campione si divide in tre parti, un anello rigido nel quale verrà posto il provino, una base ed una testa di carico. Tra la base e la testa di carico vengono posizionate delle pietre porose per permettere il drenaggio in fase di consolidazione. Di seguito viene riportato uno schema dell'attrezzatura di prova:

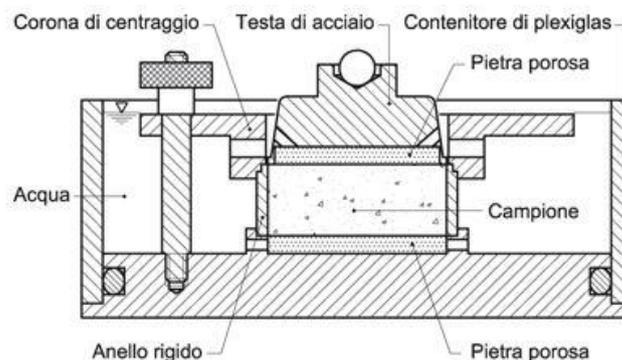


Figura 84. Schema di prova di un edometro, Lancellotta (2014)

L'insieme precedentemente descritto è posto, per mezzo di una corona di centraggio, nella cella edometrica. La cella verrà riempita con acqua distillata, in modo da prevenire l'essiccamento del materiale nel corso della prova e da fornire l'acqua di assorbimento durante la fase di scarico (rigonfiamento). Il diametro del campione deve essere di almeno 50mm ed il rapporto tra diametro ed altezza deve essere maggiore uguale a 2,5 e minore di 6. Queste prescrizioni permettono di ridurre minimo gli effetti dell'attrito laterale e di evitare di avere un provino troppo sottile e quindi di difficile preparazione.

### 3.2.2 Procedura di prova

La cella edometrica deve essere collocata all'interno di un telaio preposto all'applicazione dei carichi. Si riporta di seguito una fotografia della strumentazione:



Figura 85. Apparecchiatura edometrica (laboratorio di geotecnica, DISEG, Polito).

Per l'applicazione dei carichi al provino viene utilizzato un sistema a leva, per tale ragione con ogni attrezzatura viene fornita una tabella di conversione tra i pesi applicati e la tensione generata sul campione. Si riporta di seguito tale tabella per un apparecchiatura della Tecnotest:

<b>Tecnotest</b>	
10	Rapporto leva
50,46	diametro provino [mm]
$\sigma_v$ [KPa]	Pesi in piombo [g]
12,3	250
24,5	500
49,0	1000
98,1	2000
196,1	4000
392,3	8000
784,5	16000
1569,1	2 * 16000
3138,1	4 * 16000

Tabella 22. Tabella di conversione Tecnotest.

La tabella 22, presenta la gli step di carico da applicare per una prova edometrica standard. Data la bassa conducibilità dei terreni coesivi, i cedimenti conseguenti all'applicazione di ogni gradino di carico si sviluppano lentamente nel tempo. Ogni incremento di carico, pertanto, deve essere mantenuto per un periodo di tempo necessario a che si sviluppino gli assestamenti del provino. Susseguentemente, la fase di scarico, viene eseguita imponendo un numero di intervalli almeno pari a metà di quello utilizzato in fase di carico.

### 3.2.3 Elaborazione dei risultati

Per ogni gradino di carico si riporta l'andamento dei cedimenti ( $\delta$ ) in funzione del tempo ( $t$ ).

#### 3.2.3.1 Coefficiente di consolidazione e conducibilità idraulica

Per valutare sperimentalmente il coefficiente di consolidazione, nelle analisi effettuate nei capitoli seguenti, viene utilizzato il metodo di Taylor. Tale metodo vede il tracciamento dei dati acquisiti dalle prove sul piano ( $\delta-\sqrt{t}$ ). Su questo paino, si traccia la retta interpolatrice della parte lineare della curva (prime acquisizioni); ed una retta parallela costruita dall'insieme dei punti che hanno le stesse ordinate della retta interpolatrice ma valore delle ascisse aumentato del 15%. Il punto di intersezione di questa retta con la curva dei dati sperimentali indica il valore del  $t_{90}$  a cui corrisponde un cedimento del 90%. Si riporta di seguito la ricerca grafica del  $t_{90}$ :

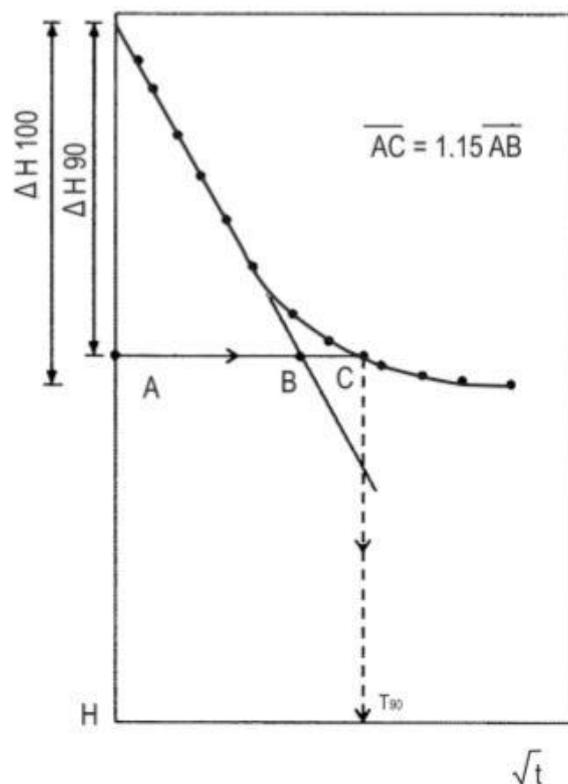


Figura 86. Determinazione di  $c_v$  con il metodo di Taylor (Lancellotta, 2004).

Mediante l'utilizzo della seguente espressione è possibile ricavare il coefficiente di consolidazione:

$$T_{v90} = 0,848 = \frac{C_v \cdot t_{90}}{H^2}$$

Equazione 14

Da cui:

$$C_v = \frac{0,848 \cdot H^2}{t_{90}}$$

Equazione 15

Dove H è la lunghezza del percorso di drenaggio, pari a metà dell'altezza del campione.

La conducibilità idraulica può essere ricavata come:

$$k = \frac{C_v \cdot \gamma_w}{m_v}$$

Equazione 16

Dove:

$C_v$  = coefficiente di consolidazione primaria

$m_v = \Delta \varepsilon_v / \Delta \sigma_v$  coefficiente di compressibilità

$\gamma_w$  = peso specifico dell'acqua pari a 9.80665  $\left[\frac{KN}{m^3}\right]$

### 3.2.3.2 Curva di compressibilità

Dopo aver, per ogni gradino di carico, ottenuto le curve dei cedimenti in funzione del tempo, il passo successivo riguarda la costruzione della curva edometrica. Essa viene ottenuta riportando i valori dell'indice dei vuoti ricavato dopo ogni step di carico, in funzione del logaritmo della tensione verticale efficace  $\sigma'_v$ . La curva di compressibilità così ottenuta, consente di caratterizzare il comportamento volumetrico del provino.

E' inoltre possibile ricavare i parametri di compressibilità che risultano essere i coefficienti angolari dei tratti di ricomprensione, compressione e scarico. Questi parametri vengono definiti rapporto o indice a seconda che ci si riferisce alla curva ( $\log \sigma_v, \varepsilon_z$ ) oppure alla curva ( $\log \sigma_v, e$ ). Si riporta di seguito la rappresentazione grafica di tali indici:

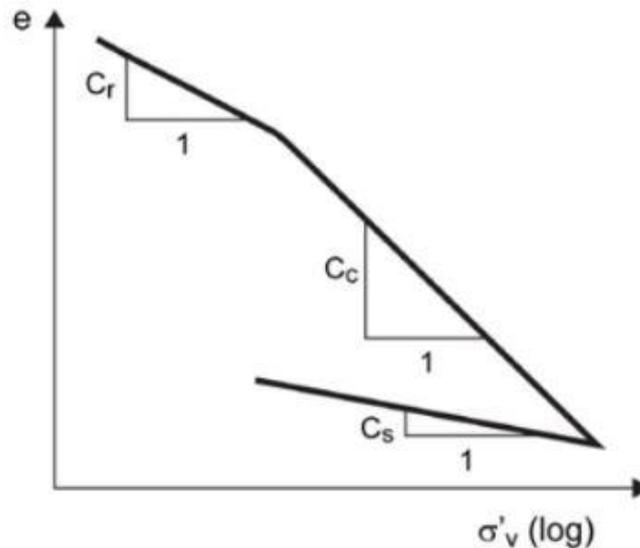


Figura 87. Curva edometrica con indici.

Gli indici possono essere calcolati attraverso il calcolo della pendenza nei tre diversi tratti, si riporta di seguito la formula generale per il loro calcolo:

$$C_x = \frac{-\Delta e}{\Delta \log \sigma_v}$$

Equazione 17

### 3.2.3.3 Indice dei vuoti (e)

L'indice dei vuoti iniziale ( $e_0$ ) del campione può essere calcolato come:

$$e_0 = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{\gamma_d} - 1$$

Equazione 18

Con:

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V}$$

Equazione 19

Dove:

$W_s$  = Peso secco

$V$  = Volume totale del campione

Per ciascuna fase di carico, l'indice dei vuoti al termine della relativa consolidazione, può essere calcolato a partire dall'indice dei vuoti iniziale del provino e dalla deformazione assiale  $\epsilon_z$  causata dall'applicazione del carico che si sta studiando.

### 3.3 Prove mediante permeametri

Il principio di base della prova è quello di instaurare un moto di filtrazione attraverso il provino, impostando il gradiente idraulico. Andando a verificare la portata in ingresso ed in uscita dal campione è possibile tramite la legge di Darcy ricavare la conducibilità idraulica. Di seguito viene riportato lo schema di prova utilizzato:

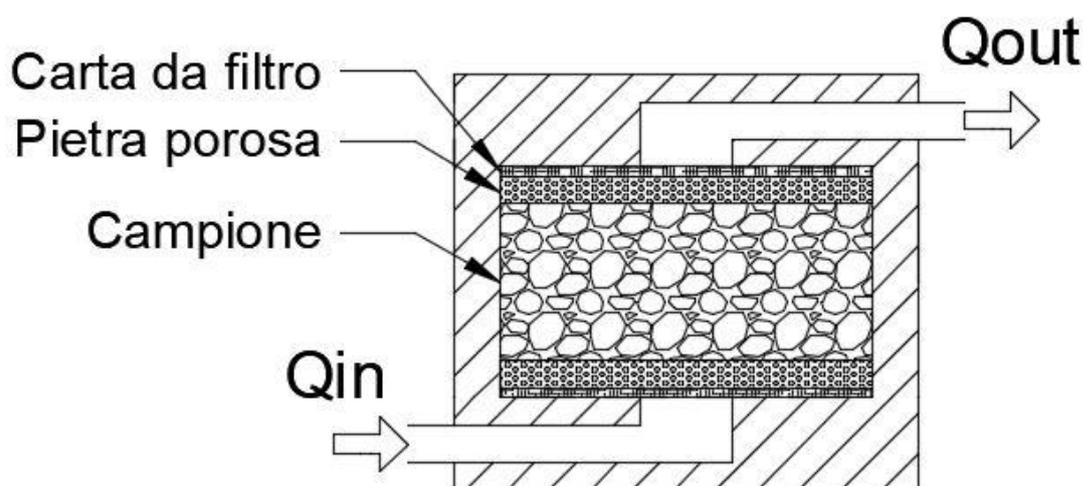


Figura 88. Schema semplificato della prova di permeazione.

#### 3.3.1 Permeametro a pareti rigide

Questa tipologia di prova prevede un anello rigido di contenimento del campione, che verrà allocato sulla base dell'apparecchiatura di prova. A contatto con la faccia superiore ed inferiore del campione vengono montate due pietre porose, per il passaggio dell'acqua, e le carte da filtro, per evitare il trasporto di materiale solido dal campione verso la pietra porosa. Si riportano di seguito delle fotografie delle fasi di montaggio:



Figura 89. Allocazione dell'anello contenente il campione nella sede di prova (laboratorio di geotecnica, DISEG, Polito).

Verrà quindi montata la parte superiore dell'attrezzatura di prova, che prevede un ulteriore anello di confinamento radiale e un pistone che permette la compressione del campione:



*Figura 90. Chiusura dell'attrezzatura di prova (laboratorio di geotecnica, DISEG, Polito).*

In questa prova il campione è assoggettato ad uno stato tensionale edometrico. Una particolare attenzione va effettuata nell'ottenimento della perfetta aderenza tra le pareti del campione e le pareti dell'anello di contenimento, in quanto durante la fase di flusso il fluido potrebbe trovare una via preferenziale tra l'apertura parete provino-parete anello, ed i dati di conducibilità calcolati non sarebbero rappresentativi del materiale analizzato.

### **3.3.2 Permeametro a pareti flessibili**

In questa tipologia di prova il campione dopo essere stato messo a contatto superiormente ed inferiormente con le pietre porose, viene rivestito attraverso una membrana in lattice. In questo modo si ha una completa aderenza tra la membrana e le pareti del provino, escludendo la possibilità di avere un moto di filtrazione attraverso una via preferenziale sui lati del campione.



*Figura 91. Montaggio permeametro a pareti flessibili (laboratorio di geotecnica, DISEG, Polito).*

Una volta posizionato il campione si procede con la chiusura della cella e con il suo riempimento mediante acqua.



*Figura 92. Montaggio ultimato di un permeametro a pareti flessibili (laboratorio di geotecnica, DISEG, Polito).*

Mediante questa prova non si ha il controllo diretto sulla tensione assiale, in quanto il campione può essere assoggettato solo ad un carico isotropo. In aggiunta non è prevista una misura della deformazione assiale e durante l'elaborazione dei dati della fase di consolidazione si dovrà tenere conto della deformazione radiale del campione.

### **3.3.3 Fasi di prova**

#### **3.3.3.1 Saturazione**

Anche per questa tipologia di prova prima della fase di prova va controllata la saturazione del campione, avendo cura di arrivare a valori di  $B$  maggiori o uguali a 0,95. Il calcolo di  $B$  è il medesimo dell'Equazione 4.

#### **3.3.3.2 Consolidazione**

Questa fase va eseguita assegnando una tensione efficace al campione e susseguentemente aprendo i drenaggi. Durante questa fase si avrà una variazione di volume del campione, registrata dai volumometri collegati al campione. Tale incremento di tensione avverrà per via di un carico assiale nel permeametro a pareti rigide e tramite una compressione isotropa nel permeametro a pareti flessibili.

#### **3.3.3.3 Prova**

Durante la prova si impone un gradiente idraulico  $i$ , andando ad impostare una pressione alla base del campione maggiore di quella impostata in testa. In tal modo si instaura un moto di filtrazione. Grazie ai volumometri si potranno recepire i dati riguardanti il volume d'acqua in ingresso al campione e quella in uscita. Inizialmente tali quantità non saranno uguali, ma con il procedere della prova convergeranno verso il medesimo valore. Il tempo per arrivare a convergenza è funzione della conducibilità del materiale. Durante questa fase si rilevano le variazioni dei volumi d'acqua in funzione del tempo. Mediante tali valori sarà possibile calcolare la conducibilità idraulica del materiale.

#### **3.3.4 Elaborazione dei dati**

Per l'interpretazione della prova a carico costante, una volta che le portate in ingresso ed in uscita dal campione risultano le medesime, è sufficiente diagrammare l'andamento nel tempo del volume d'acqua  $V$  in uscita in funzione del tempo. La pendenza della retta così ricavata rappresenta la portata  $Q$  effluente:

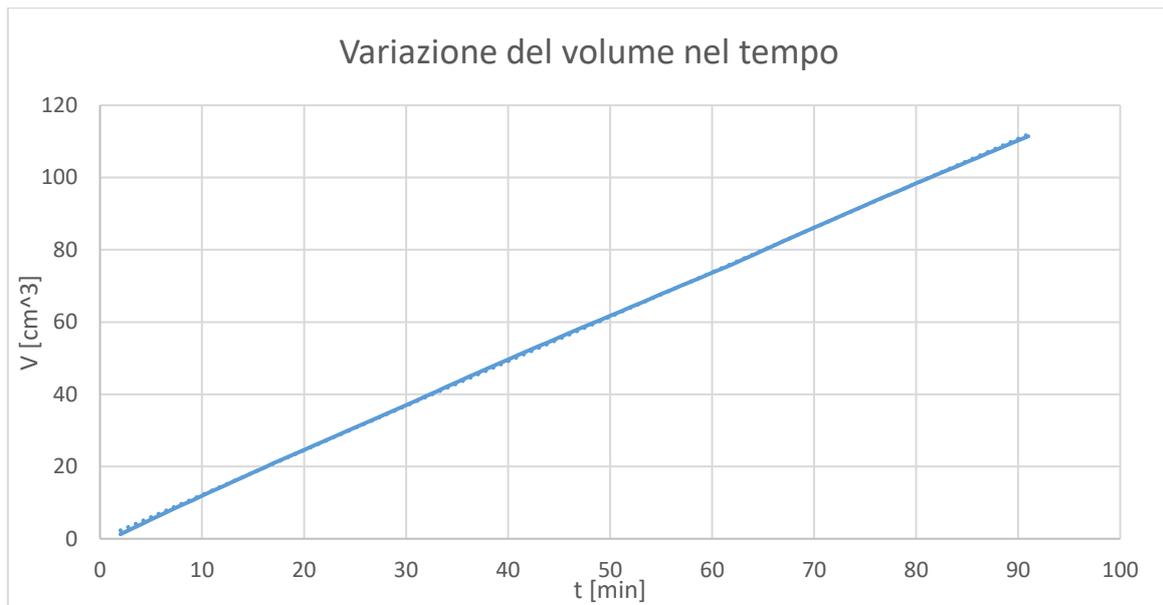


Figura 93. Andamento nel tempo del volume in uscita dal campione.

Il valore di portata in un dato lasso ti tempo  $\Delta t$  può essere calcolato come:

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

Equazione 20

Dove:

$\Delta V$  = Volume effluente dal campione in un intervallo di tempo  $\Delta t$ .

Ottenuta la portata, attraverso la legge di Darcy si è in grado di ricavare la conducibilità idraulica del materiale:

$$k = \frac{Q}{A \cdot i}$$

Equazione 21

Dove:

A = area della superficie superiore del campione

i = gradiente idraulico

Q = portata, a regime, uscente dal campione

## **4. Modalità di preparazione dei campioni cemento/bentonite studiati**

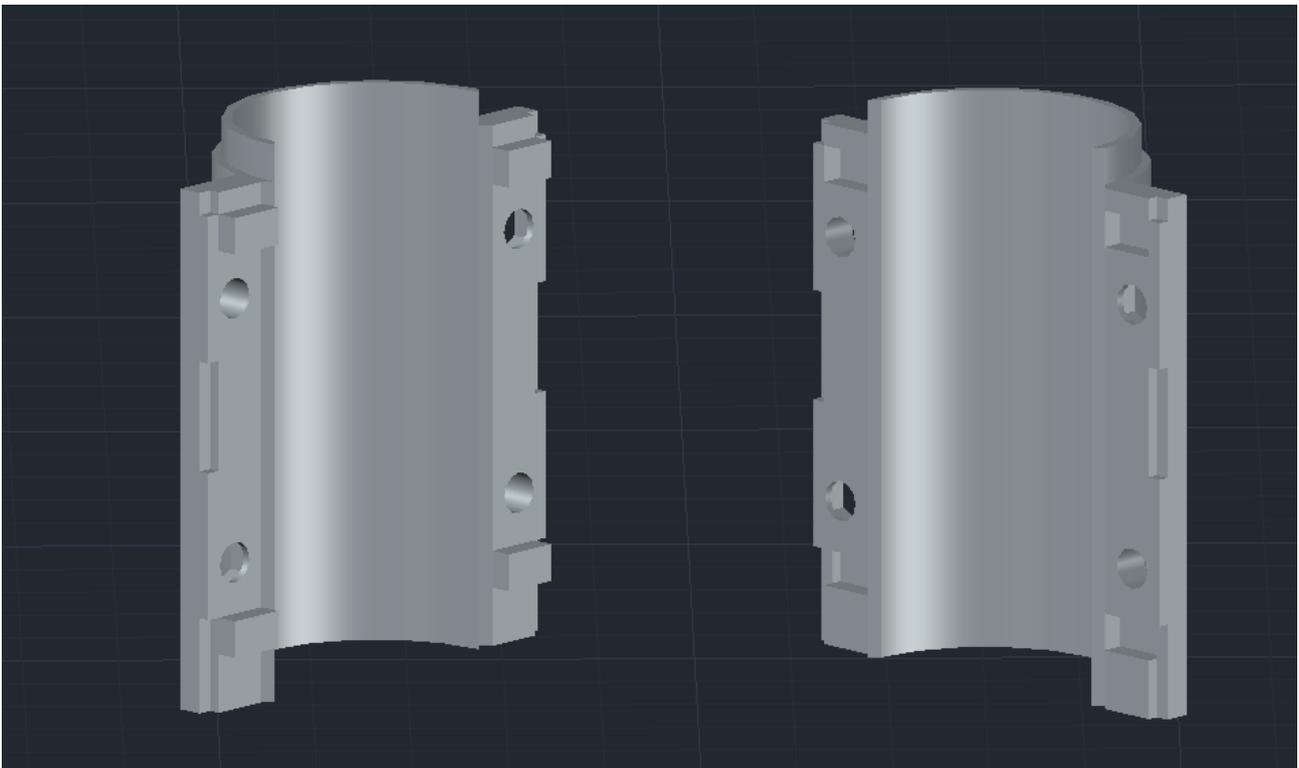
Le proprietà meccaniche e idrauliche della miscela cemento-bentonite variano in funzione delle percentuali di cemento e bentonite che la costituiscono. Al fine di capire come si modificano queste caratteristiche si sono analizzate tre miscele aventi composizioni diverse. Il materiale inizialmente allo stato liquido è stato fatto maturare per la durata di ventotto giorni prima dell'esecuzione delle prove. Essendo tutti i campioni invecchiati per la stessa quantità di tempo, si è riusciti a rimuovere la variabilità data dal tempo, che condizionava sia la resistenza che la conducibilità del materiale.

### **4.1 Moduli di contenimento per la maturazione dei campioni**

Le prove eseguite sono state prove triassiali, prove edometriche e di conducibilità. Ognuna delle attrezzature di prova utilizzate necessita di campioni con geometrie definite, per tale ragione, è stata necessaria la creazione di cassaforni su misura dove poter far stagionare il materiale. A tal fine si è proceduto con lo studio di varie soluzioni differenti. Le principali problematiche sono state legate al materiale da utilizzare e le tempistiche di realizzazione. La prima soluzione analizzata vedeva l'utilizzo del polistirolo, in quanto è un materiale a basso costo e facilmente lavorabile. Le difficoltà riscontrate su questa soluzione sono state molteplici. La principale è stata la caratteristica monouso del cassero, infatti durante la fase di scasso la formina contenente il campione doveva essere completamente distrutta. Una altra difficoltà riscontrata è stata la bassa densità del materiale. Durante la fase di stagionatura il materiale deve essere completamente sommerso in acqua ed avere completa aderenza con il fondo della vasca di stagionatura. Per verificare questa condizione, il cassero deve essere vincolato al fondo della vasca di maturazione, in alternativa la matrice tenderebbe a risalire verso la superficie, facendo mancare il contatto vasca-campione. Per tali problematiche si è deciso di utilizzare un materiale plastico. I vantaggi di questa soluzione sono molteplici. La problematica legata al galleggiamento è stata immediatamente superata, scegliendo un materiale plastico con una densità maggiore di quella dell'acqua si è potuto evitare l'istaurarsi del fenomeno di risalita della formina. Grazie alla resistenza del materiale si è potuto procedere con la progettazione di un manufatto riutilizzabile nel tempo. A tal fine si è utilizzato il software di disegno AutoCad 2018, mediante la funzione 3D è stato possibile progettare in tre dimensioni le varie parti dell'oggetto. Al termine della progettazione si è passati alla produzione delle matrici mediante una stampante 3D. Questa soluzione ha permesso di ottenere molteplici pezzi in breve tempo e con una elevata precisione in fase di costruzione.

### 4.1.1 Formina per la prova triassiale

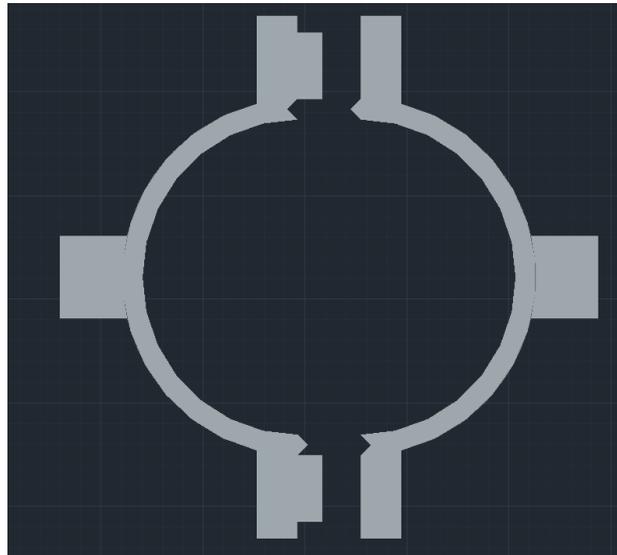
Il progetto si è sviluppato partendo dalle misure del provino finale necessarie per la corretta esecuzione della prova triassiale, diametro di 38.1 mm e altezza di 76.2 mm. Il valore dello spessore dell'elemento è stato scelto in base ad un fattore economico, in quanto gli sforzi che dovrà subire sono irrilevanti. In questo caso si è scelto uno spessore di 3mm. Ricavato il cilindro nel quale verrà colato il provino si è proceduto con la sua divisione in due moduli distinti. Quest'operazione è stata necessaria per andare a semplificare il più possibile la fase di scasso del campione. Il processo alternativo sarebbe stato l'estrusione dal provino dalla formina. Non si è utilizzata tale soluzione in quanto si è voluta preservare il più possibile il campione da possibili deformazioni o eventuali rotture. Di seguito viene mostrata una assonometria del cassero:



*Figura 94. Assonometria matrice per la maturazione del campione adibito alla prova triassiale.*

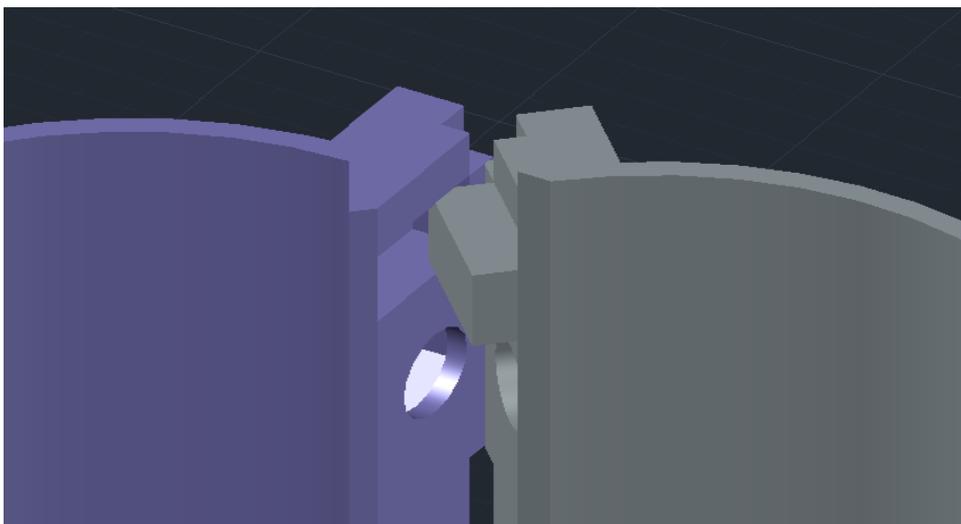
La problematica principale individuata è stata la ricerca della perfetta aderenza dei due blocchi, a tale scopo sono state inserite delle scanalature al termine delle semi circonferenze, grazie alle quali durante la fase di montaggio si ha un perfetto allineamento orizzontale tra i due blocchi. In aggiunta mediante questa geometria si ricava un campione finale perfettamente cilindrico, senza alcuna scanalatura data dalla discontinuità.

Di seguito è riportata una proiezione della geometria utilizzata:



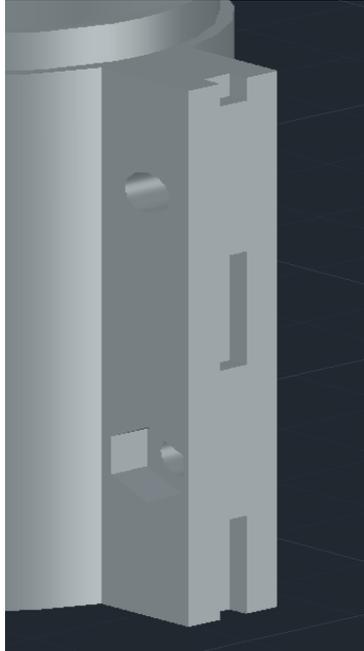
*Figura 95. Geometria a 'v' per la perfetta aderenza.*

Per quanto riguarda il bloccaggio della traslazione verticale di un blocco rispetto all'altro è stato utilizzato un sistema ad incastro. Si sono adibiti due blocchi rettangolari che in fase di montaggio tra i due pezzi, si innestano all'interno di due cavità aventi le medesime dimensioni. In tal modo viene completamente vincolato lo spostamento orizzontale e verticale di un blocco rispetto all'altro. Viene di seguito esposta una assonometria della geometria:



*Figura 96. Blocchi adibiti al blocco dello spostamento tra i due blocchi.*

Per migliorare la fase di scassero sono state inserite delle scanalature sui bordi del pezzo, mediante le quali si può imprimere una forza tale da vincere la coesione che si è venuta a creare durante la fase di maturazione tra il provino e le pareti della formina che lo contengono. E' susseguentemente riportato il dettaglio costruttivo:



*Figura 97. Dettaglio costruttivo delle finestre per la fase di scassero.*

Una volta terminato il progetto si è proceduto con la fase di stampa mediante la stampante 3D. Il risultato di tale processo è il seguente:



*Figura 98. Elemento dopo la fase di stampa.*

Per il blocco meccanico tra le due porzioni della formina si sono utilizzati dei bulloni e delle viti. Mediante questo immorsamento si è ottenuto un pezzo unico. Di seguito è riportata una fotografia del cassero ultimato:



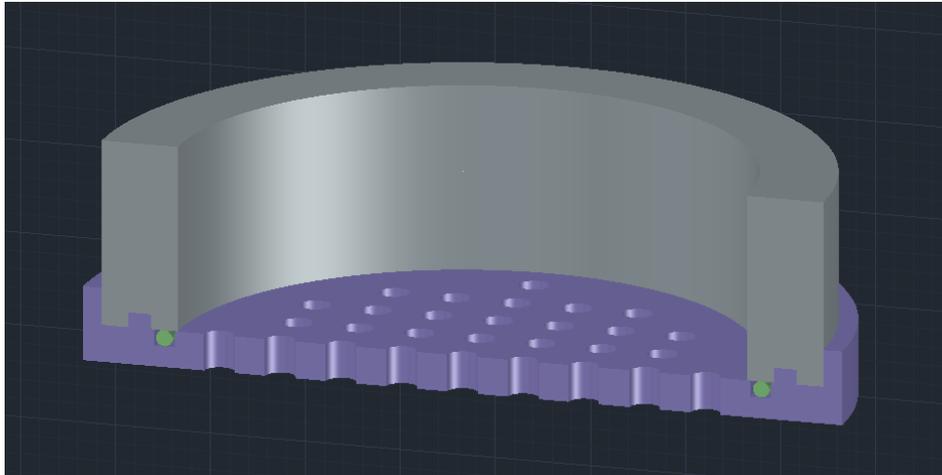
*Figura 99. Cassero ultimato e montato.*

Le due alette che visibili alla base del campione, vengono utilizzate per avere un incastro tra il cassero ed il fondo della vasca di maturazione.

#### **4.1.2 Formina per la prova di conducibilità**

Anche in questo caso per la progettazione si è partiti dalle dimensioni del provino finale. Si è deciso di utilizzare un elemento di contenimento laterale cilindrico, che verrà assemblato con un secondo manufatto che andrà a creare la base d'appoggio della miscela. Per la creazione di questa cassaforma ci si è imbattuti in due problemi principali. Il primo riguarda la perfetta tenuta idraulica tra i due blocchi, infatti se i due elementi non fossero perfettamente aderenti si avrebbe un moto di filtrazione verso l'esterno da parte della miscela. Questo problema è stato risolto mediante una geometria "a gradoni" ed all'inserzione di un o-ring. Grazie all'o-ring si riesce ad attuare una tenuta idraulica elevata, a patto che esso venga ben immorsato tra le due facce degli elementi. Le due distinte parti del cassero sono unite reciprocamente tramite l'attrito presente tra di esse. Mediante

questo tipo di unione la fase di scassero è resa molto semplice, infatti basterà rototraslare l'anello per poterlo dividere dalla base. Nella seguente figura viene rappresentato in grigio l'anello, in viola la base e in verde l'o-ring:



*Figura 100. Sezione cassaforma provino.*

La seconda problematica riguarda la possibilità del campione di stare a contatto con l'acqua. Per ottenere una maturazione ottimale del campione, il cemento contenuto nella miscela, deve avere a disposizione l'acqua necessaria alla reazione di idratazione. Per tale ragione si è provveduto alla progettazione di un sistema di drenaggio inferiore, in tal modo l'acqua può raggiungere il centro del provino da due direzioni. Per bloccare l'avanzamento della miscela all'interno dei tubi di drenaggio verrà disposta una carta da filtro, sarà quindi possibile il drenaggio dell'acqua, ma non il passaggio degli elementi solidi della miscela. Si presenta di seguito la foto del cassero per il confinamento laterale della miscela:



*Figura 101. Cassaforma per provino per la prova di conducibilità.*

Nella seguente fotografia viene rappresentato l'elemento di chiusura della formina, all'interno della quale è già stato inserito l'O-ring per la tenuta idraulica:



Figura 102. Elemento di fondo del cassero per la prova di conducibilità.

#### 4.1.3 Formina per la prova edometrica

Per la realizzazione di questo pezzo plastico la progettazione della geometria è stata notevolmente più semplice rispetto che ai precedenti. Infatti partendo dalle dimensioni del campione finale si è ricavato un cilindro, avente raggio interno uguale al raggio del campione. In questo caso la problematica è stata la definizione dello spessore dell'anello, in quanto è stato scelto di montare l'anello plastico, contenente il campione, direttamente nell'apparecchiatura di prova edometrica. Questa scelta è stata dettata dal fatto che si vuole mantenere il campione il più indisturbato possibile. Essendo la prova condotta in condizioni edometriche, si è prestata molta attenzione al confinamento radiale fornito dall'anello progettato. In quanto se presentasse una forte deformazione radiale si perderebbero le condizioni necessarie allo svolgimento della prova. A tal fine si è proceduto con la progettazione del pezzo considerando il carico massimo dato in fase di prova. Le caratteristiche del materiale utilizzato sono le seguenti:

Caratteristiche materiale		
Rtrazione:	33	MPa
$\epsilon_u$ :	6	%
$R_y$ :	31	MPa
$\epsilon_y$ :	2	%
E	2200	MPa

Tabella 23. Caratteristiche del materiale plastico.

Dove:

Rtrazione = resistenza a rottura del materiale per trazione

$\epsilon_u$  = deformazione a rottura del materiale

$R_y$  = resistenza a snervamento

$\epsilon_y$  = deformazione a snervamento

E = modulo elastico

Per il calcolo delle tensioni agenti sull'anello, si sono utilizzate formule delle sezioni sottili circolari:

PRESSIONE INTERNA			
	Tensione radiale	Tensione circonferenziale	Tensione longitudinale
	$\sigma_r = -\frac{1-\rho^2}{\rho^2} \frac{\beta^2}{1-\beta^2} p_i$	$\sigma_\theta = \frac{1+\rho^2}{\rho^2} \frac{\beta^2}{1-\beta^2} p_i$	$\sigma_l = \frac{\beta^2}{1-\beta^2} p_i$
$\rho=\beta$	$\sigma_r = -p_i$	$\sigma_\theta = \frac{1+\beta^2}{1-\beta^2} p_i$	Spostamento radiale $u = \rho \left[ (1-\nu) + \frac{1}{\rho^2} (1+\nu) \right] \frac{\beta^2}{1-\beta^2} \frac{p_i r_e}{E}$
$\rho=1$	$\sigma_r = 0$	$\sigma_\theta = \frac{2\beta^2}{1-\beta^2} p_i$	

Tabella 24. Formule delle sezioni sottili.

Il carico massimo verticale applicato al nostro campione in fase di prova è di 3138,1 Kpa, considerando la miscela CB-6-0 avente un angolo d'attrito pari a 45° si è ricavato un coefficiente di spinta attiva  $K_a$  pari a 0,17. Mediante questo valore si è potuta ricavare la pressione radiale sollecitante  $p_i$ .

$$P_i = 3138,1 \cdot 0,17 = 0,53 \text{ MPa}$$

Conoscendo il raggio esterno dell'anello,  $r_e$ , di 27,5 mm ed il raggio interno,  $r_i$ , di 25,25 mm possiamo ricavare  $\rho$  come:

$$\rho = \frac{r_i}{r_e}$$

Equazione 22

Essendo il nostro materiale non stratificato si ha  $\beta = \rho$ . Mediante le formule esposte nella tabella 24 si può ricavare la tensione circonferenziale  $\sigma_\theta$ :

$$\sigma_{\theta} = 6,32 \text{ [MPa]}$$

Andando a ricavare il fattore di sicurezza, utilizzando un coefficiente di sicurezza,  $\gamma$ , pari a 1,5 si ricava:

$$F = \frac{R_y}{\gamma \cdot \sigma_{\theta}}$$

*Equazione 23*

$$F = 3,2 \text{ [-]}$$

Un ulteriore controllo è stato eseguito sulla deformazione radiale, in quanto si vogliono preservare le condizioni edometriche della prova, riducendo al minimo la deformazione radiale. Non conoscendo il coefficiente di Poisson del materiale si è utilizzato un valore di 0,5 a favore di sicurezza. Mediante tale valore si è ricavato uno spostamento radiale di:

$$u = 0,076 \text{ [mm]}$$

Tale deformazione risulta essere trascurabile. Susseguentemente alla fase di progettazione si è utilizzata la stampante 3D per ottenere il pezzo finale. Nella seguente foto si riporta l'elemento dopo la fase di stampa:



*Tabella 25. Anello edometrico dopo la fase di stampa.*

## **4.2 Preparazione delle miscele e fase di colata**

Per la ricerca dei parametri meccanici ed idraulici del materiale, sono state indagate tre miscele con differenti contenuti di cemento. Le descrizioni delle composizioni di tali miscele sono riportate nella tabella seguente:

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 26. Miscele analizzate.

La differenza fra le varie miscele è il contenuto di cemento, che aumenta passando dalla miscela CB-4-0 alla CB-6-0. Il cemento utilizzato è un CEM I 32,5 N (Portland 325). Per quanto riguarda la bentonite è stata utilizzata una bentonite sodica, le cui caratteristiche sono riassunte nella seguente tabella:

Bentonite		
G <sub>s</sub>	2,952	[g/cm <sup>3</sup> ]
W <sub>L</sub>	534,51	[%]
W <sub>P</sub>	74,85	[%]
P.I.	459,66	[%]

Tabella 27. Caratteristiche della bentonite Minniti (2018).

Per quanto riguarda l'acqua presente in miscela si è visto l'utilizzo di acqua distillata.

#### 4.2.1 Idratazione della bentonite

Il primo passo per la creazione della miscela è l'idratazione della bentonite. Per questo processo si è deciso di miscelare la bentonite con 18 volte, in peso, d'acqua. La miscelazione è avvenuta mediante una centrifuga meccanica. Il processo è protratto fino a quando non si è ottenuta una miscela uniforme e l'assenza di grumi di bentonite. Si riporta di seguito una fotografia della fase di miscelazione ed il risultato finale:



Figura 103. Fase di miscelazione bentonite-acqua.

Vista la bassa conducibilità idraulica di questo materiale, il processo di idratazione del materiale richiede un minimo di 24 ore. Per tale ragione il materiale è stato coperto mediante una pellicola impermeabile e lasciato riposare.

#### **4.2.2 Aggiunta del cemento**

L'aggiunta del cemento in miscela è stata eseguita durante una seconda fase di miscelazione, anche in questo caso si è utilizzato un miscelatore meccanico. Durante il processo di miscelazione si è potuto assistere ad una prima fase di falsa presa della miscela, dovuta ad una prima idratazione del cemento, per poi ottenere una miscela fluida ed omogenea. Una volta ottenuto il composto finale, è stato necessario procedere con una miscelazione manuale per poter rimuovere eventuali bolle d'aria intrappolate. Si riporta in seguito l'immagine del processo ultimato:



*Figura 104. Unione del cemento alla miscela.*

Il colore e la lavorabilità della miscela così ottenuta dipendono dalla quantità di cemento presente in miscela. La miscela CB-4-0 presenta una fluidità molto maggiore rispetto alle altre due ed un colore marrone molto marcato. Per quanto riguarda la miscela CB-6-0, si è notata una forte predisposizione alla segregazione, per tale motivo è stata posta una particolare attenzione a questa miscela in fase di colata.

#### **4.2.3 Colata negli stampi**

La prima fase è la preparazione e saturazione delle carte da filtro, che permetteranno il drenaggio dell'acqua ma non il passaggio del materiale solido. Una volta preparate e collocate sul fondo della vasca di maturazione, si possono posizionare i casseri sopra di esse. Il bloccaggio delle formine al

fondo è affidato ad uno strato di colla a caldo. Si riporta di seguito un immagine della conclusione dell'operazione:



*Figura 105. Posizionamento degli stampi sul fondo della vasca di maturazione.*

La fase di colaggio della miscela all'interno degli stampi deve essere fatta lentamente e senza inglobare aria nel materiale. Le miscele CB-5-0 e CB-6-0 sono soggette ad un forte ritiro durante la fase di maturazione, per tale ragione è stato necessario riempire le formine con più materiale di quello necessario, facendo comunque attenzione a non fare traboccare il materiale. La miscela CB-6-0 se lasciata a riposo tende a segregare velocemente, è quindi necessario prima di colarla negli stampi, miscelarla e renderla omogenea. Una volta riempiti tutti gli stampi, si può riempire la vasca con acqua distillata. Si riporta di seguito una foto esplicativa:



*Figura 106. Fine della fase di colata.*

### 4.3 Maturazione della miscela

La maturazione delle miscele è avvenuta all'interno di vasche di maturazione. Questa esigenza nasce dal fatto che la miscela deve essere completamente immersa in acqua distillata. Si riporta in seguito una foto dei campioni in fase di maturazione:



*Figura 107. Vasca di maturazione.*

La stagionatura in acqua è necessaria affinché si possano verificare le reazioni di idratazione del cemento. Questo fenomeno si esplica modificando le proprietà della miscela, rendendola dapprima poco lavorabile (fase di presa) e susseguentemente rigida (fine presa). Avvenuta la fase di presa il processo di idratazione continua, facendo in modo che il conglomerato indurisca ulteriormente. Questo processo può durare da mesi ad anni, facendo cambiare continuamente le proprietà meccaniche ed idrauliche del materiale. Le reazioni chimiche che si sviluppano grazie all'azione chimica dell'acqua nei confronti dei granuli della polvere di cemento, avvengono in tempi diversi.

Il processo più importante è l'idratazione della celite con la formazione di una fase colloidale. Questa reazione è composta da due reazioni separate. La prima molto rapida e fortemente esotermica, riguarda l'idratazione dell'alluminato tricalcico.

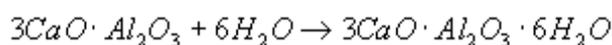


Figura 108. Prima reazione d'idratazione della celite.

La seconda reazione consiste in una scissione idrolitica dell'alluminato-ferrito tricalcico.

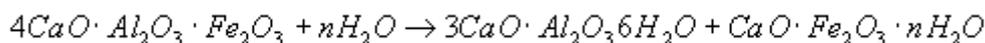


Figura 109. Seconda reazione d'idratazione della celite.

Dove con n si indica un numero imprecisato di molecole d'acqua.

Testando le varie miscele al medesimo tempo d'invecchiamento, si può rimuovere la variabile tempo, in quanto, come già esplicitato, le caratteristiche meccaniche ed idrauliche tendono a migliorare con l'avanzamento della stagionatura. Andando a diminuire la conducibilità idraulica ed incrementare la rigidità e la resistenza a compressione del materiale.

## 4.4 Studio preliminare delle miscele

La scelta delle percentuali di cemento contenuto nella miscela è fondamentale per le caratteristiche finali del materiale. In questa sede si sono scelte tre diverse miscele, mantenendo costante la percentuale di bentonite e facendo variare quella di cemento. I risultati dal punto di vista meccanico che si attendono sono un aumento di resistenza del materiale finale all'aumentare della percentuale di cemento. Infatti più è alta la sua quantità, tanto più la matrice solida del materiale sarà omogenea e densa. Viene previsto anche una diminuzione della conducibilità idraulica all'aumentare delle porzioni di cemento. Questo è dovuto alla maggior formazione di aghi di silicati, che andranno a riempire i pori creati dall'inglobamento di bentonite nella matrice solida.

### 4.4.1 Miscela CB-5-0

La miscela CB-5-0 è realizzata con un rapporto 1 a 5 di bentonite a cemento, avendo così una percentuale di cemento intermedia fra le tre studiate. Dopo la fase di miscelazione il composto risulta fluido e lavorabile. Terminata la fase di maturazione il materiale risulta un cemento plastico dotato di coesione. Riassumendo le proporzioni utilizzate:

Codice	Bentonite [g]	Cemento [g]	Acqua [g]
CB-5-0	50	250	900

Tabella 28. Descrizione CB-5-0.

Durante l'avanzamento della fase di maturazione della miscela sono state eseguite delle prove penetrometriche tramite un penetrometro tascabile. Di seguito viene mostrata una foto di un provino sottoposto a prova:



Figura 110. Prova penetrometrica.

Tale prova è stata condotta ogni sette giorni sul medesimo campione. Mediante questo procedimento si è potuto registrare l'evoluzione della resistenza alla penetrazione durante la maturazione della miscela. Di seguito si riporta il grafico dell'andamento della resistenza alla penetrazione in funzione del tempo:

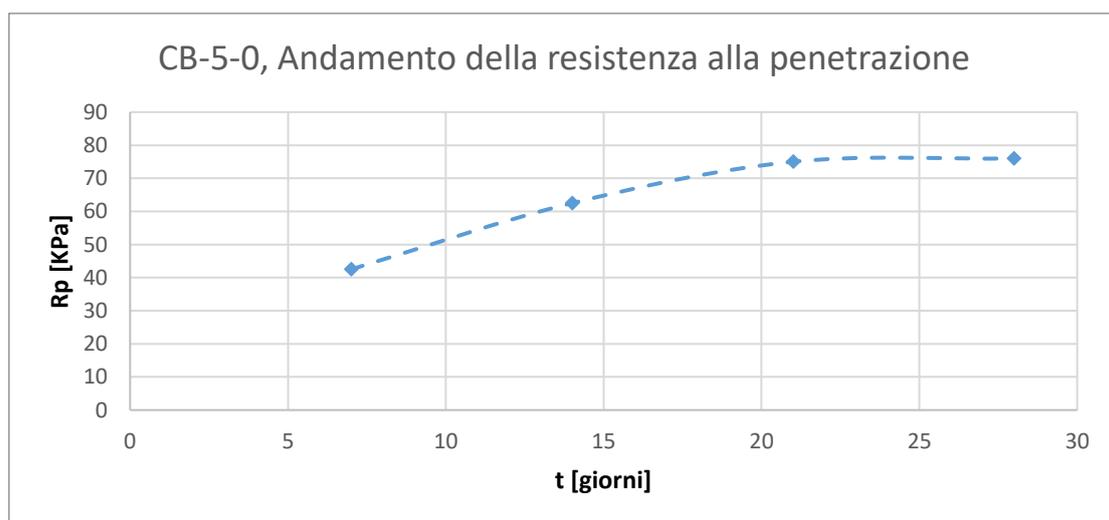
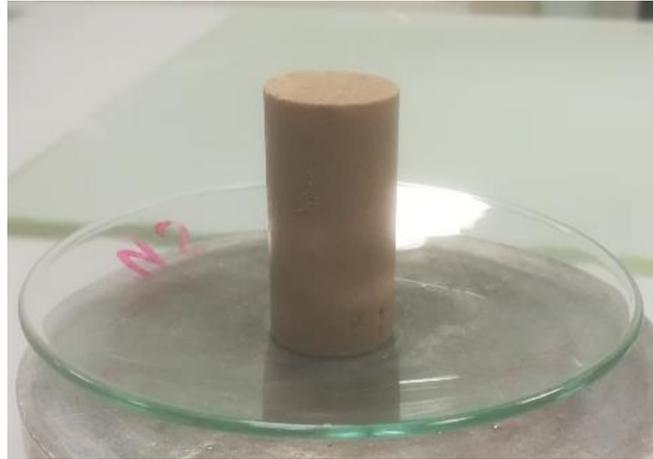


Figura 111. Andamento resistenza alla penetrazione per la miscela CB-5-0

La miscela presenta un forte indurimento durante i primi venti giorni di maturazione, successivamente a questa fase, si registrano valori costanti di resistenza alla penetrazione. Questo

fenomeno è dovuto all'esaurirsi della fase d'indurimento del cemento. Per questa miscela il valore massimo registrato è di 76 KPa.

Terminate queste prove si è proceduto con la determinazione dell'indice dei vuoti del materiale. A tal fine si è proceduto con il prelievo di campioni cilindrici dal materiale utilizzato per attuare le prove penetrometriche. Di seguito viene mostrata una foto di un campione umido estratto:



*Figura 112. Provino umido.*

Successivamente il campione è stato immesso all'interno di un forno avente temperatura di 105°C. Dopo la completa essiccazione del materiale il risultato ottenuto è mostrato nella fotografia successiva:



*Figura 113. Campione secco.*

I dati raccolti dalle misure geometriche e dalle pesate effettuate prima e dopo l'asciugatura del campione sono riassunte nella tabella successiva:

$M_w$ [g]	$M_s$ [g]	H [cm]	D [cm]
3,71	1,02	2,50	1,25

Tabella 29. Risultati delle misurazioni sulla miscela CB-5-0.

Dove:

$M_w$  = Massa umido [g]

$M_s$  = Massa secco [g]

H = Altezza [cm]

D = Diametro [cm]

Utilizzando questi dati si è potuto ricavare il volume del campione come:

$$V = Altezza \cdot \pi \cdot \frac{Diametro^2}{4}$$

Equazione 24

Da cui:

$$V = 3,06 \text{ cm}^3$$

Il passo successivo è stata la determinazione del contenuto d'acqua ottenuta come:

$$w = \frac{M_w}{M_s}$$

Equazione 25

Da cui:

$$w = 2,63 \text{ [%]}$$

Si ricavano la densità umida  $\rho$  e la densità secco  $\rho_d$  con le espressioni seguenti:

$$\rho = \frac{M_w + M_s}{V} \text{ [g/cm}^3\text{]}$$

Equazione 26

$$\rho_d = \frac{M_s}{V} [\text{g}/\text{cm}^3]$$

Equazione 27

Con cui si ottengono i seguenti valori:

$$\rho = 1,20 [\text{g}/\text{cm}^3]$$

$$\rho_d = 0,33 [\text{g}/\text{cm}^3]$$

Mediante la seguente equazione si andrà a ricavare la porosità n:

$$\rho = \rho_d + n \rho_w$$

Equazione 28

Dove:

$$\rho_w = \text{densità dell'acqua} [\text{g}/\text{cm}^3]$$

Pertanto il valore di n risulterà:

$$n = 0,87 [-]$$

In fine mediante la seguente funzione si può ottenere l'indice dei vuoti:

$$e = \frac{n}{1 - n} [-]$$

Equazione 29

Pertanto:

$$e = 7,29 [-]$$

In fine si è voluto valutare il peso specifico dei grani  $G_s$ , tale quantità ad una determinata temperatura è calcolabile tramite l'equazione:

$$G_s(T) = \frac{M_0}{M_0 + (M_a - M_b)} [\text{g}/\text{cm}^3]$$

Equazione 30

Dove:

$M_0$ : massa del campione secco

$M_a$ : massa del picnometro riempito con acqua alla temperatura T

$M_b$ : massa del picnometro riempito con acqua e terreno alla temperatura T

T: temperatura di prova, rilevata al momento della determinazione della massa  $M_b$ .

Da cui si è ricavato:

$$G_s = 2,759 \text{ [g/cm}^3\text{]}$$

Si riporta in seguito una tabella riassuntiva dei parametri della miscela CB-5-0:

<b>Parametri geotecnici miscela BC-5-0</b>		
$\rho =$	1,209	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\rho_d =$	0,332	[g/cm <sup>3</sup> ]
$n =$	0,879	[-]
$e =$	7.294	[-]
$G_s =$	2,759	[g/cm <sup>3</sup> ]

Tabella 30. Parametri della miscela CB-5-0.

#### 4.4.2 Miscela CB-4-0

La seconda miscela esamina è seguentemente nominata come CB-4-0. In questo caso la porzione di cemento contenuto nella miscela è il più basso delle tre studiate. Il materiale ottenuto dalla fase di miscelazione risulta molto fluido e lavorabile. Per tale ragione si riesce ad ottenere facilmente un campione omogeneo e senza presenza di segregazioni. Una volta indurito, il materiale risulta poco resistente ma è dotato di coesione. Di seguito si riporta una tabella riassuntiva dei materiali utilizzati:

<b>Codice</b>	<b>Bentonite [g]</b>	<b>Cemento [g]</b>	<b>Acqua [g]</b>
CB-4-0	50	200	900

Tabella 31 Materiali utilizzati per la creazione della miscela CB-4-0.

Anche in questo caso, al fine di testare la resistenza alla penetrazione del materiale in funzione del livello di maturazione, si sono svolte delle prove penetrometriche dopo 7, 14, 21 e 28 giorni dalla fase di colaggio. I risultati ottenuti sono mostrati nel grafico seguente:

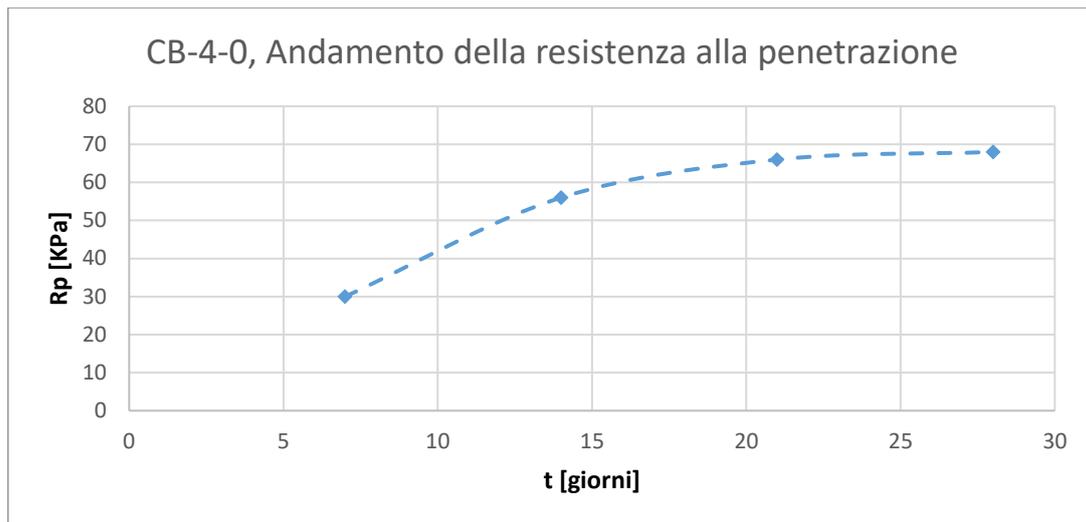


Figura 114. Andamento della resistenza alla penetrazione in funzione del tempo di CB-4-0.

In questo caso il picco di resistenza si ha al ventottesimo giorno con un valore di resistenza alla penetrazione di 68 KPa. Anche in questo caso sono state condotte indagini analoghe a quelle effettuate alla miscela CB-5-0, i risultati sono riassunti nella tabella sottostante:

Parametri geotecnici miscela BC-4-0		
$\rho =$	1,238	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\rho_d =$	0,381	[g/cm <sup>3</sup> ]
$n =$	0,859	[-]
$e =$	6,134	[-]
$G_s =$	2,722	[g/cm <sup>3</sup> ]

Tabella 32. Parametri della miscela CB-4-0.

#### 4.4.3 Miscela CB-6-0

La miscela CB-6-0 vede l'utilizzo di un rapporto 1 a 6 di bentonite a cemento. E la miscela studiata con più quantitativo di cemento. La miscela ottenuta con tali proporzioni risulta molto più densa rispetto alle precedenti e se non miscelata tende a segregarsi velocemente. Per tale ragione se non mischiata prima della fase di colaggio si tende ad avere un campione non omogeneo. Una volta trascorso il tempo di maturazione, il materiale ricavato tende ad essere più fragile e meno plastico rispetto a quello ottenuto con le altre miscele. Riassumendo le proporzioni utilizzate:

Codice	Bentonite [g]	Cemento [g]	Acqua [g]
BC-6-0	50	300	900

Tabella 33. Materiali utilizzati per la creazione della miscela CB-6-0.

Come nelle due miscele precedenti anche in questo caso sono state condotte delle prove penetrometriche, i risultati delle misurazioni sono visibili nel seguente grafico:

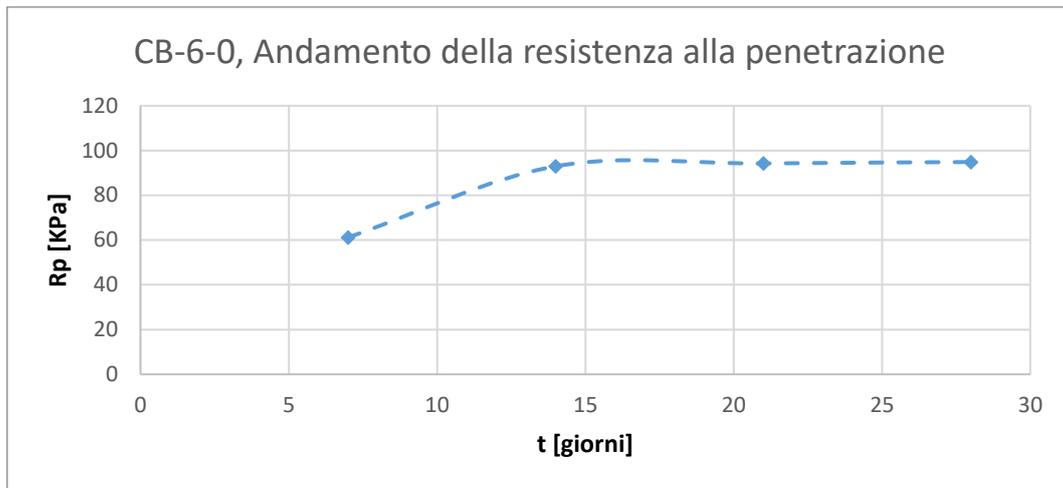


Figura 115. Andamento resistenza alla penetrazione in funzione del tempo di CB-6-0.

Anche in questo caso si può notare l'andamento asintotico dell'andamento della resistenza alla penetrazione in funzione del tempo. Per questa miscela il valore di resistenza massimo trovato è di 173KPa. Le indagini condotte sul materiale hanno portato ai seguenti risultati:

<b>Parametri geotecnici miscela BC-6-0</b>		
$\rho =$	1,186	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\rho_d =$	0,289	[g/cm <sup>3</sup> ]
$n =$	0,899	[-]
$e =$	8,829	[-]
$G_s =$	2,876	[g/cm <sup>3</sup> ]

Tabella 34. Parametri della miscela CB-6-0.

#### 4.4.4. Confronto fra le miscele

Facendo adesso un confronto tra le miscele in termini di resistenza alla penetrazione-tempo, si può notare come la resistenza alla penetrazione cresca all'aumentare del cemento contenuto in miscela. Facendo variare la resistenza a 28 giorni da 68 a 173KPa passando dalla miscela CB-4-0 alla CB-6-0. Si mostrano di seguito i risultati ottenuti dalle prove:

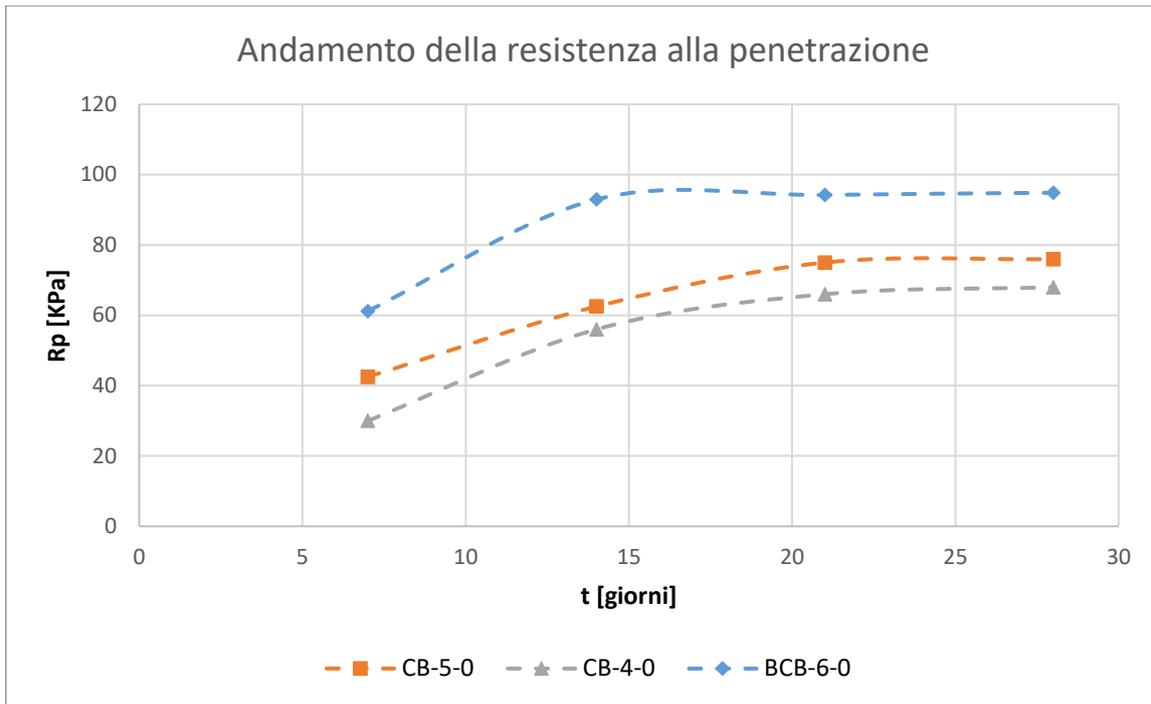


Figura 116. Confronto della resistenza alla penetrazione delle tre miscele analizzate.

Si può altresì notare come varia il valore dell'indice dei vuoti al variare delle proporzioni cemento-bentonite della miscela. Si riporta in seguito un grafico rappresentate i risultati ricavati:

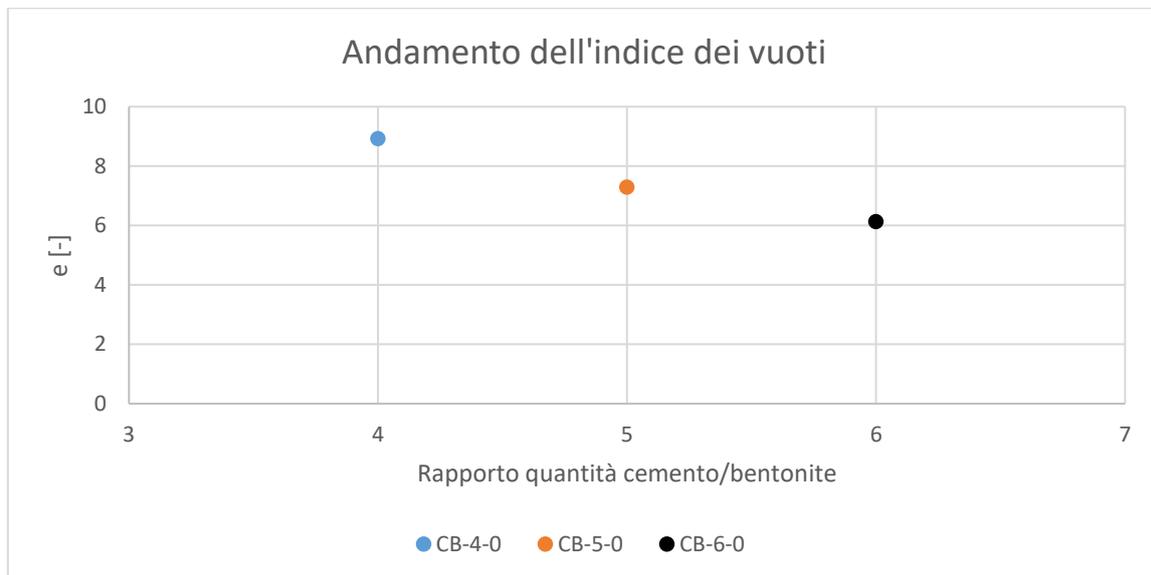


Figura 117. Andamento di 'e' al variare della miscela esaminata.

Come ci si aspettava, al crescere della quantità di cemento il valore dell'indice dei vuoti tende a diminuire.

## 5. Comportamento meccanico dei campioni di miscele cemento/bentonite

Nel presente capitolo si descrivono i risultati delle prove volte a determinare la resistenza meccanica delle miscele studiate. Quindi si è voluto ricostruire l'involuppo di rottura e capire in quale modo il confinamento radiale andasse ad influenzare la modalità di rottura del campione. A tale fine sono state eseguite tre prove triassiali in controllo di deformazione, per ognuna delle tre miscele indagate. Si sono eseguite delle prove con campioni consolidati isotropicamente e la fase di rottura è stata condotta in condizioni non drenate.

### 5.1 Montaggio prova triassiale

Dopo la fase di maturazione il campione ed il suo cassero sono stati rimossi dall'acqua distillata. La foto seguente è rappresentativa della situazione dopo ventotto giorni di immersione:



*Figura 118. Campione con cassero dopo la fase di maturazione.*

Grazie alla geometria dello stampo è stato possibile scassere con semplicità e senza danneggiare il campione. Una volta estratto dalla formina il provino si presenta perfettamente cilindrico ed omogeneo. Si può notare il ritiro del materiale in fase di maturazione. Infatti l'altezza del cilindro di materiale finale risulta mediamente di 1-2 mm più basso rispetto a quello originario. Per tale ragione nelle fasi di calcolo si è utilizzata l'altezza reale del campione. Nella faccia superiore del

campione è stata riscontrata la presenza di uno strato di sale, venutasi a creare durante la fase di maturazione della miscela. Essendo questa una barriera per il passaggio dell'acqua, si è provveduto con la sua rimozione tramite raschiamento meccanico. Di seguito viene rappresentato un campione dopo la fase di scassero:



*Figura 119. Provino scasserato.*

Successivamente a questa fase si è potuto procedere con il montaggio della prova.

Il primo passo è stato la saturazione dei circuiti dell'attrezzatura di prova. Mediante l'utilizzo di un volumetro si è in grado di immettere acqua in pressione all'interno dei collegamenti idraulici dell'apparecchiatura triassiale. Questa fase è fondamentale, in quanto la presenza d'aria all'interno dei tubi falserebbe le misure. Questo fenomeno è dovuto al fatto che le misure sono condotte su pressioni e volumi. Avendo l'aria un volume variabile in funzione della pressione avremmo dei dati corrispondenti alla quantità di volume d'acqua entrante/uscente dal provino errati. Quindi la fase di consolidazione del campione o un eventuale rigonfiamento risulterebbero di difficile lettura.

Una volta saturata l'attrezzatura di prova si procede con il montaggio della pietra porosa e della carta da filtro al di sopra del pistone di compressione. Questa operazione permetterà il drenaggio dell'acqua contenuta nel campione, bloccando il passaggio del materiale solido dal campione verso la pietra porosa. Successivamente si procede con il posizionamento del provino, centrandolo rispetto al sistema pietra porosa-carta da filtro. Sull'estremità superiore del campione viene posizionata una carta da filtro ed una pietra porosa. Per velocizzare la migrazione dell'acqua in fase di consolidazione viene montata una carta da filtro a finestrelle sui lati del campione. In questo modo

l'acqua potrà drenare non solo assialmente ma anche radialmente, riducendo di molto la durata del processo di consolidazione e saturazione. Di seguito si riporta una foto susseguente le fasi di montaggio appena descritte:



*Figura 120. Fase di montaggio pietre porose e carte da filtro.*

La fase successiva è l'isolamento del provino dall'acqua che andrà inserita nella cella di carico, a tale scopo, viene montata una membrana impermeabile che avvolge l'intero sistema provino-pietre porose. L'ultimo passo è la chiusura della cella di carico mediante un cilindro di plexiglass ed il successivo riempimento mediante acqua. Di seguito si presenta una foto scattata dopo la conclusione del montaggio dell'attrezzatura:



*Figura 121. Montaggio della prova ultimato.*

### 5.2.1 Esecuzione prova triassiale

La prima fase di prova è stata il controllo di B del campione. In questa fase si va a ricercare la saturazione del campione, viste le modalità di creazione del campione il primo controllo di B risulta essere in un range compreso fra 0,78 e 0,91 a seconda della miscela esaminata. Per la trattazione delle modalità di esecuzione fa riferimento al capitolo 3.1.1.1.

Si riporta uno stralcio di foglio di prova di una prova triassiale eseguita:

Fase	$\Delta\sigma_{ax}$ [Kpa]	$\Delta\sigma_{rad}$ [Kpa]	$\sigma_{ax}$ [Kpa]	$\sigma_{rad}$ [Kpa]	u [Kpa]	B	drenaggio
Controllo B	50	50	100	100	-	0,89	Chiuso
Saturazione			100	100	90		Aperto
Controllo B	40	40	140	140	-	0,94	Chiuso
Saturazione			140	140	130		Aperto
Controllo B	10	10	150	150	-	0,97	Chiuso
Consolidazione			150	150	130		Aperto
Rottura				150			Chiuso

Tabella 35. Stralcio di prova triassiale eseguita su un campione CB-5-0.

Dopo ogni controllo di B è sempre seguita una fase di consolidazione del materiale, si è proceduto con questo iter fino al raggiungimento di un B pari almeno a 0,95.

Dopo questa prima fase di preparazione è seguita la procedura di consolidazione. Questa fase è stata condotta in tre condizioni diverse per ogni miscela. Si è scelto di consolidare isotropicamente a tensioni efficaci di 20, 100 e 300KPa.

Quindi si è passati alla fase di rottura del campione, condotta in condizioni non drenate e in percorsi di compressione per carico. La velocità di avanzamento del pistone di compressione per ottenere una rottura in controllo di deformazione è stata di 3 [mm/min].

## 5.3 Risultati prove triassiali:

### 5.3.1 Risultati della miscela CB-5-0

Di seguito si riporto un grafico rappresentante l'andamento delle prove triassiali nel piano ( $q'$ - $\epsilon$ ). Le curve sono state ricavate mediante la rottura di tre campioni creati con la miscela CB-5-0, portati a rottura con un confinamento di 20, 100 e 300KPa. I singoli grafici vengono riportati nelle figure (Appendice, Fig. 1.), (Appendice, Fig. 2.) e (Appendice, Fig. 3.).

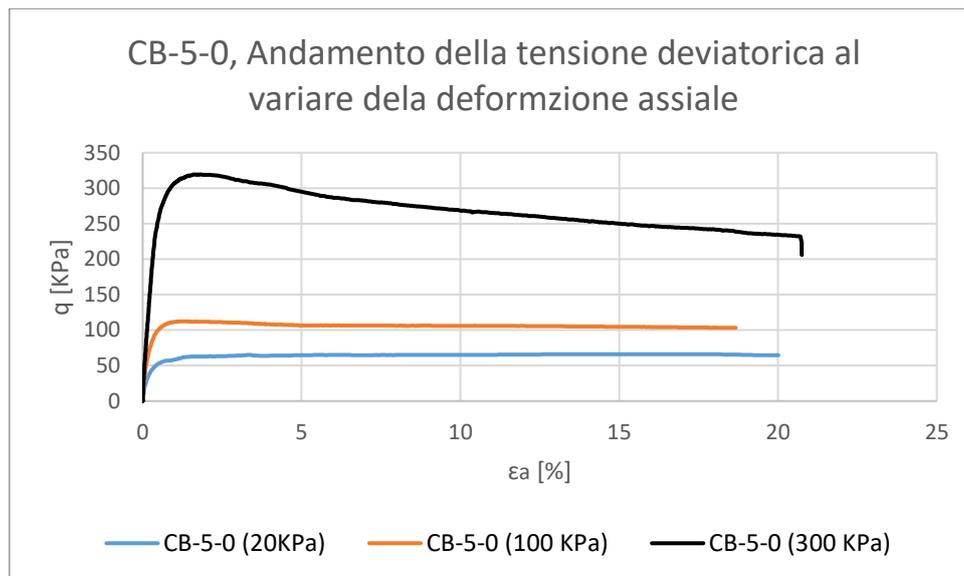


Figura 122. Miscela CB-5-0 portata a rottura con confinamenti di 20, 100 e 300KPa.

All'aumentare del confinamento si ha un notevole aumento della tensione deviatorica di picco. Passando da un valore di 61 KPa a 320 KPa, utilizzando rispettivamente un confinamento di 20KPa e 300KPa. Anche la deformazione assiale a rottura subisce un aumento all'aumentare della tensione radiale da 20 a 300KPa, rispettivamente si ha un aumento dall' 1,3% al 1,8%. Superata tale deformazione, si nota un andamento costante della tensione deviatorica per i campioni CB-5-0 (20KPa) e CB-5-0 (100KPa), mentre per la miscela CB-5-0 (300KPa) presenta un comportamento di incrudimento negativo (softening).

Per ogni prova triassiale effettuata si è ricavato il modulo di taglio del materiale. Per tale indagine è stata utilizzata la seguente espressione:

$$G = \frac{q}{3 \epsilon_s}$$

Equazione 31

La deformazione assiale di calcolo è stata ottenuta come la metà della deformazione assiale a snervamento, mentre il valore di  $q$  è univoco una volta fissato l'  $\varepsilon_a$ . Si riportano di seguito i risultati ottenuti, i grafici rappresentanti le singole misurazioni sono riportati nelle figure (Appendice, Fig.4.), (Appendice, Fig. 5.) e (Appendice, Fig. 6.).

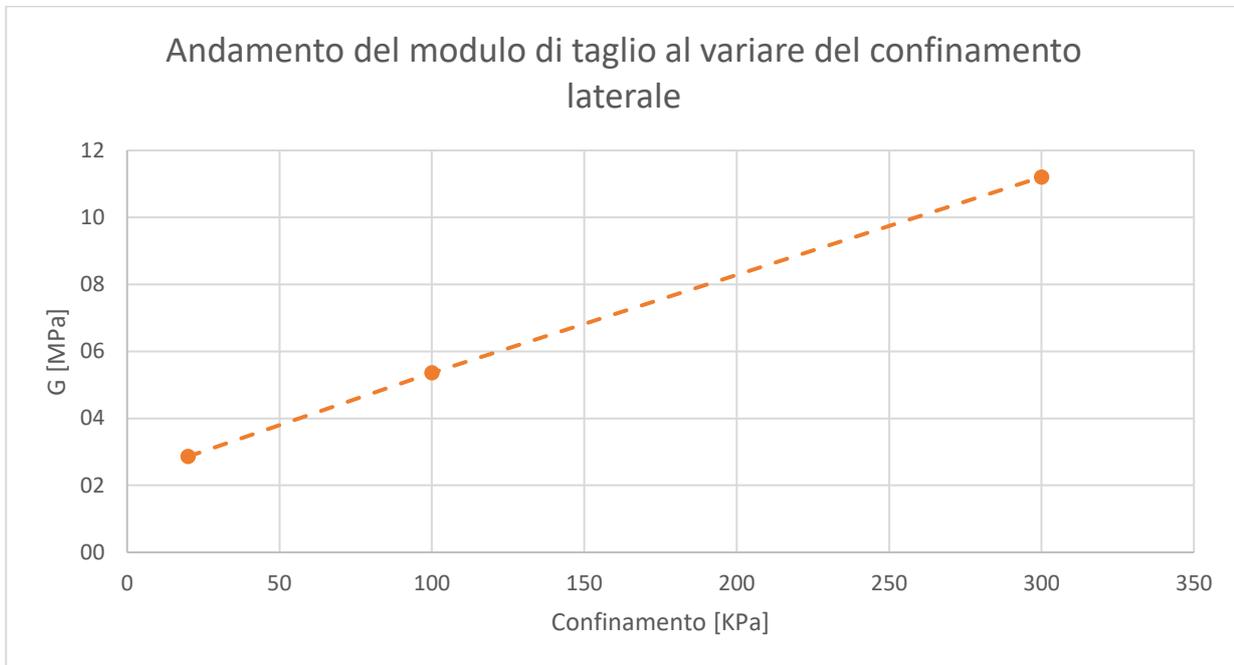


Figura 123. Andamento del modulo di taglio per la miscela CB-5-0.

Il valore di  $G$  cresce al crescere del confinamento radiale con un andamento quasi lineare. Si riporta di seguito una tabella riassuntiva dei valori ricavati:

CB-5-0	
Confinamento [KPa]	G [MPa]
20	2,8
100	5,3
300	11,2

Tabella 36. Valori del modulo di taglio della miscela CB-5-0.

Durante la fase di carico, essendo state effettuate prove CIU, si ha un aumento della pressione dell'acqua interstiziale del campione. Di seguito viene riportato l'andamento delle sovrappressioni in funzione della deformazione assiale:

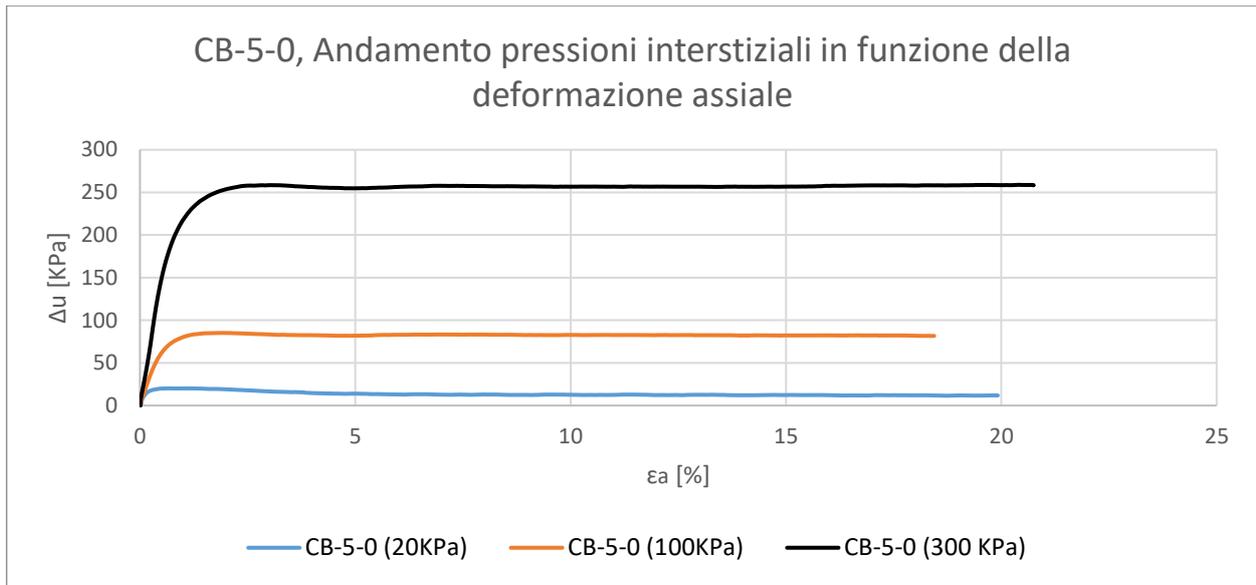


Figura 124. Confronto dell'evoluzione delle pressioni interstiziali per i tre confinamenti diversi, per le miscele CB-5-0

I valori riportati sono decurtati del valore di back pressure. Le singole prove sono mostrate nelle figure (Appendice, Fig.7.), (Appendice, Fig.8.) e (Appendice, Fig.9.).

Andando a diagrammare i risultati sul piano ( $p'$ -  $q$ ), possiamo ricercare l'involuppo di rottura del materiale. Si riporta in seguito la rappresentazione dell'involuppo di rottura di picco:

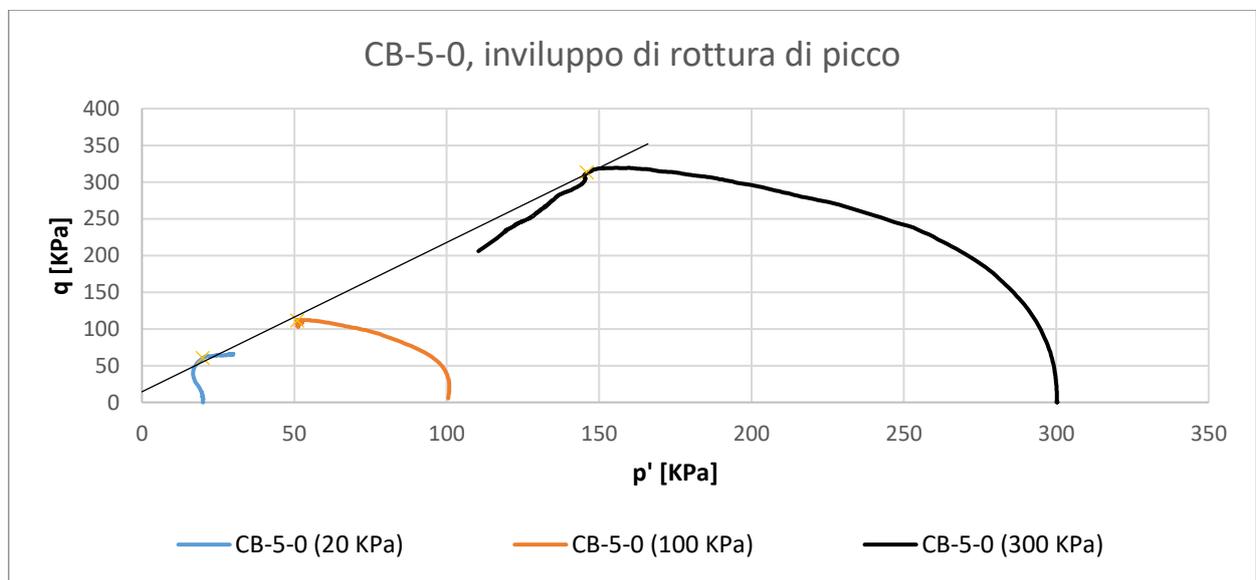


Figura 125. Involuppo di rottura di picco del materiale CB-5-0.

Le singole prove vengono rappresentate nelle figure (Appendice, Fig.10.), (Appendice, Fig.11.) e (Appendice, Fig.12.).

Mediante questa rappresentazione si può ricavare l'angolo d'attrito di picco del materiale utilizzando la seguente formulazione:

$$\operatorname{sen} \varphi'_p = \frac{3 \cdot M_p}{6 + M_p} \quad \varphi'_p = \operatorname{arcsen}\left(\frac{3 \cdot M_p}{6 + M_p}\right)$$

Equazione 32.

Dove:

M = coefficiente angolare della retta dell'involuppo di rottura in condizioni di picco

In questo caso si ricava un angolo d'attrito di picco di:

$$\varphi'_p = 47.18^\circ$$

Da cui è possibile ricavare la coesione:

$$c = 5.02 \text{ [KPa]}$$

Utilizzando le medesime considerazioni si può ricavare dell'angolo d'attrito ultimo:

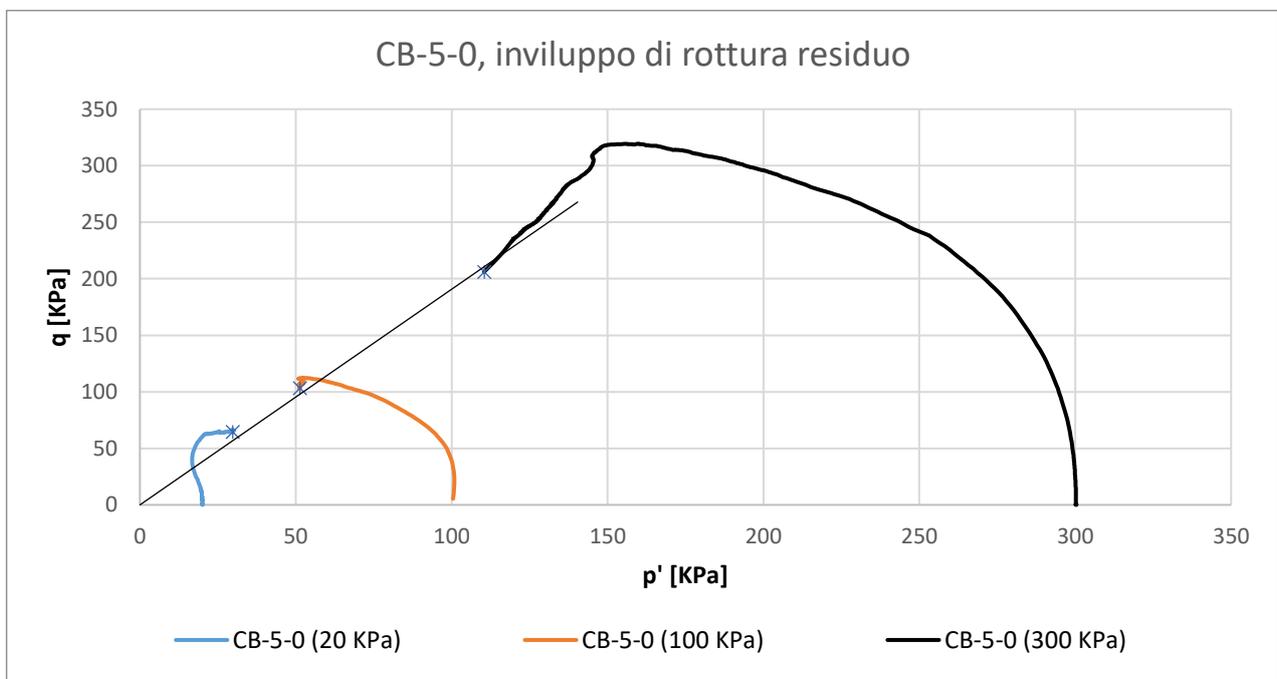


Figura 126. Involuppo di rottura residuo del materiale CB-5-0.

Da cui utilizzando l'Equazione 30. si ottiene:

$$\varphi'_u = 46^\circ$$

Si è altresì ricercato l'involuppo di rottura per mezzo dei cerchi di Mohr:

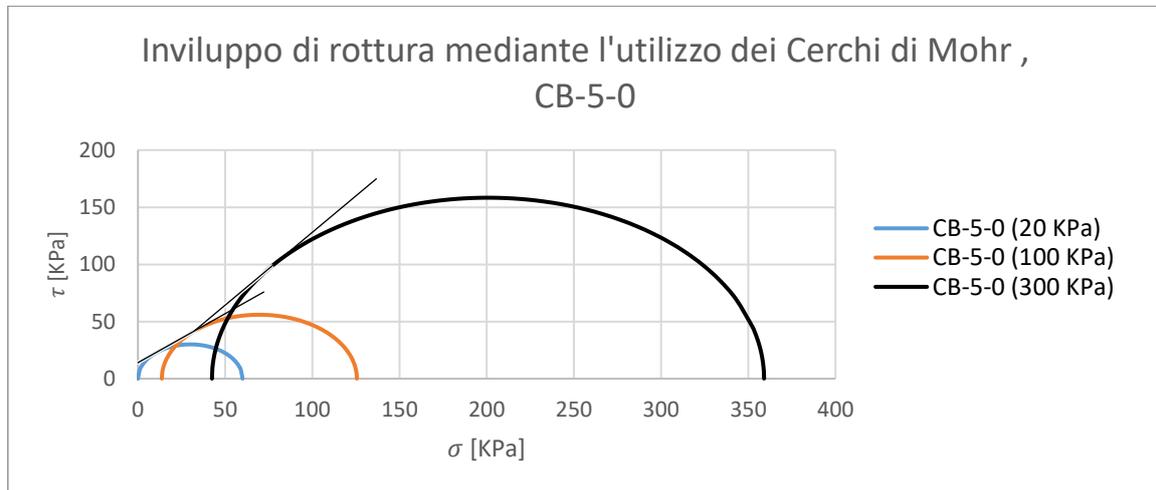


Figura 127. Involuppo di rottura della miscela CB-5-0, tramite l'utilizzo dei cerchi mi Mohr.

Si è calcolata la coesione del materiale utilizzando la retta tangente dai due cerchi ricavati per confinamenti minori:

$$c = 13,6 \text{ [KPa]}$$

Le curve raffiguranti i singoli cerchi vengono riportati in appendice nelle figure (Appendice, Fig.13.), (Appendice, Fig.14.) e (Appendice, Fig.15.).

Si riporta in seguito la curva di stato critico ricavata dalle prove triassiali eseguite:

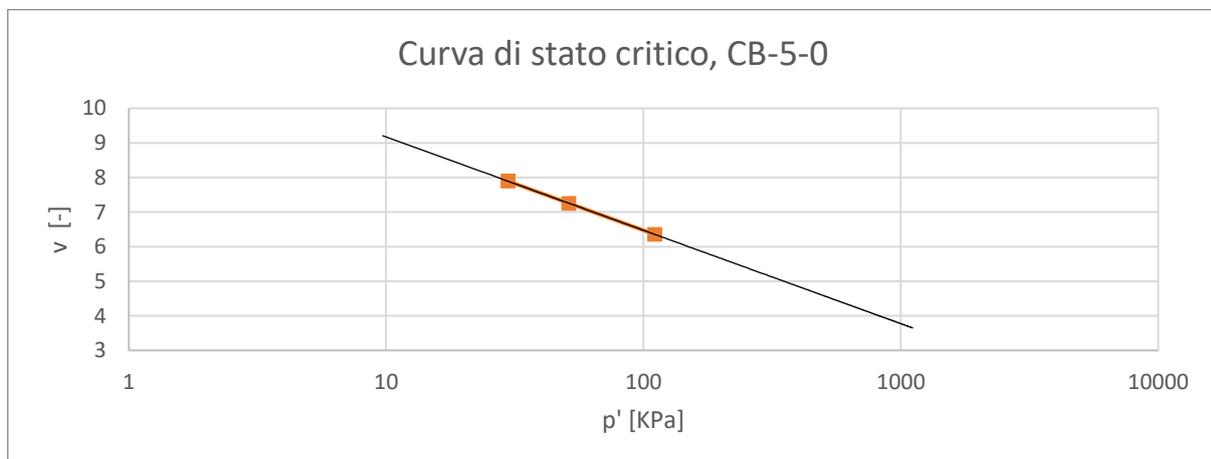


Figura 128. Curva di stato critico della miscela CB-5-0.

Di seguito si riporta una tabella riassuntiva dei valori di volume specifico,  $\Gamma$ , e pendenza della retta,  $\lambda$ , ricavati:

CB-5-0	
$\Gamma$	$\lambda$
8.95	0.203

Tabella 37. Valori ricavati dalla CSL.

Andando ad analizzare le modalità in cui sono andati a rottura i campioni al variare del confinamento radiale, si può notare come si passi da comportamento a botte (Figura 119.), ad una rottura per taglio con la presenza di una superficie di scivolamento ben definita (Figura 120.) e (Figura 121.) all'aumentare della tensione radiale applicata.



Figura 129. Comportamento a botte in fase di rottura del campione CB-5-0 (20KPa).



Figura 130. Comportamento a botte in fase di rottura del campione CB-5-0 (100KPa).



*Figura 131. Rottura per taglio del campione CB-5-0 (300KPa).*

Durante la prova del campione CB-5-0 (100 KPa) si è anche cercato di misurare le deformazioni radiali. A tal fine durante la fase di montaggio della prova sono stati inseriti dei rettangoli di carta stagnola sui lati del campione (10mm x 5mm). Mediante l'utilizzo dei Kaman, si acquisisce la variazione del potenziale del campo magnetico dovuta allo spostamento della patina di carta stagnola rispetto alla posizione fissa del Kaman. Questa variazione viene convertita in spostamenti radiali. Nel nostro caso non è stato possibile portare a termine la prova, in quanto il campione ha reagito con la carta stagnola decomponendola totalmente. In aggiunta, la reazione venutasi a creare, ha portato alla formazione d'aria tra il campione e la membrana in lattice. Questa condizione ha condotto ad una desaturazione del campione e dell'apparecchiatura triassiale. Per la quale è stato necessario effettuare una procedura di drenaggio dell'aria presente nell'apparecchiatura, espellendola, e procedendo con una risaturazione del campione. Nella figura seguente si mostra la porzione di campione che ha reagito con la carta stagnola:



*Figura 132. Risultato della disgregazione della carta stagnola a contatto con il campione.*

Si può notare una parte più chiara nella parte centrale del campione, dove è avvenuta la reazione.

### 5.3.2 Risultati della miscela CB-4-0:

Per lo studio delle proprietà meccaniche della miscela CB-4-0 è stato seguito un iter analogo alla miscela CB-5-0. Andando a rappresentare i risultati delle prove sul piano ( $q$ - $\epsilon$ ), si può vedere l'effetto dell'aumento del confinamento sulla tensione deviatorica massima offerta dal materiale. Le singole prove vengono riportate nelle figure (Appendice, Fig.16.), (Appendice, Fig.17.) e (Appendice, Fig.18.).

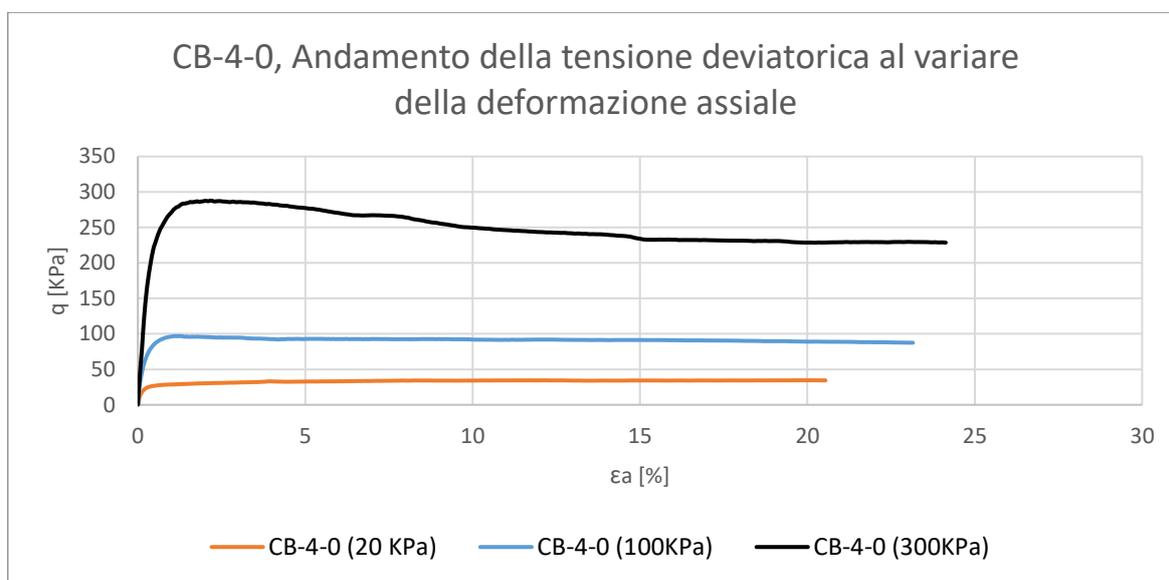


Figura 133. Miscela CB-4-0 portata a rottura con confinamenti di 20, 100 e 300KPa.

Anche in questo caso all'aumentare del confinamento si ha un aumento della tensione deviatorica di picco. Si può notare un comportamento di softening del materiale sia per il confinamento di 100 che di 300KPa. Mentre per un basso valore di tensione radiale dopo la fase di snervamento si ha una fase di incrudimento. I valori della tensione di snervamento di picco ottenuti sono: 27,4 KPa per la miscela CB-4-0 (20 KPa), 96,8 KPa per la miscela CB-4-0 (100 KPa) e 287,7 KPa per la miscela CB-4-0 (300KPa). Le deformazioni sviluppate al raggiungimento dello snervamento crescono al crescere del confinamento, passando da un valore minimo del 0,59 [%] ad un valore massimo 2,01 [%].

Anche in questo caso per ogni prova triassiale si è ricavato il modulo di taglio  $G$  del materiale, le immagini rappresentanti le rette secanti le curve, da cui è stato possibile ricavare tale valore, sono riportate nelle figure (Appendice, Fig.19.), (Appendice, Fig.20.) e (Appendice, Fig.21.).

Si riporta di seguito l'andamento di G al variare della tensione di confinamento radiale:

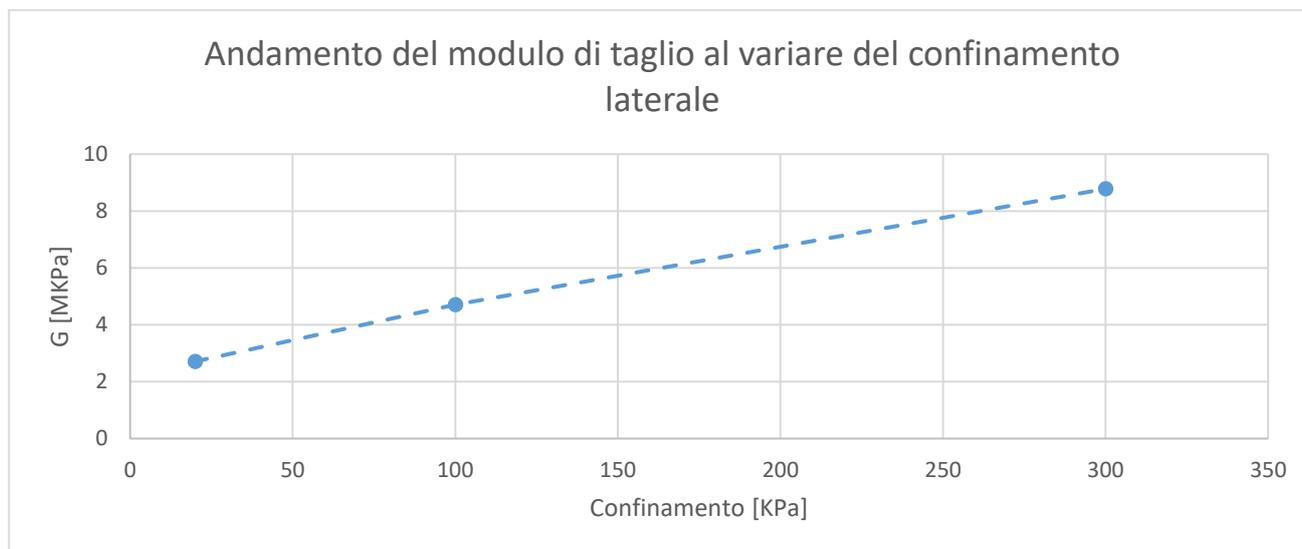


Figura 134. Andamento del modulo di taglio per la miscela CB-4-0.

Anche in questo caso il valore di G cresce al crescere del confinamento radiale con un andamento quasi lineare. Si riporta di seguito una tabella riassuntiva dei valori ricavati:

CB-4-0	
Confinamento [KPa]	G [MPa]
20	2,6
100	4,7
300	8,7

Tabella 38. Valori del modulo di taglio della miscela CB-4-0.

Di seguito vengono riportate le registrazioni riguardanti le pressioni dell'acqua interstiziale durante le prove:

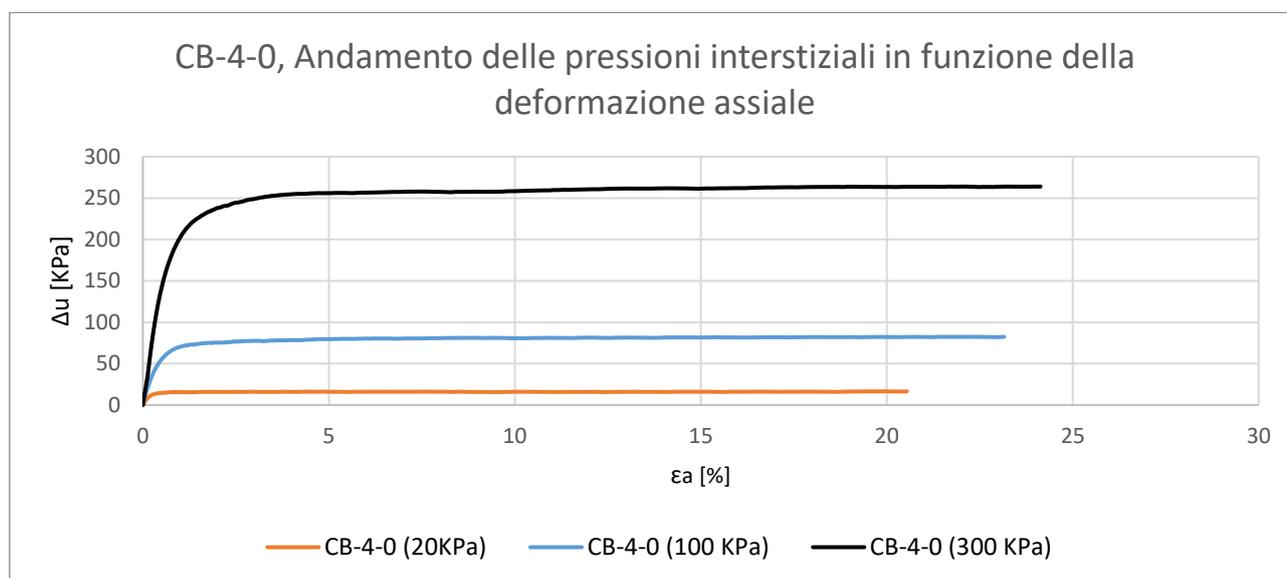


Figura 135. Confronto dell'evoluzione delle pressioni interstiziali per i tre confinamenti diversi, per le miscele CB-4-0.

Anche in questo caso le singole registrazioni vengono riportate in appendice nelle figure (Appendice, Fig.22.), (Appendice, Fig.23.) e (Appendice, Fig.24.).

Si vuole adesso ricavare l'involuppo di rottura di picco e residuo del materiale. Per tale ragione si rappresentano i risultati delle prove sul piano (p' - q):

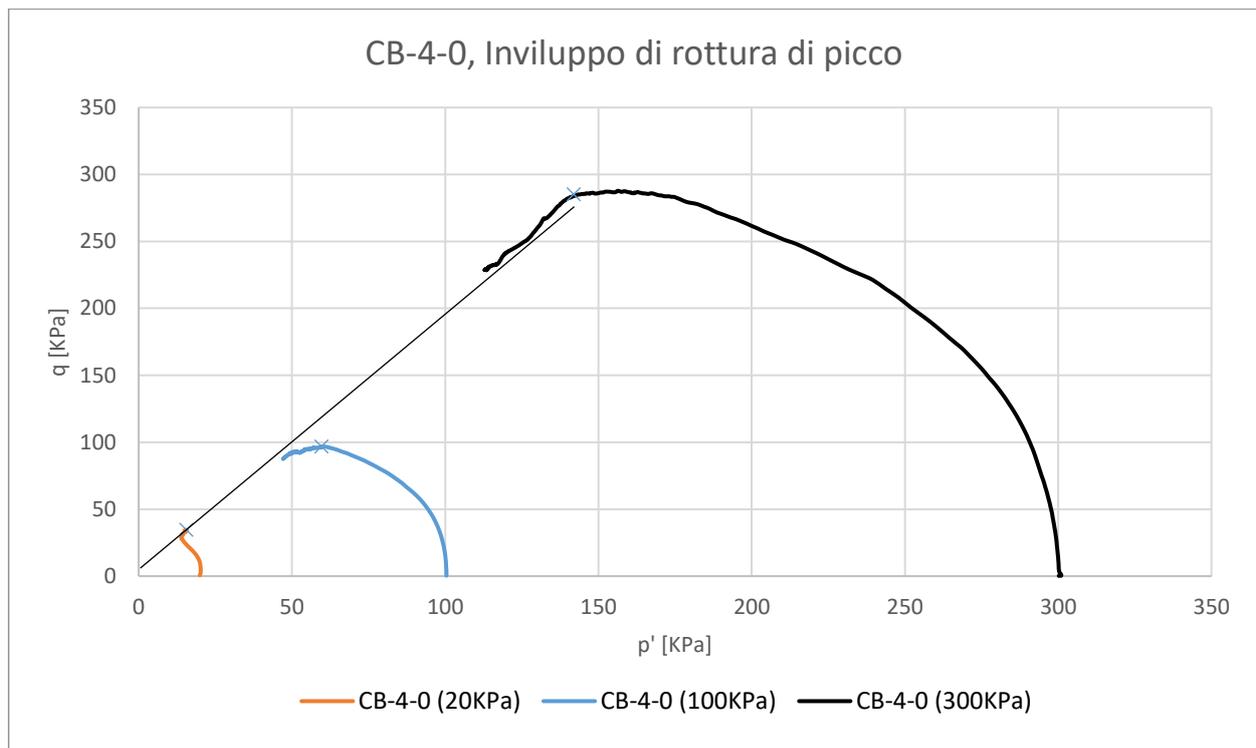


Figura 136. Involuppo di rottura di picco del materiale CB-4-0.

Le singole prove vengono rappresentate nelle figure (Appendice, Fig. 25.), (Appendice, Fig. 26.) e (Appendice, Fig. 27.). Utilizzando la retta interpolante i tre punti di snervamento mediante la l'Equazione 32 è possibile ricavare l'angolo d'attrito di picco del materiale:

$$\varphi'_u = 49,11^\circ$$

Da cui è possibile ricavare la coesione:

$$c = 2,77 \text{ [KPa]}$$

Andando ad analizzare le condizioni ultime:

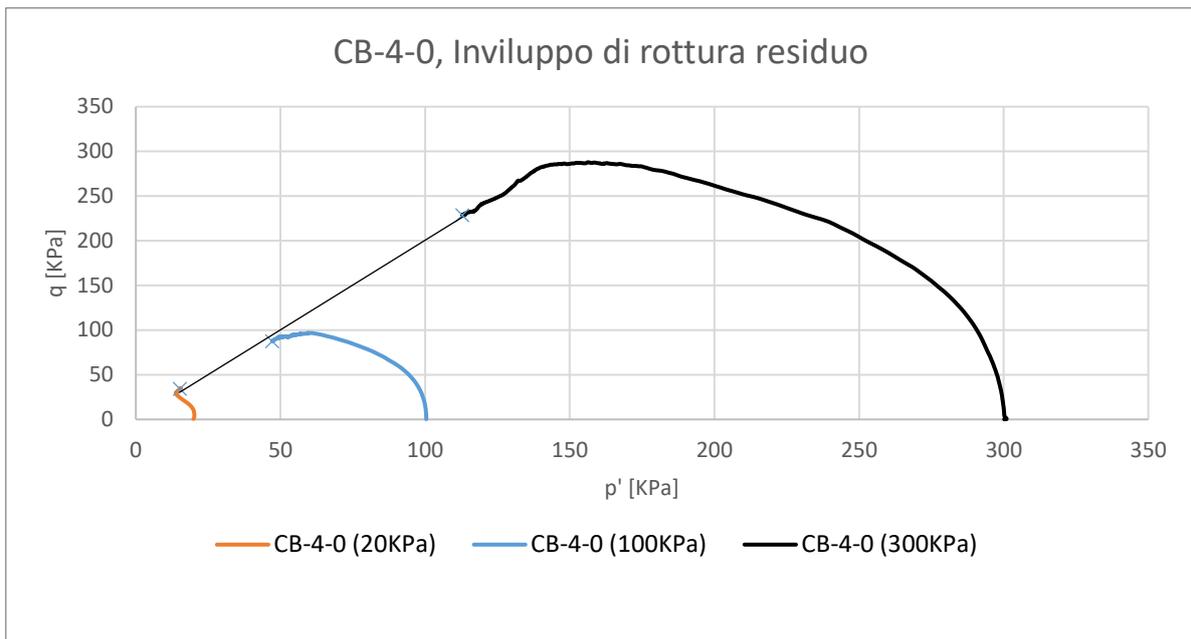


Figura 137. Involuppo di rottura residuo del materiale CB-4-0.

Si ricava:

$$\varphi_u = 48^\circ$$

Anche in questo caso si ricorre alla rappresentazione mediante i cerchi di Mohr dell'involuppo di rottura:

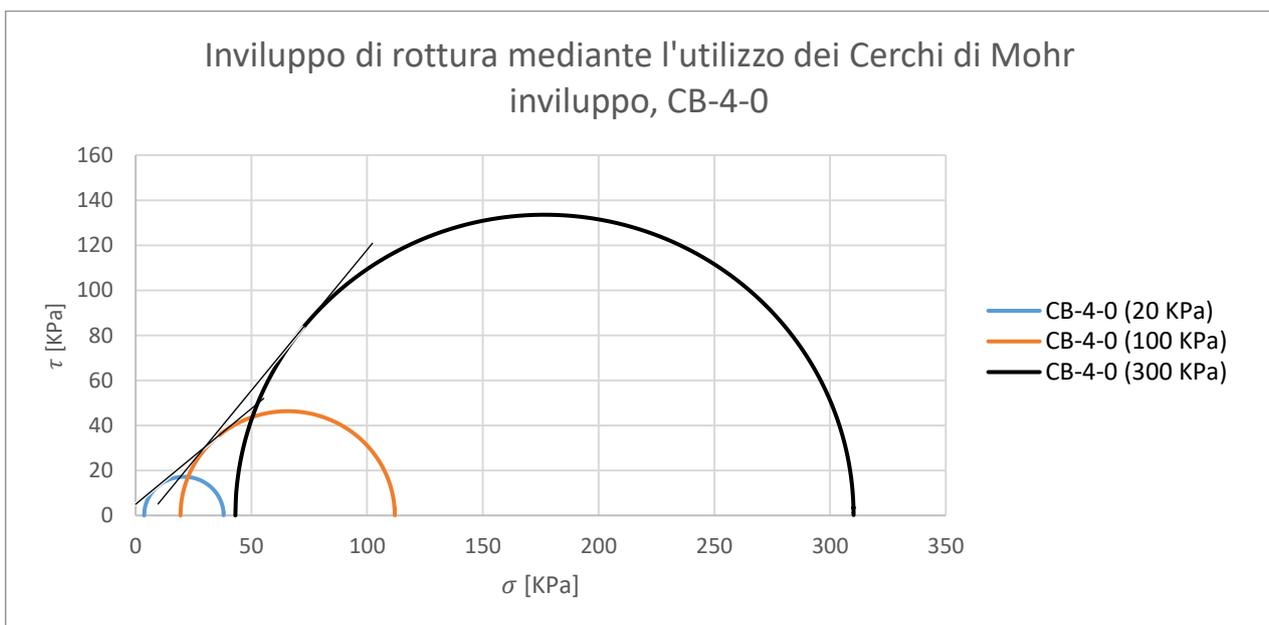


Figura 138. Involuppo di rottura della miscela CB-4-0, tramite l'utilizzo dei cerchi mi Mohr.

Si è potuta ricavare una coesione pari a:

$$c = 5 \text{ [KPa]}$$

Anche in questo caso i singoli cerchi vengono riportati nelle figure (Appendice, Fig.28.), (Appendice, Fig.29.) e (Appendice, Fig.30.).

Si riporta in seguito la curva di stato critico ricavata dalle prove triassiali eseguite:

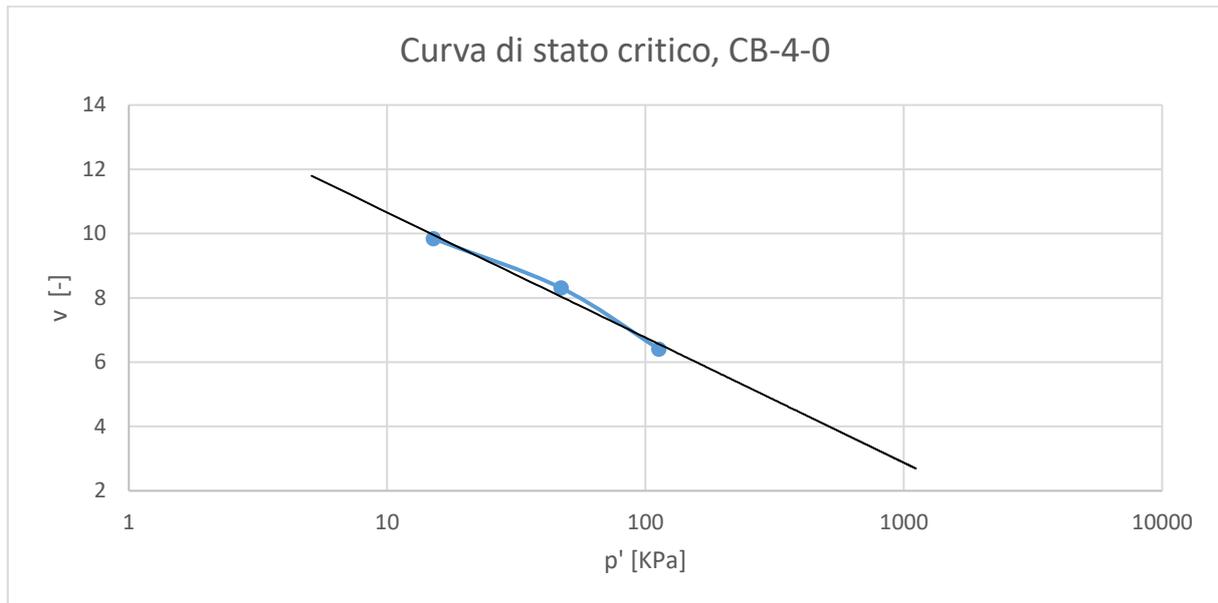


Figura 139. Curva di stato critico della miscela CB-4-0.

Di seguito si riporta una tabella riassuntiva dei valori di volume specifico e pendenza della retta ricavati:

CB-4-0	
$\Gamma$	$\lambda$
14.55	1.69

Tabella 39. Valori ricavati dalla CSL.

Le modalità di rottura dei campioni dipendono dalla tensione radiale applicata. Questo materiale contenente relativamente poco cemento, presenta una bassa rigidezza, questa caratteristica si può vedere nel comportamento che presentano i campioni testati con confinamento di 20 e 100KPa. Mentre il campione CB-4-0 (300) presenta una classica rottura a botte.



*Figura 140. Rottura del campione CB-4-0 (20KPa).*



*Figura 141. Rottura del campione CB-4-0 (100KPa).*



*Figura 142. Rottura del campione CB-4-0 (300KPa).*

### 5.3.3 Risultati della miscela CB-6-0:

La trattazione dello studio di questa miscela è analoga a quella effettuata per le due precedenti. Si riporta il grafico rappresentante l'andamento delle prove triassiali nel piano ( $q$ - $\epsilon$ ). Anche in questo caso le curve sono state ricavate mediante la rottura di tre campioni creati con la miscela CB-6-0, portati a rottura con un confinamento di 20, 100 e 300KPa. Le singole prove vengono riportate nelle figure (Appendice, Fig. 31.), (Appendice, Fig. 32.) e (Appendice, Fig. 33.).

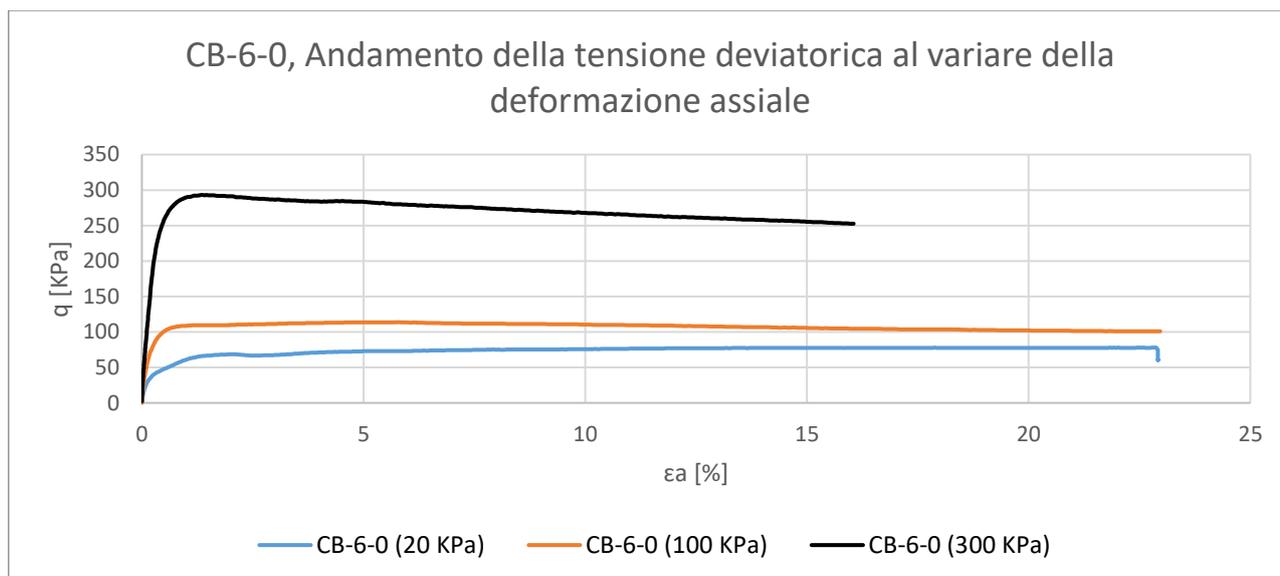


Figura 143. Miscela CB-6-0 portata a rottura con confinamenti di 20, 100 e 300KPa.

I campioni CB-6-0 (100 KPa) e CB-6-0 (300 KPa) presentano un incrudimento negativo dopo la fase di snervamento, mentre nella prova riguardante un confinamento di 20 KPa il campione mostra dell'incrudimento. I valori di tensione deviatorica di snervamento per le tre miscele sono 65, 108 e 290 KPa rispettivamente per il confinamento di 20, 100 e 300 KPa. Le deformazioni raggiunte dai campioni in fase di snervamento sono dipendenti dal confinamento radiale assegnato alla prova. Il campione CB-6-0 (20 KPa) mostra una deformazione a rottura di 1,28 [%], passando al confinamento maggiore del campione CB-6-0 (100 KPa) si ottiene un valore di 1,25[%], per arrivare a 1,05 [%] nel caso del campione CB-6-0 (300 KPa). Si può notare come per questa miscela, all'aumentare del confinamento, si ha una deformazione a rottura decrescente.

Seguendo l'iter utilizzato per le due miscele precedenti si è proceduto con il calcolo del modulo di taglio del materiale per i tre confinamenti assegnati. Le rette con cui è stato possibile ricavare tali valori sono riportate nelle figure (Appendice, Fig.34.), (Appendice, Fig.35.) e (Appendice, Fig.36.). Si riporta di seguito l'andamento di  $G$  al variare della tensione di confinamento radiale:

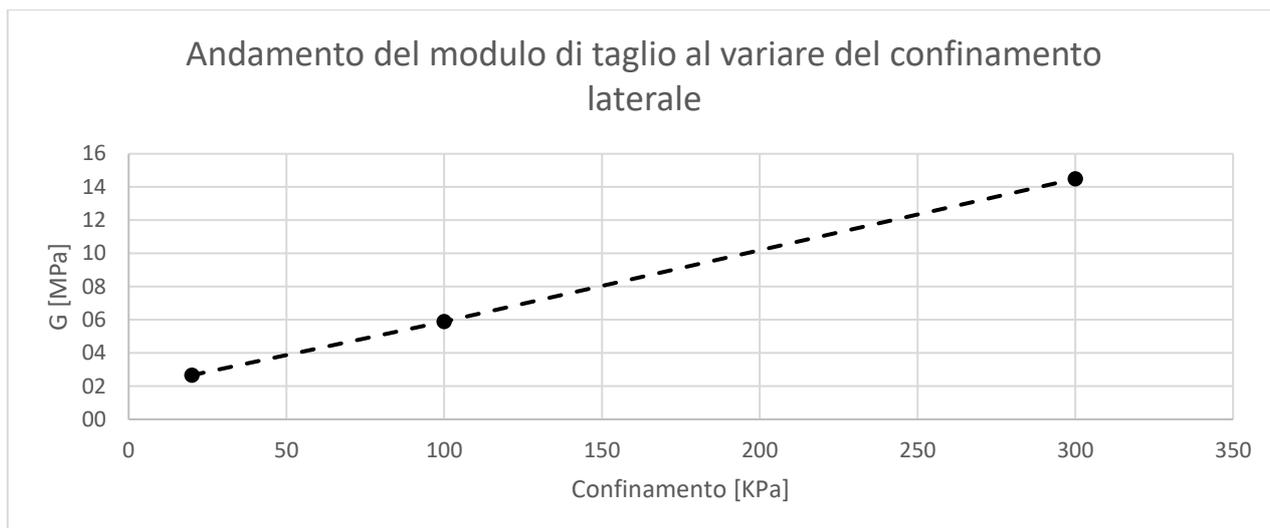


Figura 144. Andamento del modulo di taglio per la miscela CB-6-0.

La miscela CB-6-0 ha un comportamento analogo alle due miscele esaminate in precedenza, mostrando una crescita lineare del valore di G all'aumentare del confinamento radiale. Si riporta di seguito una tabella riassuntiva dei valori ricavati:

CB-6-0	
Confinamento [KPa]	G [MPa]
20	2,6
100	5,8
300	14,4

Figura 145. Valori del modulo di taglio della miscela CB-6-0.

Di seguito vengono riportate le registrazioni riguardanti le pressioni dell'acqua interstiziale durante le prove:

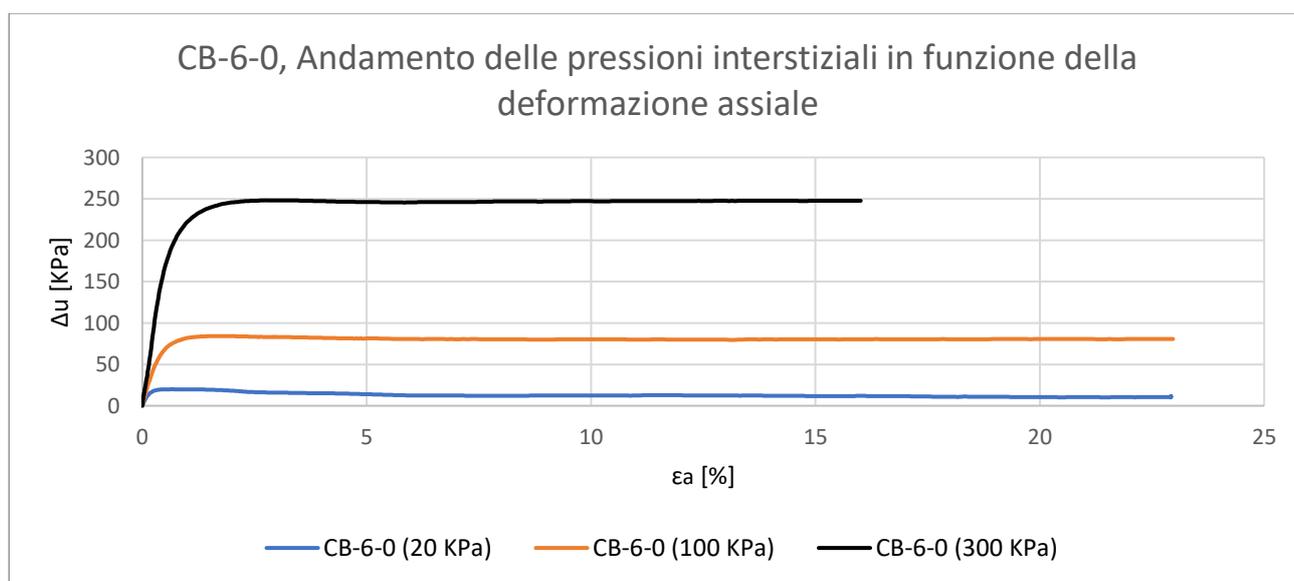


Figura 146. Confronto dell'evoluzione delle pressioni interstiziali per i tre confinamenti diversi, per le miscele CB-6-0.

Le singole registrazioni vengono riportate in appendice nelle figure (Appendice, Fig.37.), (Appendice, Fig.38.) e (Appendice, Fig.39.).

Mediante la rappresentazione delle prove sul piano (p' - q), si vuole ricercare l'involuppo di rottura del materiale. Si riporta in seguito la rappresentazione dell'involuppo di rottura di picco:

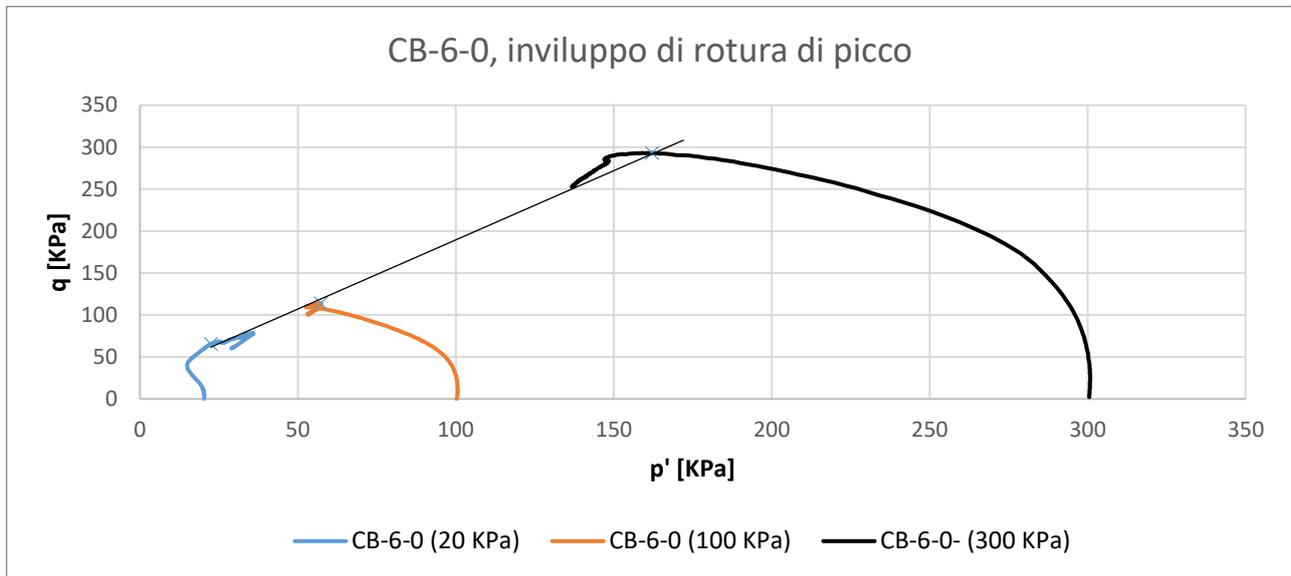


Figura 147. Involuppo di rottura di picco del materiale CB-6-0.

Le singole prove vengono rappresentate nelle figure (Appendice, Fig. 40.), (Appendice, Fig. 41.) e (Appendice, Fig. 42.).

Mediante questa rappresentazione, con l'utilizzo dell'Equazione 32. si può ricavare l'angolo d'attrito di picco del materiale:

$$\varphi'_p = 44.99^\circ$$

Da cui è possibile ricavare la coesione:

$$c = 8.98 \text{ [KPa]}$$

Andando ad analizzare le condizioni residue:

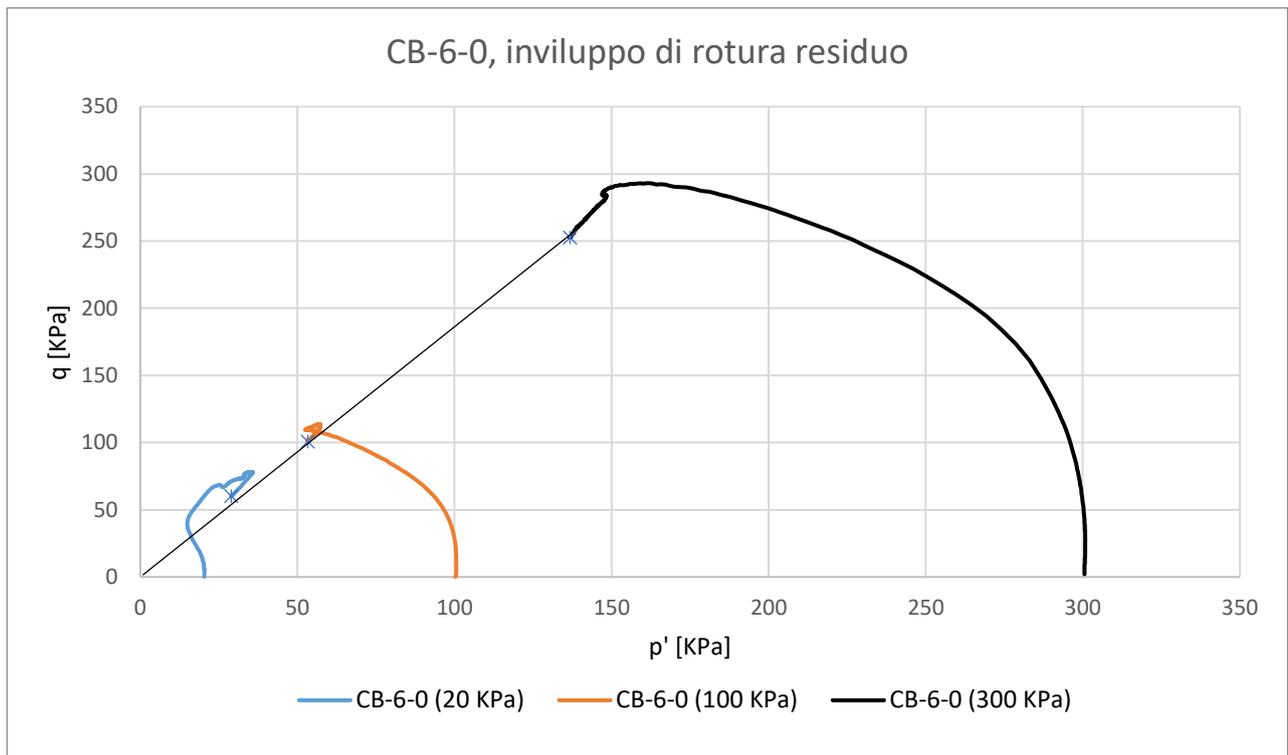


Figura 148. Involucro di rottura residuo del materiale CB-6-0.

Da cui si può ricavare l'angolo d'attrito ultimo:

$$\varphi'_u = 43^\circ$$

Mediante la rappresentazione dell'involucro di rottura è possibile ricavare la coesione del materiale:

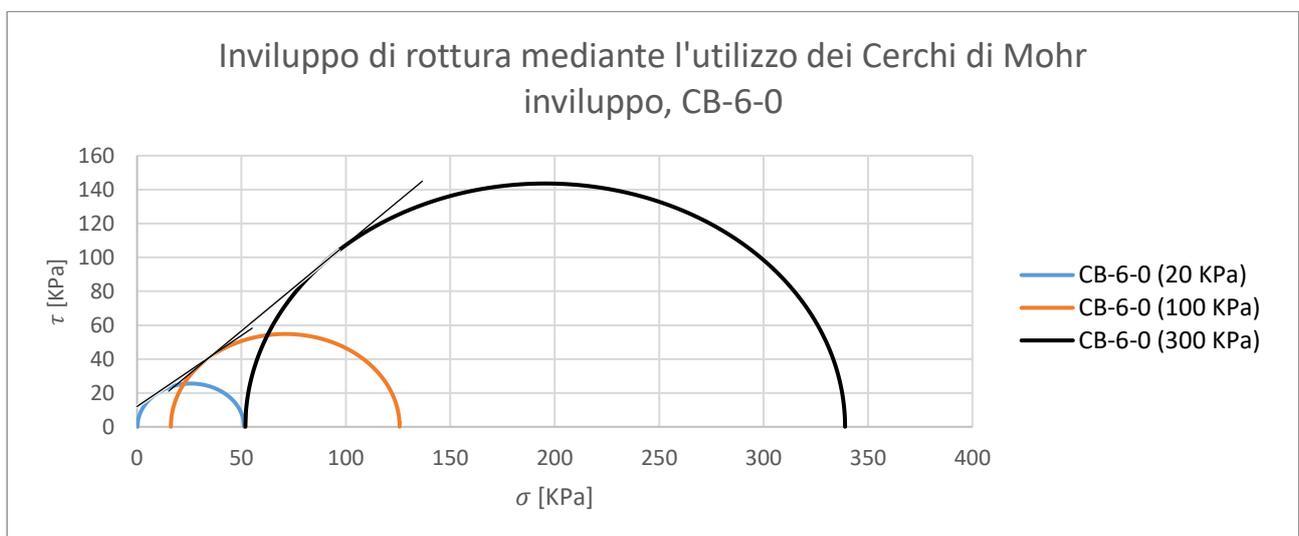


Figura 149. Involucro di rottura della miscela CB-6-0, tramite l'utilizzo dei cerchi mi Mohr.

Da cui si ricava una coesione:

$$c = 12 \text{ [KPa]}$$

Anche in questo caso si riportano le singole curve nelle figure (Appendice, Fig.43.), (Appendice, Fig.44.) e (Appendice, Fig.45.).

Si riporta in seguito la curva di stato critico ricavata dalle prove triassiali eseguite:

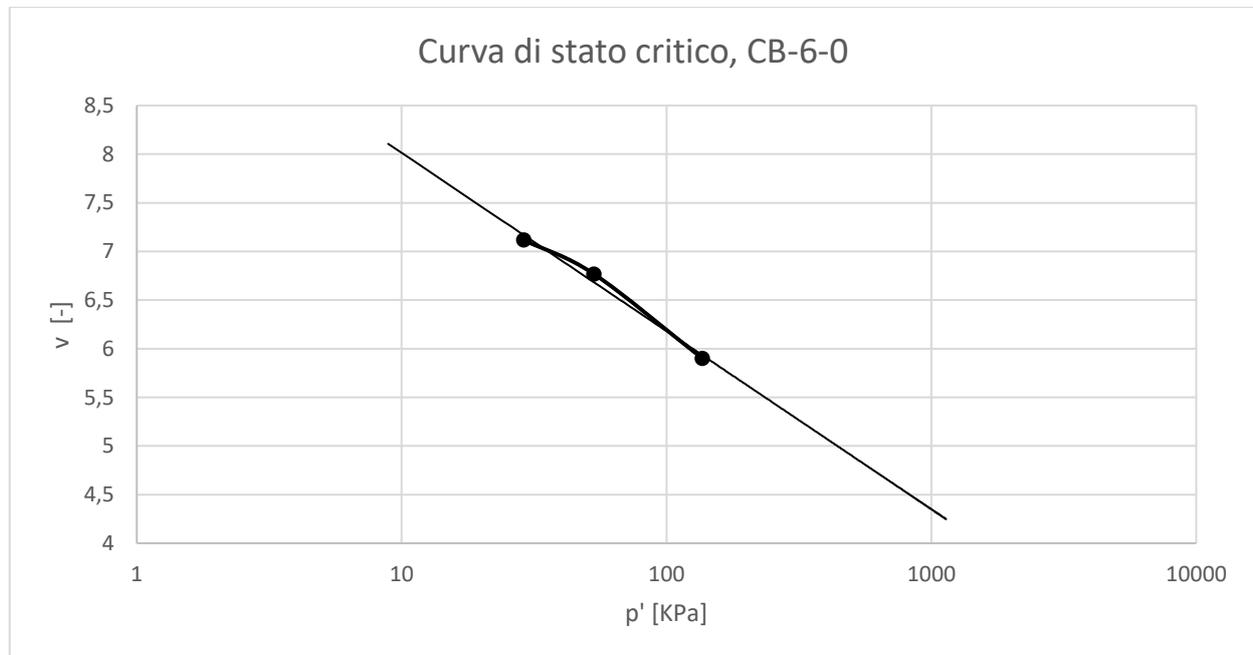


Figura 150. Curva di stato critico della miscela CB-6-0.

Di seguito si riporta una tabella riassuntiva dei valori di volume specifico e pendenza della retta ricavati:

CB-6-0	
$\Gamma$	$\lambda$
9.84	0.796

Tabella 40. Valori ricavati dalla CSL.

Anche in questo caso la rottura del campione con confinamento minore avviene con una rottura per taglio, mentre aumento il confinamento radiale a 100 si registra una rottura a botte. Per quanto riguarda il campione CB-6-0 (300KPa) si presuppone una rottura a botte simile al campione CB-6-0 (100 KPa), ma la prova non si è protratta abbastanza per ottenere una deformazione assiale abbastanza elevata da avere un evidente superficie di rottura.



*Figura 151. Rottura del campione CB-6-0 (20KPa).*



*Figura 152. Rottura del campione CB-6-0 100KPa).*



*Figura 153. Rottura del campione CB-6-0 300KPa).*

La prova sul campione CB-6-0 (300 KPa) è stata condotta due volte. In quanto, durante la prima prova si è verificato un errore nel controllo della tensione radiale. Il problema è stato attribuito al grande quantitativo d'acqua che ha drenato il campione durante la fase di consolidazione. Quest'acqua ha saturato completamente il volumometro collegato al provino, mandando in pressione l'acqua all'interno del campione. Si riporta di seguito una foto del campione dopo la fase di consolidazione.



*Figura 154. Prova sul campione CB-6-0 (300 KPa) fallita.*

## 5.4 Analisi dei risultati e confronto con i dati presenti in letteratura

Viene di seguito riportato l'andamento della tensione deviatorica di snervamento al variare della quantità di cemento presente in miscela e della pressione di confinamento.

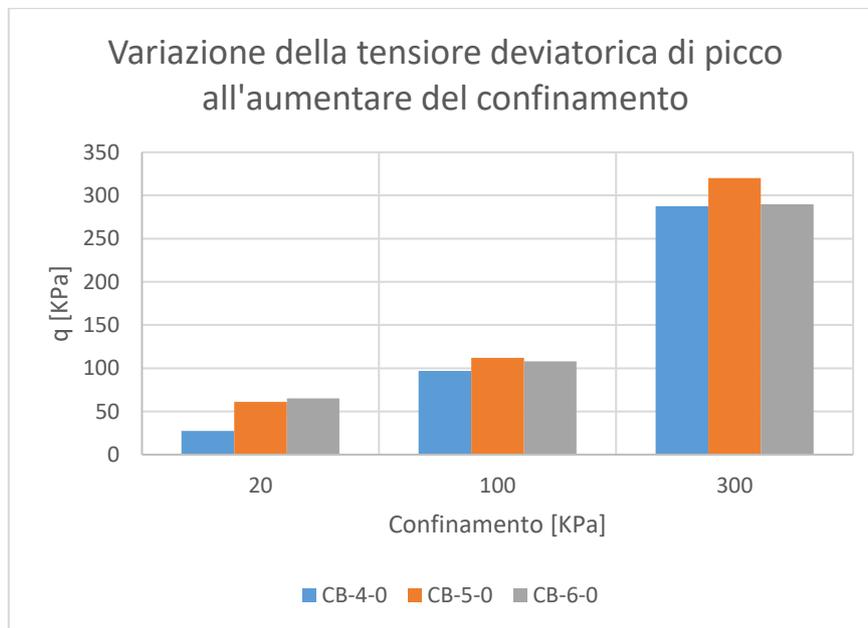


Figura 155. Confronto fra le tre miscele esaminate in funzione della quantità di cemento e della tensione deviatorica di picco.

Si può notare come la miscela CB-4-0 mostri una tensione deviatorica di picco sempre minore rispetto alle altre due miscele. Mentre la CB-5-0 e la CB-6-0 mostrano valori simili per confinamenti di 20 e 100KPa. Analizzando i tre punti più alti, recepiti mediante una pressione di confinamento di 300KPa, si può notare come la miscela CB-5-0 mostri il valore di tensione deviatorica di picco più elevato. Per tanto, per bassi valori di confinamento radiale la quantità di cemento in miscela governa il valore della tensione deviatorica di snervamento, in quanto all'aumentare della percentuale di cemento si ha un aumento di questo valore. Ma per alti livelli di pressioni radiali si perde questa dipendenza.

Per quanto riguarda la deformazione a rottura, le miscele CB-4-0 e CB-5-0 mostrano un aumento di tale valore all'aumentare del confinamento radiale. Mentre la miscela CB-6-0 mostra un decremento, passando da un valore del 1,28% al 1,05%. La variazione più elevata viene mostrata dalla miscela CB-4-0, che passando da un confinamento di 20 a 300KPa ha un incremento della deformazione a rottura dello 0,8%. La miscela CB-6-0 ha una dipendenza molto minore rispetto alle altre miscele rispetto alla pressione di confinamento, infatti si riscontra una variazione del 0,23% contro un 0,5% mostrato dalla miscela CB-5-0 per una variazione di 280 KPa di pressione di

confinamento. Si può notare che per bassi confinamenti, all'aumentare della presenza di cemento in miscela si ha un notevole miglioramento della deformabilità del materiale prima di arrivare allo snervamento. Ma questa dipendenza va persa all'aumentare della tensione di confinamento imposta al materiale.

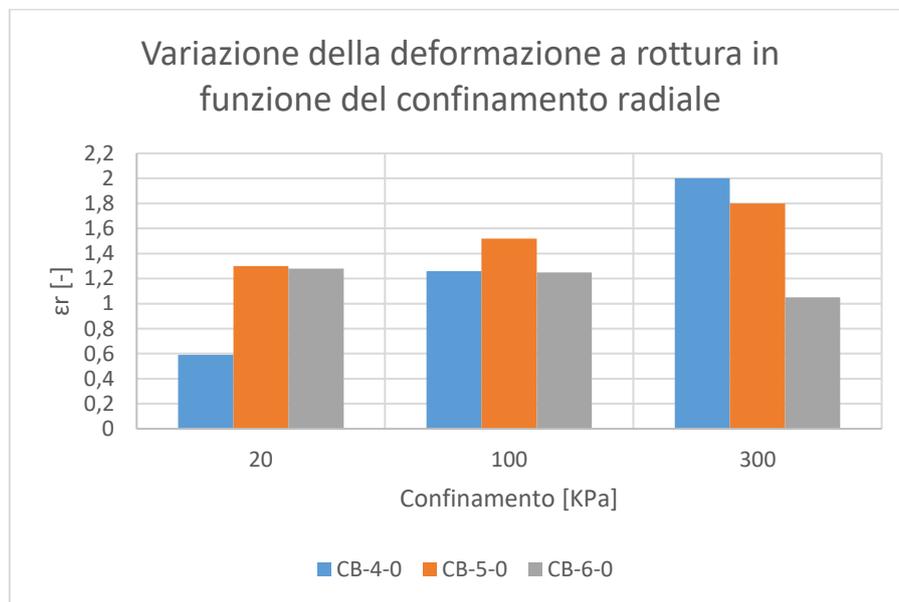


Figura 156. Confronto fra le tre miscele esaminate in funzione della quantità di cemento e della deformazione associata alla tensione deviatorica di picco.

Andando a valutare la variazione l'angolo d'attrito del materiale rispetto alla quantità di cemento presente in miscela, si può notare un decadimento di tale valore all'aumentare della percentuale di cemento presente in miscela. Di seguito si riporta un immagine esplicativa:

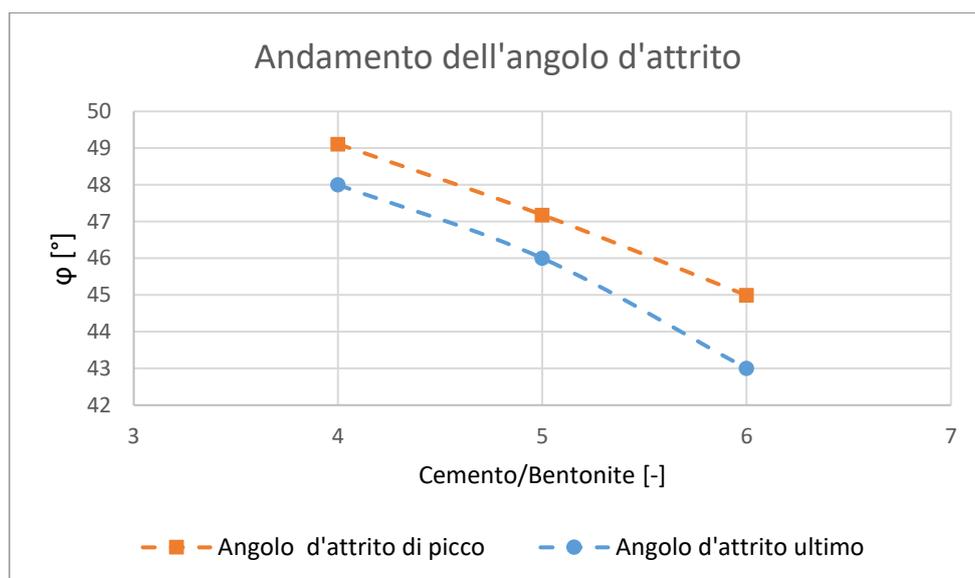


Figura 157. Variazione dell'angolo d'attrito in funzione della quantità di cemento presente in miscela.

La coesione vede un aumento all'aumentare del cemento in miscela, questo fenomeno è dovuto all'addensamento della matrice solida formante il materiale da parte del cemento. Passando dalla miscela CB-4-0 alla CB-6-0 si ha un aumento di coesione di circa tre volte. Si riporta di seguito l'andamento della coesione al variare della miscela:

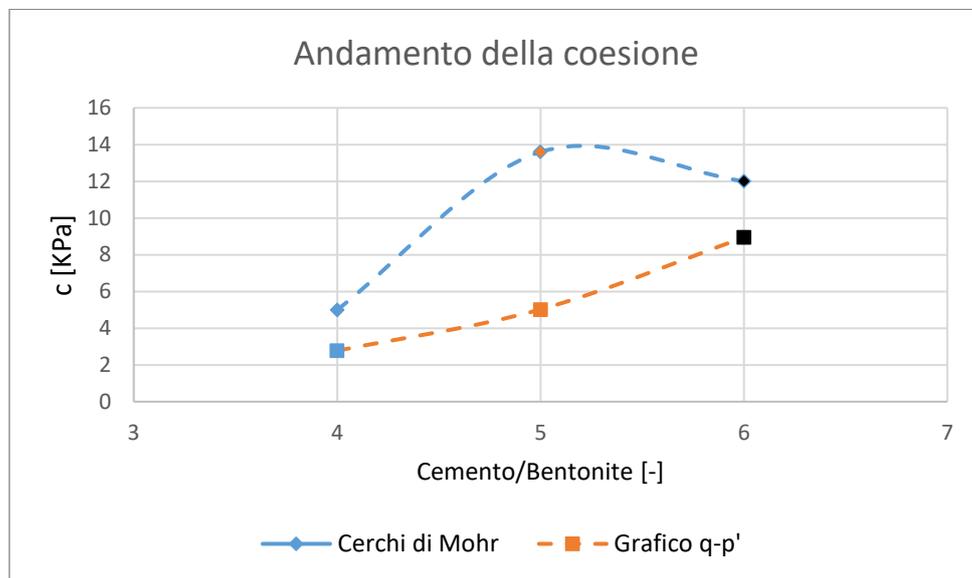


Figura 158. Variazione della coesione in funzione della quantità di cemento presente in miscela.

La differenza tra i due grafici riportati è la metodologia di calcolo dei valori di coesione. Come si può notare mediante l'utilizzo dell'involuppo di rottura sul pian q-p' si effettua una sottostima del valore di c.

Si riportano di seguito le curve di stato critico dei materiali analizzati:

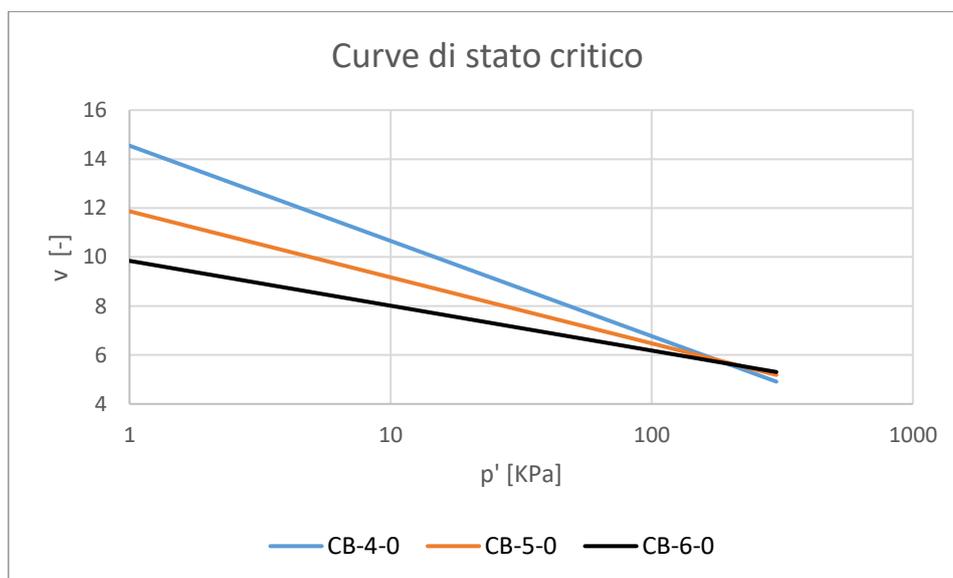


Figura 159. Confronto tra le CSL delle tre miscele analizzate.

Il volume specifico, corrispondente al valore di riferimento di 1 KPa, delle miscele varia al variare del contenuto di cemento. Diminuendo all'aumentare della quantità di legante presente. Mentre le pendenze delle curve diminuiscono all'aumentare del cemento.

Nella seguente tabella si riportano le fotografie delle varie rotture dei campioni esaminati al variare del confinamento radiale e della miscela utilizzata:

	20 KPa		100 KPa		300 KPa
CB-4-0					
CB-5-0					
CB-6-0					

Figura 160. Riassunto modalità di rottura dei campioni in funzione della tensione di confinamento.

Andando a confrontare i valori di tensione deviatorica di snervamento ricavati per un confinamento radiale di 100KPa con quelli presenti nello studio condotto da Soga et al. (2013) si può notare una corrispondenza fra gli studi condotti. Le miscele CB-5-0 e CB-6-0 presentano una quantità di cemento maggiore rispetto alle altre, per questa ragione si vede una traslazione verso l'alto dovuta all'aumento di tensione deviatorica di snervamento che ne consegue.

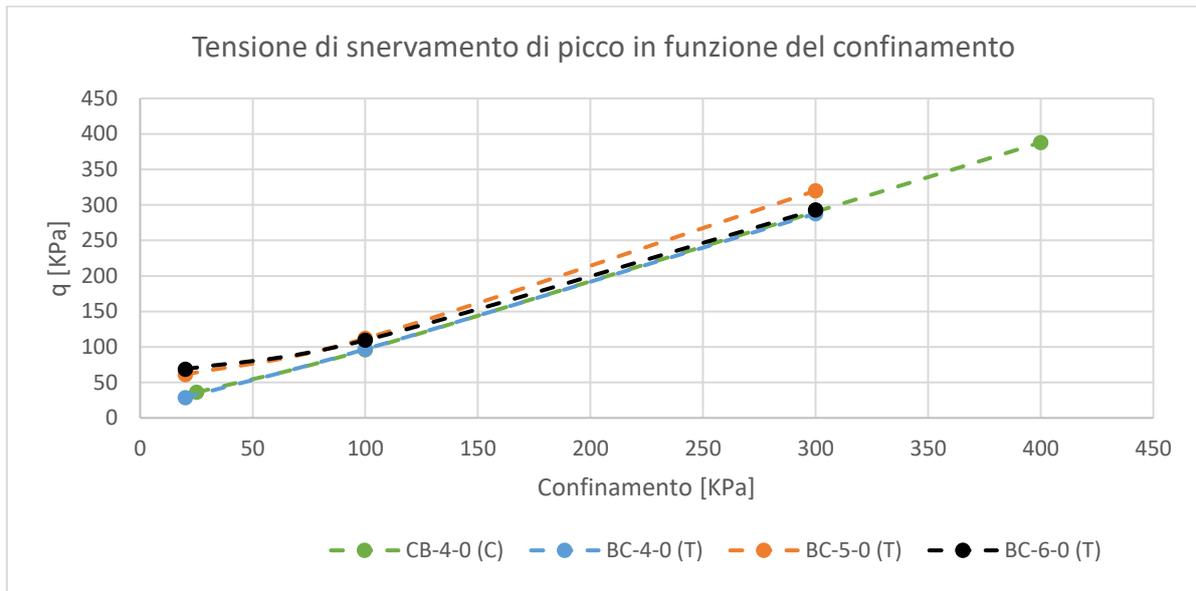


Figura 161. Confronto fra le miscele analizzate in questa ricerca e quella analizzata da Carreto et al. (2015).

Per quanto riguarda il modulo di taglio G, si riscontra che per un confinamento laterale di 20 KPa i valori calcolati per le tre miscele non differiscono di molto. Ma all'aumentare del confinamento radiale, si nota una crescita del valore di G proporzionale alla quantità di cemento presente in miscela.

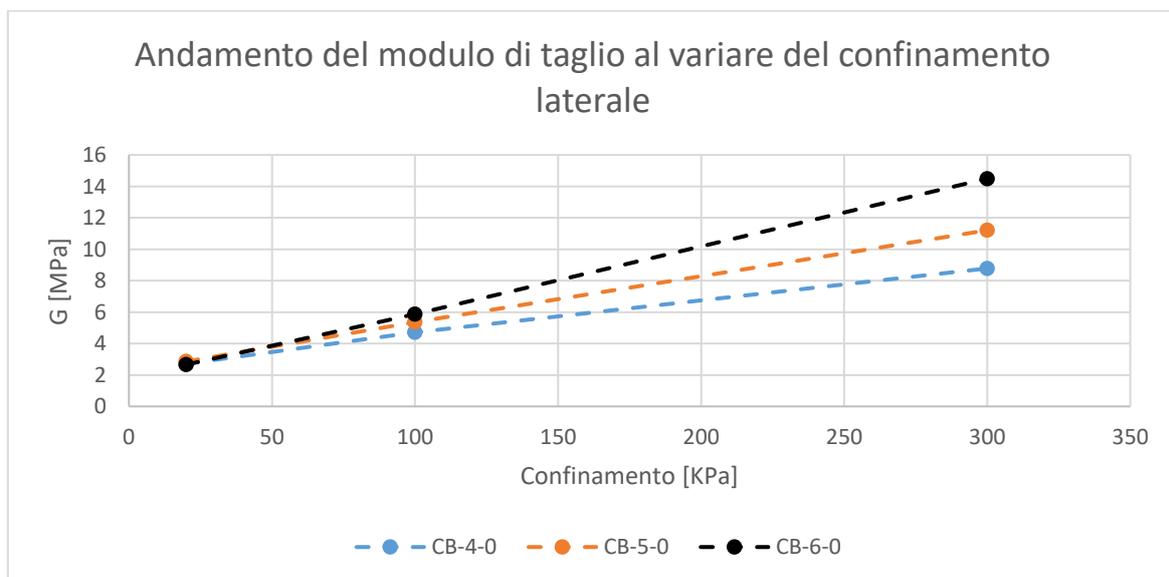


Figura 162. Andamento del modulo di taglio per le miscele CB-4-0, CB-5-0 e CB-6-0.

Andando a confrontare questi dati con la ricerca eseguita da Soga et al. (2013), si può notare come l'andamento del modulo di taglio sia circa il medesimo per valori di confinamento pari a 20 e 100 KPa. Ma di circa 100KPa più elevato per valori di confinamento radiale pari a 300KPa.

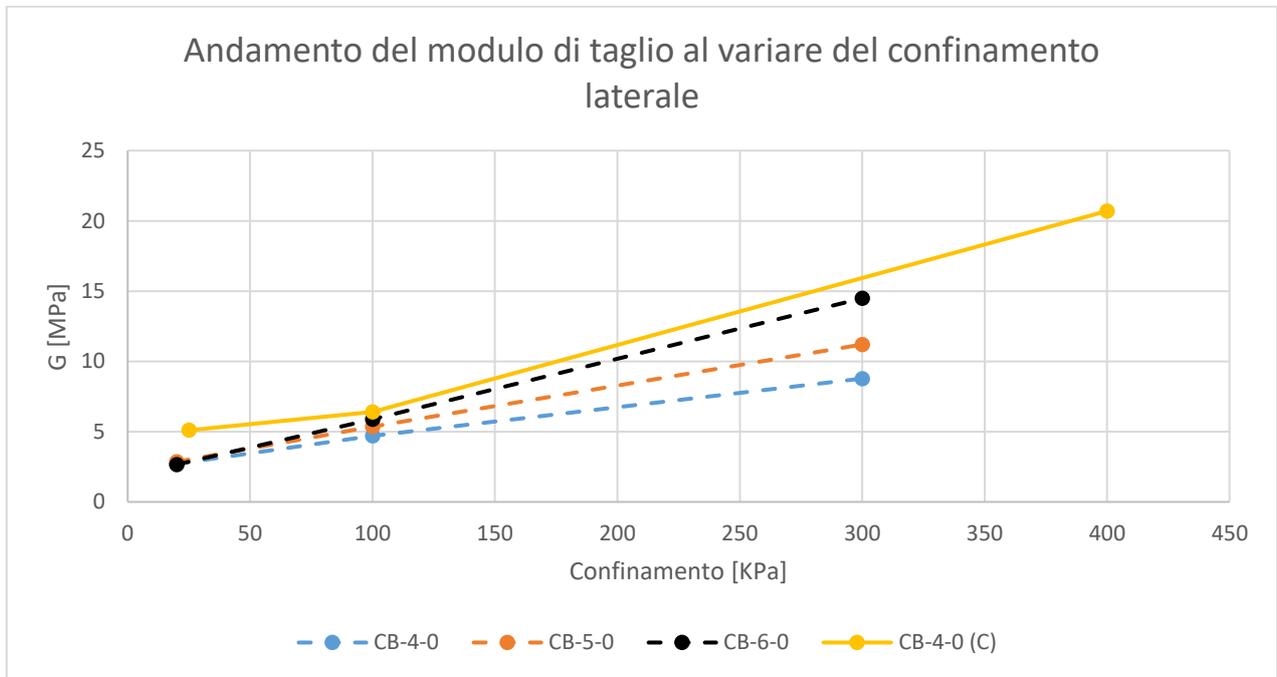


Figura 163. Confronto con lo studio eseguito da Carreto et al. (2015).

## **6. Comportamento sotto carichi edometrici e conducibilità idraulica**

In questa fase si è indagata la conducibilità idraulica e le caratteristiche deformative lungo percorsi edometrici. Mediante prove di conducibilità che vedono l'utilizzo di permeametri a parete rigida e flessibile si è instaurato un moto di filtrazione nel campione, andando a ricavare la conducibilità idraulica attraverso l'imposizione di un gradiente idraulico e la rilevazione delle portate d'acqua in ingresso ed in uscita dal campione. A supporto dei risultati così ottenuti, si sono eseguite tre prove triassiali con tensioni di consolidamento diverse per ogni miscela, quindi si è potuto valutare la dipendenza della conducibilità idraulica in funzione del livello tensionale di consolidazione imposto. Infine si sono svolte delle prove edometriche per poter valutare la compressibilità e anche la relazione che intercorre fra l'indice dei vuoti e la conducibilità idraulica delle miscele. Al termine di queste analisi, si sono confrontati i dati ricavati con le diverse metodologie con i dati presenti nello stato dell'arte.

### **6.1 Prove in permeametro a parete rigida**

Per questa tipologia di prova è stato testato un provino per ogni miscela analizzata. Ogni campione analizzato presenta una altezza di 25mm e un diametro di 75mm. Prima della fase di prova, ogni campione è stato consolidato ad una tensione efficace di 150KPa. Il processo di flusso è stato instaurato grazie ad una differenza di pressione dell'acqua alla base ed in testa al campione. Per la miscela CB-5-0 è stato scelto un gradiente idraulico pari a 90, imponendo una differenza di pressioni di 20KPa. Per quanto riguarda le miscele CB-4-0 e CB-6-0 si è utilizzato un gradiente idraulico pari a 25, imponendo alla base una pressione di 6 KPa e pari a 0 in testa al campione. Per ricercare la condizione di regime del flusso, si è atteso che il volume d'acqua entrante nel campione, fosse pari al volume d'acqua uscente nello stesso intervallo di tempo. Raggiunta questa condizione è stato possibile ricavare le variazioni di portata nel tempo, con le quali è stato eseguito il calcolo della conducibilità idraulica. Di seguito vengono riportate le curve rappresentanti il flusso d'acqua uscente dai campioni in funzione del tempo:

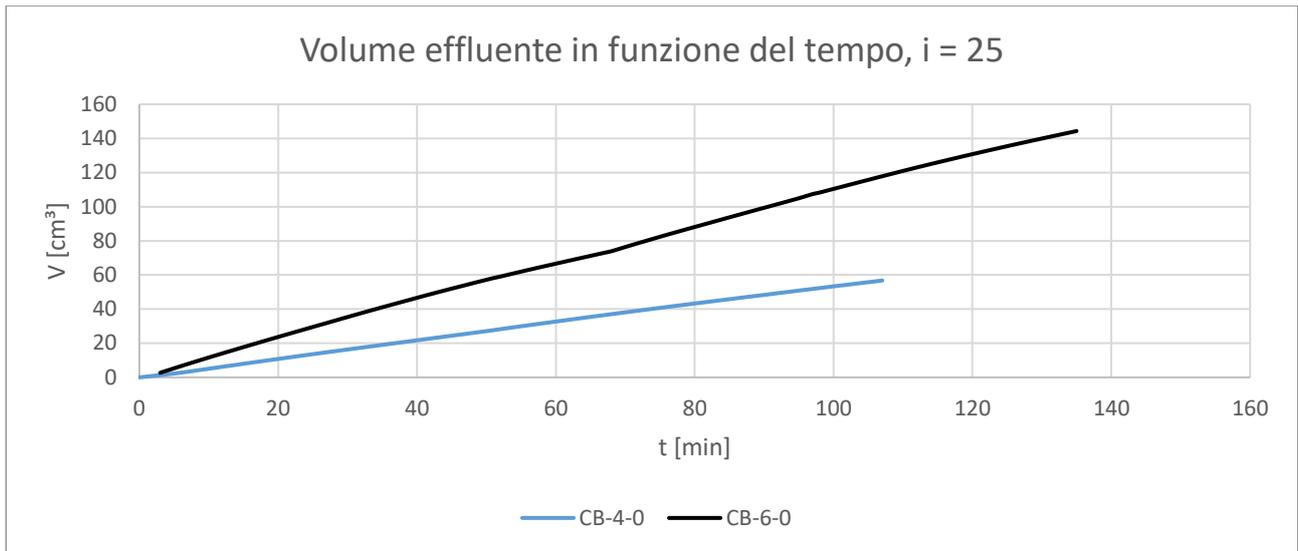


Figura 164. Confronto fra le miscele esaminate, aventi un gradiente idraulico pari a 25.

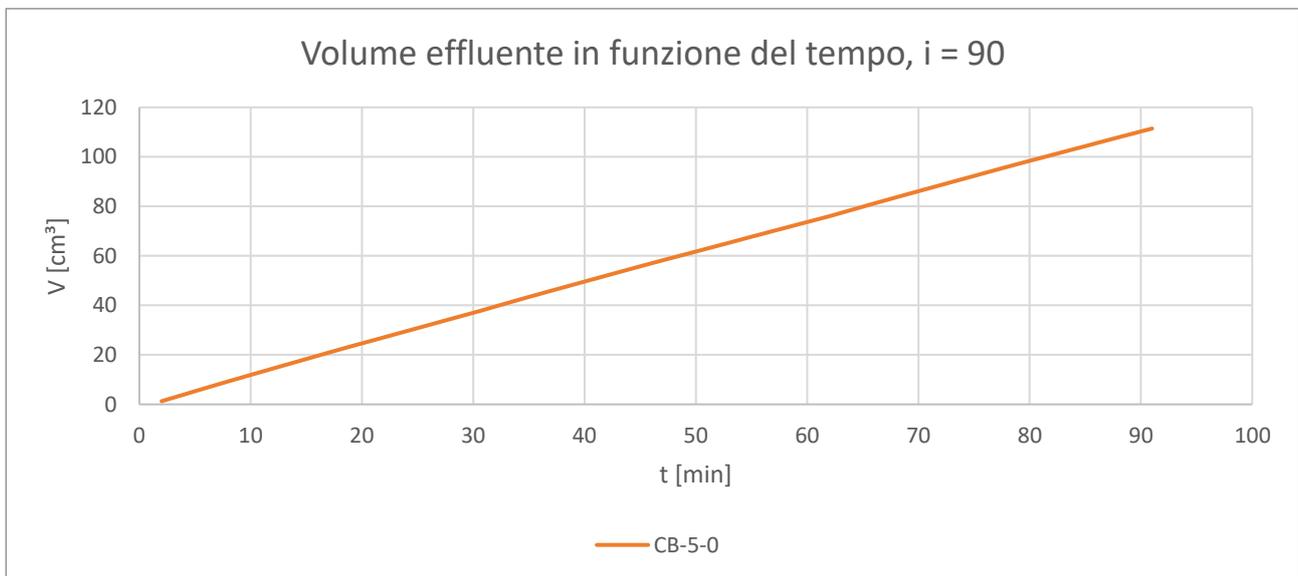


Figura 165. Andamento del volume uscente dal campione nel tempo, mediante l'utilizzo di un gradiente idraulico pari a 90.

Una volta ottenute queste curve, grazie all'Equazione 21, è possibile ricavare la conducibilità idraulica.

Di seguito viene riportato un grafico rappresentante l'andamento della conducibilità idraulica in funzione del tempo per le tre prove effettuate:

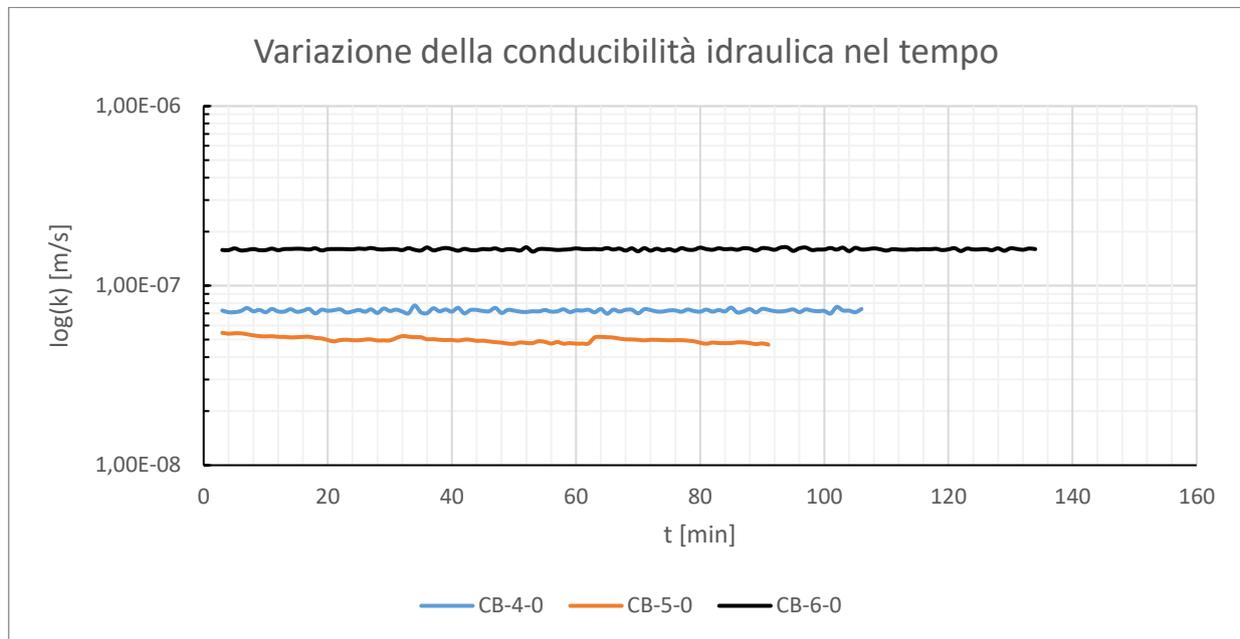


Figura 166. Conducibilità idraulica in funzione del tempo ricavata per mezzo di permeametri a parete rigida.

Le rappresentazioni delle singole prove vengono riportate nelle immagini (Appendice, Fig. 46.), (Appendice, Fig. 47.) e (Appendice, Fig. 48.). Si riporta di seguito una tabella con i valori di conducibilità idraulica ricavati:

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

Tabella 41. Risultati ottenuti mediante i permeametri a parete rigida.

## 6.2 Prove in permeametro a parete flessibile

Anche per questa tipologia di prova è stata effettuata una prova per ogni miscela analizzata. Come per le precedenti prove i campioni sono stati maturati per 28 giorni in acqua distillata. Di seguito è stata controllata la corretta geometria del campione, che prevedeva una altezza di 30mm ed un diametro di 101mm. Prima della permeazione è stata eseguita la saturazione del campione. Tale fase è stata possibile mediante il controllo di B, le modalità di esecuzione di tale esame vengono descritte nel Capitolo 3.1.1.1. Ogni campione è stato consolidato isotropicamente ad una tensione efficace di 150KPa. Le modalità di prova sono analoghe a quelle descritte per il permeametro a pareti rigide, a meno dei gradienti idraulici imposti. A causa di un malfunzionamento del volumometro, che controllava la pressione dell'acqua immessa nel campione non è stato possibile mantenere costante il carico idraulico imposto. In ogni modo, il carico è sempre stato correttamente registrato. Si riporta di seguito una tabella che riassume i gradienti idraulici imposti per ogni prova:

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

Tabella 42. Variazione del gradiente idraulico utilizzato durante la fase di prova.

Di seguito vengono riportate le curve rappresentanti il flusso d'acqua uscente dai campioni in funzione del tempo ed i relativi gradienti idraulici imposti:

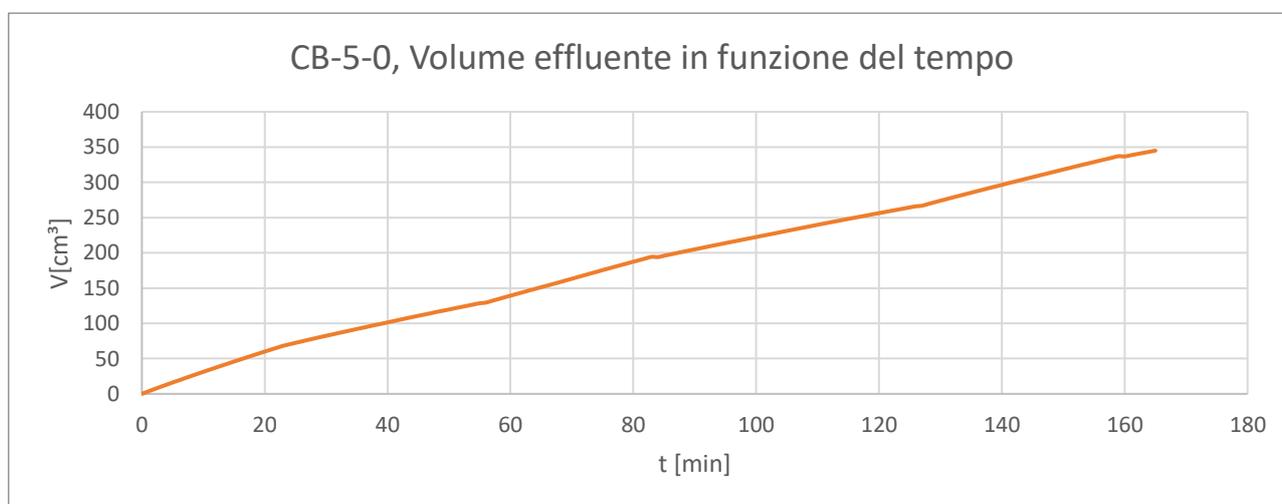


Figura 167. Variazione del volume uscente dal campione in funzione del tempo, CB-5-0.

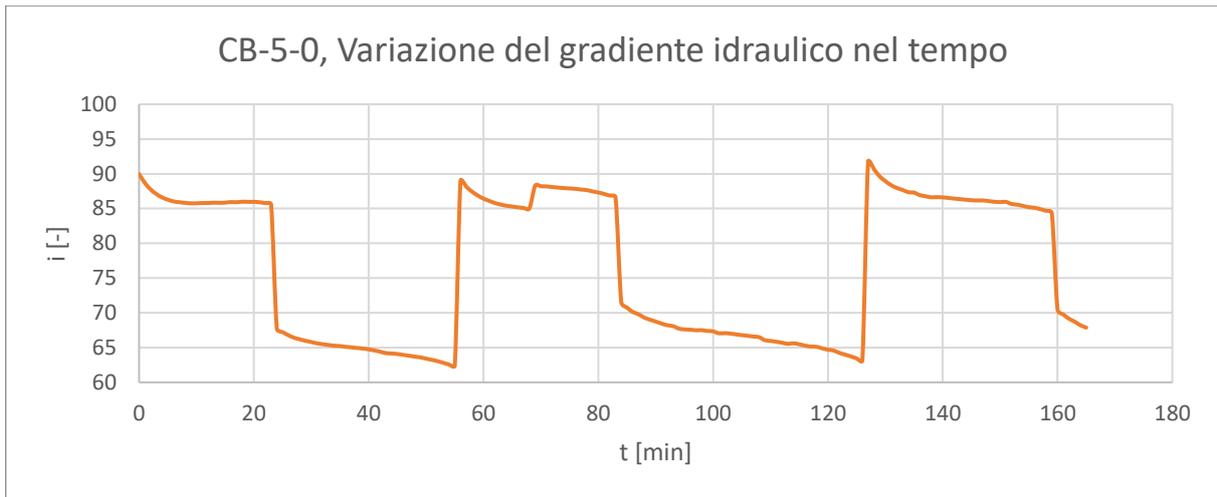


Figura 168. Variazione del gradiente idraulico in funzione del tempo, CB-5-0.

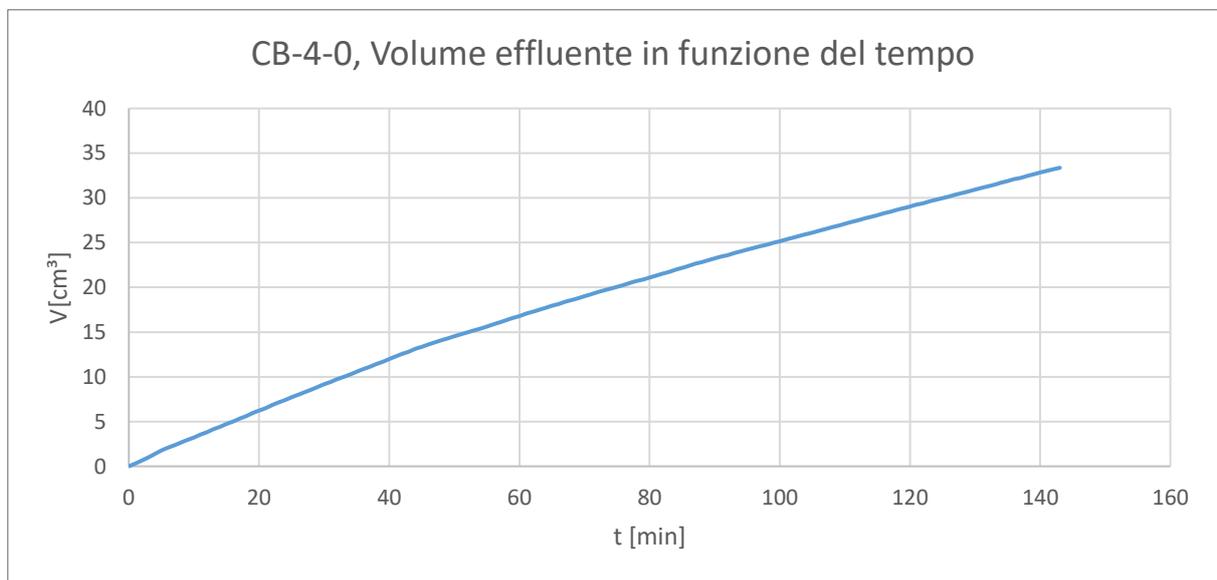


Figura 169. Variazione del volume uscente dal campione in funzione del tempo, CB-4-0.

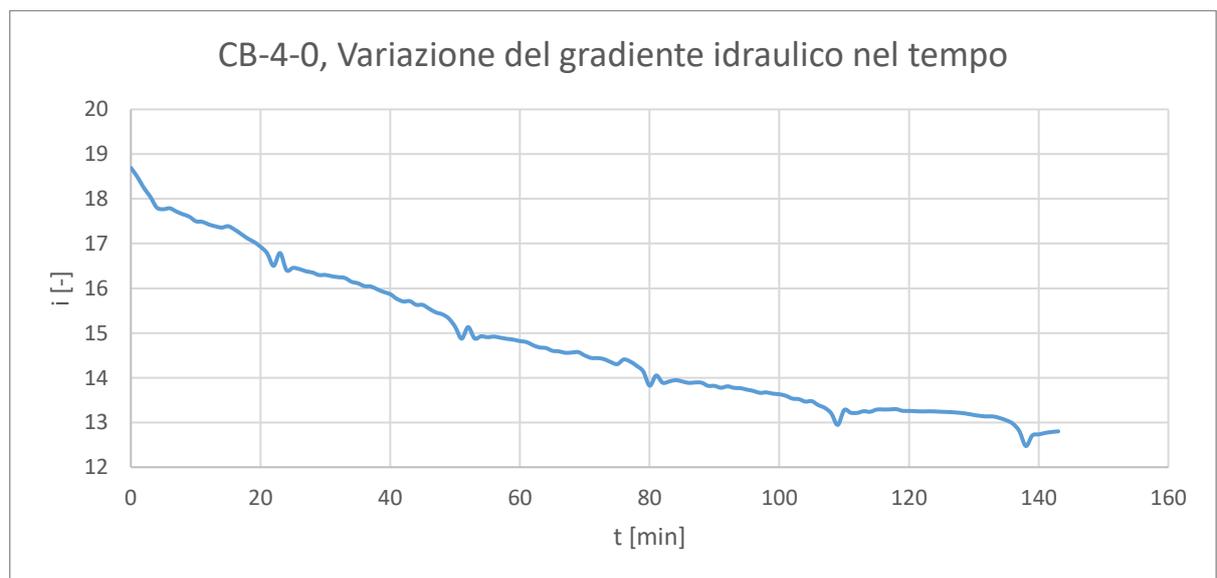


Figura 170. Variazione del gradiente idraulico in funzione del tempo, CB-4-0.

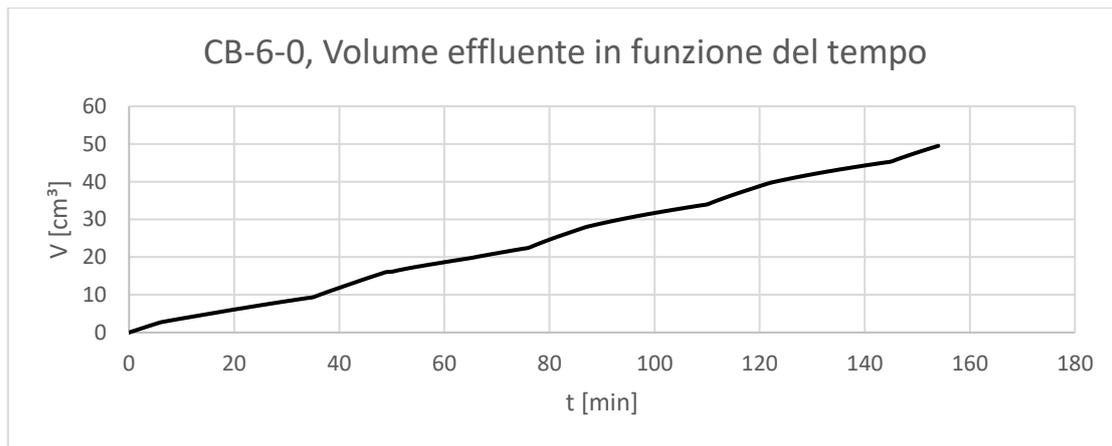


Figura 171. Variazione del volume uscente dal campione in funzione del tempo, CB-6-0.

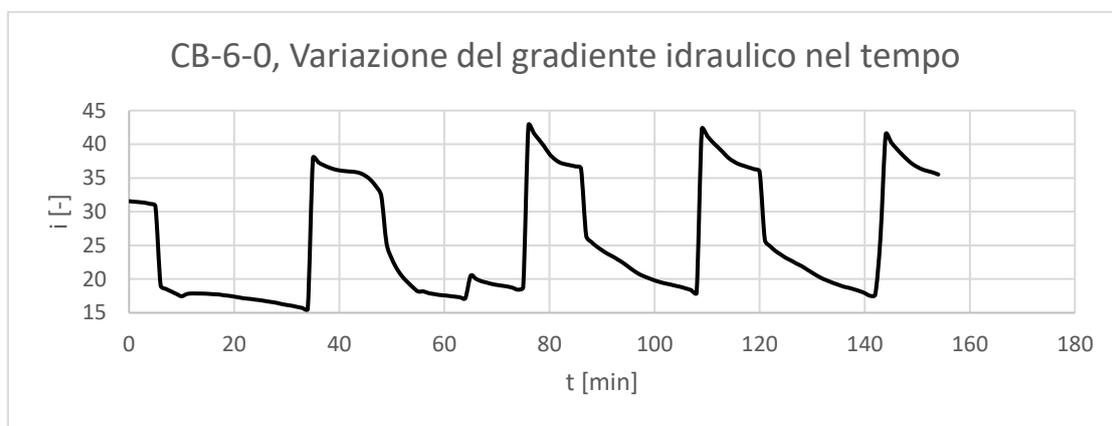


Figura 172. Variazione del gradiente idraulico in funzione del tempo, CB-6-0.

Anche in questo caso si ricorre all'equazione di Darcy per ricavare la conducibilità idraulica del materiale. Di seguito viene riportato un grafico rappresentante l'andamento della conducibilità idraulica in funzione del tempo per le tre prove effettuate:

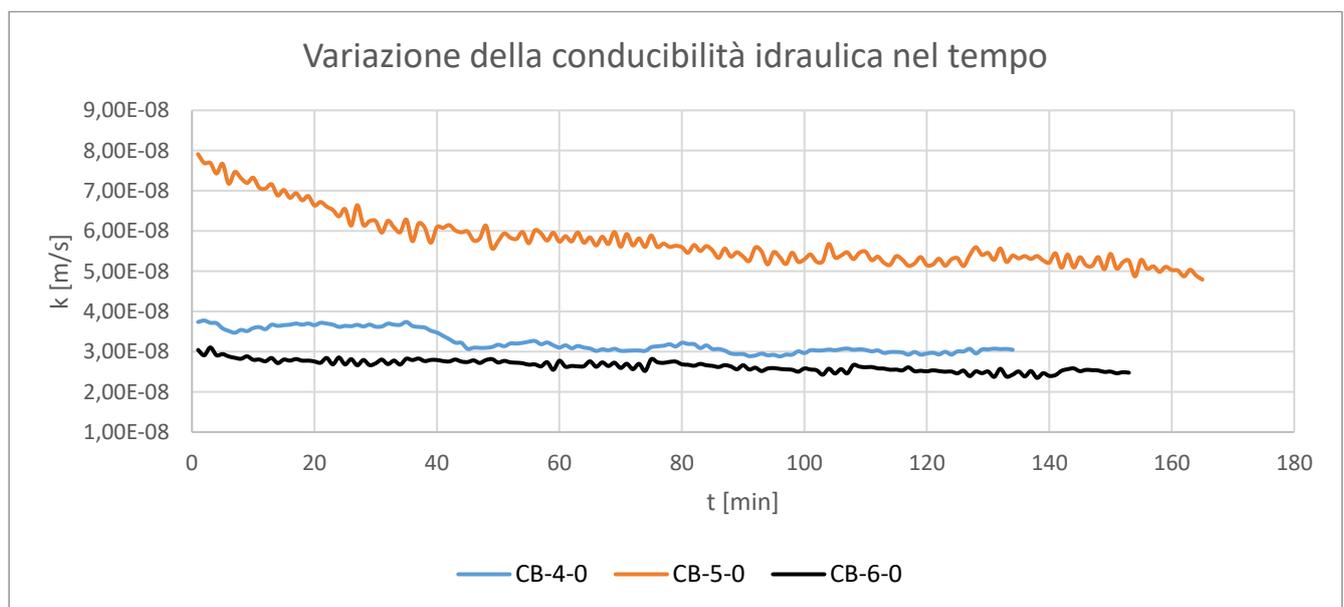


Figura 173. Conducibilità idraulica in funzione del tempo, ricavata per mezzo di permeametri a parete flessibile.

Come si può notare a regime le conducibilità idrauliche dei tre materiali differiscono di un valore massimo pari a  $2E-8$ . Si è ottenuto un comportamento idraulico molto simile, anche se le miscele esaminate sono state preparate mediante quantità di cemento diverse. I singoli grafici riguardante la conducibilità idraulica in funzione del tempo vengono riportati nelle immagini (Appendice, Fig. 49.), (Appendice, Fig. 50.) e (Appendice, Fig. 51.). Si riporta di seguito una tabella con i valori di conducibilità idraulica ricavati da ogni prova:

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

Tabella 43. Risultati ottenuti mediante i permeametri a parete flessibile.

### 6.3 Prove edometriche

Si è eseguita una prova edometrica per ogni tipologia di miscela studiata. Le modalità di prova utilizzate sono descritte nel Capitolo 3.2. Ogni step di carico è stato mantenuto per un periodo di tempo adeguato ad ottenere una completa consolidazione del campione. Le curve di consolidazione/rigonfiamento per ogni singolo step di carico/scarico vengono riportate nelle figure dalla (Appendice, Fig. 52.) alla (Appendice, Fig. 64.) per la miscela CB-5-0, dalla (Appendice, Fig. 65.) alla (Appendice, Fig. 77.) per la miscela CB-4-0 e dalla (Appendice, Fig. 80.) alla (Appendice, Fig. 90.) per la miscela CB-6-0. Di seguito vengono mostrate le curve edometriche dei campioni testati. Le singole curve vengono riportate nelle figure (Appendice, Fig. 91.), (Appendice, Fig. 92.) e (Appendice, Fig. 93.).

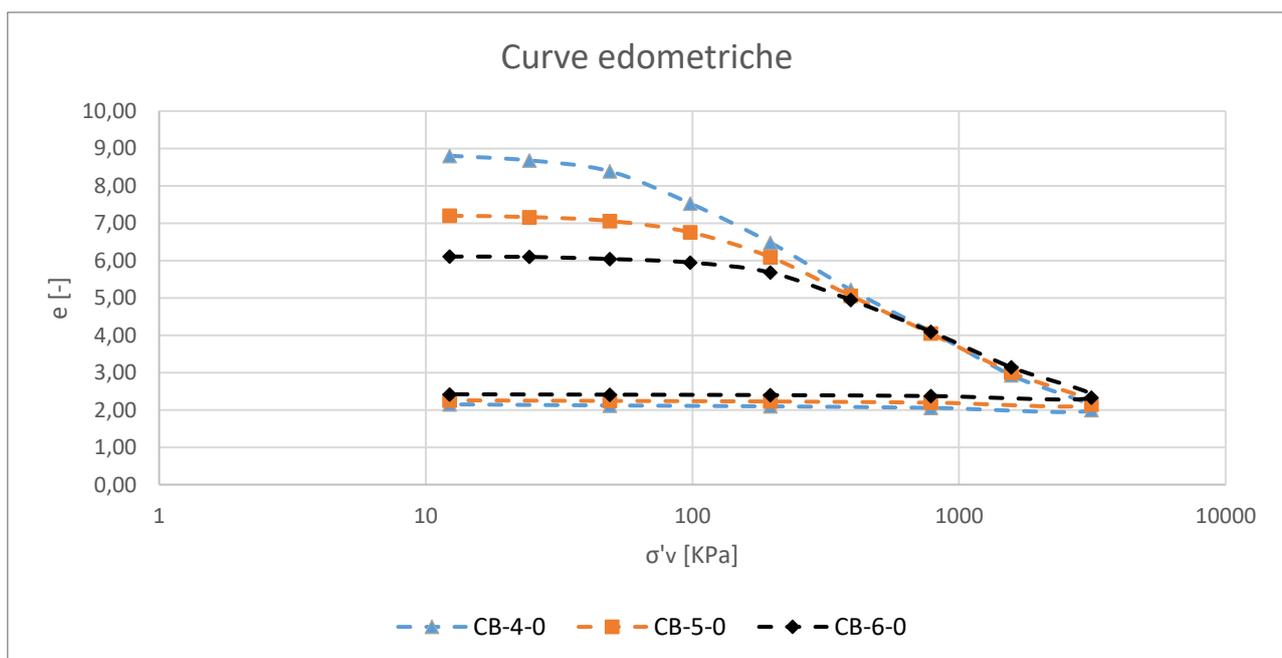


Figura 174. Curve edometriche delle miscele analizzate.

Le miscele mostrano un indice dei vuoti iniziale in funzione del cemento contenuto nella miscela. Tale dipendenza viene a mancare quando si sottopongono i campioni ad una tensione efficace pari a 392,3 KPa. Infatti per tale valore, si può notare una sovrapposizione delle curve edometriche, che indica il medesimo comportamento dei campioni analizzati. Mediante l'utilizzo di queste curve è stato possibile ricavare gli indici di compressione  $C_c$  e di rigonfiamento  $C_s$  come mostrato nel capitolo 3.2.3.2. Si riportano di seguito i valori ricavati:

	<b>CB-4-0</b>	<b>CB-5-0</b>	<b>CB-6-0</b>
<b>Cr</b>	0.12	0.12	1.12
<b>Cc</b>	2.69	3.07	3.28
<b>Cs</b>	0.09	0.09	0.09

*Tabella 44. Valori degli indici di compressibilità e rigonfiamento delle miscele studiate.*

Sono state altresì ricercati i valori di tensione di preconsolidazione dei tre materiali esaminati, si riporta di seguito una tabella riassuntiva di tali quantità:

<b>Miscela</b>	<b><math>\sigma'_p</math> [KPa]</b>
CB-4-0	49,0
CB-5-0	98,1
CB-6-0	196,1

*Tabella 45. Valori delle tensioni di preconsolidazione dei campioni esaminati.*

I dati ricavati mostrano un aumento del valore della tensione di preconsolidazione all'aumentare della quantità di cemento contenuto in miscela.

Per ogni curva di consolidazione è stato ricavata una conducibilità idraulica, utilizzando la teoria esposta nel capitolo 3.2.3.1.

Di seguito viene riportato l'andamento della conducibilità idraulica in funzione del carico applicato ad ogni step di carico:

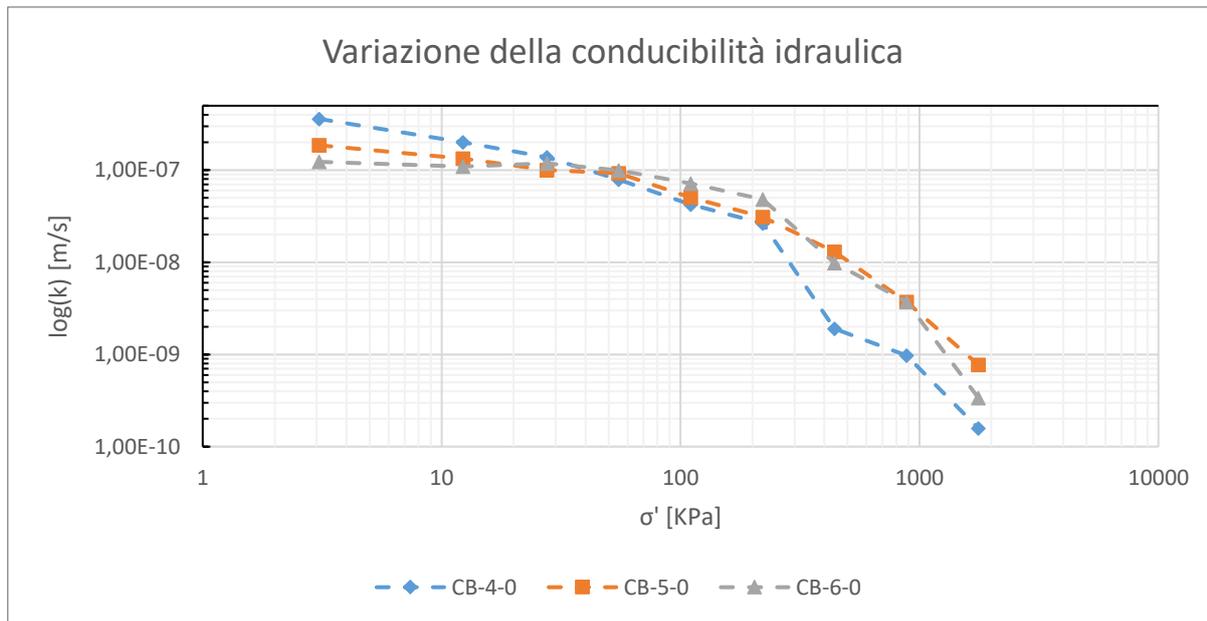


Figura 175. Raffigurazione della dipendenza della conducibilità idraulica dalla tensione di compressione applicata.

Per una maggiore leggibilità dei dati si riportano le curve rappresentanti la conducibilità in funzione dell'indice dei vuoti:

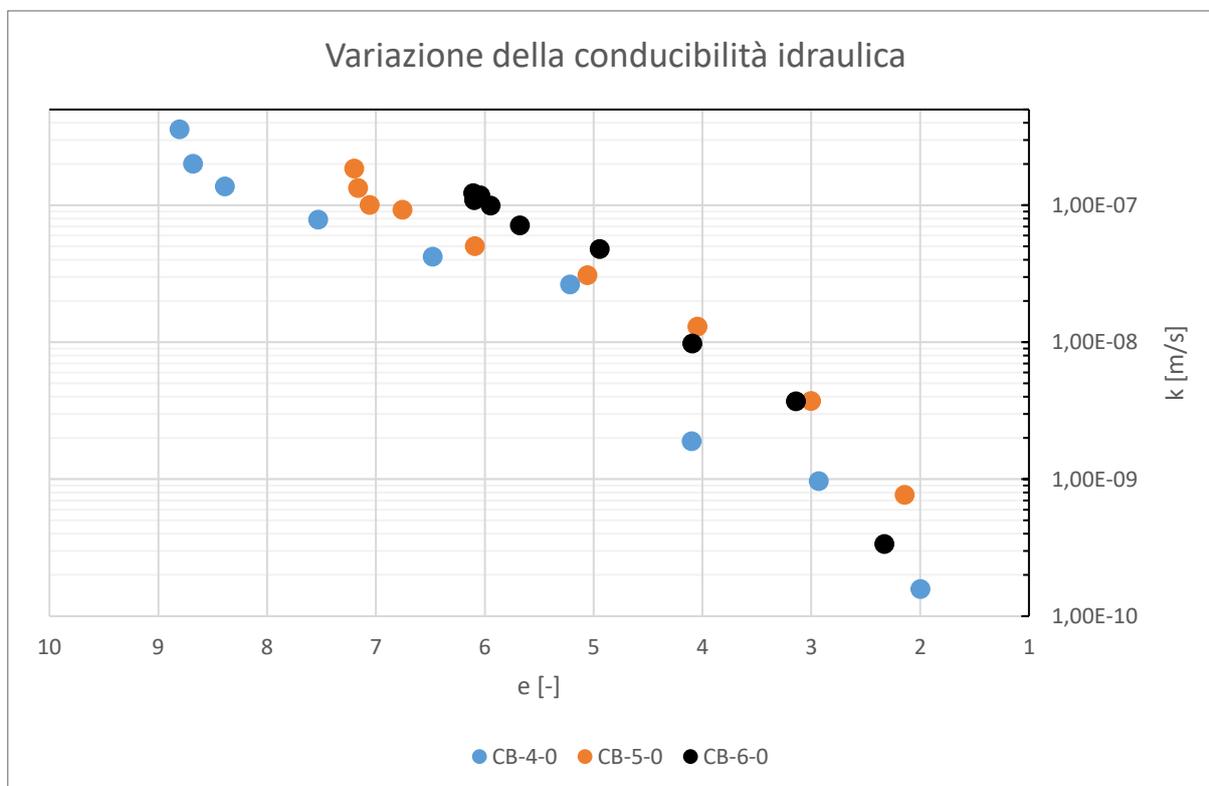


Figura 176. Raffigurazione della dipendenza della conducibilità idraulica dall'indice dei vuoti.

Come si può notare all'aumentare della tensione verticale si ha un abbattimento dell'indice dei vuoti e della conducibilità idraulica. A parità di indice dei vuoti per le tre miscele si può notare una diminuzione della conducibilità idraulica al diminuire del cemento presente in miscela. Assegnata una tensione efficace maggiore o uguale a 392,3 KPa si riscontrano medesimi valori di conducibilità idraulica e indici dei vuoti per tutti campioni analizzati. Tale fenomeno è dovuto al fatto che una volta mandata a rottura la matrice solida del materiale, tutte le miscele espongono lo stesso comportamento. Si riportano in seguito i dati ricavati dalle prove edometriche:

CB-4-0			CB-5-0			CB-6-0		
$\sigma'$ [Kpa]	e [-]	k [m/s]	$\sigma'$ [Kpa]	e [-]	k [m/s]	$\sigma'$ [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 46. Valori della conducibilità idraulica ed indice dei vuoti ad ogni step di carico per le miscele analizzate.

## 6.4 Prove triassiali

Un indicazione di massima della conducibilità idraulica delle miscele è stata ricavata dall'analisi dei tempi di consolidazione nelle prove triassiali, utilizzando le relazioni introdotte nel capitolo 3.1.2. Di seguito è riportato un grafico rappresentante i risultati in termini di conducibilità idraulica-tensione di consolidazione imposta al campione:

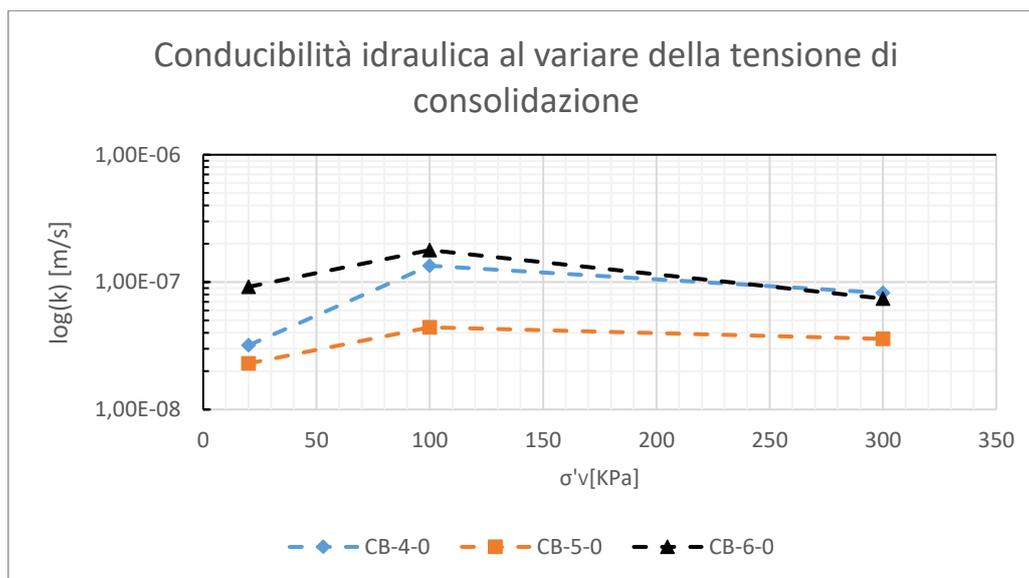


Figura 177. Variazione della conducibilità idraulica in funzione della tensione di consolidazione.

I risultati sembrano suggerire, per tutte e tre le miscele, un aumento di conducibilità idraulica passando da una tensione di consolidazione di 20 a 100 KPa, tuttavia questo fenomeno è possibile che dipenda dalla difficile interpretazione dei dati riguardanti la consolidazione dei campioni a tensioni efficaci di 20 KPa. A tensioni efficaci maggiori corrisponde una diminuzione dell'indice dei vuoti più marcata, che determina una diminuzione della conducibilità idraulica. La miscela CB-5-0 presenta una conducibilità idraulica sempre minore rispetto alle altre miscele esaminate, indipendentemente dalla tensione di consolidazione a cui è stata sottoposta. La conducibilità idraulica della miscela CB-4-0 mostra una più forte variazione al variare del livello tensione applicato, mentre la conducibilità idraulica della miscela CB-6-0 subisce piccole variazioni per tensioni di consolidazione analoghe. I grafici rappresentanti le curve di consolidazione, con la presenza delle rette con le quali si sono calcolati i  $t_{100}$ , sono riportate nelle figure (Appendice, Fig.94.), (Appendice, Fig.95.), (Appendice, Fig.96.), (Appendice, Fig.97.), (Appendice, Fig.98.),

(Appendice, Fig.99.), (Appendice, Fig.100.), (Appendice, Fig.101.) e (Appendice, Fig. 102.). Di seguito viene presentata una tabella riassuntiva dei valori di conducibilità idraulica ricavati:

Miscela	Confinamento [KPa]	k [m/s]
CB-4-0	20	3.2E-08
	100	1.3E-07
	300	8.2E-08
CB-5-0	20	2.3E-08
	100	4.4E-08
	300	3.6E-08
CB-6-0	20	9.2E-08
	100	1.8E-07
	300	7.4E-08

Tabella 47. Conducibilità idraulica in funzione della tensione di consolidazione.

## 6.5 Confronto dei risultati ottenuti

Di seguito vengono riportati i risultati recepiti da campioni consolidati mediante una tensione efficace di 150 KPa. Le conducibilità idraulica sono state ricavate mediante edometri e permeametri a pareti rigide e flessibili, i risultati vengono esposti in termini di conducibilità idraulica-indice dei vuoti:

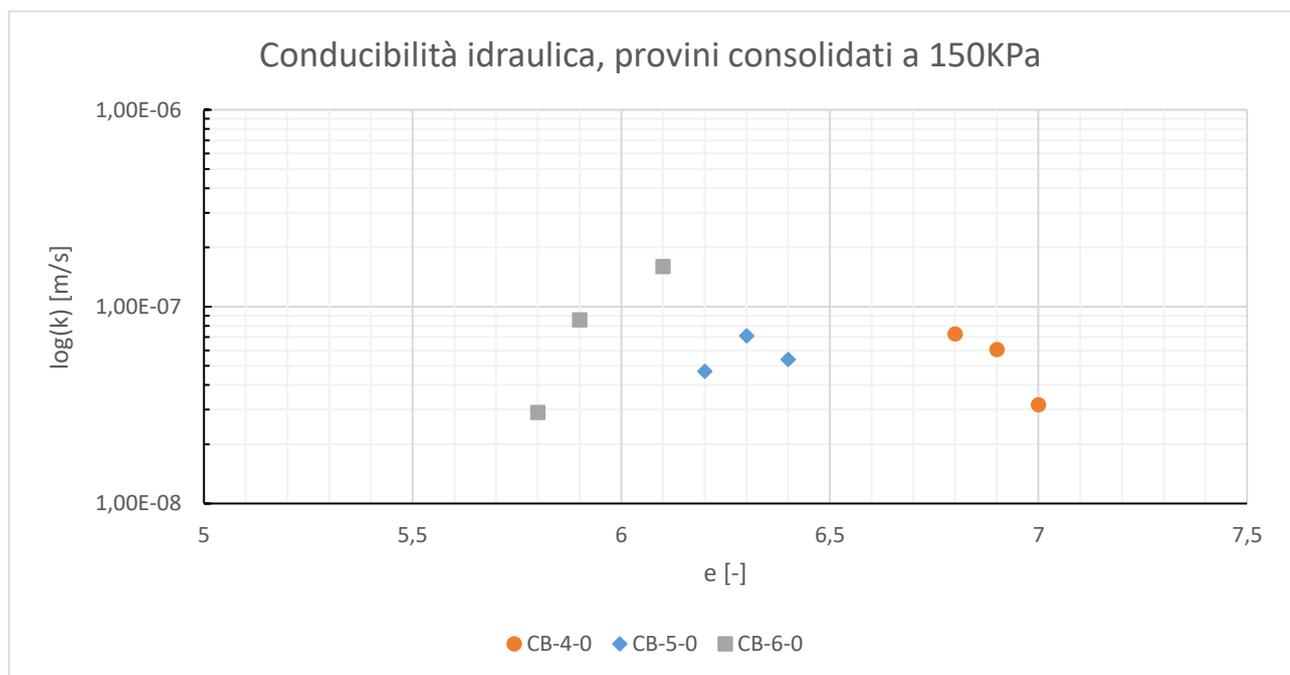


Figura 178. Valori di conducibilità idraulica ricavati mediante edometri e permeametri.

Come si può notare le conducibilità idraulica ottenute per una maturazione di 28 giorni dei campioni sono circa le medesime per le tre miscele analizzate. La variazione di conducibilità idraulica varia tra  $3E-8$  e  $9E-8$  [m/s], entrambi gli estremi vengono ricavati per la miscela CB-6-0. Non è stato preso in considerazione il valore di conducibilità idraulica più alto ottenuto per la miscela CB-6-0, in quanto si sospetta un errore di misura della conducibilità idraulica. Mediante questi dati si evince che la quantità di cemento in miscela, per una maturazione di 28 giorni, non ha una grande influenza sulla conducibilità idraulica del materiale finale per prove condotte a parità di stato tensionale. L'indice dei vuoti è fortemente influenzato dalla quantità di legante presente in miscela. Questo valore assume valori di 7 e 5,8 rispettivamente per le miscele CB-4-0 e CB-6-0, quindi si assiste ad un decremento di 'e' all'aumentare della quantità di cemento in miscela.

Andando ad analizzare la variabilità della conducibilità idraulica in funzione della metodologia di prova utilizzata per il suo calcolo, si può riscontrare una fluttuazione dei valori ottenuti legata all'attrezzatura utilizzata.

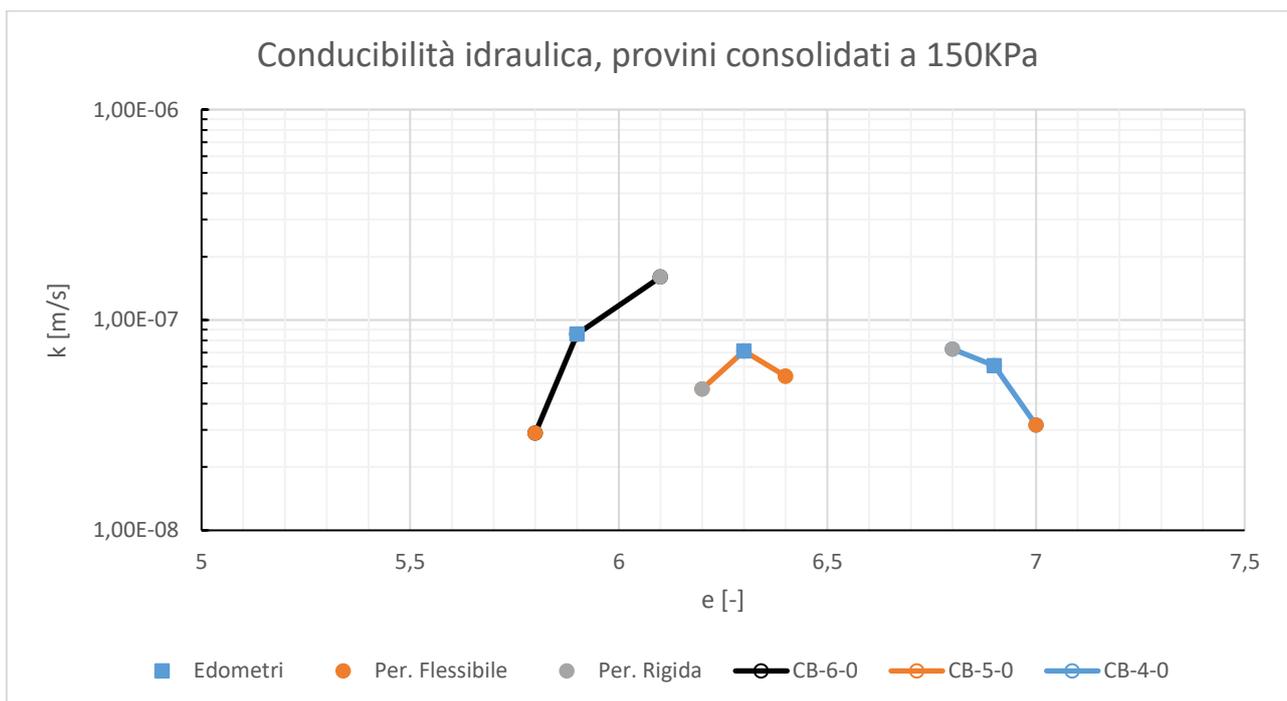


Figura 179. Variazione del valore di conducibilità in funzione della prova utilizzata.

La conducibilità idraulica misurata nel permeametro a parete flessibile è ritenuta la più affidabile rispetto alle altre tipologie di prova, in quanto meno soggetta ad errori di misura o d'interpretazione dei dati. La miscela CB-5-0 ha una piccola variazione del valore di conducibilità idraulica dovuta alla modalità di prova utilizzata, infatti il valore registrato utilizzando l'edometro o i permeametri

risulta essere contenuto nell'intervallo  $5E-8 \pm 2E-8$  [m/s]. Per quanto riguarda le miscele CB-4-0 e CB-6-0 si riscontra una variazione più marcata a seconda della tipologia di prova utilizzata, ma comunque in un range relativamente ristretto, avente come estremi  $6E-8 \pm 4E-8$  [m/s].

Andando a diagrammare i risultati ottenuti in funzione del contenuto di cemento in miscela si può notare come in termine di conducibilità idraulica, per 28 giorni di maturazione, non è presente una marcata variazione. I punti con conducibilità idraulica più elevata di ogni miscela sono stati ricavati attraverso le prove triassiali. Di seguito viene mostrato il grafico rappresentante i risultati ricavati:

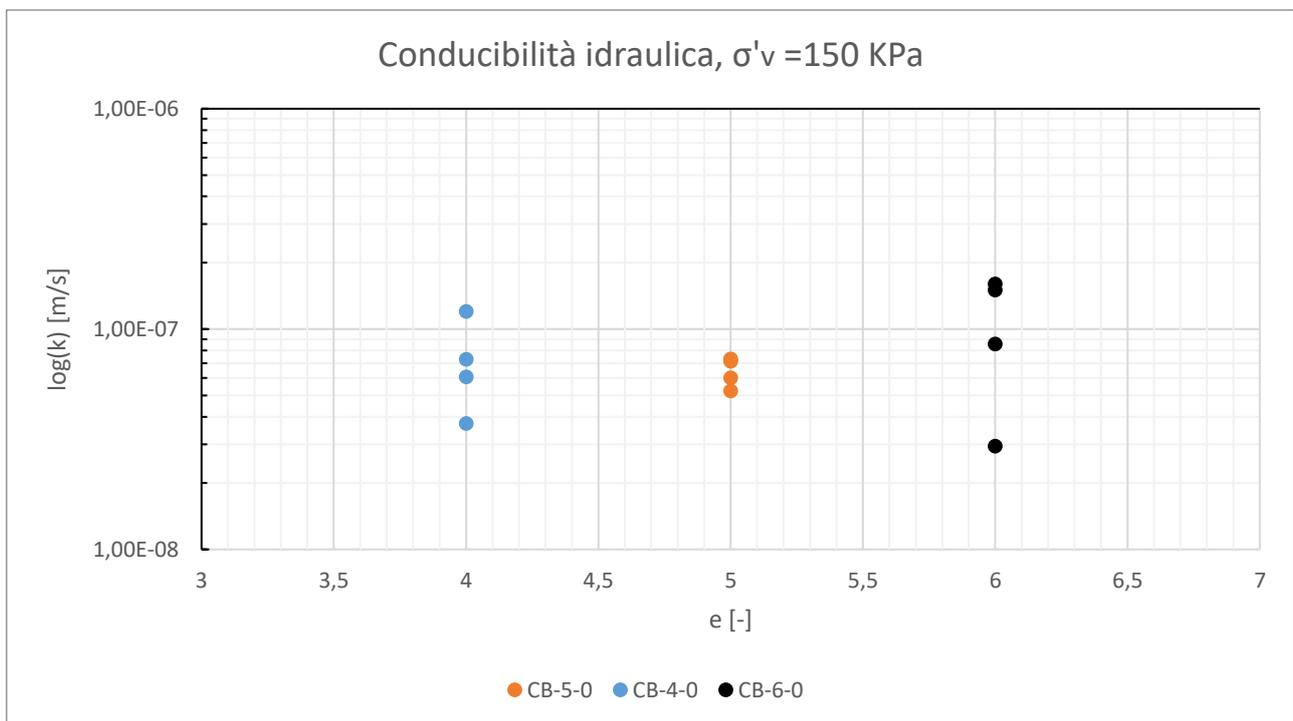


Figura 180. Calcolo della conducibilità idraulica attraverso prove triassiali, edometriche e permeametri.

Un'ulteriore rappresentazione dei dati ricavati può essere effettuata andando a valutare la variazione della conducibilità idraulica al variare della tensione di consolidazione applicata al campione.

Di seguito vengono riportati i tre grafici rappresentanti le variazioni di  $k$  all'aumentare della tensione di consolidazione:

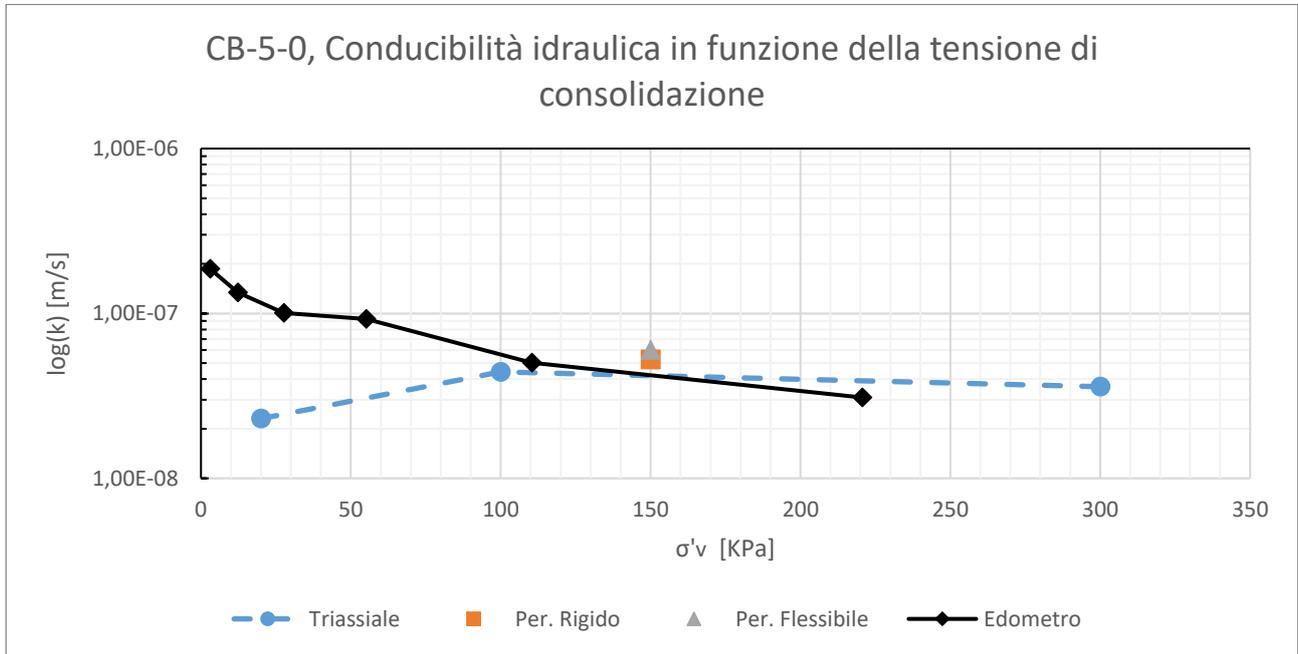


Figura 181. Variazione della conducibilità idraulica in funzione della tensione di consolidazione, CB-5-0.

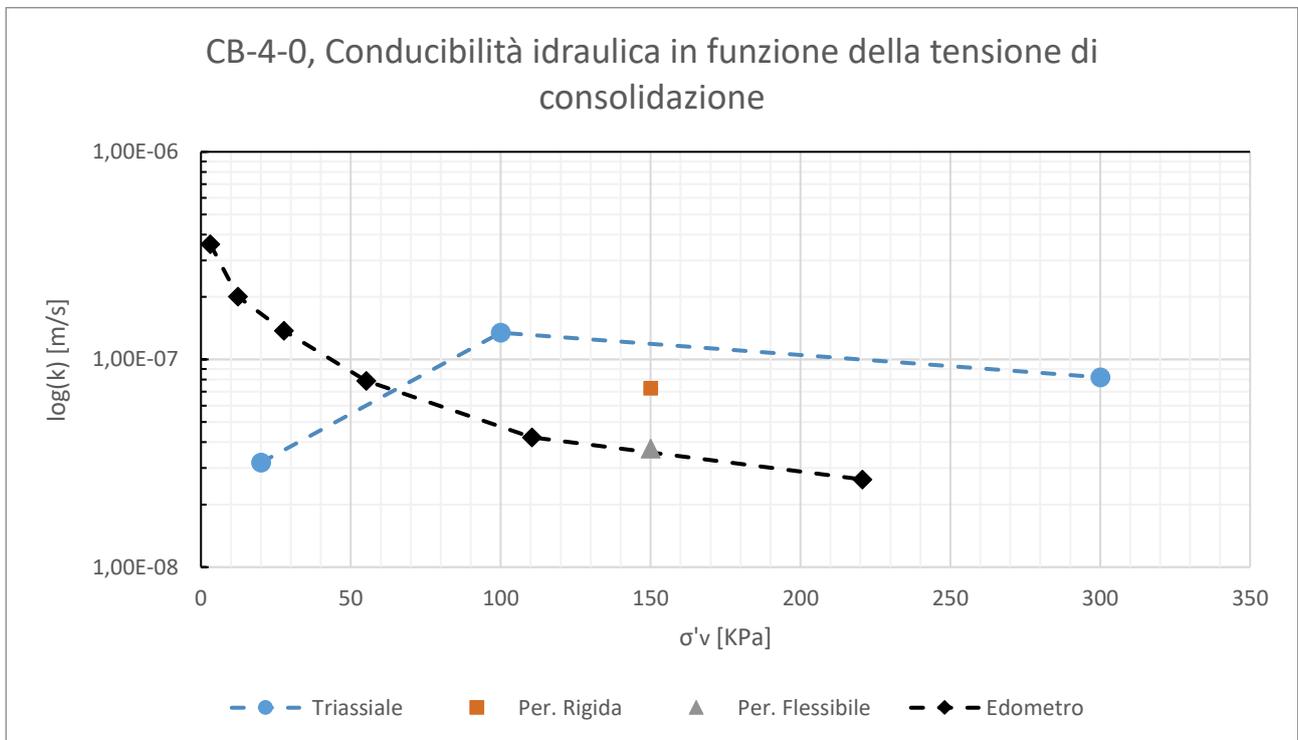


Figura 182. Variazione della conducibilità idraulica in funzione della tensione di consolidazione, CB-4-0.

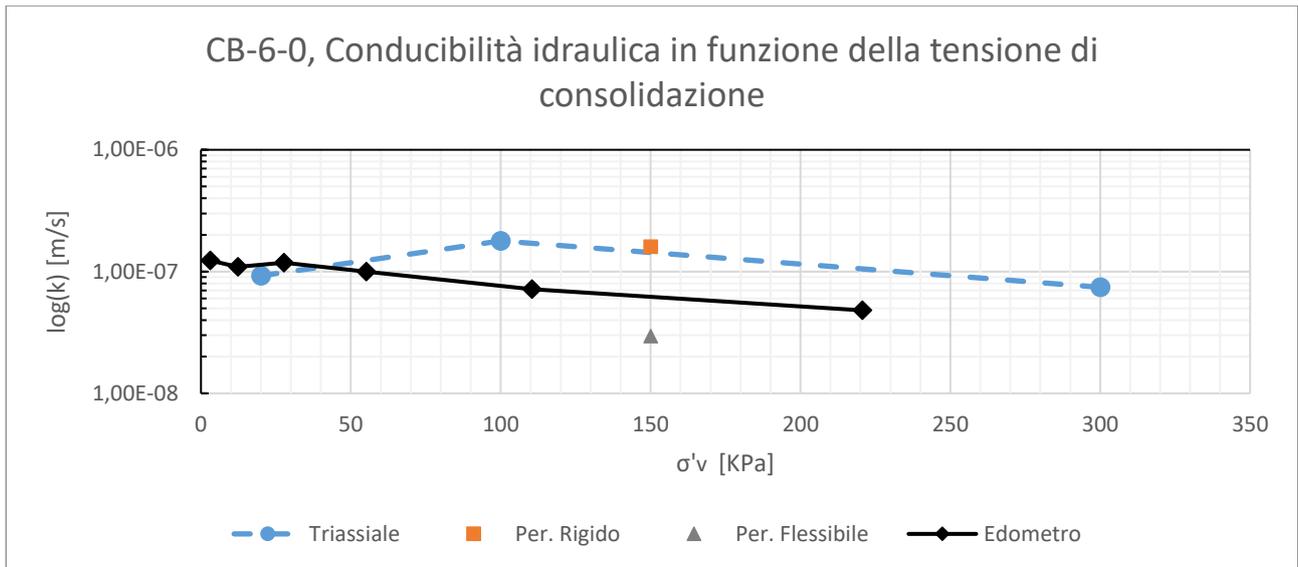


Figura 183. Variazione della conducibilità idraulica in funzione della tensione di consolidazione, CB-6-0.

Tutte le miscele mostrano un trend discendente della conducibilità idraulica all'aumentare della tensione di consolidazione applicata.

Di seguito è mostrato un confronto tra i risultati ottenuti in questa tesi e quelli presentati da Evans e Opdyke (2005), Fratolocchi et al. (2005) e Veràstegui et al. (2013).

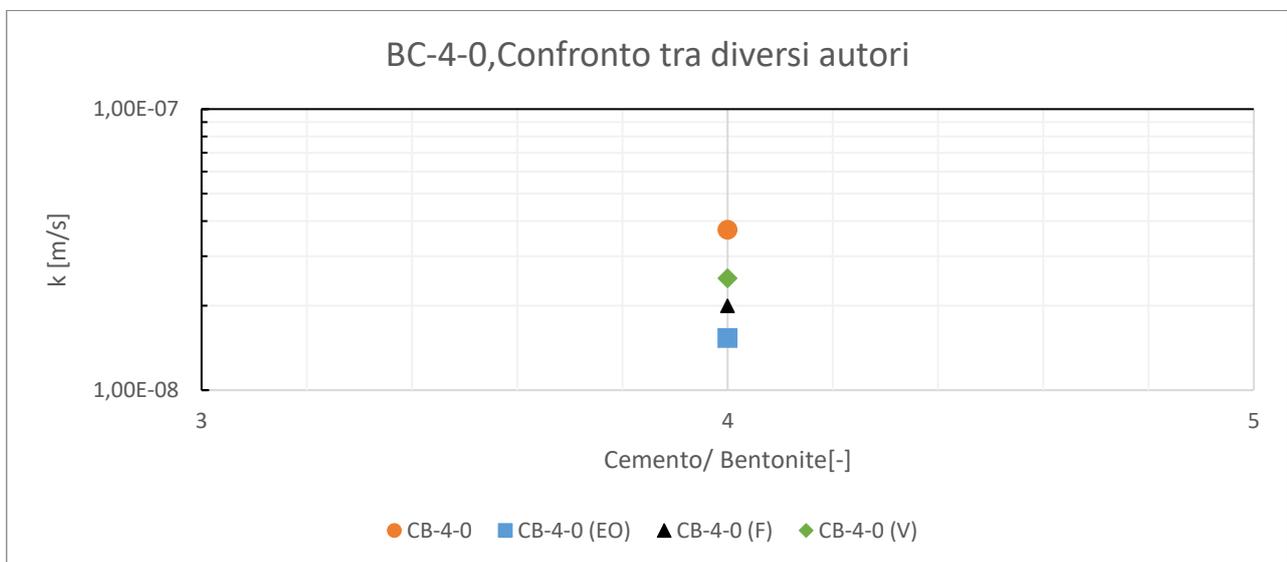


Figura 184. Confronto tra i risultati ottenuti in questo studio e quelli presenti in letteratura.

Come si può notare tutti i valori ricavati presentano il medesimo ordine di grandezza di quelli esposti in letteratura, a meno di un valore calcolato attraverso la fase di consolidazione di una prova triassiale, che riscontra un valore più alto. Il valore di conducibilità idraulica registrato attraverso il permeametro a pareti flessibili è quasi il medesimo che quello calcolato dagli altri autori, mentre per le altre metodologie di prova si ha una variazione maggiore.

## **7. Analisi mediante il microscopio elettronico, SEM, e maturazione in olio di paraffina**

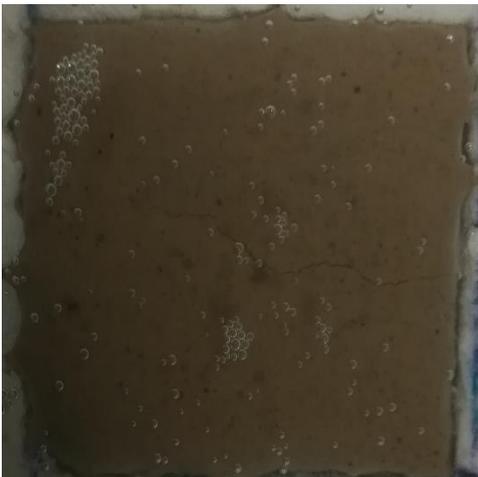
### **7.1 Analisi mediante SEM**

Per studiare al meglio la composizione interna dei materiali trattati in questa tesi, si sono eseguite delle analisi mediante il microscopio a scansione elettronica SEM. Le suddette sono state effettuate presso la facoltà di geologia dell'Università di Torino e con l'ausilio del Professor Emanuele Costa.

### **7.2 Maturazione in olio di paraffina**

E' stata eseguita una maturazione delle tre miscele analizzate in olio di vasellina. Tale studio è stato condotto per verificare dal punto di vista visivo gli effetti della stagionatura del materiale immerso in un idrocarburo. Si riportano di seguito le fotografie a 7 e 28 giorni di maturazione delle tre miscele:

CB-4-0:



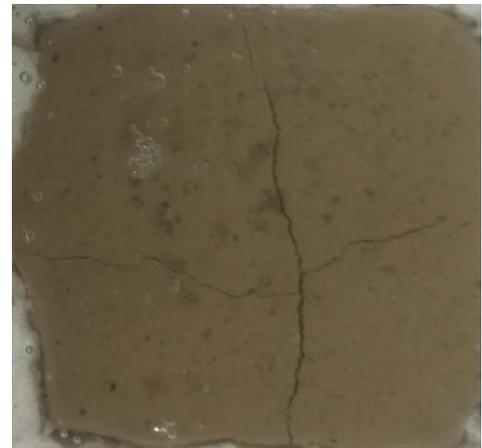
*Figura 185. Maturazione della miscela CB-4-0 a 7 e 28 giorni.*

CB-5-0:



*Figura 186. Maturazione della miscela CB-5-0 a 7 e 28 giorni.*

CB-6-0:



*Figura 187. Maturazione della miscela CB-6-0 a 7 e 28 giorni.*

Come si evince dalle immagini dopo sette giorni di maturazione si ha la presenza di uno stato fessurativo proporzionale alla presenza di cemento in miscela. Tale fenomeno è dovuto alle reazioni di idratazione del cemento, che provocano uno stato tensionale dovuto alla contrazione del materiale. Non si registra un notevole cambiamento di tale stato passando da 7 a 28 giorni di curing.

## 8. Conclusioni

La presente tesi ha avuto come oggetto lo studio del comportamento idraulico e meccanico di tre miscele formate da cemento, bentonite ed acqua.

Si è investigato come la percentuale di cemento presente in miscela, influisca sul comportamento mostrato dal materiale assoggettato a carichi verticali o a permeazione da parte di acqua distillata.

La sperimentazione su tali materiali, è stata eseguita presso il Laboratorio di Geotecnica del (DISEG) Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica del Politecnico di Torino; attraverso lo studio della conducibilità idraulica e dei parametri meccanici dei materiali analizzati.

Parallelamente si è eseguita una caratterizzazione mediante un'analisi al microscopio a scansione elettronica (SEM), realizzata presso la Facoltà di Geologia dell'Università di Torino.

Le tre miscele analizzate differiscono per la quantità di cemento che contengono. La miscela CB-4-0 contiene un rapporto Cemento/Bentonite di 4 a 1, la CB-5-0 un rapporto di 5 a 1 e la CB-6-0 un rapporto di 6 a 1. La maturazione del materiale è stata effettuata all'interno di vasche di maturazione per mezzo di acqua distillata. La fase di stagionatura è avvenuta per un periodo di 28 giorni per tutti i campioni testati, al fine di rimuovere la variabilità data dal tempo delle caratteristiche idro-meccaniche.

E' stata eseguita un'analisi preliminare delle miscele analizzate, andando a valutare i valori di massa specifica relativa ( $G_s$ ), l'indice dei vuoti iniziale ( $e_0$ ) e la variazione di resistenza alla penetrazione ( $R_p$ ). Mediante tali analisi è stato possibile ricavare il legame che intercorre tra tali valori e la quantità di cemento contenuta nei materiali. Il valore dell'indice dei vuoti iniziale vede una forte diminuzione passando dalla miscela CB-4-0 alla CB-6-0, in quanto, l'aumento di cemento contenuto della miscela, si riflette in una diminuzione dei pori contenuti nel materiale. Anche la resistenza alla penetrazione aumenta all'aumentare della quantità di legante, tale fenomeno è dovuto ad una maggior densità dello scheletro solido formato dal cemento. Mentre il valore di massa specifica relativa vede una diminuzione al crescere della percentuale di cemento contenuta nelle miscele.

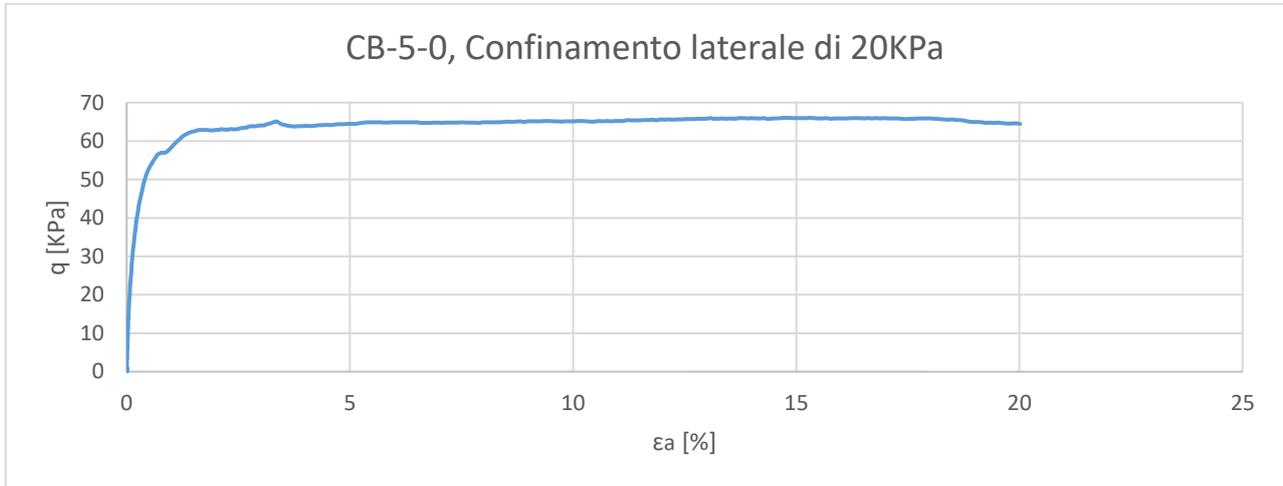
Lo studio delle caratteristiche meccaniche è avvenuto per mezzo di prove triassiali ed edometriche. I risultati ottenuti mostrano un decremento dell'angolo d'attrito di picco del materiale al crescere della quantità di cemento presente in miscela, ma al contempo si ha un aumento della coesione. Durante la fase di rottura dei campioni mediante le prove triassiali, per bassi confinamenti radiali, si è registrata una dipendenza della tensione deviatorica di picco dalla quantità di cemento. Al

crescere della quantità di cemento si assiste ad un aumento di tale valore. Ma andando ad aumentare il confinamento, si ha un annullamento della dipendenza. Il valore di deformazione a snervamento nelle miscele CB-4-0 e CB-5-0 aumenta all'aumentare del confinamento radiale, mentre per la miscela CB-6-0 si assiste ad un decremento di tale valore al crescere della tensione radiale. Gli indici ricavati dalle curve edometriche, indicano il medesimo comportamento dei materiali in fase di ricomprensione e di rigonfiamento. Mentre in fase di compressione, al diminuire del cemento presente in miscela, si assiste ad un aumento dei cedimenti registrati.

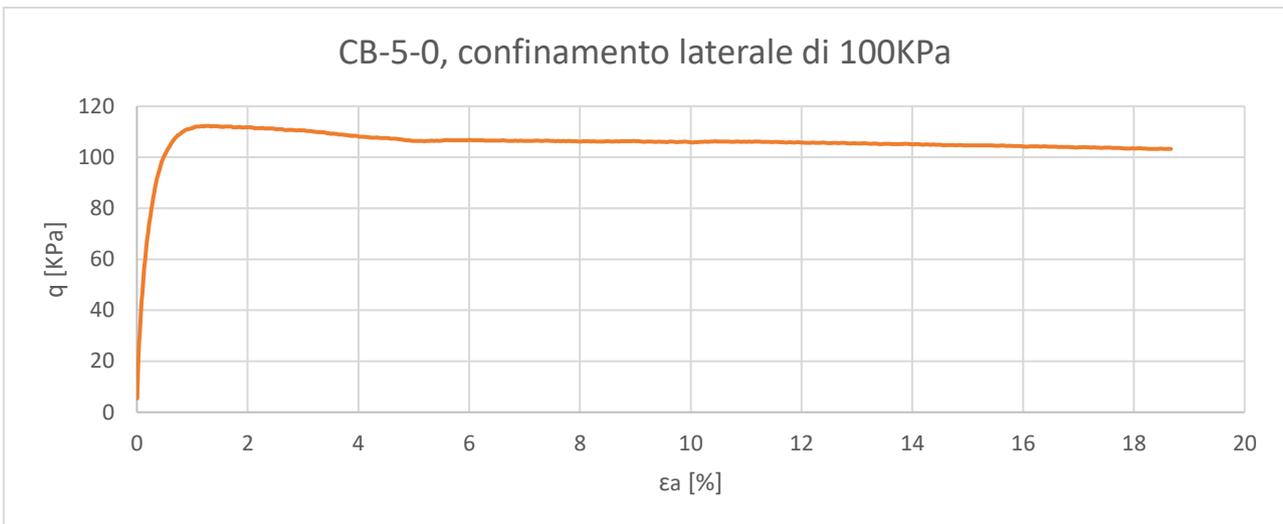
Lo studio riguardante le caratteristiche idrauliche è stato condotto mediante l'esecuzione di prove di conducibilità in permeametri a pareti flessibili e rigide ed in edometri. A tali risultati sono stati affiancati i valori di conducibilità idraulica ricavati dalla fase di consolidazione delle prove triassiali, tali valori risultano essere puramente indicativi dell'ordine di grandezza della quantità indagata. I risultati registrati dai permeametri a pareti flessibili, mostrano che dopo una maturazione di 28 giorni, le conducibilità delle tre miscele sono circa le medesime, escludendo una dipendenza di tale valore dal quantitativo di cemento utilizzato. Tale prova è ritenuta la più affidabile in quanto meno soggetta ad errori di misura o inesattezze di interpretazione dei dati. I valori ottenuti tramite questa prova risultano essere in linea con i dati esposti da Evans e Opdyke (2005), Fratolocchi et al. (2005) e Veràstegui et al. (2013). Le analisi effettuate mediante i permeametri a parete rigida mostrano mediamente dei valori di conducibilità più alta di quelli registrati con i permeametri a parete flessibile, tale fenomeno potrebbe essere dovuto all'istaurarsi di un moto di filtrazione tra le pareti del campione e le pareti interne dell'anello di contenimento. Mediante l'interpretazione dei tempi di consolidazione delle prove edometriche si è potuto valutare l'andamento della conducibilità idraulica in funzione dell'indice dei vuoti del materiale. Tali risultati mostrano un comportamento comune a tutte le miscele, che vede una diminuzione dell'indice dei vuoti e della conducibilità idraulica all'aumento della tensione di consolidazione applicata. Si può altresì notare un legame tra la quantità di cemento presente in miscela e la conducibilità idraulica. In quanto, a parità di indice dei vuoti, la miscela CB-4-0 mostra sempre una conducibilità idraulica minore delle altre. Questo fenomeno si accentua per carichi verticali superiori a 392,3 [KPa].

Dai dati registrati in questo studio, si può affermare come l'aumento di cemento presente in miscela, per un invecchiamento di 28 giorni, si riflette in un aumento della coesione del materiale e della tensione deviatorica di snervamento. A discapito dell'angolo d'attrito di picco e della deformazione a snervamento, che vedono una diminuzione. Per le variazioni di cemento presente nelle miscele indagate, ed un tempo di maturazione di 28 giorni, non si registrano grandi differenze in termini di conducibilità idraulica del materiale finale.

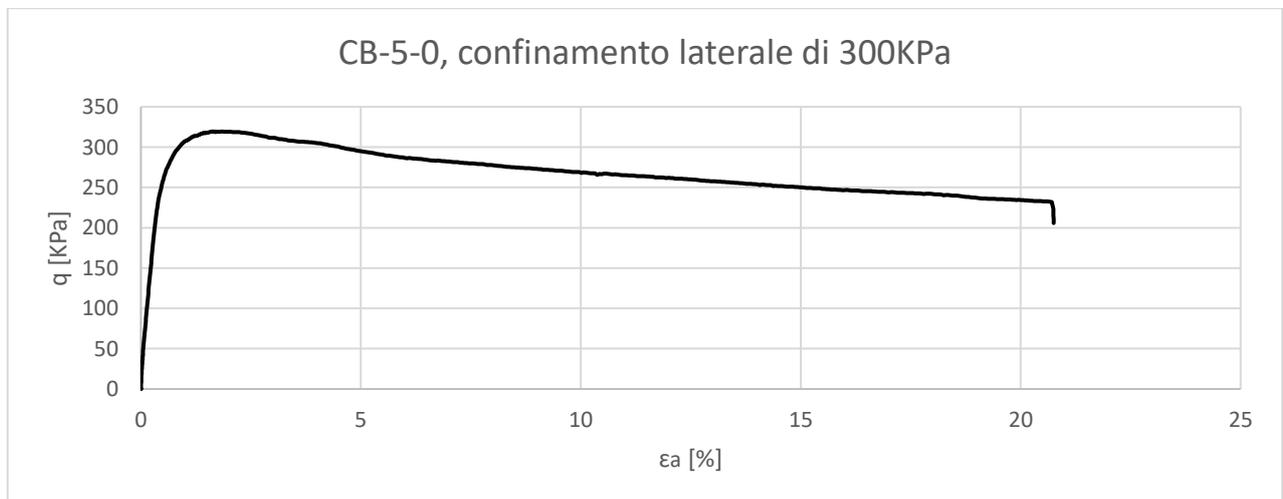
## Appendice figure



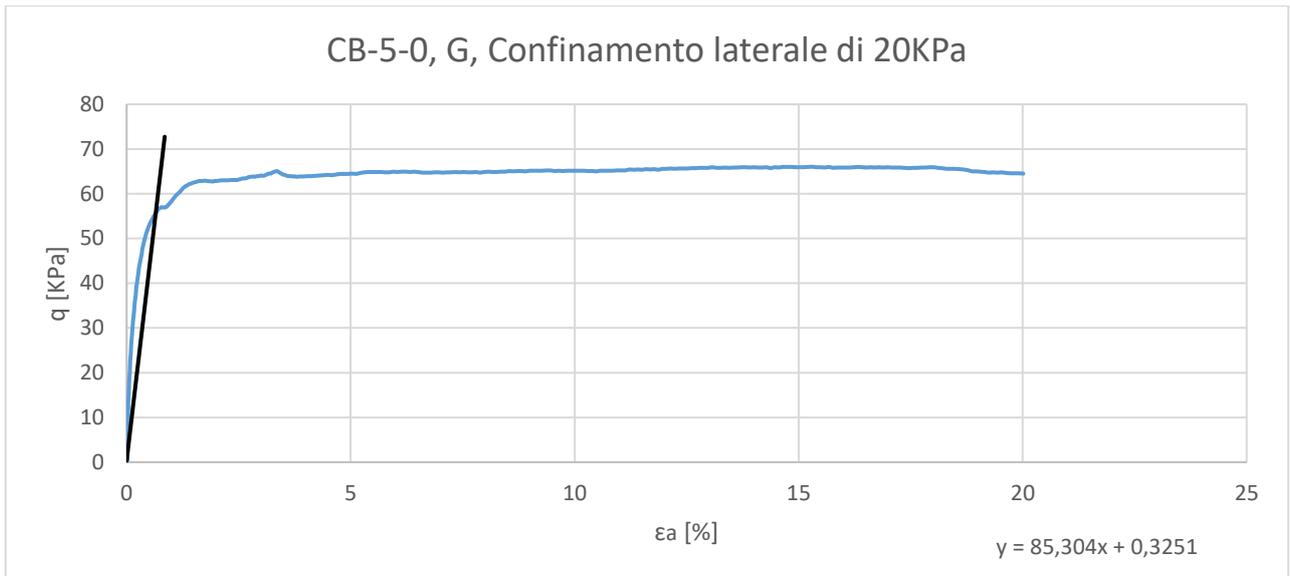
Appendice, Fig. 1. Grafico della fase di rottura della miscela CB-5-0, con confinamento di 20KPa.



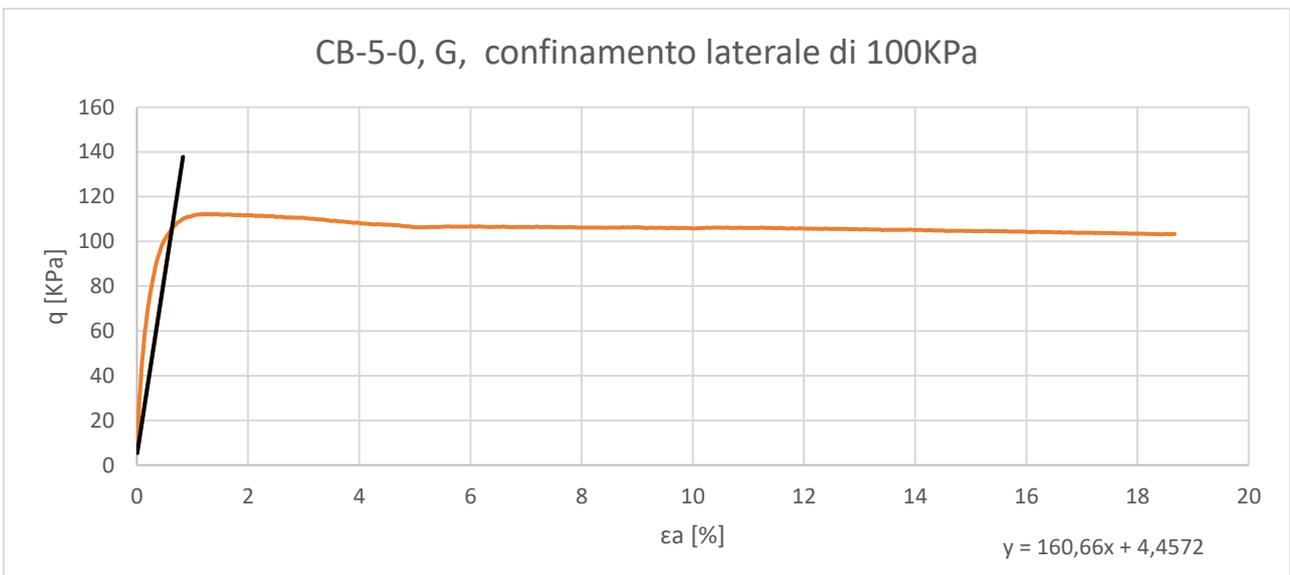
Appendice, Fig. 2. Grafico della fase di rottura della miscela CB-5-0, con confinamento di 100KPa.



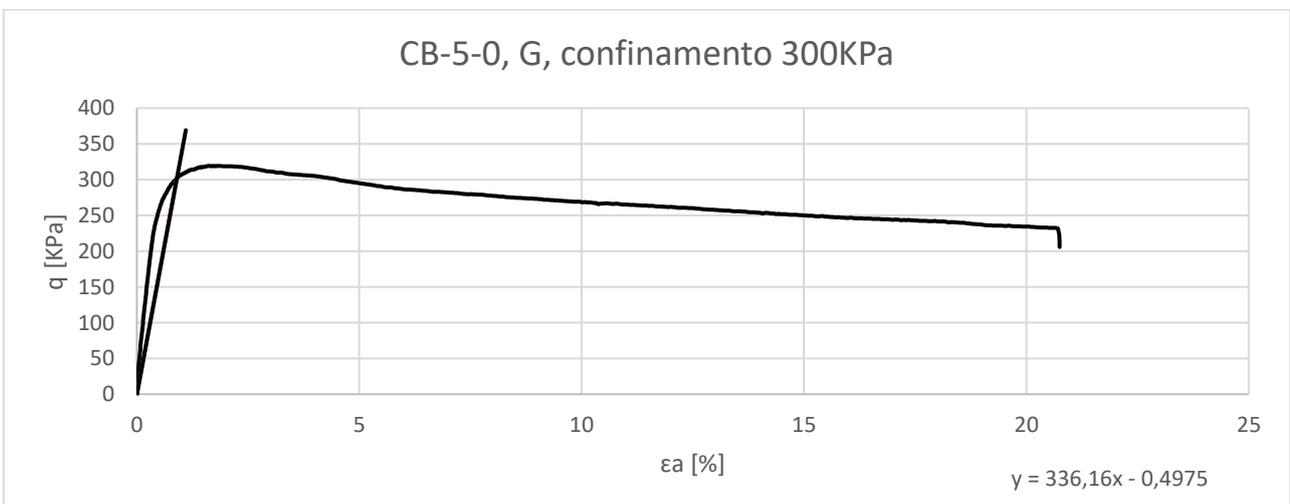
Appendice, Fig. 3. Grafico della fase di rottura della miscela CB-5-0, con confinamento di 300KPa.



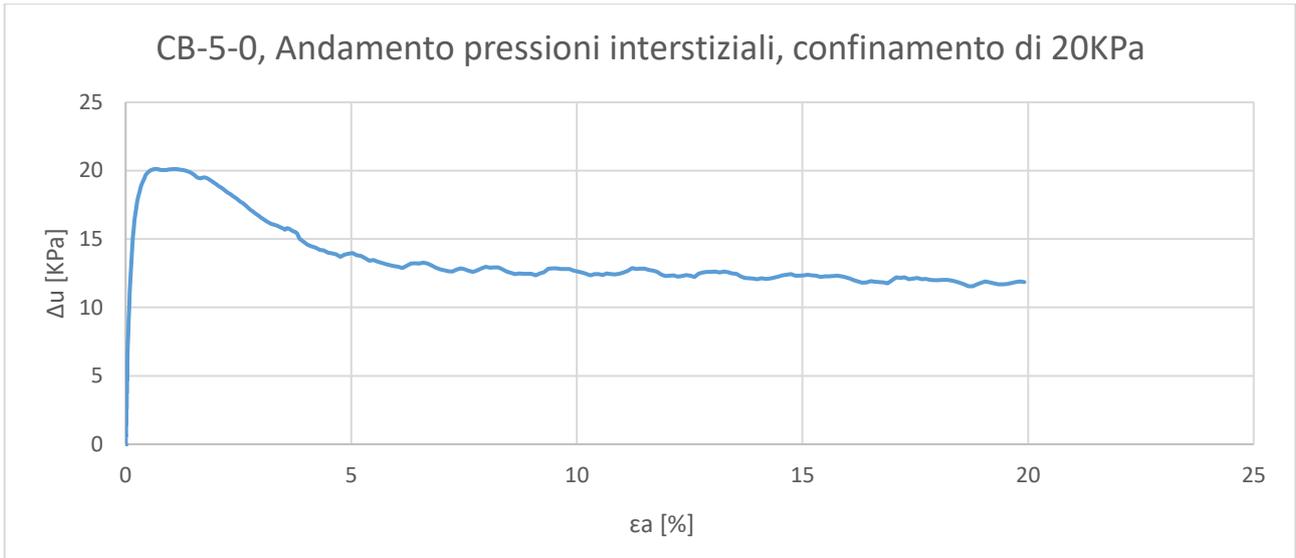
*Appendice, Fig. 4. Ricerca del modulo di taglio per la miscela CB-5-0 (20 KPa).*



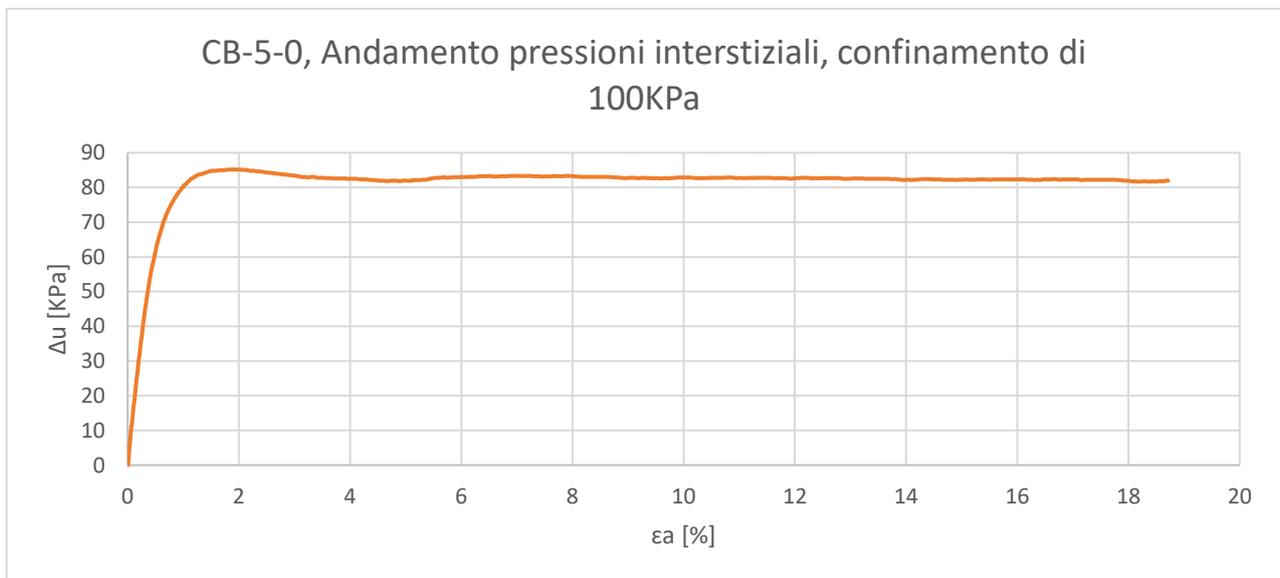
*Appendice, Fig. 5. Ricerca del modulo di taglio per la miscela CB-5-0 (100 KPa).*



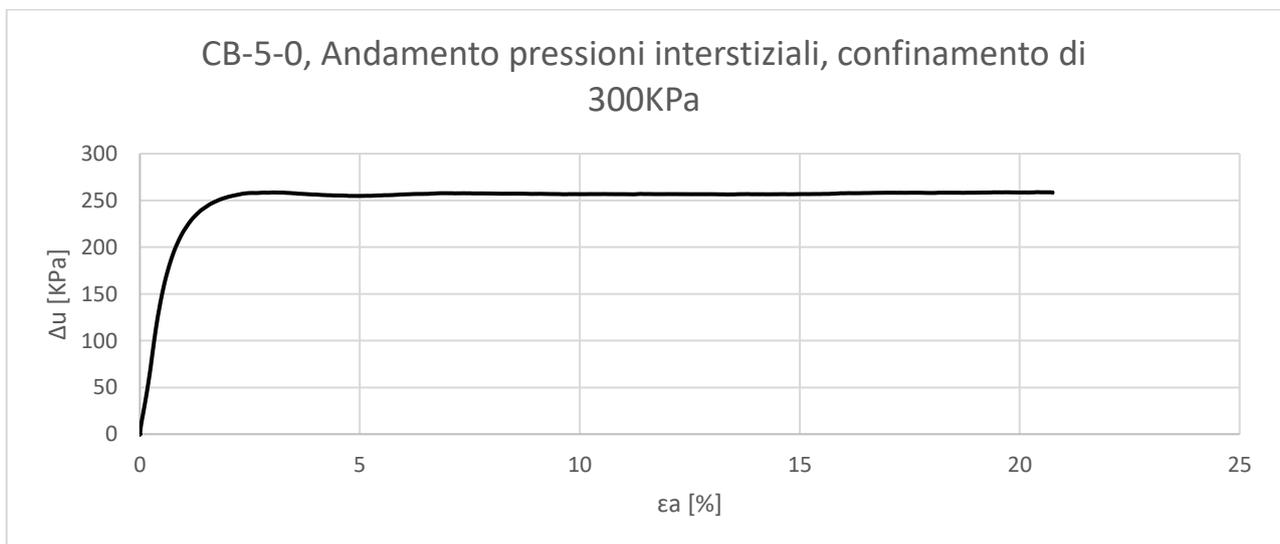
*Appendice, Fig. 6. Ricerca del modulo di taglio per la miscela CB-5-0 (300 KPa).*



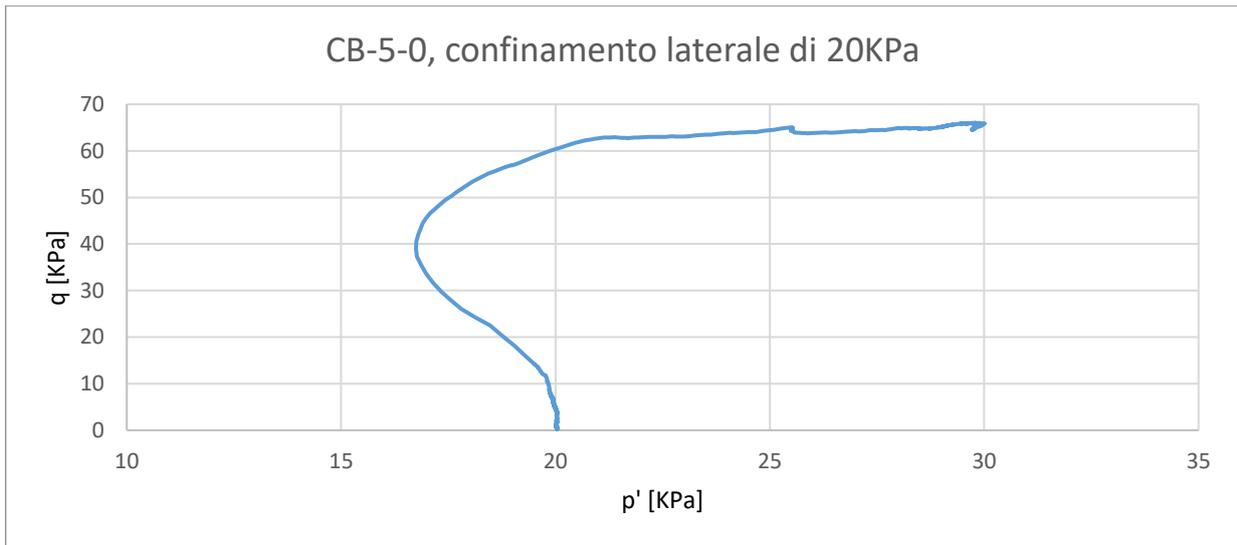
Appendice, Fig. 7. Grafico della variazione della pressione interstiziale della miscela CB-5-0, con confinamento di 20KPa.



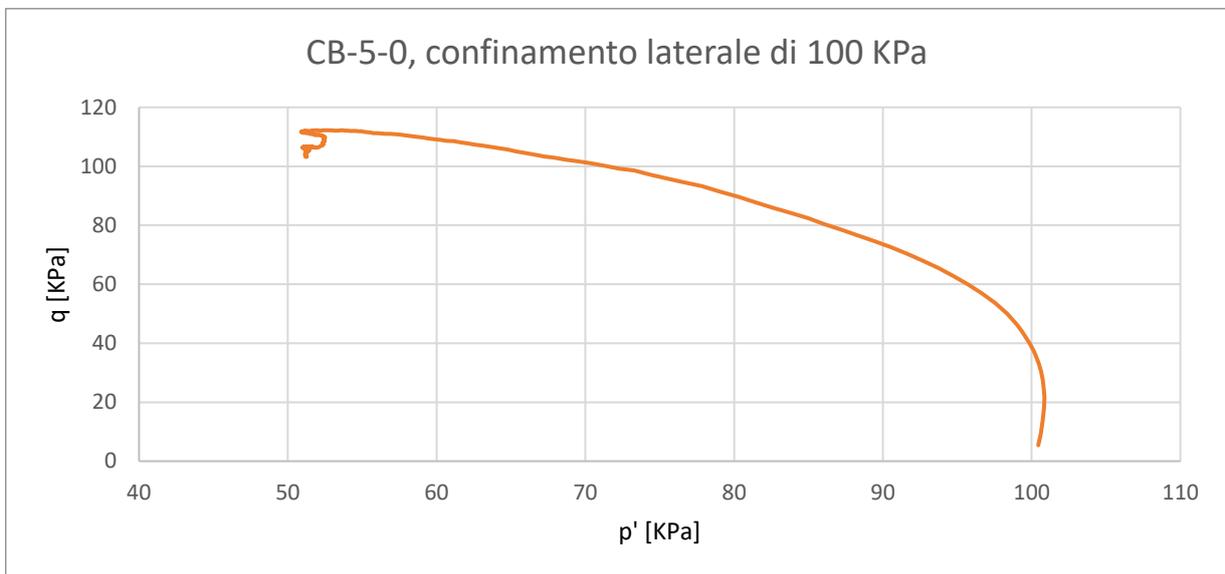
Appendice, Fig. 8. Grafico della variazione della pressione interstiziale della miscela CB-5-0, con confinamento di 100KPa.



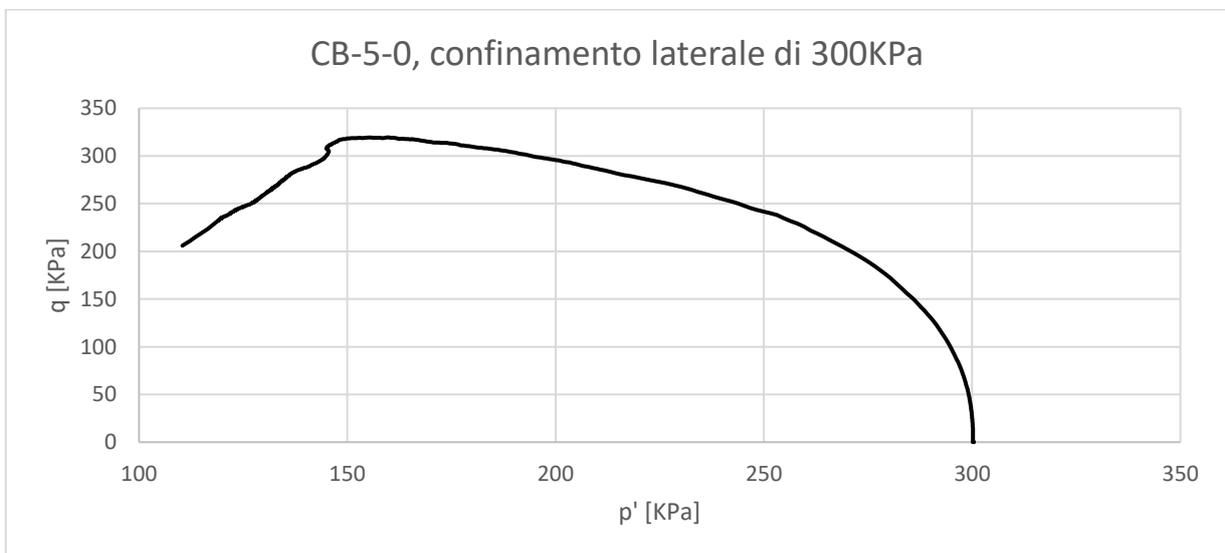
Appendice, Fig. 9. Grafico della variazione della pressione interstiziale della miscela CB-5-0, con confinamento di 300KPa.



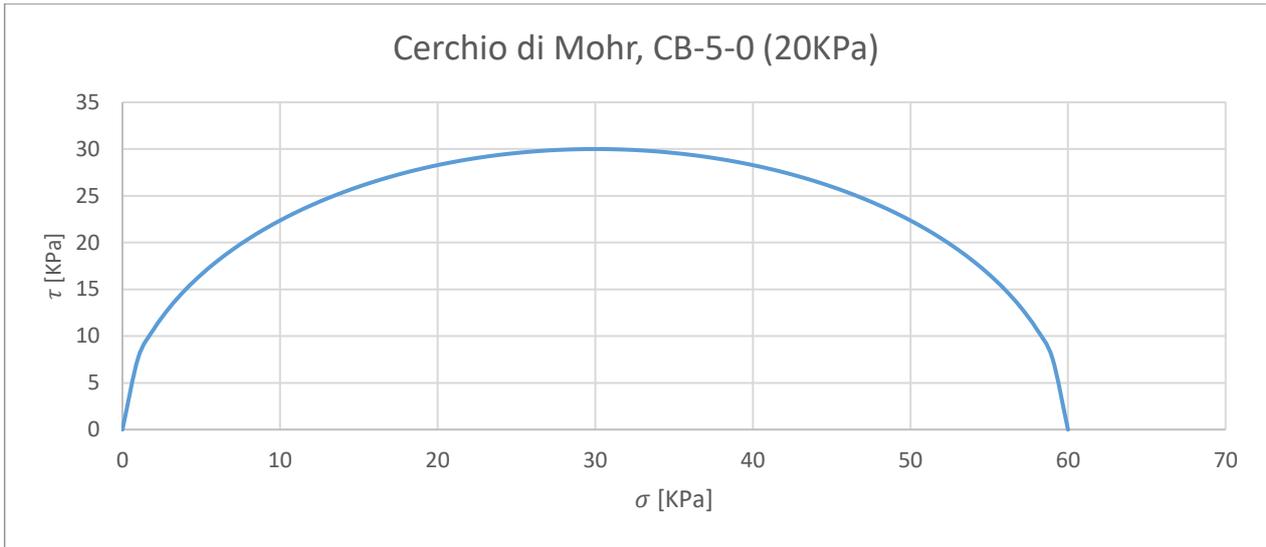
Appendice, Fig. 10. Grafico della fase di rottura della miscela CB-5-0, con confinamento di 20KPa.



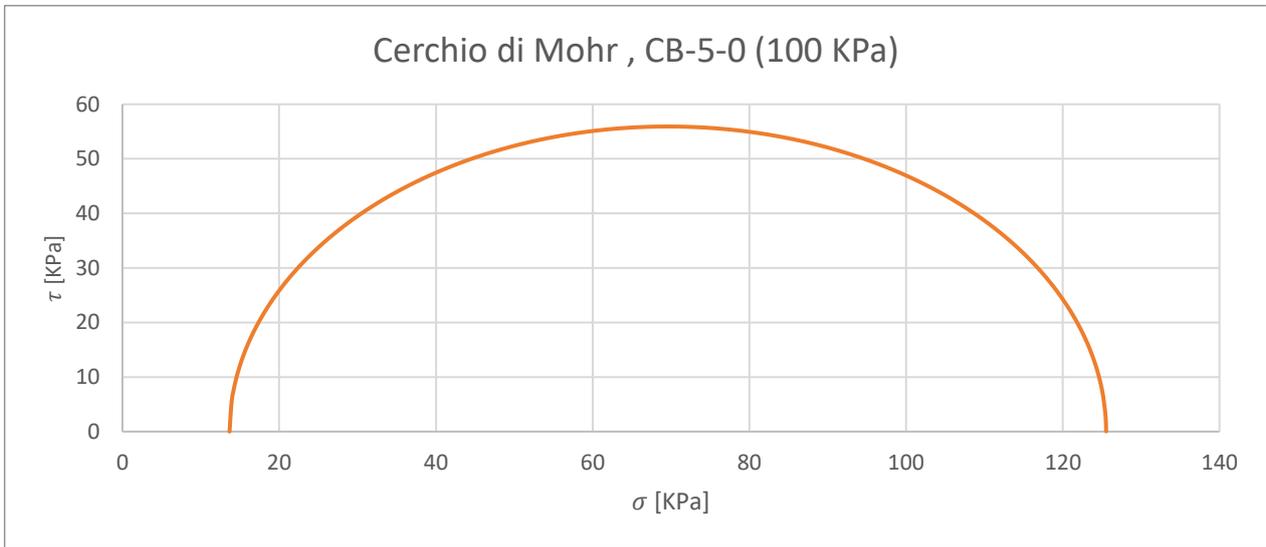
Appendice, Fig. 11. Grafico della fase di rottura della miscela CB-5-0, con confinamento di 100KPa.



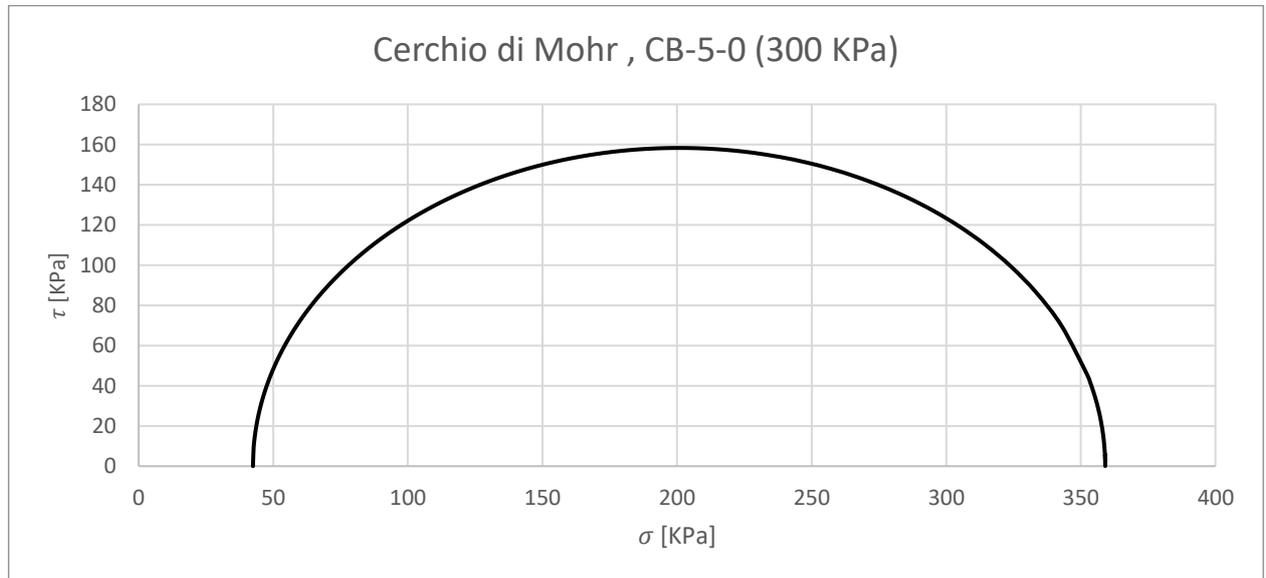
Appendice, Fig. 12. Grafico della fase di rottura della miscela CB-5-0, con confinamento di 300KPa.



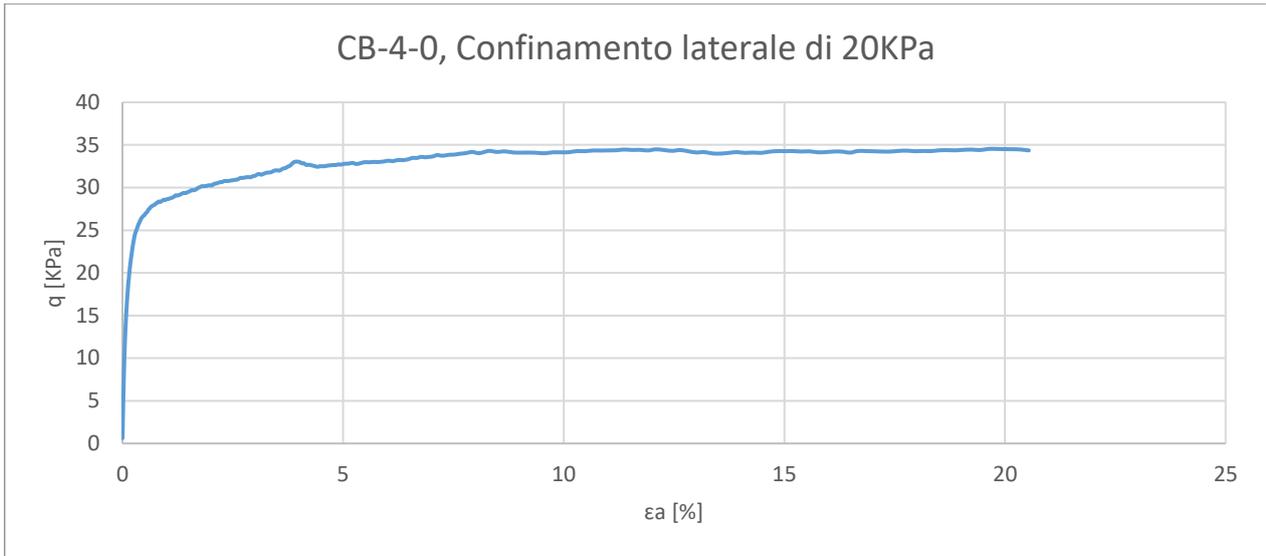
*Appendice, Fig. 13. Cerchio di Mohr della miscela CB-5-0 (20 KPa).*



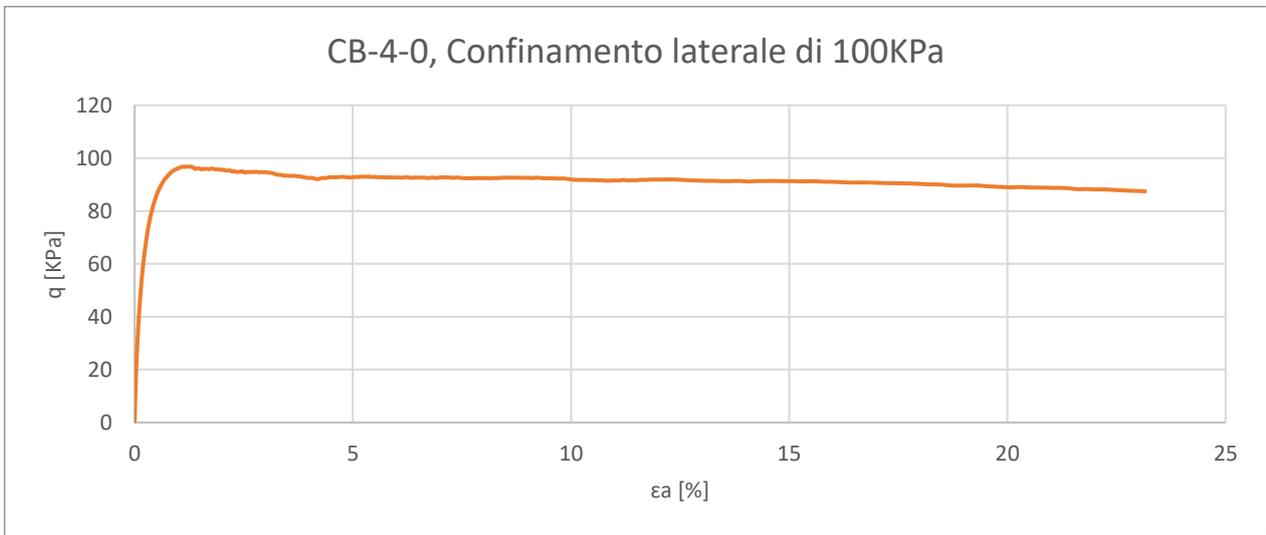
*Appendice, Fig. 14. Cerchio di Mohr della miscela CB-5-0 (100 KPa).*



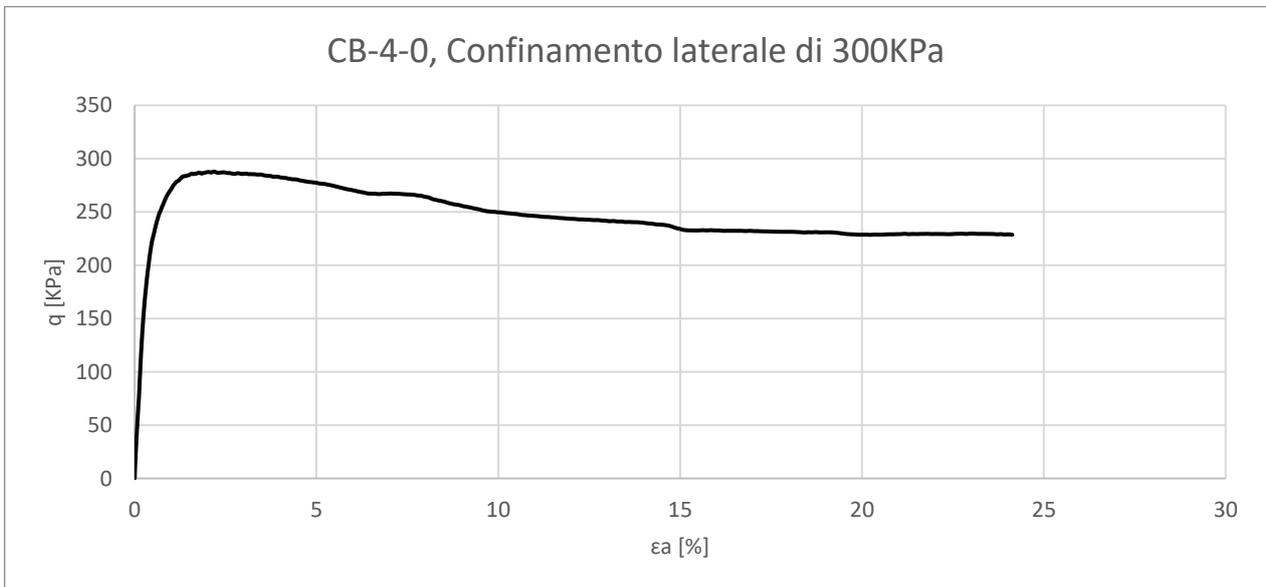
*Appendice, Fig. 15. Cerchio di Mohr della miscela CB-5-0 (300 KPa).*



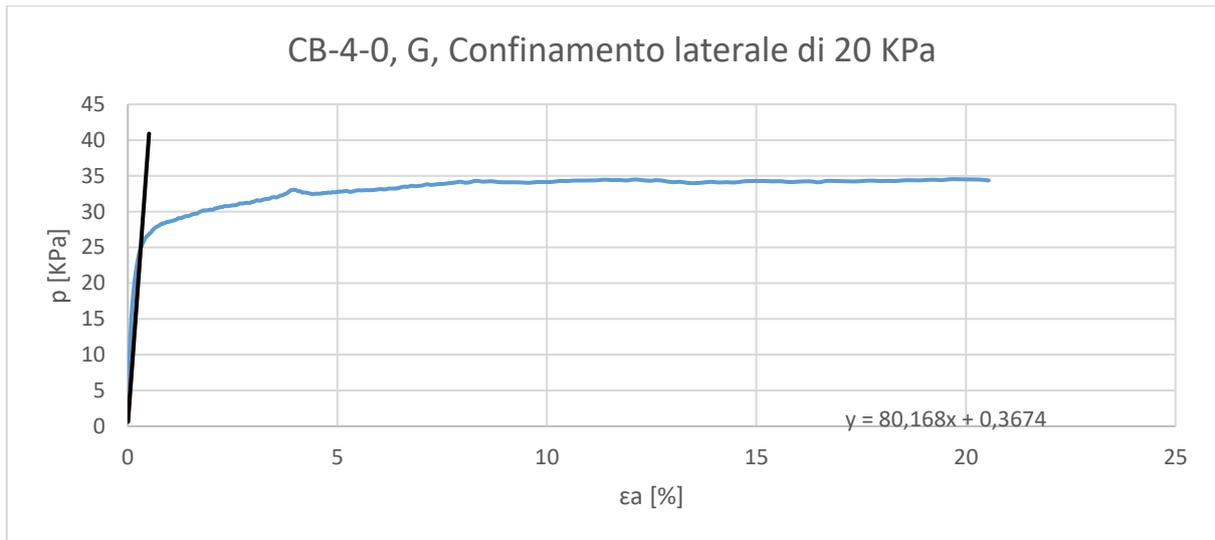
Appendice, Fig. 16. Grafico della fase di rottura della miscela CB-4-0, con confinamento di 20KPa.



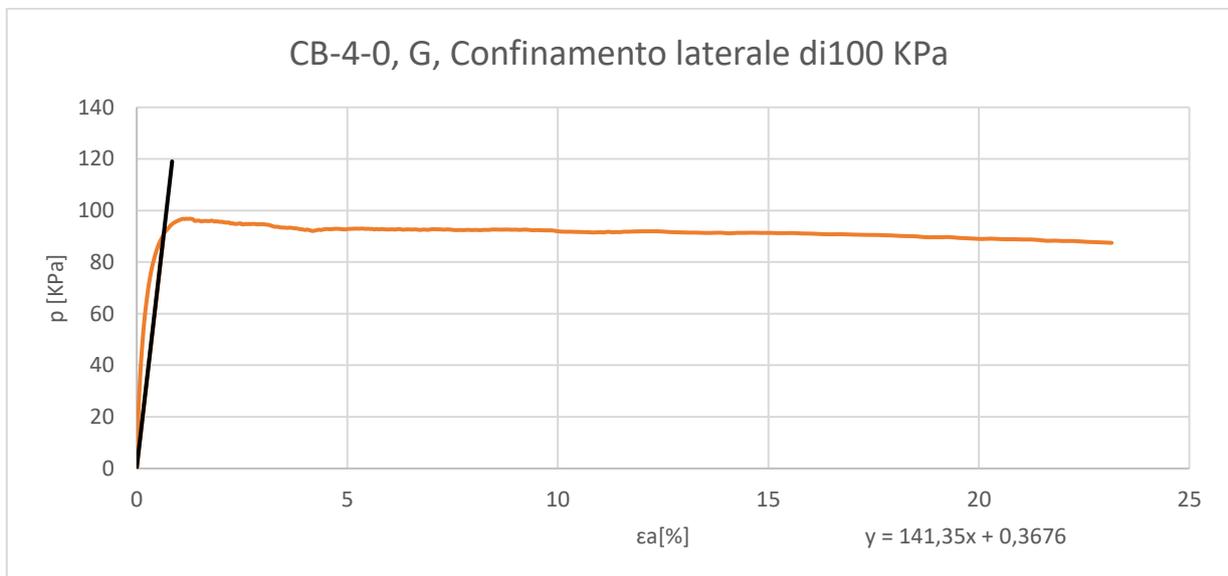
Appendice, Fig. 17. Grafico della fase di rottura della miscela CB-4-0, con confinamento di 100KPa.



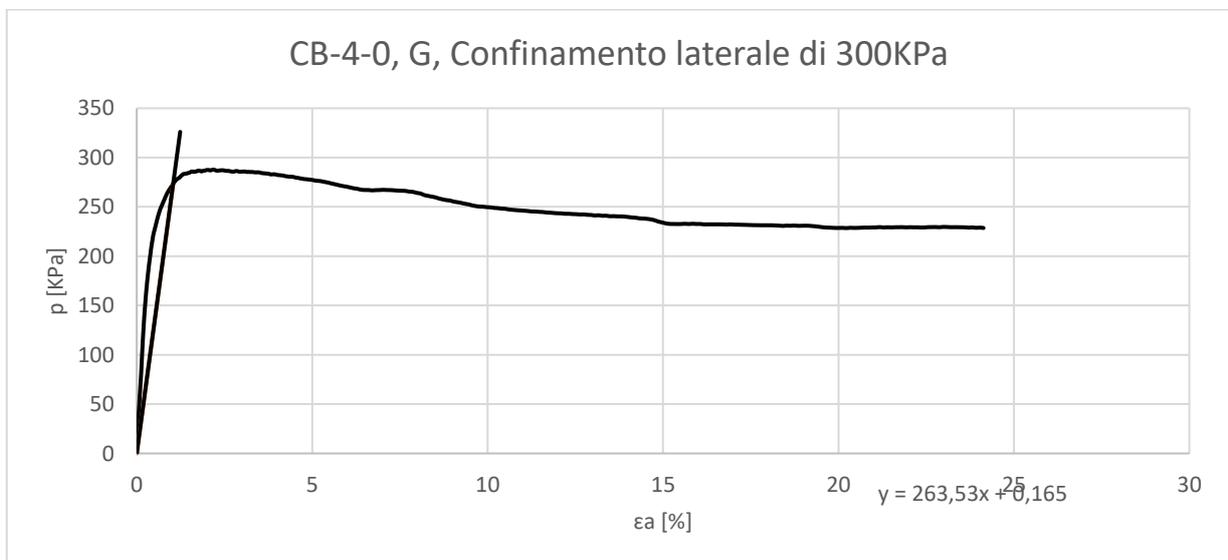
Appendice, Fig. 18. Grafico della fase di rottura della miscela CB-4-0, con confinamento di 300KPa.



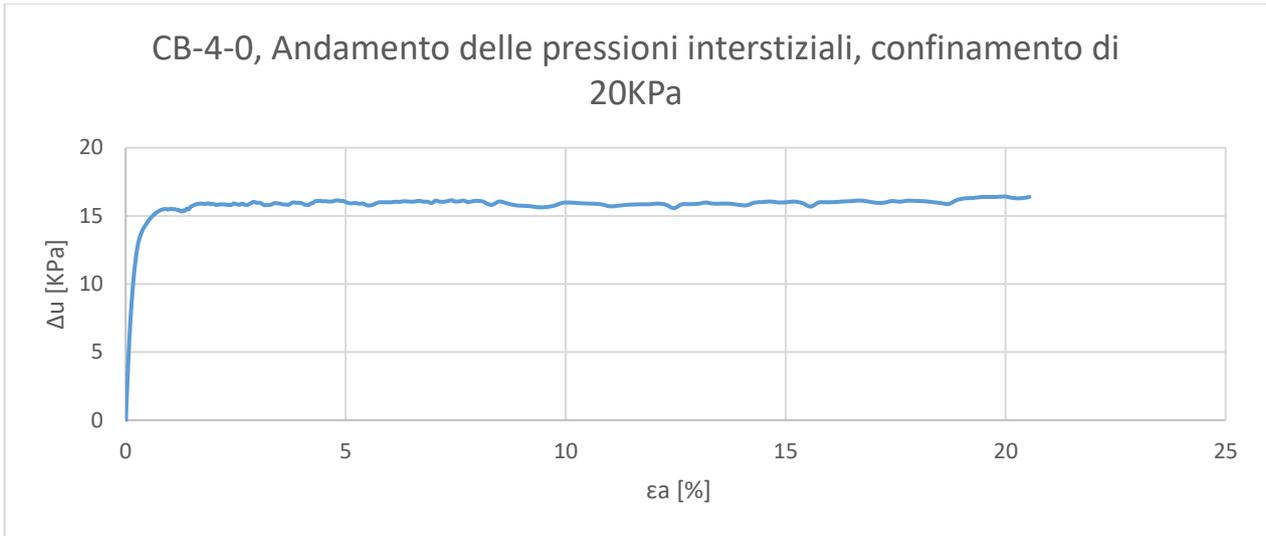
Appendice, Fig. 19. Ricerca del modulo di taglio per la miscela CB-4-0 (20 KPa).



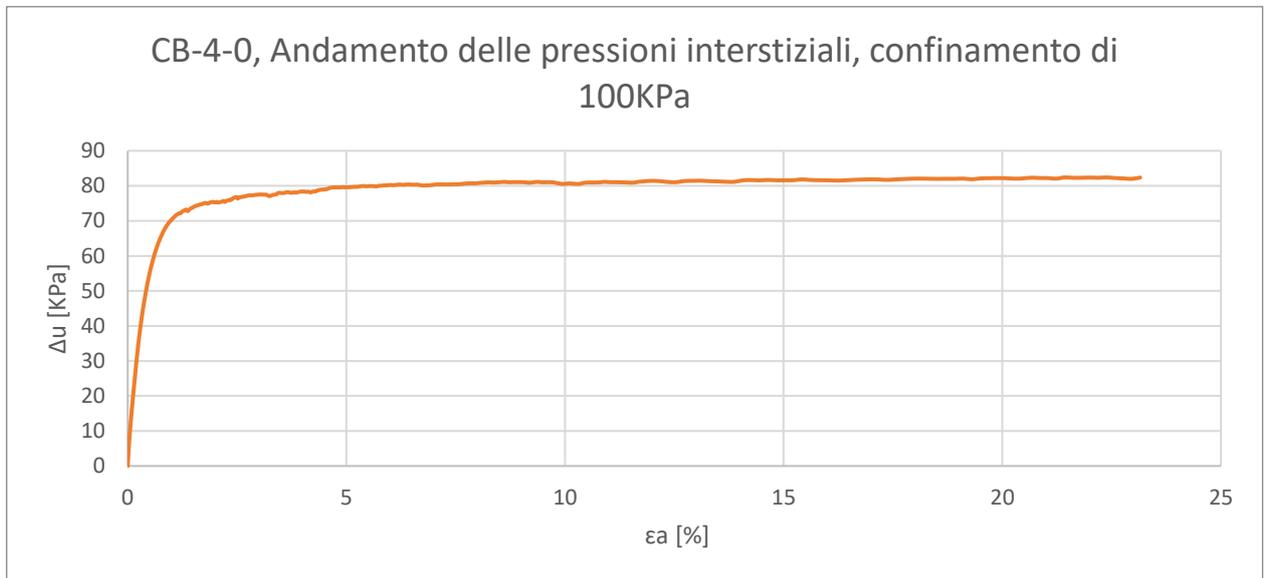
Appendice, Fig. 20. Ricerca del modulo di taglio per la miscela CB-4-0 (100 KPa).



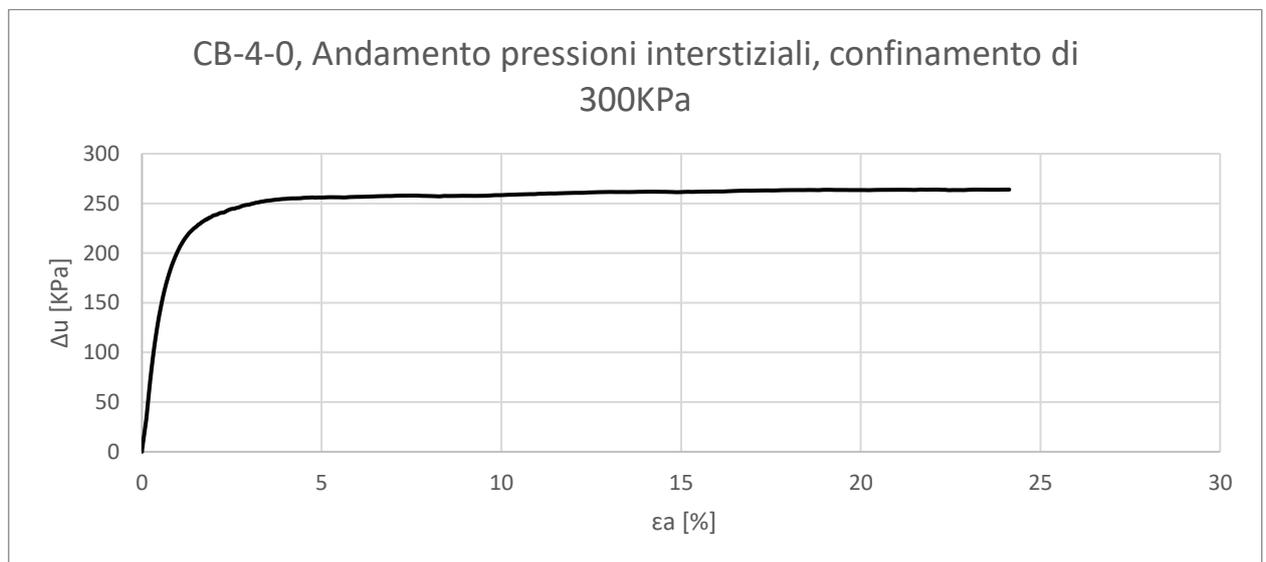
Appendice, Fig. 21. Ricerca del modulo di taglio per la miscela CB-4-0 (300 KPa).



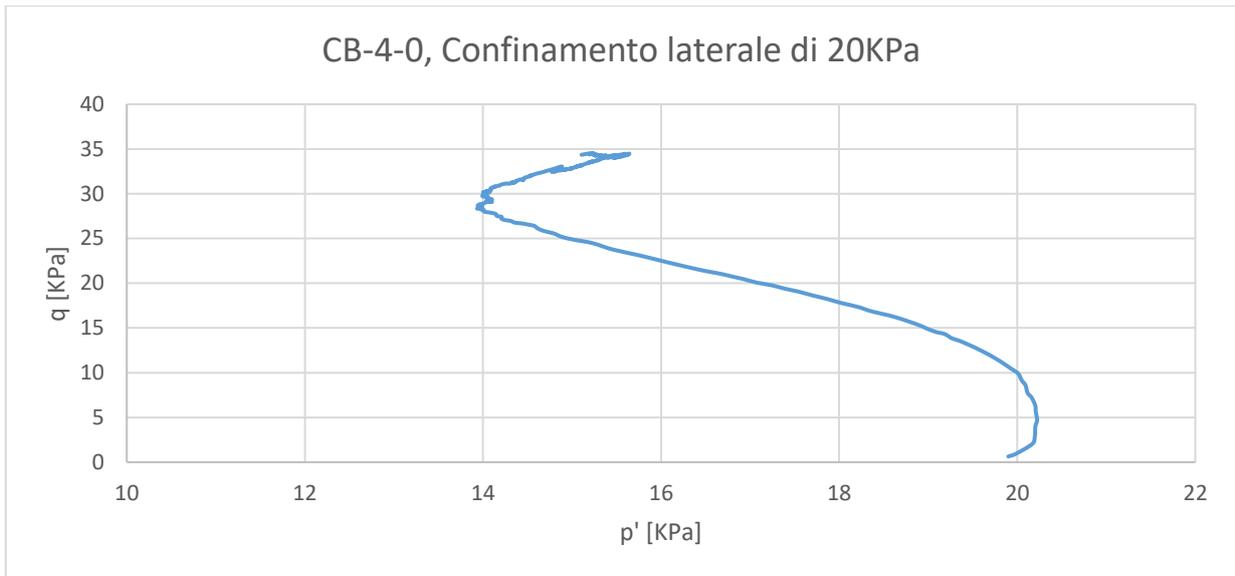
Appendice, Fig. 22. Grafico della variazione della pressione interstiziale della miscela CB-4-0, con confinamento di 20KPa.



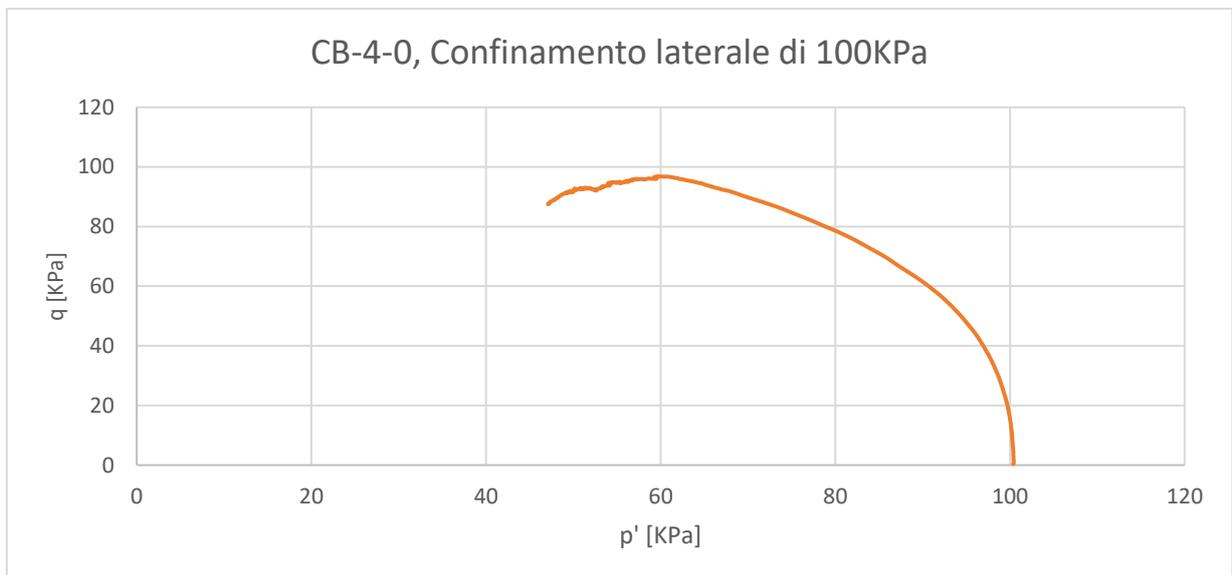
Appendice, Fig. 23. Grafico della variazione della pressione interstiziale della miscela CB-4-0, con confinamento di 100KPa.



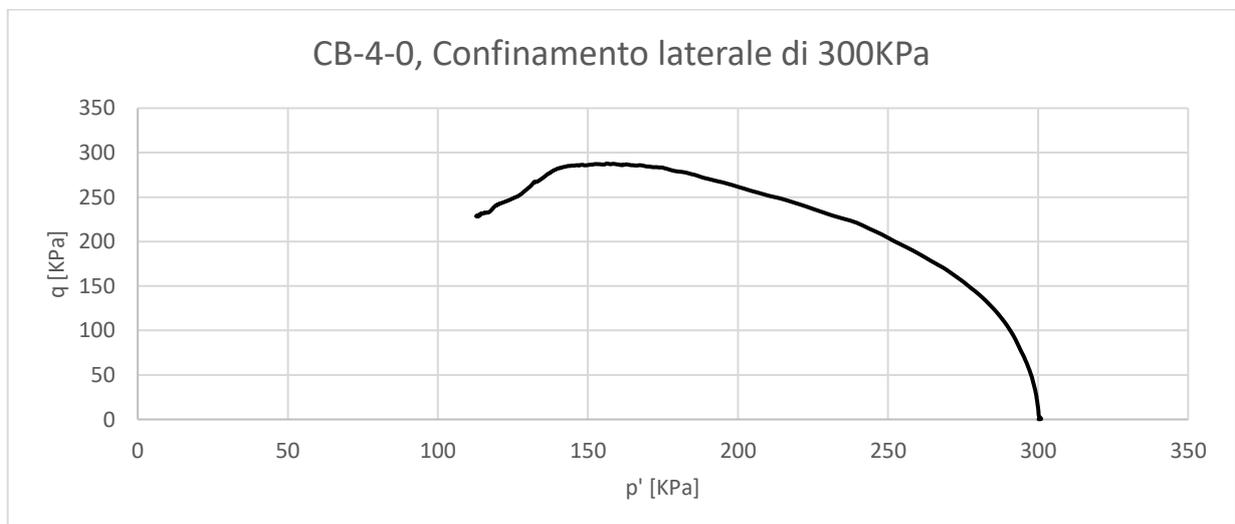
Appendice, Fig. 24. Grafico della variazione della pressione interstiziale della miscela CB-4-0, con confinamento di 300KPa.



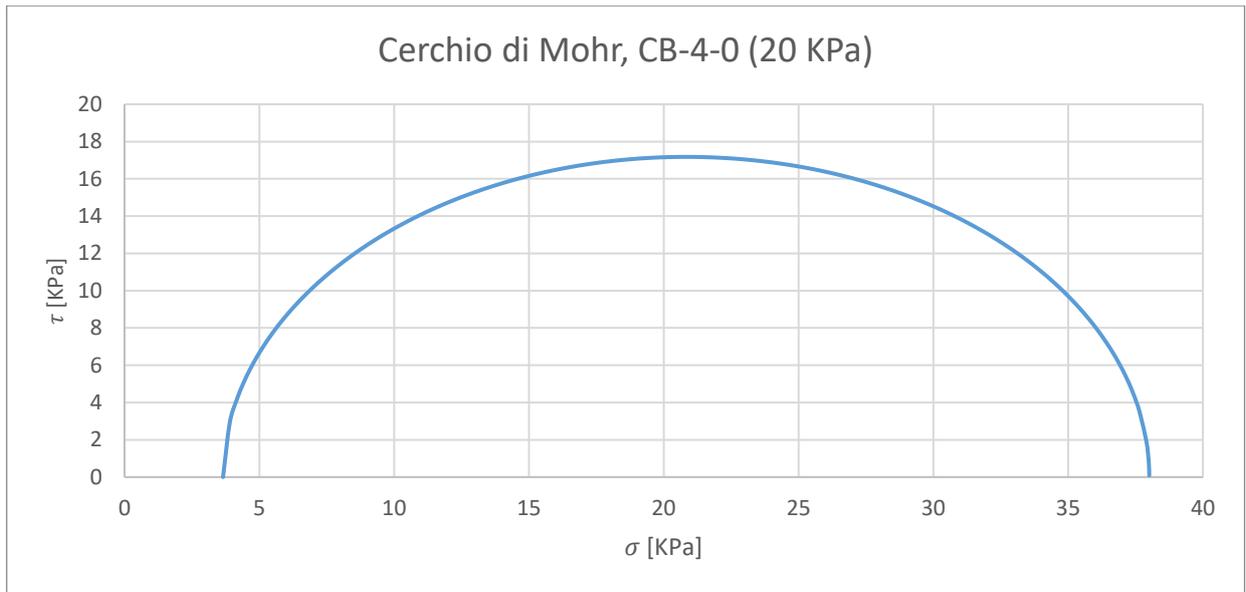
Appendice, Fig. 25. Grafico della fase di rottura della miscela CB-4-0, con confinamento di 20KPa.



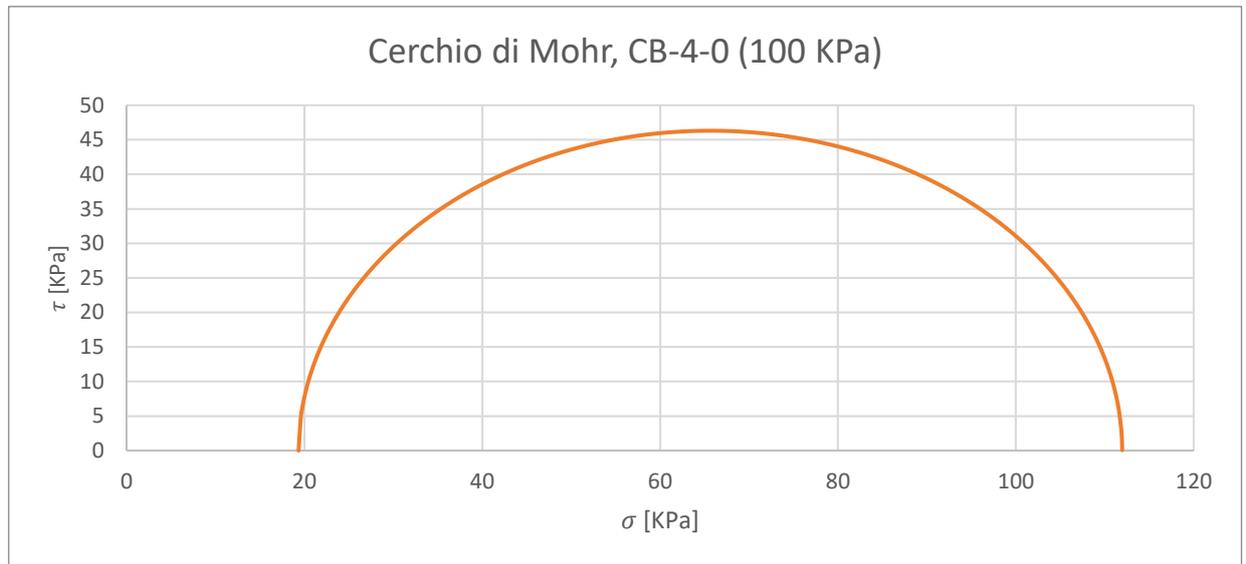
Appendice, Fig. 26. Grafico della fase di rottura della miscela CB-4-0, con confinamento di 100KPa.



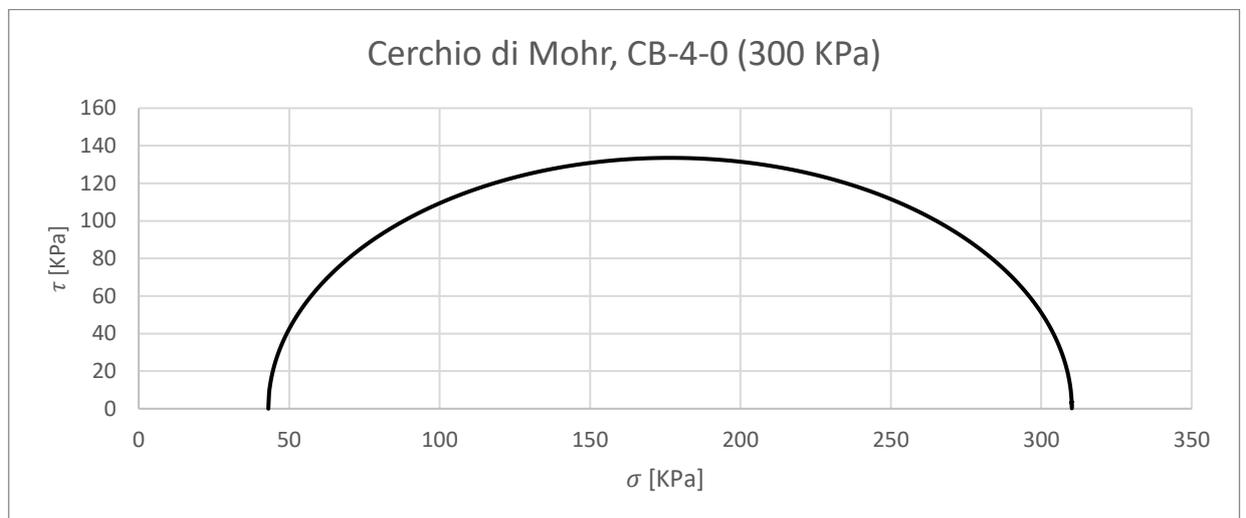
Appendice, Fig. 27. Grafico della fase di rottura della miscela CB-4-0, con confinamento di 300KPa.



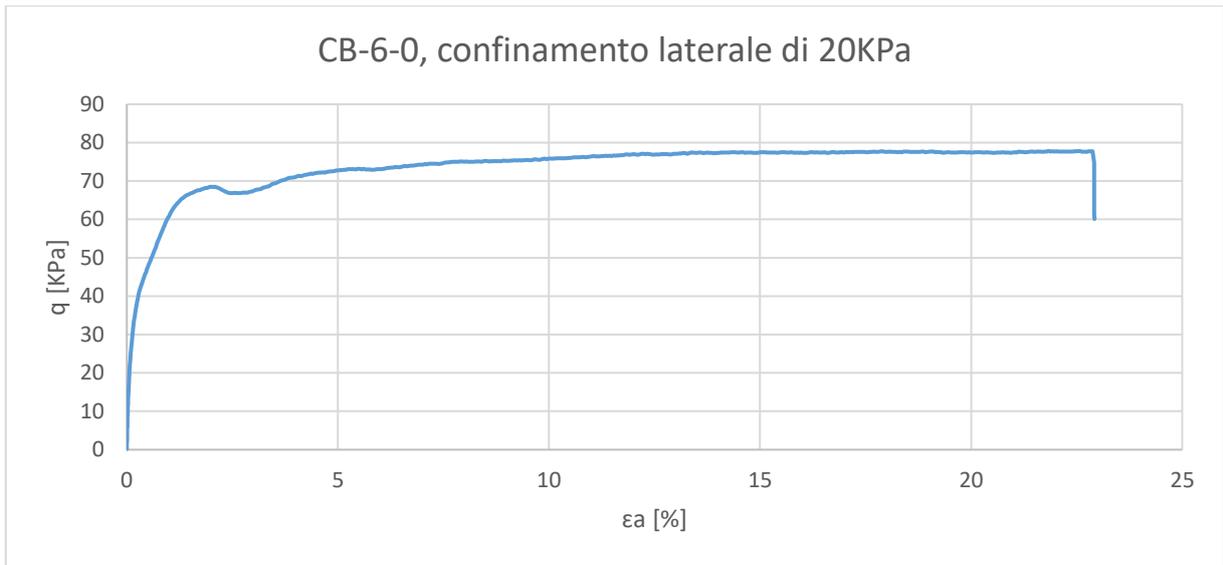
Appendice, Fig. 28. Cerchio di Mohr della miscela CB-4-0 (20 KPa).



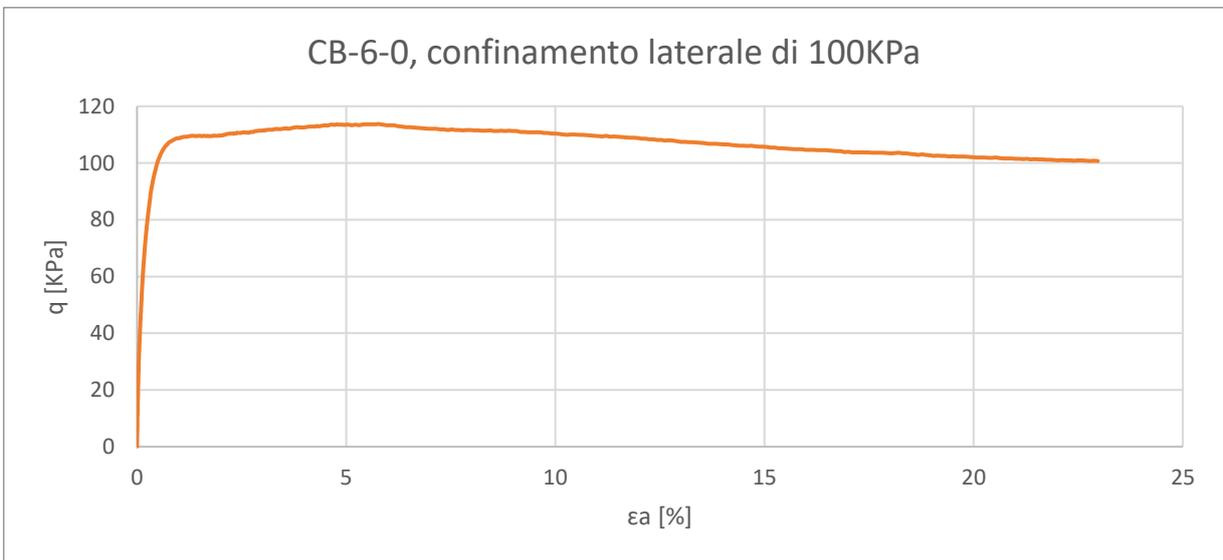
Appendice, Fig. 29. Cerchio di Mohr della miscela CB-4-0 (100 KPa).



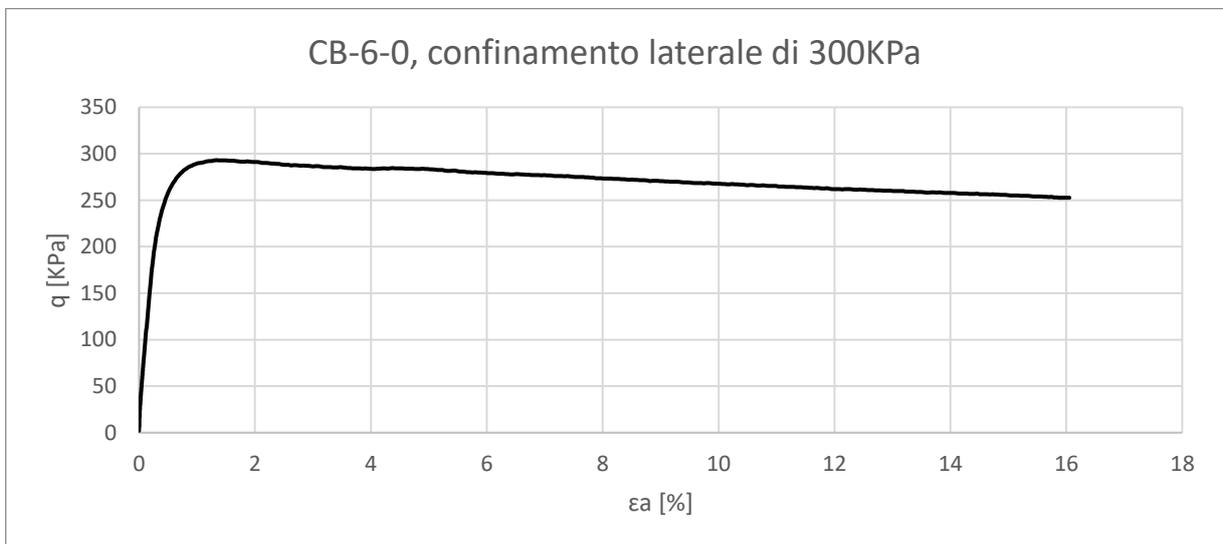
Appendice, Fig. 30. Cerchio di Mohr della miscela CB-4-0 (300 KPa).



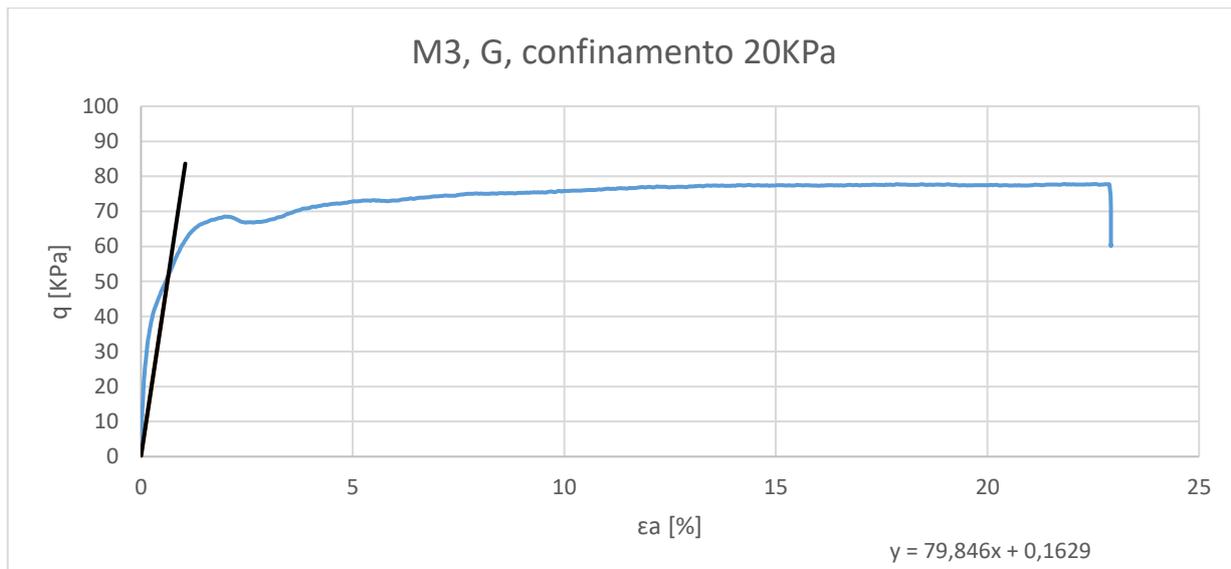
Appendice, Fig. 31 Grafico della fase di rottura della miscela CB-6-0, con confinamento di 20KPa.



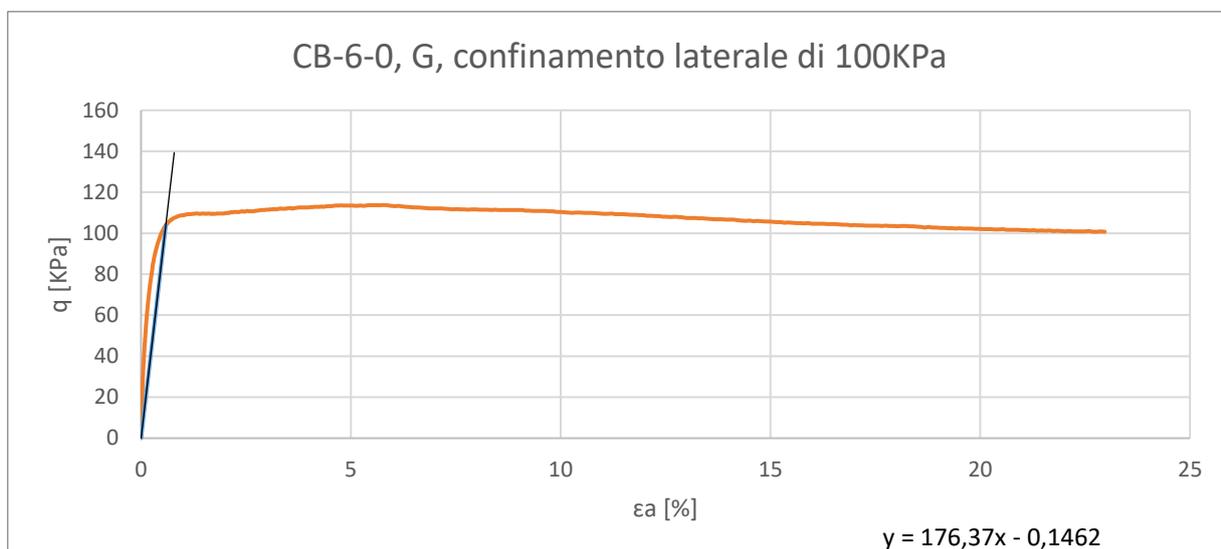
Appendice, Fig. 32. Grafico della fase di rottura della miscela CB-6-0, con confinamento di 100KPa.



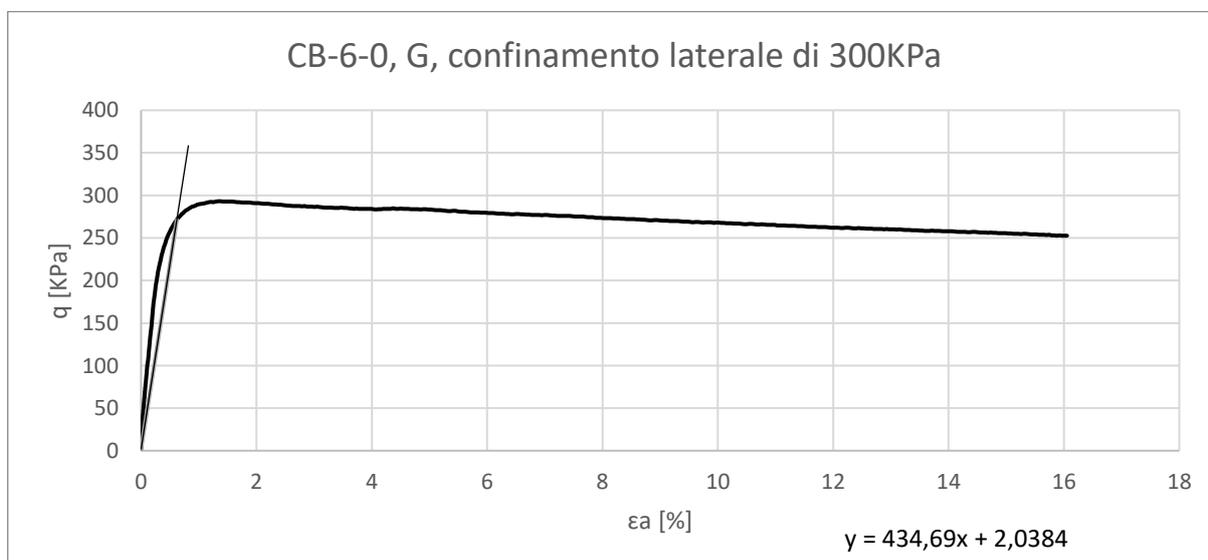
Appendice, Fig. 33. Grafico della fase di rottura della miscela CB-6-0, con confinamento di 300KPa.



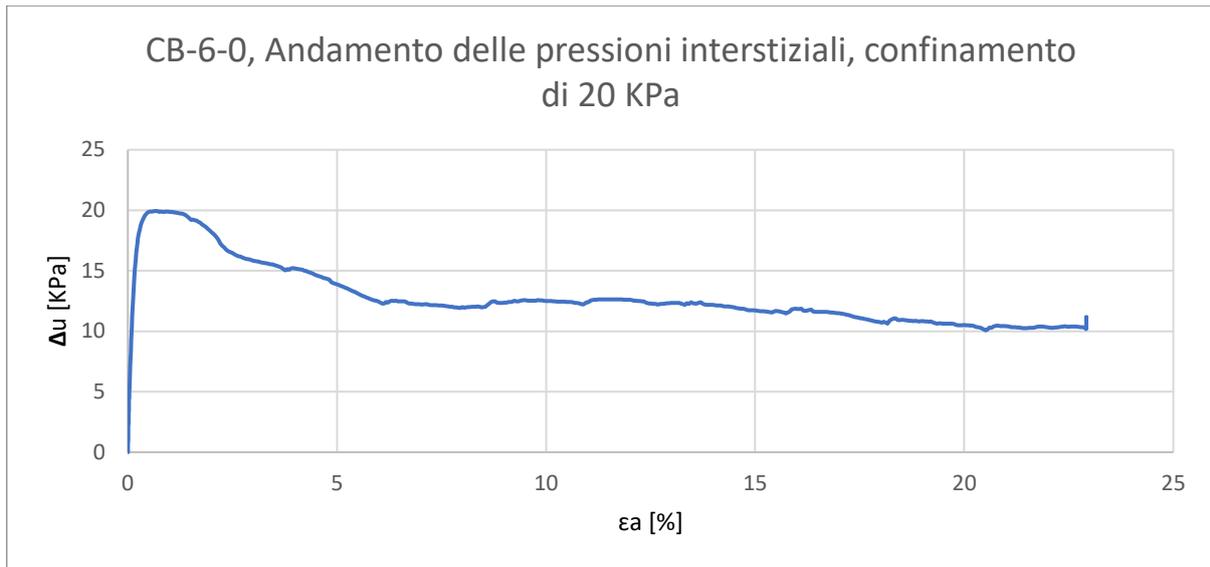
Appendice, Fig. 34. Ricerca del modulo di taglio per la miscela CB-6-0 (20 KPa).



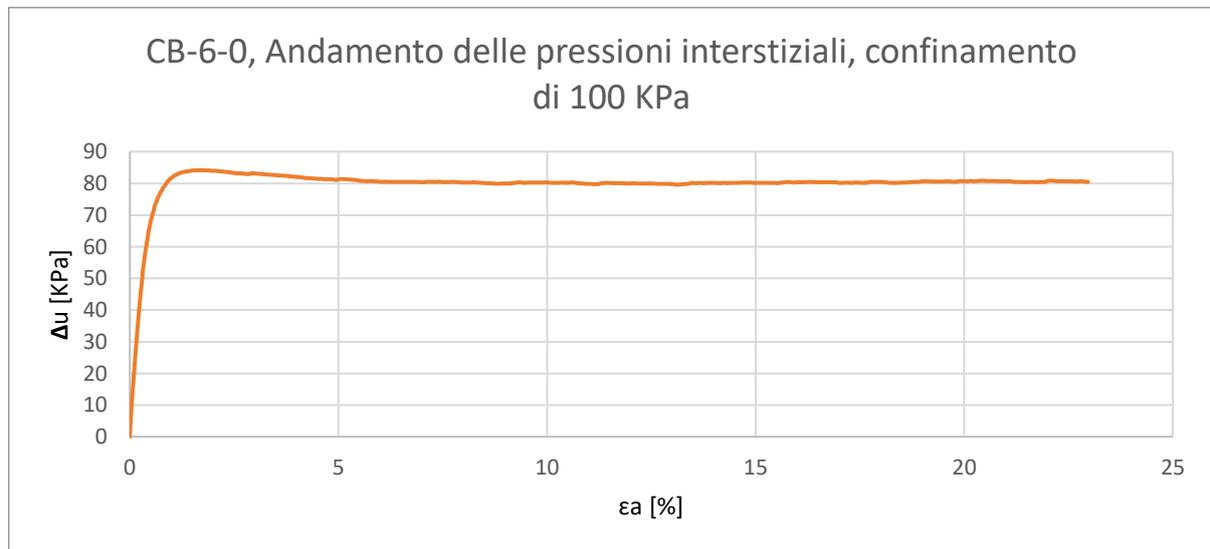
Appendice, Fig. 35. Ricerca del modulo di taglio per la miscela CB-6-0 (100 KPa).



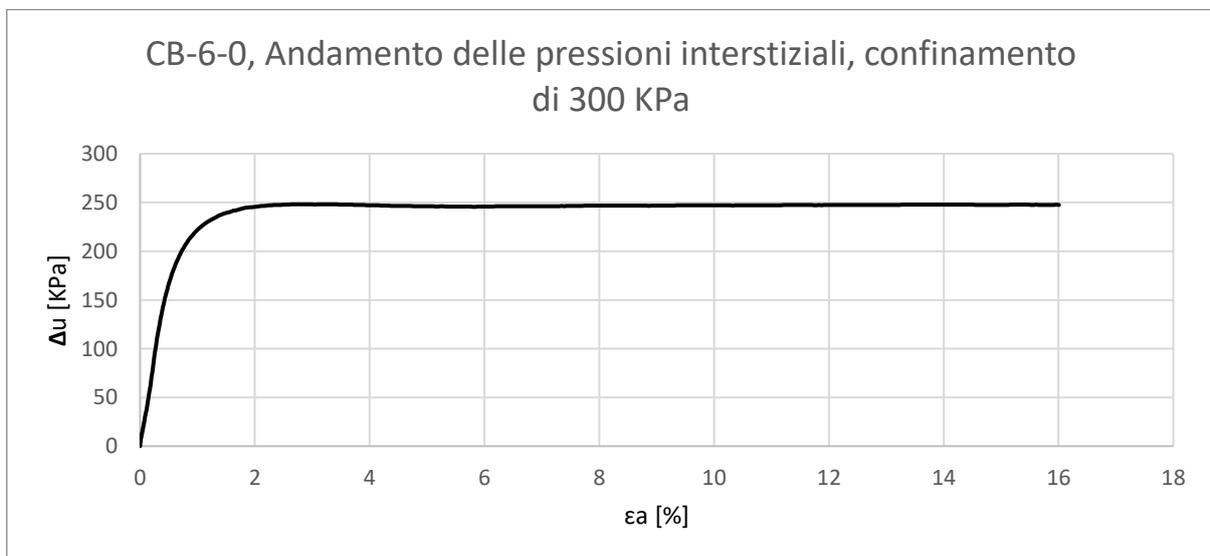
Appendice, Fig. 36. Ricerca del modulo di taglio per la miscela CB-6-0 (300 KPa).



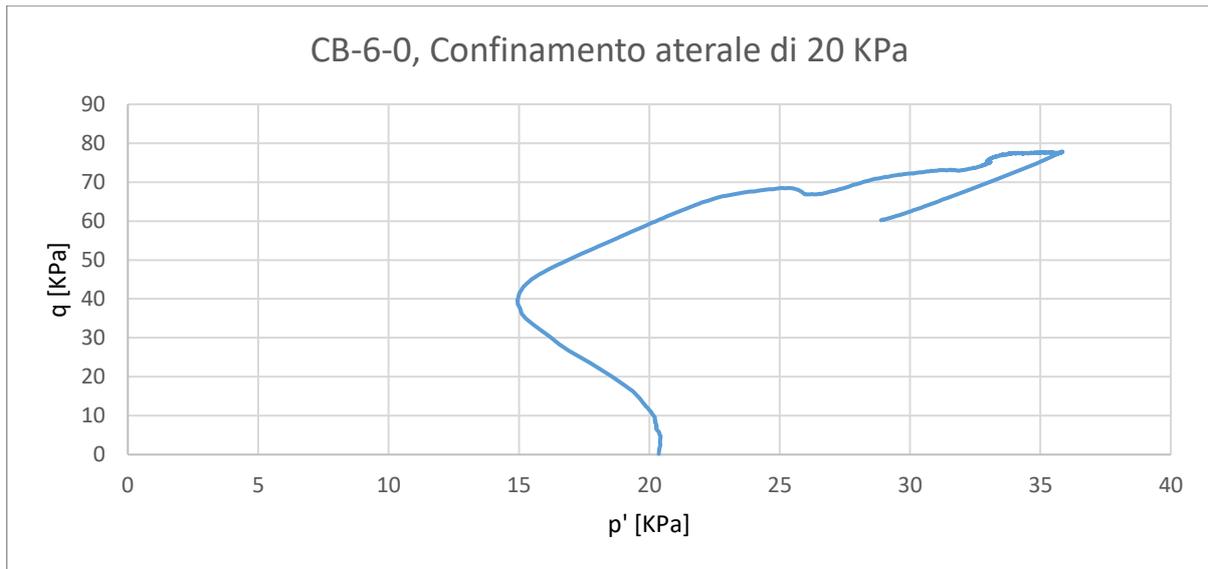
Appendice, Fig. 37. Grafico della variazione della pressione interstiziale della miscela CB-6-0, con confinamento di 20KPa.



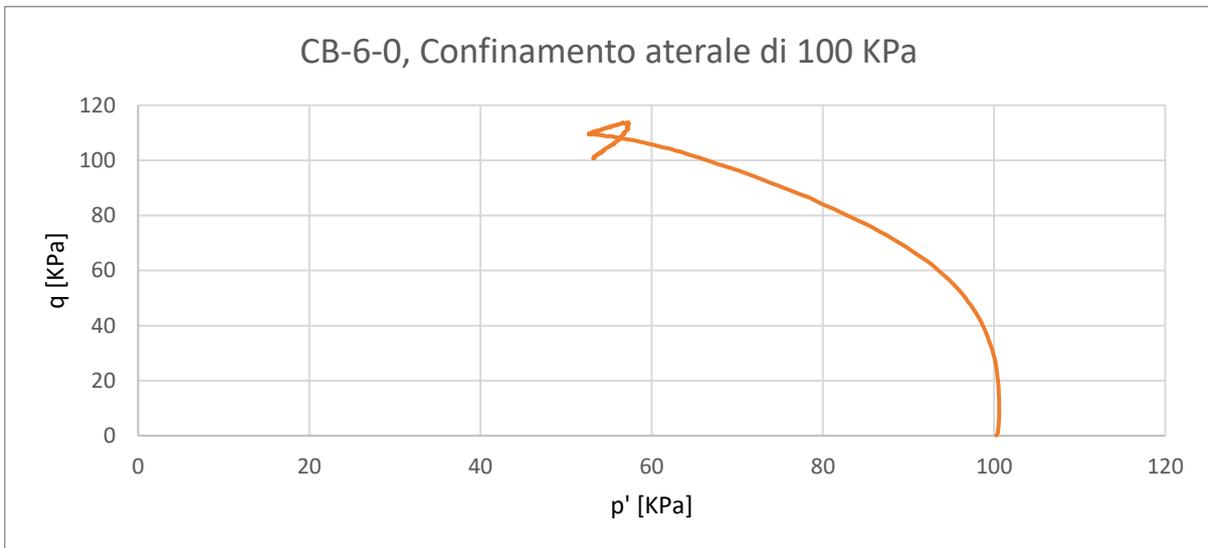
Appendice, Fig. 38. Grafico della variazione della pressione interstiziale della miscela CB-6-0, con confinamento di 100KPa.



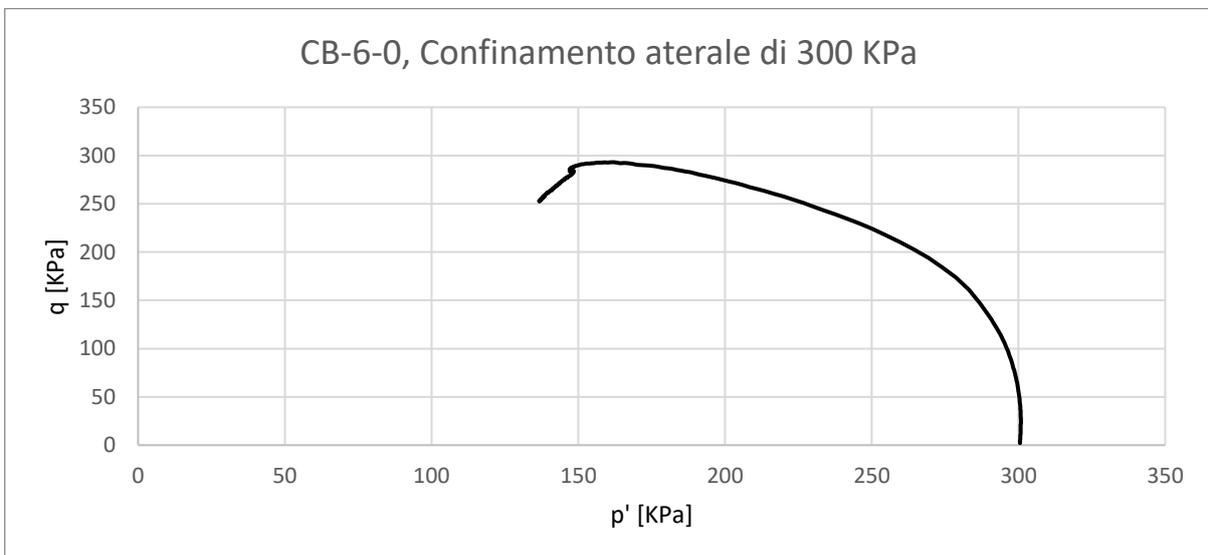
Appendice, Fig. 39. Grafico della variazione della pressione interstiziale della miscela CB-6-0, con confinamento di 300KPa.



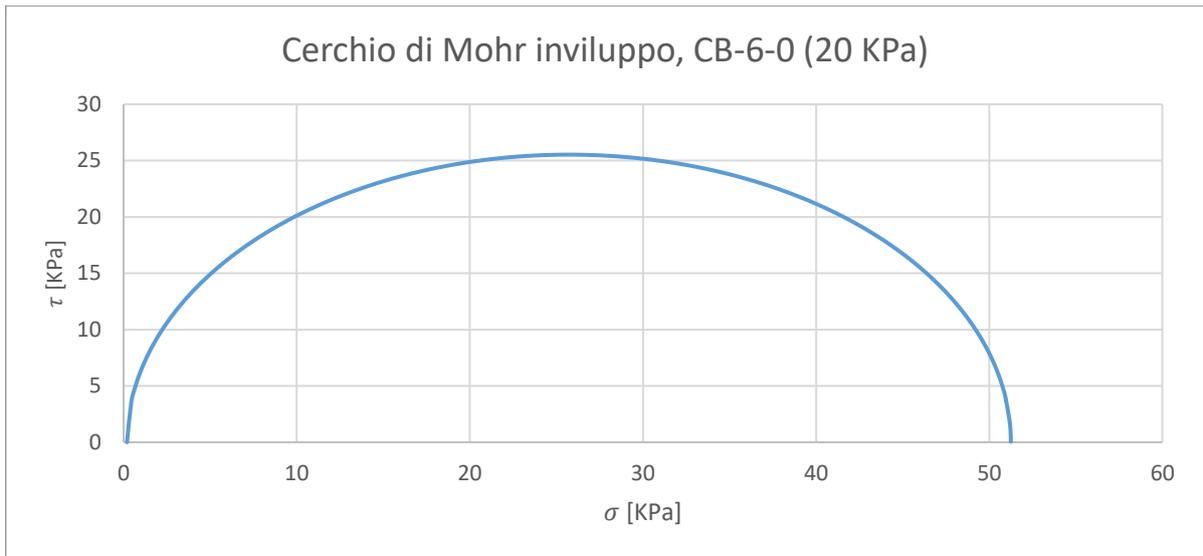
Appendice, Fig. 40. Grafico della fase di rottura della miscela CB-6-0, con confinamento di 20KPa.



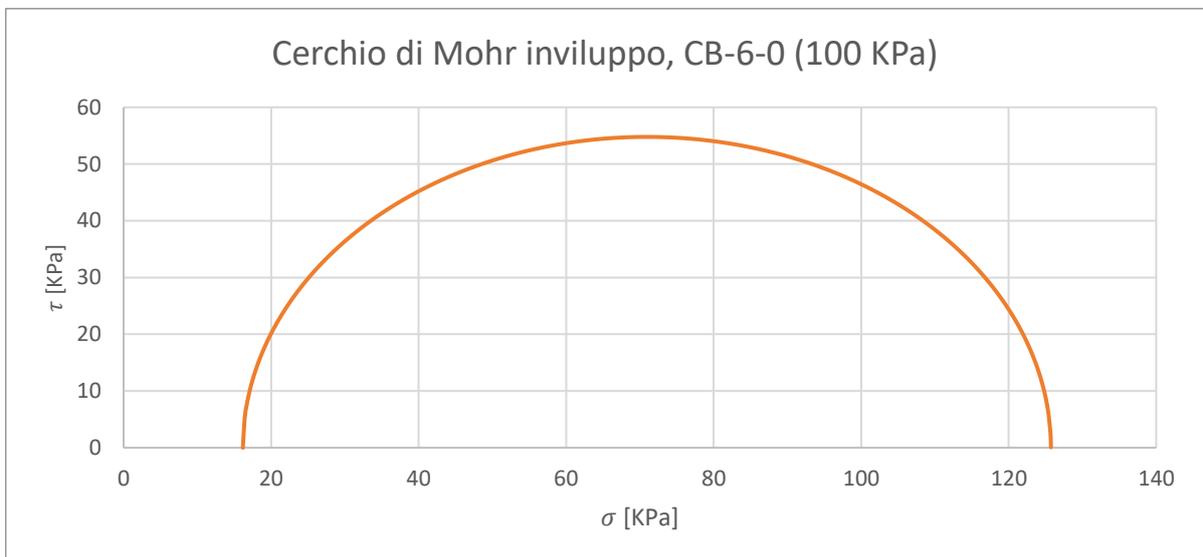
Appendice, Fig. 41. Grafico della fase di rottura della miscela CB-6-0, con confinamento di 100KPa.



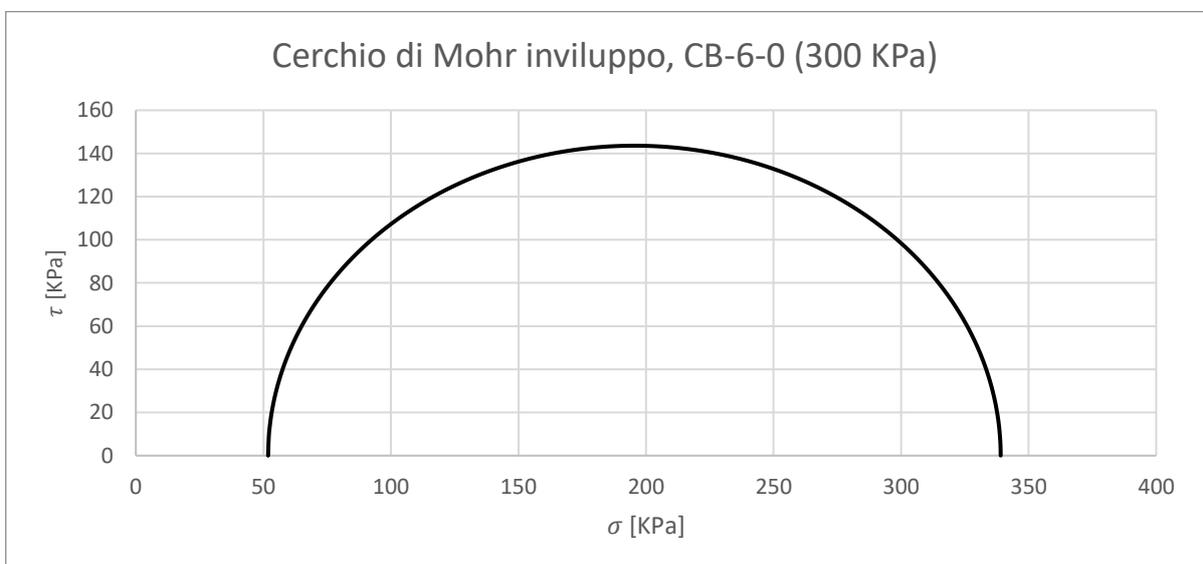
Appendice, Fig. 42. Grafico della fase di rottura della miscela CB-6-0, con confinamento di 300KPa.



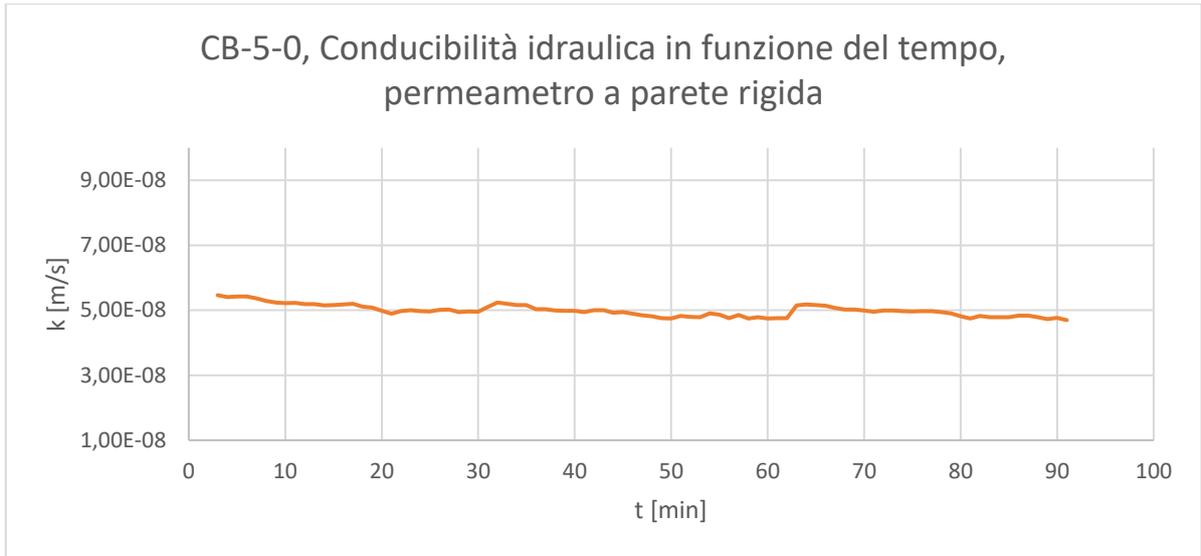
Appendice, Fig. 43. Cerchio di Mohr della miscela CB-6-0 (20 KPa).



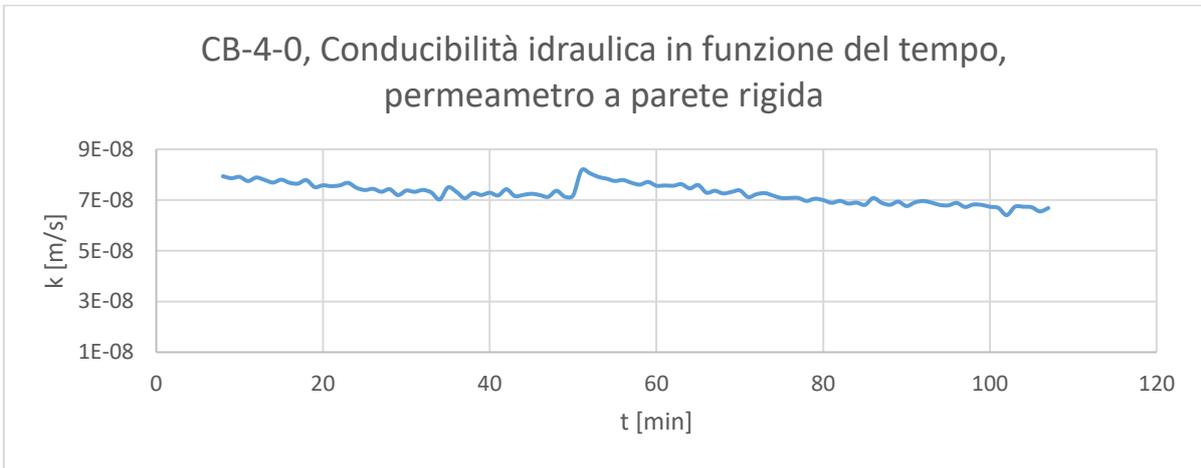
Appendice, Fig. 44. Cerchio di Mohr della miscela CB-6-0 (100 KPa).



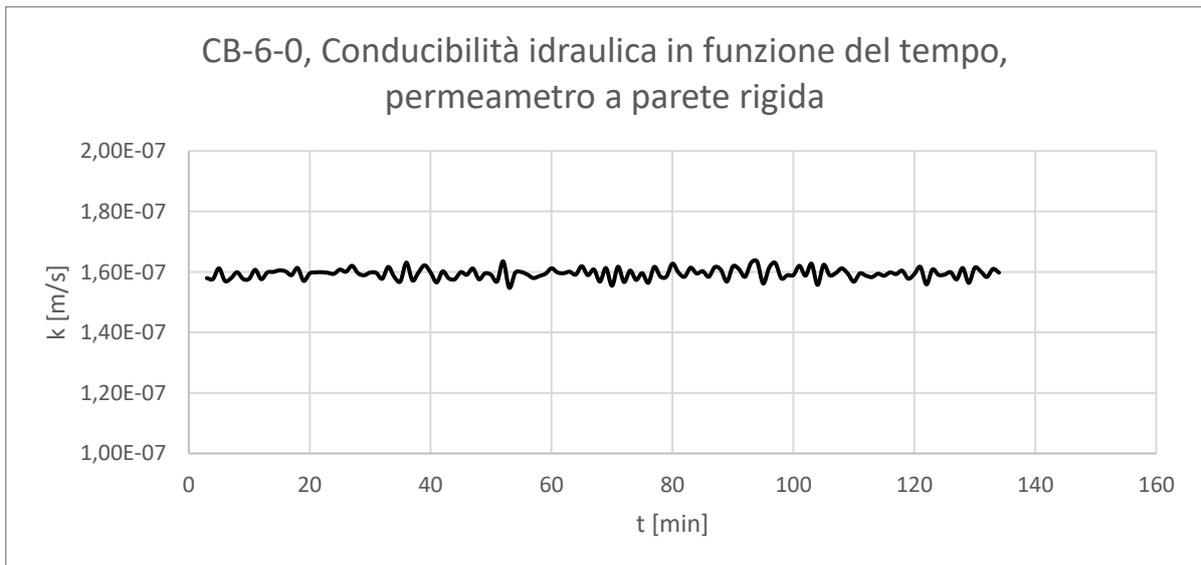
Appendice, Fig. 45. Cerchio di Mohr della miscela CB-6-0 (300 KPa).



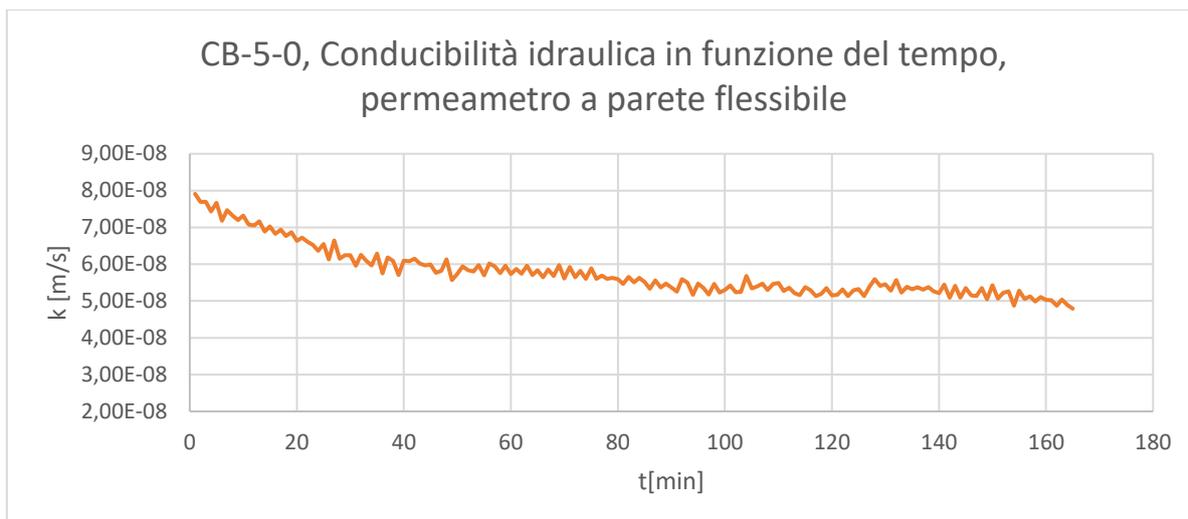
Appendice, Fig. 46. Prova di conducibilità idraulica sulla miscela CB-5-0 effettuate mediante un permeametro a parete rigida, conducibilità idraulica in funzione del tempo.



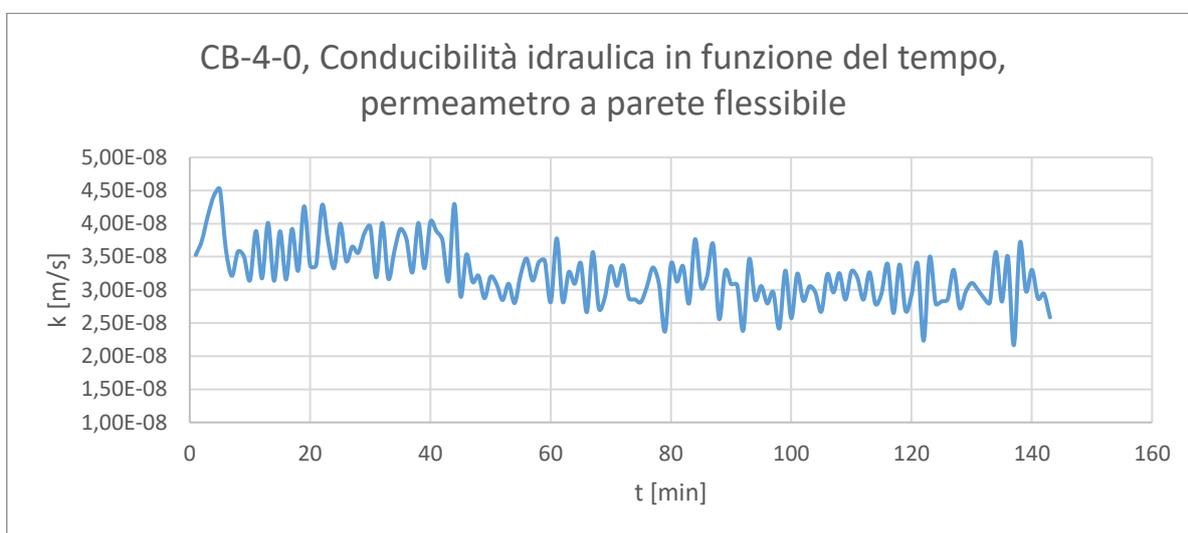
Appendice, Fig. 47. Prova di conducibilità idraulica sulla miscela CB-4-0 effettuate mediante un permeametro a parete rigida, conducibilità idraulica in funzione del tempo.



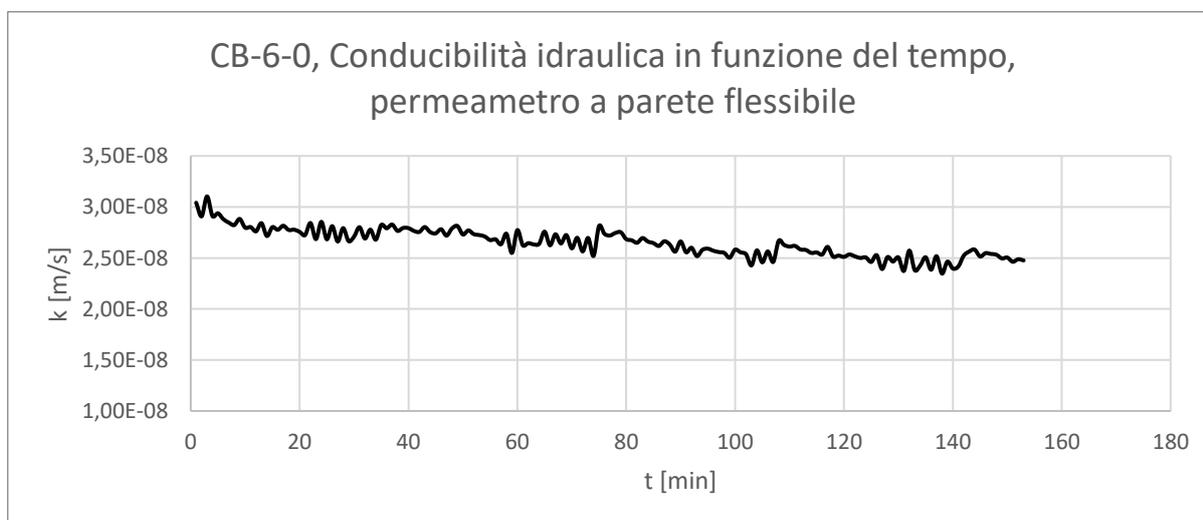
Appendice, Fig. 48. Prova di conducibilità idraulica sulla miscela CB-6-0 effettuate mediante un permeametro a parete rigida, conducibilità idraulica in funzione del tempo.



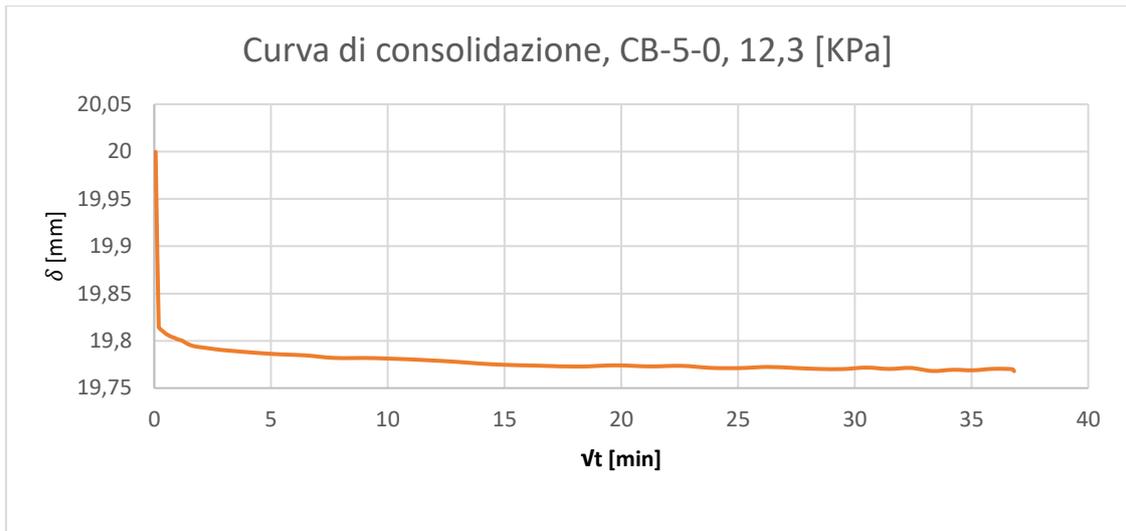
Appendice, Fig. 49. Prova di conducibilità idraulica sulla miscela CB-5-0 effettuate mediante un permeametro a parete flessibile, conducibilità idraulica in funzione del tempo.



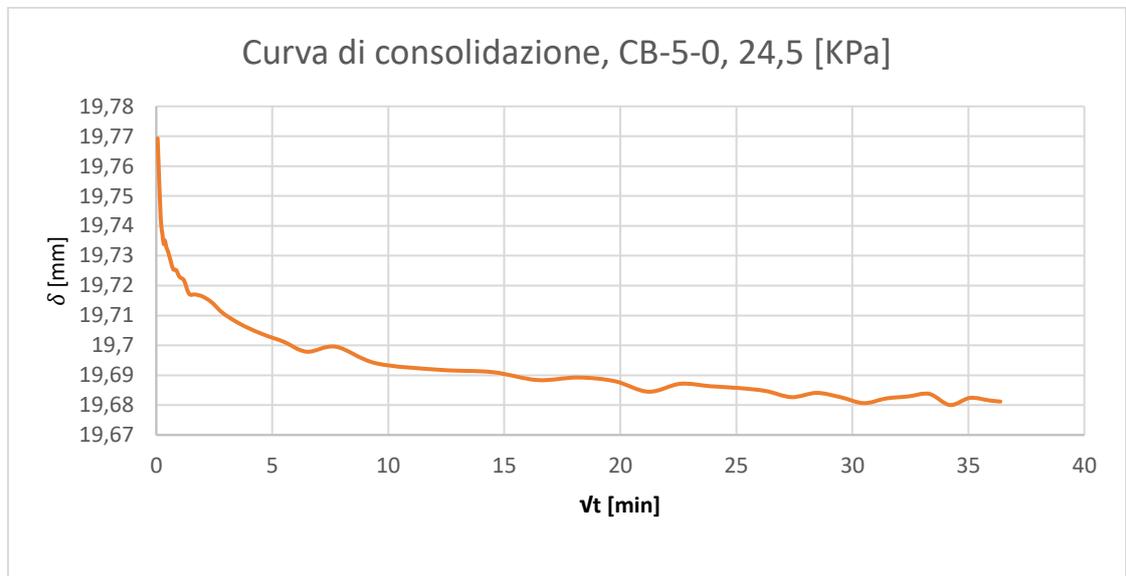
Appendice, Fig. 50. Prova di conducibilità idraulica sulla miscela CB-4-0 effettuate mediante un permeametro a parete flessibile, conducibilità idraulica in funzione del tempo.



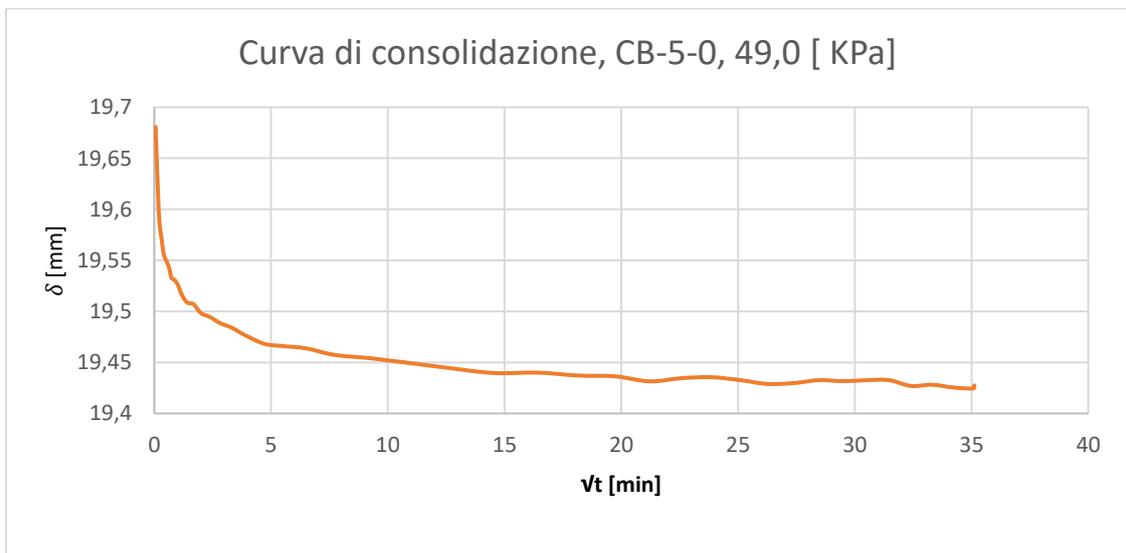
Appendice, Fig. 51. Prova di conducibilità idraulica sulla miscela CB-6-0 effettuate mediante un permeametro a parete flessibile, conducibilità idraulica in funzione del tempo.



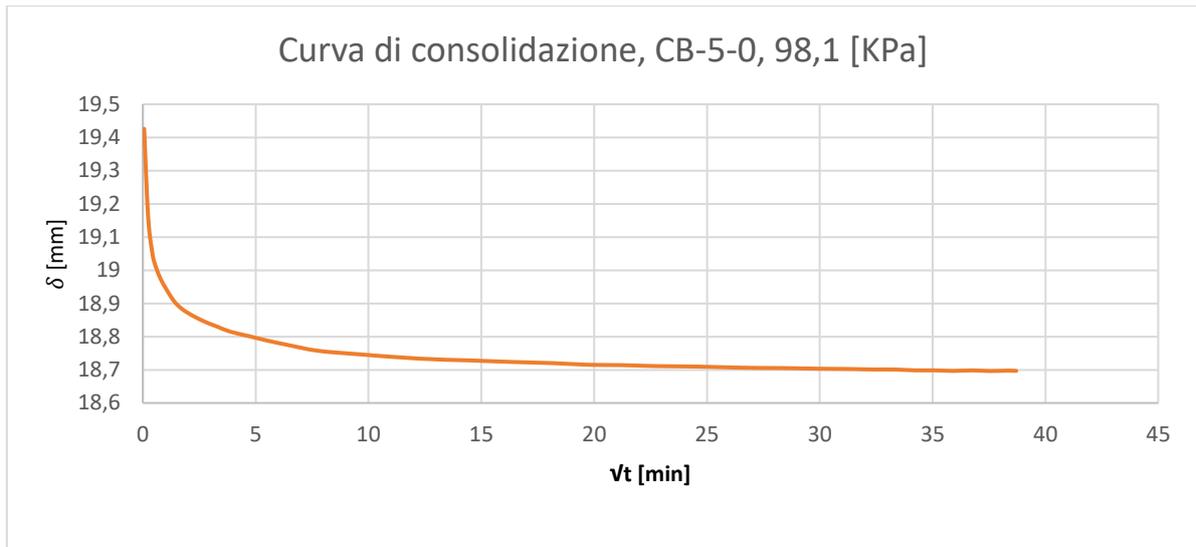
Appendice, Fig. 52. Curva di consolidazione della miscela CB-5-0 per uno step di carico di 12,3 KPa.



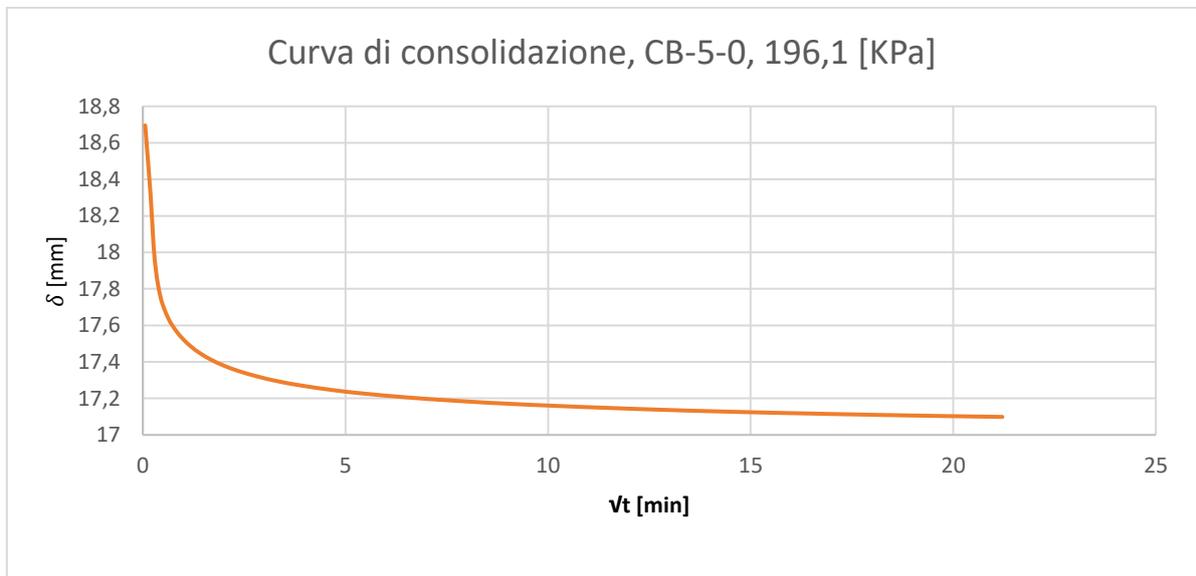
Appendice, Fig. 53. Curva di consolidazione della miscela CB-5-0 per uno step di carico di 24,5 KPa.



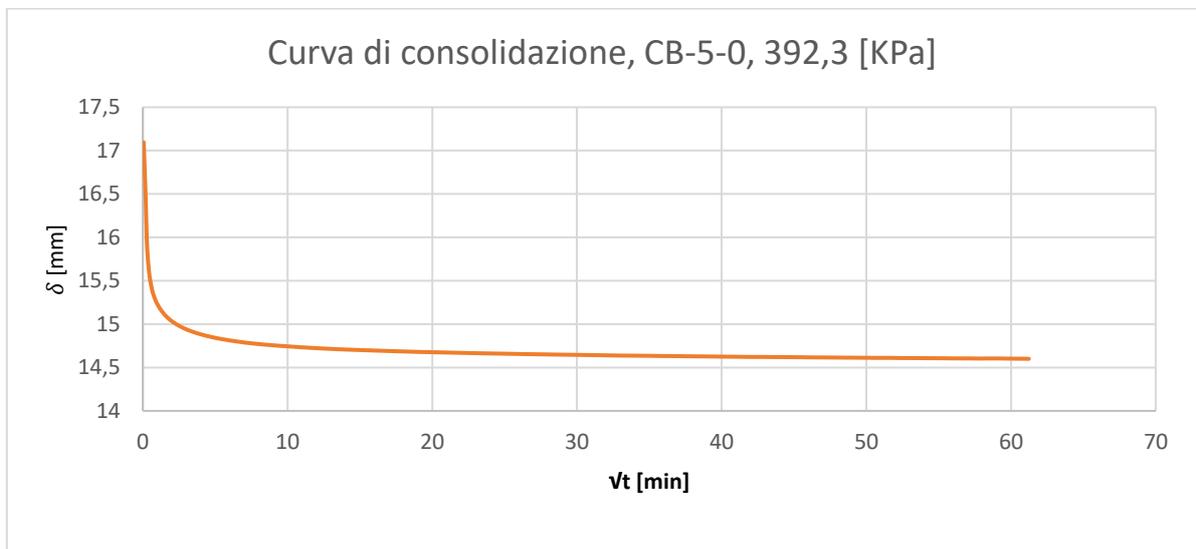
Appendice, Fig. 54. Curva di consolidazione della miscela CB-5-0 per uno step di carico di 49,0 KPa.



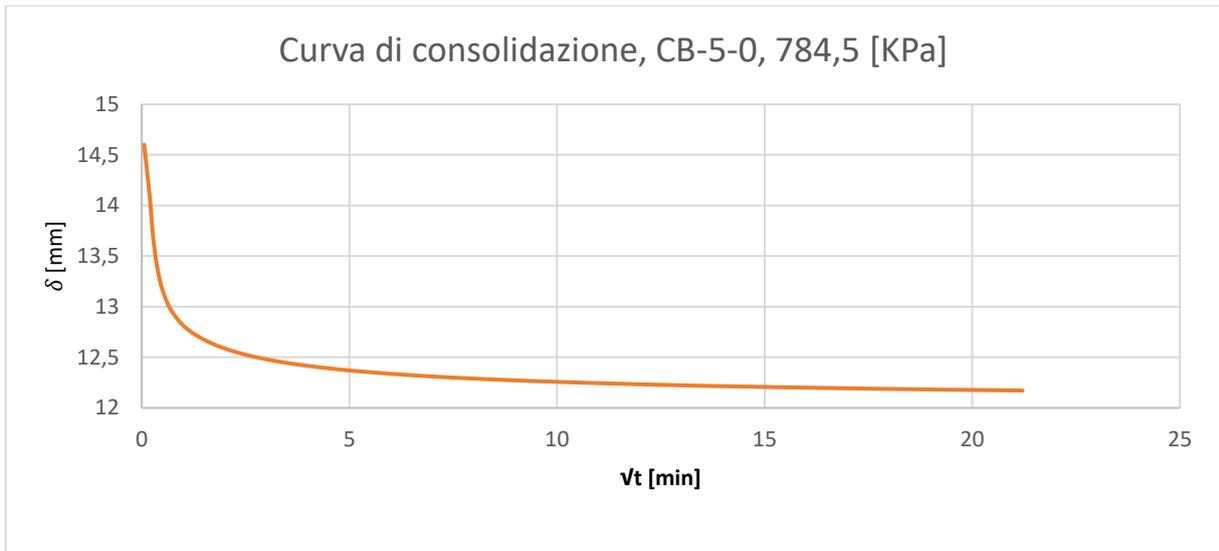
*Appendice, Fig. 55. Curva di consolidazione della miscela CB-5-0 per uno step di carico di 98,1 KPa.*



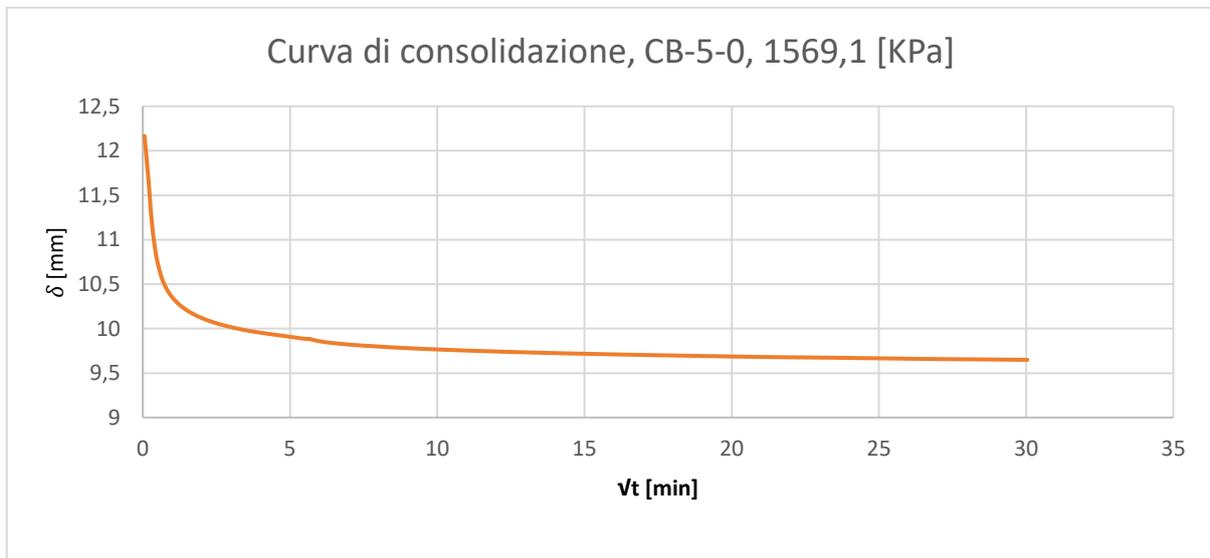
*Appendice, Fig. 56. Curva di consolidazione della miscela CB-5-0 per uno step di carico di 196,1 KPa.*



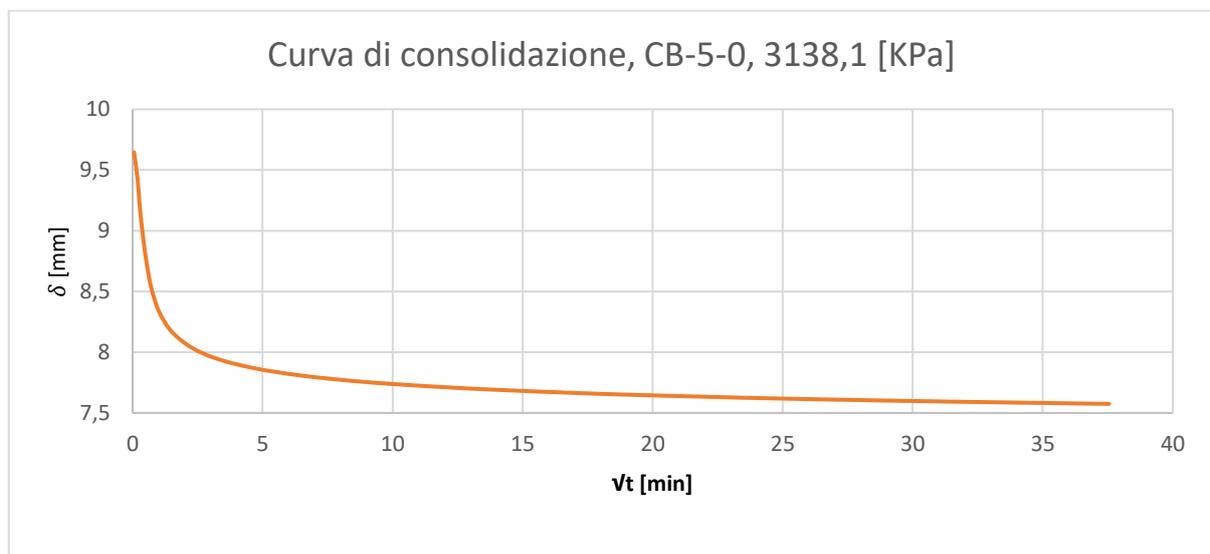
*Appendice, Fig. 57. Curva di consolidazione della miscela CB-5-0 per uno step di carico di 392,3 KPa.*



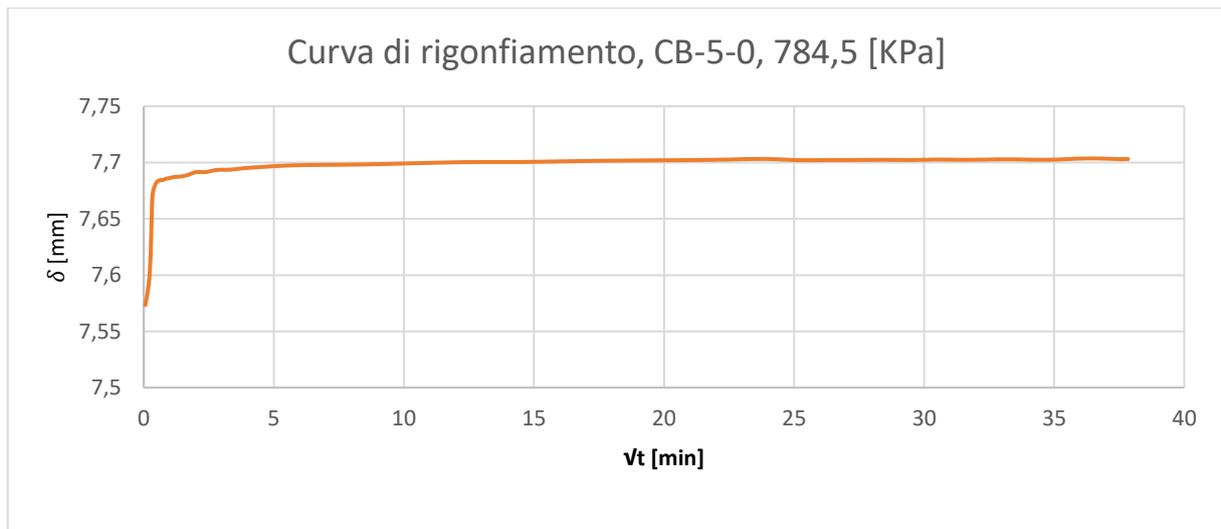
*Appendice, Fig. 58. Curva di consolidazione della miscela CB-5-0 per uno step di carico di 784,5 KPa.*



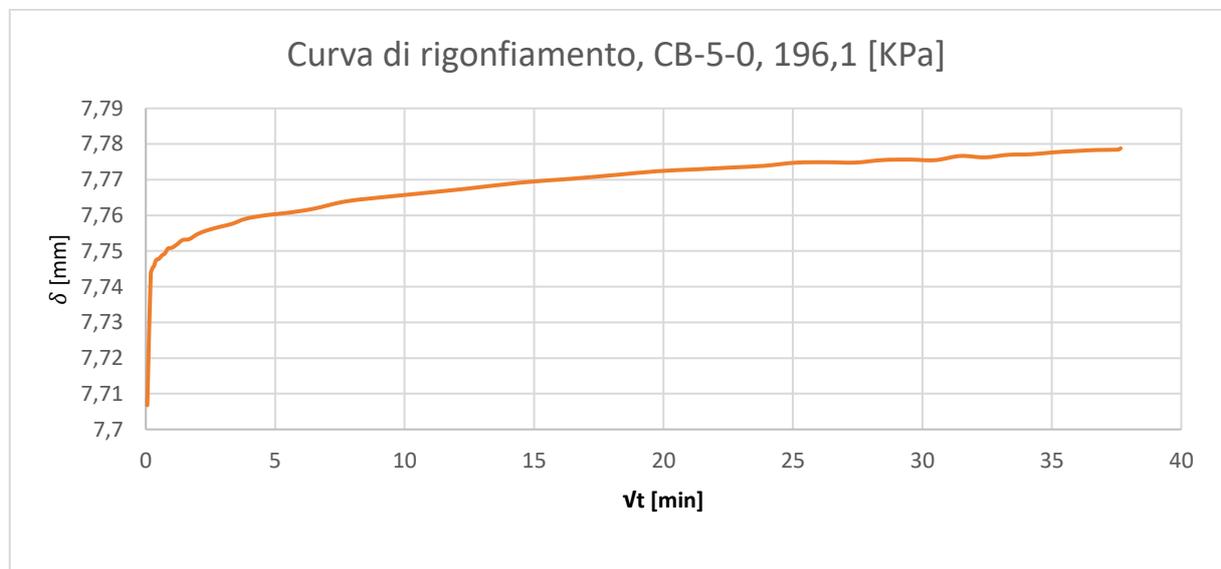
*Appendice, Fig. 59. Curva di consolidazione della miscela CB-5-0 per uno step di carico di 1569,1 KPa.*



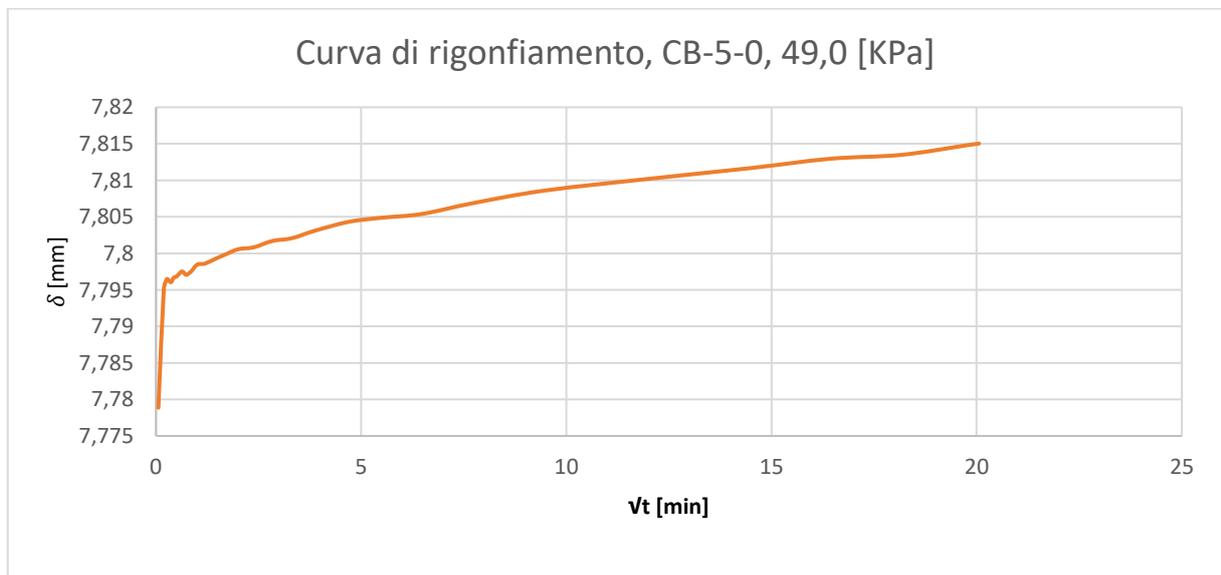
*Appendice, Fig. 60. Curva di consolidazione della miscela CB-5-0 per uno step di carico di 3138,1 KPa.*



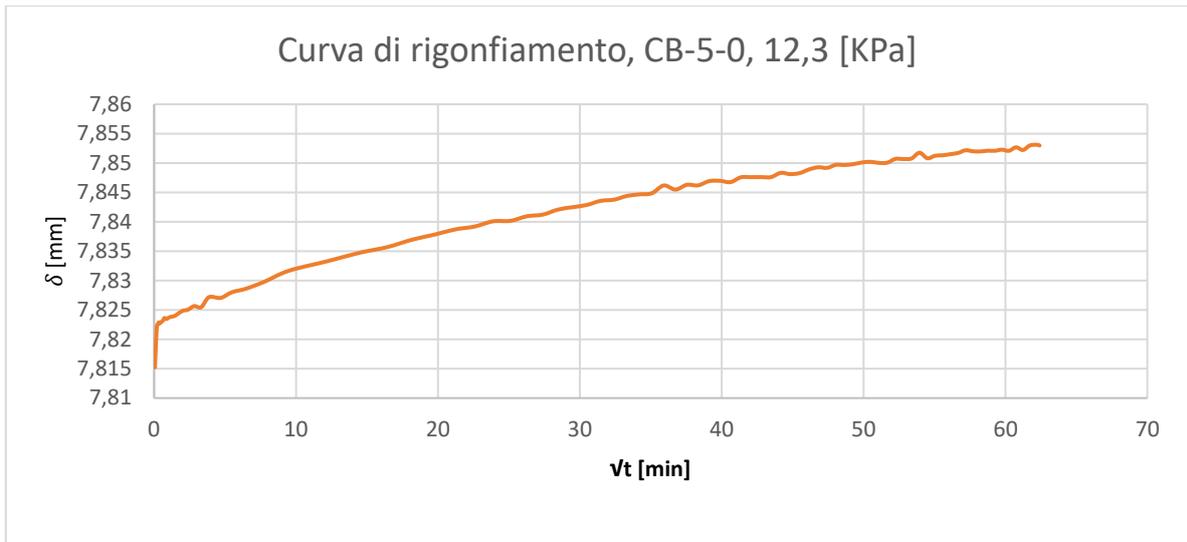
Appendice, Fig. 61. Curva di rigonfiamento della miscela CB-5-0 per uno step di carico di 784,5 KPa.



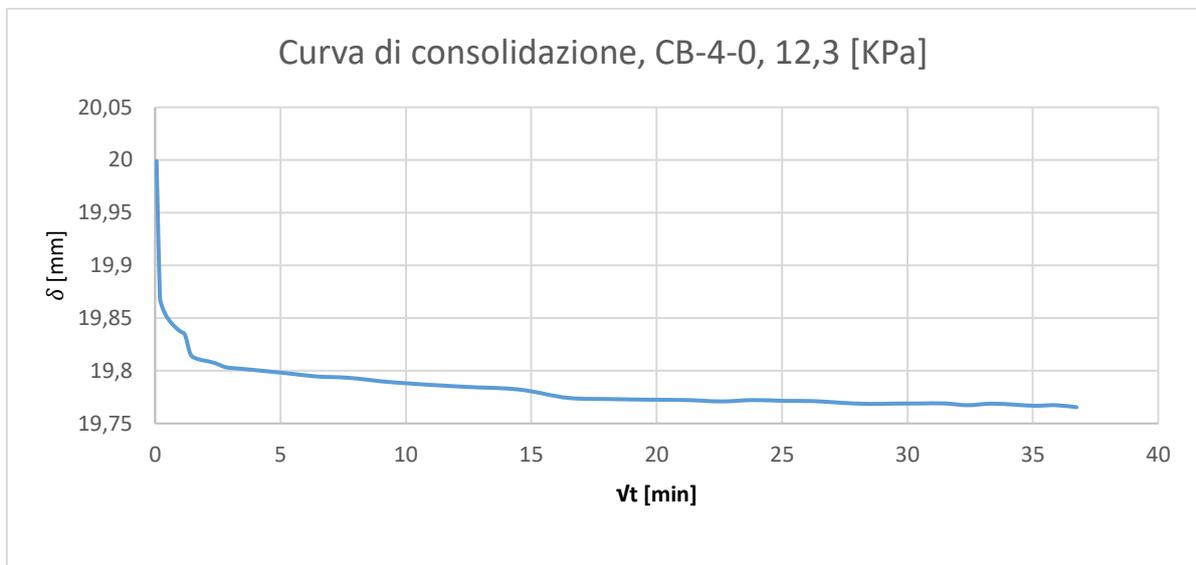
Appendice, Fig. 62. Curva di rigonfiamento della miscela CB-5-0 per uno step di carico di 196,1 KPa.



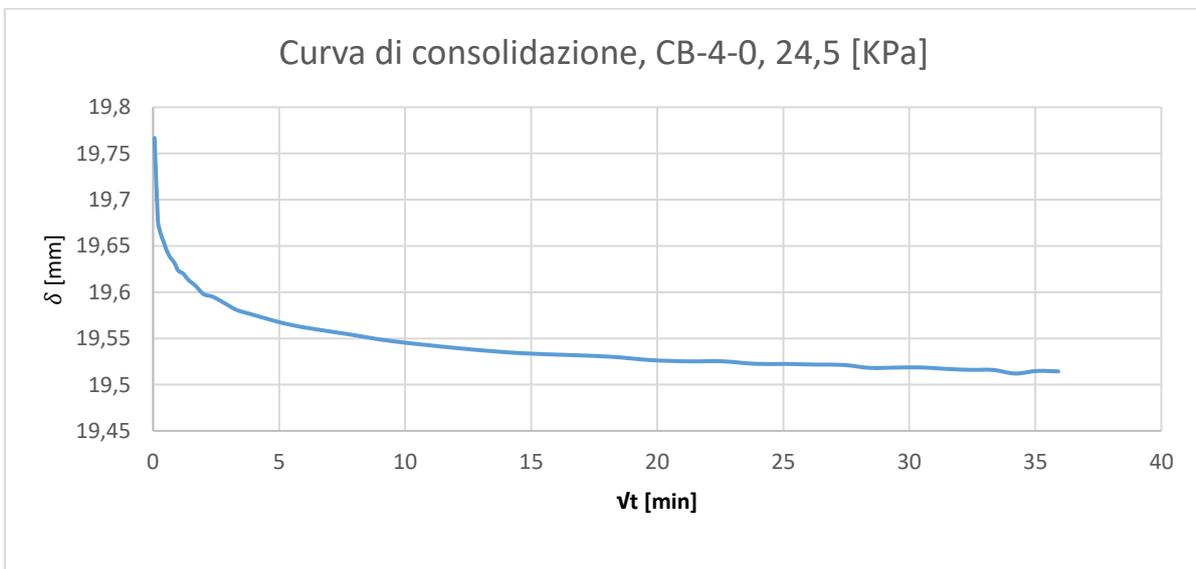
Appendice, Fig. 63. Curva di rigonfiamento della miscela CB-5-0 per uno step di carico di 49,0 KPa.



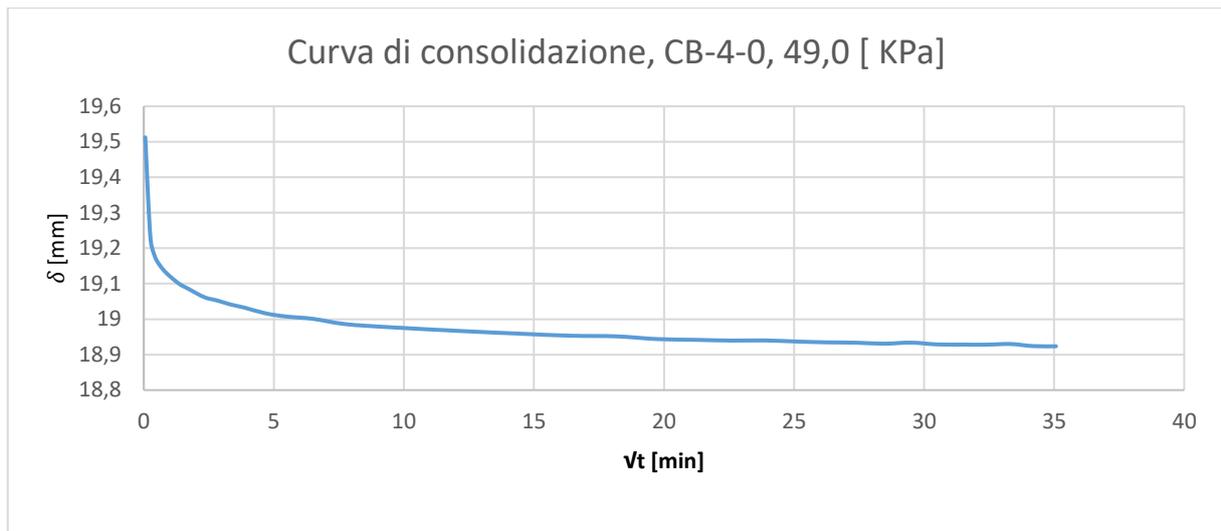
Appendice, Fig. 64. Curva di rigonfiamento della miscela CB-5-0 per uno step di carico di 12,35 KPa.



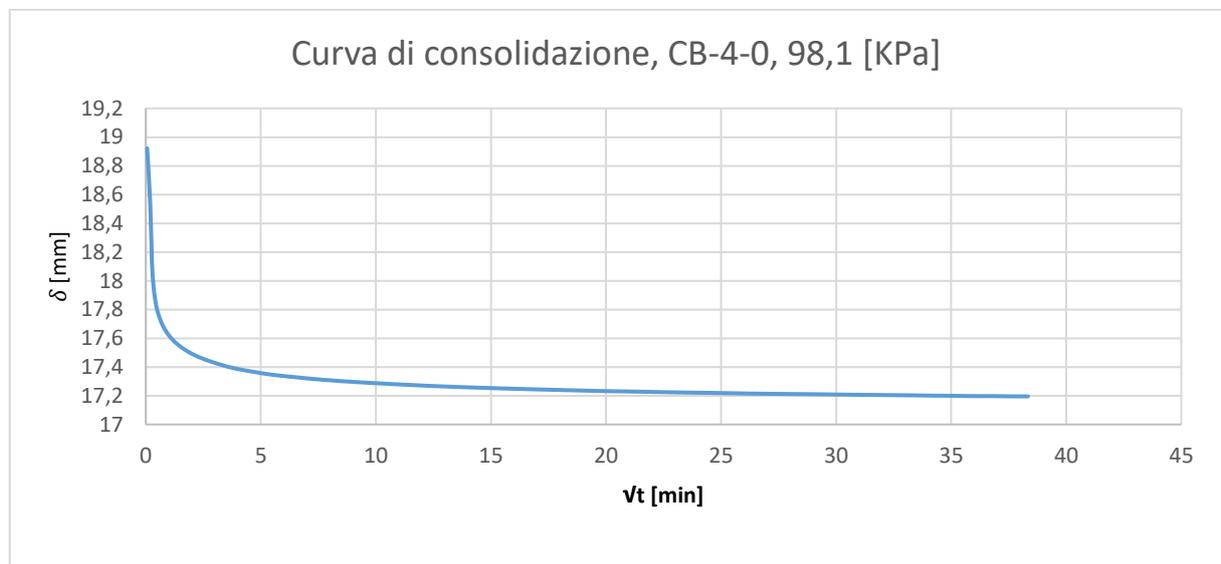
Appendice, Fig. 65. Curva di consolidazione della miscela CB-4-0 per uno step di carico di 12,3 KPa.



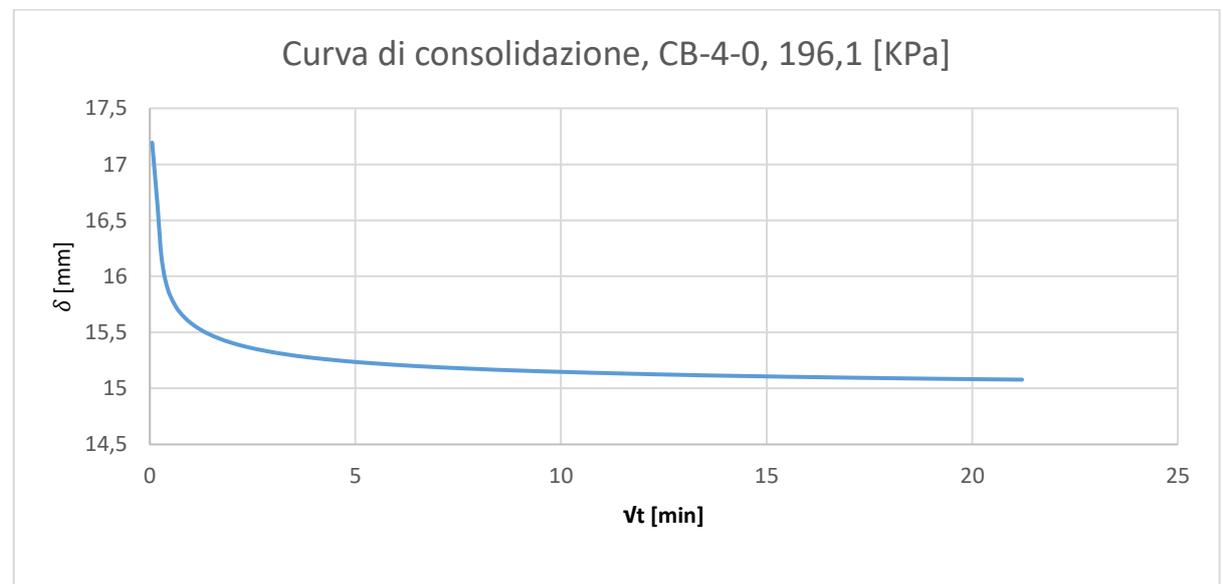
Appendice, Fig. 66. Curva di consolidazione della miscela CB-4-0 per uno step di carico di 24,5 KPa.



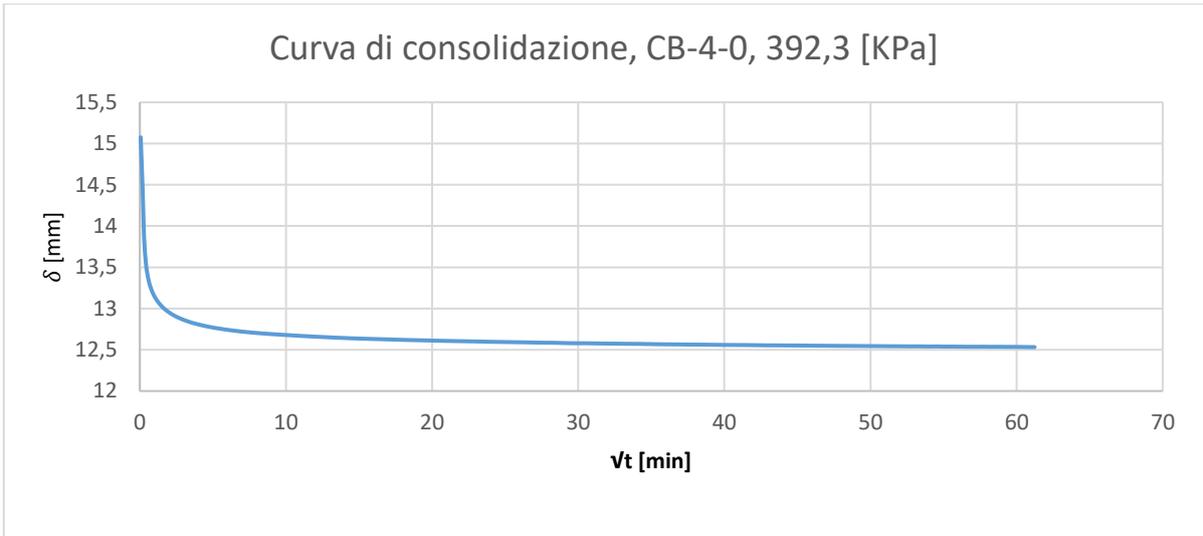
Appendice, Fig. 67. Curva di consolidazione della miscela CB-4-0 per uno step di carico di 49,0 KPa.



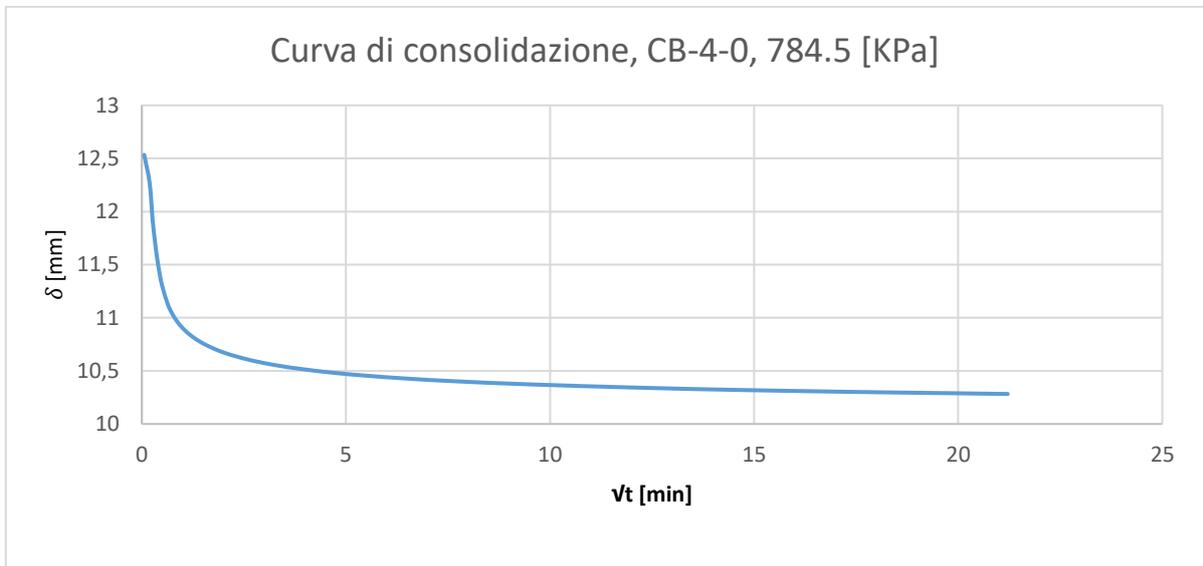
Appendice, Fig. 68. Curva di consolidazione della miscela CB-4-0 per uno step di carico di 98,1 KPa.



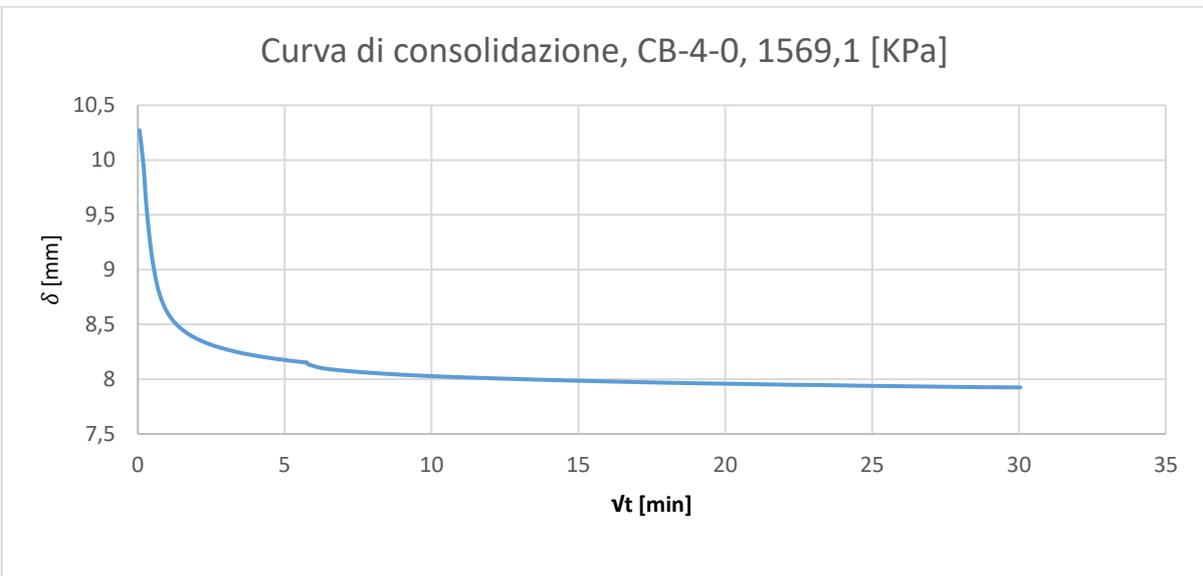
Appendice, Fig. 69. Curva di consolidazione della miscela CB-4-0 per uno step di carico di 196,1 KPa.



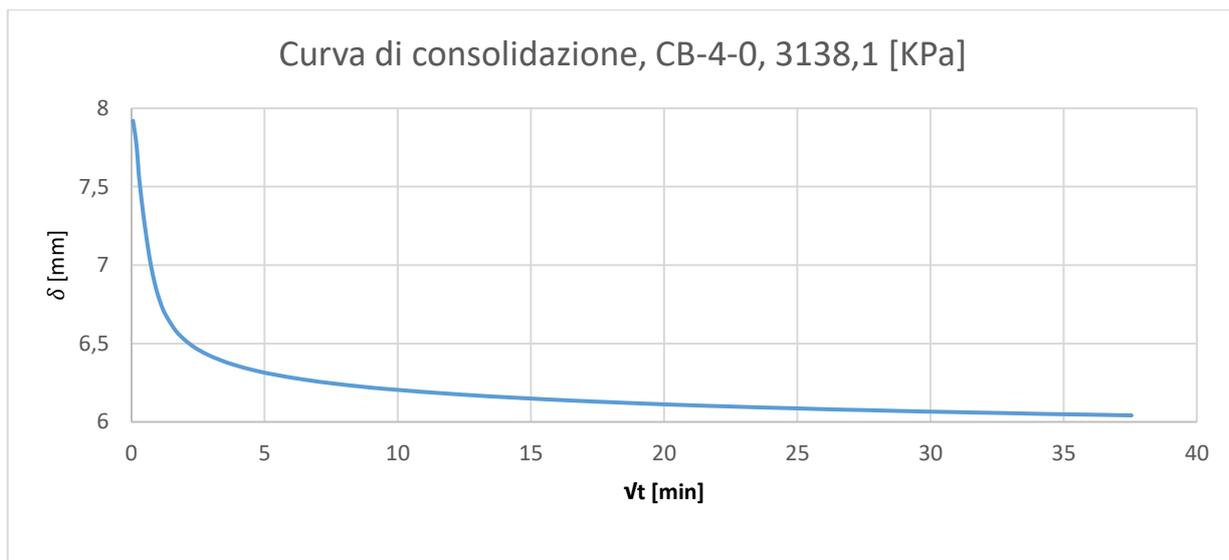
*Appendice, Fig. 70. Curva di consolidazione della miscela CB-4-0 per uno step di carico di 392,3 KPa.*



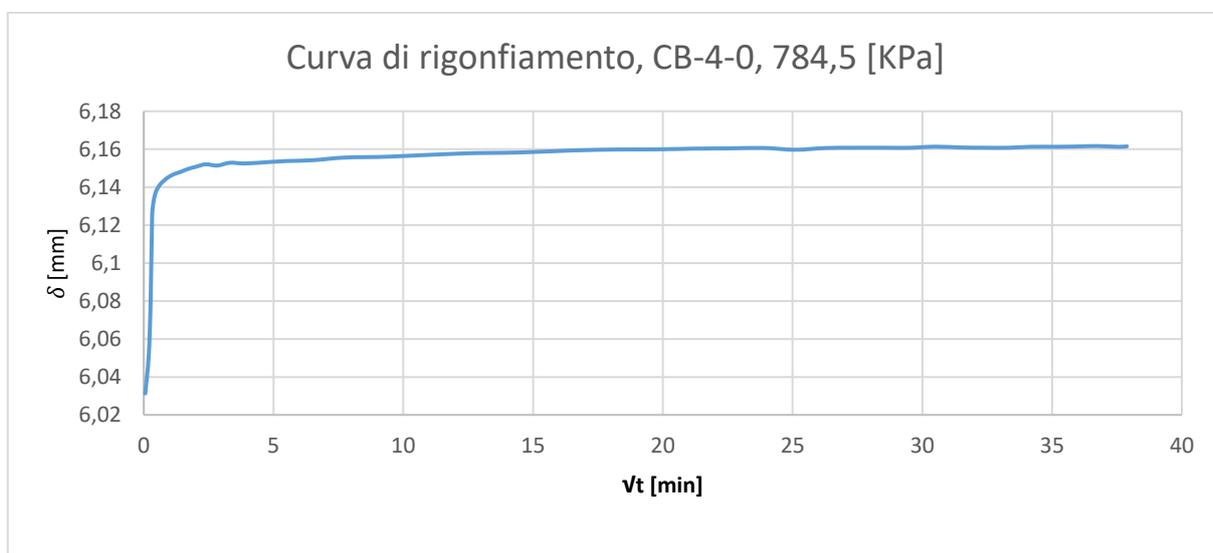
*Appendice, Fig. 71. Curva di consolidazione della miscela CB-4-0 per uno step di carico di 784,5 KPa.*



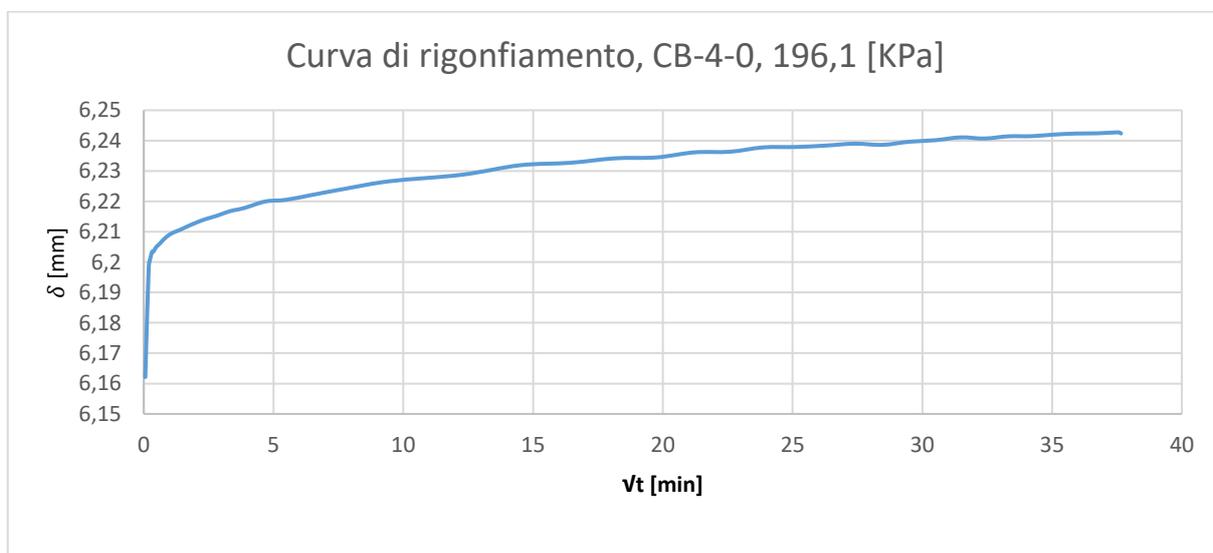
*Appendice, Fig. 72. Curva di consolidazione della miscela CB-4-0 per uno step di carico di 1569,1 KPa.*



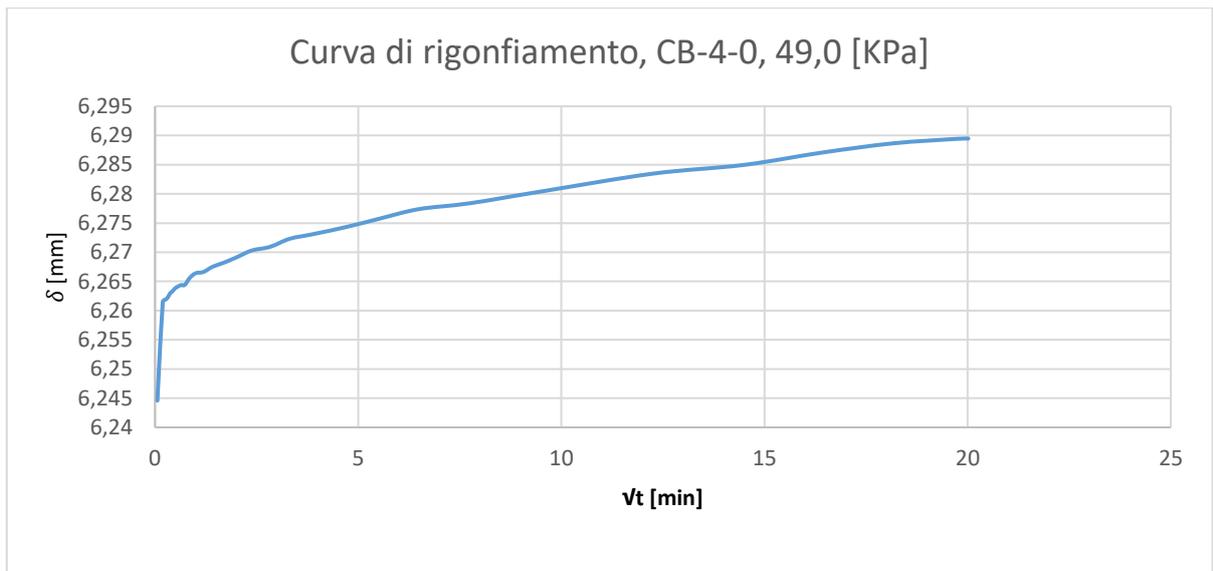
Appendice, Fig. 73. Curva di consolidazione della miscela CB-4-0 per uno step di carico di 3138,1 KPa.



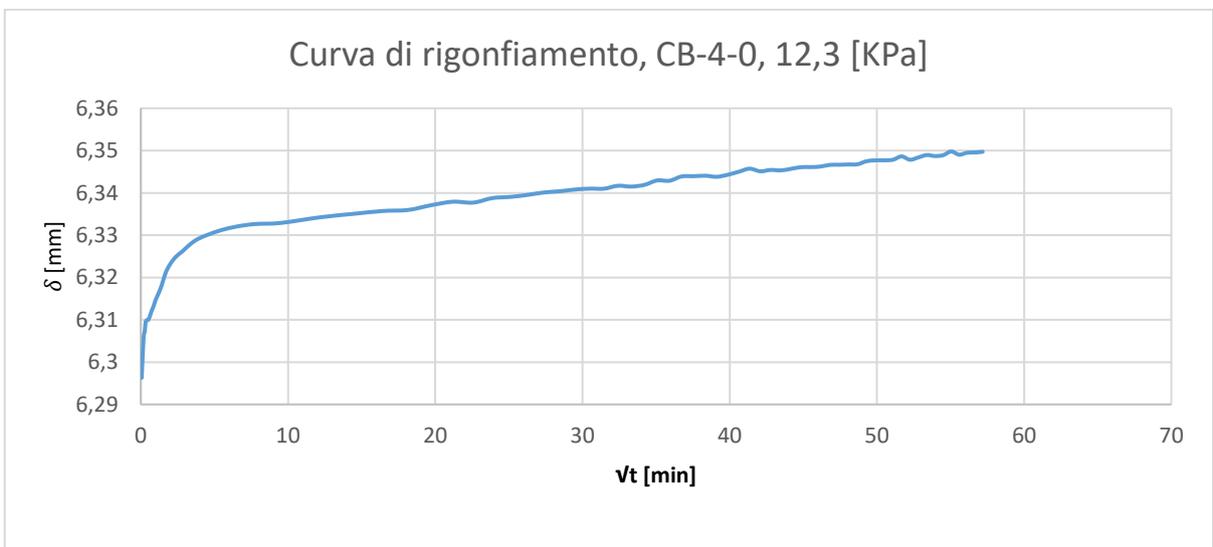
Appendice, Fig. 74. Curva di rigonfiamento della miscela CB-5-0 per uno step di carico di 784,5 KPa.



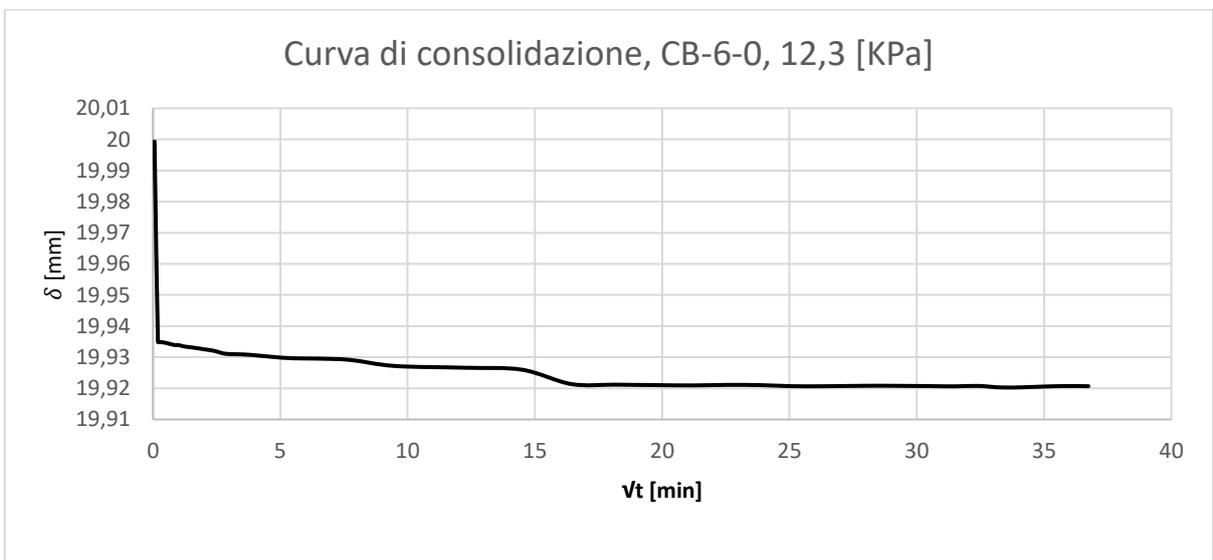
Appendice, Fig. 75. Curva di rigonfiamento della miscela CB-5-0 per uno step di carico di 196,1 KPa.



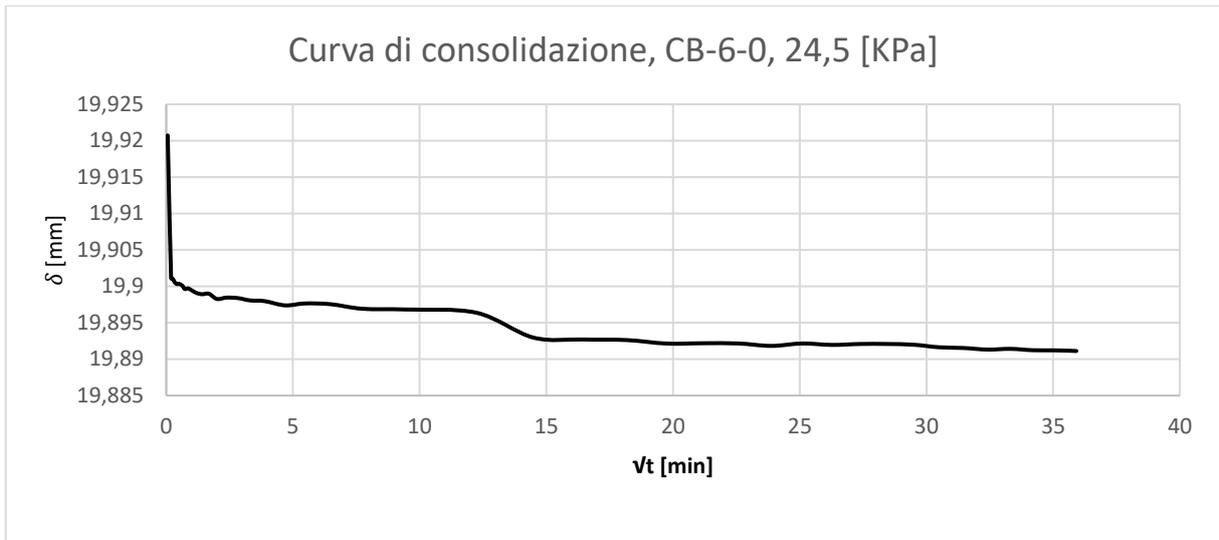
Appendice, Fig. 76. Curva di rigonfiamento della miscela CB-5-0 per uno step di carico di 49,0 KPa.



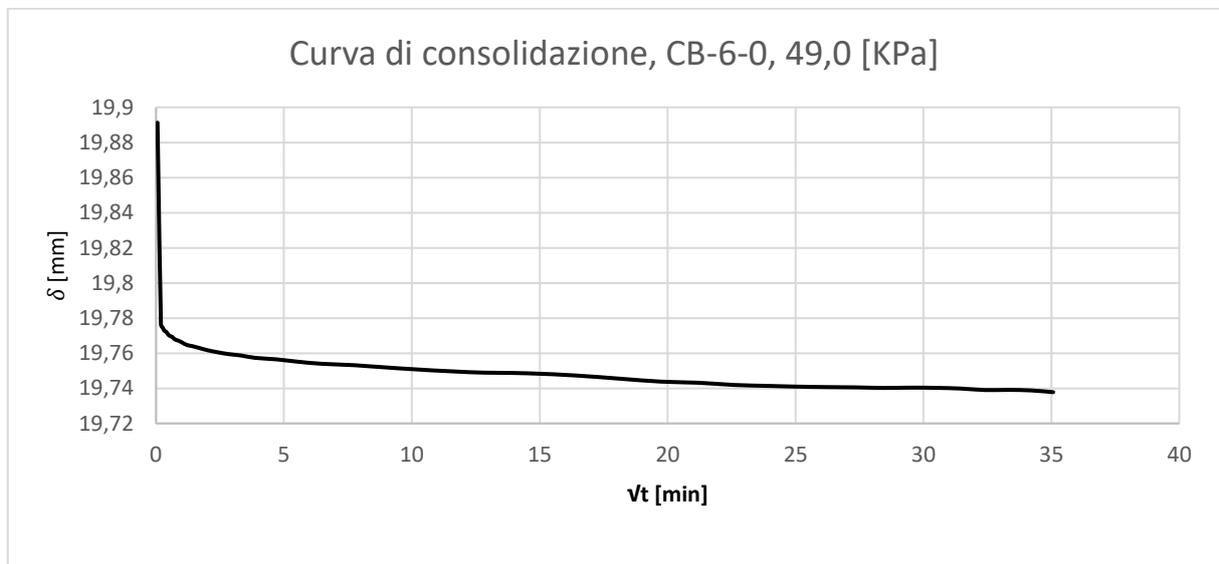
Appendice, Fig. 77. Curva di rigonfiamento della miscela CB-5-0 per uno step di carico di 12,3 KPa.



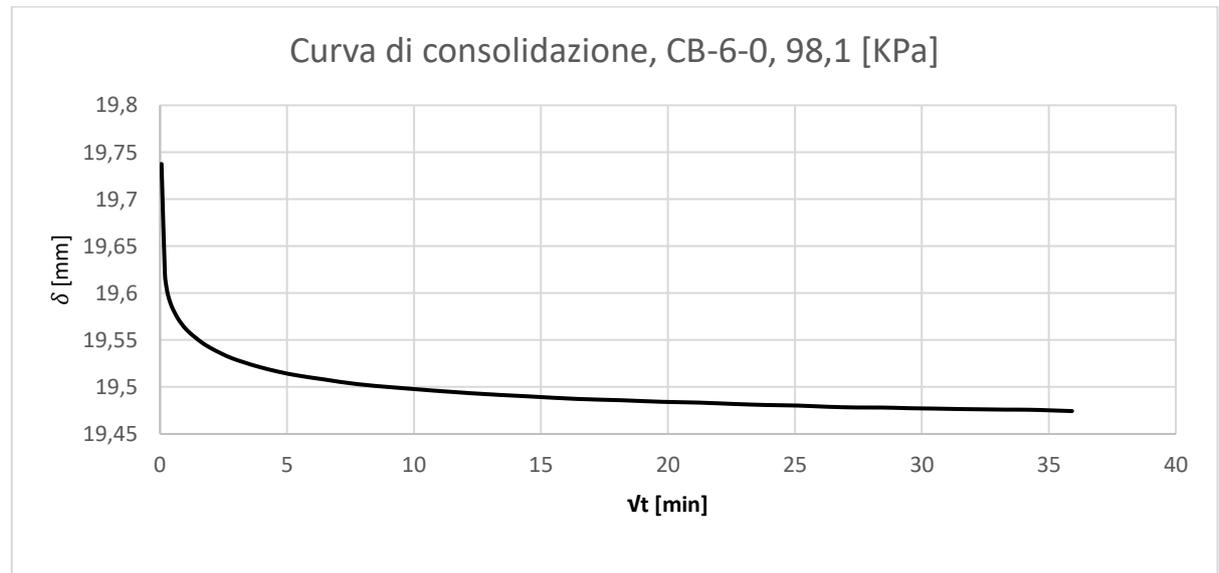
Appendice, Fig. 78. Curva di consolidazione della miscela CB-6-0 per uno step di carico di 12,3 KPa.



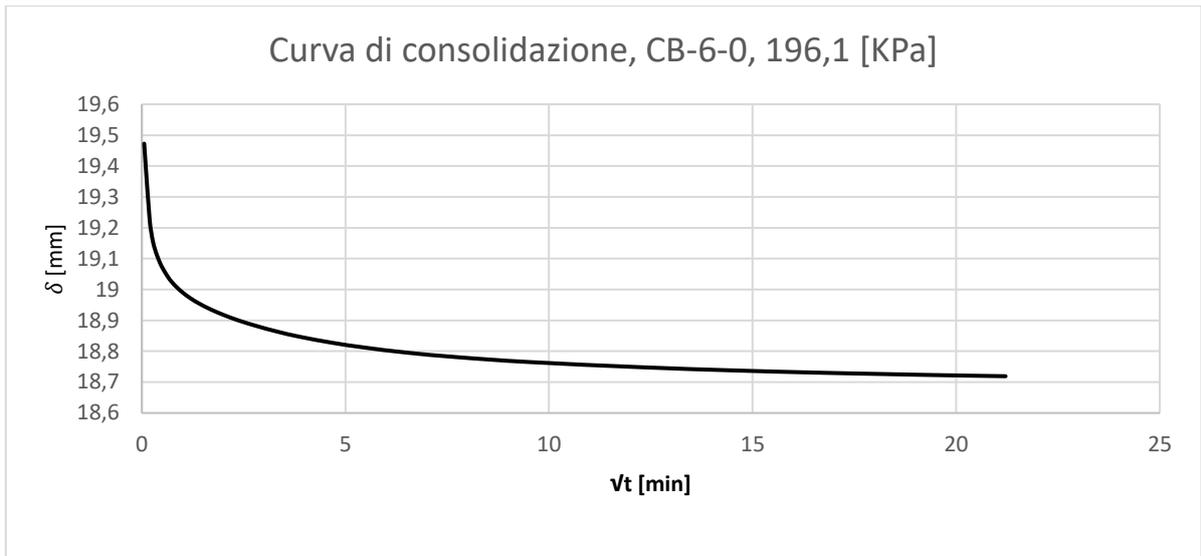
Appendice, Fig. 79. Curva di consolidazione della miscela CB-6-0 per uno step di carico di 24,5 KPa.



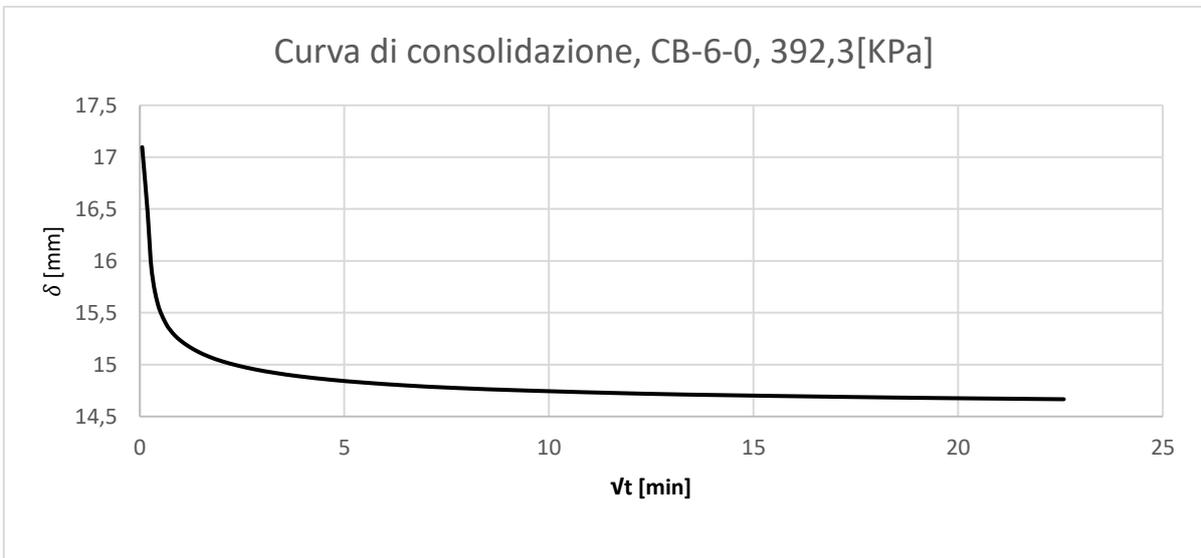
Appendice, Fig. 80. Curva di consolidazione della miscela CB-6-0 per uno step di carico di 49,0 KPa.



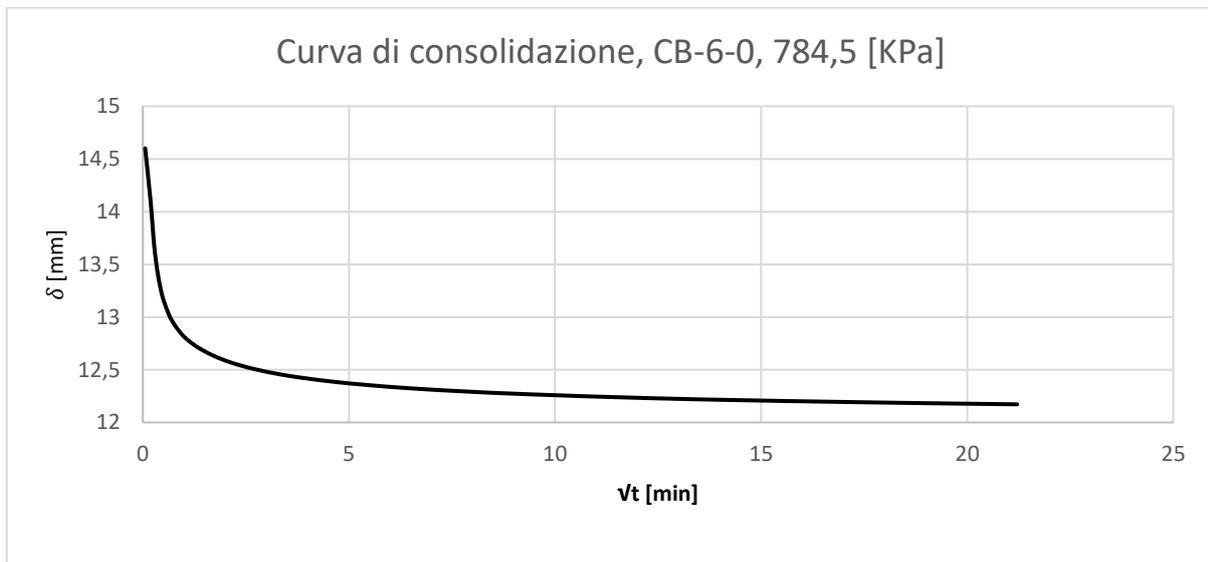
Appendice, Fig. 81. Curva di consolidazione della miscela CB-6-0 per uno step di carico di 98,1 KPa.



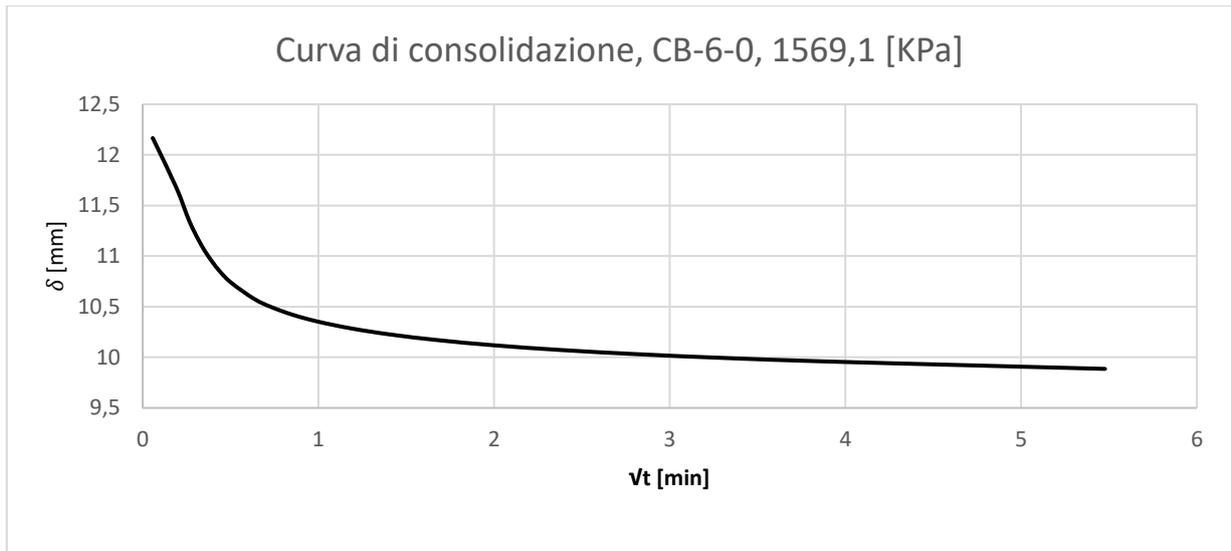
*Appendice, Fig. 82. Curva di consolidazione della miscela CB-6-0 per uno step di carico di 196,1 KPa.*



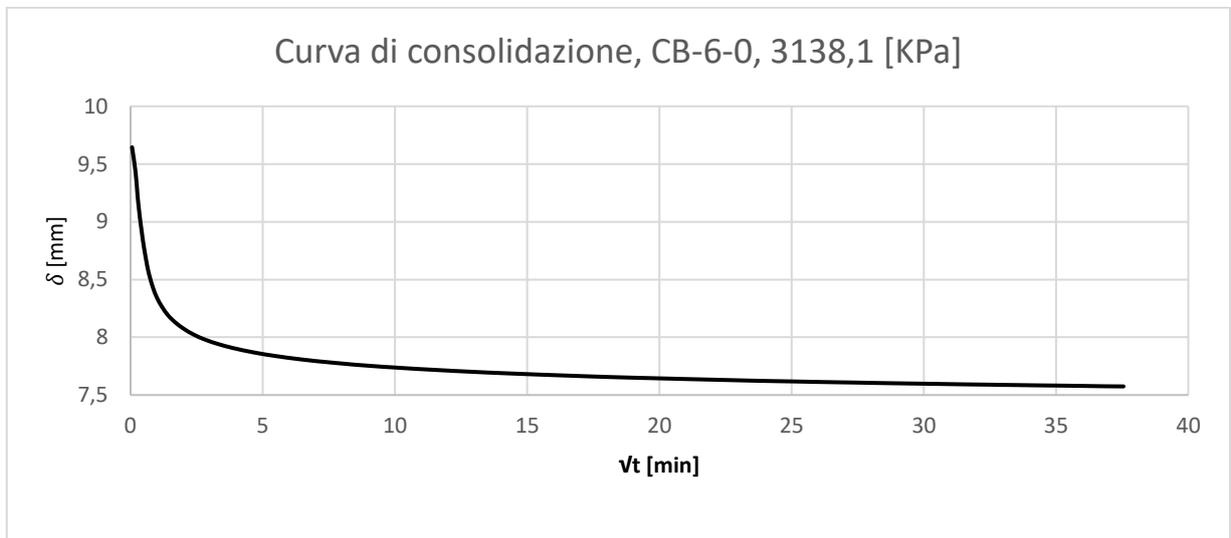
*Appendice, Fig. 83. Curva di consolidazione della miscela CB-6-0 per uno step di carico di 392,3 KPa.*



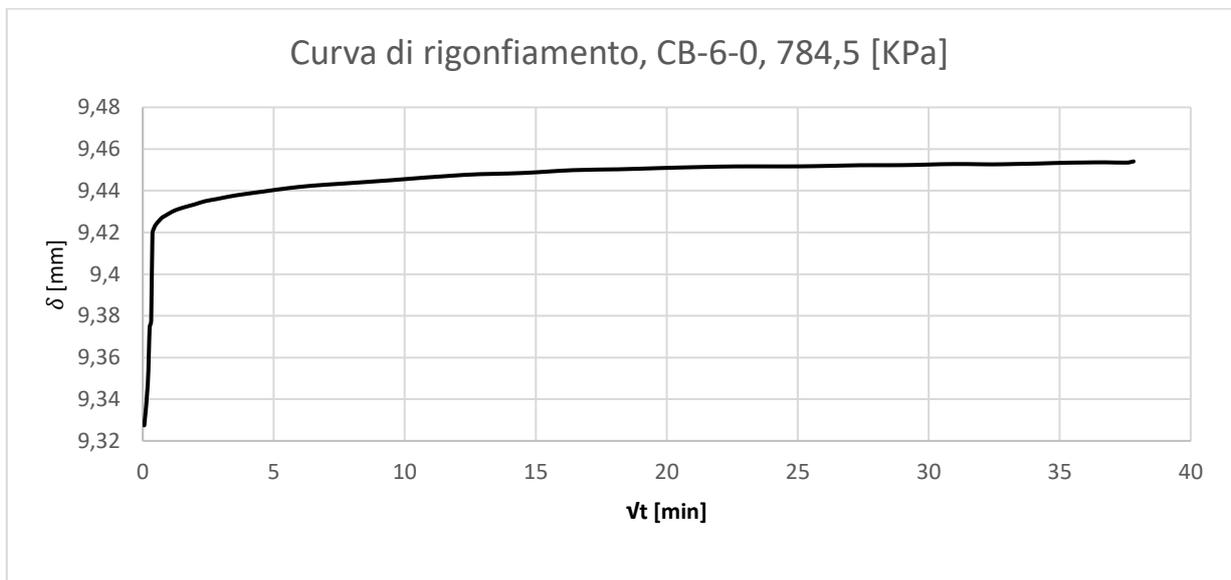
*Appendice, Fig. 84. Curva di consolidazione della miscela CB-6-0 per uno step di carico di 784,5 KPa.*



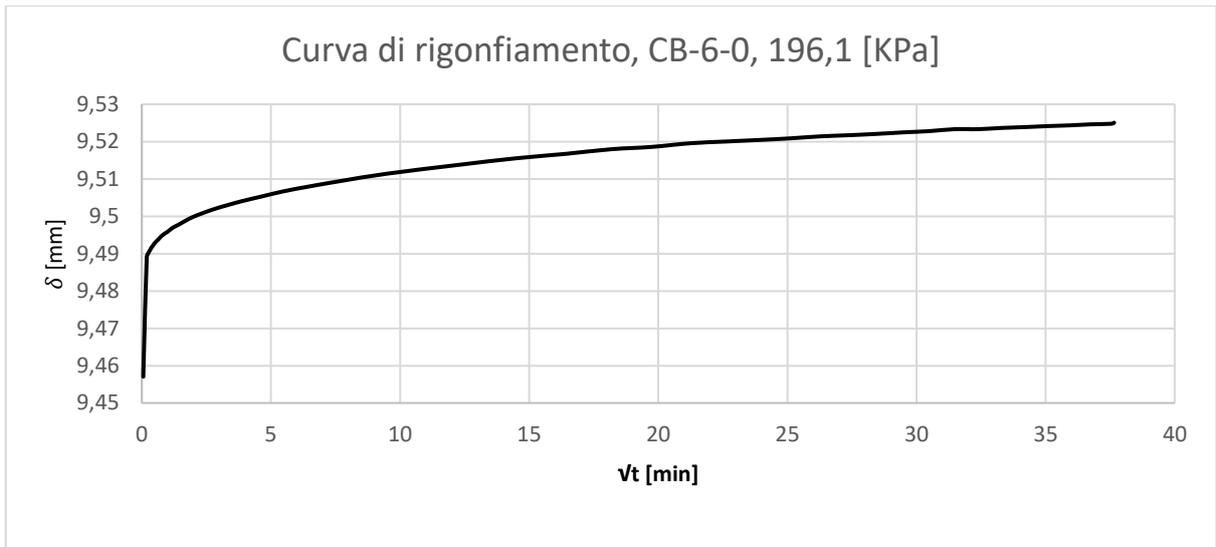
*Appendice, Fig. 85. Curva di consolidazione della miscela CB-6-0 per uno step di carico di 1569,1 KPa.*



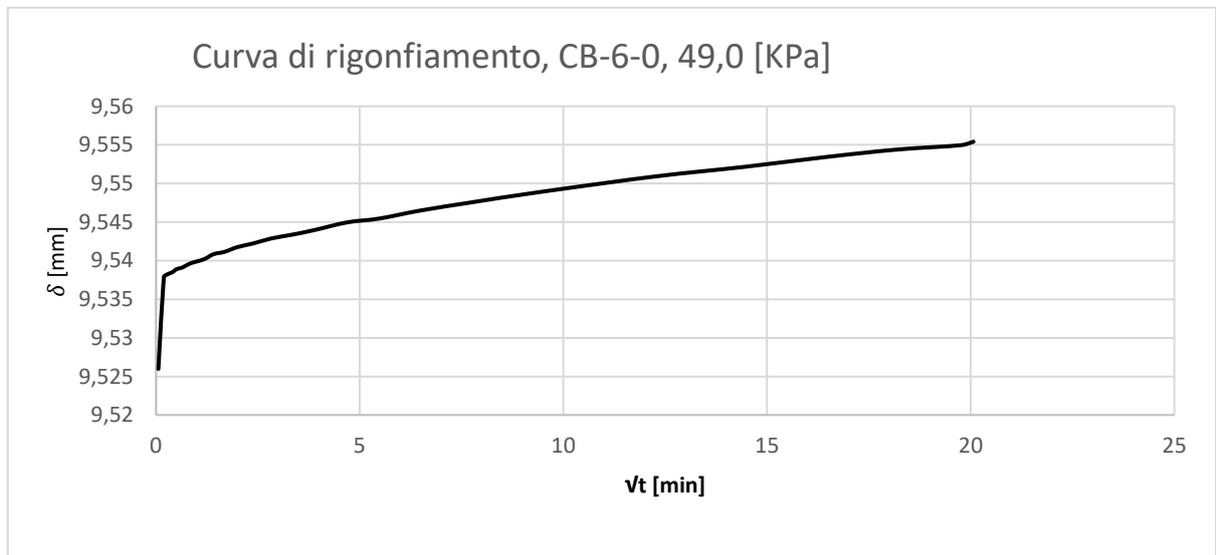
*Appendice, Fig. 86. Curva di consolidazione della miscela CB-6-0 per uno step di carico di 3138,1 KPa.*



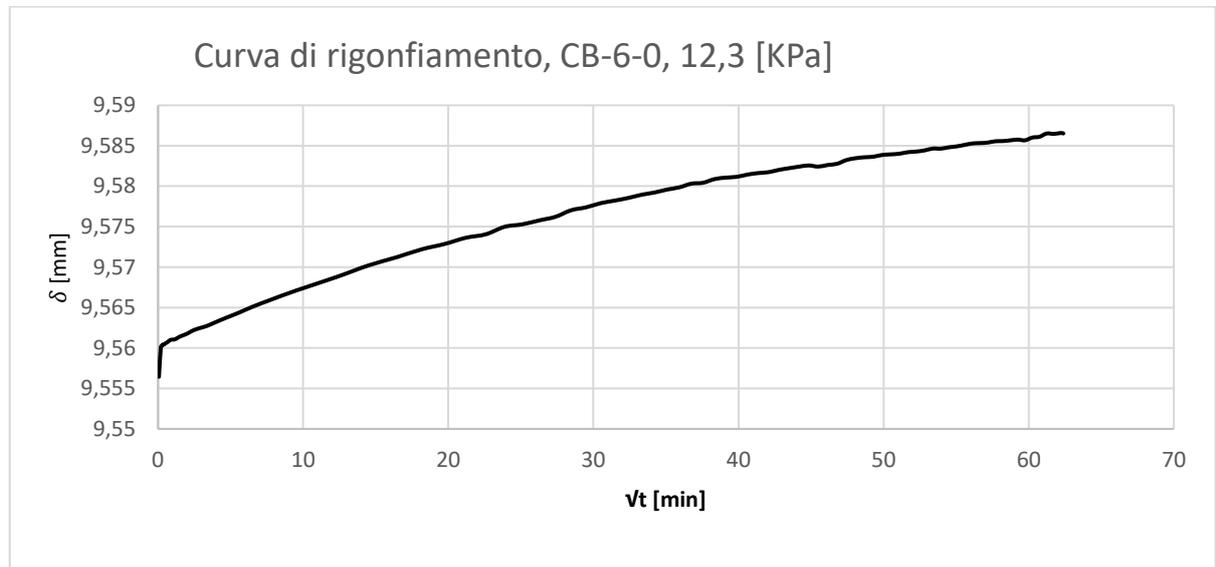
*Appendice, Fig. 87. Curva di rigonfiamento della miscela CB-6-0 per uno step di carico di 784,5 KPa.*



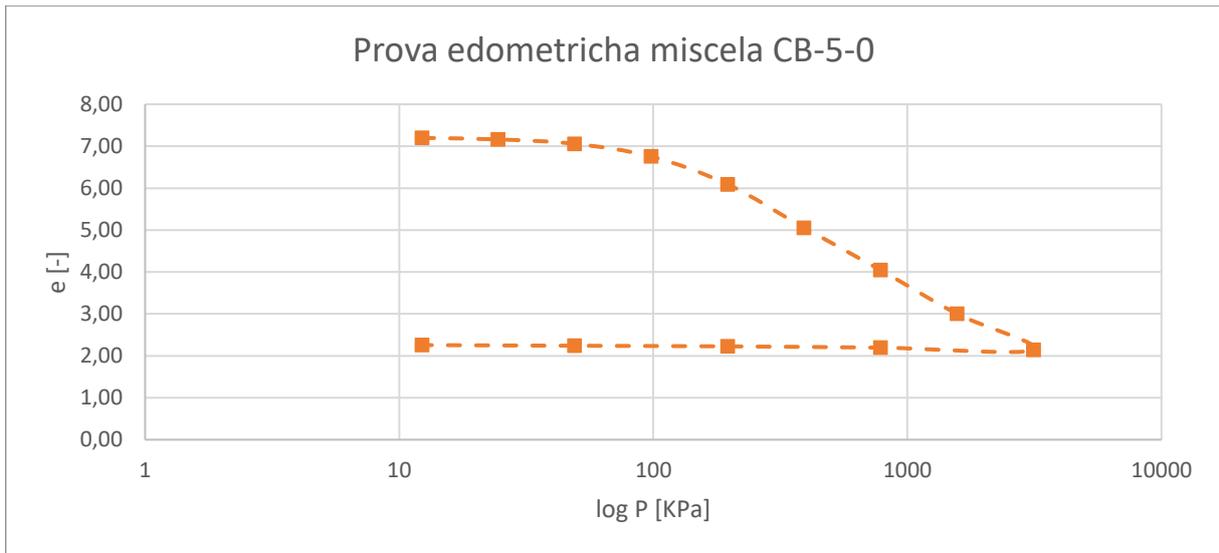
*Appendice, Fig. 88. Curva di rigonfiamento della miscela CB-6-0 per uno step di carico di 196,1 KPa.*



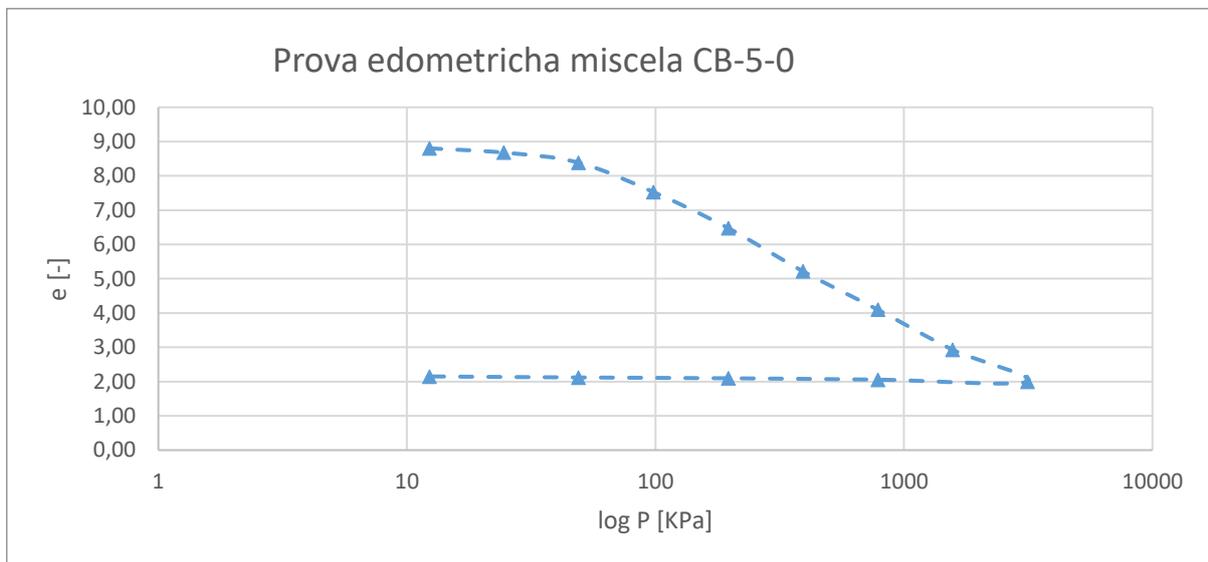
*Appendice, Fig. 89. Curva di rigonfiamento della miscela CB-6-0 per uno step di carico di 49,0 KPa.*



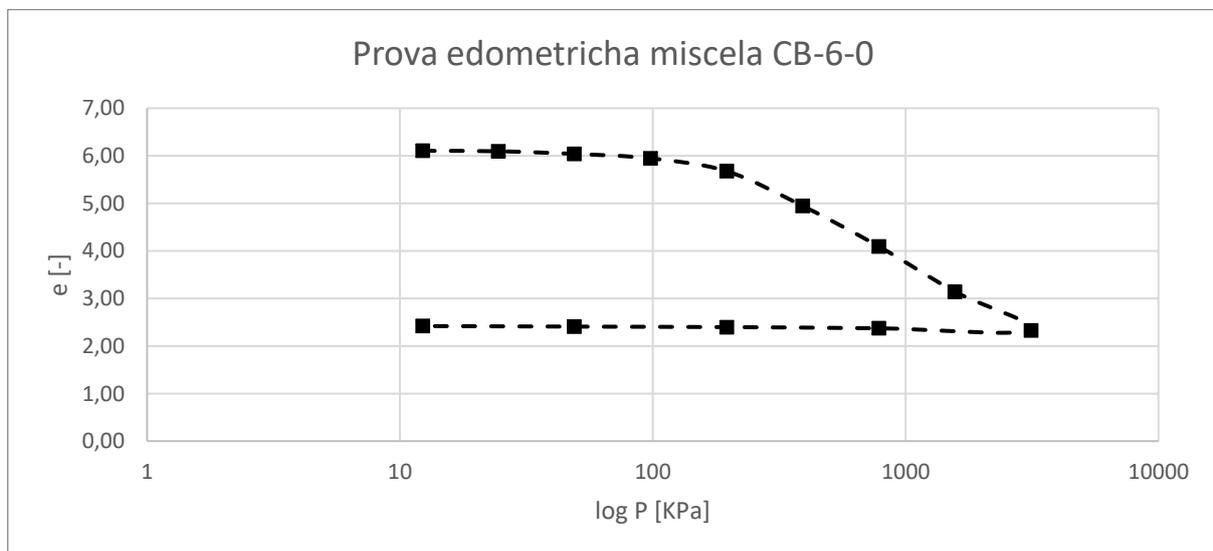
*Appendice, Fig. 90. Curva di rigonfiamento della miscela CB-6-0 per uno step di carico di 12,3 KPa.*



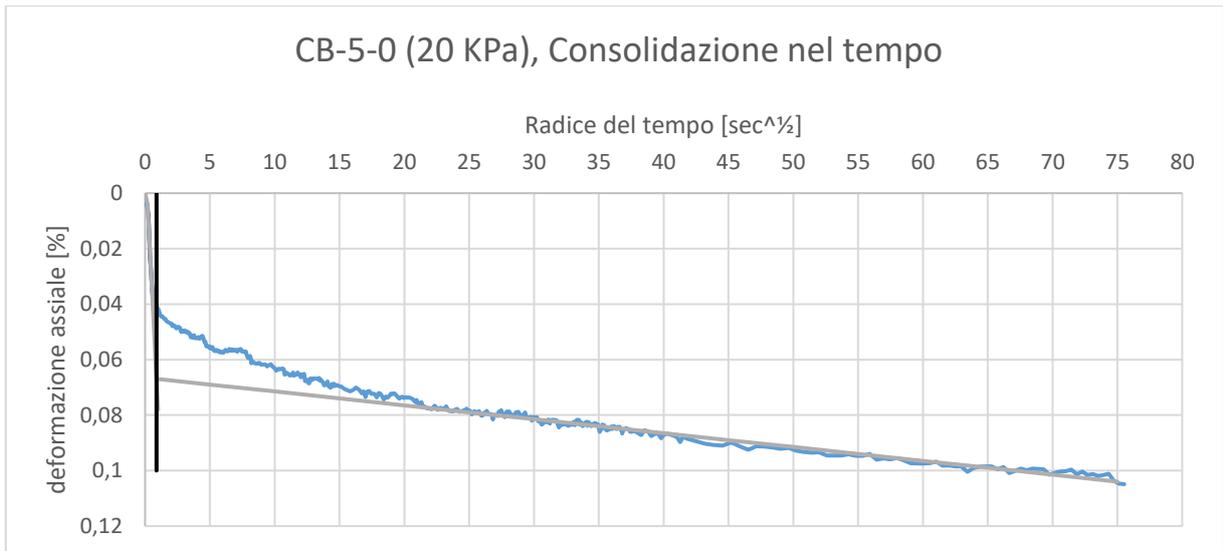
Appendice, Fig. 91. Curva edometrica della miscela CB-5-0.



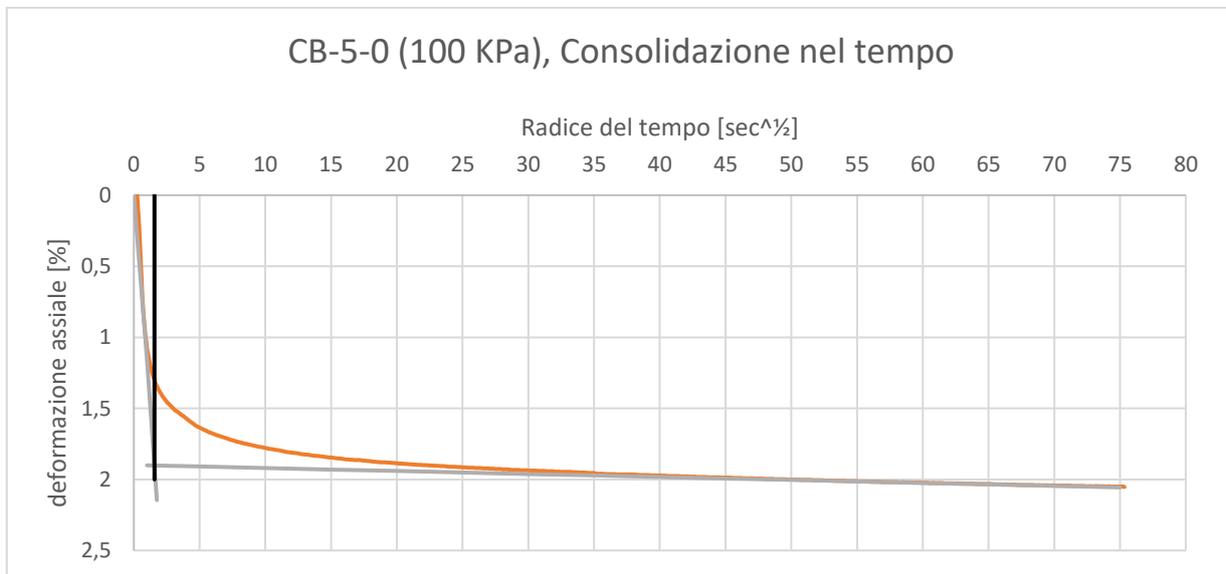
Appendice, Fig. 92. Curva edometrica della miscela CB-4-0.



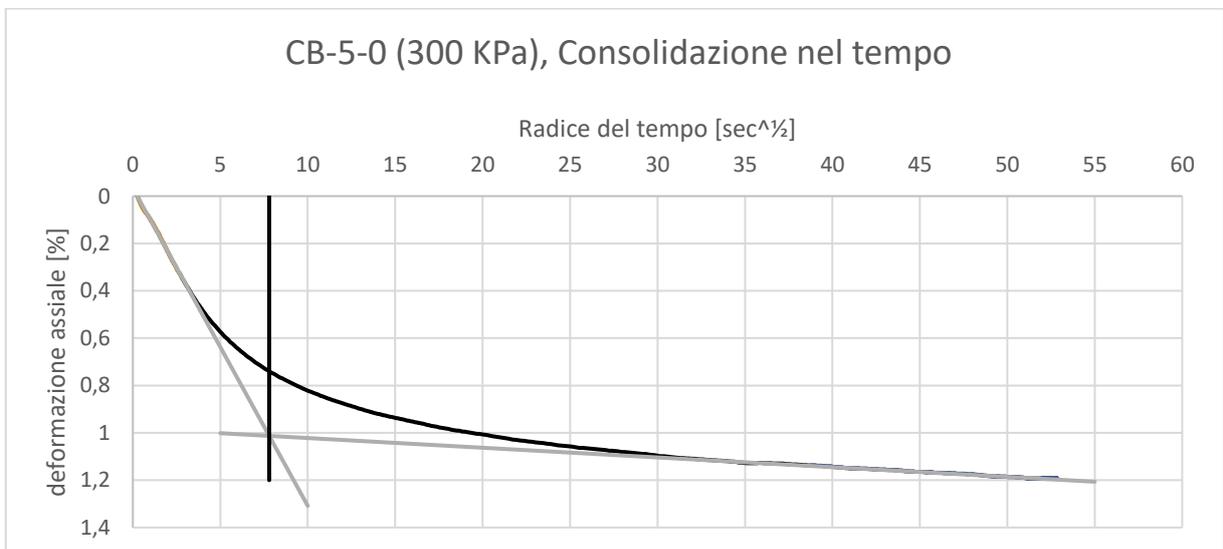
Appendice, Fig. 93. Curva edometrica della miscela CB-6-0.



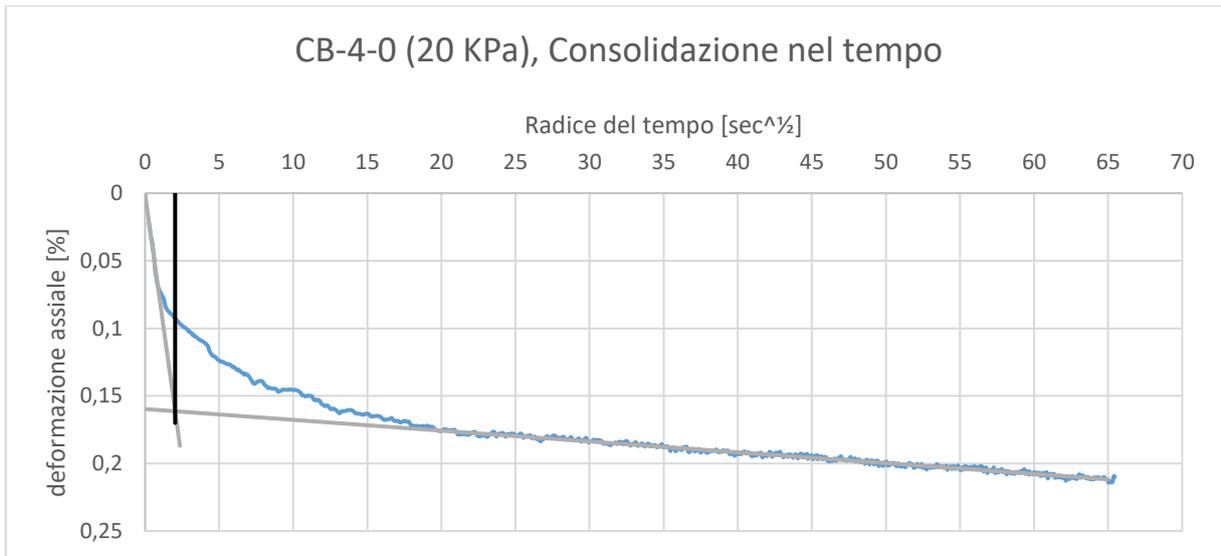
*Appendice, Fig. 94. Ricerca del t100 per la miscela CB-5-0 (20 KPa).*



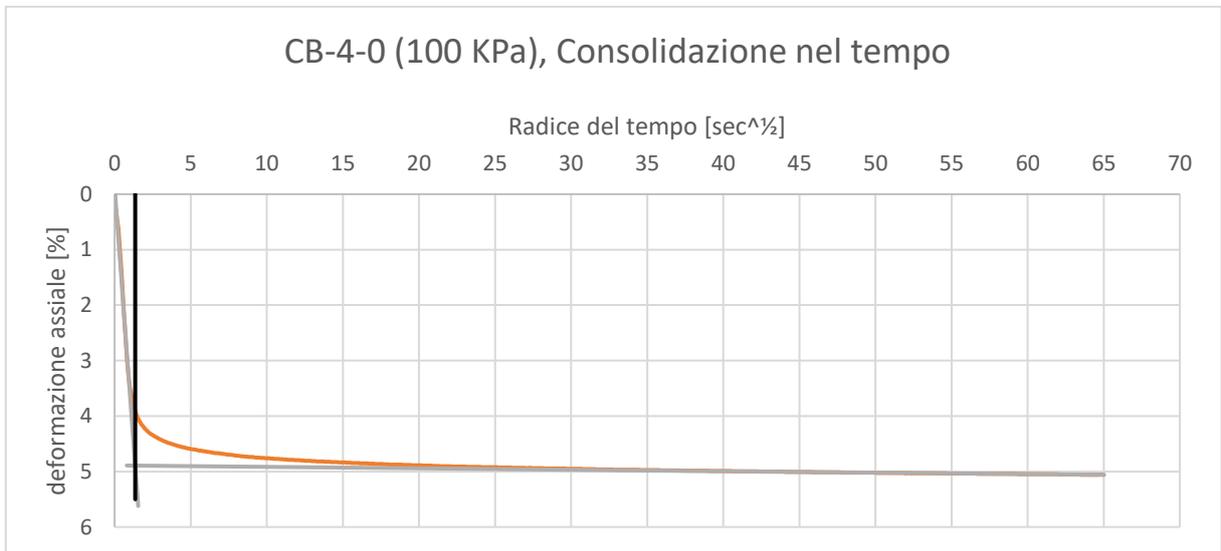
*Appendice, Fig. 95. Ricerca del t100 per la miscela CB-5-0 (100 KPa).*



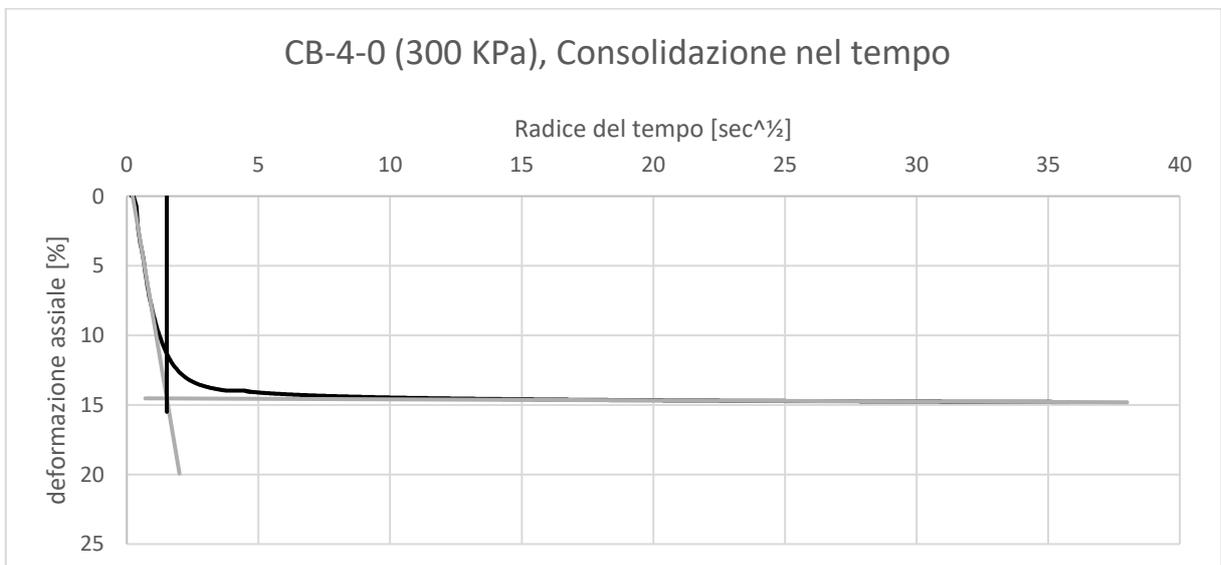
*Appendice, Fig. 96. Ricerca del t100 per la miscela CB-5-0 (300 KPa).*



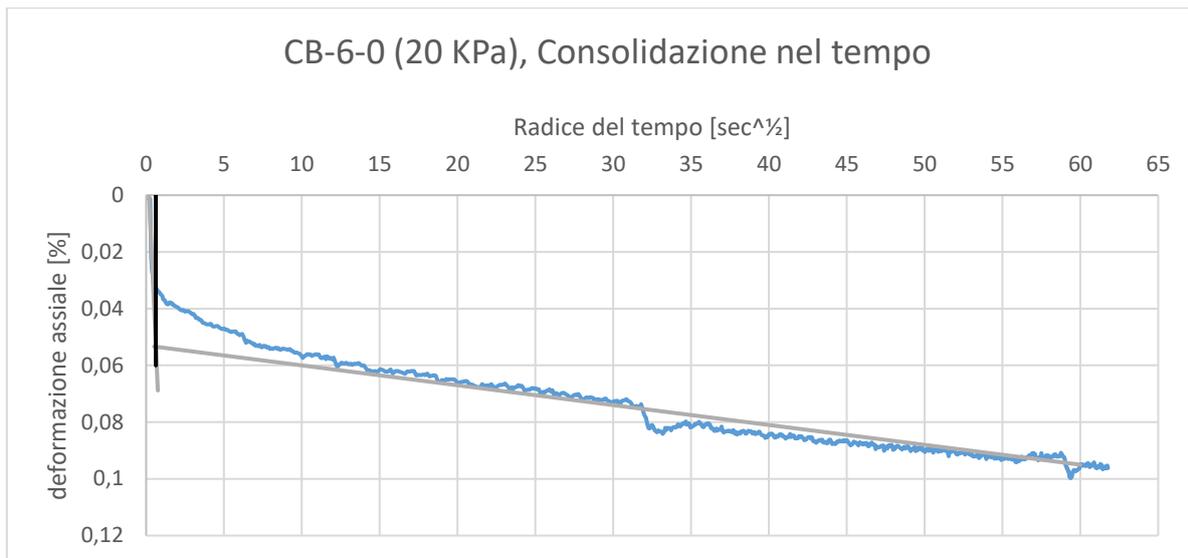
*Appendice, Fig. 97. Ricerca del t<sub>100</sub> per la miscela CB-4-0 (20 KPa).*



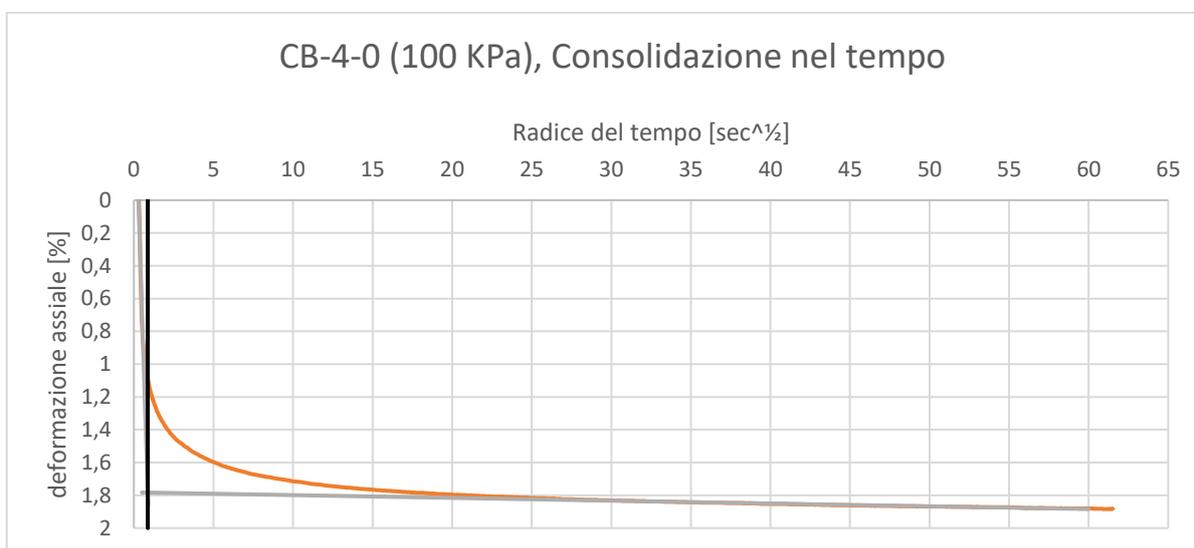
*Appendice, Fig. 98. Ricerca del t<sub>100</sub> per la miscela CB-4-0 (100 KPa).*



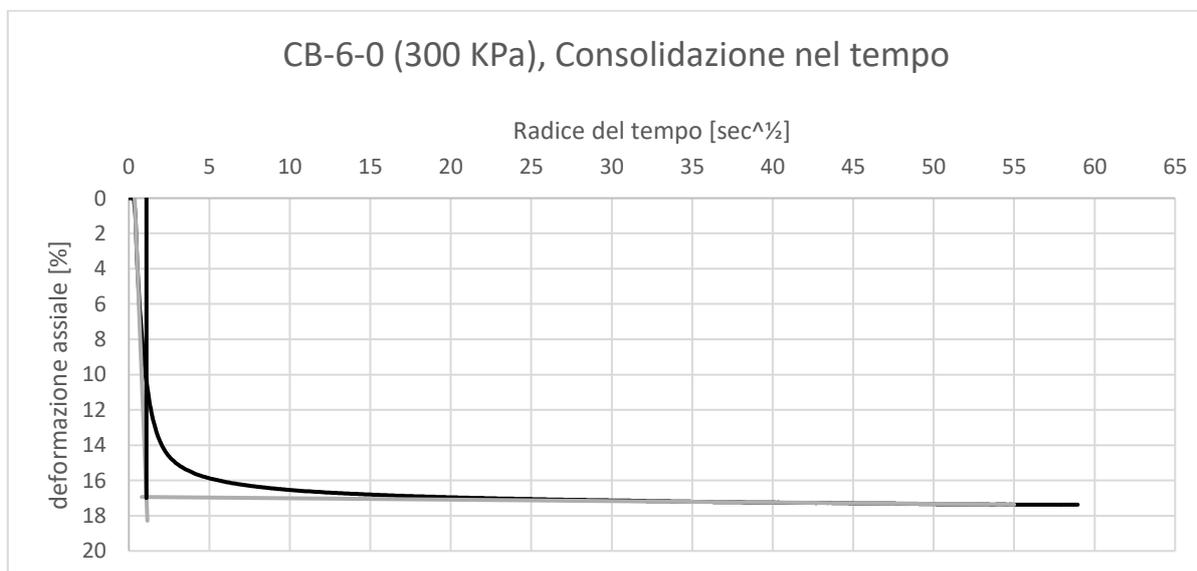
*Appendice, Fig. 99. Ricerca del t<sub>100</sub> per la miscela CB-4-0 (300 KPa).*



Appendice, Fig. 100. Ricerca del  $t_{100}$  per la miscela CB-6-0 (20 KPa).



Appendice, Fig. 101. Ricerca del  $t_{100}$  per la miscela CB-6-0 (100 KPa).



Appendice, Fig. 102. Ricerca del  $t_{100}$  per la miscela CB-6-0 (300 KPa).

## **BIBLIOGRAFIA:**

Alzayani et al. (2016) "Cement Bentonite comparison Environmental Geotechnics".

Carreto et al. (2015) ASCE.

Daniel D.E. (1993). "Pollution Prevention in Landfills Using Engineered Final Covers". General Report. Proc., International Conference Green '93, R.W. Sarsby editor, Bolton, UK, Balkema, Rotterdam.

Daniel D.E., Bowders J.J. (1994). "In Situ Confinement of Contaminated Lands". Atti, Meeting di Ingegneria Geotecnica La geotecnica nella progettazione e costruzione delle discariche controllate. Associazione Politecnici Riuniti, Milazzo (ME), pp. 128-148.

Evans Opdyke (2005) "Strength, permeability and compatibility".

Fralocchi et al. (2015) "Performance of a cement-bentonite cut-off wall in an acid sulphate environment".

Garvin and Hayes (1999) "The chemical compatibility of cement-bentonite cut-off wall material".

Joshi et al. (2010) "Laboratory and in situ tests for long term hydraulic conductivity of a cement-bentonite cutoff wall".

Lancellotta R. (2012) "Geotecnica".

Manassero M. (1995) "A Look at Performance with Particular Emphasis to Cement-Bentonite Slurry Walls". Draft, International Containment Technology Workshop Session: Design, Construction and Performance of Soil- and Cement- Based Vertical Barriers, sponsored by USEPA, USDOE, DuPont, August 29th-31st, Baltimore, Maryland.

Opdyke and Evans (2006) "Slag-cement Bentonite Slurry Walls" - ASCE J.

Pascualini e Fralocchi (2000) "Indagini in sito e in laboratorio nella geotecnica ambientale".

Royal (2018) "Deformation and compression behaviour of a cement-bentonite slurry for groundwater control applications".

Shackelford C.D. (1999). "Remediation of Contaminated Land; an Overview". Proc. 11<sup>th</sup> Panam. Conf. Soil Mech. & Geotech. Engrg., Iguassu Falls, Brazil.

Soga et al. (2013) "Cement bentonite cutoff walls for polluted sites".

Veràstegui et al. (2013) "Hydraulic conductivity and small-strain stiffness of a cement-bentonite sample exposed to sulphates".

## Ringraziamenti:

Vorrei spendere parole di gratitudine per tutte quelle persone che, in un modo o in un altro, mi hanno aiutato e mi sono state vicine durante tutto il percorso che si conclude con questa tesi.

Anzitutto, dico grazie ai miei genitori, i migliori che un figlio possa avere.

Ai miei nonni, che ci sono sempre stati.

Alla mia “ciambellina” che ogni giorno sta al mio fianco, ma soprattutto perché è sempre la prima a credere in me e a supportarmi in ogni cosa che faccio.

A Frassi, Vero e Carlitolos con cui ho potuto svagarmi e staccare da tutto.

A Ciop, che ha sempre creduto in me e nel buon esito dei miei studi.

Ai compagni di questo “viaggio” Mannito, Giulia, Er bialera, Mischio, Dennis, Migio e Jonathan con cui ho condiviso gioie e fatiche.