

POLITECNICO DI TORINO

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA STRUTTURALE, EDILE E GEOTECNICA



Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

Messa in sicurezza permanente di siti contaminati
da idrocarburi leggeri: studio del processo di
desaturazione di miscele cemento-bentonite tramite
tecnica ERT

Relatore:

Prof. Guido MUSSO

Correlatore:

Prof. Renato Maria COSENTINI

Candidato:

Antonio ZIBISCO

Anno Accademico 2018/2019

Sommario

L'incapsulamento del contaminante mediante l'impiego di diaframmi plastici cemento - bentonite rappresenta una soluzione efficace per la messa in sicurezza permanente di siti contaminati impedendo la diffusione del contaminante nell'ambiente. L'esposizione a diverse condizioni ambientali determina una forte variazione delle proprietà fisiche, e quindi idrauliche, della miscela cemento-bentonite. Il presente lavoro di tesi presenta i risultati di un programma di sperimentazione basato sull'impiego della tecnica di tomografia di resistività elettrica (ERT) per il monitoraggio del processo di essiccamento avvenuto mediante esposizione all'ambiente di laboratorio ($T = 21^{\circ}C$, umidità relativa approssimativamente 38%) a cui sono stati sottoposti campioni di differenti dimensioni e a diverso invecchiamento. Al termine del processo di essiccamento alcuni campioni sono stati sottoposti al processo di imbibizione. Le misure di conducibilità elettrica σ [mS/cm], realizzate mediante la tecnica ERT, sono state convertite in contenuto d'acqua gravimetrico w [%] mediante correlazioni empiriche riuscendo a produrre mappe di distribuzione di w all'interno del campione. Il contenuto d'acqua ricostruito restituisce valori molto prossimi a quello misurato. Inoltre, i risultati sperimentali ottenuti confermano la possibilità di individuare fratture presenti all'interno del provino mediante la tomografia elettrica. La caratterizzazione meccanica evidenzia un incremento di resistenza al diminuire del contenuto d'acqua gravimetrico raggiungendo un picco di prestazioni nel range $w = 110 - 130\%$.

Abstract

Cement bentonite slurry cutoff walls are used to encapsulate pollutants within contaminated areas, so avoiding their spreading in the environment. Exposure to different environment conditions could affect the performances and the physical integrity of this kind of structures. Samples of cement-bentonite mixtures were prepared in order to investigate the effects of drying process similar to those that could affect plastic diaphragm walls in situ. The drying process was induced by exposing the samples to the laboratory environment ($T = 21^{\circ}C$, relative humidity approximately 38%) and the effects on samples were monitored by means of Electrical Resistivity Tomography. The results obtained show the reliability of this technique to investigate the mean water content w [%] on basis of empirical relationship and of the development of fractures within the samples. Once dried, some samples were placed in contact with a thin later of water to induce wetting. Also in this case the results obtained by using ERT were reliable and show that this material regained up to the 80% of the initial water content. The mechanical behavior of cement-bentonite mixture is water content (w) dependent. Penetration resistance of the samples was measured by using a pocket penetrometer and the relationship found between penetration resistance – water content shows that the maximum mechanical resistance is reached between W range of 110 – 130%.

Indice

Elenco delle figure	III
Elenco delle tabelle	VIII
Elenco dei grafici	XI
Introduzione	12
1 Miscele cemento-bentonite: stato dell'arte	16
1.1 Applicazioni ingegneristiche	17
1.2 Caratteristiche fisiche e compatibilità chimica	23
1.3 Caratteristiche meccaniche ed idrauliche	41
2 Applicazioni pregresse della tecnica ERT	60
3 Proprietà elettriche dei mezzi porosi e metodi di indagine	77
3.1 Relazione tra proprietà elettriche e parametri fisici	79
3.2 Prova elettrica monodimensionale	83
3.3 Tomografia di resistività elettrica	85
4 Materiali e programma di sperimentazione	92
4.1 Attrezzatura di laboratorio e principi di funzionamento	92
4.2 Composizione e confezionamento della miscela	100
4.3 Fase preliminare: calibrazione costanti di cella	104
5 Risultati	114
5.1 Relazione $\sigma - w$	115
5.2 Legge di Archie	121

5.3	Relazione conducibilità-invecchiamento	124
5.4	Deformazioni indotte da variazioni di contenuto d'acqua lungo un processo di essiccazione/imbibizione	130
5.5	Essiccamento campioni cilindrici	132
5.6	Confronto $w_{stimato} - w_{misurato}$	146
5.7	Caratterizzazione meccanica speditiva	149
5.8	Imbibizione campioni cilindrici	155
5.9	Caratterizzazione campioni colonnari	161
6	Conclusioni	173
	Bibliografia	175

Elenco delle figure

1	Schema tipologico messa in sicurezza permanente di siti contaminati	14
1.1	Gabbia per l'installazione della cella piezometrica [Grisolia and Napoleoni, 1997]	22
1.2	Curva granulometrica della bentonite, del caolino e dell'illite [Koch, 2002]	23
1.3	Attivazione della bentonite [Koch, 2002]	24
1.4	Regioni principali per la preparazione delle miscele acqua-cemento-bentonite [Jefferis, 1981]	25
1.5	Interazione cemento bentonite [Koch, 2002]	26
1.6	Resistenza a taglio sviluppata dalle miscele contenenti scorie d'altoforno [Jefferis, 1981]	27
1.7	Campione utilizzato per il test di immersione [Garvin and Hayles, 1999]	34
1.8	Andamento della conducibilità idraulica del campione immerso in acqua [Fratolocchi et al., 2006]	39
1.9	Andamento della conducibilità idraulica per differenti liquidi di permeazione [Fratolocchi et al., 2006]	39
1.10	Resistenza a compressione monoassiale a 28 gg [Evans and Opdyke, 2006]	42
1.11	Influenza del contenuto di cemento sulla conducibilità idraulica delle miscele a 28gg [Evans and Opdyke, 2006]	43
1.12	Influenza del tempo di maturazione e del contenuto di scorie d'altoforno sulla conducibilità idraulica [Evans and Opdyke, 2006]	43
1.13	Consolidamento monodimensionale della miscela cemento-bentonite dopo 15 mesi di maturazione [Evans and Opdyke, 2006]	45
1.14	Percorsi di tensione prove triassiali in condizioni drenate [Soga et al., 2013]	46
1.15	Curve di deformazione prove triassiali in condizioni drenate [Soga et al., 2013]	47
1.16	Rapporto tra il parametro p' e la variazione di volume della prova triassiale in condizione drenate a 100 kPa [Soga et al., 2013]	48

1.17	Modelli costitutivi in funzione della pressione di confinamento e della maturazione delle miscele cemento-bentonite [Soga et al., 2013] . . .	49
1.18	Relazione tenso-deformativa e variazione della pressione dell'acqua in prova triassiale non drenata [Soga et al., 2013]	49
1.19	Percorso tensionale nel piano p'-q prova triassiale in condizioni non drenate [Soga et al., 2013]	50
1.20	Modelli di rottura dei provini dipendenti dalla pressione di confinamento e dall'invecchiamento [Soga et al., 2013]	51
1.21	Incremento in termini di UCS in funzione del tempo di maturazione [Manassero, 1999]	51
1.22	Comportamento tenso-deformativo esibito dal campione durante la prova di trazione indiretta [Soga et al., 2013]	53
1.23	Sezione corrente del diaframma plastico [Joshi et al., 2010]	55
1.24	Conducibilità idraulica misurata in laboratorio in funzione dell'invecchiamento [Joshi et al., 2010]	56
1.25	Conducibilità idraulica in funzione della profondità per campioni tipo "Block field" [Joshi et al., 2010]	57
1.26	Fattori che influenzano le performance dei diagrammi plastici [Joshi et al., 2010]	58
2.1	Attrezzatura di laboratorio per l'esecuzione di tomografie elettriche [Borsic et al., 2005]	61
2.2	a) Campione di sabbia con presenza di inclusioni b) Ricostruzione tomografica [Borsic et al., 2005]	62
2.3	a) Campione di sabbia con presenza di una zona a più bassa densità b) Ricostruzione tomografica [Borsic et al., 2005]	63
2.4	a) Inclusione di una banda granulometricamente modulata all'interno di un campione omogeneo di sabbia b) Ricostruzione tomografica [Borsic et al., 2005]	64
2.5	Provino utilizzato per la Tomografia Elettrica: a) posizione degli elettrodi b) provino ultimato c) posizione del serbatoio [Smyl et al., 2017]	65
2.6	Provini con discontinuità artificiali [Smyl et al., 2017]	66
2.7	Modello numerico utilizzato per la simulazione della prova di flusso [Smyl et al., 2017]	66
2.8	Ricostruzione tomografica 3D della conducibilità elettrica σ e l'ipotetico contenuto d'acqua θ corrispondente a successivi istanti di tempo [Smyl et al., 2017]	67
2.9	Ricostruzione tomografica 3D della conducibilità elettrica σ e l'ipotetico contenuto d'acqua θ corrispondente a successivi istanti di tempo su provini manifestanti fenomeni di fessurazione [Smyl et al., 2017] .	69
2.10	Sequenza delle misura di resistività elettrica [Derfouf et al., 2019] .	70

2.11	Correlazione grado di saturazione – resistività elettrica normalizzata [Smyl et al., 2017]	71
2.12	Localizzazione e caratterizzazione geologica dell’area oggetto di studio [Casado et al., 2015]	72
2.13	Localizzazione dei fori di sondaggio e dei profili di resistività elettrica elaborati [Casado et al., 2015]	73
2.14	Profili di resistività contenenti anomalie (Cx) e sone ad alta resistività (Rx) [Casado et al., 2015]	75
3.1	Schema prova elettrica su elemento di volume	84
3.2	Mesh del modello numero di ricostruzione tomografica	88
3.3	Set-up di misura: 1. Tomografo. 2. Multiplexers e cavi di connessione. 3. PC di controllo	88
3.4	Protocollo di misura nella tecnica ERT 2D [Seppänen et al., 2009]	89
3.5	Esempio file di prova .txt	90
3.6	Programma di acquisizione dati tomografia elettrica	91
4.1	Elettrodi puntuali e a testa piatta per ERT 2D	93
4.2	Elettrodi per prova elettrica su elemento di volume	93
4.3	Conduktometro da laboratorio	94
4.4	Penetrometro tascabile	95
4.5	Calibro e bilancia ad alta precisione	95
4.6	Stampo elemento di volume	96
4.7	Stampi campioni cilindrici $D = 11$ cm ed $H = 4$ cm	97
4.8	Stampi campioni cilindrici $D = 19$ cm ed $H = 4$ cm	97
4.9	Stampi campioni cilindrici $D = 8$ cm ed $H = 6$ cm	98
4.10	Stampi campioni colonnari	99
4.11	Fasi di preparazione della miscela a. Idratazione della bentonite b. Miscelazione con il cemento	101
4.12	Maturazione dei campioni	102
4.13	Aspetto di un campione al termine della maturazione di 28gg in acqua	103
4.14	Preparazione soluzione saline (KCl)	105
4.15	Conduktometro e prova ERT su soluzione salina cella $D = 8$ cm	106
4.16	Ricostruzione della conducibilità elettrica delle soluzioni saline a differente concentrazione (cella 8 cm)	107
4.17	Calibrazione costante di cella $D = 11$ cm (a sinistra) e $D = 19$ cm (a destra)	109
4.18	Ricostruzione della conducibilità elettrica delle soluzioni saline a differente concentrazione (cella 11 cm)	109
4.19	Calibrazione costante di cella campioni colonnari	112
5.1	Stato fisico dell’elemento di volume per differenti istanti di tempo (maturazione 60gg)	117

5.2	Rappresentazione tridimensionale della legge di Archie	123
5.3	Particolare campione $D = 8$ cm	124
5.4	Confronto miscela con maturazione in acqua e con maturazione in aria a differenti istanti di tempo	127
5.5	Mappe di conducibilità elettrica ricostruita a differenti tempi di ma- turazione per cella $D = 8$ cm	128
5.6	Istogramma di frequenza del vettore delle soluzioni σ (per $t_4 = 90$ gg)	129
5.7	Ricostruzione tomografica campione $D = 11$ cm t_0 - t_3 (28gg)	133
5.8	Ricostruzione tomografica campione $D = 11$ cm t_4 - t_8 (28gg)	134
5.9	Mappe ricostruite del contenuto d'acqua gravimetrico campione $D =$ 11 cm (28gg)	135
5.10	Stato fisico iniziale e finale del campione $D = 11$ cm (28gg)	136
5.11	Localizzazione zone di fratturazione mediante ricostruzione tomogra- fica campione $D = 11$ cm (28gg)	136
5.12	Ricostruzione tomografica campione $D = 11$ cm t_0 - t_3 (60gg)	139
5.13	Ricostruzione tomografica campione $D = 11$ cm t_4 - t_7 (60gg)	139
5.14	Stato fisico iniziale e finale del campione $D = 11$ cm (60gg)	140
5.15	Mappe ricostruite del contenuto d'acqua gravimetrico campione $D =$ 11 cm (60gg)	141
5.16	Ricostruzione tomografica campione $D = 19$ cm t_0 - t_3 (28gg)	143
5.17	Ricostruzione tomografica campione $D = 19$ cm t_4 - t_7 (28gg)	144
5.18	Stato fisico iniziale e finale del campione $D = 19$ cm (28gg)	145
5.19	Mappe ricostruite del contenuto d'acqua gravimetrico campione $D =$ 19 cm (28gg)	145
5.20	Configurazione prove penetrometriche campione $D = 11$ cm (60gg) .	149
5.21	Rottura campione $D = 11$ cm (60gg)	150
5.22	Esecuzione prova caratterizzazione meccanica $D = 11$ cm (28gg) . .	151
5.23	Stato fisico del campione sottoposto a caratterizzazione meccanica speditiva $w \approx 110\%$ $D = 19$ cm (28gg)	153
5.24	Campione $D = 11$ cm sottoposto ad imbibizione (60gg)	155
5.25	Ricostruzione tomografica dopo il processo di imbibizione (28gg) . .	156
5.26	Ricostruzione tomografia dopo processo di imbibizione campione $D =$ 11 cm	156
5.27	Campioni essiccati del provino $D = 11$ cm (60gg)	157
5.28	Ricostruzione tomografia dopo processo di imbibizione campione $D =$ 19 cm (28gg)	158
5.29	Distribuzione verticale del contenuto d'acqua campione $D = 19$ cm (28gg)	159
5.30	Localizzazione zone di fratturazione mediante ricostruzione tomogra- fica	160
5.31	Prima fase di sperimentazione su cilindro $H = 30$ cm	161
5.32	Fessurazione superficiale del campione colonnare $H = 30$ cm	165

5.33	Stato fisico del campione colonnare al termine del processo di essiccamento	166
5.34	Imbibizione campione colonnare $H = 30$ cm	167
5.35	Preparazione campioni per caratterizzazione colonna $H = 30$ cm . .	168
5.36	Carotaggio colonna $H = 30$ cm	169

Elenco delle tabelle

1.1	Composizione tipica di una miscela cemento-acqua-bentonite [Jefferys, 1981]	25
1.2	Quantità delle componenti per le miscele acqua-cemento-bentonite [Garvin and Hayles, 1999]	29
1.3	Proporzioni miscela per 1000 litri di acqua [Garvin and Hayles, 1999]	32
1.4	Analisi chimiche di PC, ggbs e pfa utilizzate nella sperimentazione [Garvin and Hayles, 1999]	33
1.5	Classificazione dei risultati del test di immersione [Garvin and Hayles, 1999]	36
1.6	Proporzioni miscela cemento-bentonite [Fratolocchi et al., 2006]	37
1.7	Composizione chimica del percolato [Fratolocchi et al., 2006]	37
1.8	Analisi chimica dell'acqua di falda presente in sito [Joshi et al., 2010]	55
3.1	Caratteristiche del CIT	89
4.1	Tipologia di stampi e relativi tempi di maturazione della miscela	96
4.2	Composizione miscela acqua-cemento-bentonite	100
4.3	Caratteristiche della Bentonite	100
4.4	Conducibilità elettrica delle soluzioni saline (<i>KCl</i>)	105
4.5	Confronto $\sigma_{ricostruita} - \sigma_{misurata}$ (cella 8 cm)	107
4.6	Confronto $\sigma_{ricostruita} - \sigma_{misurata}$ (cella 11 cm)	110
4.7	Confronto $\sigma_{ricostruita} - \sigma_{misurata}$ (cella 19 cm)	111
4.8	Effetto del tipo di elettrodi e del rapporto H/D sulla costante di cella	113
5.1	Misure di caratterizzazione elettrica lungo percorso di essiccamento per invecchiamento 28gg	116
5.2	Misure di caratterizzazione elettrica lungo percorso di essiccamento per invecchiamento 60gg	116
5.3	Misure di caratterizzazione elettrica lungo percorso di essiccamento per invecchiamento 90gg	116
5.4	Processo di imbibizione elemento di volume 28gg	119
5.5	Parametri caratteristici della legge di Archie	121

5.6	Parametri legge di Archie	122
5.7	Evoluzione della conducibilità elettrica nel tempo (cella $D = 8$ cm .	125
5.8	Parametri statistici del vettore delle soluzioni del problema inverso .	128
5.9	Evoluzione nel tempo della conducibilità elettrica provino $D = 11$ cm (28gg)	132
5.10	Evoluzione nel tempo della conducibilità elettrica provino $D = 11$ cm (60gg)	137
5.11	Evoluzione nel tempo della conducibilità elettrica provino $D = 19$ cm (28gg)	142
5.12	Caratterizzazione meccanica speditiva campione $D = 11$ cm (60gg) .	150
5.13	Caratterizzazione meccanica speditiva campione $D = 11$ cm (28gg) .	152
5.14	Caratterizzazione meccanica speditiva campione $D = 19$ cm (28gg) .	152
5.15	Contenuto d'acqua w del campione $D = 11$ cm dopo imbibizione . .	157
5.16	Misurazione conducibilità elettrica 1° livello di elettrodi cilindro $H =$ 30 cm	162
5.17	Misurazione conducibilità elettrica 2° livello di elettrodi cilindro $H =$ 30 cm	162
5.18	Misurazione conducibilità elettrica 3° livello di elettrodi cilindro $H =$ 30 cm	162
5.19	Parametri fisici colonna $H = 30$ cm	170
5.20	Confronto conducibilità elettrica iniziale campioni colonnari	172

Elenco dei grafici

4.1	Costante di cella per cassero $D = 8$ cm	108
4.2	Costante di cella per cassero $D = 11$ cm	110
4.3	Costante di cella per cassero $D = 19$ cm	111
4.4	Costante di cella per cilindro $H = 24$ cm	112
5.1	Relazione conducibilità elettrica contenuto d'acqua elemento di volume	118
5.2	Correlazione $\sigma - w$ essiccamento/imbibizione (28gg)	119
5.3	Determinazione dei parametri m ed n della legge di Archie a partire da percorsi di essiccamento	122
5.4	Evoluzione della conducibilità elettrica nel tempo (cella $D = 8$ cm) .	125
5.5	Relazione indice dei vuoi contenuto d'acqua elemento di volume . .	130
5.6	Variazione volume dell'elemento di volume lungo i percorsi di essiccamento- imbibizione (28gg)	131
5.7	Evoluzione della conducibilità elettrica nel tempo durante il processo di essiccamento $D = 11$ cm (28gg)	135
5.8	Evoluzione della conducibilità elettrica nel tempo durante il processo di essiccamento $D = 11$ cm (60gg)	138
5.9	Evoluzione nel tempo della conducibilità elettrica provino $D = 19$ cm (28gg)	142
5.10	Confronto $w_{stimato} - w_{misurato}$ $D = 11$ cm (28gg)	146
5.11	Confronto $w_{stimato} - w_{misurato}$ $D = 11$ cm (60gg)	147
5.12	Confronto $w_{stimato} - w_{misurato}$ $D = 19$ cm (28gg)	147
5.13	Relazione tra σ/σ_{max} e tempo durante il processo di essiccamento su tutti i provini analizzati	148
5.14	Resistenza a penetrazione in funzione del contenuto d'acqua gravi- metrico	154
5.15	Processo di imbibizione campione $D = 19$ cm (1-5min)	159
5.16	Evoluzione temporale della conducibilità elettrica cilindro $H = 30$ cm 3° livello di elettrodi	163
5.17	Evoluzione temporale della conducibilità elettrica cilindro $H = 30$ cm 2° livello di elettrodi	164
5.18	Evoluzione temporale della conducibilità elettrica cilindro $H = 30$ cm 1° livello di elettrodi	164

5.19	Evoluzione della conducibilità elettrica nel tempo cilindro $H = 30$ cm durante essiccamento	165
5.20	Processo di imbibizione colonna $H = 30$ cm (0-60minuti)	167
5.21	Processo di imbibizione colonna $H = 30$ cm (1-48ore)	168
5.22	Indice dei vuoti, Conducibilità elettrica e contenuto d'acqua colonna $H = 30$ cm	170
5.23	Evoluzione della conducibilità elettrica nel tempo cilindro $H = 24$ cm	172

Introduzione

Inquadramento preliminare

L'ormai consolidata politica ambientalista perseguita dall'Unione Europea e dagli Stati Membri negli ultimi anni, evidenzia l'esigenza di approfondire le attuali tecniche di messa in sicurezza permanente di siti contaminati, con particolare attenzione sugli effetti a lungo termine.

La recente attenzione mediatica indirizzata nei confronti della salvaguardia ambientale ed una sempre maggiore consapevolezza nel cercare di ridurre ed arginare i fenomeni di inquinamento, ha fatto emergere, negli ultimi anni, numerose criticità ambientali derivanti da insidiose attività antropiche praticate durante gli anni 60' e 70' aventi come conseguenza l'utilizzo del suolo come principale recettore di sostanze inquinanti, come prodotti di scarto della lavorazione degli idrocarburi. Tale problematica è stata riscontrata, ad esempio, nella Repubblica Slovacca dove l'Ente preposto al censimento di siti contaminati ha riscontrato la presenza di circa 400 aree affette da contaminanti ad origine idrocarburea.¹

L'Italia, paese all'avanguardia per la tutela ambientale, grazie all'approvazione del Dlgs. n.152/2006 ha predisposto strumenti efficaci per l'individuazione e la tutela di siti inquinati, introducendo procedure e metodologie che fornissero agli Enti ed al mondo professionale gli strumenti per un approccio corretto alle problematiche di carattere ambientale. Il risultato di tale approccio ha portato al riconoscimento di aree del nostro territorio affette dalle problematiche qui esposte: i SIN (Siti di Interesse Nazionale), che attualmente ne risultano censiti 41.²

¹<https://envirozataze.enviroportal.sk/>

²<http://www.isprambiente.gov.it/it/temi/suolo-e-territorio/siti-contaminati/siti-di-interesse-nazionale-sin>

"siti d'interesse nazionale, ai fini della bonifica, sono individuabili in relazione alle caratteristiche del sito, alle quantità e pericolosità degli inquinanti presenti, al rilievo dell'impatto sull'ambiente circostante in termini di rischio sanitario ed ecologico, nonché di pregiudizio per i beni culturali ed ambientale."(Art. 252, comma 1 del D.Lgs. 152/06 e ss.mm.ii.)

Grazie al progresso in materia tecnica e giuridica finalizzato alla gestione della problematica in parola, la Geotecnica Ambientale rappresenta un punto di riferimento per l'ulteriore sviluppo di soluzioni, metodologie e strumenti per far fronte alla necessità di salvaguardare il suolo e tutte le risorse ad esso collegate. Nella persecuzione di tale obiettivo, la tecnica ad oggi più utilizzata risulta essere la messa in sicurezza permanente di siti contaminati. Tale metodologia prevede l'incapsulamento dell'area inquinata al fine di evitare la dispersione nell'ambiente, la percolazione in falda ed altri fenomeni a cui può essere soggetto l'inquinante. Le disposizioni di legge contenute nel Titolo V del Dlgs. n.152/2006 in materia di Tutela Ambientale definiscono la messa in sicurezza permanente di siti contaminati come:

"l'insieme degli interventi atti ad isolare in modo definitivo le fonti inquinanti rispetto alle matrici ambientali circostanti e a garantire un elevato e definitivo livello di sicurezza per le persone e per l'ambiente. In tali casi devono essere previsti piani di monitoraggio e controllo e limitazioni d'uso rispetto alle previsioni degli strumenti urbanistici"

Nello spirito di tale definizione l'adozione di diaframmi plastici realizzati mediante l'impiego delle miscele in parola è ritenuta essere da professionisti ed accademici una soluzione efficace per contenere, incapsulandolo, l'inquinante. In Figura 1 è stato rappresentato uno schema tipo dell'operazione di messa in sicurezza permanente in cui il confinamento laterale è affidato a diaframmi plastici ed il confinamento orizzontale è affidato ad una formazione geologica le cui caratteristiche idrauliche evidenziano un comportamento impermeabile.

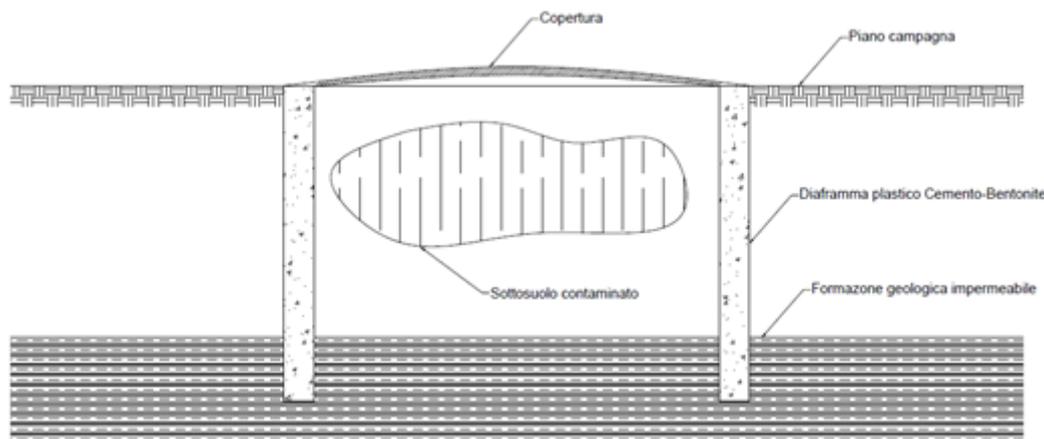


Figura 1: Schema tipologico messa in sicurezza permanente di siti contaminati

Articolazione del lavoro svolto

Il presente lavoro di tesi si sviluppa nell'ambito di un'attività di ricerca sulle miscele acqua-cemento-bentonite svolta presso il Politecnico di Torino dal Dipartimento di Strutture, Edile e Geotecnica in collaborazione con il Politecnico di Milano e con il Ministero dello Sviluppo Economico (MISE).

La caratterizzazione delle miscele acqua-cemento-bentonite è oggetto di studio e approfondimento da circa 30 anni nell'ambito della Geotecnica Ambientale applicata alla messa in sicurezza permanente di siti contaminati. In particolare, sono noti gli effetti del tempo e della composizione chimica del fluido interstiziale (compatibilità chimica) sul comportamento idraulico e meccanico delle miscele cemento bentonite [Jefferis, 1981], [Fratolocchi et al., 2006], [Soga et al., 2013]. Negli studi precedenti è stato invece per lo più trascurato lo studio dell'effetto di variazioni del grado di saturazione e del contenuto d'acqua, che è però d'interesse in quanto può potenzialmente alterare la resistenza e la permeabilità dei materiali costituenti le barriere.

Nel presente lavoro di tesi, quindi, si cercherà di correlare le proprietà idromeccaniche delle miscele in parola ad una grandezza fisica, la resistività elettrica, analizzando la fattibilità e l'affidabilità della tecnica ERT (Electrical Resistivity Tomography).

La miscela oggetto di caratterizzazione è stata denominata M1 ed è stata prodotta componendo 18 parti di acqua, 4 parti di cemento Portland e 1 parte di bentonite

e si sono indagate le proprietà di cui sopra per differenti tempi di maturazione e a diversa scala. Le prove di laboratorio sono state eseguite su elementi di volume, sui quali sono state misurate la conducibilità elettrica del mezzo σ [mS/cm], il contenuto d'acqua gravimetrico w [%], la porosità n [-] ed altre grandezze. Sulla base dei dati raccolti si sono determinate leggi di correlazione con le quali si sono interpretate le prove elettriche eseguite sui provini cilindrici con prevalente sviluppo areale. Inoltre, si sono prodotti campioni colonnari sui quali si è svolto un lavoro di caratterizzazione dal punto di vista elettrico e fisico.

Struttura della tesi

Il lavoro di tesi è strutturato in modo tale da fornire una panoramica il più possibile completa riguardo le principali applicazioni ingegneristiche e lo stato dell'arte delle miscele oggetto di studio, di cui si parlerà nel Capitolo 1, analizzando la compatibilità chimica, il comportamento meccanico ed idraulico.

Nel Capitolo 2 si esporranno i risultati di sperimentazioni documentate nella letteratura scientifica utilizzando la tecnica ERT (*Electrical Resistivity Tomography*) come metodologia sperimentale e come sistema di monitoraggio in sito.

Nel Capitolo 3 si forniranno le basi teoriche relative alle proprietà elettriche dei mezzi porosi ed i metodi di indagine utilizzati per indagarle. Nel Capitolo 4 verranno descritte le attrezzature di laboratorio impiegate durante la fase di sperimentazione ed i loro principi di funzionamento, le metodologie sperimentali seguite e le operazioni effettuate a partire dalla fase di preparazione dei campioni fino all'interpretazione dei risultati delle prove eseguite.

Nel Capitolo 5 si esporranno i risultati ai quali si è giunti operando come descritto nel Capitolo 3 e nel Capitolo 4, fornendo tutti gli elementi necessari per un'efficace comprensione dello studio condotto.

Nel Capitolo 6 verranno espone le conclusioni alle quali si è giunti al termine del programma di sperimentazione e dell'elaborazioni dei dati, legate alle premesse fatte per il presente lavoro di tesi. Le conclusioni si concentreranno sull'affidabilità e l'applicabilità della tomografia di resistività elettrica usata per caratterizzare il materiale oggetto di studio e sulle caratteristiche comportamentali manifestatesi durante la fase di sperimentazione.

Capitolo 1

Miscela cemento-bentonite: stato dell'arte

Le miscele acqua-cemento-bentonite sono state oggetto di numerosi programmi di sperimentazione ed attività di ricerca negli ultimi 30 anni. Nell'ambito a cui si fa riferimento nel presente lavoro di tesi le principali applicazioni ingegneristiche delle miscele in parola riguardano i diaframmi plastici verticali e orizzontali. L'impiego di tali opere trova spazio per lo più nell'ambito della tutela ambientale, e nello specifico nella messa in sicurezza permanente di siti contaminati. Le attività di ricerca svolte quindi, sono mirate all'indagine delle proprietà fisiche e chimiche in relazione alle componenti costituenti e le loro interazioni reciproche e con le specie contaminanti, alla caratterizzazione meccanica ed idraulica delle miscele in parola sia in scala di laboratorio che di sito.

Nel presente capitolo si esporranno quindi, gli aspetti caratteristici delle miscele acqua-cemento-bentonite ed i risultati delle sperimentazioni documentate nella letteratura scientifica.

1.1 Applicazioni ingegneristiche

In riferimento alle tematiche ambientali su cui si concentra il presente lavoro di tesi la principale applicazione ingegneristica delle miscele acqua-cemento-bentonite è rappresentata dai diaframmi plastici.

Un diaframma è un'opera inserita nel terreno avente una dimensione (spessore) piccola rispetto alle altre due con caratteristiche di resistenza, deformabilità e permeabilità prestabilite [De Paoli et al., 1991]. È possibile adottare una classificazione dei diaframmi che li distingua in due categorie: verticali e orizzontali. A loro volta i diaframmi verticali possono assolvere ad una funzione statica o idraulica (drenanti o impermeabili).

Queste opere, come già detto, trovano largo impiego nella geotecnica ambientale nell'ambito della messa in sicurezza permanente di siti contaminati. Ad oggi, nonostante gli sforzi e gli investimenti profusi nel miglioramento e nella messa a punto di nuove tecnologie di intervento, in molte situazioni l'incapsulamento permane l'unica alternativa praticabile tenendo conto sia degli aspetti economici sia dell'efficacia finale [Manassero, 1999].

In generale, la messa in sicurezza di un sito contaminato mediante incapsulamento deve prevedere [Manassero, 1999]:

1. Valutazione del fenomeno di inquinamento in atto mediante appropriati metodi di indagine;
2. Definizione della tipologia dei materiali da impiegare nella realizzazione del sistema di incapsulamento;
3. Il progetto del sistema di incapsulamento in termini di posizione e dimensione;
4. Validazione delle ipotesi e dei risultati della fase di progettazione mediante prove a diversa scala;
5. Costruzione e controllo qualità;
6. Monitoraggio a lungo termine.

[Manassero, 1999] fornisce un'ampia panoramica sulle tipologie e le tecnologie esecutive, sui materiali, sulle procedure di dimensionamento e sui controlli di qualità delle barriere verticali come sistema di incapsulamento.

I diaframmi plastici cemento-bentonite rappresentano la soluzione tecnologica più utilizzata in Europa per gli interventi di cinturazione di siti contaminati. Essi vengono realizzati mediante scavo di pannelli alternati o trincea continua. La consistenza plastica delle miscele in parola consente la realizzazione delle operazioni di scavo in successione garantendo comunque il perfetto immorsamento reciproco delle parti di opera già realizzate.

Le tecniche esecutive prevedono che il diaframma plastico possa essere realizzato in un'unica fase (*sistema monofase*) ponendo in opera la miscela definitiva già durante le operazioni di scavo, o in due fasi (*sistema bifase*) che consistono nella sostituzione, a scavo terminato, della miscela acqua-bentonite utilizzata per stabilizzare la trincea, con la miscela definitiva a base di cemento e bentonite. In questo secondo caso, al fine di garantire la completa sostituzione delle miscele di stabilizzazione, è necessario che queste abbiano un peso di volume inferiore a quello delle miscele definitive. Un'ulteriore differenza che limita l'applicabilità dei sistemi bifase è costituita dalla profondità massima raggiungibile, che risulta limitata rispetto a quella raggiungibile con un sistema monofase a causa della complessità delle operazioni di sostituzione delle miscele di stabilizzazione.

Le dimensioni caratteristiche di questa tipologia di opere sono molto variabili in funzione delle esigenze. Possono presentare spessori dell'ordine di 0.6 – 1.6 m e profondità da circa 30 – 40 m, fino a raggiungere i 170 m impiegando attrezzature speciali. La permeabilità globale raggiungibile con le normali miscele cemento-bentonite è dell'ordine di $10^{-8} - 10^{-9}$ m/s, ma è possibile raggiungere valori dell'ordine di 10^{10} m/s utilizzando cementi speciali o additivi.

In accordo con altri studi già esposti nel presente lavoro di tesi, l'autore sottolinea come la conducibilità idraulica di una miscela cemento-bentonite è principalmente influenzata dal contenuto di cemento e dal tempo di maturazione. Pertanto, egli suggerisce una relazione che lega la conducibilità idraulica al tempo.

$$k = k_r \times \left(\frac{t}{t_r} \right)^{-\alpha} \quad (1.1)$$

Dove:

- k è la conducibilità idraulica [m/s];
- k_r è la conducibilità idraulica al tempo di maturazione t_r [m/s];

- t è il tempo di maturazione della miscela [s];
- α è il coefficiente di riduzione della conducibilità idraulica nel tempo.

Tale formulazione, la cui validità è stata testata dall'autore, permette di stimare il decremento della conducibilità idraulica delle usuali miscele cemento-bentonite, nell'ambito di alcuni anni, misurando in laboratorio la permeabilità a 28 giorni e conoscendo il contenuto di cemento e di acqua.

I principali fenomeni che governano la propagazione dei contaminanti nei mezzi porosi e quindi anche la loro migrazione attraverso le barriere perimetrali e di fondo, sono descritti nel caso di flusso monodimensionale dalla seguente equazione:

$$R_d \frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial t^2} - \nu_x \frac{\partial c}{\partial x} - [\lambda_w + \lambda_s \times (R_d - 1)] \times c \quad (1.2)$$

Dove:

- c è la concentrazione del soluto;
- R_d esprime la capacità di assorbimento da parte dello scheletro solido;
- D è il coefficiente di diffusione;
- ν_x esprime la velocità di trasporto per convezione;
- λ_w e λ_s sono costanti che descrivono il decadimento di tipo biologico o radioattivo nelle fasi liquida e solida rispettivamente.

Assumendo una condizione di flusso stazionaria per gli inquinati, l'equazione diventa:

$$D \frac{\partial^2 c}{\partial t^2} - \nu_x \frac{\partial c}{\partial x} = 0 \quad (1.3)$$

Le cui soluzioni in termini di concentrazione di contaminante nella barriera e di flusso attraverso di essa dipendono dalle dimensioni geometriche della stessa.

In ultimo, l'autore dedica uno spazio al controllo di qualità, collaudi e monitoraggi delle opere in parola.

Queste operazioni risultano di importanza fondamentale per confermare le assunzioni fatte in fase di progetto e che le performance del manufatto soddisfino le specifiche di progetto. La metodologia sperimentale proposta si basa sull'impiego

del piezocono, che permette, attraverso la combinazione di differenti parametri, di valutare la conducibilità idraulica attraverso la seguente relazione:

$$\log(k) = A \times \sqrt{B_k} + B \quad [\text{m/s}] \quad (1.4)$$

$$6B_k = \frac{q_t^2}{100f_s\Delta u} \quad (1.5)$$

Dove:

- Δu è l'incremento di pressione interstiziale;
- f_s è la resistenza per attrito laterale sul manicotto;
- q_t è la resistenza totale alla punta del cono;
- A e B sono due costanti.

La calibrazione delle costanti A e B avviene mediante confronto tra i risultati delle prove CPTU e la permeabilità dei terreni naturali con riferimento al sistema di classificazione di Robertson et al., (1986).

La conclusione a cui giunge l'autore è che tale metodologia sperimentale restituisce risultati in accordo con quanto emerso da altre prove, tuttavia, in seguito alle difficoltà di interpretazione dei dati e della corretta esecuzione della prova CPTU rimangono dubbi sull'effettiva attendibilità dei risultati.

Quanto esposto finora pone in evidenza la necessità di stabilire dei criteri di controllo a partire dalla fase di progetto fino alla fase di esercizio che permettano di valutare l'efficacia e l'efficienza dei diaframmi plastici cemento-bentonite [De Paoli et al., 1991]. La progettazione del diaframma si basa sulla conoscenza approfondita della geologia e dell'idrogeologia dell'area contaminata. In questa fase devono essere individuati tutti i parametri meccanici ed idraulici caratteristici del terreno e le analisi chimiche delle acque e dei contaminanti. Sulla base di queste caratterizzazioni è possibile iniziare a sviluppare la specifica interventistica più idonea per la messa in sicurezza permanente dell'area. Tale specifica interventistica al termine della realizzazione deve soddisfare le specifiche di prestazione cui si è fatto riferimento in sede di progetto. Al fine di ottemperare tale obbligo è necessaria che la fase esecutiva venga monitorata costantemente sia controllando le caratteristiche

chimico-fisiche delle materie prime impiegate sia le operazioni di mescolazione maturazione e messa in opera dei prodotti. Il controllo della continuità rappresenta un elemento critico per quelle tipologie costruttive che prevedono la realizzazione dei diaframmi plastici in pannelli primari e secondari. Tale controllo è operabile mediante realizzazione di sondaggi post realizzazione o tramite controllo di verticalità e sovrapposizione dei pannelli. La continuità è un requisito fondamentale per evitare la presenza di zone di discontinuità nell'opera che rappresenterebbero punti di debolezza strutturale o percorsi preferenziali per la migrazione del contaminante verso l'ambiente circostante. Al termine della fase esecutiva è necessario assicurare l'efficienza del diaframma plastico. Tale misura può avvenire sia in modo diretto che indiretto. Nel primo caso è possibile operare direttamente sul diaframma utilizzando strumenti per la misura diretta della permeabilità. Nel secondo caso è possibile monitorare ad esempio gli spostamenti del terreno adiacente al diaframma che possono segnalare incrementi o decrementi di spinta orizzontale che potrebbero essere critici per il diaframma stesso. Il tema del controllo della qualità di un diaframma plastico è stato affrontato da [Grisolia and Napoleoni, 1997], 1997 nell'articolo *“Esempio di controllo di qualità di un diaframma plastico a protezione di una discarica di rifiuti”*.

In accordo con quanto espresso da [Manassero,1999], le misure continue eseguite con impiego di “penetrometro elettrico” con piezocono all'interno del diaframma risultano di particolare interesse per il controllo delle performance.

Nel caso esaminato dagli autori, per la misura della conducibilità idraulica del diaframma in opera è stato impiegato, come permeametro, un normale piezometro a tubo aperto a funzionamento inverso, nel quale cioè il tubo di lettura è stato utilizzato per l'immissione del fluido di prova e la cella piezometrica come elemento di diffusione all'interno del diaframma.

La strumentazione è stata installata quando la miscela gettata in trincea era ancora fresca. Al fine di mantenere la centratura dello strumento durante tutte le operazioni, lo stesso è stato fissato da una gabbia metallica che ha anche svolto un effetto zavorra per contrazione l'azione di galleggiamento esercitata sul piezometro (Figura 1.1).

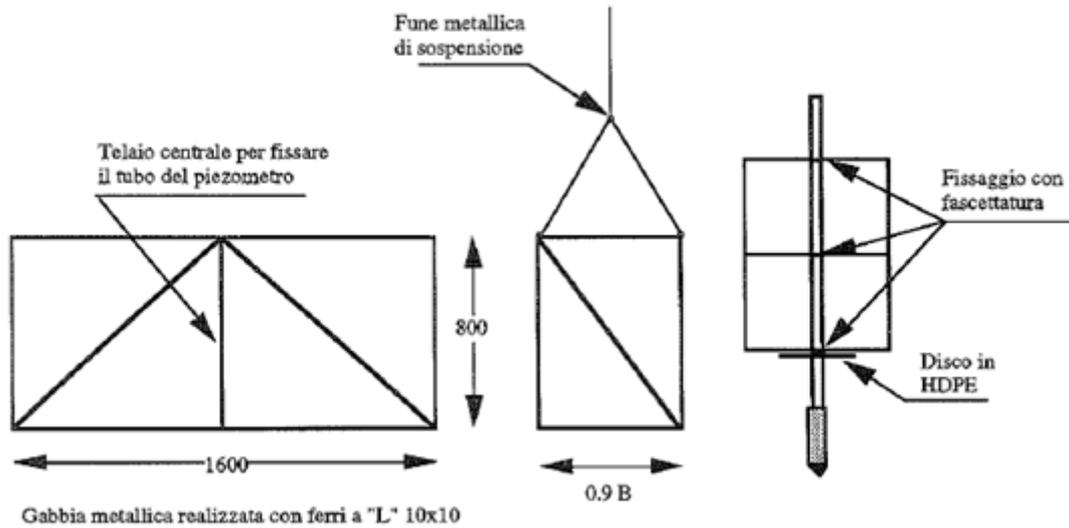


Figura 1.1: Gabbia per l'installazione della cella piezometrica [Grisolia and Napoleoni, 1997]

Inoltre, al fine di limitare la possibilità di intasamento della strumentazione, è stato inserito un elemento filtrante costituito da una sacca di geotessuto a passa porosità sigillata ai lati della cella stessa. La misura di conducibilità idraulica, eseguita dopo che la miscela ha raggiunto un sufficiente grado di maturazione, è basata sull'interpretazione di una prova di filtrazione a carico costante, che fornisce il valore di conducibilità idraulica k .

In conclusione, il sistema adottato per la misura della conducibilità idraulica dell'opera in esame può risultare valido per il monitoraggio delle prestazioni idrauliche, poiché consente di ripetere le prove nel tempo e di prelevare campioni di liquido da sottoporre ad eventuali analisi di controllo.

1.2 Caratteristiche fisiche e compatibilità chimica

La bentonite è un materiale che da sempre rappresenta una risorsa preziosa nel campo dell'Ingegneria Civile. Fin dagli anni 50 l'utilizzo di questo materiale nell'ambito dell'Ingegneria Geotecnica o nel campo dell'Ingegneria Idraulica trova spazio grazie alla sua bassa conducibilità idraulica che gli conferisce ottime proprietà "sigillanti". Successivamente è stata impiegata dai primi anni 70' come componente di miscele per la realizzazione di diaframmi plastici per il contenimento di siti contaminati [Koch, 2002].

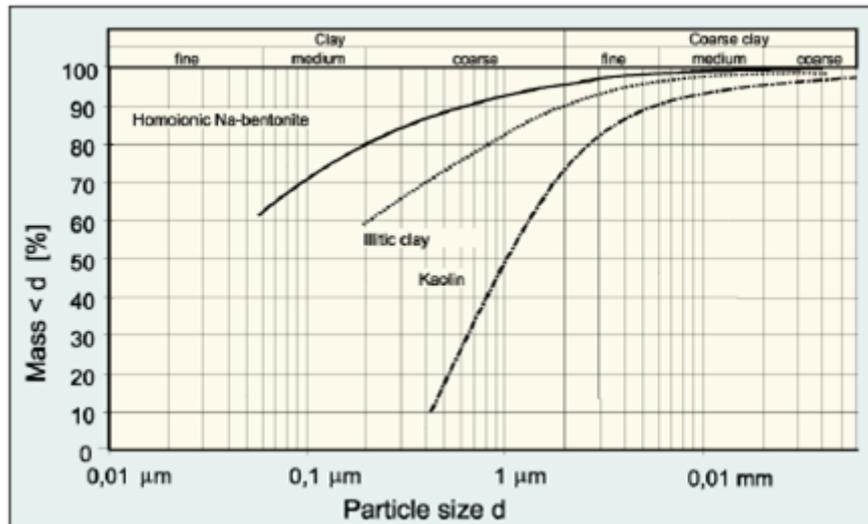


Figura 1.2: Curva granulometrica della bentonite, del caolino e dell'illite [Koch, 2002]

La bentonite è un fillosilicato¹ caratterizzato dalla presenza di ioni Sodio (Na) o Calcio (Ca) che governano il comportamento del materiale se miscelato con acqua. Le sue proprietà fisiche, meccaniche ed idrauliche sono governate principalmente da un minerale: la montmorillonite, un idrosilicato di alluminio.

¹Minerale argilloso composto da montmorillonite, calcio o sodio ed altri elementi.

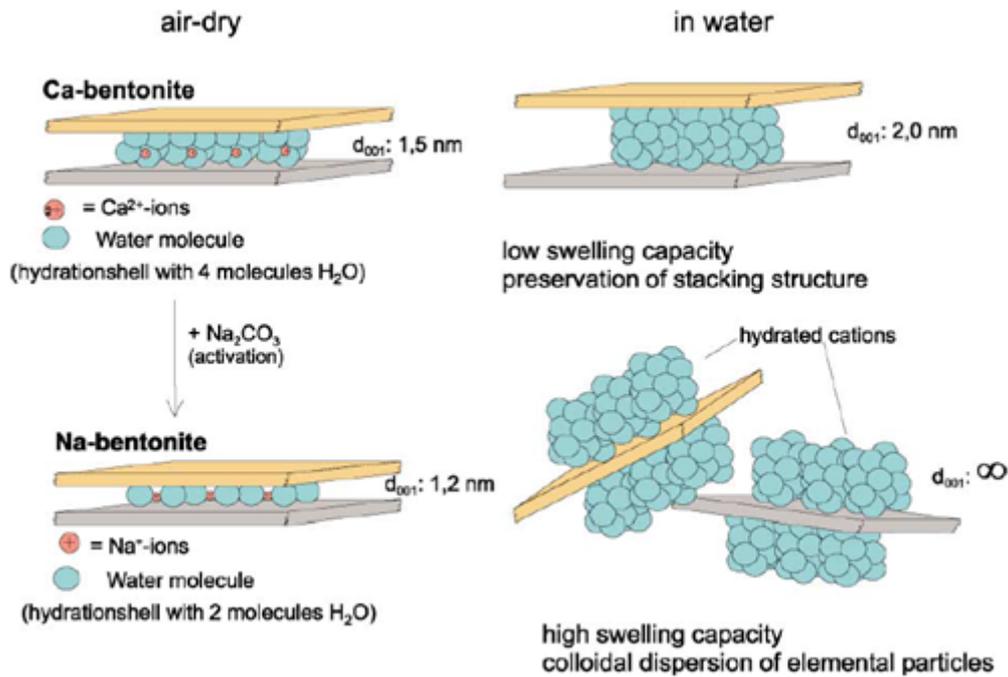


Figura 1.3: Attivazione della bentonite [Koch, 2002]

In Figura 1.3 è mostrato il processo di attivazione della bentonite e del differente comportamento a seconda della composizione della bentonite stessa. L'importanza di tale analisi risiede nel fatto che l'acqua risulta essere una componente fondamentale per la corretta progettazione della miscela, ma ancor di più rappresenta un aspetto cruciale nella vita utile dell'opera.

La composizione mineralogica della bentonite tuttavia è molto variabile, quindi sono molto variabili gli effetti e le proprietà che questa può presentare. In Europa, dove l'attività estrattiva del materiale in parola viene riscontrata principalmente in Grecia, Italia, Spagna, Gran Bretagna e nei paesi balcanici, la bentonite più comune presenta una composizione mineralogica a base di Ca-montmorillonite e le principali proprietà che presenta sono le seguenti (IBECO, 1998):

- Rigonfiamento, causato dall'assorbimento di molecole d'acqua;
- Una buona capacità di scambio cationico;
- Una curva granulometrica "piatta" che indica una quantità di particelle fini considerevole.

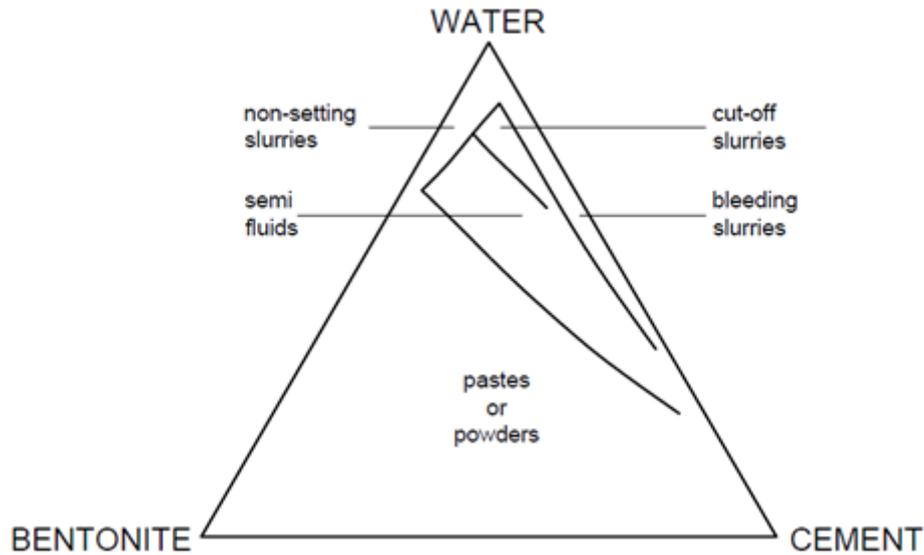


Figura 1.4: Regioni principali per la preparazione delle miscele acqua-cemento-bentonite [Jefferis, 1981]

Tra altri usi, la bentonite viene miscelata con acqua e cemento per la realizzazione delle miscele utilizzate nella costituzione di diaframmi plastici. In Figura 1.4 è rappresentata una schematizzazione dei rapporti tra i tre proposti [Jefferis, 1981]. Nello studio condotto dall'autore in parola si analizzano gli effetti dell'aggiunta della componente cementizia sulle proprietà della miscela.

Nella trattazione l'autore evidenzia come la presenza di eccessive quantità di cemento e bentonite conferirebbero alla miscela finita una densità elevata con una conseguente diminuzione della viscosità rendendo così l'impasto di difficile lavorazione. Al contempo, una eccessiva presenza di acqua potrebbe provocare fenomeni di separazione delle componenti rendendo così le prestazioni della miscela inaffidabili. L'autore quindi propone una composizione tipica delle componenti indicando i range di quantità consigliati per la produzione di un impasto ottimale:

Componente	Quantità
Bentonite	40 – 100 kg
Cemento	80 – 350 kg
Acqua	850 – 950 kg

Tabella 1.1: Composizione tipica di una miscela cemento-acqua-bentonite [Jefferis, 1981]

Si segnala che la quantità di bentonite da impiegare nella realizzazione della miscela dipende fortemente dalle sue proprietà fisiche, come ad esempio l'indice di plasticità, pertanto le quantità proposte sono da considerare indicative. Il tipo di cemento che viene impiegato solitamente per la produzione di tali miscele è il cemento Portland la cui funzione è quella di produrre una considerevole resistenza meccanica garantendo i valori di conducibilità idraulica necessari per gli scopi richiesti. La concentrazione consigliata dall'autore si attesta inferiore ai 100 kg/m^3 , tuttavia potrebbe scendere al di sotto dei 50 kg/m^3 se altri materiali, come ad esempio la sabbia, vengono aggiunti per garantire valori simili di resistenza meccanica. Valori superiori ai 350 kg/m^3 sono sconsigliati perché renderebbero la miscela eccessivamente densa diminuendone la lavorabilità, che rappresenta un requisito essenziale per la realizzazione dei diaframmi plastici.

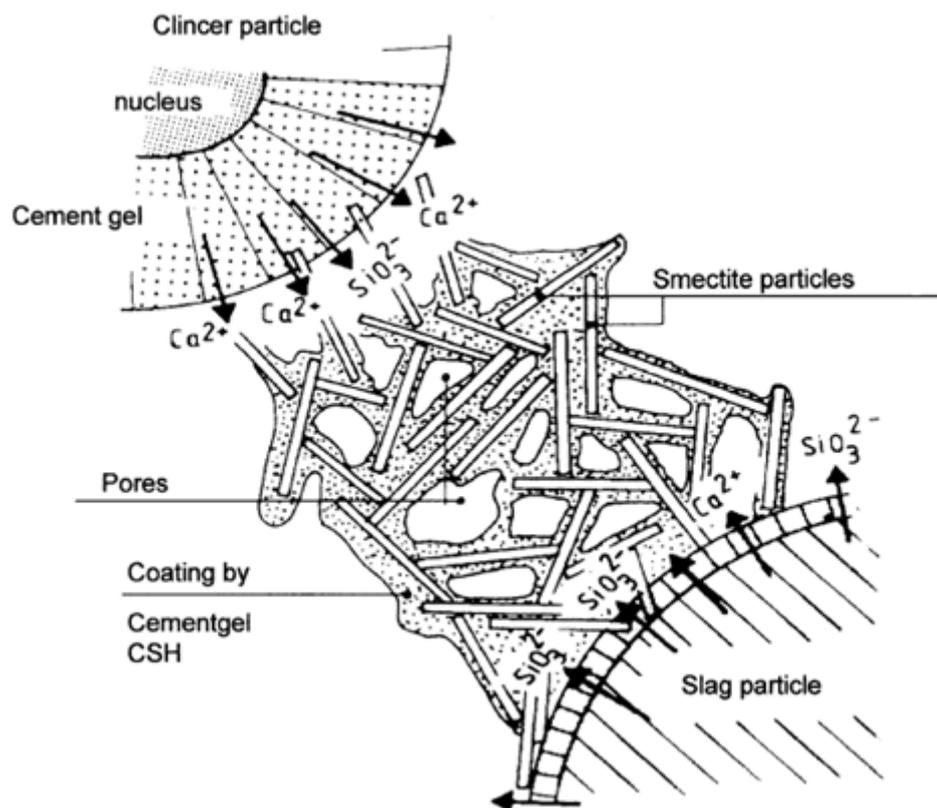


Figura 1.5: Interazione cemento bentonite [Koch, 2002]

Inoltre, viene segnalato come utilizzare grandi quantità di cemento provocherebbe un eccessivo irrigidimento della barriera rendendola così più vulnerabile alle sollecitazioni orizzontali derivanti da fenomeni sismici, determinando un comportamento dell'opera finita eccessivamente fragile. Infine, grande quantità di cemento non implica, necessariamente, una riduzione della permeabilità o un miglioramento della durabilità dell'opera.

L'autore propone la possibilità di sostituire parte della componente cementizia con scorie d'alto forno anche fino ad una percentuale di sostituzione del 90%. Tale operazione rende la miscela più lavorabile, compatibilmente con operazioni di scavo di lunga durata, e ne migliora le proprietà meccanica ed idrauliche. Tuttavia, è necessario adottare soluzioni per limitare l'infragilimento derivante dalla presenza delle scorie d'altoforno.

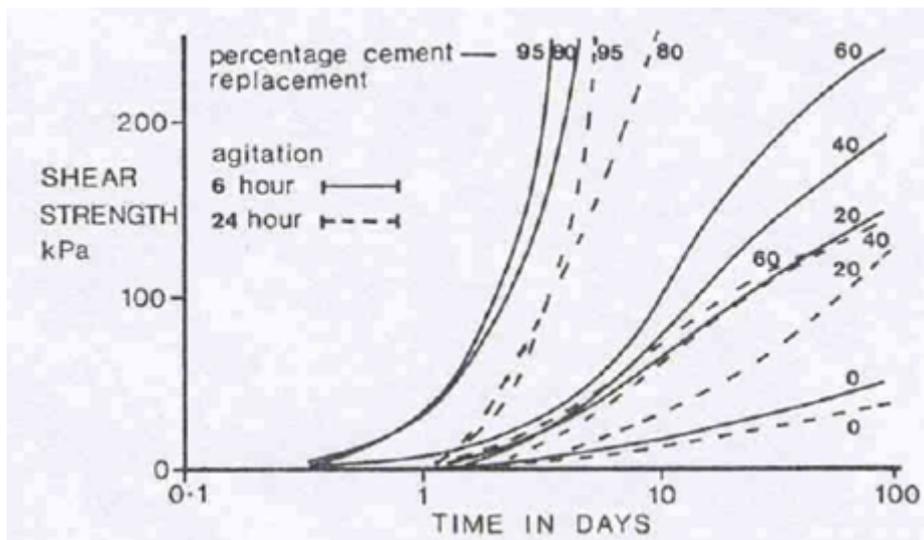


Figura 1.6: Resistenza a taglio sviluppata dalle miscele contenenti scorie d'altoforno [Jefferis, 1981]

In Figura 1.6 l'autore riporta le curve di sviluppo della resistenza al taglio in funzione della quantità di scorie d'alto forno usata come componente sostitutivo del cemento. Risulta evidente come il comportamento meccanico sia fortemente dipendente dal materiale in parola consentendo alla miscela di sviluppare una resistenza meccanica più alta in un minor tempo.

Il trattamento della miscela con componenti chimici per migliorare alcune proprietà

fisiche, come la velocità di indurimento, viene proposto dall'autore, tuttavia, l'elevata superficie specifica che caratterizza la bentonite tenderebbe a rendere non vantaggiosa economicamente tale soluzione a causa delle quantità di cui si necessiterebbe.

Un altro possibile componente sostituivo del cemento è rappresentato dalle ceneri volanti², che conferiscono alla miscela una maggiore lavorabilità ed una maggiore resistenza all'attacco di agenti chimici aggressivi.

In presenza di un ambiente chimicamente aggressivo l'autore oltre a suggerire la sostituzione della componente cementizia con ceneri volanti, suggerisce l'utilizzo di bentonite inerte in alte concentrazioni così da diminuire la permeabilità della miscela e rendere meno vulnerabile la componente cementizia agli attacchi chimici. La permeabilità della miscela cemento-bentonite controlla il livello di aggressione, anche se in ultima analisi bisogna considerare il cemento completamente degradato. Tuttavia, questa assunzione non necessariamente porterebbe all'inefficacia della soluzione adottata se la pressione di confinamento esercitata dal terreno circostante l'opera sia sufficiente ad evitare fenomeni di fessurazione e la miscela cemento degradato-bentonite presenti comunque un buon comportamento meccanico ed idraulico.

Un aspetto fondamentale delle miscele acqua-cemento-bentonite è stato approfondito da Stephen L. Garvin et Carolyn S. Hayles nel report "The chemical compatibility of cement-bentonite cut-off wall material, 1999" nel quale viene analizzata la compatibilità chimica delle componenti in relazione all'ambiente nel quale verranno inserite.

Lo studio condotto dagli autori riguarda una miscela composta da:

- Bentonite sodica;
- Cemento Portland;
- Scorie di altoforno sostitutive parziale della componente cementizia;
- Additivi chimici come ritardanti e disperdenti.

²Sottoprodotto della combustione di carbone polverizzato nelle centrali termoelettriche

L'utilizzo della bentonite sodica, il cui comportamento è descritto in Figura 4, deriva dalle sue considerevoli proprietà di rigonfiamento che permettono un'espansione pari a circa 10 – 15 volte il volume iniziale e la completa dissociazione dei cristalli di smectite. Altre proprietà rilevanti del tipo di bentonite oggetto di studio sono l'alta capacità di assorbimento ed un'alta dispersività. La microstruttura della bentonite idratata è rappresentata da un mezzo poroso anisometrico con grandi capacità di assorbimento. In accordo con gli studi di [Jefferis, 1981] anche gli autori dell'articolo in parola suggeriscono l'utilizzo di scorie di altoforno (ground granulated blast-furnace slag, ggbs) con una percentuale di sostituzione pari al 60 – 70% e ceneri volanti (pulverised fuel ash, pfa) con una percentuale di sostituzione compresa tra il 10 – 30% come componenti sostituenti il cemento. Si riportano in Tabella 1.2 le proporzioni composizionali suggerite [Garvin and Hayles, 1999].

Componente	Quantità
Bentonite	30 – 60 kg
Cemento	100 – 150 kg
Acqua	1000 kg
PC/ggbs	90 – 200 kg
PC/pfa	150 – 300 kg
PC	90 – 200 kg

Tabella 1.2: Quantità delle componenti per le miscele acqua-cemento-bentonite [Garvin and Hayles, 1999]

L'utilizzo delle scorie di altoforno può produrre effetti sul comportamento meccanico ed idraulico della miscela aumentandone la resistenza meccanica e diminuendone la permeabilità idraulica. Tuttavia, le caratteristiche fisiche della miscela PC/ggbs, nello specifico l'idratazione, pongono delle complicazioni sul raggiungimento contestuale della permeabilità e delle deformazioni ultime raggiungibili dalla miscela indurita. Gli autori evidenziano come una miscela che presenta come sostituyente le scorie di altoforno sviluppa molto rapidamente la resistenza meccanica, e nonostante raggiunga un valore di permeabilità idraulica pari a 10^{-9} m/s a 28gg, presenterà a lungo termine un comportamento fragile. Pertanto, risulta necessario trovare un compromesso tra i requisiti di resistenza meccanica e conducibilità idraulica, intervenendo sulla percentuale di componenti sostituenti, che garantisca un comportamento più duttile della miscela indurita ed una permeabilità idraulica

finale dell'ordine dei 10^{-9} m/s.

Gli autori dell'articolo in parola hanno svolto uno studio sperimentale riguardante la compatibilità delle componenti delle miscele in parola, ed in particolare evidenziano come sia strettamente legata al comportamento di cemento e bentonite esposte a particolari tipi di contaminanti o una combinazione degli stessi.

La caratterizzazione chimica dell'ambiente per il quale le miscele vengono progettate risulta, pertanto, di fondamentale importanza al fine di determinare la composizione ottimale che garantisca le prestazioni richieste e soprattutto la durabilità.

In letteratura si riscontrano numerosi studi sull'interazione tra argilla e componenti chimiche di vario genere. In generale è possibile affermare che il comportamento della bentonite risulta fortemente dipendente dal contenuto d'acqua la cui variazione ne altera la permeabilità idraulica e la microstruttura. Gli autori evidenziano come le cause dei fenomeni appena citati sono da ricercare in un'elevata concentrazione degli ioni Calcio (Ca^+) e in un pH fortemente alcalino causato dalle reazioni di idratazione della componente cementizia della miscela. La bentonite sodica, caratterizzata da un'elevata capacità di rigonfiamento, tende a interagire con le specie chimiche con cui viene a contatto effettuando uno scambio ionico tra Sodio (Na^+) e ad esempio Alluminio (Al^+) o Calcio (Ca^+). Il comportamento appena descritto altera la composizione e la microstruttura della bentonite sodica e ne limita fortemente le capacità di rigonfiamento, riducendo quindi l'assorbimento di acqua e di conseguenza determinandone un aumento della permeabilità [Garvin and Hayles, 1999].

L'analisi svolta dagli autori fin qui ha riguardato le miscele fresche, non ancora indurite, in cui è evidente che giocano un ruolo fondamentale l'aggressività dell'ambiente e la rapidità con cui la miscela alteri il suo stato fisico.

La compatibilità chimica e le interazioni tra la miscela acqua-cemento-bentonite allo stato indurito e le specie chimica inquinanti è stata indagata in letteratura avvalendosi di 4 metodi [Garvin and Hayles, 1999]:

- Miscelazione delle componenti con un appropriato volume di contaminante ed osservazione degli effetti prodotti (S.A. Jefferis, 1989; H. Brandl, 1992);
- Test di immersione del campione in una soluzione di una o più specie chimica contaminante (S.A. Jefferis, 1989; H. Meseck et R. Herhans, 1988);

- Permeazione dell'inquinante nel campione attraverso l'utilizzo di una cella triassiale predisponendo un carico idraulico ed una pressione di confinamento (P.J. Barker, 1992);
- Test di diffusione (H. Brandl, 1992).

Le metodologie proposte mirano ad indagare differenti aspetti dell'interazione miscela-contaminante come ad esempio la vulnerabilità a particolari specie chimiche piuttosto che altre, il tempo di reazione e l'aggressività dell'attacco chimico.

Gli autori indicando, inoltre, i principali composti chimici aggressivi (acidi organici ed inorganici, sali di magnesio ed ammonio e solfati) ed i meccanismi di attacco che sviluppano:

- Gli acidi reagiscono con il calcio presente nel cemento idratato degradandone i legami. L'aggressività di questo tipo di attacco chimico è funzione della solubilità dei prodotti di reazione, più è alta maggiore è l'aggressività.
- I sali di magnesio e ammonio attaccano la componente cementizia della miscela. Lo scambio ionico con il Calcio presente nella miscela tende a degradare la componente cementizia sostituendola con sali di calcio solubili che progressivamente verranno "espulsi" dal materiale.;
- I solfati reagiscono con il cemento provocando fenomeni di espansione e fessurazione a causa del maggiore volume caratterizzante i prodotti di tale reazione.;
- I fenoli (acidi deboli) ed altre soluzioni organiche hanno un effetto trascurabile sia sul cemento che sulla bentonite. Tuttavia, alcuni composti (anilina e cloruro di ammonio) possono alterare la microstruttura e la porosità della miscela.

Emerge quindi, la necessità di additivare le miscele acqua-cemento-bentonite con altri componenti sostitutivi (scorie d'altoforno e ceneri volanti) o complementari (additivi chimici) al fine di migliorarne le proprietà di resistenza da attacco chimico.

In particolare, gli autori suggeriscono che in caso di attacco chimico da solfati in concentrazione compresa tra i 150 – 1500 mg/l il contenuto di C_3A nel cemento portland deve essere inferiore all'8%. In caso di concentrazioni maggiori di 1500 mg/l il

contenuto di C_3A deve essere inferiore al 5%.

L'importanza dell'analisi della compatibilità chimica tra le componenti della miscela e l'ambiente nel quale verranno poste in opera risiede nell'importanza nel garantire le prestazioni durante l'intera vita utile. La funzione principale dei diaframmi verticali cemento-bentonite è quella di limitare e quasi azzerare la diffusione delle sostanze chimiche inquinanti nell'ambiente circostante. In tale aspetto, gioca un ruolo fondamentale la microstruttura e la porosità del materiale. Pertanto, è necessario che le componenti rispondano a caratteristiche specifiche funzione della tipologia di attacco chimico che ci si aspetta. È stato discusso e trattato che in ambienti particolarmente aggressivi è opportuno utilizzare miscele ad alta concentrazione di bentonite essendo una componente inerte. Ovviamente, l'alta concentrazione di bentonite porta ad una minore resistenza meccanica, ma contemporaneamente una minore permeabilità idraulica che permette di mitigare l'aggressione chimica alla componente cementizia.

Per una completa trattazione dell'argomento fino a qui discusso, si riporta la sperimentazione ed i risultati raggiunti da [Garvin and Hayles, 1999].

Mix. no	Bentonite	Ggbs	Pfa	PC	Totale cemento
1A	40 kg	N/A	36 kg	84 kg	120 kg
2A	40 kg	N/A	60 kg	140 kg	200 kg
3A	40 kg	N/A	N/A	200 kg	200 kg
4A	40 kg	40 kg	100 kg	60 kg	200 kg
1B	40 kg	N/A	37.5 kg	112.5 kg	150 kg
2B	40 kg	N/A	60 kg	90 kg	150 kg
3B	40 kg	N/A	75 kg	225 kg	300 kg
4B	40 kg	N/A	120 kg	180 kg	300 kg

Tabella 1.3: Proporzioni miscela per 1000 litri di acqua [Garvin and Hayles, 1999]

Il programma di sperimentazione si basa sull'utilizzo del test di immersione per caratterizzare la compatibilità chimica delle miscele cemento-bentonite. La scelta di tale metodologia sperimentale risiede nelle seguenti ragioni:

- Semplicità di esecuzione ed economicità della prova;
- Analisi in condizioni critiche di attacco chimico, rappresentando un processo più severo rispetto a quello reale.

Gli autori hanno realizzato 8 miscele di cui si descrive la composizione in Tabella 1.3 e di cui forniscono le analisi chimiche della componente cementizia e dei suoi sostituenti in Tabella 4.

Oxide	Pfa	Ggbs	PC
<i>CaO</i>	1.88 %	42.78 %	63.57 kg
<i>SiO₂</i>	49.41 %	33.09 %	22.08 kg
<i>Al₂O₃</i>	24.21 %	12.59 %	5.15 kg
<i>Fe₂O₃</i>	13.99 %	0.4 kg	3.55 kg
<i>NaO₂</i>	0.57 %	0.21 %	0.22 kg
<i>MgO</i>	1.62 %	7.59 %	2.4 kg
<i>K₂O</i>	3.21 %	0.38 %	0.7 kg
<i>SO₃</i>	0.76 %	N/A	3.12 kg
<i>Mn₂O₃</i>	0.0007 %	N/A	N/A
<i>LOI</i>	2.89 %	0.4 %	N/A
<i>Insolubles</i>	40 %	0.07 %	N/A
<i>FreeCao</i>	40 %	0 %	N/A

Tabella 1.4: Anilisi chimiche di PC, ggbs e pfa utilizzate nella sperimentazione [Garvin and Hayles, 1999]

I campioni descritti sono stati prodotti considerando 1/10 delle proporzioni e la procedura per la preparazione è la seguente:

1. Miscelazione della bentonite sodica con acqua agitando il composto per 5 min;
2. È stata lasciata idratare la bentonite per 24 h ad una temperatura di $20 \pm 5^\circ C$;
3. Miscelazione della componente cementizia (PC) con le componenti sostitutive;
4. Miscelazione della componente secca con la bentonite idratata agitando il composto per 5 min;
5. Verifica dell'omogeneità del composto ottenuto;
6. Colata della miscela fresca negli stampi per la sperimentazione.

Dopo 28 gg di maturazione i campioni sono stati tagliati funzionalmente alle dimensioni del tubo utilizzato per la prova di immersione alla quale sono stati sottoposti per un massimo di 6 mesi.

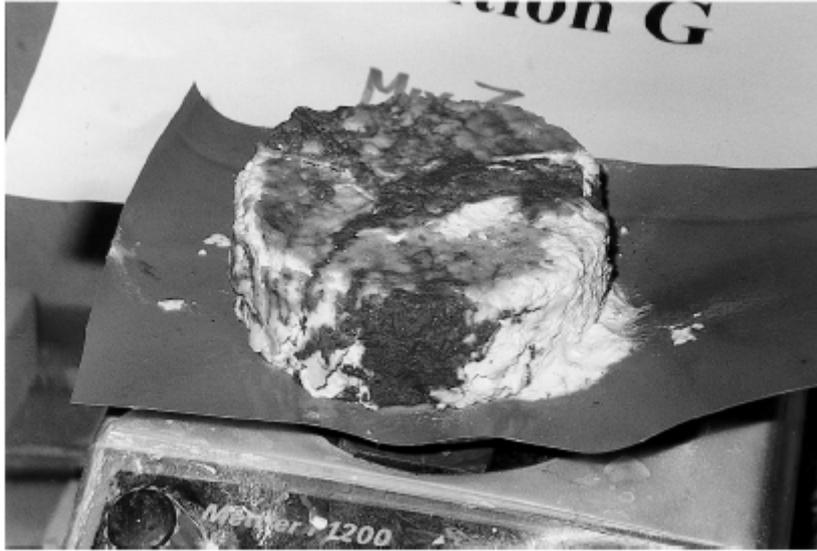


Figura 1.7: Campione utilizzato per il test di immersione [Garvin and Hayles, 1999]

Sono state preparate inoltre, 6 soluzioni la cui composizione è stata scelta in funzione delle tipologie di contaminanti più aggressivi:

- Soluzione A: solfato di sodio $[SO_4^{2-}] = 4200 \text{ mg/l}$, $pH > 7$;
- Soluzione B: solfato di sodio $[SO_4^{2-}] = 4200 \text{ mg/l}$, $pH = 2$;
- Soluzione C: solfato di sodio $[SO_4^{2-}] = 1000 \text{ mg/l}$;
- Soluzione D: solfato di magnesio $[SO_4^{2-}] = 1000 \text{ mg/l}$;
- Soluzione E: fenoli = 10000 mg/l ;
- Soluzione F: acido solforico $pH = 2$;

Al termine della fase di sperimentazione gli autori propongono le seguenti osservazioni in relazione allo stato fisico dei campioni e le relative influenze della composizione.

La soluzione A di solfato di sodio $[SO_4^{2-}] = 4200 \text{ mg/l}$ avente un $pH > 7$ ha provocato un deterioramento in tutti i campioni testati, tuttavia si è riscontrata una maggiore resistenza nei campioni PC/pfa ad alta concentrazione di PC.

La soluzione B di solfato di sodio $[SO_4^{2-}] = 4200 \text{ mg/l}$, $pH = 2$ ha provocato un

rapido deterioramento di tutti i campioni. I campioni PC/pfa contenenti alte concentrazioni di PC hanno mostrato una resistenza leggermente maggiore.

La soluzione C di solfato di sodio $[SO_4^{2-}] = 1000 \text{ mg/l}$ ha provocato un aggressivo deterioramento nelle miscele ad alta concentrazione di cemento. I campioni PC/ggbs/pfa hanno evidenziato una maggiore resistenza.

La soluzione D di solfato di magnesio $[SO_4^{2-}] = 4200 \text{ mg/l}$ ha provocato il deterioramento di tutti i campioni testati in particolar modo in quelli a bassa concentrazione di pfa. I risultati sono stati simili a quelli della soluzione C.

La soluzione E di fenoli $= 10000 \text{ mg/l}$ ha provocato deterioramento da dechlorazione senza manifestare particolari fenomeni di fessurazione. Tutte le miscele hanno manifestato una buona resistenza a questa tipologia di attacco chimico.

La soluzione F di acido solforico con $pH = 2$ ha provocato un veloce deterioramento di tutti i campioni testati. Tutte le miscele hanno evidenziato una bassa resistenza all'attacco acido e sono stati deteriorati in 2-3 mesi. In Tabella 1.5 è riassunto dagli autori il risultato degli effetti del test di immersione su tutti i campioni secondo la seguente scala di valutazione qualitativa:

- Molto debole (VP): 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%.

Mix no.	A	B	C	D	E	F
1A	VP	VP	VP	VP	M	VP
2A	VP	VP	M	M	M	VP
3A	M	P	P	VP	M	N/A
4A	G	VP	VP	G	M	VP
1B	VP	VP	P	P	M	VP
2B	P	VP	P	P	P	VP
3B	G	P	G	VP	G	P
4B	VVP	P	G	G	G	P

Tabella 1.5: Classificazione dei risultati del test di immersione [Garvin and Hayles, 1999]

In conclusione, secondo [Garvin and Hayles, 1999] i test di immersione rappresentano una buona soluzione per indagare la compatibilità chimica delle miscele acqua-cemento-bentonite con le specie chimiche contaminanti. In questo modo è possibile studiare le performance di determinate composizioni in relazione ad un determinato ambiente chimico così da ottenere informazioni sulla durabilità del manufatto. In questo studio è emerso come alcuni tipi di miscele sono più suscettibili al contatto con agenti chimici aggressivi piuttosto che altre contenenti ad esempio ggbs o pfa in termini di deterioramento. Inoltre, evidenziano come le miscele contenenti PC o PC/pfa in alta concentrazione presentano una migliore resistenza al deterioramento da parte di agenti chimici, pertanto suggeriscono di considerare miscele ad alta concentrazione di componente cementizia. In ultima analisi sulla caratterizzazione fisica e sulla compatibilità chimica delle miscele acqua-cemento-bentonite si riporta uno studio effettuato da [Fratolocchi et al., 2006]. Lo studio riguarda la conducibilità idraulica delle miscele in parola sottoposte a trattamenti in acqua e in percolato. In opposizione a quanto espresso da [Garvin and Hayles, 1999] gli autori sostengono che il test di immersione sia eccessivamente severo per definire le caratteristiche di un diaframma plastico realizzato con miscela cemento-bentonite e che misure dirette della conducibilità idraulica possono fornire indicazioni più affidabili sulla vita utile dell'opera e sulle sue performance.

La sperimentazione effettuata dagli autori è stata effettuata sia su campioni costruiti in laboratorio la cui composizione è descritta in Tabella 6 sia su campioni prelevati da un diaframma plastico realizzato in sito a differenti istanti di tempo. I liquidi con i quali è stato testato il materiale sono percolato, le cui caratteristiche sono esposte in Tabella 1.7, ed acqua.

La scelta di utilizzare il percolato per le prove eseguite sui campioni risiede nella caratteristica di poter essere un agente aggressivo per le miscele a base di cemento a causa dell'alta concentrazione di solfati caratterizzato da un basso pH. Il classico deterioramento dovuto alla presenza di tali sostanze consiste in fenomeni di fessurazione a causa dell'espansione generata dalla formazione di prodotti secondari quali ettringite e gesso. Questo fenomeno porta alla genesi di una rete di fessure che causa un innalzamento della conducibilità idraulica e quindi una riduzione della funzionalità dell'opera e della sua vita utile. Inoltre, l'attacco da solfati può causare la formazione di Thaumasite³ che a temperature inferiori ai 15°C provoca danni alla microstruttura, indebolendola.

Componente	Quantità
Cemento	240 g
Bentonite	60 g
Acqua	1000 g

Tabella 1.6: Proporzioni miscela cemento-bentonite [Fratolocchi et al., 2006]

pH	2.1 [-]
Conducibilità elettrica	22.2 mS/cm
SO_4^-	3968 ppm
HPO_4^{--}	23867 ppm
F^-	619 ppm
Cl^-	4088 ppm
Fe^-	22 ppm
Zn^-	18 ppm
Al_4^-	27 ppm

Tabella 1.7: Composizione chimica del percolato [Fratolocchi et al., 2006]

I campioni realizzati in laboratorio sono stati preparati in accordo con le procedure raccomandate dal ETC8 (1993). Per la realizzazione dei campioni è stata miscelata la bentonite sodica con l'acqua. Le proporzioni seguite sono state 60 parti di bentonite e 1000 di acqua. Dopo ventiquattro ore di idratazione è stato aggiunto

³minerale del gruppo dell'ettringite

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.

I campioni sono stati realizzati in cilindri di 7 cm di diametro e 10 cm di altezza. La maturazione dei campioni è stata fatta avvenire in acqua o percolato e 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.

I risultati ottenuti dal programma di sperimentazione hanno evidenziato la formazione di fessure nei campioni maturati a contatto con il percolato dopo 6-7 mesi, tuttavia viene segnalato come l'assenza di una pressione di confinamento possa sovrastimare il deterioramento verificatosi. Questa considerazione è stata provata dal campione prelevato dal diaframma verticale realizzato in situ dopo un anno dalla sua realizzazione poiché non presentava nessun tipo di deterioramento. Risulta evidente quindi, che la presenza di una pressione di confinamento tende a conferire al materiale una maggiore resistenza da attacco chimico.

Al fine di caratterizzare dal punto di vista idraulico queste miscele in relazione alla compatibilità chimica con l'ambiente circostante sono stati prodotti test per determinarne la conducibilità idraulica k [cm/s]. In Figura 1.9 vengono riportati i risultati ottenuti per due campioni di miscela preparati in laboratorio sui quali è stata condotta la prova di conducibilità idraulica sia con acqua sia con il percolato. La curva evidenzia come un valore di conducibilità idraulica che si attesta intorno ai 10^{-8} cm/s viene raggiunto in tempi sostanzialmente brevi (circa 1 mese) per entrambi i campioni.

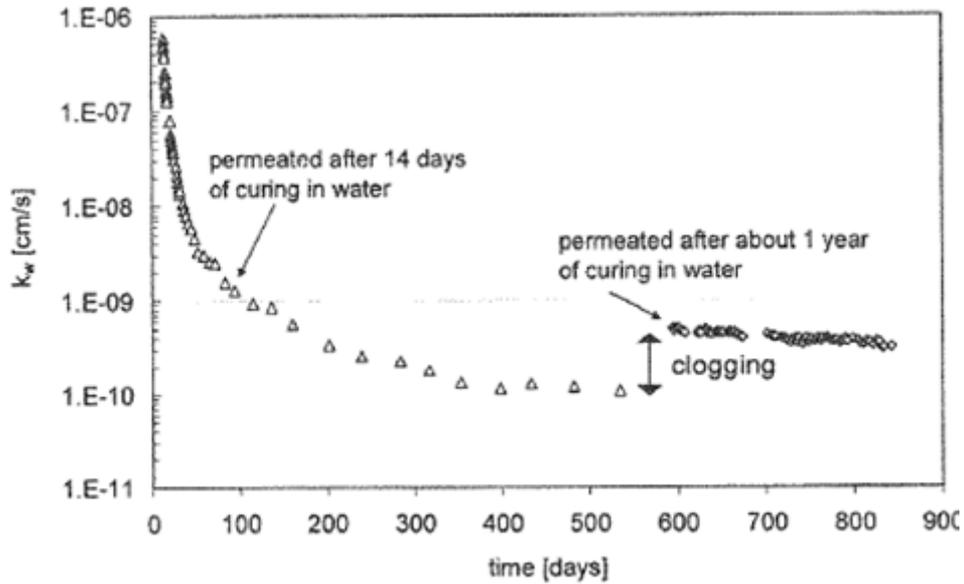


Figura 1.8: Andamento della conducibilità idraulica del campione immerso in acqua [Fratolocchi et al., 2006]

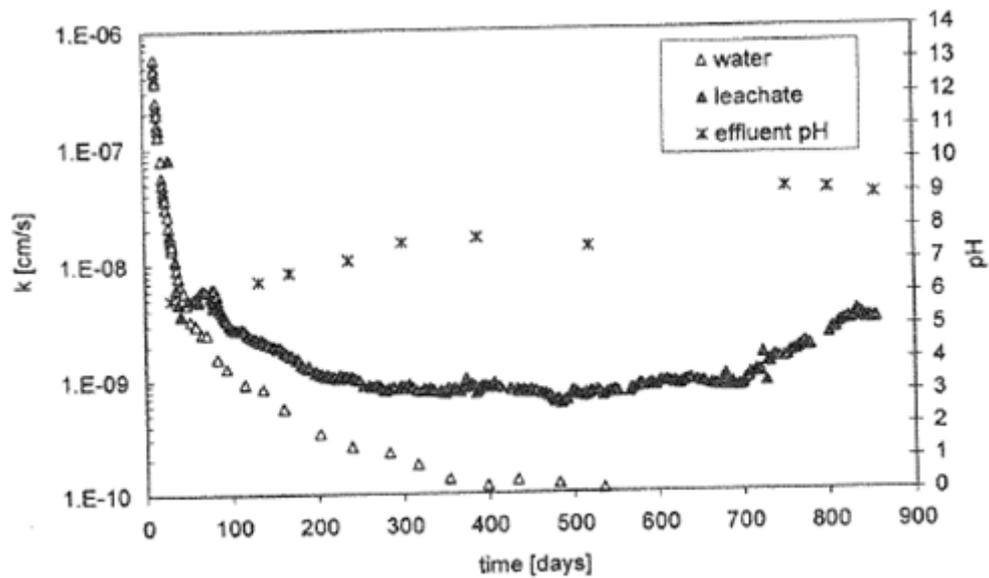


Figura 1.9: Andamento della conducibilità idraulica per differenti liquidi di permeazione [Fratolocchi et al., 2006]

A medio-lungo termine l'andamento della conducibilità idraulica dei campioni testati mostra una marcata differenza. La progressiva esposizione ad un attacco

acido da parte del percolato ed a causa della reazione dei solfati con la componente cementizia della miscela viene a formarsi ettringite come prodotto secondario di reazione, che causando un rigonfiamento del materiale ne altera la struttura fisica (aumento dell'indice dei vuoti) generando così un aumento della conducibilità idraulica. Questo aspetto, suggeriscono gli autori, è possibile arginarlo considerando una pressione di confinamento di circa 100 kPa. Un altro effetto negativo dell'attacco dei solfati è la dissoluzione del carbonato causata dall'acidità della soluzione acquosa che porta alla dissoluzione della matrice cementizia del materiale oggetto di studio.

In conclusione, considerando la severità delle condizioni di prova (assenza di pressione di confinamento ed alti gradienti idraulici) gli autori evidenziano come le proprietà idrauliche delle miscele a lungo termine hanno comunque prodotto buoni risultati evidenziando valori di conducibilità idraulica bassi. Accreditano come soluzione efficiente per la messa in sicurezza permanente di siti contaminati l'utilizzo di diaframmi plastici realizzati con miscele acqua-cemento-bentonite, tuttavia segnalano che un ambiente chimico particolarmente aggressivo (bassi valori di pH ed alte concentrazioni di solfati) possano provocare danni alla microstruttura del materiale con conseguente alterazione delle performance idrauliche.

1.3 Caratteristiche meccaniche ed idrauliche

La caratterizzazione meccanica ed idraulica delle miscele acqua-cemento-bentonite è stata ampiamente sviluppata nell'ambito della ricerca nel campo dell'Ingegneria Civile. Numerosi autori hanno condotto studi avvalendosi di prove triassiali, prove di compressione monoassiale e prove edometriche per la caratterizzazione meccanica e di prove di conducibilità idraulica per la caratterizzazione idraulica delle miscele in parola. In relazione a quanto già detto le miscele oggetto di studio presentano materiali parzialmente sostitutivi della componente cementizia giustificandone l'utilizzo nella maggiore compatibilità chimica e nel miglioramento delle caratteristiche idrauliche. Nella presente trattazione si farà riferimento ai principali autori che hanno indagato le caratteristiche meccaniche ed idrauliche delle miscele in parola presentandone le metodologie di sperimentazione ed i risultati ottenuti.

Nella presente trattazione si farà riferimento ai principali autori che hanno indagato le caratteristiche meccaniche ed idrauliche delle miscele in parola presentandone le metodologie di sperimentazione ed i risultati ottenuti.

[Evans and Opdyke, 2006] autori dell'articolo "Strength, permeability and compatibility of slag-cement-bentonite slurry wall mixtures for constructing vertical barriers" hanno condotto studi su miscele acqua-cemento-bentonite e su miscele alle quali è stata sostituita parzialmente la componente cementizia con scorie d'altoforno.

Per lo studio della resistenza meccanica e della conducibilità idraulica 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% ed il 90% (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). 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. 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.

Gli autori hanno condotto i test di compressione monoassiale su provini con maturazione in acqua a 28 giorni. In Figura 1.10 sono riportati i risultati ottenuti da tale test ed evidenziano, in assenza di materiale sostitutivo, un incremento del valore

di resistenza a compressione monoassiale crescente al crescere della percentuale di componente cementizia. Inoltre, in accordo con quanto espresso da altri autori per una percentuale di sostituzione di circa 70-80% della componente cementizia con le scorie d'altoforno risulta fortemente apprezzabile l'aumento in resistenza che il materiale conferisce alla miscela. La percentuale di sostituzione appena indicata corrisponde a quella per cui si ottengono miglioramenti apprezzabili anche per la conducibilità idraulica.

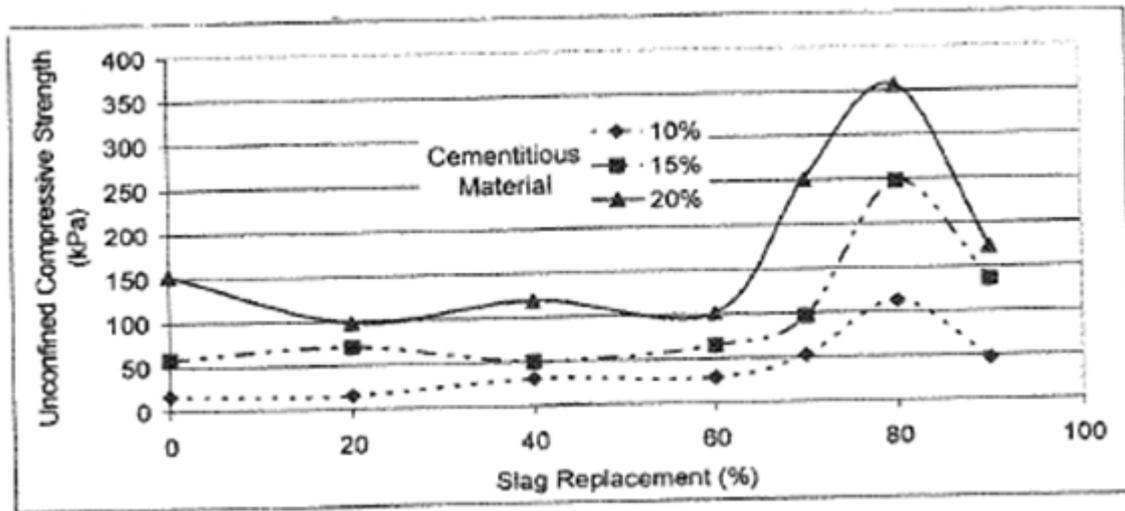


Figura 1.10: Resistenza a compressione monoassiale a 28 gg [Evans and Opdyke, 2006]

La deformazione a rottura per i campioni analizzati è bassa, 3%, ma generalmente aumenta all'aumentare dell'ottimizzazione della resistenza.

In Figura 1.11 è riportata l'influenza del contenuto di cemento sulla conducibilità idraulica delle miscele per provini maturati in acqua a 28 giorni. Risulta evidente che la conducibilità idraulica è pressoché costante fino al 70% di componente sostituita di quella cementizia. Un netto miglioramento di questo parametro è apprezzabile per una percentuale di componente sostituita pari all'80% (la medesima per il miglioramento delle caratteristiche meccaniche).

Un'ulteriore considerazione riguarda la quantità di cemento contenuta nelle miscele. I risultati evidenziano come, le miscele prodotte con il 20% di componente cementizia beneficiano, seppur di poco, dei miglioramenti conferiti dall'aggiunta delle scorie d'altoforno, pertanto gli autori consigliano che una composizione ottimale per la produzione delle miscele è rappresentata dal 20% di materiale cementizio composto

rispettivamente dall'80% di scorie d'alto forno e dal 20% di cemento Portland.

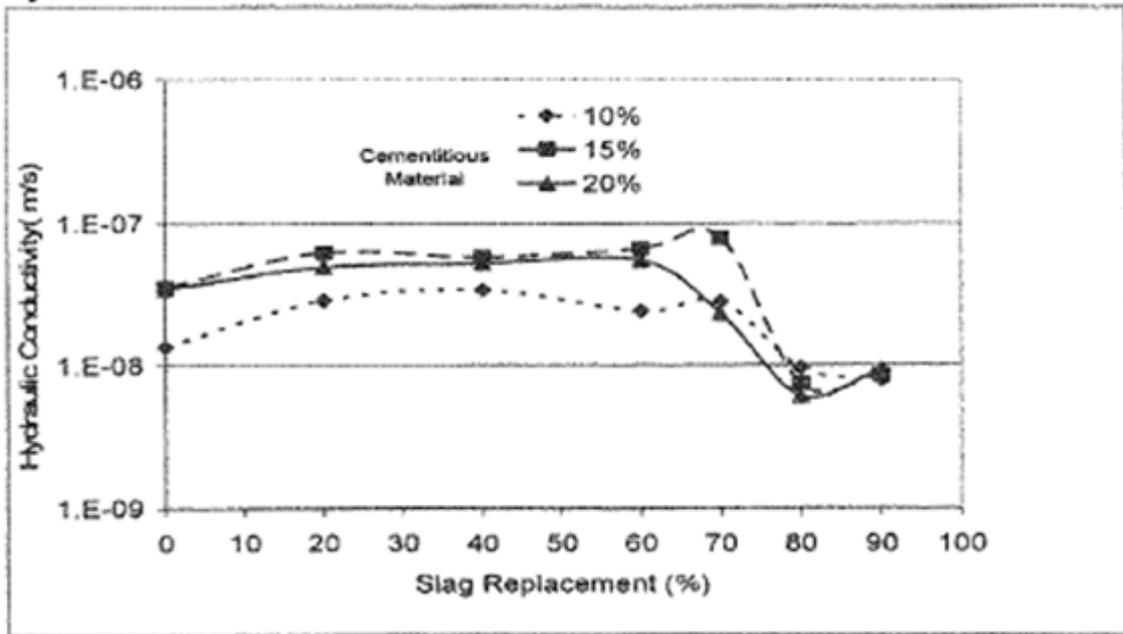


Figura 1.11: Influenza del contenuto di cemento sulla conducibilità idraulica delle miscele a 28gg [Evans and Opdyke, 2006]

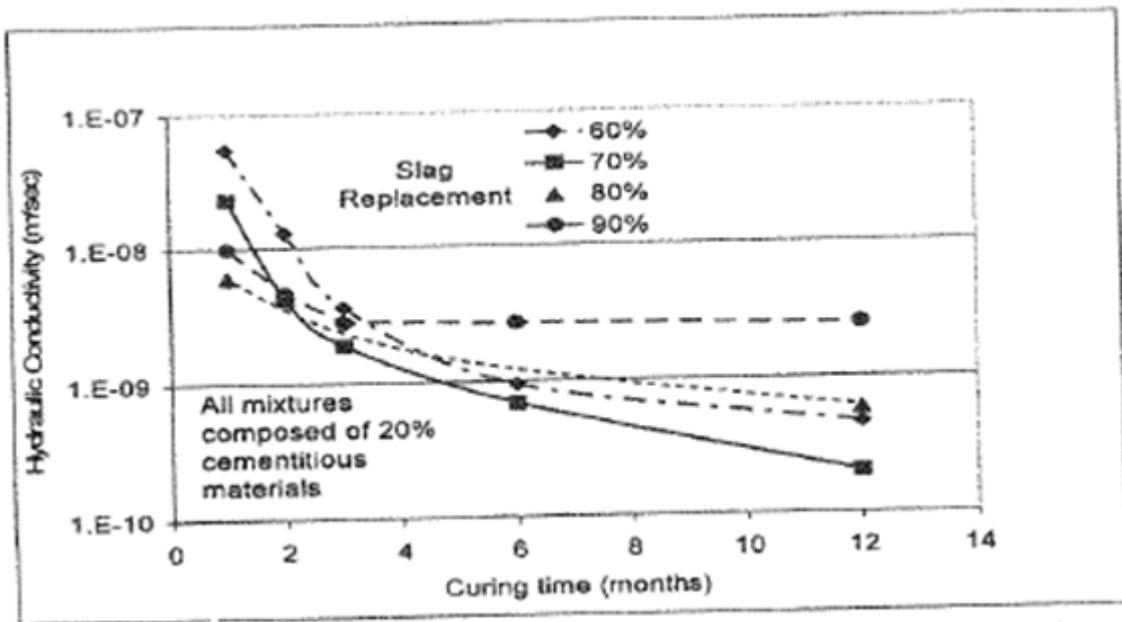


Figura 1.12: Influenza del tempo di maturazione e del contenuto di scorie d'altoforno sulla conducibilità idraulica [Evans and Opdyke, 2006]

In Figura 1.12 viene riportata l'influenza del tempo di maturazione (in mesi) su miscele preparate con il 20% di componente cementizia a sua volta presentante una componente sostitutiva (scorie d'altoforno) variabile dal 60% al 90%. Il trend delle curve sperimentali mostra per quasi tutte le miscele un sostanziale miglioramento raggiungendo valori, dopo 12 mesi di maturazione di acqua, dell'ordine di grandezza di 10^{-9} m/s. Un completo ed esauriente apporto all'indagine del comportamento meccanico delle miscele acqua-cemento-bentonite è stato dato da [Soga et al., 2013]. Gli autori, nel loro programma di sperimentazione, indagano le proprietà del materiale per fornire indicazioni sul comportamento a breve e a lungo termine delle miscele. La misura della conducibilità idraulica e la resistenza a compressione monoassiale sono due importanti parametri che riescono a descrivere il comportamento delle miscele a breve termine. Tuttavia, rappresentando la condizione a lungo termine l'elemento di criticità nel comportamento delle miscele in parola, gli autori sottolineano come questo sia fortemente dipendente da alcuni fattori esterni che includono il mix design, le modalità di posa in opera e l'assenza o la presenza di contaminanti aggressivi a diretto contatto con i diaframmi plastici verticali, l'invecchiamento, la desaturazione e lo stato tensionale in sito.

Prima di analizzare gli aspetti e la sperimentazione condotta dagli autori per la caratterizzazione meccanica delle miscele è opportuno descrivere un modello concettuale di comportamento meccanico del materiale. Le miscele acqua-cemento-bentonite presentano un contenuto d'acqua considerevole e la maggior parte rimane disponibile all'interno della struttura porosa. Generalmente, nella meccanica delle terre sature, l'acqua contenuta nei pori può essere trattata come volume dei vuoti, tuttavia, nello specifico caso delle miscele in parola, questo elemento è parte integrante del materiale indurito e la sua perdita può causare un ritiro progressivo e permanente del materiale. Il materiale secco risultante non può essere classificato come idoneo per la realizzazione dei diaframmi plastici per la messa in sicurezza permanente dei siti contaminati poiché presenta delle proprietà fortemente mutate rispetto al materiale saturo.

La microstruttura delle miscele presenta un network di grani cementati che aumento la percentuale di vuoti, la resistenza meccanica e contemporaneamente abbassano la conducibilità idraulica. La struttura presenta un comportamento rigido quando un basso valore di carico viene applicato, quando il carico supera la tensione di

snervamento, la matrice porosa collassa rapidamente generando una grande deformazione volumetrica.

La tensione di snervamento in compressione rappresenta la soglia di pressione oltre la quale i legami della matrice cementizia si rompono e la matrice porosa si occlude rapidamente.

In Figura 1.13 è rappresentata la curva di compressione monodimensionale di un provino di miscela cemento-bentonite dopo 15 mesi di maturazione [Evans and Opdyke, 2006] il cui indice di compressione è pari a $C_c = 0.97$, l'indice di ricomprensione $C_r = 0.10$ e la pressione di preconsolidazione risulta essere compresa tra i 100 kPa ed i 200 kPa. Inoltre, è interessante notare (sull'asse delle ordinate) l'alto indice dei vuoti che caratterizza questo materiale compreso tra 9.9 ed 11.1 che riflette un basso contenuto nel volume di particelle solide.

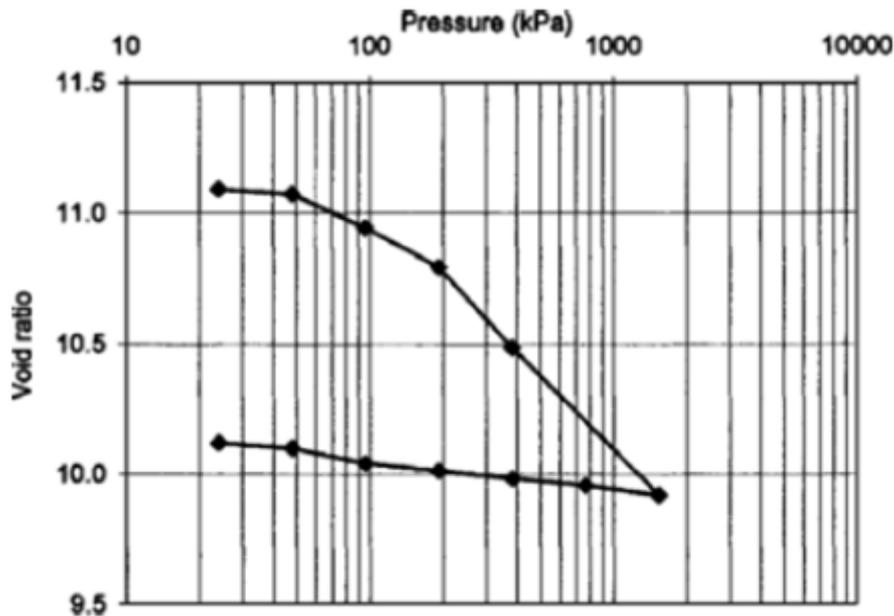


Figura 1.13: Consolidamento monodimensionale della miscela cemento-bentonite dopo 15 mesi di maturazione [Evans and Opdyke, 2006]

In contrapposizione al valore di tensione di snervamento determinato da [Evans and Opdyke, 2006], Manassero et al. (1995) determinano una tensione di snervamento pari a 700 kPa, cioè 3-7 volte quella determinata in Figura 1.13, ed un indice dei vuoti compreso tra 4.2 e 5.2 per una compressione isotropa con valori di tensione simili a quelli utilizzati da [Evans and Opdyke, 2006]. La differenza di risultati

può essere ricondotta ad un diverso rapporto tra i costituenti della miscela. I diversi risultati ottenuti dagli autori citati evidenziano come la scelta sulle proporzioni delle componenti costituenti la miscela finita di acqua-cemento-bentonite producano considerevoli variazioni sulle proprietà fisiche e meccaniche del materiale.

[Soga et al., 2013] hanno, inoltre, condotto prove triassiali in condizioni drenate su provini di miscela cemento-bentonite con due valori di tensione di confinamento radiale 100 kPa e 500 kPa. Le prove condotte con una tensione di confinamento radiale pari a 100 kPa, nelle quali il campione è stato consolidato al di sotto della tensione di snervamento, mostrano una resistenza drenata tra i 660–850 kPa e delle deformazioni assiali di picco comprese tra il 5 – 10%. Come riportato in Figura 1.14 il comportamento esibito dal materiale è di tipo duttile.

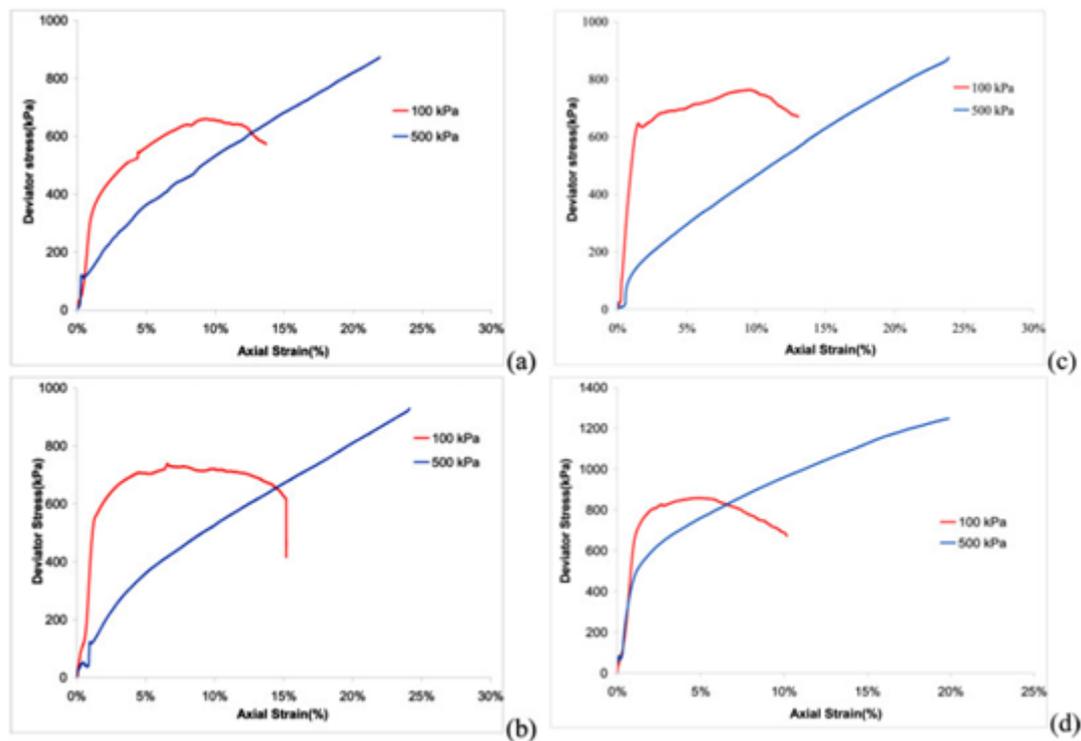


Figura 1.14: Percorsi di tensione prove triassiali in condizioni drenate [Soga et al.,2013]

In Figura 1.14 ed in Figura 1.15 il grafico a) fa riferimento ad un provino realizzato in laboratorio maturato 35 gg, il grafico b) fa riferimento ad un provino realizzato in laboratorio maturato 90 gg, il grafico c) fa riferimento ad un provino

realizzato in laboratorio maturato 4.25 anni ed il grafico d) fa riferimento ad un provino estratto da un sito maturato 12.25 anni.

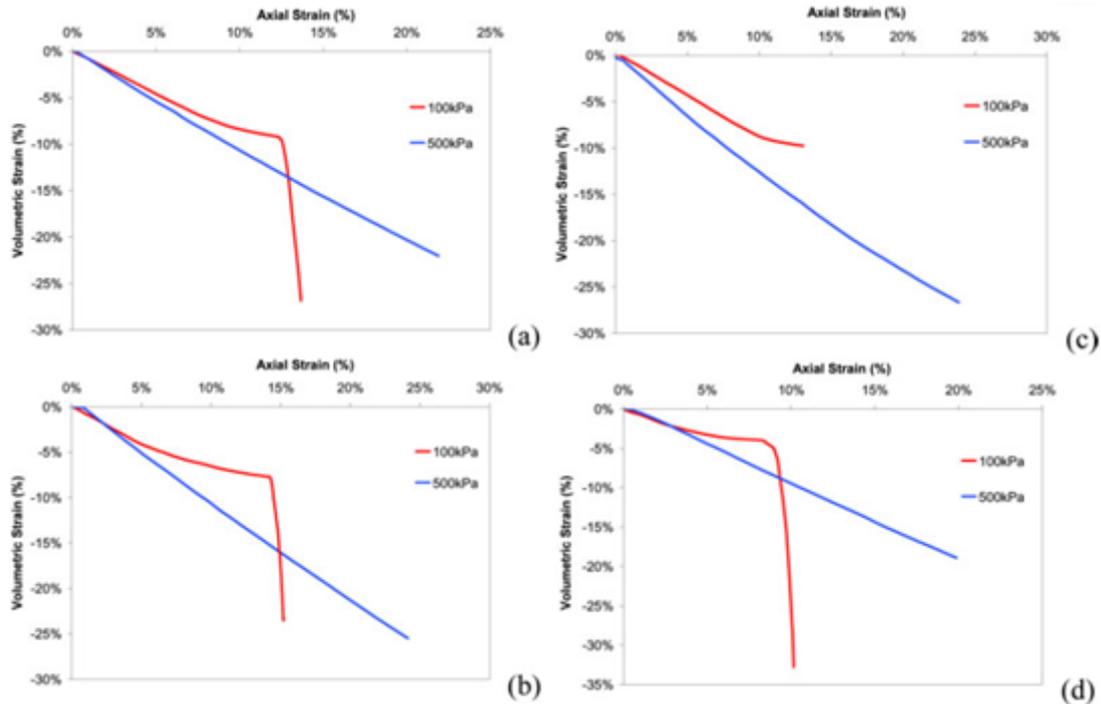


Figura 1.15: Curve di deformazione prove triassiali in condizioni drenate [Soga et al.,2013]

La prova eseguita con una pressione di confinamento radiale pari a 500 kPa evidenzia un comportamento sostanzialmente differente dal primo descritto. Il consolidamento del campione è stato eseguito per una pressione inferiore a quella di snervamento e la curva evidenzia come non viene raggiunta la rottura ed il materiale esibisce un comportamento incrudente. Il test è stato fermato al raggiungimento del 20-25% di deformazione assiale per prevenire danni alla strumentazione.

In Figura 1.15 gli autori riportano i risultati delle curve di deformazione associate alle prove triassiali in condizioni drenate di cui in Figura 1.14.

Entrambe le prove condotte a 100 kPa e 500 kPa evidenziano un comportamento contraente con una forte variazione della deformazione volumetrica. La prova a 500 kPa mostra una relazione lineare tra la deformazione assiale e quella volumetrica con un rapporto di crescita per entrambi pari ad 1:1. La prova a 100 kPa

inizialmente presenta una relazione lineare tra la deformazione assiale e la deformazione volumetrica fino al raggiungimento del picco della tensione deviatorica. La deformazione volumetrica incrementa drasticamente dal 12% al 15% della deformazione assiale fino al termine della prova. Questo brusco incremento è dovuto al percorso tensionale seguito dal provino sottoposto a prova triassiale con 100 kPa di tensione di confinamento radiale che raggiunge il livello di tensione di snervamento a compressione.

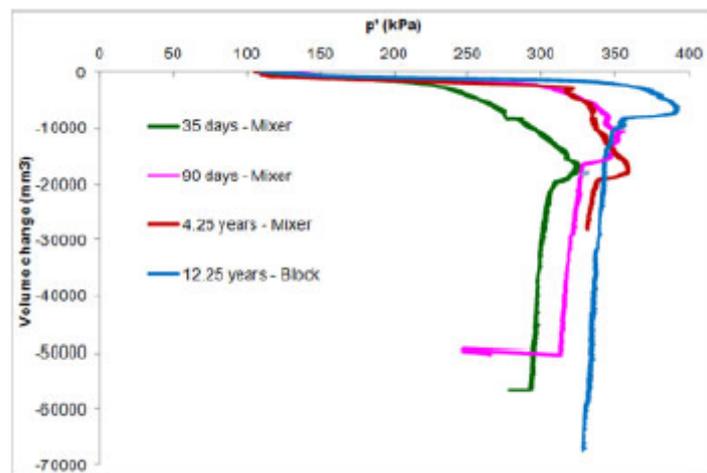


Figura 1.16: Rapporto tra il parametro p' e la variazione di volume della prova triassiale in condizione drenate a 100 kPa [Soga et al., 2013]

In Figura 1.16 è rappresentato il comportamento del provino sottoposto a prova triassiale in condizioni drenate nei termini della variabile p' e della variazione di volume. Si osserva che non vi sono variazioni di volume fino al raggiungimento della variabile p' di valori che si attestano intorno ai 300 – 400 kPa, che corrispondono circa al valore della tensione di snervamento in compressione. Nel momento in cui lo stato tensionale supera quello di snervamento il provino inizia ad esibire forti variazioni volume. A rottura il valore di p' decade e la struttura del provino collassa.

In Figura 1.17 sono rappresentati tre differenti tipi di comportamento del materiale oggetto di studio che corrispondono a tre diversi modi in cui il materiale può arrivare a rottura. Il primo campo è chiamato “*strain hardening*”, dove il provino sottoposto a compressione presenta un incremento di resistenza dovuto al decremento del

volume dei vuoti. La rottura avviene per valori di pressione di confinamento pari a 500 kPa per tutti i test. Gli altri due campi fanno riferimento ad un comportamento duttile e fragile.

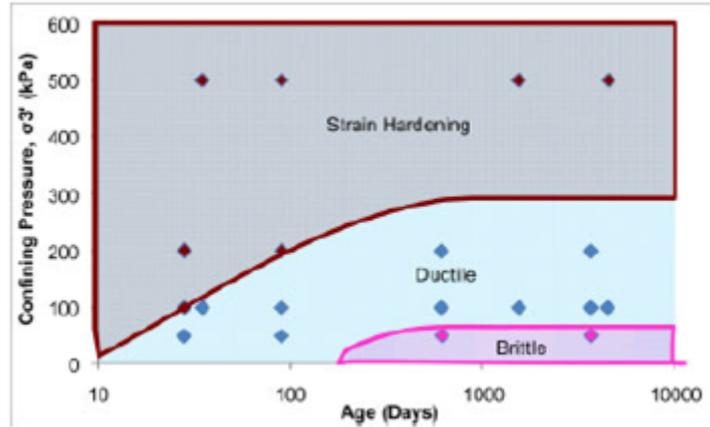


Figura 1.17: Modelli costitutivi in funzione della pressione di confinamento e della maturazione delle miscele cemento-bentonite [Soga et al., 2013]

Gli autori, inoltre, hanno indagato il comportamento meccanico del materiale in condizioni non drenate. [Joshi et al., 2010] hanno condotto prove triassiali in condizione non drenata su provini consolidati isotropicamente a differenti stati di invecchiamento. I provini sono stati testati considerando differenti pressioni di confinamento al fine di relazionare il livello tensionale e quello deformativo.

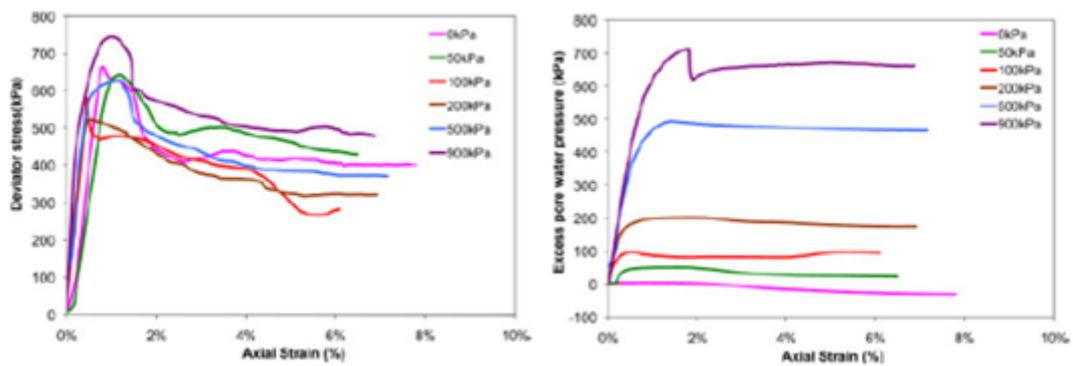


Figura 1.18: Relazione tenso-deformativa e variazione della pressione dell'acqua in prova triassiale non drenata [Soga et al., 2013]

In Figura 1.18 sono riportati i risultati di una prova triassiale in condizioni non

drenate in termini di relazione sforzo-deformazione e di variazione della pressione dell'acqua in funzione della deformazione assiale. Il comportamento del materiale non evidenzia significative differenze in funzione della pressione di confinamento in termini di resistenza non drenata e la pressione dell'acqua raggiunge un livello tensionale molto elevato. La resistenza non drenata del materiale risulta compresa tra i 535 – 745 kPa ad un corrispondente livello di deformazione assiale compreso tra 0.5 – 2%.

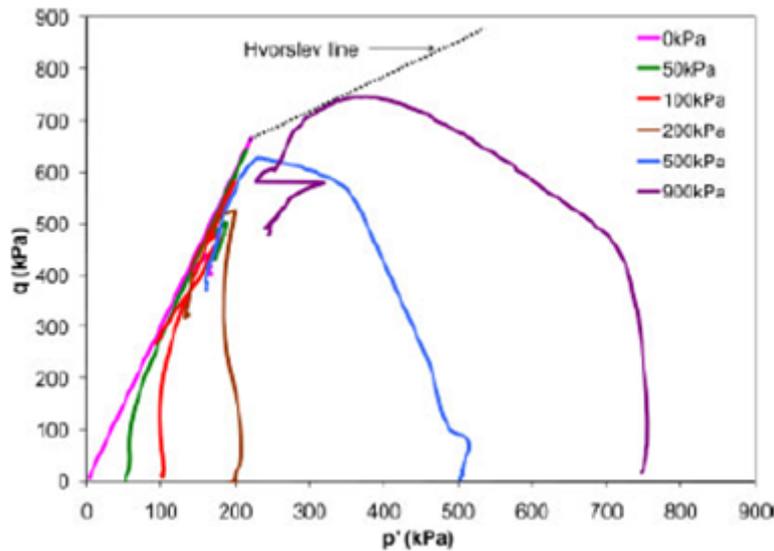


Figura 1.19: Percorso tensionale nel piano p' - q prova triassiale in condizioni non drenate [Soga et al., 2013]

In Figura 1.19 vengono riportati i percorsi tensionali ai quali sono stati sottoposti i provini durante la prova in termini di variabili p' e q . Sono evidenti alcune differenze di comportamento che il materiale manifesta a differenti livelli di confinamento radiale (σ_3). I percorsi tensionali caratterizzati da $\sigma_3 < 200$ kPa evidenziano un comportamento elastico del materiale fino al raggiungimento del luogo dei punti per cui $q = 3p'$ giungendo a rottura. Gli autori segnalano che il raggiungimento di questo stato non corrisponde necessariamente al livello tensionale in cui iniziano a manifestarsi le prime fessurazioni, che non riescono ad essere individuate per limitazioni caratteristiche della tipologia di prova adottata. I percorsi tensionali caratterizzati da valori di $\sigma_3 > 500$ kPa presentano andamenti sub-verticali e raggiungono lo stato di rottura prima di arrivare allo stato $q = 3p'$. I provini sottoposti a pressione di confinamento $\sigma_3 > 500$ kPa raggiungono rottura, a differenza degli

altri caratterizzati da $\sigma_3 < 200$ kPa, per taglio.

In Figura 1.20 gli autori riassumono il comportamento appena descritto evidenziando come le miscele acqua-cemento-bentonite raggiungono una buona resistenza dopo 90 giorni di maturazione oltre i quali le proprietà meccaniche sviluppate rimangono sufficientemente stabili.

In accordo con quanto esposto fin ora, anche [Joshi et al., 2010] indica come le modalità di rottura del materiale in esame dipendono non solo dalla pressione di confinamento ma anche dal grado di maturazione della miscela e cioè dalle reazioni sviluppate dalla componente cementizia.

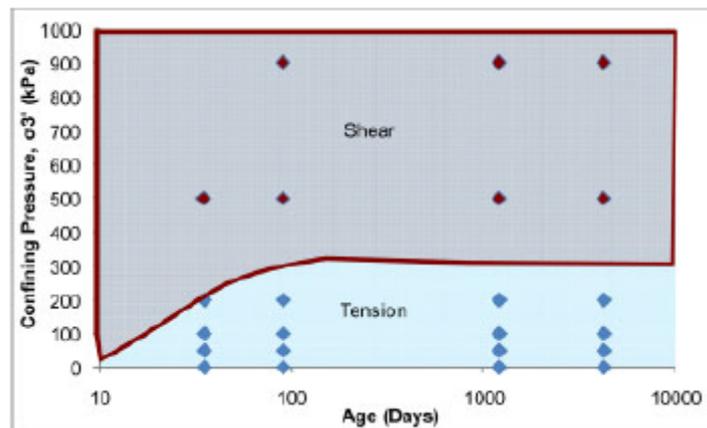


Figura 1.20: Modelli di rottura dei provini dipendenti dalla pressione di confinamento e dall'invecchiamento [Soga et al., 2013]

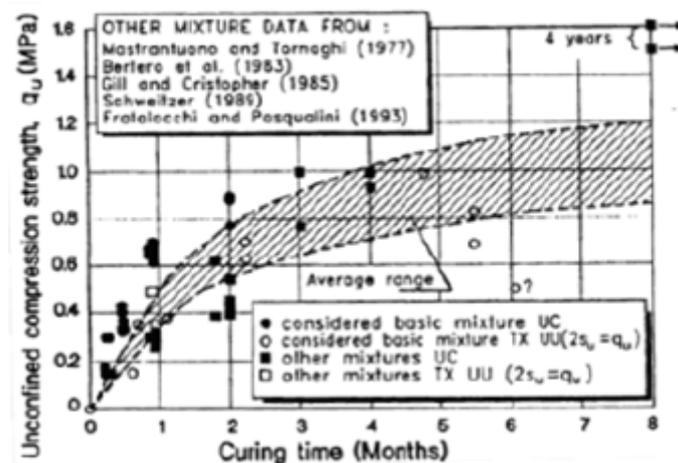


Figura 1.21: Incremento in termini di UCS in funzione del tempo di maturazione [Manassero, 1999]

Un ulteriore aspetto indagato dagli autori nell'articolo in parola riguarda la resistenza a compressione monoassiale (*Unconfined compressive strenght, UCS*) che rappresenta la resistenza del materiale sottoposto ad un carico di compressione in condizioni monoassiali. Avendo già dimostrato che la resistenza del materiale, coerentemente con le caratteristiche delle miscele a base cementizia, è dipendente dal tempo, già [Manassero et al. (1995)] riportano i risultati di prove di compressione monoassiali delle miscele cemento-bentonite in funzione del tempo di maturazione, come mostrato in Figura 1.21.

Le prove di compressione monoassiale condotte dagli autori evidenziano, in accordo con quanto già esposto in letteratura, che la resistenza a compressione monoassiale delle miscele cemento bentonite aumenta significativamente in funzione del tempo di maturazione. Ad esempio, come mostrato in Figura 1.21, passando da 28gg a 90gg di maturazione il valore di UCS cresce anche del 300%, oltre le caratteristiche meccaniche rimangono sostanzialmente stabili non mostrando ulteriori incrementi. Gli autori evidenziano come il range di variabilità della resistenza a compressione sia dovuto al numero ed ai percorsi di fessurazione che si generano all'interno del provino sottoposto a prova.

Un altro parametro che risulta dipendente dal grado di maturazione è la conducibilità idraulica. Questo parametro diminuisce nel corso di anni probabilmente perché le razioni sviluppate dalla componente cementizia (le più rapide) non contribuiscono sostanzialmente all'occlusione della matrice porosa. Pertanto, risulta ragionevole pensare che continue reazioni tra i reagenti delle componenti della miscela creino nuovi prodotti che progressivamente vanno ad occupare i vuoti presenti nella microstruttura diminuendo la permeabilità del materiale stesso.

L'ultimo aspetto indagato dagli autori riguarda la resistenza a trazione delle miscele cemento-bentonite. Due provini sono stati sottoposti ad una prova di trazione indiretta, la così detta prova Brasiliana in accordo con le indicazione espresse nel BS/EN-12390 parte 6 (200). Il test prevede di esercitare un carico di compressione lungo la circonferenza di un provino avente diametro pari a 100mm ed altezza pari a 150mm. La resistenza a trazione del provino viene calcolata allorquando lo stesso perviene a rottura lungo il diametro.

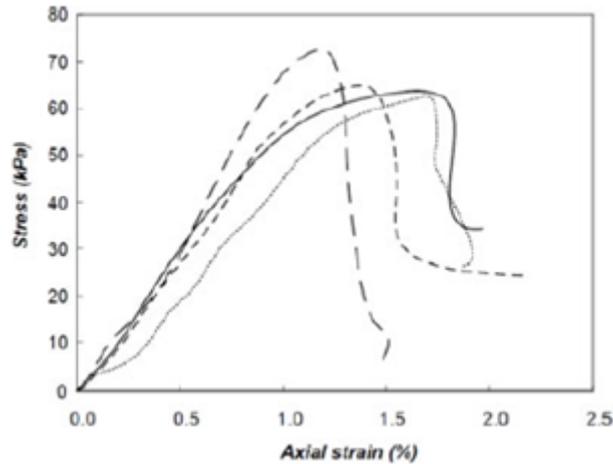


Figura 1.22: Comportamento tenso-deformativo esibito dal campione durante la prova di trazione indiretta [Soga et al., 2013]

In Figura 1.22 viene riportato il comportamento tenso-deformativo esibito dal campione sottoposto alla prova di trazione indiretta, il quale evidenzia una resistenza a trazione media di circa $\sigma_t = 65$ kPa. Tale risultato descrive come questo materiale inizia a sviluppare fenomeni di fessurazione e rottura progressiva durante le prove triassiali con pressione di confinamento basse, non appena il valore di tensione raggiunge quello di resistenza a trazione.

La prova brasiliana non consente di misurare il valore della pressione neutra, pertanto l'interpretazione può essere condotta solo in termini di tensioni totali. Una delle assunzioni fatte dagli autori consiste nel considerare pari a zero le tensioni efficaci e che le pressioni neutre negative si concentrino nelle zone di fessurazione. Queste condizioni di tensione possono essere simili a quelle registrate per le prove triassiali non drenate con assenza di tensione di confinamento in prossimità della rottura del campione. Tuttavia, prima di raggiungere la rottura non si è manifestato nessun comportamento dilatante del materiale e risulta improbabile che si verifichi un'espansione dei pori della microstruttura tale da generare suzione. Gli autori, quindi, ritengono che la resistenza a trazione sia garantita molto più probabilmente dal processo di cementazione che dal fenomeno della suzione causato da pressioni neutre negative.

Alla luce di quanto esposto finora, gli autori concludono che la conducibilità idraulica, la compatibilità chimica e la resistenza meccanica dipendono dalle condizioni tensionali in sito, dal grado di maturazione della miscela, dalla composizione e

dalle interazioni chimiche con l'ambiente circostante. In particolare, la conducibilità idraulica decresce con il progredire della maturazione ed è ottimale ove siano presenti nella composizione componenti sostitutivi del cemento come le scorie d'altoforno. In ultimo si sottolinea come il comportamento del materiale sia fortemente dipendente dal livello tensionale, passando da una modalità di rottura per sforzi compressione/trazione ad una modalità di rottura per taglio.

Una sperimentazione di interesse per la caratterizzazione idraulica del tipo di materiale oggetto di studio è stata condotta da [Joshi et al., 2010].

L'obiettivo perseguito dagli autori durante la sperimentazione è quello di caratterizzare le performance a lungo termine di diaframmi plastici realizzati con miscele di acqua-cemento-bentonite, ed in particolare, di determinarne le proprietà idrauliche a lungo termine tenendo in conto l'influenza del tempo, delle eterogeneità composizionali e gli effetti della contaminazione sulla conducibilità idraulica. Al fine di indagare queste caratteristiche gli autori hanno realizzato una sperimentazione in laboratorio mediante l'utilizzo di permeametri per misurare la conducibilità idraulica di provini maturati in laboratorio e campioni prelevati in sito. L'invecchiamento dei provini esaminati è compreso tra 1 mese e 11 anni ed alcuni di questi sono stati esposti all'attacchi di specie chimiche aggressive.

La sperimentazione in sito, al fine di ottenere una conoscenza diretta delle performance dell'opera e l'affidabilità delle tipologie di prova, è stata realizzata mediante l'impiego delle seguenti prove:

- Self boring permeameter (SBP);
- Cone penetration test (CPT);
- Falling-Head packer test;
- Constant-flow packer test.

Al presente non esiste nessun metodo approvato e regolato da strumenti di legge che possa essere utilizzato per una completa caratterizzazione idromeccanica dei diaframmi plastici in sito. La miscela utilizzata per la realizzazione dell'opera analizzata dagli autori presenta la seguente composizione in peso: 3.4% di Bentonite, 2.5% di Cemento Portland, 10.1% di scorie d'altoforno e l'84% di acqua.

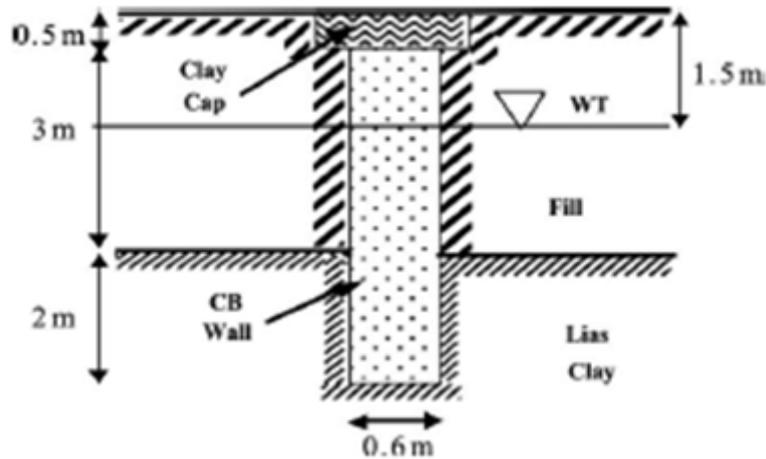


Figura 1.23: Sezione corrente del diaframma plastico [Joshi et al., 2010]

In Figura 1.23 viene riportata una sezione tipica del diaframma plastico studiato dagli autori, con indicazione della successione stratigrafica della litologia ed il livello di falda. Come già evidenziato in precedenza, il comportamento di questa tipologia di opera dipende fortemente dalle proprietà chimiche dell'ambiente in cui assolve alle sue funzioni, pertanto gli autori hanno realizzato una campagna di sondaggi per determinare il tipo di contaminante presente in sito ed il livello di contaminazione del sottosuolo. I risultati di tale operazione sono riassunti in Tabella 1.8.

	Before wall construction		After wall construction	
	Well 1	Well 2	Well 3	Well 4
NH_4 mg/l	125	183	NaN	NaN
<i>Cresol</i> mg/l	0.13	0.19	NaN	NaN
<i>Phenol</i> mg/l	0.09	<0.05	NaN	NaN
<i>As</i> mg/l	0.200	0.014	NaN	NaN
<i>Na</i> mg/l	180	159	271	163
<i>Ca</i> mg/l	657	475	460	419
<i>Mg</i> mg/l	260	273	296	304
<i>Cl</i> mg/l	67	120	<50	<50
<i>TotalSo₄</i> mg/l	14000	12000	24400	35200
<i>Zn</i> mg/l	405	2.65	10	16
<i>Fe</i> mg/l	NaN	NaN	273	457
<i>pH</i>	NaN	NaN	3	2.5

Tabella 1.8: Analisi chimica dell'acqua di falda presente in sito [Joshi et al., 2010]

La sperimentazione in laboratorio è stata realizzata analizzando il comportamento di tre diversi tipi di campioni:

- “mixer cast”: realizzati in laboratorio utilizzando miscela fresca;
- “trench-cast”: realizzati in laboratorio utilizzando miscela proveniente da getto;
- “block field”: campionati dal diaframma.

I campioni rappresentativi del diaframma plastico sono stati campionati a differenti profondità per avere informazioni circa l'omogeneità delle proprietà caratterizzanti l'opera in esame. La misura della conducibilità idraulica è stata effettuata mediante l'utilizzo di permeametri a parete flessibile applicando un carico idraulico costante. I provini sono stati saturati applicando una back pressure di 100 kPa e successivamente consolidati ad una pressione di confinamento di 100 kPa. Il flusso in ingresso nel permeametro è stato controllato in modo da indagare la conducibilità idraulica del materiale sotto differenti condizioni di gradiente idraulico ($5 < \frac{dh}{dl} < 30$).

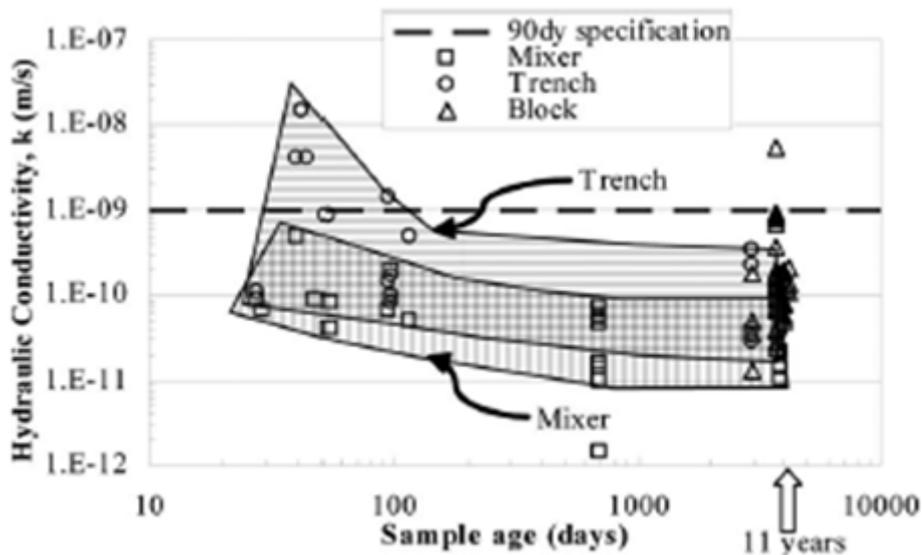


Figura 1.24: Conducibilità idraulica misurata in laboratorio in funzione dell'invecchiamento [Joshi et al., 2010]

In Figura 1.24 sono riportati i valori di conducibilità idraulica dei campioni denominati in precedenza “mixer-cast”, “trench-cast” e “block field” a differenti stadi

di maturazione. Questi risultati evidenziano che la conducibilità idraulica delle miscele cemento-bentonite tende a ridursi in un periodo di 3 anni, subendo una rapida decrescita durante i primi 90 giorni. Tale tendenza, secondo gli autori, può essere attribuita alla progressiva idratazione della componente cementizia o dei sostituenti della miscela. Sottolineano, infatti, come i materiali pozzolanici reagiscono lentamente con i prodotti idrati del cemento sviluppando una microstruttura più densa. Tutti i provini analizzati, in accordo anche con quanto espresso da altri autori, attestano il parametro della conducibilità idraulica intorno a $k = 10^{-9}$ m/s. I provini denominati “trench-cast” presentano valori di conducibilità idraulica più dispersi nel grafico perché la struttura dei campioni ingloba particelle di terreno e quindi anche tracce di contaminazione, che rendono la struttura disomogenea costituendo delle vie preferenziali di migrazione per il contaminante.

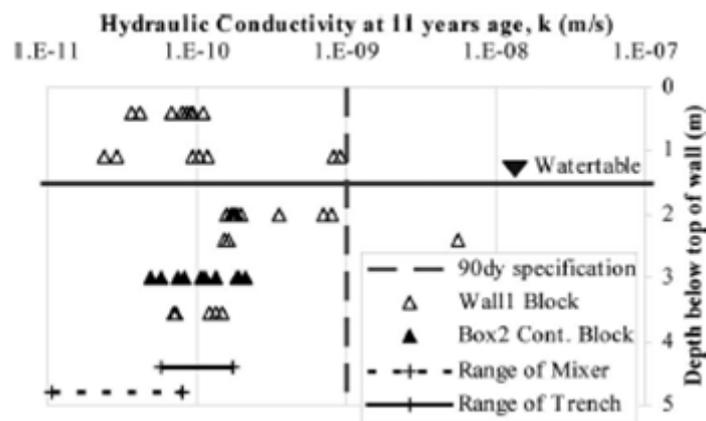


Figura 1.25: Conducibilità idraulica in funzione della profondità per campioni tipo “Block field” [Joshi et al., 2010]

Un'ulteriore analisi è stata condotta sui campioni prelevati direttamente dal diaframma posto in opera misurandone la conducibilità idraulica tramite prove di laboratorio. In Figura 1.26 sono riportati i risultati di tale analisi che evidenziano come l'opera finita sia caratterizzata da una sostanziale eterogeneità delle proprietà idrauliche dovuta all'eterogeneità della microstruttura. Le miscele cemento-bentonite sono suscettibili a fenomeni di fessurazione se poste a contatto con aria, causando un incremento della conducibilità idraulica per la presenza di fessure. Tuttavia, i test condotti in laboratorio sui campioni prelevati al di sopra della falda evidenziano valori di conducibilità idraulica simili ai corrispondenti prelevati a

profondità maggiori. Questo risultato può essere riconducibile sia al fenomeno di risalita capillare, amplificato da una pressione negativa dell'acqua all'interno del materiale, sia comunque all'umidità presente nel sottosuolo.

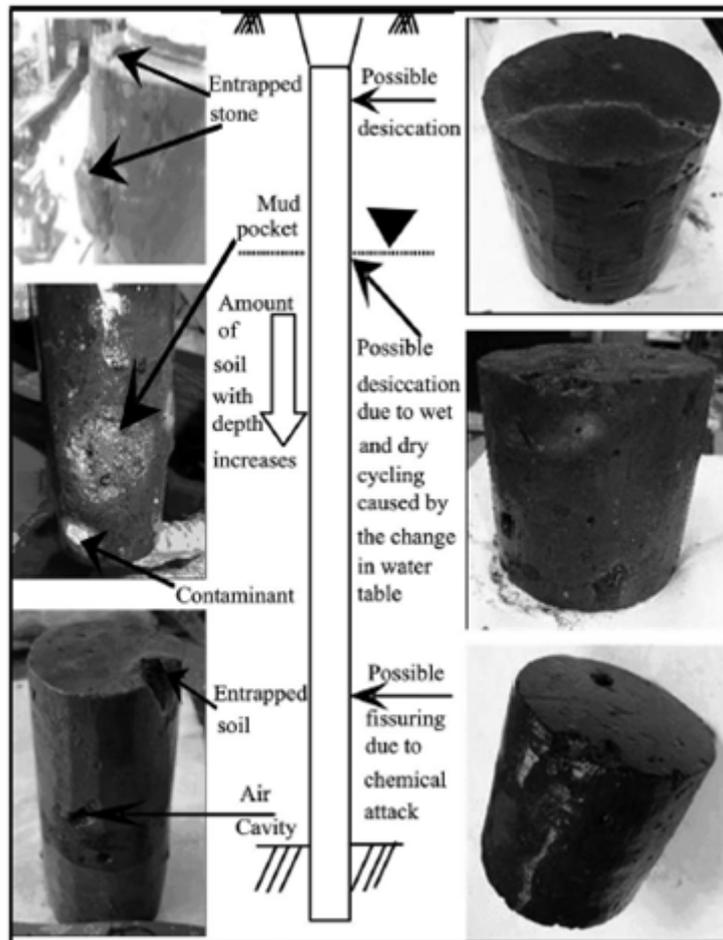


Figura 1.26: Fattori che influenzano le performance dei diaframmi plastici [Joshi et al., 2010]

I risultati ottenuti dagli autori evidenziano come non si possa definire una correlazione diretta tra la conducibilità idraulica e la profondità del diaframma a causa dell'aumento della densità o delle fluttuazioni del livello di falda. Tali conclusioni suggeriscono come le performance a lungo termine di questa tipologia di opere non possono essere descritte da un singolo parametro, ma da una combinazione di diversi fattori come le impurità e ed il tipo di ambiente. La sperimentazione in sito ha evidenziato come la composizione del diaframma plastico posto in opera non

presenti una composizione omogenea, ma sono state trovate inclusioni di terreno e pietre. Risulta, quindi, necessaria un'appropriata caratterizzazione geotecnica delle proprietà idromeccaniche dell'opera, come ad esempio la conducibilità idraulica, per fornire configurazione delle performance realistica nelle condizioni di sito. Le tecniche impiegate dagli autori, oltre ad indagare questo aspetto, servono a valutare l'affidabilità.

I risultati derivanti dalle prove CPTU evidenziano una conducibilità idraulica intorno a $k = 10^{-6}$ m/s, che risulta essere significativamente differente dai valori ottenuti tramite prove di laboratorio. Questo può essere spiegato ipotizzando che il diaframma sia stato soggetto a fenomeni di fessurazione dovuti alla penetrazione del piezocono e che il test sia stato falsato da perdite di fluido lungo l'asse verticale dello strumento. Queste ipotesi sono state verificate dagli autori impiegando lo stesso foro utilizzato per la prova CPT per eseguire il packer test, ottenendo risultati compatibili con quelli ottenuti in laboratorio ($k = 10^{-9}$ m/s). Le problematiche incontrate nel presente studio relative all'affidabilità della prova CPTU, condivise anche da altri autori, suggeriscono come questa tipologia di prova sia consigliabile in un breve arco di tempo appena a valle della realizzazione dell'opera, poiché una volta sviluppata una discreta resistenza meccanica è necessario impiegare metodi meno invasivi.

I test condotti con le altre tecniche proposte dagli autori hanno fornito risultati pressoché simili evidenziando una conducibilità idraulica superiore allo stante $k = 10^{-9}$ m/s. Questi risultati, suggeriscono gli autori, possono essere spiegati dalla presenza di difetti e fessure all'interno del diaframma. Tuttavia, come è evidente per la prova CPTU, questa tipologia di tecniche sperimentali è molto sensibile ad errori nell'esecuzione delle prove.

In conclusione, la sperimentazione condotta in laboratorio ha ampiamente soddisfatto i requisiti richiesti dai diaframmi plastici in termini di conducibilità idraulica che si attesta a valori maggiori o uguali a $k = 10^{-9}$ m/s. I test svolti in sito evidenziano come il comportamento di queste opere possa essere diverso da quello risultante in laboratorio, ponendo così evidente la necessità di condurre appropriate prove di campo per indagare le performance dei diaframmi. In questo ambito, le tecniche sperimentali proposte dagli autori mostrano una coerenza di risultati, pertanto si consiglia di affidarsi ai risultati provenienti da queste prove per avere una stima più appropriata delle proprietà idromeccaniche.

Capitolo 2

Applicazioni pregresse della tecnica ERT

La tomografia di resistività elettrica è una tecnica sperimentale che può essere adottata sia in scala di laboratorio sia in scala di sito per indagare molteplici aspetti di un generico corpo fisico. Il metodo si basa sulla determinazione di una grandezza fisica, la resistività elettrica ρ . La definizione classica di questa grandezza deriva dalla resistenza R di un conduttore filiforme di lunghezza l e sezione S :

$$R = \rho \times \frac{l}{S} \quad (2.1)$$

La resistenza, inoltre, è esprimibile secondo la legge di Ohm che stabilisce che la corrente in un conduttore tra due punti è direttamente proporzionale alla differenza di potenziale tra i due punti stessi. La costante di proporzionalità è detta resistività elettrica.

$$R = \frac{V}{I} \quad (2.2)$$

Sfruttando i principi appena esposti, nell'ambito della geologia e della geotecnica, la tomografia elettrica è uno strumento utile nella caratterizzazione di siti, in particolare nel determinare la successione litostratigrafica. Tale metodologia sperimentale rappresenta una soluzione non invasiva per ottenere informazioni sul sottosuolo, nell'ambito della sperimentazione da campo, e su alcune caratteristiche di materiali nella sperimentazione da laboratorio.

In letteratura, pertanto, sono presenti numerosi lavori che attestano la validità della tomografia elettrica per studiare ad esempio, l'eterogeneità di un materiale, la presenza di inclusioni grossolane fino alla caratterizzazione di fenomeni di fessurazione. Nel presente lavoro di tesi, che si basa fortemente sulle proprietà elettriche dei geomateriali, si presenteranno i maggiori risultati presenti nella letteratura del settore evidenziando le potenzialità di tale metodo nelle applicazioni ambientali.

Il primo articolo dal titolo "Imaging heterogeneities with electrical impedance tomography: laboratory results" che si vuole introdurre è stato prodotto da A. Borsic, C. Comina, S. Foti, R. Lancellotta e G. Musso.

Nel lavoro svolto dagli autori la tomografia elettrica è stata applicata alla scala di laboratorio al fine di investigare la sua affidabilità in condizioni controllate per rilevare la presenza di anomalie all'interno di campioni di sabbia. Sono state studiate varie configurazioni ed investigate le eterogeneità dovute a variazioni di porosità, granulometria e contenuti di argilla.

La sperimentazione è stata realizzata utilizzando una cella cilindrica di Plexiglass avente un diametro interno pari a $D_i = 130$ mm ed un'altezza pari a $H = 100$ mm. Sulla circonferenza interna sono stati disposti 16 elettrodi realizzati da sottili fogli d'argento di dimensioni $5 \text{ mm} \times 80 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$ equispaziati tra di loro.



Figura 2.1: Attrezzatura di laboratorio per l'esecuzione di tomografie elettriche [Borsic et al., 2005]

La forma e la posizione degli elettrodi sono state scelte al fine di riprodurre una

condizione bidimensionale di propagazione della corrente elettrica all'interno del campione. Il numero di elettrodi adottati dagli autori è stato scelto in funzione della semplicità di esecuzione della prova e della risoluzione della ricostruzione tomografica. Applicazioni della tecnica in esame in altri ambiti hanno evidenziato come l'utilizzo di 32 elettrodi migliori solo marginalmente la risoluzione della tomografia elettrica. Sulla base dei principi enunciati all'inizio del presente capitolo gli autori hanno utilizzato in combinazione quattro elettrodi per imprimere una corrente e misurarne la differenza di potenziale, per un totale di 96 combinazioni. La prima tipologia di eterogeneità indagata dagli autori riguarda l'inserimento di inclusioni più conduttive in un campione di sabbia. In Figura 2.2 a sinistra è riportato il campione reale con segnalazione della posizione delle inclusioni circolari, a destra è riportata la ricostruzione effettuata mediante l'impiego della tomografia elettrica.

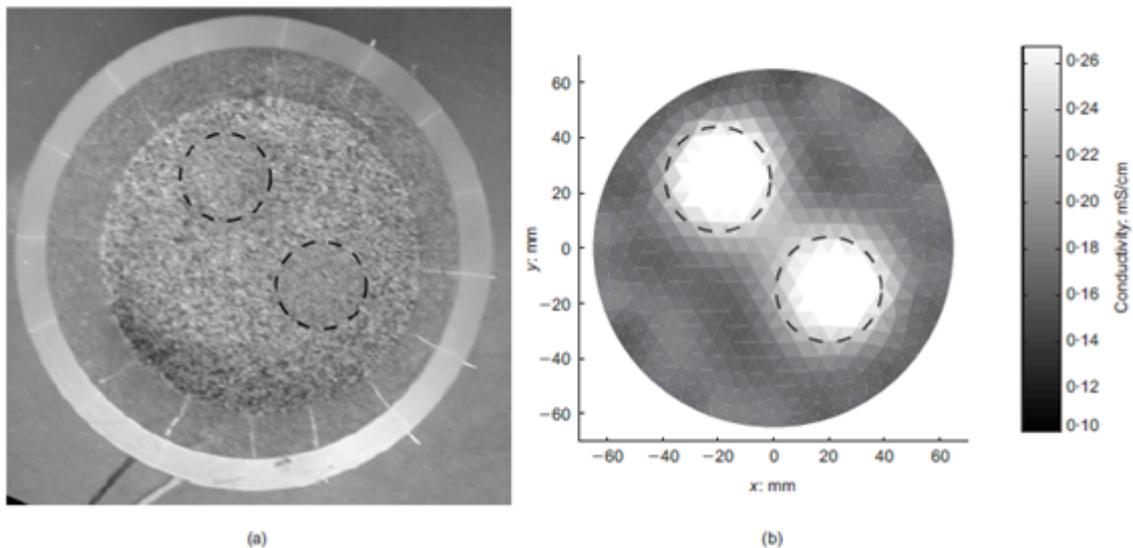


Figura 2.2: a) Campione di sabbia con presenza di inclusioni b) Ricostruzione tomografica [Borsic et al., 2005]

Il risultato ottenuto è indubbiamente utile poiché attraverso l'impiego della tecnica ERT/EIT è possibile individuare la presenza di eterogeneità composizionali di un campione. Gli autori evidenziano come la dimensione e la posizione delle inclusioni rilevate sia soggetta ad errori dovuti alla tecnica regolarizzazione adottata nella risoluzione del problema inverso, pertanto la soluzione finale è influenzata dalla tipologia di elementi e dal numero costituenti la mesh.

Un'altra tipologia di eterogeneità studiata dagli autori riguarda la variazione di densità di un materiale. Al fine di ottenere tale effetto un campione di sabbia è stato preparato posizionando all'interno dello stampo un cilindro d'acciaio che successivamente è stato rimosso causando così il collasso del materiale circostante determinando una zona a differente grado di addensamento.

In Figura 2.3 è riportato il risultato della sperimentazione, che come si evince ha confermato la validità di tale tecnica sperimentale. La zona più conduttiva, costituita da sabbia meno densa, trova spiegazione nella maggiore porosità del materiale che determina una maggiore conducibilità elettrica. Questa correlazione può essere applicata per studiare altri fenomeni, come ad esempio la formazione di bande di taglio in campioni di sabbia densa che determinano una variazione locale della porosità.

L'ultimo fattore esplorato dagli autori tramite la tecnica EIT *Electrical Impedance Tomography* riguarda la variazione della dimensione dei grani. Un fenomeno che coinvolge questo tipo di problematica è l'erosione interna¹.

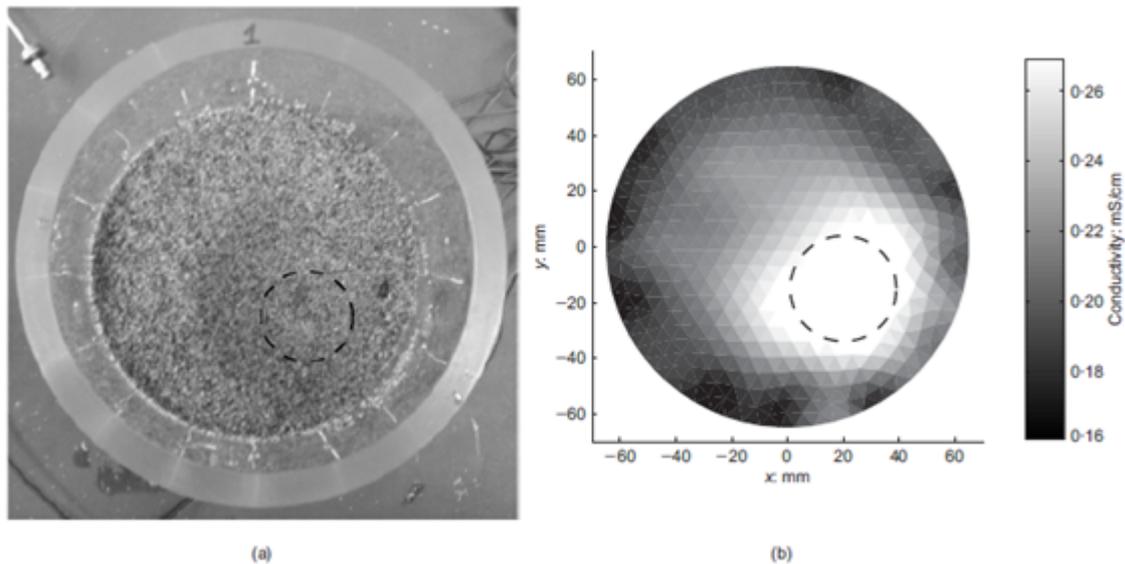


Figura 2.3: a) Campione di sabbia con presenza di una zona a più bassa densità b) Ricostruzione tomografica [Borsic et al., 2005]

Al fine di indagare l'affidabilità della tomografia elettrica nell'individuare zone

¹Fenomeno evolutivo che può manifestarsi inizialmente in modo diffuso, per poi localizzarsi in canali di flusso costituenti vie preferenziali di migrazione.

interessate da questo fenomeno, gli autori hanno realizzato un campione di sabbia caratterizzato da una banda granulometricamente modulata di materiale di spessore di 4mm.

In Figura 2.4 sono riportati i risultati della sperimentazione, evidenziando ancora una volta come tecnica EIT sia in grado di individuare qualitativamente eterogeneità di differente natura.

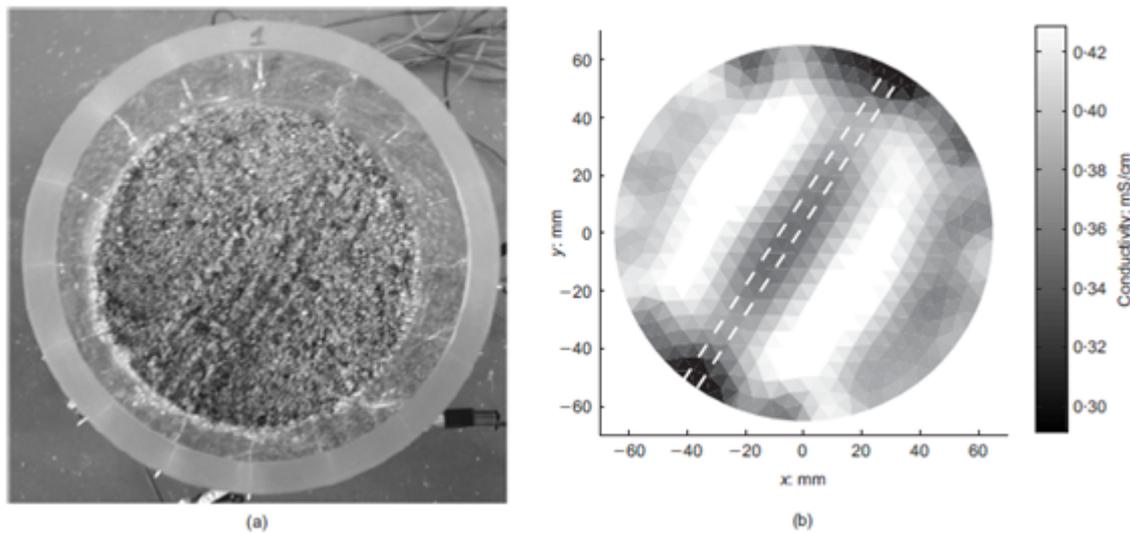


Figura 2.4: a) Inclusione di una banda granulometricamente modulata all'interno di un campione omogeneo di sabbia b) Ricostruzione tomografica [Borsic et al., 2005]

Numerosi studi hanno evidenziato che, in genere, le miscele acqua-cemento-bentonite sono soggette, durante un processo di asciugatura, a fenomeni di fessurazione che generano una rete di crack all'interno di un provino o di un diaframma. Danny Smyl, Reza Rashetnia, Aku Seppänen, Mohammad Pour-Ghaz hanno condotto uno studio intitolato *“Can Electrical Resistivity Tomography be used for imaging unsaturated moisture flow in cement-based materials with discrete cracks?”* al fine di valutare l'affidabilità della tecnica ERT per il rilevamento crack all'interno di campioni omogenei.

In precedenza, è stato dimostrato che è possibile utilizzare la Tomografia Elettrica per monitorare la presenza di acqua all'interno di materiali cementizi. Nella pubblicazione è stata indagata l'affidabilità della Tomografia Elettrica Tridimensionale nel monitorare flussi d'acqua all'interno di un materiale cementizio caratterizzato

dalla presenza di un numero discreto di crack. In generale, la presenza di queste zone di discontinuità influenza la durabilità e le performance idrauliche delle opere affette da tale problematica. In particolare, si vengono ad instaurare dei percorsi preferenziali per la migrazione di qualunque sostanza posta a contatto, favorendo così il degrado della microstruttura e l'aumento ad esempio della permeabilità idraulica e la riduzione della resistenza meccanica

Nello studio svolto dagli autori i campioni sono stati realizzati utilizzando cemento portland e aggregato fine in rapporto volumetrico pari al 40% ed il rapporto acqua cemento risulta pari a $\frac{w}{c} = 0.60$. Il basso contenuto di aggregato inerte e l'alto rapporto acqua cemento sono stati utilizzati al fine di incrementare la porosità del campione e quindi la capillarità per diminuire i tempi di prova. In alcuni campioni, inoltre, è stata aggiunta fibra di nylon, in quantità di volume pari al 0.2%, per cercare di ridurre la vulnerabilità alla fessurazione incrementando la resistenza a trazione compressiva. Le fibre di nylon sono 1.9cm lunghe (fattore di forma pari a 70) e sono caratterizzate da una resistenza a trazione pari 966 MPa. I campioni sono stati preparati in accordo con le prescrizioni presenti in "ASTM C192-06".

Gli elettrodi utilizzati per eseguire la Tomografia Elettrica sono stati realizzati con una pittura d'argento applicata sulla superficie del provino tramite un piccolo pennello. La pittura colloidale d'argento ha una bassa resistività elettrica ed è a rapida asciugatura. Sono stati realizzati 24 elettrodi quadrati aventi dimensioni $1.30 \text{ cm} \times 1.30 \text{ cm}$ sulla superficie esterna del cilindro (Figura 2.5).

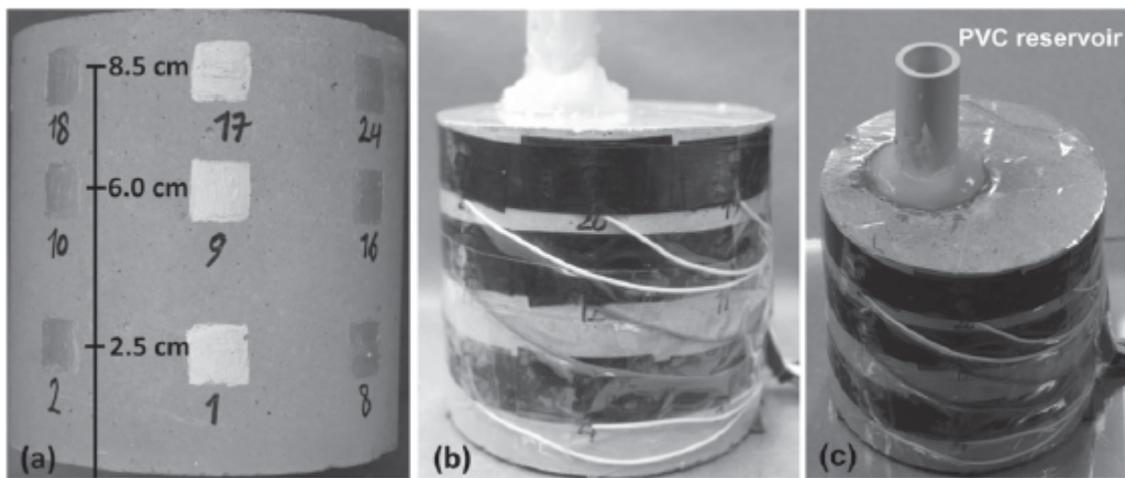


Figura 2.5: Provino utilizzato per la Tomografia Elettrica: a) posizione degli elettrodi b) provino ultimato c) posizione del serbatoio [Smyl et al., 2017]

In Figura 2.6 è possibile osservare la forma e le dimensioni delle discontinuità artificiali realizzate sui campioni ed in Figura 2.7 il corrispettivo modello numerico utilizzato per la simulazione del processo di flusso all'interno del materiale.

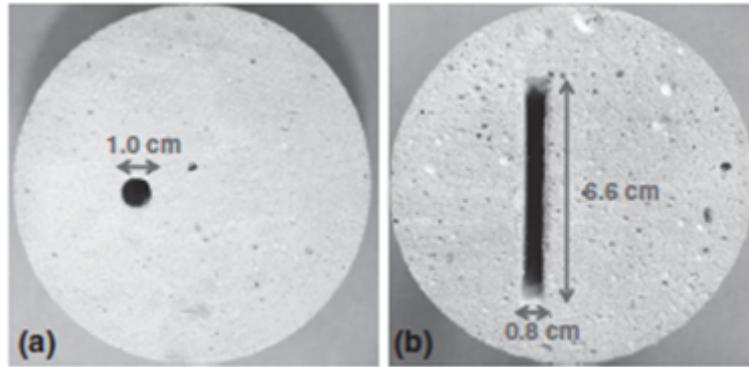


Figura 2.6: Provini con discontinuità artificiali [Smyl et al., 2017]

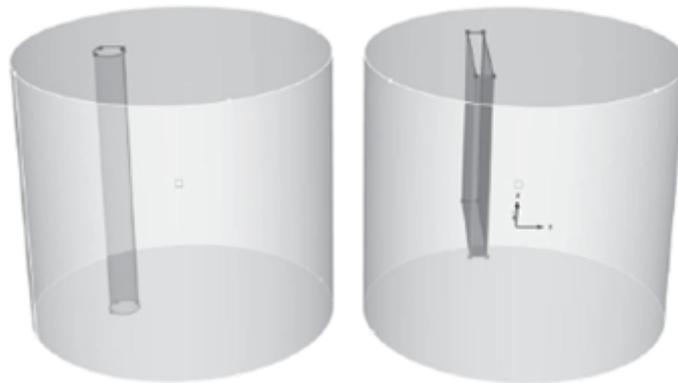


Figura 2.7: Modello numerico utilizzato per la simulazione della prova di flusso [Smyl et al., 2017]

In Figura 2.8 sono riportati i risultati dell'esperimento condotto di simulazione di un fenomeno di infiltrazione d'acqua all'interno di un campione con discontinuità create artificialmente. La Figura 2.8a corrisponde al campione con la discontinuità circolare, la Figura 2.8b corrisponde al campione con la discontinuità planare, di cui in Figura 2.6. Entrambe le ricostruzioni presentano sia la distribuzione di conducibilità elettrica σ misurata in mS/cm a differenti istanti di tempo (1h, 4h, 12h, 24h) sia il contenuto d'acqua ipotetico θ . Si nota che il contenuto d'acqua

mostrato in figura è relativo esclusivamente al dominio del modello (Figura 2.7) ed esclude il contenuto d'acqua presente nelle zone di discontinuità artificiali poiché è intuibile che all'interno delle stesse il valore di θ sia pari ad 1.

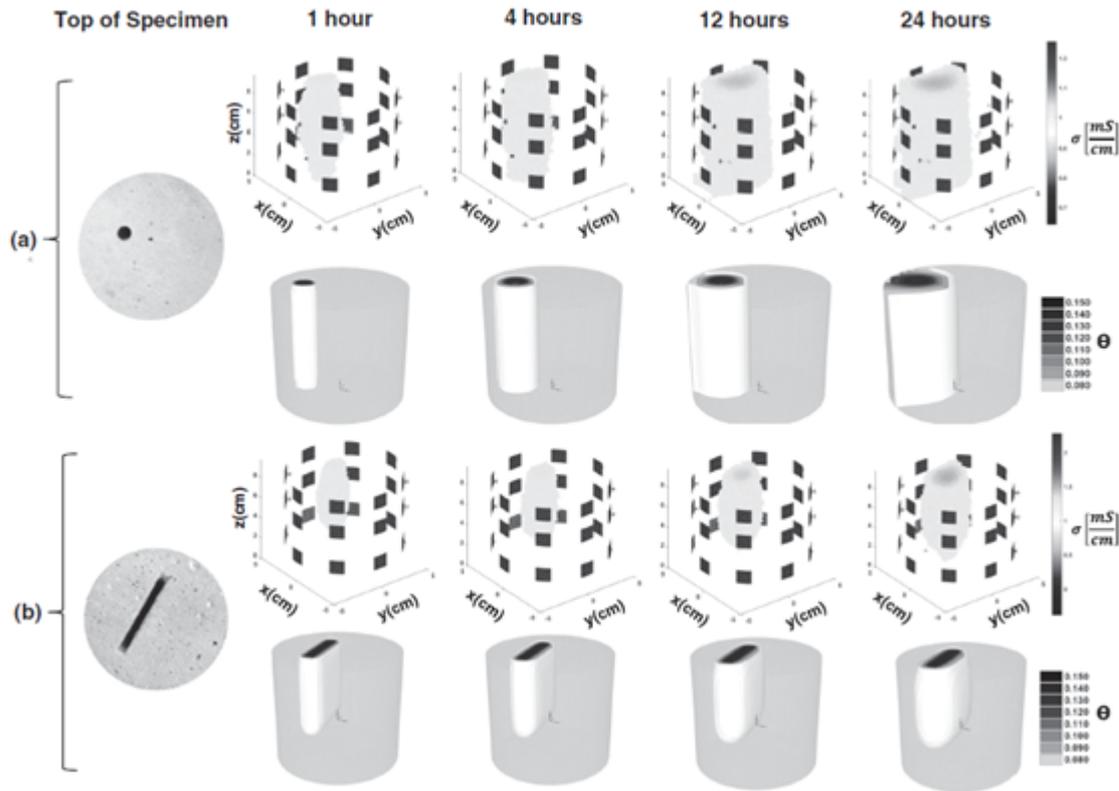


Figura 2.8: Ricostruzione tomografica 3D della conducibilità elettrica σ e l'ipotetico contenuto d'acqua θ corrispondente a successivi istanti di tempo [Smyl et al., 2017]

La ricostruzione tomografica relativa all'istante t_1 corrisponde alla prima ora dall'instaurarsi del fenomeno di infiltrazione e mostra un elevato valore di conducibilità elettrica σ che assume gli stessi contorni della discontinuità circolare. Quindi, si può concludere in prima battuta che la Tomografia Elettrica ha individuato con successo la discontinuità cilindrica in condizioni di completa saturazione. La conducibilità elettrica all'interno del campione risulta essere pressoché uniforme e minore rispetto a quella misurata all'interno della discontinuità, il che suggerisce che il processo di filtrazione all'interno del campione sia ancora debole. Infatti, il contenuto d'acqua stimato attraverso la simulazione numerica ha evidenziato la congruenza del risultato tomografico.

Negli istanti di tempo successivi il volume interno al campione caratterizzato da una conducibilità elettrica maggiore aumenta in accordo con il processo di filtrazione in atto, che viene confermato anche dalla ricostruzione del contenuto d'acqua che in forma e volume si correla bene con i risultati della tomografia. Infine, osservando in sequenza le immagini riportate in Figura 2.8 è possibile osservare come questa tecnica sperimentale si presti efficacemente nell'indagare, almeno in tale sede, il fenomeno di infiltrazione dell'acqua all'interno della microstruttura del campione. In secondo esperimento di si riporta la sequenza catturata mediante tecnica ERT in Figura 2.8, conferma quanto si è detto fin ora. Gli autori, tuttavia, sottolineano come questa tecnica fornisca un'interpretazione qualitativa del fenomeno in atto poiché la relazione tra conducibilità elettrica σ e contenuto d'acqua w è non lineare, pertanto andrebbero realizzate prove per calibrare il modo in cui esse sono legate. In Figura 2.9 sono riportati i risultati della sperimentazione condotta su provini in cui si sono manifestati fenomeni di fessurazione a seguito di percorsi di carico. La Figura 2.9a e la 2.9b mostrano i risultati su provini realizzati con l'inserimento di fibre di nylon nella miscela e la 2.9c mostra i risultati sul provino realizzato senza l'aggiunta delle suddette fibre. Come per la precedente sperimentazione, gli autori riportano in bianco la conducibilità della discontinuità circolare utilizzata per produrre il fenomeno di infiltrazione per rendere la visualizzazione dei processi in atto più intuitiva. Per il primo provino (a) la ricostruzione tomografica evidenzia, all'istante di tempo corrispondente a 15 minuti dall'inizio della prova, una più alta conducibilità elettrica σ appena al di sotto del serbatoio caratterizzando un volume che si estende fino alla superficie circolare esterna del campione. Negli istanti di tempo successivi il volume così identificato si estende all'interno del provino, come si può vedere dall'immagine, lungo il percorso preferenziale individuato dalle fessure. Nella seconda figura (b) quanto appena descritto è molto più marcato, infatti è subito riconoscibile come il volume caratterizzato da valori di conducibilità elettrica maggiori si sovrappone sostanzialmente alla zona in cui è presente la discontinuità. Tale risultato è giustificabile considerando che all'interno della fessura si raggiungano condizioni di saturazione prossime all'unità che producono come effetto una maggiore conducibilità elettrica.

Gli autori evidenziano come il volume interessato dal fenomeno di infiltrazione nei due provini rinforzati con fibre di nylon si espanda molto più velocemente in

direzione orizzontale che in direzione verticale. Questo può essere dovuto alla diminuzione dell'apertura della fessura in senso verticale causato proprio dalla presenza delle fibre di nylon.

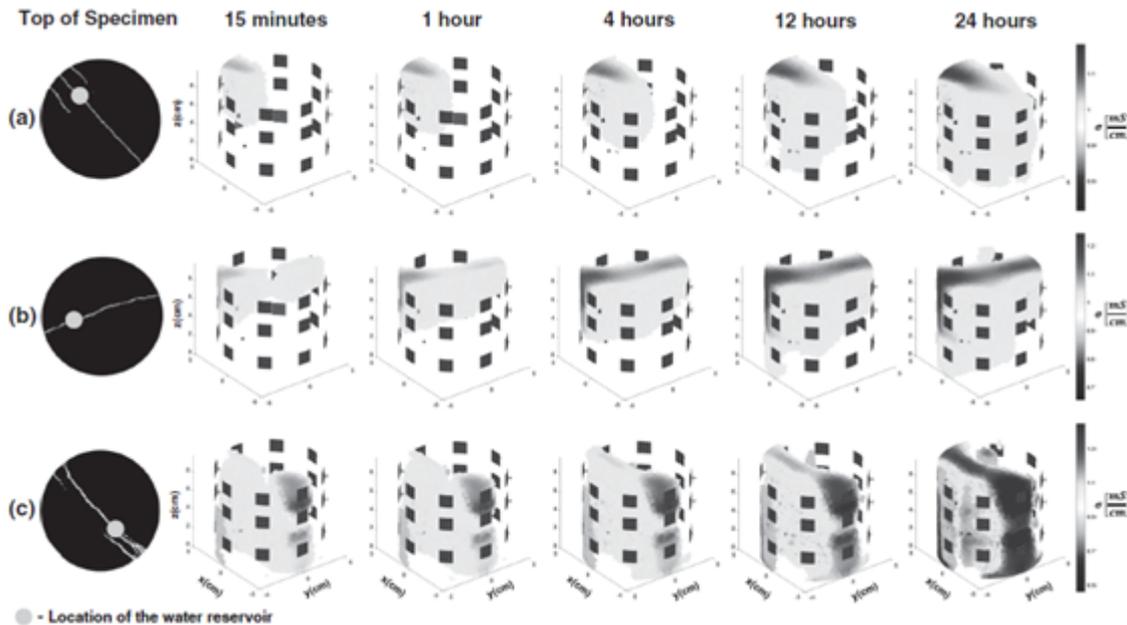


Figura 2.9: Ricostruzione tomografica 3D della conducibilità elettrica σ e l'ipotetico contenuto d'acqua θ corrispondente a successivi istanti di tempo su provini manifestanti fenomeni di fessurazione [Smyl et al., 2017]

In conclusione, gli autori affermano che i fenomeni di fessurazione manifestati dai provini lungo i percorsi di carico costituiscono vie preferenziale per l'infiltrazione di acqua o altri fluidi all'interno di questa tipologia di materiali, compromettendone le performance e la durabilità. Inoltre, dalla sperimentazione condotta dagli stessi è possibile affermare come l'Electric Resistivity Tomography rappresenti una valida metodologia sperimentale per indagare questa tipologia di fenomeni, riuscendo ad individuare qualitativamente la presenza e la posizione di crack all'interno del provino e riuscendo a monitorare il fenomeno di infiltrazione nel tempo.

[Derfouf et al., 2019] nell'articolo "A New Osmotic Oedometer with Electrical Resistivity Technique for Monitoring Water Exchanges" riportano i risultati di una sperimentazione basata sull'utilizzo di un edometro sul quale è stata applicata la tomografia di resistività elettrica per monitorare escursioni del grado di saturazione durante cicli di essiccamento ed imbibizione.

Il materiale sottoposto a prova è un terreno argilloso utilizzato per la costruzione di una diga nel nord-ovest dell'Algeria. I provini sono stati preparati in quattro step:

- Il terreno è stato sottoposto ad un processo di essiccamento in aria e gli aggregati sono stati successivamente frantumati;
- Le particelle di terreno essiccate sono state miscelate con acqua deionizzata;
- Il composto ottenuto è stato posto in un contenitore sigillato per raggiungere l'omogeneizzazione del contenuto d'acqua;
- Infine, il materiale è stato compattato staticamente per raggiungere la densità prefissata all'interno di un anello edometrico sotto una deformazione costante di 1 mm/min.

Le dimensioni del provino compattato sono: $D = 70$ mm ed $H = 20$ mm. In Figura 2.10 è riportato lo schema di prova utilizzato per l'esecuzione delle tomografie di resistività elettrica. Essa prevede l'utilizzo di 6 elettrodi posizionati nel piano medio del provino. Iterativamente attraverso 2/6 elettrodi viene impressa un'intensità di corrente nota mentre gli altri 4/6 misurano la resistività del campione.

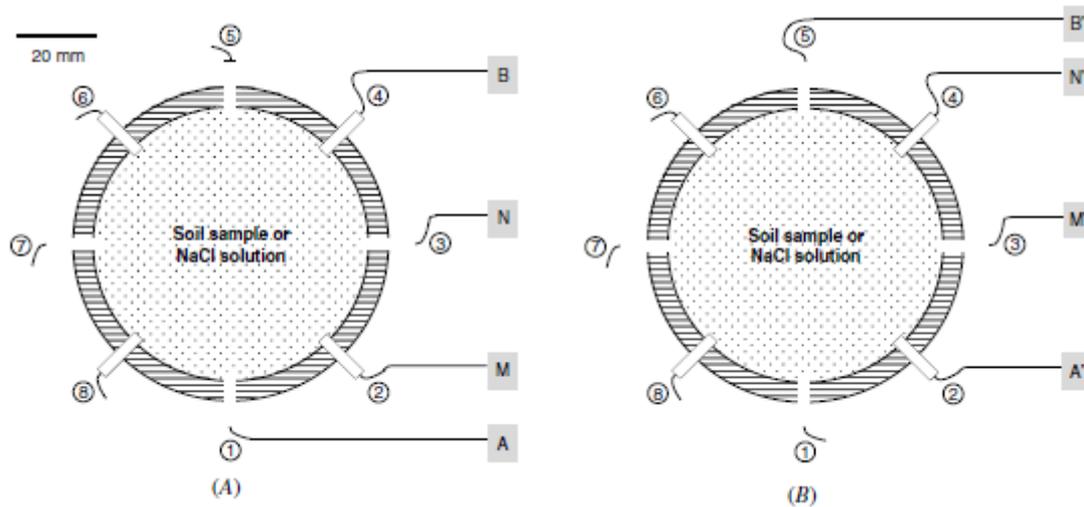


Figura 2.10: Sequenza delle misura di resistività elettrica [Derfouf et al., 2019]

Gli autori hanno prodotto un totale di 29 provini con le modalità descritte in precedenza a differenti valori di contenuto d'acqua e differenti densità del secco.

In Figura 2.11 è riportato il risultato della tomografia di resistività elettrica eseguita su campioni a differente contenuto d'acqua al variare del grado di saturazione.

$$S_r = 100 \times \left(\frac{\rho}{\rho_{sat}} \right)^{-0.33} \quad (2.3)$$

L'equazione 2.3 esprime la correlazione tra il grado di saturazione e la resistività elettrica estrapolata dai risultati ottenuti. Il coefficiente di determinazione evidenzia che l'equazione descrive in modo soddisfacente la relazione tra queste due grandezze contenendo errori di stima compresi tra 2%-6% rispetto alle grandezze misurate.

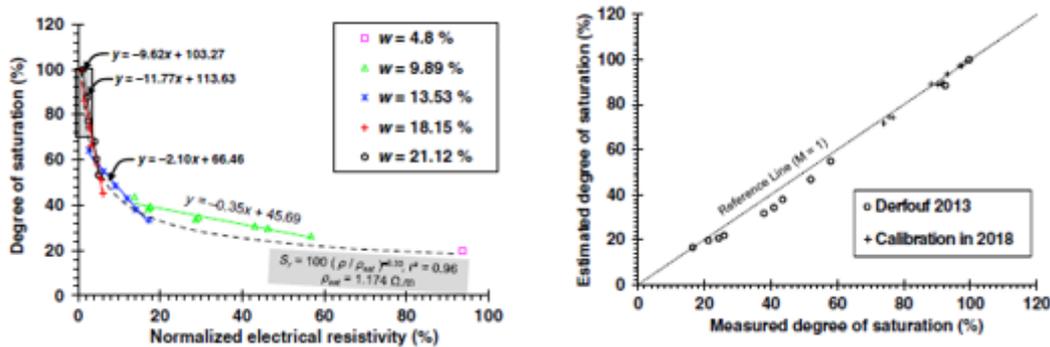


Figura 2.11: Correlazione grado di saturazione – resistività elettrica normalizzata [Smyl et al., 2017]

I risultati ottenuti dagli autori evidenziano che la resistività elettrica del materiale oggetto di studio è dipendente dal grado di saturazione e dall'indice dei vuoti. Tale relazione ha permesso attraverso la realizzazione di prove di tomografia di resistività elettrica di stimare il grado di saturazione a partire da misure di resistività. Tale operazione ha riportato una congruenza soddisfacente tra il risultato sperimentale e la stima attraverso l'equazione 2.3. In conclusione [Derfouf et al., 2019] attraverso la sperimentazione per mezzo di questa tipologia di edometro con ERT integrata affermano che l'utilizzo di questa attrezzatura consente di investigare i meccanismi accoppiati idromeccanici e di formulare nuovi modelli numerici che tengono in conto dei parametri idraulici.

Quanto detto finora evidenzia l'utilità della Tomografia Elettrica nello studiare processi di infiltrazione di fluidi all'interno di mezzi con presenza di fratture nella loro

microstruttura. Un ulteriore approfondimento quindi, può essere fatto nel comprendere l'effettiva affidabilità di tale approccio riportato alla scala del sito.

In tal senso, [Casado et al., 2015] hanno condotto uno studio relativo all'utilizzo della tomografia elettrica e le sue potenziali correlazioni con proprietà chimiche ed idrauliche per caratterizzare fenomeni di filtrazione di acquiferi contaminati nel sottosuolo.

L'area di cui gli autori si propongono la caratterizzazione risulta contaminata da differenti sostanze inquinanti derivanti dalla discarica di Sardas (Spagna). L'enorme quantità di rifiuti presenti in questa discarica ha generato nel tempo una considerevole quantità di percolato che, a causa della mancata presenza di opere atte a prevenire il fenomeno della percolazione, si è diffuso nell'ambiente circostante.

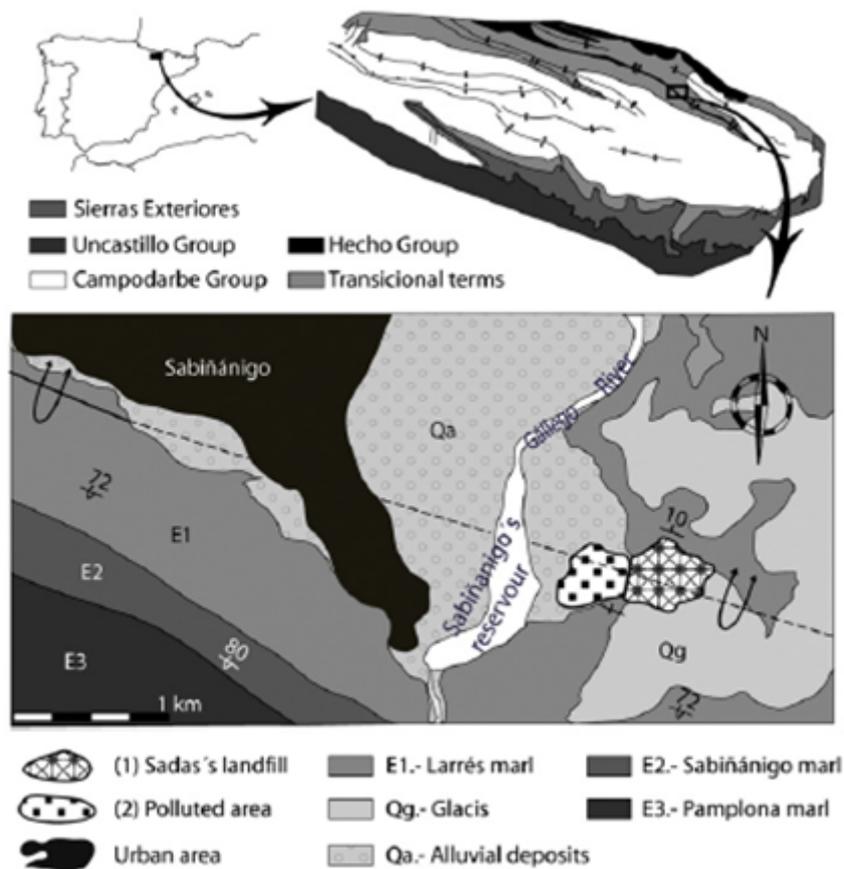


Figura 2.12: Localizzazione e caratterizzazione geologica dell'area oggetto di studio [Casado et al., 2015]

La correlazione tra il percolato diffuso all'interno della litostruttura fratturata e la bassa resistività del substrato ($< 8 \Omega m$) permette di definire le vie di migrazione preferenziali del contaminante indagando la distribuzione di resistività elettrica del sottosuolo.

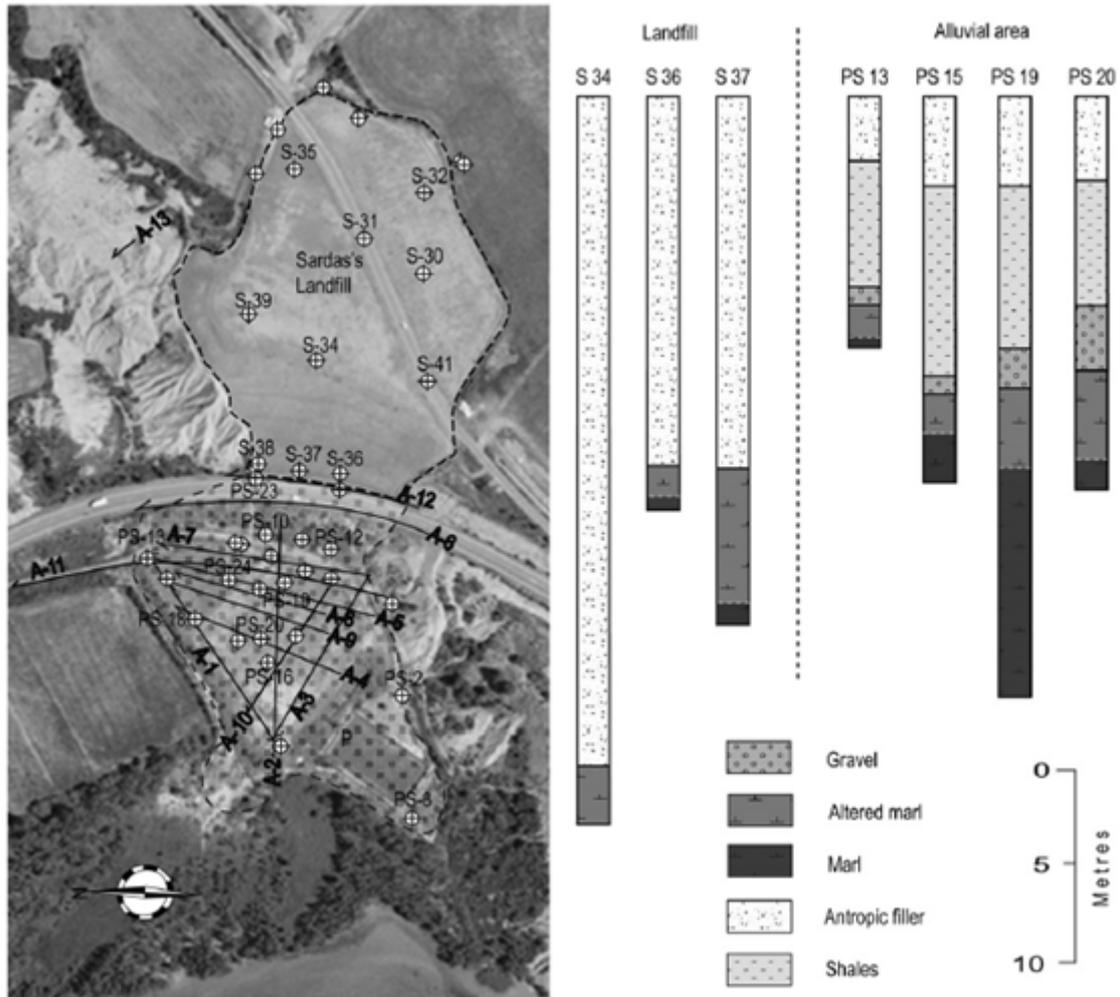


Figura 2.13: Localizzazione dei fori di sondaggio e dei profili di resistività elettrica elaborati [Casado et al., 2015]

I dati di resistività ottenuti da indagini in sito sono stati elaborati mediante l'impiego del software RES2DINV che ha permesso di trasformare i valori di resistività elettrica apparente in resistività elettrica reale mediante un processo di inversione.

Tale processo si basa sull'applicazione dei minimi quadrati considerando le condizioni al contorno caratterizzanti il problema inverso. I risultati del processo di inversione per la realizzazione dei profili di resistività elettrica hanno evidenziato uno scarto quadratico medio (RMS) minore dell'8% dopo 5 iterazioni. I dati ottenuti mediante tale operazione sono stati poi comparati con i risultati derivanti da una campagna di indagini svolta in sito consistente nella produzione di profili geologici mediante carotaggi.

Al fine di interpretare correttamente i dati provenienti dalle prove geofisiche, gli autori sottolineano come sia necessario tenere in considerazione le caratteristiche geologiche dell'area per avere una visione chiara del comportamento del mezzo in presenza del percolato. Generalmente, i contrasti emergenti dai profili di resistività sono riconducibili alle variazioni nella struttura litologica del sottosuolo o da variazioni della microstruttura della singola formazione geologica. In questo caso, la presenza di percolato porta a significative variazioni di resistività in funzione del grado di saturazione raggiunto nelle diverse formazioni che possono mascherare le zone di discontinuità tra formazioni geologiche differenti. Pertanto, gli autori hanno condotto delle campagne di acquisizione dati preliminari al fine di comprendere i range di resistività caratteristici delle litostrutture caratterizzanti l'area oggetto di studio e solo successivamente si sono prodotti i profili rappresentati in Figura 2.14. Il profilo A13 è stato prodotto al fine di ottenere un'indicazione sul valore di resistività caratteristico delle formazioni geologiche presenti nell'area di indagine. L'outcome dell'analisi ha restituito il range di variazione delle marne non fratturate che si attesta a valori maggiori di $23\Omega m$, mentre in altri profili realizzati il range caratteristico del substrato di marne risulta compreso tra i 6 ed i $35\Omega m$. Le prove geotecniche utilizzate per la caratterizzazione idraulica delle litostrutture ha evidenziato una sostanziale variabilità della conducibilità idraulica, che varia tra i 3.07×10^{-7} m/s a 5.20×10^{-10} m/s. Questa variazione, riportano gli autori, è possibile ricondurla alla presenza o assenza di sistemi di fratture o all'alterazione della stessa formazione geologica.

Alla luce di quanto esposto, è possibile affermare che valori di resistività inferiori ai $23\Omega m$ in corrispondenza del substrato di marne possono indicare la presenza di percolato e quindi la presenza di un sistema di fratture (Casado et al., 2015).

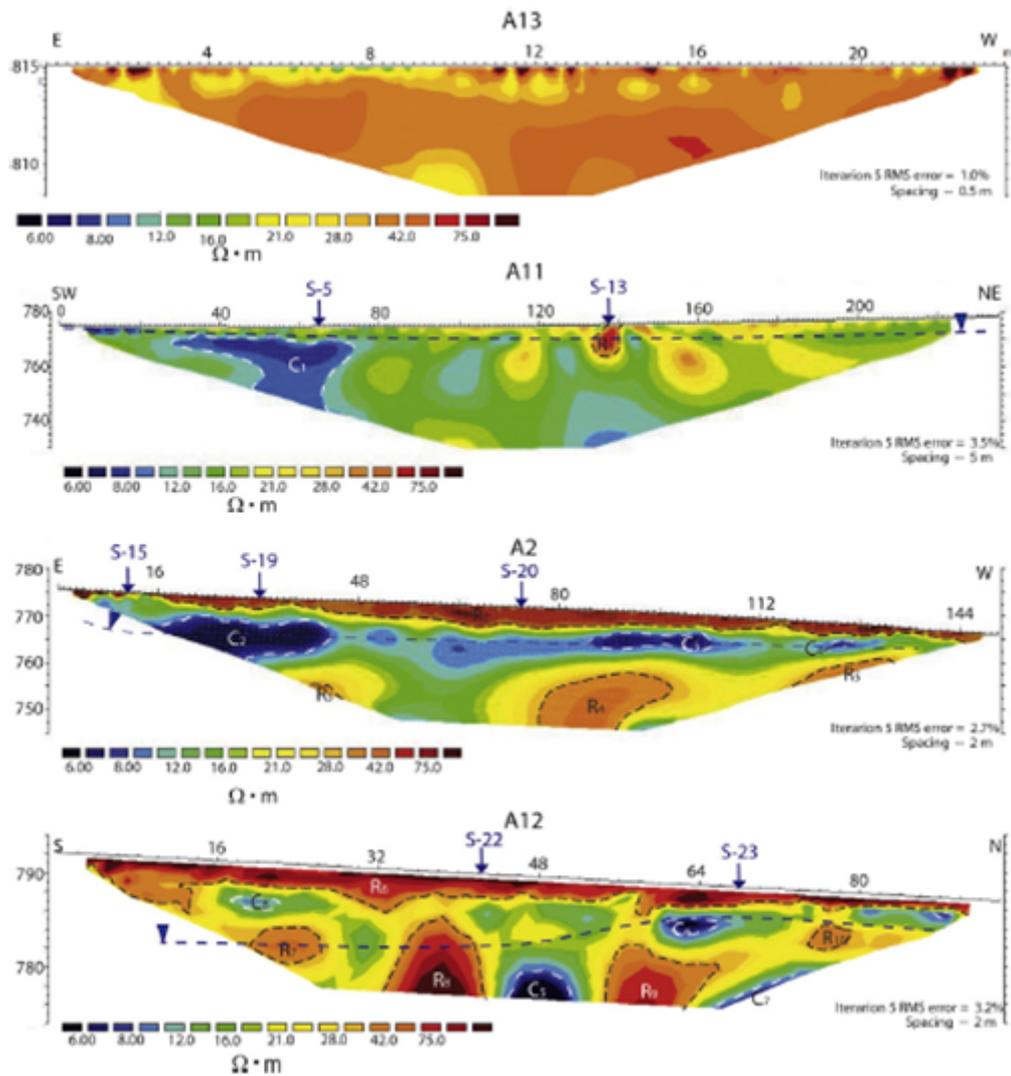


Figura 2.14: Profili di resistività contenenti anomalie (Cx) e sone ad alta resistività (Rx) [Casado et al., 2015]

Il profilo A11 è stato utilizzato per determinare l'influenza sulla resistività elettrica del mezzo da parte del percolato. Nel profilo in parola possono essere individuate due aree che presentano un differente comportamento in termini di resistività. La prima è localizzata tra il sud-ovest del profilo e il perforo S-13, che corrisponde ad un'area affetta da contaminazione. La seconda localizzata tra il perforo S-13 e il nord-est del profilo che corrisponde ad un'area non affetta da contaminazione. L'area contaminata è caratterizzata da valori bassi di resistività elettrica ed una zona anomala (C1) a forma allungata che si estende a maggiore profondità.

Il profilo A2 evidenzia una successione litostratigrafica più complessa comprendente 4 differenti strati. Tuttavia, gli autori non associano la differenza di resistività alla successione di formazioni geologiche differenti, bensì alla presenza o assenza del percolato. Infatti, comparando i valori di resistività del mezzo dell'anomalia C1 con le analisi chimiche dell'acqua di falda estratta dal perforo S-5, è possibile trovare una correlazione tra la concentrazione di contaminanti e le anomalie nella resistività del mezzo. In conferma di tale ipotesi, l'assenza di percolato provoca di nuovo delle anomalie nella resistività del mezzo determinando zone ad alto valore. Il profilo A12 presenta differenti anomalie nella ricostruzione tomografica. Le anomalie caratterizzate da bassi valori di resistività elettrica possono essere associate alla presenza di percolato proveniente dalla discarica e le anomalie caratterizzate da alti valori di resistività elettrica possono essere associate a zone non sature. In conclusione, lo studio effettuato dagli autori mostra come la tomografia elettrica, seppur di complessa interpretazione, costituisce un valido approccio sperimentale per l'analisi di problemi di percolazione e migrazione di sostanze inquinanti presenti nel substrato sia in fase non disciolta (DNAPL) che disciolta. Inoltre, questa metodologia sperimentale è in grado di rilevare anomalie a larga scala nella struttura delle formazioni geologiche. Infatti, grazie alle tomografie realizzate si sono individuate delle famiglie di fratture caratterizzanti il substrato costituito da marne che rappresentano percorsi preferenziali di migrazione e diffusione del contaminante.

Capitolo 3

Proprietà elettriche dei mezzi porosi e metodi di indagine

Le proprietà elettriche dei mezzi porosi sono quasi sempre riconducibili alla capacità di trasporto di ioni (Na^+ , Cl^- , etc. . .), veicolato attraverso l'acqua interstiziale, all'interno del reticolo poroso caratterizzante la microstruttura. In particolare, la conducibilità elettrica σ [mS/cm] di un mezzo poroso determina quanto efficacemente esso si lasci attraversare da una corrente elettrica. Viceversa, la resistività elettrica ρ Ω m indica quanto il mezzo poroso opponga una resistenza al passaggio di una corrente elettrica. Queste due grandezze sono tra loro correlate secondo la relazione (3.1).

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (3.1)$$

L'acqua che generalmente imbibisce parzialmente o totalmente i pori della microstruttura del mezzo poroso discioglie i composti ionici, come ad esempio $NaCl$ e $Ca(OH)_2$, che si dissociano completamente e la soluzione acquosa diventa un buon conduttore di corrente. In questo modo la soluzione ha la capacità di condurre efficacemente corrente elettrica influenzando il comportamento elettrico del mezzo poroso.

La capacità di trasporto ionico, quindi, è fortemente dipendente dalla matrice porosa del mezzo in esame. Una struttura porosa lineare ed interconnessa facilita

il passaggio di corrente elettrica, pertanto, presenterà una resistività bassa. Una struttura porosa che presenta pori isolati e non comunicante non permette il trasporto degli ioni presenti nell'acqua interstiziale pertanto presenterà una conducibilità elettrica pari $\sigma \approx 0$.

La presenza di argilla influenza particolarmente la resistività dei terreni poiché interagendo con la soluzione elettrolitica porta alla ionizzazione dei minerali argillosi che genera una capacità di conduzione superficiale.

3.1 Relazione tra proprietà elettriche e parametri fisici

I primi studi per trovare una relazione tra la resistività elettrica e i parametri fisici in una formazione rocciosa furono eseguiti da Archie nel 1942. Questi mette in relazione la conducibilità elettrica di un generico materiale con la conducibilità elettrica del fluido interstiziale, la porosità ed il grado di saturazione.

$$\sigma_m = \sigma_w \cdot \phi^n \cdot S_r^m \quad (3.2)$$

Dove:

- σ_m rappresenta la conducibilità elettrica del materiale saturo;
- σ_w rappresenta la conducibilità elettrica del fluido interstiziale;
- ϕ ed S_r sono rispettivamente la porosità ed il grado di saturazione;
- n è un parametro legato al grado di cementazione del materiale;
- m è un parametro legato al grado di saturazione.

In origine la formulazione di Archie è stata applicata per l'individuazione di giacimenti petroliferi attraverso indagini geofisiche, sfruttando la capacità degli idrocarburi di ostacolare il trasporto ionico. Questa proprietà permette quindi attraverso indagini geoelettriche del sottosuolo di determinare posizione ed estensione dei giacimenti petroliferi attraverso un'analisi di resistività elettrica. La legge di Archie successivamente è stata applicata ad altri ambiti e tutt'oggi viene utilizzata anche per la caratterizzazione di rocce e terreni.

La formulazione classica della legge di Archie (3.2) non permette di ottenere una stima dei parametri n ed m diretta, pertanto, si sono operate delle linearizzazioni per ottenere una formulazione adeguata.

Passando ai logaritmi delle grandezze riportate nell'equazione (3.2) si è ottenuta la seguente formulazione:

$$\ln(\sigma_m) = \ln(\sigma_w) \cdot \ln(\phi^n) \cdot \ln(S_r^m) \quad (3.3)$$

Applicando le proprietà dei logaritmi è stato possibile ottenere che:

$$\ln \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_w} \right) = n \cdot \ln(\phi) + m \cdot \ln(S_r) \quad (3.4)$$

In ultimo si sono divisi tutti i membri dell'equazione per il logaritmo naturale della porosità $\ln(\phi)$, al fine di ottenere una formulazione matematica riconducibile all'equazione di una retta generica con coefficiente angolare m ed intercetta n .

$$\frac{\ln \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_w} \right)}{\ln(\phi)} = m \cdot \frac{\ln(S_r)}{\ln(\phi)} + n \quad (3.5)$$

Una formulazione così scritta ci permette di tenere in conto, nella determinazione dei parametri n ed m della variabilità del grado di saturazione e della porosità. Quest'ultima forma matematica risulta, inoltre, essere trattabile attraverso una interpolazione di tipo lineare.

Per la sperimentazione attinente al presente lavoro di tesi si è considerata la variabilità della conducibilità del fluido interstiziale in relazione alla variazione di contenuto d'acqua nella misura espressa dalla (3.6):

$$w^t \cdot \sigma_w^t = \sigma_w^0 \cdot w^0 \quad (3.6)$$

$$\sigma_w^t = \frac{\sigma_w^0 \cdot w^0}{w^t} \quad (3.7)$$

Esprimendo il contenuto d'acqua gravimetrico w come:

$$w = \frac{e_0 \cdot S_r}{G_s} \quad (3.8)$$

È possibile ricavare che:

$$\sigma_w^t = \sigma_w^0 \cdot \frac{e^0 \cdot S_r^0}{e^t \cdot S_r^t} \quad (3.9)$$

Sostituendo l'indice dei vuoti con la porosità è possibile ottenere che:

$$\sigma_w^t = \left(\frac{\phi^0}{1 - \phi^0} \right) \cdot \left(\frac{1 - \phi^t}{\phi^t} \right) \cdot \sigma_w^0 \cdot \frac{S_r^0}{S_r^t} \quad (3.10)$$

Riscrivendo la precedente espressione, tenendo che i parametri identificati con l'apice 0 sono delle costanti¹:

$$\sigma_w^t = \sigma_w^{0*} \cdot \left(\frac{1 - \phi^t}{\phi^t} \right) \cdot \sigma_w^0 \cdot \frac{1}{S_r^t} \quad (3.11)$$

$$\sigma_w^{0*} = \sigma_w^0 \cdot \left(\frac{\phi^0}{1 - \phi^0} \right) \cdot S_r^0 \quad (3.12)$$

Quindi è possibile esprimere la legge di Archie come segue:

$$\sigma_m^t = \sigma_w^{0*} \cdot (1 - \phi^t) \cdot \phi^{n-1} \cdot S_r^{m-1} \quad (3.13)$$

Tale forma, esattamente come la (10), è linearizzabile ottenendo la seguente formulazione:

$$\frac{\ln \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_w^{0*}} \right) \cdot \frac{1}{1 - \phi}}{\ln(\phi)} = (m - 1) \cdot \frac{\ln(S_r)}{\ln(\phi)} + (n - 1) \quad (3.14)$$

L'espressione (3.14) quindi ci consente di ottenere una stima diretta dei parametri n ed m attraverso un'interpolazione dei dati sperimentali di tipo lineare. Inoltre, con le modifiche apportate attraverso l'espressione (3.6) è possibile tenere in conto della variabilità della conducibilità elettrica del fluido interstiziale.

I parametri fisici di un generico materiale possono essere espressi attraverso l'impiego delle relazioni:

$$w = \frac{M_u - M_s}{M_s} \quad (3.15)$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \quad (3.16)$$

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (3.17)$$

$$\phi = \frac{V_v}{V_t} \quad (3.18)$$

Dove:

¹Gli apici rappresentano gli istanti di tempo (0: istante iniziale, t: generico istante t-esimo)

- M_u rappresenta la massa umida del campione g;
- M_s rappresenta la massa secca del campione g;
- V_w rappresenta il volume dell'acqua cm^3 ;
- V_v rappresenta il volume dell'acqua cm^3 ;
- V_s rappresenta il volume dell'acqua cm^3 ;
- V_t rappresenta il volume dell'acqua cm^3 .

3.2 Prova elettrica monodimensionale

Un modello elementare per la descrizione del comportamento elettrico dei materiali conduttori è rappresentato dalla legge di Ohm. Essa stabilisce che la corrente in un conduttore tra due punti è direttamente proporzionale alla differenza di potenziale tra i due punti stessi. La costante di proporzionalità è detta resistenza elettrica.

$$V = R \times I \quad (3.19)$$

dove I è la corrente attraverso il conduttore, V è la differenza di potenziale ed R è la resistenza. Nel sistema internazionale la corrente si misura in ampere, la differenza di potenziale in volt e la resistenza in ohm. Più specificatamente, la legge di Ohm stabilisce che la R in questa relazione è costante, cioè indipendente dalla corrente. Sulla base di quanto espresso una metodologia sperimentale che consente, attraverso la determinazione delle grandezze rappresentate nella (3.19), di caratterizzare elettricamente un conduttore è una prova elettrica monodimensionale. Lo schema rappresentato in Figura 3.1 rappresenta la configurazione di prova per la determinazione della conducibilità elettrica di un materiale conduttore. Esso prevede l'impressione di un'intensità di corrente nota attraverso degli elettrodi esterni (M-N) e la misura di resistenza attraverso gli elettrodi interni (A-B). Nota la geometria del campione sottoposto a prova e la distanza tra gli elettrodi di misura è possibile risalire alla conducibilità elettrica del materiale utilizzando la relazione (3.20).

$$\sigma = \frac{l}{S \times R} \cdot 1000 \quad (3.20)$$

Dove:

- σ è la conducibilità elettrica misurata in mS/cm;
- l è la distanza che intercorre tra i due elettrodi di misura cm;
- S rappresenta la sezione del provino cm²
- R è la resistenza elettrica misurata dagli elettrodi di misura ohm;
- 1000 è un fattore moltiplicativo.

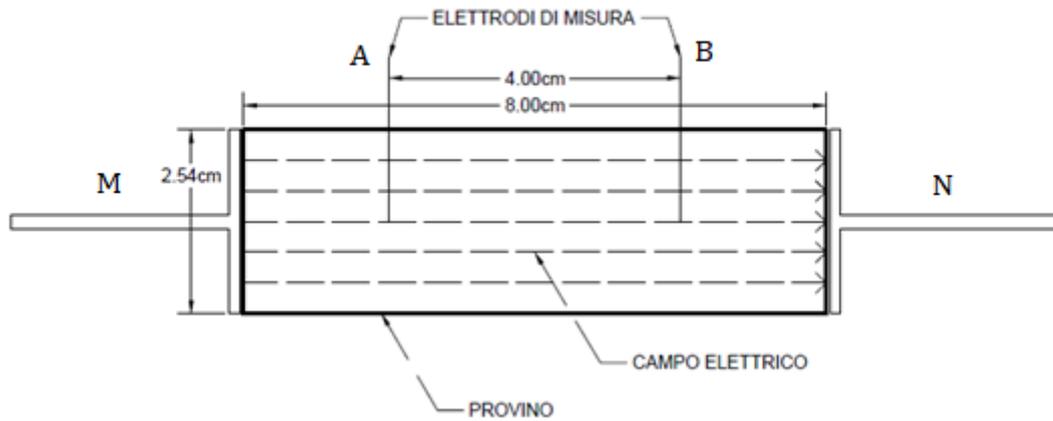


Figura 3.1: Schema prova elettrica su elemento di volume

L'interpretazione diretta attraverso la relazione (3.20) è possibile considerando che il campo elettrico generato da questa configurazione di prova è uniforme.

3.3 Tomografia di resistività elettrica

La tomografia di resistività elettrica è una metodologia sperimentale che consente di stimare la distribuzione spaziale della conducibilità elettrica di un oggetto a partire da misure di resistività elettrica. Generalmente, un numero discreto di elettrodi viene posizionato sulla superficie esterna di un oggetto e viene impressa un'intensità di corrente nota su alcuni di essi. La differenza di potenziale elettrico derivante dall'applicazione della corrente elettrica viene misurata dagli elettrodi rimanenti. I dati acquisiti in fase di misura sono collegati alla conducibilità elettrica dell'oggetto sottoposto a prova attraverso leggi fisiche note ed è possibile, quindi, stimare la distribuzione spaziale di questo parametro all'interno dell'oggetto attraverso un processo di stima chiamato *ricostruzione tomografica*. Questo processo rappresenta la soluzione di un problema inverso, nel quale note le grandezze misurate, attraverso un processo iterativo si ricerca la configurazione ricostruita che minimizza gli scarti con la configurazione reale.

La soluzione del problema inverso, quindi, correla le misure di resistenza alla conducibilità elettrica dell'oggetto sottoposto a prova. Assumendo che l'oggetto in parola ha una conducibilità elettrica lineare ed isotropa e che i campi elettrico e magnetico hanno una bassa variabilità spaziale, il potenziale elettrico u all'interno del corpo B è governato dall'equazione di Maxwell:

$$\nabla (\sigma \nabla u) = 0 \quad (3.21)$$

dove σ è la conducibilità elettrica del corpo B . La presenza degli elettrodi è tenuta in conto applicando delle appropriate condizioni al contorno. Il modello utilizzato per la modellazione degli elettrodi assume che questi siano buoni conduttori ed il potenziale elettrico di ciascuno di essi sia costante sulla loro intera superficie ([Borsic, 2002]). Inoltre, il modello assume che ci sia una resistenza intrinseca sulla superficie di contatto tra gli elettrodi e l'oggetto sottoposto a prova. Sulla base di queste assunzioni, la relazione che lega le grandezze fin qui esposte risulta essere la seguente per ogni elettrodo $l = 1, \dots, L$.

$$V_l = u + z_l \sigma \frac{\partial u}{\partial \bar{n}} \quad \text{per } \partial B_l, \quad \text{con } l = 1, \dots, L \quad (3.22)$$

Dove V_l rappresenta il potenziale dell'elettrodo l -esimo, z_l è la resistenza di contatto dell'elettrodo l -esimo, u e σ sono rispettivamente il potenziale elettrico e la conducibilità elettrica dell'oggetto B , \bar{n} è la normale uscente al contorno ∂B e ∂B_l è la porzione di ∂B circostante l'elettrodo l -esimo. Inoltre, vale la seguente relazione:

$$\int \sigma \frac{\partial u}{\partial \bar{n}} = I_l \quad \text{per } \partial B_l, \quad \text{con } l = 1, \dots, L \quad (3.23)$$

Dove I_l è la corrente impressa sull'elettrodo l -esimo. Le equazioni appena descritte vengono applicate sulla porzione del corpo ∂B circostante ogni elettrodo, mentre sulla parte rimanente del corpo ∂B vale la seguente relazione:

$$\sigma \frac{\partial u}{\partial \bar{n}} = 0 \quad (3.24)$$

Poiché si considera che non vi sia nessuna densità di corrente che attraverso la superficie libera dell'oggetto sottoposto a prova. In aggiunta alle equazioni qui descritte si implementa il modello con un'ulteriore equazione che consente di determinare in modo univoco il potenziale V_l :

$$\sum_{l=1}^L V_l = 0 \quad (3.25)$$

In generale, nelle operazioni di ricostruzione, l'operatore inverso, che fornisce la conducibilità elettrica in funzione delle misurazioni effettuate non è noto a priori. Quindi l'algoritmo di ricostruzione fa uso di un modello inverso e la ricostruzione è formulata come un problema non lineare ai minimi quadrati, dove la conducibilità del modello inverso è variata fino a quando non viene raggiunta, in modo ragionevole, una compatibilità tra il dato ricostruito e quello misurato. La ricostruzione tomografica implementa un modello inverso basato sugli elementi finiti, discretizzando il dominio dell'oggetto B e quindi la distribuzione di conducibilità elettrica. La ricostruzione si basa, quindi, sulla seguente formulazione:

$$s_{rec} = \operatorname{argmin} \left\| h_{(s)} - v \right\|_2^2 \quad (3.26)$$

dove v è il vettore dei voltaggi misurati, s è la conducibilità discreta ed h è l'operatore non lineare inverso. Il problema di ricostruzione è *ill-posed* nel senso che piccole perturbazioni nei dati di misurazione possono causare arbitrariamente grandi

errori nella conducibilità stimata. Al fine di aggirare tale problematica nell'algoritmo di ricostruzione sono state adottate tecniche di regolarizzazione per ottenere una soluzione cosiddetta stabile. L'equazione di cui sopra, generalmente, viene risolta adottando la regolarizzazione di Tikhonov, modificandola come segue:

$$s_{rec} = \operatorname{argmin} \left\| h_{(s)} - v \right\|_2^2 + \alpha F_{(s)} \quad (3.27)$$

Dove $F_{(s)} \geq 0$ è la funzione di regolarizzazione ed α è uno scalare positivo denominato "fattore di Tikhonov". Nello specifico F agisce come un fattore penalizzante, prendendo grandi valori corrispondenti a distribuzioni di s che devono essere evitate nei profili ricostruiti. L'effetto di F sulle ricostruzioni può essere valutato variando il valore del parametro α . Dal momento che la conducibilità elettrica viene espressa come un valore discreto, la funzione di regolarizzazione è generalmente espressa nella forma:

$$F_{(s)} = \left\| L_{(s)} \right\|_2^2 \quad (3.28)$$

dove L rappresenta la matrice di regolarizzazione. Quindi la formulazione finale dell'algoritmo di ricostruzione risulta essere:

$$s_{rec} = \operatorname{argmin} \left\| h_{(s)} - v \right\|_2^2 + \alpha \left\| L_{(s)} \right\|_2^2 \quad (3.29)$$

Come già detto, il ruolo della funzione di regolarizzazione è di penalizzare la presenza nella ricostruzione di distribuzioni di conducibilità per le quali le osservazioni sono eccessivamente piccole rispetto al rumore delle misurazioni. La matrice di regolarizzazione L è rappresentata dalla matrice identità.

I metodi di regolarizzazione utilizzati permettono, quindi, di ottenere un processo di inversione stabile ottenendo così un buon compromesso tra stabilità della soluzione e chiarezza dell'immagine.

L'algoritmo risolutivo finora descritto è stato implementato² in Matlab elaborando un codice numerico che si basa su un modello agli elementi finiti rappresentato in Figura 43. Il modello presenta una geometria circolare ed una mesh di tipo triangolare distribuita in modo uniforme nello spazio con una densità maggiore in corrispondenza degli elettrodi. Tale configurazione consente di avere una risoluzione

²©2003 Andrea Borsic, SC-AIP s.a.s., www.sc-aip.com

migliore in corrispondenza degli elementi limitrofi agli elettrodi ed un'informazione omogenea sull'intera estensione del provino.

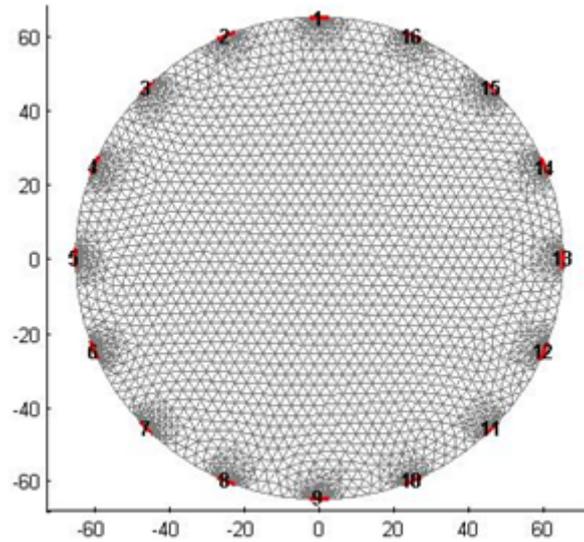


Figura 3.2: Mesh del modello numero di ricostruzione tomografica

L'attrezzatura utilizzata per la realizzazione delle prove di tomografia di resistività elettrica è costituita dal Complex Impedance Tomograph (1) e dal Multiplexers (2) mostrati in Figura 3.2. La strumentazione è collegata ad un PC (3) dal quale è possibile controllarne il funzionamento ed i parametri di input.

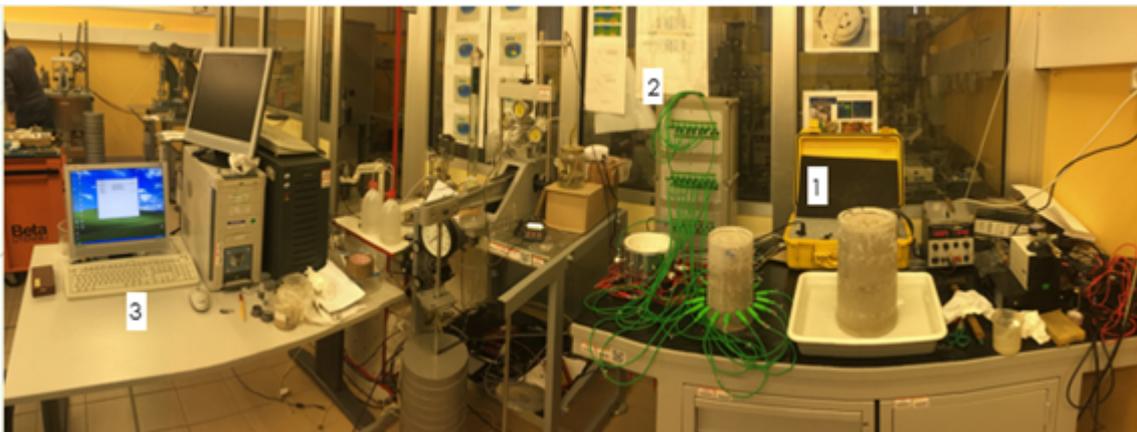


Figura 3.3: Set-up di misura: 1. Tomografo. 2. Multiplexers e cavi di connessione. 3. PC di controllo

L'esecuzione della prova di tomografia di resistività elettrica prevede l'impressione di una corrente elettrica attraverso due elettrodi opposti e la misura della resistività elettrica mediante l'impiego degli elettrodi rimanenti. Il CIT (*Complex Impedance Tomograph*) utilizzato per effettuare le operazioni appena descritte è stato realizzato da Iridium Italy s.a.s. e le sue caratteristiche sono riportate in Tabella 3.1. Il dispositivo permette l'acquisizione dei dati velocemente con una risoluzione a 16-bit, infatti riesce ad acquisire fino a 200 letture al secondo. Questo permette di misurare fenomeni transitori che presentano un'evoluzione rapida nel tempo. Il tomografo è controllato da un PC, che è utilizzato per definire le configurazioni di prova.

Complex Impedance Tomograph	
Maximum output current	$\pm 250 \text{ mA}$ (500 mApp)
Maximum output voltage	$\pm 50 \text{ V}$ (100 Vpp)
Operative frequencies	0.1 to 2500 Hz
Acquisition channel	48
Resolution on phase angles	1 mrad
Resolution on voltage	$100 \mu\text{V}$
Resolution on current	$10 \mu\text{A}$
Input impedance	$200 \text{ M}\Omega$

Tabella 3.1: Caratteristiche del CIT

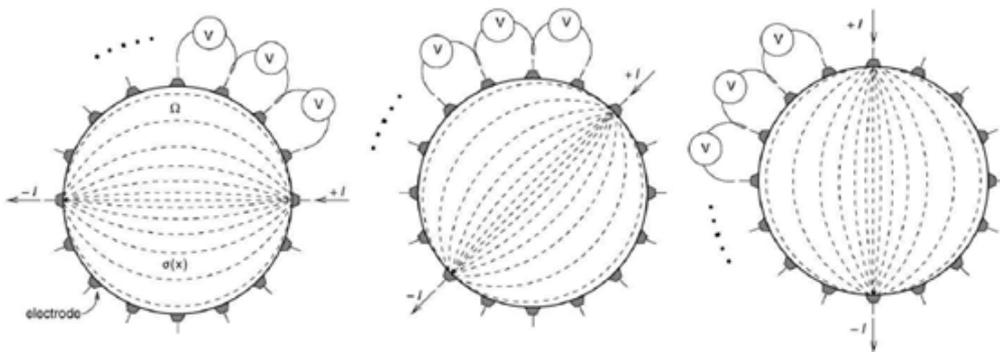


Figura 3.4: Protocollo di misura nella tecnica ERT 2D [Seppänen et al., 2009]

Un esempio di protocollo di misura relativo all'esecuzione delle tomografie di resistività elettrica è rappresentato in figura Figura 3.4. In successione, i 16 elettrodi previsti per l'esecuzione delle misure prevedono che una coppia opposta al

diametro (es. 1-9; 2-10 etc.) imprima una corrente elettrica all'interno dell'oggetto e che, contemporaneamente, i restanti elettrodi, in coppia, misurino le differenze di potenziale e quindi la resistività elettrica.

Il protocollo di prova utilizzato nel presente lavoro di tesi prevede l'impressione di una corrente elettrica tramite due elettrodi opposti e la misura della resistenza elettrica tramite gli elettrodi rimanenti. In Figura 3.5 è riportato un estratto del file di misura che consente di individuare in corrispondenza delle colonne A, B, M, N il protocollo di misura seguito. L'acquisizione dei dati avviene in un tempo molto rapido (circa 60 secondi) attraverso un software che consente di esportare i dati misurati in formato .txt (Figura 3.5).

Scan	Time [ms]	A	B	M	N	Res. [Ohm]	I [mA]	Phase [°]
1	873	1	9	2	3	2,89281	7,008168E-02	8,333334E-03
2	1577	1	9	2	4	4,118405	7,702205E-02	-0,1416667
3	2282	1	9	2	5	4,977682	7,695673E-02	-0,05
4	2986	1	9	2	6	5,77853	7,699862E-02	-0,1083333
5	3690	1	9	2	7	6,939033	7,704085E-02	0,05
6	4394	1	9	2	8	10,06808	7,695106E-02	-0,6583334
7	5098	1	9	16	15	2,871035	7,698584E-02	0,35
8	5803	1	9	16	14	4,109852	7,694218E-02	0,175
9	6506	1	9	16	13	4,945036	7,689428E-02	0,1166667
10	7210	1	9	16	12	5,757311	7,681833E-02	0,15
11	7914	1	9	16	11	7,086526	7,692302E-02	6,666667E-02
12	8618	1	9	16	10	10,14647	7,692728E-02	0,075

Figura 3.5: Esempio file di prova .txt

All'interno dei file esportati vi sono 96 righe, corrispondenti alle 96 letture acquisite dal software sulle quali vengono registrati l'identificativo della misura (Scan), gli elettrodi utilizzati per eseguirla (A, B, M, N) e le grandezze elettriche misurate (Resistenza, Intensità di corrente, etc...). Un parametro di controllo utilizzato per controllare le singole misure è rappresentato dalla fase. In regime di corrente alternata la fase del segnale deve essere prossima a 0° o 180° , qualora il valore segnalato dal software indichi fase che si discostano eccessivamente da tali valori significa che la lettura è identificata come errore. In Figura 3.6 sono riportate le schermate caratteristiche del software utilizzato per l'acquisizione dei dati. Il funzionamento dello stesso è molto semplice ed i comandi, come si può osservare dall'immagine sono molto intuitivi. È possibile caricare una qualunque configurazione di prova, il che rende molto versatile l'impiego del CIT, ed iniziare la prova attraverso il comando

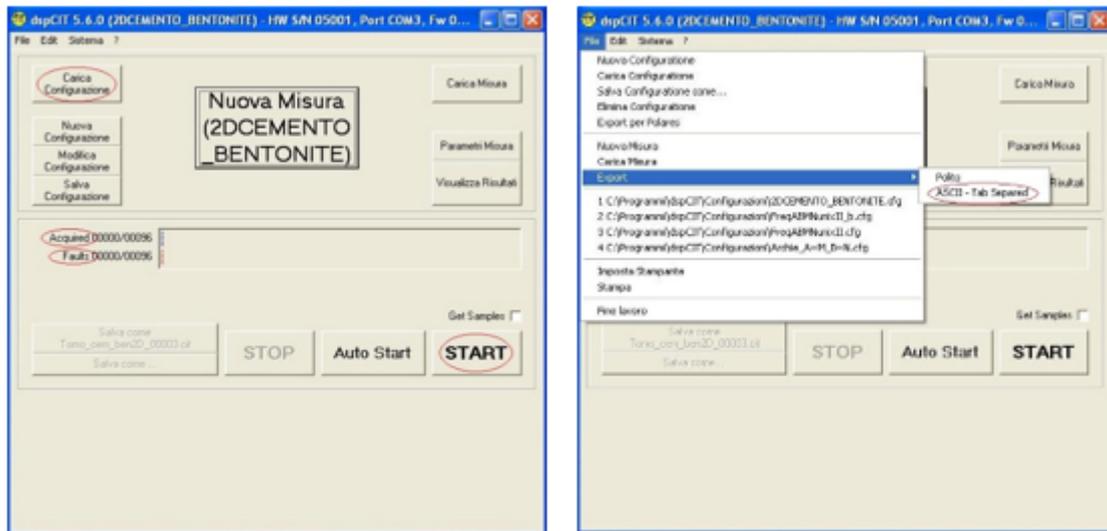


Figura 3.6: Programma di acquisizione dati tomografia elettrica

“START”. Le letture sono rappresentate graficamente dalla barra “Acquired” che indica quante misure sono state registrate dallo strumento, invece la barra “Faults” indica quante misure non sono andate a buon fine. Solitamente, anche con una percentuale di errore del 40% si ottengono risultati in grado di permettere una ricostruzione tomografica efficace. In ultimo, attraverso il comando “File>Export” è possibile esportare il file contenente le misurazioni in formato ASCII.

Capitolo 4

Materiali e programma di sperimentazione

4.1 Attrezzatura di laboratorio e principi di funzionamento

La tomografia di resistività elettrica descritta nel Capitolo 3.2 ha previsto l'impiego della medesima strumentazione descritta e del medesimo algoritmo di risoluzione. Per l'esecuzione delle prove di tomografia di resistività elettrica si è scelto di utilizzare due tipologie di elettrodi. Uno è stato realizzato utilizzando un filo di diametro di circa $D = 1\text{mm}$ e lunghezza variabile funzione dello spessore dello stampo. Il secondo tipo è stato realizzato saldando un foglietto d'argento quadrato di dimensioni $L=5\text{mm}$ ad un filo, sempre d'argento, di lunghezza variabile funzione dello spessore dello stampo. Le saldature sono state realizzate utilizzando dello stagno. La scelta di utilizzare due tipologie di elettrodi (Figura 4.1) ha permesso di avere a disposizione, per ogni misura eseguita, due ricostruzioni che hanno consentito di valutare sia l'affidabilità del risultato che l'affidabilità degli strumenti di misura. Per le prove eseguite sugli elementi di volume è stato utilizzato un differente set di elettrodi (Figura 4.2) la cui configurazione ha previsto la creazione di un campo elettrico uniforme all'interno dell'elemento ed una misura di resistenza lineare che consentisse di caratterizzare le proprietà elettriche del materiale tramite un'interpretazione diretta dei risultati.

Nello specifico gli elettrodi A ed B sono utilizzati per la realizzazione del campo elettrico uniforme e gli elettrodi M e N per le misure di resistenza.

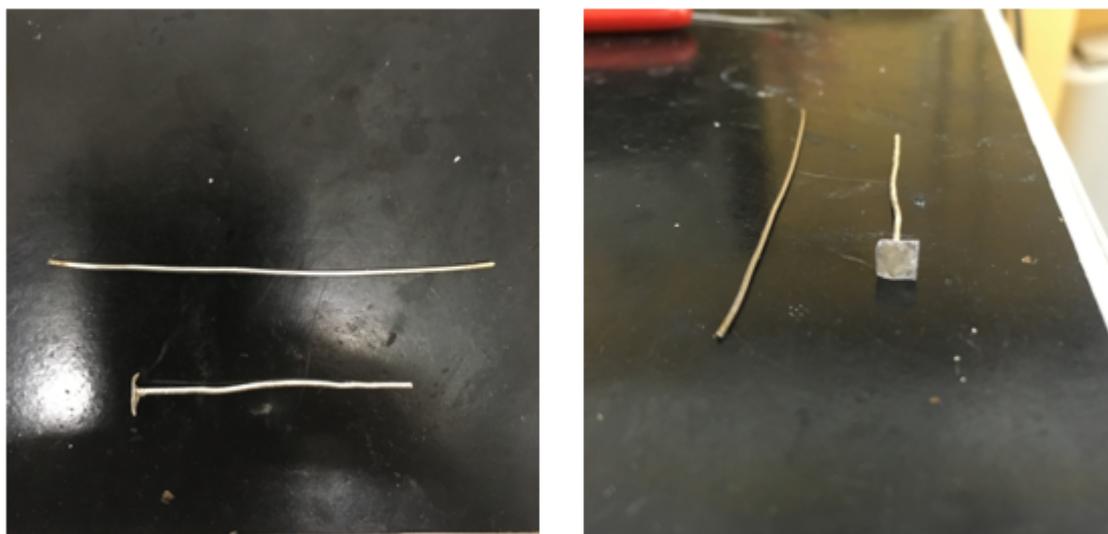


Figura 4.1: Elettrodi puntuali e a testa piatta per ERT 2D

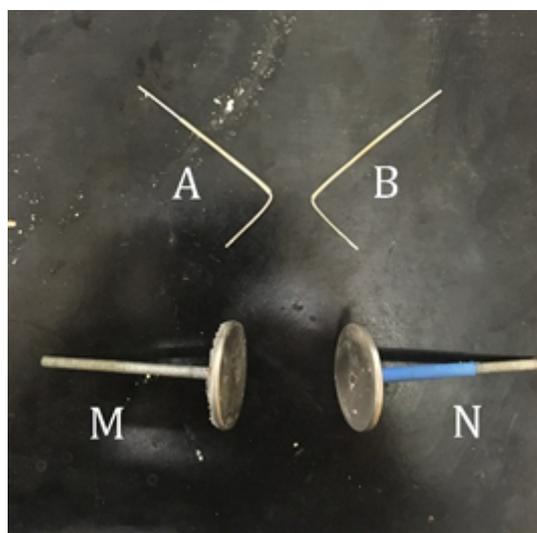


Figura 4.2: Elettrodi per prova elettrica su elemento di volume

Al fine di ottenere dei risultati sperimentali che possano fornire un'indicazione adeguata sull'affidabilità della ERT come tecnica sperimentale ed una caratterizzazione soddisfacente delle proprietà elettriche del materiale indagato si è prodotto

un numero considerevole di campioni variandone la geometria ed i tempi di maturazione.

Un ulteriore strumento utilizzato durante la fase di sperimentazione è il conduttimetro (Figura 4.3). Tale strumento consente di misurare sia la conducibilità elettrica che il pH di una soluzione prelevandone un campione di 10 ml e disponendolo in un'apposita provetta. campo elettrico uniforme e gli elettrodi M e N per le misure di resistenza.

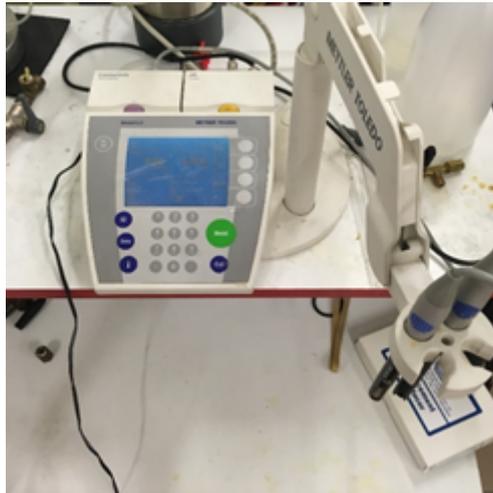


Figura 4.3: Conduttimetro da laboratorio

La caratterizzazione meccanica speditiva, prevista nel programma di sperimentazione, è stata realizzata mediante l'impiego di un penetrometro tascabile (Figura 4.4). Esso, solitamente, viene impiegato per determinare la resistenza alla penetrazione dei terreni o di materiali non cementati.

La metodologia di utilizzo prevede di posizionare lo strumento perpendicolarmente rispetto al piano del materiale di cui si vuole misurare la resistenza applicando una pressione sullo strumento per provocare la penetrazione dello stesso all'interno del materiale. Il valore di resistenza alla penetrazione caratteristico del materiale viene letto sull'apposito quadrante che restituisce la misura di resistenza alla penetrazione in Kg/cm^2 .

La casa produttrice consiglia di eseguire 10 prove considerando la media come il valore di resistenza alla penetrazione. Nel presente studio sperimentale si sono considerati attendibili i risultati derivanti dalla media di 3-4 prove puntuali.



Figura 4.4: Penetrometro tascabile

Le misure geometriche dei campioni sono state eseguite mediante l'utilizzo di un calibro tipo "Absolute digimatic" con precisione di 0.01 mm e le misure di peso sono state eseguite con una bilancia tipo "GIBERTINI - E42S" con precisione di 0.0001 g.



Figura 4.5: Calibro e bilancia ad alta precisione

In Tabella 4.1 è riportato un riassunto schematico di tutte le tipologie di campioni realizzati e dei corrispondenti tempi di maturazione previsti. Di seguito si riporta inoltre, la descrizione geometrica e la documentazione fotografica di tutti gli stampi utilizzati.

Stampo	Tempo di maturazione			
	28 gg	60 gg	90 gg	120 gg
Elemento di volume	X	X	X	
Cella D=8cm	X	X	X	X
Cella D=11cm	X	X		
Cella D=19cm	X			
Cilindro H30		X		
Cilindro H24	X			

Tabella 4.1: Tipologia di stampi e relativi tempi di maturazione della miscela

Gli elementi di volume sono stati prodotti mediante l'impiego di casseri cilindrici aventi dimensioni $D = 2.54$ cm ed $H = 8$ cm. Tale configurazione è stata scelta per realizzare una condizione di prova monodimensionale che consentisse l'interpretazione diretta dei parametri elettrici indagati.



Figura 4.6: Stampo elemento di volume

Le celle sono rappresentate da stampi cilindrici in PVC con diverso rapporto H/D che sono state utilizzate per la realizzazione di campioni sottoposti poi a

caratterizzazione elettrica attraverso la tecnica ERT e a caratterizzazione meccanica speditiva mediante l'impiego del penetrometro tascabile. Le dimensioni degli stampi sono $D = 11$ cm ed $H = 4$ cm (Figura 4.7) e $D = 19$ cm ed $H = 4$ cm (Figura 4.8). La scelta di variare il rapporto dimensionale $\frac{H}{D}$ consente di indagare possibili effetti scala sia sul comportamento meccanico del materiale sia sul comportamento elettrico.

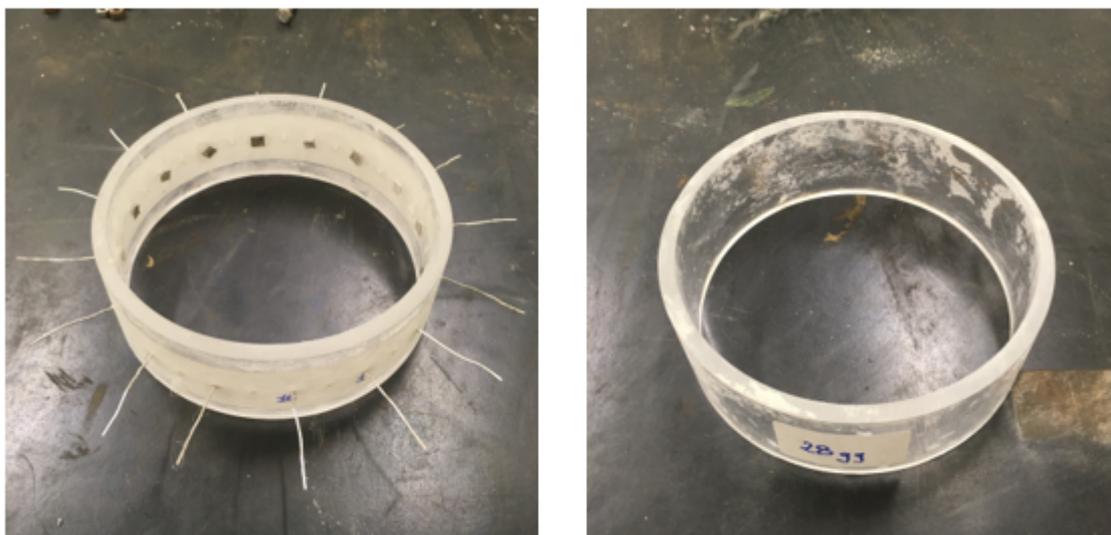


Figura 4.7: Stampi campioni cilindrici $D = 11$ cm ed $H = 4$ cm

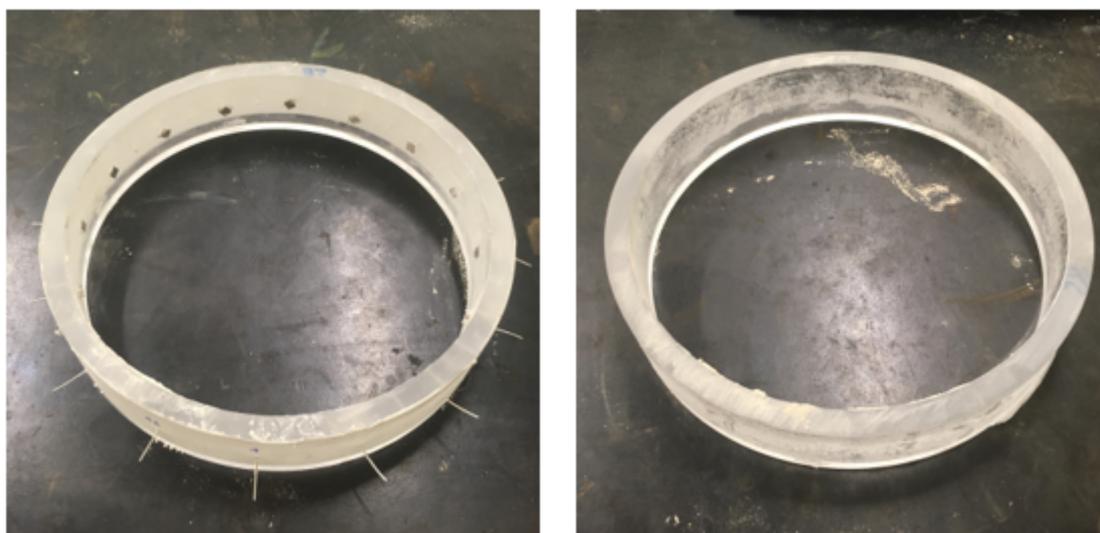


Figura 4.8: Stampi campioni cilindrici $D = 19$ cm ed $H = 4$ cm

Le celle con $D = 8$ cm hanno previsto che il fondo dell'anello sia occluso da un disco in PVC, la cui tenuta idraulica è stata assicurata dall'applicazione di un o-ring. Le dimensioni dello stampo sono $D = 8$ cm ed $H = 6$ cm.

Tutti gli stampi utilizzati per la tomografia elettrica presentano 32 fori equidistanti di diametro 1 mm posizionati nel piano medio dove sono stati inseriti 16 elettrodi a testa piatta e 16 elettrodi puntuali, ad eccezione delle celle $D = 8$ cm che presentano solo 16 fori con le stesse caratteristiche geometriche descritte.

In ultimo, sono state realizzate anche due campioni colonnari utilizzando degli stampi cilindrici aventi dimensioni rispettivamente (Figura 4.10) uno $D = 13$ cm ed $H = 30$ cm e l'altro $D = 11$ cm ed $H = 24$ cm. Entrambe le colonne presentano tre livelli equispaziati nell'altezza dello stampo di 32 fori ciascuno, aventi diametro pari ad 1 mm ed equispaziati nella circonferenza, costituenti alloggiamento per gli elettrodi a testa piatta e puntuali.

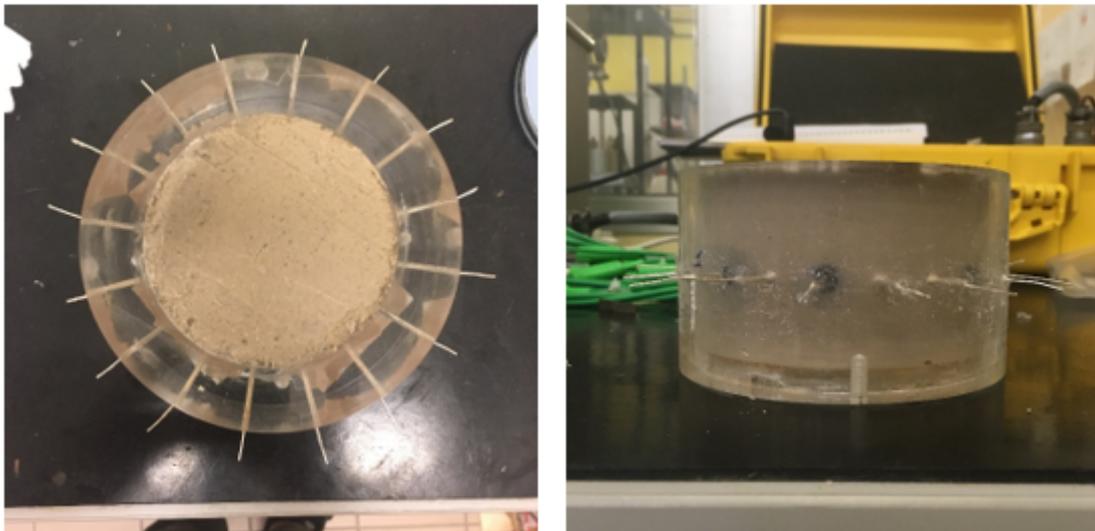


Figura 4.9: Stampi campioni cilindrici $D = 8$ cm ed $H = 6$ cm

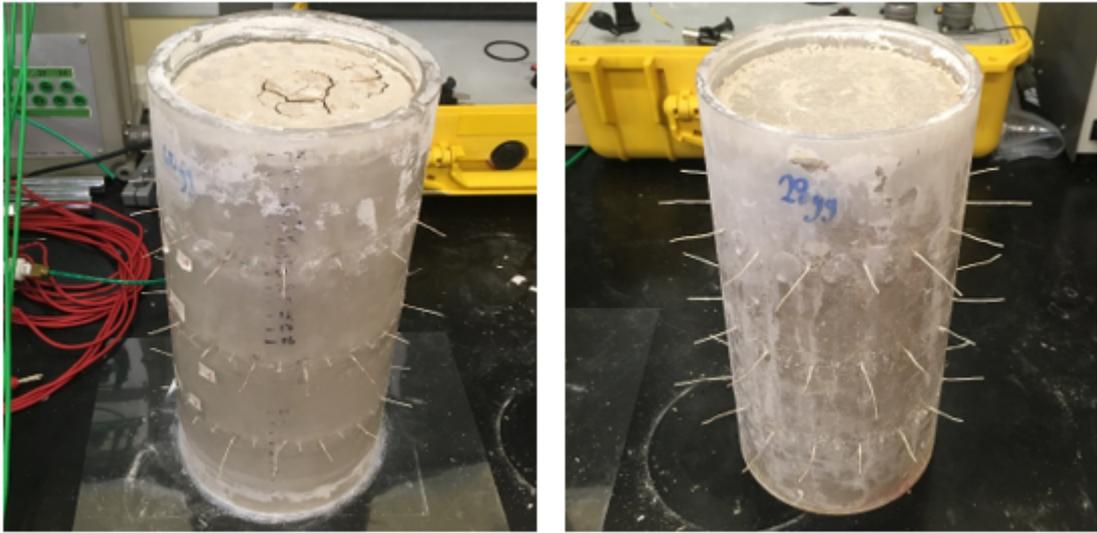


Figura 4.10: Stampi campioni colonnari

4.2 Composizione e confezionamento della miscela

Il programma di sperimentazione presentato nella presente tesi ha previsto l'impiego di un'unica tipologia di miscela denominata "M1" la cui composizione è riportata in Tabella 4.2. La scelta di caratterizzare una miscela così composta deriva dai risultati ottenuti in precedenti studi che la accreditano come più idonea ad essere utilizzata come materiale di impiego per la realizzazione dei diaframmi plastici.

ID	Bentonite [g]	Cemento [g]	Acqua [g]
M1	50	200	900

Tabella 4.2: Composizione miscela acqua-cemento-bentonite

Il cemento utilizzato è di tipo CEM I 32.5 N (Portland 32.5). In accordo con quanto espresso dalla UNI EN 197-1, tale materiale presenta una resistenza a 7 gg maggiore di 16 MPa ed una a 28gg compresa tra 32.5 MPa e 52.5 MPa, un tempo di inizio presa maggiore di 60min ed una stabilità, in termini di espansione, inferiore ai 10min. La bentonite, il cui comportamento è descritto nel Capitolo 1.2 - Caratteristiche fisiche e compatibilità chimica, è di tipo sodico e le caratteristiche sono riportate in Tabella 4.3. L'acqua utilizzata per la produzione della miscela è acqua

Bentonite		
G_s	2.952	–
W_L	534.51	%
W_P	74.85	%
IP	459.66	%

Tabella 4.3: Caratteristiche della Bentonite

proveniente dalla rete di distribuzione idrica, di cui è stata misurata la conducibilità elettrica che è risultata essere pari a circa $\sigma \approx 500 \mu\text{S}/\text{cm}$. In Figura 4.11 sono mostrate le fasi di preparazione della miscela. La prima fase ha previsto la miscelazione, attraverso l'impiego di un mixer, della bentonite con l'acqua. Il composto ottenuto si è lasciato riposare per 24h al fine di permettere la completa idratazione

della bentonite. Durante questo processo si è sigillato il contenitore contenente la miscela per evitare perdita di acqua per evaporazione. Successivamente è stato aggiunto il cemento e, sempre utilizzando un mixer, si è miscelato il composto fino alla completa omogeneizzazione delle componenti. Si osserva che al termine della miscelazione, una volta travasato il composto in un apposito contenitore, risulta apprezzabile una separazione delle fasi, poiché si forma, sulla superficie, uno strato di acqua slegata dalla miscela.

Questo processo risulta essere trascurabile per le quantità trattate in laboratorio, ma può assumere una rilevanza fondamentale durante la fase di getto per la realizzazione dei diaframmi plastici. Durante la fase di miscelazione dopo l'aggiunta

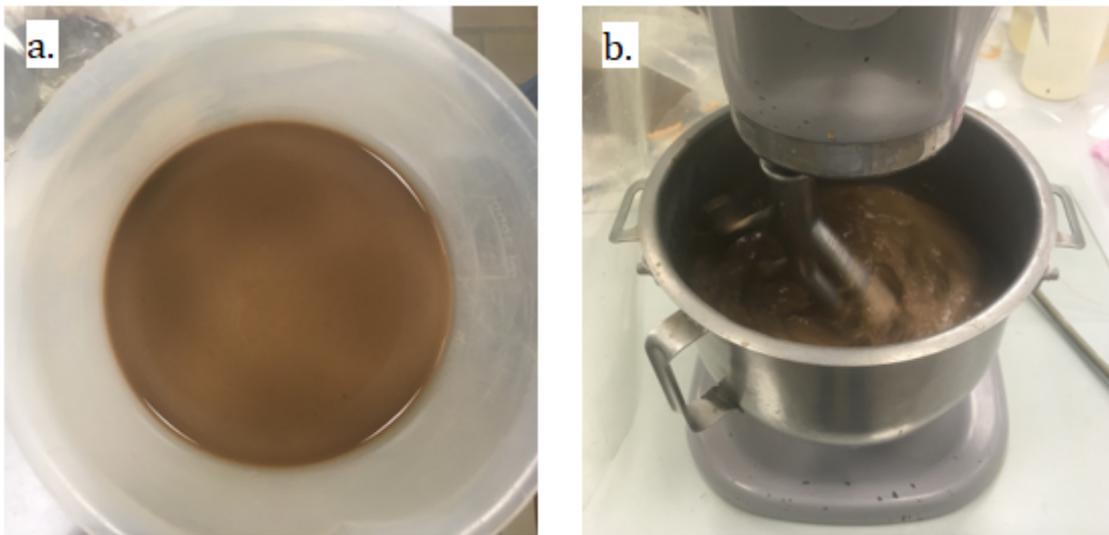


Figura 4.11: Fasi di preparazione della miscela a. Idratazione della bentonite b. Miscelazione con il cemento

del cemento si sono posizionati gli stampi dove effettuare la colata nelle vasche di maturazione. Si è predisposto l'utilizzo della carta filtro per consentire il passaggio di acqua e allo stesso tempo evitare la fuoriuscita di materiale ed è stata posizionata alla base degli stampi. Un accorgimento che è stato adottato è stato quello di saturare la carta filtro prima della posa al fine di evitare la formazione di bolle d'aria che avrebbero alterato la planarità della superficie del campione posta a contatto. La fase di maturazione è avvenuta in acqua, come riportato in Figura 4.12, ed è apprezzabile come il colore della miscela sia scuro all'istante di tempo t_0 e diventi via via più chiaro con il progredire della maturazione. Sempre in Figura

4.12 è visibile la differenza di colorazione tra campioni appena gettati e campione con maturazione pari a 110 giorni.

Si è scelto di procedere con una maturazione in acqua per diverse motivazioni. I diaframmi plastici vengono utilizzati per realizzare una discontinuità idraulica tra il corpo inquinante e l'ambiente circostante. Pertanto, si ritiene che la maturazione della miscela in sito avvenga sottofalda. Inoltre, le proprietà idrauliche ottimali delle miscele acqua-cemento-bentonite si esplicano in condizioni di completa saturazione, $S_r = 1$. In ultimo, la maturazione in acqua è fondamentale per consentire alla componente cementizia di sviluppare le reazioni di idratazione che conferiscono al materiale le proprietà meccaniche ed idrauliche.

Per completezza di trattazione si riportano le reazioni chimiche caratterizzanti la fase di idratazione del cemento.

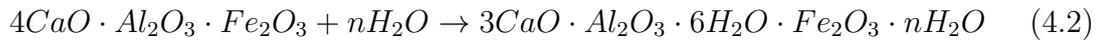


Figura 4.12: Maturazione dei campioni

In tutti i campioni preparati è stato apprezzabile come sulla superficie libera, durante la fase di maturazione, si sia sviluppato un film di sali (Figura 4.13) che assume una consistenza solida o viscosa a seconda del tempo di maturazione in acqua.

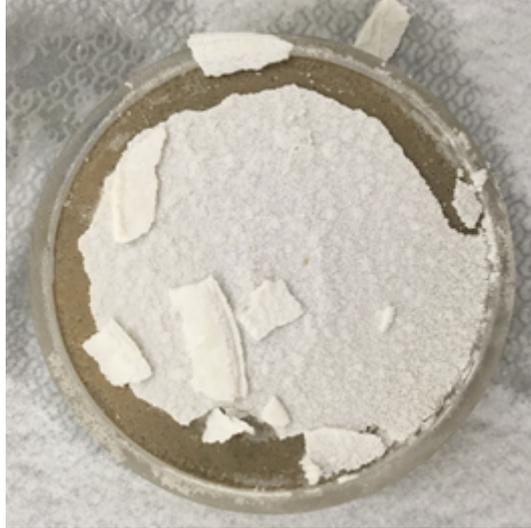


Figura 4.13: Aspetto di un campione al termine della maturazione di 28gg in acqua

4.3 Fase preliminare: calibrazione costanti di cella

La validità della ricostruzione tomografica, per mezzo dell'algoritmo descritto, si basa sull'assunzione che le dimensioni del provino sottoposto a prova siano le medesime del modello utilizzata dall'algoritmo risolutivo, ovvero un provino cilindrico di diametro pari a $D = 13$ cm.

Tale assunzione risulta limitante nel caso di studio oggetto della presente tesi, poiché i diametri degli stampi a disposizione risultano differire con il diametro del modello inverso. Pertanto, si è ipotizzata la possibilità di identificare delle costanti di cella che permettessero di ricavare dalla ricostruzione tomografica i dati di conducibilità reali dell'oggetto. Ovviamente tale operazione comporta delle limitazioni concettuali perché l'algoritmo risolutivo e quindi la distribuzione della conducibilità elettrica e la risoluzione dell'immagine ricostruita sono tarate su di un modello aventi le caratteristiche geometriche differenti. Sulla base di quanto detto, si ritiene che il valore medio di conducibilità elettrica $\bar{\sigma}$ [mS/cm] possa essere attendibile e che le mappe di distribuzione possano fornire un'idea qualitativa sull'omogeneità della grandezza indagata.

L'operazione di calibrazione delle costanti di cella è stata realizzata utilizzando come materiale di riferimento una soluzione salina di cloruro di potassio ($KCl = 74,5513$ g/mol) a differente concentrazione molare.

Utilizzando le note leggi della chimica di base si è ricavato il peso di soluto necessario per ottenere un volume di soluzione salina pari a $V = 1$ litro con una concentrazione molare stabilita.

$$m_{soluto} = M_{molare} \cdot [M] \cdot V \quad (4.3)$$

Dove:

- m_{soluto} è la massa in grammi del soluto;
- M_{molare} è la massa molare della specie chimica considerata espressa in g/mol;
- $[M]$ è la concentrazione molare della soluzione;
- V è il volume della soluzione in litri.



Figura 4.14: Preparazione soluzione saline (KCl)

Le soluzioni sono state preparate utilizzando acqua distillata alla quale è stata aggiunta la massa di soluto necessaria per raggiungere la concentrazione desiderata ed il tutto è stato miscelato utilizzando degli agitatori magnetici per 30min. Successivamente è stata lasciata riposare, sigillando la superficie libera per limitare l'evaporazione, per 24h.

Al termine delle operazioni appena descritte è stata misurata direttamente, attraverso l'utilizzo del conduttimetro, la conducibilità elettrica della soluzione (Tabella 4.4).

Soluzione salina	Concentrazione [M]	Massa soluto [g/l]	σ [mS/cm]
KCl	0.1	7.45	13.99
KCl	0.2	14.91	25.20
KCl	0.5	37.28	61.10
KCl	1.0	74.55	117.2

Tabella 4.4: Conducibilità elettrica delle soluzioni saline (KCl)

In contemporanea è stata effettuata la prova di tomografia di resistività elettrica

delle soluzioni saline versate all'interno degli stampi, che verranno utilizzati come casseri di colata per le miscele acqua-cemento-bentonite.



Figura 4.15: Conduttimetro e prova ERT su soluzione salina cella $D = 8$ cm

In Figura 62 è riportata l'esecuzione della prova di tomografia di resistività elettrica sulla cella di diametro pari a $D = 8$ cm. La prova è stata eseguita in regime di corrente alternata con una frequenza di $f = 100$ Hz su tutte le soluzioni preparate ed i risultati sono stati confrontati con le misure dirette di conducibilità elettrica attraverso la seguente relazione:

$$C = \frac{\sigma_{misurata}}{\sigma_{ricostruita}} \quad (4.4)$$

Si riporta a titolo di esempio la sequenza delle ricostruzioni tomografiche delle soluzioni saline a concentrazione molare crescente. In Figura 4.16a è rappresentata la ricostruzione della conducibilità elettrica della soluzione salina $[KCl] = 0.1M$ nella Figura 4.16b. la ricostruzione della conducibilità elettrica della soluzione salina $[KCl] = 0.2M$, nella Figura 4.16c. la ricostruzione della conducibilità elettrica della soluzione salina $[KCl] = 0.5M$ e nella Figura 4.16d. la ricostruzione della conducibilità elettrica della soluzione salina $[KCl] = 1.0M$.

Come ci si aspettava la ricostruzione tomografica fornisce una distribuzione omogenea dei valori di conducibilità ricostruiti. L'interpretazione dei dati è stata fatta

confrontando sul piano cartesiano le conducibilità elettriche misurate con il conduttimetro e le conducibilità elettriche ricostruite, al fine di ricavare la legge di correlazione dalla quale si è derivata la costante di cella C .

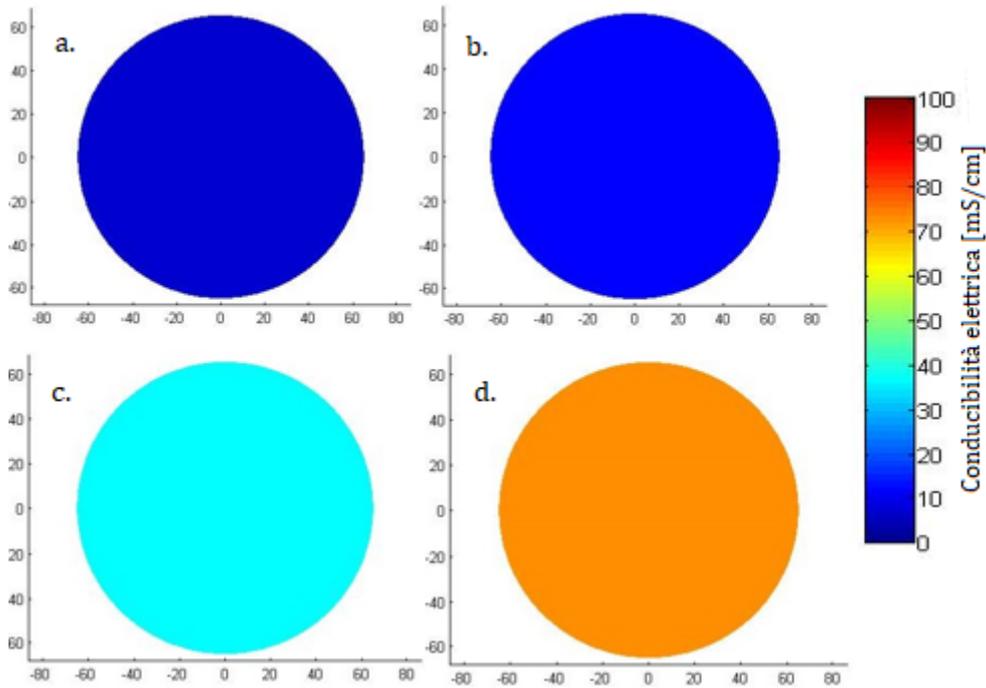


Figura 4.16: Ricostruzione della conducibilità elettrica delle soluzioni saline a differente concentrazione (cella 8 cm)

Concentrazione [M]	$\sigma_{ricostruita}$ [mS/cm]	$\sigma_{misurata}$ [mS/cm]
$[KCl] = 0.1$	7.04	13.99
$[KCl] = 0.2$	12.01	25.20
$[KCl] = 0.5$	29.99	61.10
$[KCl] = 1.0$	58.30	117.20

Tabella 4.5: Confronto $\sigma_{ricostruita} - \sigma_{misurata}$ (cella 8 cm)

I risultati esposti in Tabella 4.5, dove il valore di $\sigma_{ricostruita}$ fa riferimento alla media della distribuzione, sono rappresentati nel Grafico 4.1 e mediante interpolazione lineare, imponendo l'intercetta pari a zero, si è ricavata la legge di correlazione

tra le due grandezze in esame:

$$\sigma_{misurata} = 2.0195 \cdot \sigma_{ricostruita} \quad (4.5)$$

ricavando così una costante di cella $C=2.0195$.

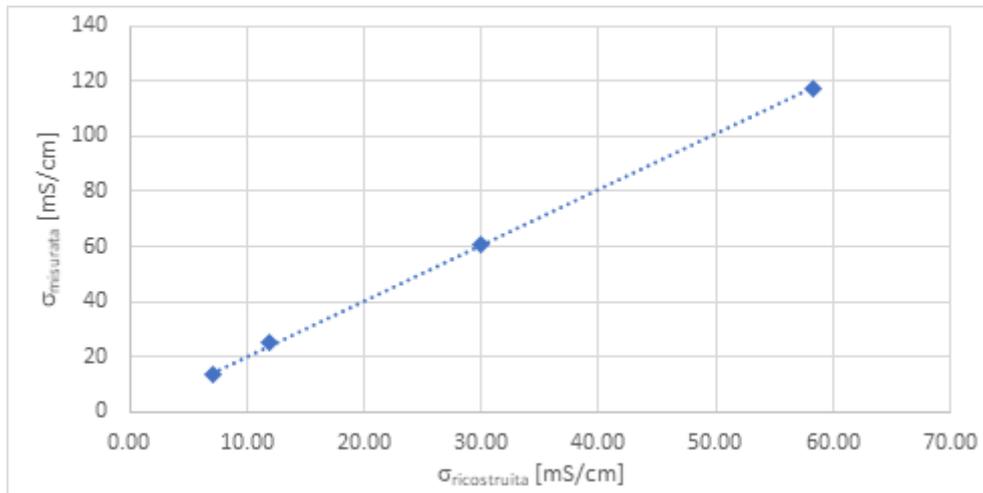


Grafico 4.1: Costante di cella per cassero $D = 8$ cm

Il coefficiente di determinazione¹ R^2 associato all'interpolazione di tipo lineare risulta essere pari a $R^2 = 0.9998$.

La stessa operazione descritta per la cella con diametro pari a $D = 8$ cm è stata eseguita anche per le celle con diametro pari a $D = 11$ cm e $D = 19$ cm.

In Figura 4.17 è rappresentata l'esecuzione della misura di conducibilità elettrica per gli stampi di diametro $D = 11$ cm e $D = 19$ cm. Nei due casi è stata utilizzata, rispettivamente, della pellicola trasparente per assicurare la tenuta del fondo ed un piano in PVC sul quale è stato incollato l'anello.

In Figura 4.18a è rappresentata la ricostruzione della conducibilità elettrica della soluzione salina $[KCl] = 0.1M$ nella Figura 4.18b. la ricostruzione della conducibilità elettrica della soluzione salina $[KCl] = 0.2M$, nella Figura 4.18c. la ricostruzione della conducibilità elettrica della soluzione salina $[KCl] = 0.5M$ e nella Figura 4.18d. la ricostruzione della conducibilità elettrica della soluzione salina $[KCl] = 1.0M$.

¹Rappresenta la variabilità dei dati e la correttezza del modello statistico utilizzato

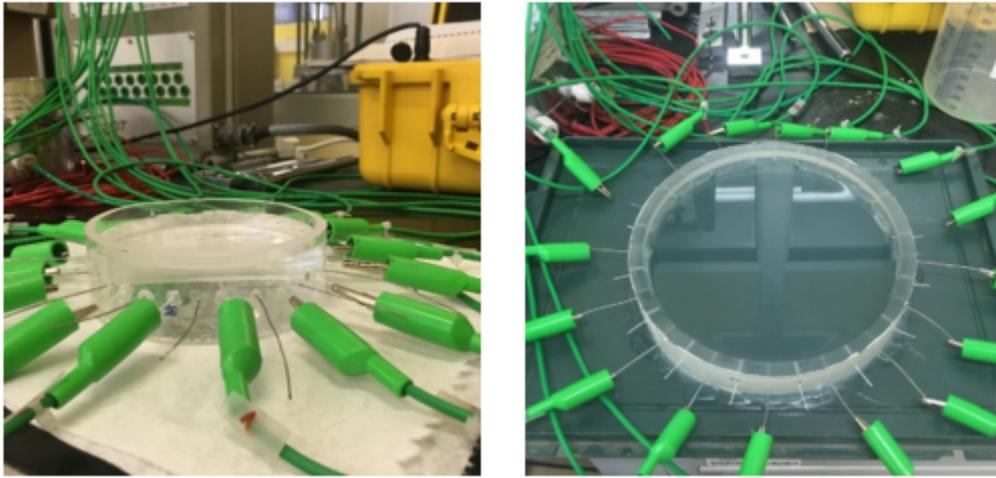


Figura 4.17: Calibrazione costante di cella $D = 11$ cm (a sinistra) e $D = 19$ cm (a destra)

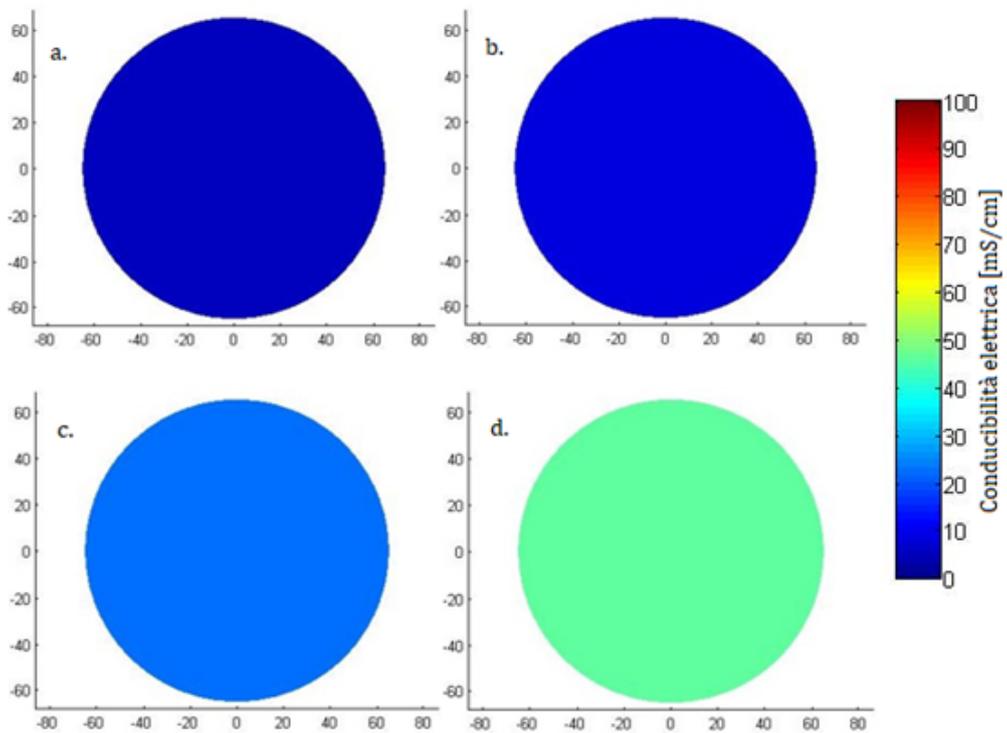


Figura 4.18: Ricostruzione della conducibilità elettrica delle soluzioni saline a differente concentrazione (cella 11 cm)

Concentrazione [M]	$\sigma_{ricostruita}^{elettodi\ piatti}$ [mS/cm]	$\sigma_{ricostruita}^{elettodi\ puntuali}$ [mS/cm]	$\sigma_{misurata}$ [mS/cm]
[KCl] = 0.1	4.97	4.97	13.76
[KCl] = 0.2	9.18	9.18	25.60
[KCl] = 0.5	21.98	22.02	61.10
[KCl] = 1.0	46.27	45.85	120.50

Tabella 4.6: Confronto $\sigma_{ricostruita} - \sigma_{misurata}$ (cella 11 cm)

Ripetendo le stesse operazioni fatte per la cella $D=8\text{cm}$ sono state ricavate le leggi di correlazione per entrambe le tipologie di elettrodi utilizzate nella fase di sperimentazione (Grafico 4.2).

Analogamente l'espressione dalla quale è stata ricavata la costante di cella risulta essere:

$$\sigma_{misurata} = 2.6607 \cdot \sigma_{ricostruita} \quad \text{elettrodi puntuali} \quad (4.6)$$

$$\sigma_{misurata} = 2.6426 \cdot \sigma_{ricostruita} \quad \text{elettrodi piatti} \quad (4.7)$$

I coefficienti di correlazione R^2 , come in precedenza, risultano essere prossimi all'unità, pertanto si ritiene valida tale interpretazione.

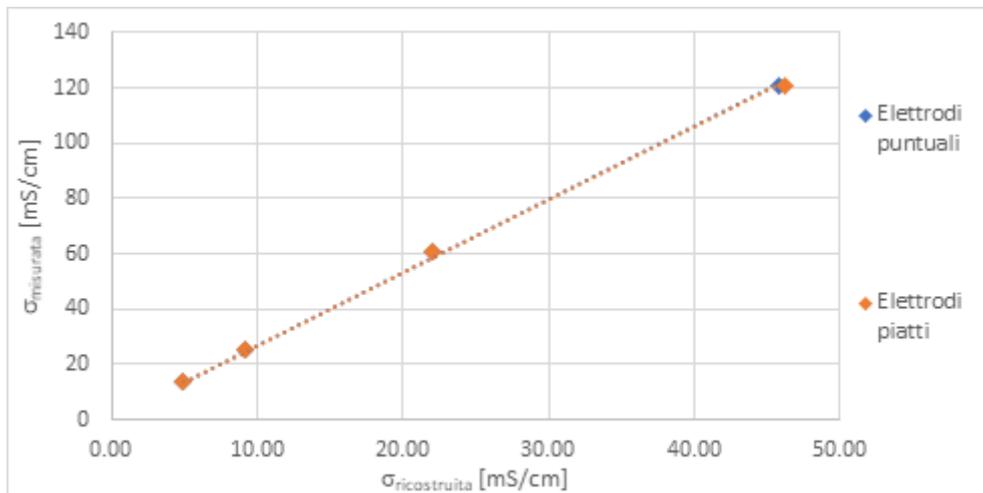


Grafico 4.2: Costante di cella per cassero $D = 11\text{ cm}$

Le prove effettuate sui casseri di diametro $D = 19\text{ cm}$ hanno restituito valori di conducibilità elettrica $\sigma_{ricostruita}$ simili a quelle ricavate per i casseri di diametro

$D = 11$ cm. Anche in questo caso le tomografie realizzate utilizzando gli elettrodi piatti e quelle realizzate utilizzando gli elettrodi puntuali hanno fornito risultati pressoché identici.

Concentrazione [M]	$\sigma_{ricostruita}^{elettrodi\ piatti}$ [mS/cm]	$\sigma_{ricostruita}^{elettrodi\ puntuali}$ [mS/cm]	$\sigma_{misurata}$ [mS/cm]
$[KCl] = 0.1$	5.25	5.27	13.61
$[KCl] = 0.2$	9.84	9.79	25.50
$[KCl] = 0.5$	22.61	22.63	61.60
$[KCl] = 1.0$	45.19	45.01	117.40

Tabella 4.7: Confronto $\sigma_{ricostruita} - \sigma_{misurata}$ (cella 19 cm)

Ripetendo le stesse operazioni fatte per la cella $D = 8$ cm sono state ricavate le leggi di correlazione per entrambe le tipologie di elettrodi utilizzate nella fase di sperimentazione (Grafico 4.3).

Analogamente l'espressione dalla quale è stata ricavata la costante di cella risulta essere:

$$\sigma_{misurata} = 2.6336 \cdot \sigma_{ricostruita} \quad \text{elettrodi puntuali} \quad (4.8)$$

$$\sigma_{misurata} = 2.6256 \cdot \sigma_{ricostruita} \quad \text{elettrodi piatti} \quad (4.9)$$

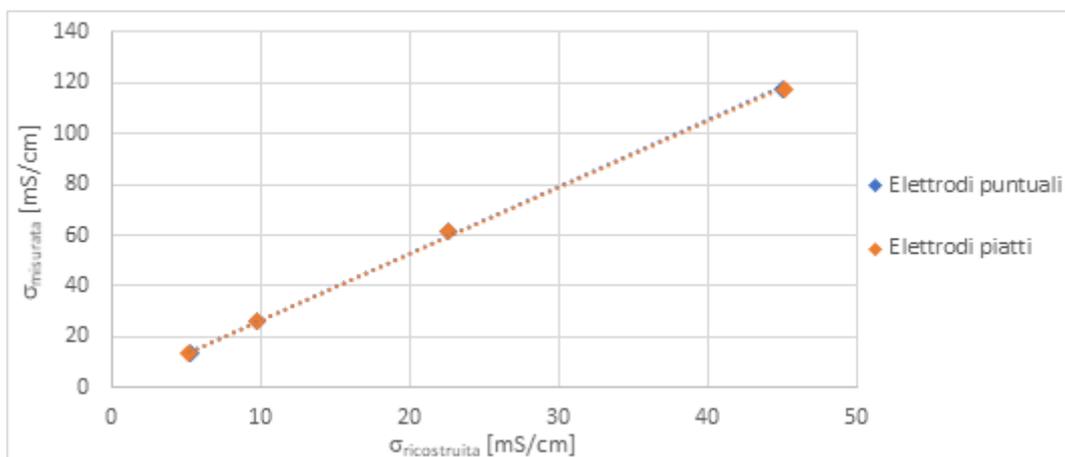


Grafico 4.3: Costante di cella per cassero $D = 19$ cm

I coefficienti di correlazione R^2 , come in precedenza, risultano essere prossimi all'unità, pertanto si ritiene valida tale interpretazione.

Analogamente a quanto descritto finora è stata determinata la costante di calibrazione per lo stampo colonnare $H = 24$ cm che risulta essere pari a:

$$\sigma_{misurata} = 1.3045 \cdot \sigma_{ricostruita} \quad \text{elettrodi puntuali} \quad (4.10)$$

$$\sigma_{misurata} = 1.2198 \cdot \sigma_{ricostruita} \quad \text{elettrodi piatti} \quad (4.11)$$

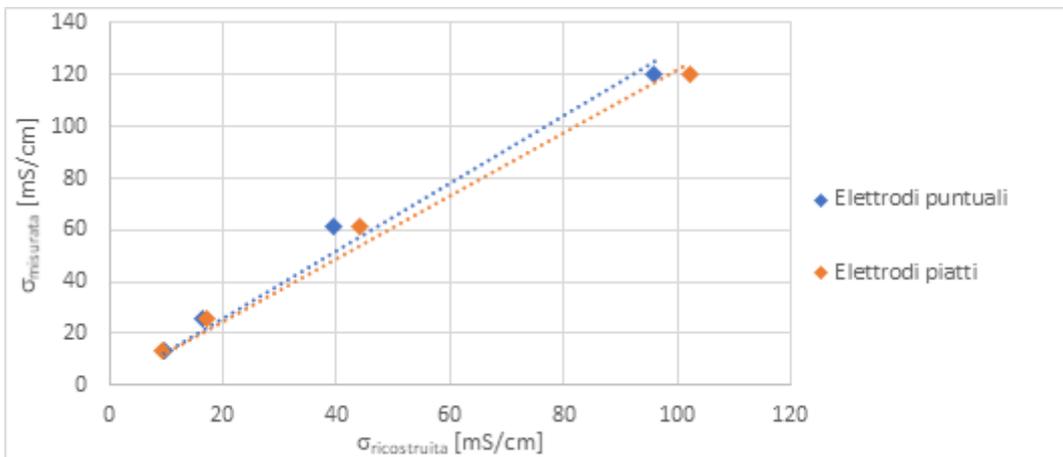


Grafico 4.4: Costante di cella per cilindro $H = 24$ cm



Figura 4.19: Calibrazione costante di cella campioni colonnari

Le operazioni di calibrazione della costante di cella per i cilindri di $H = 24$ cm e di $H = 30$ cm sono state eseguite per tutte le file di elettrodi. I risultati ottenuti hanno evidenziato l'assenza di effetti dovuti alla snellezza dello stampo riportando valori di conducibilità elettrica ricostruita ragionevolmente omogenea.

In Tabella 4.8 è riportato il confronto di tutte le costanti di cella determinate in funzione della geometria dello stampo e della tipologia di elettrodi utilizzati.

Elettrodi	D	H	$\frac{H}{D}$	C
Piatti	8 cm	6 cm	0.75	2.02
Puntuali				2.01
Piatti	11 cm	4 cm	0.36	2.64
Puntuali				2.66
Piatti	11 cm	24 cm	0.21	2.63
Piatti	19 cm	4 cm	0.21 cm	2.63
Puntuali				2.63
Piatti	13 cm	30 cm	2.31	1.00

Tabella 4.8: Effetto del tipo di elettrodi e del rapporto H/D sulla costante di cella

Capitolo 5

Risultati

Il programma di sperimentazione ha previsto la caratterizzazione di una miscela cemento-bentonite, sottoposte a processi di essiccamento ed imbibizione, sia dal punto vista del comportamento elettrico che del comportamento fisico sottoposte a processi di essiccamento ed imbibizione. Il punto di partenza della sperimentazione risiede nell'aver individuato la relazione che lega la conducibilità elettrica della miscela in parola all'invecchiamento. Successivamente per definiti tempi di maturazione sono è stata ricavata una correlazione empirica che lega il contenuto d'acqua gravimetrico alla conducibilità elettrica. Le correlazioni in parola sono state validate attraverso il confronto del contenuto d'acqua gravimetrico misurato e il contenuto d'acqua stimato per campioni cilindrici di diverse dimensioni e differente invecchiamento. Infine, sono stati prodotti due campioni colonnari la cui sperimentazione è stata suddivisa in più fasi, ognuna delle quali ha permesso di indagare l'influenza delle proprietà del fluido interstiziale sulla conducibilità elettrica e le variazioni indotte da processi di essiccamento ed imbibizione mediante tomografia di resistività elettrica.

5.1 Relazione $\sigma - w$

La caratterizzazione della relazione $\sigma - w$ è stata eseguita sulle miscele cemento-bentonite a tre diversi livelli di maturazione: 28gg, 60gg e 90gg.

La condizione di partenza per la sperimentazione realizzata sugli elementi di volume è rappresentata dall'istante di tempo t_0 , corrispondente momento in cui si è prelevato il campione dal bagno di maturazione. A questo istante di tempo si è considerato un grado di saturazione $S_r = 1$. Successivamente si è indotto un processo di essiccamento tramite esposizione dell'elemento di volume all'ambiente di laboratorio ($T = 21^\circ C$ ed umidità relativa approssimativamente del 38%). Si è quindi monitorato il peso del campione e ad ogni step espresso in termini di $\Delta peso$ si è misurata la conducibilità elettrica σ e le variazioni delle dimensioni geometriche. Il $\Delta peso$ è stato individuato in modo tale da avere un set di misure ogni $\Delta S_r \approx 40\%$. Al raggiungimento del peso stabilito il campione è stato sigillato e posto in una campana di vetro per 24h al fine di far omogeneizzare la distribuzione del contenuto d'acqua al suo interno.

I dati raccolti a differenti istanti di tempo sono riassunti in Tabella 5.1, Tabella 5.2 e Tabella 5.3 corrispondenti rispettivamente a 28gg, 60gg e 90gg di invecchiamento. In Figura 5.1 sono state riportate le immagini che fotografano lo stato fisico dell'elemento di volume a differenti istanti di tempo. Si può notare come l'aspetto così come l'integrità del campione sono dipendenti dal contenuto d'acqua, infatti con il progressivo avanzare del processo di essiccamento il campione si ritira manifestando una tendenza all'infragilimento. Si segnala che il passaggio critico, come rappresentato nella successione $t_4 - t_5$, avviene per un contenuto d'acqua di poco inferiore a $w = 100\%$, oltre il quale il materiale tende a sgretolarsi fino a rompersi lungo un piano di debolezza ($w \approx 100\%$).

Nel Grafico 5.1 è rappresentata la relazione che intercorre tra la conducibilità elettrica misurata σ ed il contenuto d'acqua gravimetrico w dell'elemento di volume all'avanzare del processo di essiccamento e a diverso grado di maturazione. Il trend manifestato è pressoché lo stesso per tutte le miscele. La differenza di conducibilità elettrica misurata all'istante iniziale può essere dovuta a molteplici fattori, ad esempio ad una minima variazione delle proporzioni delle componenti delle miscele preparate o alla diversa conducibilità del fluido interstiziale. Tuttavia, è stato possibile estrapolare delle correlazioni empiriche che permettessero di stimare il

contenuto d'acqua di un qualsiasi campione conoscendo la conducibilità elettrica.

Misura [gg]	w [%]	S_r [-]	e [mS/cm]	ϕ [mS/cm]	σ [mS/cm]
t_0	284	1.00	7.86	0.86	5.75
t_1	238	0.88	7.53	0.86	2.02
t_2	181	0.67	7.45	0.86	0.98
t_3	134	0.50	7.40	0.86	0.37
t_4	90	0.36	6.99	0.85	0.10
t_5	71	0.30	6.53	0.84	0.04

Tabella 5.1: Misure di caratterizzazione elettrica lungo percorso di essiccamento per invecchiamento 28gg

Misura [gg]	w [%]	S_r [-]	e [mS/cm]	ϕ [mS/cm]	σ [mS/cm]
t_0	310	1.00	8.31	0.89	4.33
t_1	266	0.93	7.70	0.89	2.45
t_2	215	0.76	7.56	0.88	1.43
t_3	170	0.63	7.22	0.88	0.79
t_4	103	0.39	7.04	0.88	0.16
t_5	53	0.22	6.61	0.87	0.04

Tabella 5.2: Misure di caratterizzazione elettrica lungo percorso di essiccamento per invecchiamento 60gg

Misura [gg]	w [%]	S_r [-]	e [mS/cm]	ϕ [mS/cm]	σ [mS/cm]
t_0	289	1.00	8.27	0.86	4.39
t_1	246	0.88	8.04	0.86	1.88
t_2	214	0.79	7.72	0.85	1.64
t_3	168	0.63	7.66	0.85	0.75
t_4	132	0.50	7.56	0.85	0.31
t_5	84	0.35	6.585	0.84	0.15

Tabella 5.3: Misure di caratterizzazione elettrica lungo percorso di essiccamento per invecchiamento 90gg

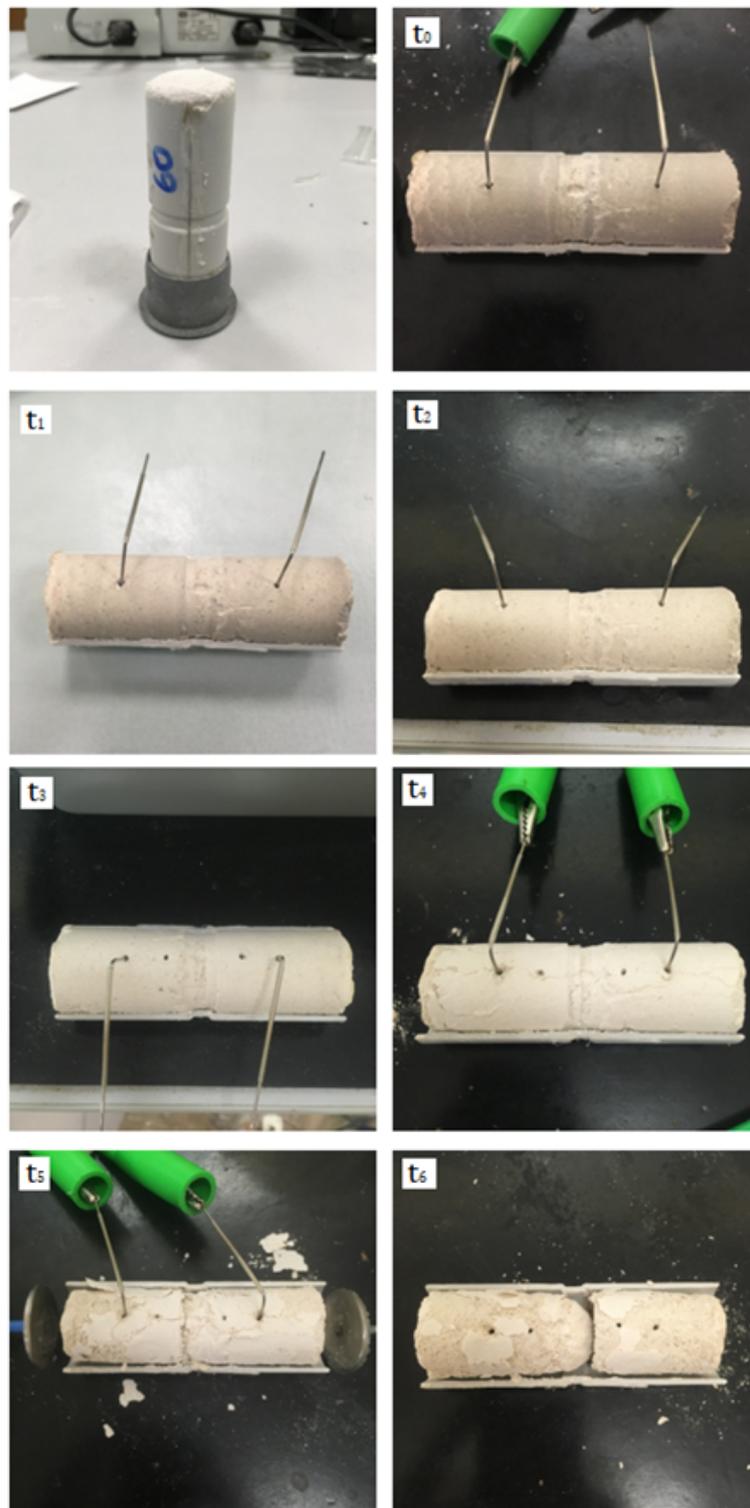


Figura 5.1: Stato fisico dell'elemento di volume per differenti istanti di tempo (maturazione 60gg)

- Correlazione $\sigma - w$ miscela invecchiata 28gg:

$$w = 1.8001 \cdot \sigma^{0.294} \quad R^2 = 0.9937 \quad (5.1)$$

- Correlazione $\sigma - w$ miscela invecchiata 60gg:

$$w = 1.7809 \cdot \sigma^{0.3876} \quad R^2 = 0.9927 \quad (5.2)$$

- Correlazione $\sigma - w$ miscela invecchiata 90gg:

$$w = 1.8253 \cdot \sigma^{0.3585} \quad R^2 = 0.9720 \quad (5.3)$$

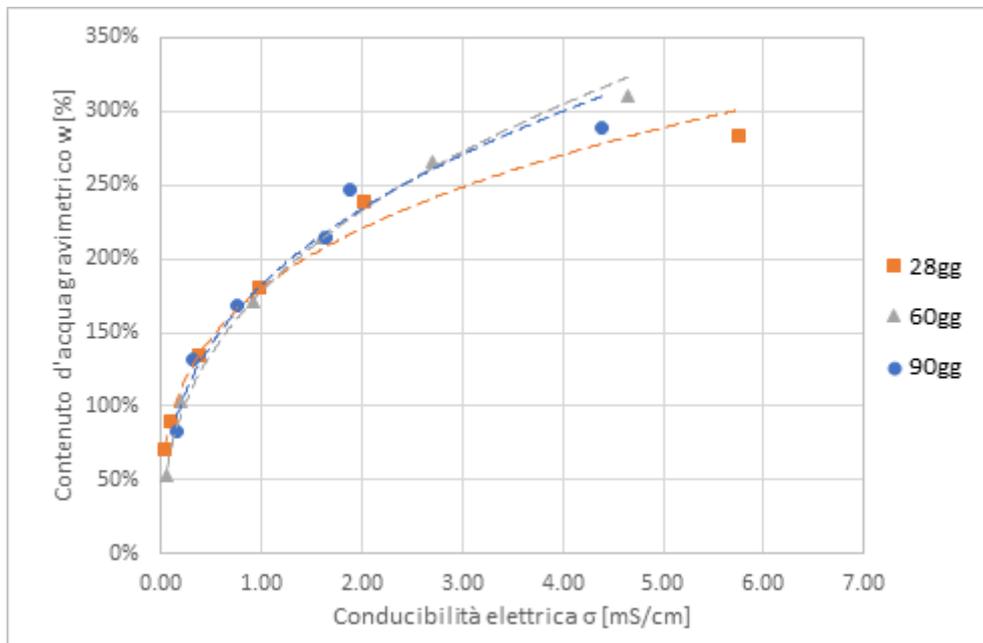


Grafico 5.1: Relazione conducibilità elettrica contenuto d'acqua elemento di volume

L'elemento di volume invecchiato per 28 giorni è stato sottoposto anche ad un processo di imbibizione aggiungendo circa 6g di acqua, prelevata dal bagno di maturazione, per gocciolamento sulla superficie esposta. Successivamente il campione è stato sigillato e posto in una campana di vetro per 24h al fine di raggiungere un punto di equilibrio corrispondente all'omogeneizzazione del contenuto d'acqua gravimetrico su tutto lo sviluppo volumetrico dello stesso. Questo procedimento è stato adottato per verificare che la correlazione empirica conducibilità elettrica-contenuto

d'acqua ottenuta in fase di essiccamento fosse valida anche per un processo inverso. I risultati di tale analisi sono riportati in Tabella 5.4.

Tempo	w [%]	σ [%]
t_0	71 %	0.04 mS/cm
t_1	124 %	0.50 mS/cm
t_2	180 %	1.22 mS/cm
t_3	232 %	3.56 mS/cm

Tabella 5.4: Processo di imbibizione elemento di volume 28gg

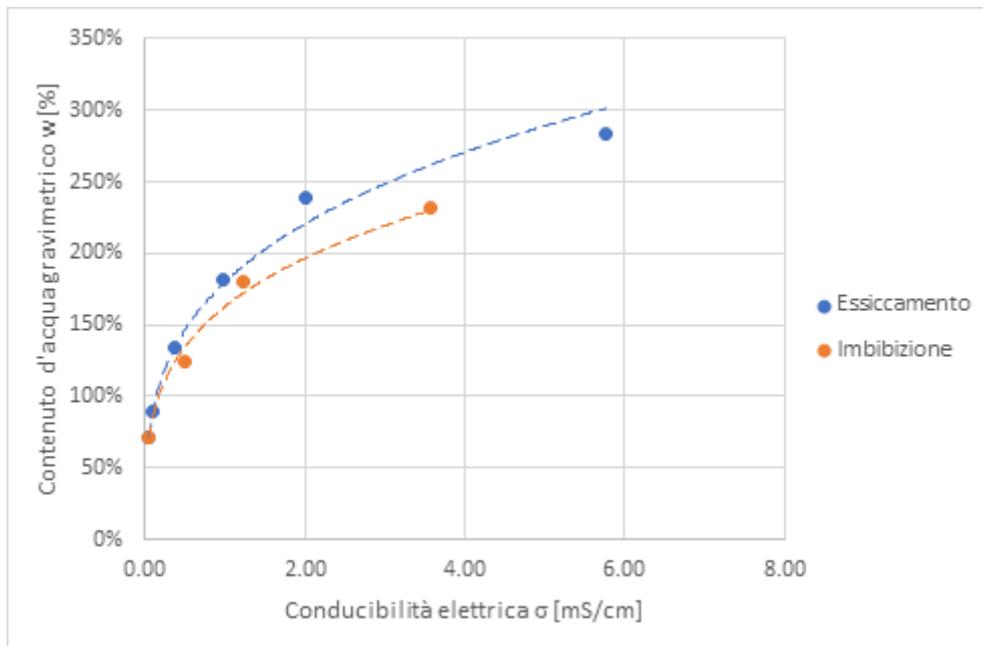


Grafico 5.2: Correlazione $\sigma - w$ essiccamento/imbibizione (28gg)

L'equazione descrittiva del comportamento del campione lungo il percorso di imbibizione è la (50).

$$w = 1.6291 \cdot \sigma^{0.272} \quad R^2 = 0.9874 \quad (5.4)$$

Nel Grafico 5.2 si può osservare come il processo essiccamento-imbibizione generi un'isteresi del materiale che evidenzia come le leggi ricavate empiricamente debbano essere utilizzate rispettivamente in funzione del processo che si sta esaminando.

Se non si facesse ciò, ma si utilizzasse solo una per descrivere univocamente il comportamento del materiale si commetterebbero errori di stima non trascurabili.

5.2 Legge di Archie

La caratterizzazione mediante l'applicazione della legge di Archie è stata eseguita sulle miscele cemento-bentonite a tre diversi livelli di maturazione: 28gg, 60gg e 90gg.

Richiamando la (22) e riportando i risultati ottenuti su un diagramma cartesiano (Grafico 5.3) è possibile osservare che le curve individuate sono congruenti tra di loro.

$$x = \frac{\ln(S_r)}{\ln(\phi)} \quad (5.5)$$

$$y = \frac{\ln\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_w^{0*}}\right) \times \frac{1}{1-\phi}}{\ln(\phi)} \quad (5.6)$$

I risultati ottenuti si prestano discretamente a descrivere la conducibilità elettrica del materiale σ_m in funzione della porosità ϕ , del grado di saturazione S_r e della conducibilità elettrica del fluido interstiziale σ_w . I risultati ottenuti evidenziano come il parametro n , dipendente dal grado di cementazione del materiale, sia crescente in funzione della maturazione della miscela, coerentemente con il progressivo aumentare dei prodotti di idratazione della componente cementizia. Il parametro m mostra invece una variabilità casuale che dipende dall'organizzazione microstrutturale del campione dipendente sia dalle proporzioni delle componenti sia dalle reazioni di idratazione della componente cementizia (Tabella 5.5).

Invecchiamento	n	m
28gg	5.56	4.81
60gg	5.77	3.95
90gg	6.01	4.20

Tabella 5.5: Parametri caratteristici della legge di Archie

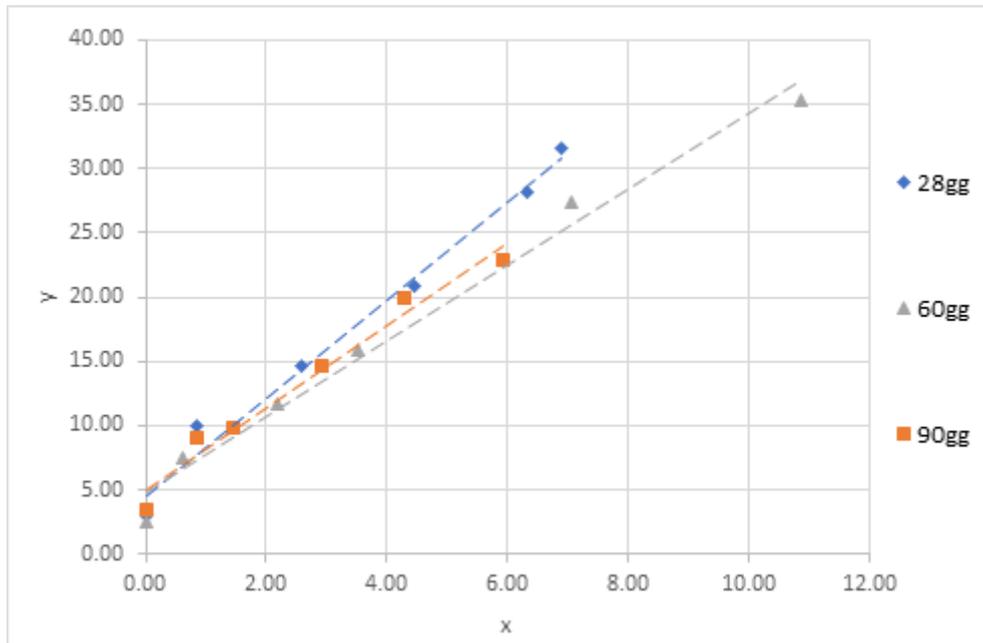


Grafico 5.3: Determinazione dei parametri m ed n della legge di Archie a partire da percorsi di essiccamento

I risultati ottenuti si prestano discretamente a descrivere la conducibilità elettrica del materiale σ_m in funzione della porosità ϕ , del grado di saturazione S_r e della conducibilità elettrica del fluido interstiziale σ_w .

In Tabella 5.6 si riportano i valori delle grandezze descritte per l'elemento di volume invecchiato 28gg, ed in particolare è visibile il confronto tra la $\sigma_m^{misurata}$ e la $\sigma_m^{stimata}$. È possibile notare come la legge di Archie descrive in modo soddisfacente l'evoluzione della conducibilità elettrica del materiale in funzione della variazione della porosità e del grado di saturazione.

Misura [gg]	ϕ [-]	S_r [-]	$\sigma_m^{misurata}$ [mS/cm]	$\sigma_m^{stimata}$ [mS/cm]
t_0	0.865	1.00	5.75	4.54
$t_1 = 1gg$	0.859	0.88	2.02	2.77
$t_2 = 2gg$	0.857	0.67	0.98	1.01
$t_3 = 3gg$	0.857	0.50	0.37	0.33
$t_4 = 4gg$	0.850	0.36	0.10	0.09
$t_5 = 5gg$	0.841	0.30	0.04	0.05

Tabella 5.6: Parametri legge di Archie

In Figura 5.2 è stata riportata una rappresentazione tridimensionale della legge di Archie che permette di apprezzare la variazione di conducibilità elettrica $\sigma_m^{stimata}$ in funzione di grado di saturazione e porosità ed il confronto con la $\sigma_m^{misurata}$.

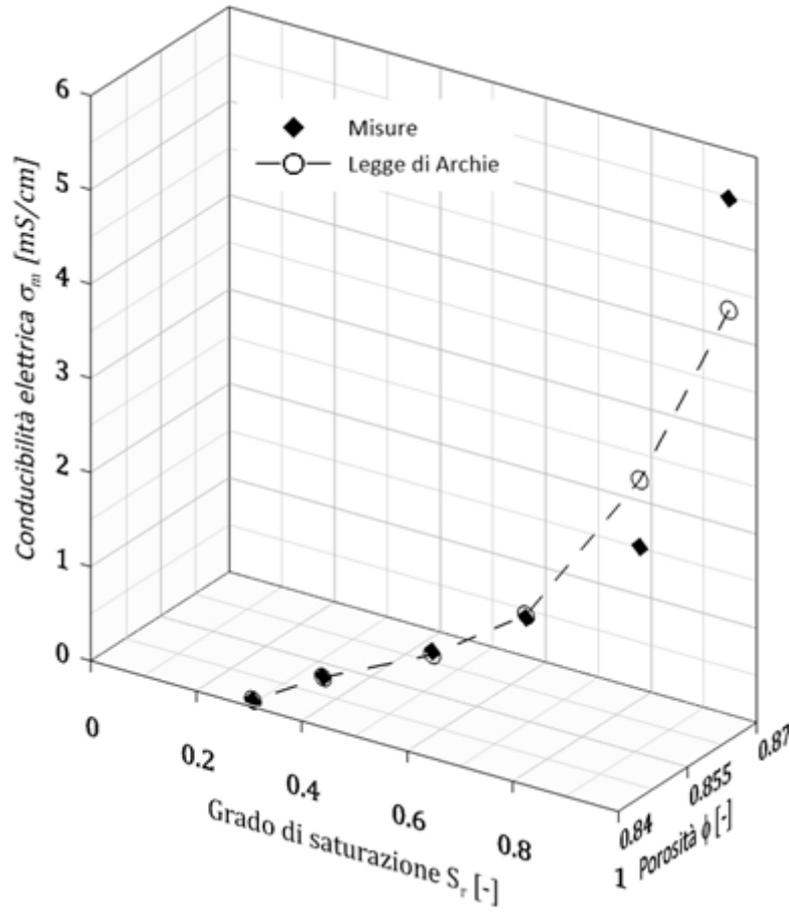


Figura 5.2: Rappresentazione tridimensionale della legge di Archie

5.3 Relazione conducibilità-invecchiamento

La relazione tra la conducibilità elettrica e l'invecchiamento è stata determinata sui campioni cilindrici di diametro pari ad $D = 8$ cm.

Lo studio realizzato sui campioni descritti nel presente paragrafo rappresenta un'operazione preliminare alla sperimentazione vera e propria sui restanti campioni cilindrici al fine fornire elementi di valutazione preliminari sui risultati attesi in termini di conducibilità elettrica del materiale saturo a differenti gradi di maturazione. Inoltre, si è sfruttata tale sperimentazione per determinare il livello di affidabilità delle due tipologie di elettrodi utilizzati e le possibili reazioni che gli stessi potrebbero produrre a contatto con il bagno di maturazione e con la miscela stessa. Infine, di verificare l'influenza del grado di maturazione sulla conducibilità elettrica della miscela.

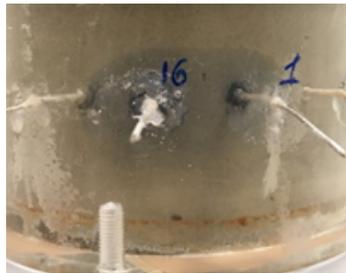


Figura 5.3: Particolare campione $D = 8$ cm

Le prove di tomografia di resistività elettrica hanno restituito risultati soddisfacenti per entrambe le tipologie di elettrodi adottate, tuttavia si ritiene che gli elettrodi con la testa piatta permettano di risalire a ricostruzioni più affidabili perché riescono meglio a rappresentare una condizione di prova bidimensionale nell'intorno del piano medio. Inoltre, si segnala che gli elettrodi a testa piatta hanno generato un numero di errori di molto inferiori rispetto agli elettrodi puntuali.

In Tabella 5.7 è riportata la conducibilità elettrica media $\bar{\sigma}$ ricavata dalla ricostruzione tomografica in funzione del tempo di maturazione raggiunto dai campioni a differenti istanti di tempo. Sulla scorta dei risultati ottenuto si ritiene che la conducibilità elettrica vari nel tempo soprattutto a causa delle reazioni di idratazione che avvengono per via della cementazione, che si sviluppano primariamente nei primi 28 giorni, arco di tempo durante il quale la variazione di conducibilità elettrica è più marcata. Successivamente si apprezza una leggera decrescita della conducibilità

elettrica in modo dilazionato nel tempo, possibilmente dovuta alla diffusione dallo spazio poroso del campione verso il bagno di maturazione.

Invecchiamento [gg]	$\bar{\sigma}_{\text{elettrodi piatti}}$ [mS/cm]	$\bar{\sigma}_{\text{elettrodi puntuali}}$ [mS/cm]
$t_0 = 14gg$	7.84	8.05
$t_1 = 21gg$	6.67	7.01
$t_2 = 28gg$	6.22	6.78
$t_3 = 60gg$	6.12	6.11
$t_4 = 90gg$	6.17	6.69
$t_5 = 120gg$	5.61	5.48
$t_6 = 150gg$	5.40	—

Tabella 5.7: Evoluzione della conducibilità elettrica nel tempo (cella $D = 8$ cm)

Nel Grafico 5.4 sono rappresentati i dati contenuti in Tabella 5.7 e si può apprezzare in modo più intuitivo quanto appena descritto. Inoltre, utilizzando un'interpolazione di tipo “potenza” è possibile ricavare delle correlazioni sperimentali sull'evoluzione della conducibilità elettrica media nel tempo.

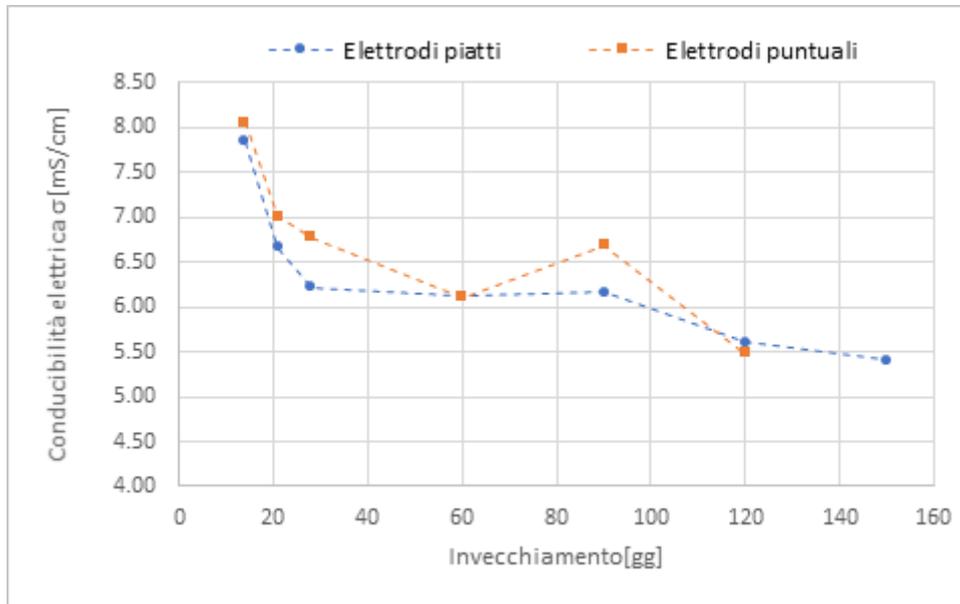


Grafico 5.4: Evoluzione della conducibilità elettrica nel tempo (cella $D = 8$ cm)

Il coefficiente di determinazione R^2 derivante dal tipo di legge di interpolazione applicata restituisce dei valori che attestano una buona validità della legge di correlazione individuata ($R^2 \approx 0.75$).

$$\bar{\sigma} = 10.868 \cdot t^{-0.132} \quad \text{elettrodi puntuali} \quad (5.7)$$

$$\bar{\sigma} = 9.8472 \cdot t^{-0.115} \quad \text{elettrodi piatti} \quad (5.8)$$

Dove:

- $\bar{\sigma}$ rappresenta la conducibilità elettrica media in mS/cm;
- t rappresenta il tempo di maturazione in gg.

In Figura 5.4 è riportata la documentazione fotografica delle prove effettuate a differenti istanti di tempo sui campioni cilindrici $D=8\text{cm}$ e lo stato fisico di un altro campione sottoposto a maturazione in aria. Risulta evidente che le caratteristiche della miscela M1 sono fortemente dipendenti dal contenuto d'acqua della stessa. Infatti, è possibile osservare, al progressivo avanzare del grado di maturazione per il campione esposto all'ambiente di laboratorio, come il materiale subisca rilevanti fenomeni di ritiro e fessurazione. Questo fenomeno intacca la superficie libera superiore del campione con una geometria "a pelle di cocodrillo" che sviluppa il suo reticolo all'avanzare del tempo e quindi alla progressiva perdita dell'acqua di composizione.

A titolo esemplificativo vengono riportate in Figura 5.5 le mappe di conducibilità elettrica ricostruite mediante l'algoritmo di risoluzione del problema inverso per i campioni con $D = 8\text{ cm}$.

I risultati rappresentati sono soddisfacenti da un punto di vista qualitativo dell'indagine poiché localizzano in modo coerente tra loro una zona più conduttiva ed una meno conduttiva. Nonostante questa differenza cromatica apprezzabile in Figura 5.5 il vettore delle osservazioni elaborato presenta una sostanziale omogeneità di valori, pertanto, si ritiene ragionevole considerare affidabile il valore della media. Per completezza di trattazione si riportano in Tabella 5.8, la media, il minimo, il massimo e la varianza del vettore delle soluzioni.

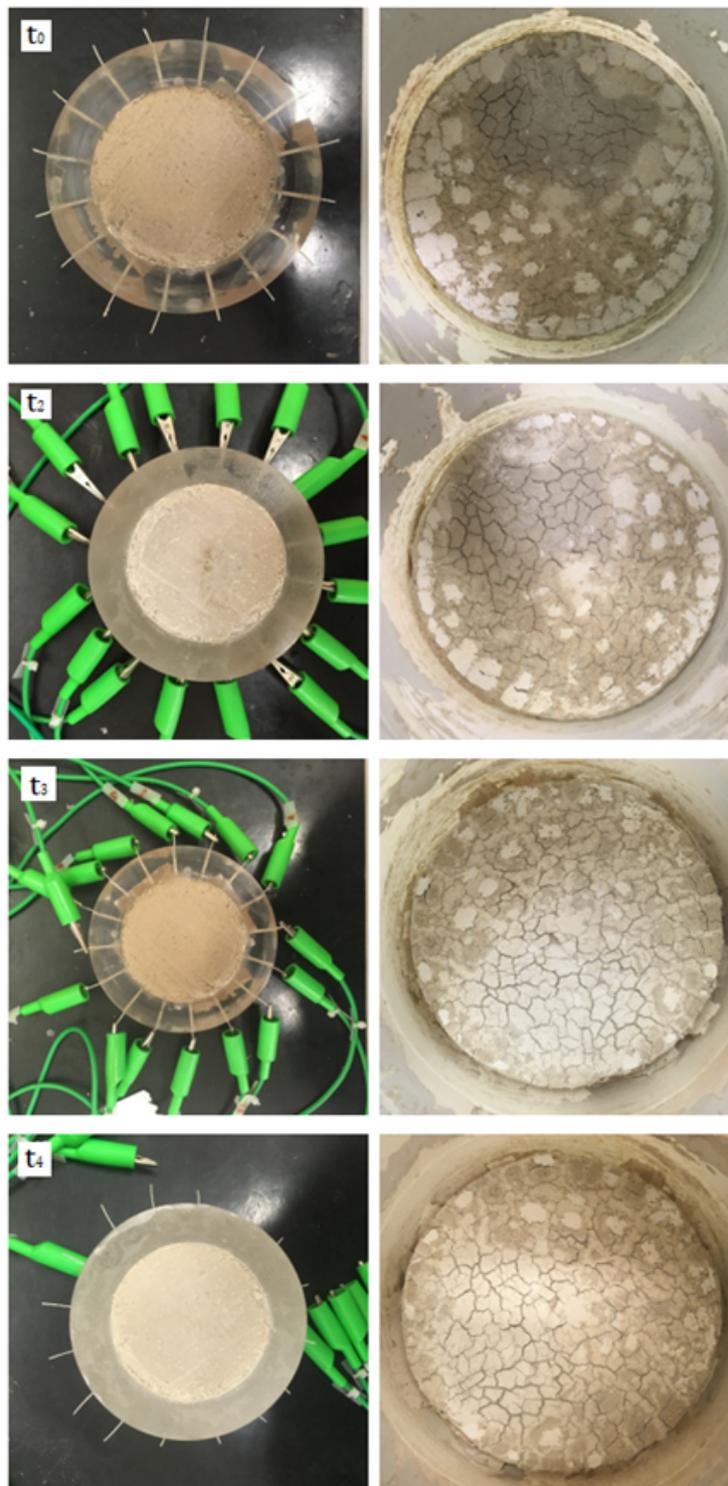


Figura 5.4: Confronto miscela con maturazione in acqua e con maturazione in aria a differenti istanti di tempo

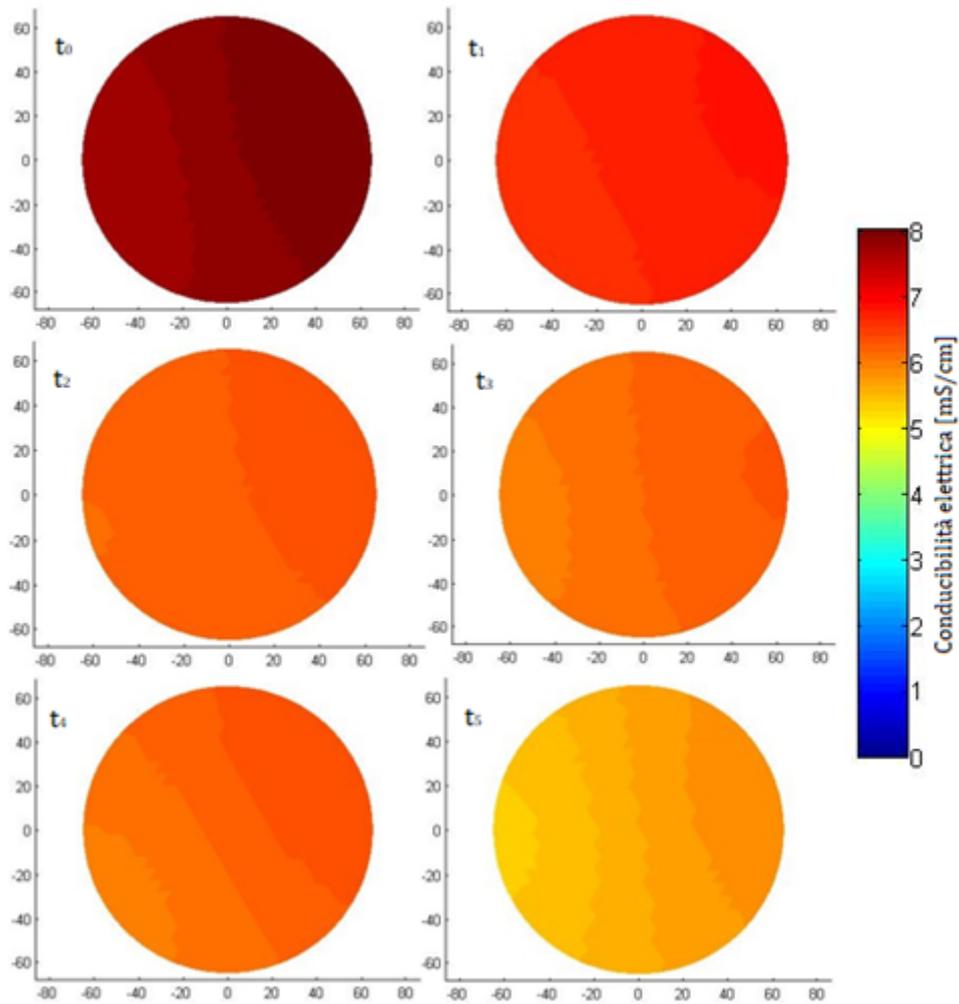


Figura 5.5: Mappe di conducibilità elettrica ricostruita a differenti tempi di maturazione per cella $D = 8$ cm

Misura [gg]	$\bar{\sigma}$ [mS/cm]	$\min(\sigma)$ [mS/cm]	$\max(\sigma)$ [mS/cm]	$\text{var}(\sigma)$ [-]
$t_0 = 14gg$	7.84	7.65	8.03	0.0127
$t_1 = 21gg$	6.67	6.56	6.77	0.0043
$t_2 = 28gg$	6.22	6.12	6.31	0.0033
$t_3 = 60gg$	6.12	5.96	6.26	0.0084
$t_4 = 90gg$	6.17	5.96	6.36	0.0145
$t_5 = 120gg$	5.61	5.35	5.83	0.0205

Tabella 5.8: Parametri statistici del vettore delle soluzioni del problema inverso

Quanto espresso in relazione alla dispersività dei dati emerge ancor più chiaramente dall'istogramma di frequenza estrapolato dal vettore delle osservazioni che evidenzia una distribuzione sufficientemente omogenea dei valori di conducibilità elettrica.

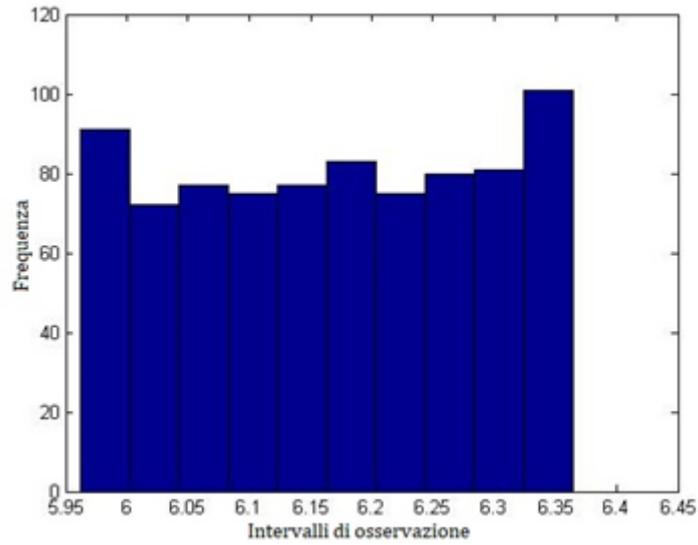


Figura 5.6: Iistogramma di frequenza del vettore delle soluzioni σ (per $t_4 = 90gg$)

5.4 Deformazioni indotte da variazioni di contenuto d'acqua lungo un processo di essiccazione/imbibizione

Nel Grafico 5.5 è riportata la variazione dell'indice dei vuoti e in funzione del contenuto d'acqua dell'elemento di volume a diversi invecchiamenti. Tale rappresentazione evidenzia quanto il materiale oggetto di studio tenda a manifestare un ritiro al progressivo decrescere del contenuto d'acqua.

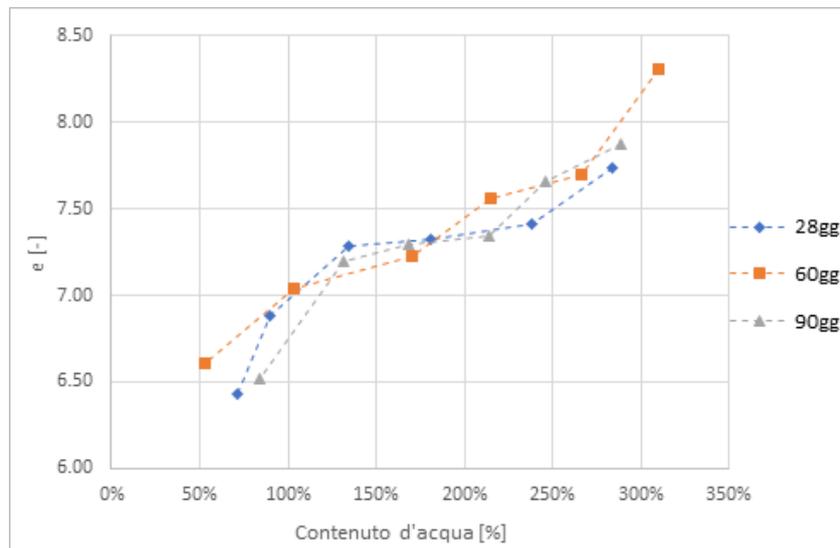


Grafico 5.5: Relazione indice dei vuoti contenuto d'acqua elemento di volume

Di particolare interesse è il comportamento manifestato dall'elemento di volume con invecchiamento a 28gg durante i processi di essiccazione ed imbibizione è osservabile nel Grafico 5.6 in cui è rappresentata la variazione dell'indice dei vuoti e in funzione del contenuto d'acqua. Possiamo suddividere il comportamento del campione durante la fase di essiccazione in tre zone.

- Zona 1: il campione manifesta una rapida variazione dell'indice dei vuoti connesso alla diminuzione di contenuto d'acqua partendo dalla condizione di completa saturazione $S_r = 1$;
- Zona 2: il campione, nell'intervallo di contenuto d'acqua $w = 150 - 250\%$, manifesta un fenomeno di ritiro contenuto;

- Zona 3: il campione, superato un contenuto d'acqua pari a $w = 150\%$ altera la microstruttura dando luogo a fessurazioni che aumentando la superficie esposta del campione provocano un'accelerazione del ritiro.

Durante il percorso di imbibizione, invece, il campione tende a recuperare circa il 10% del volume perso in fase di essiccamento.

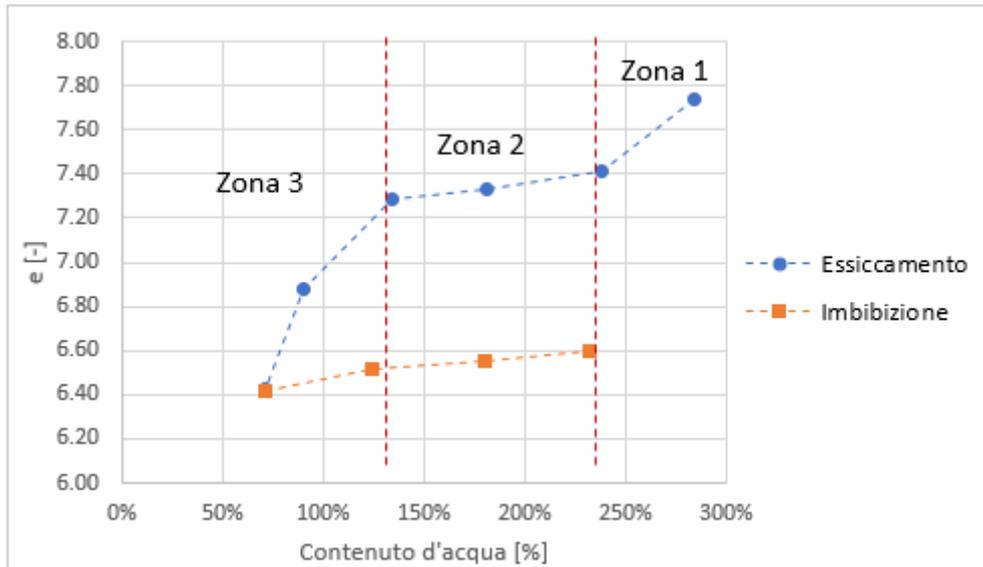


Grafico 5.6: Variazione volume dell'elemento di volume lungo i percorsi di essiccamento-imbibizione (28gg)

Esprimendo la variazione dell'indice dei vuoti rispetto alla condizione iniziale di prova è possibile ottenere la percentuale di deformazione manifestata dal campione lungo i processi analizzati.

La (5.9) esprime la deformazione totale indotta dal processo di essiccamento espressa in relazione alla deformazione volumetrica.

$$\epsilon_v = -\frac{\Delta e}{1 + e_0} = 15\% \quad (5.9)$$

Al termine del processo di imbibizione il campione ha manifestato una tendenza all'espansione che ha permesso il recupero della quota di deformazione elastica (5.10).

$$\epsilon_v = -\frac{\Delta e}{1 + e_0} = 2\% \quad (5.10)$$

5.5 Essiccamento campioni cilindrici

La sperimentazione condotta in questa fase ha previsto di monitorare l'evoluzione della conducibilità elettrica nel tempo al progressivo avanzare del processo di essiccamento indotto mediante esposizione dei campioni cilindrici all'ambiente di laboratorio. I campioni utilizzati per le tomografie di resistività elettrica sono stati lasciati essiccare esposti all'atmosfera di laboratorio ed ogni 24h si acquisiva la misura di conducibilità elettrica. I campioni utilizzati per la caratterizzazione meccanica sono stati lasciati essiccare tramite esposizione alla stessa atmosfera ed ogni 24h si registrava il peso degli stessi e si eseguivano le prove penetrometriche.

La condizione di partenza corrispondente all'istante di tempo t_0 , sia per i provini sottoposti a caratterizzazione elettrica sia quelli sottoposti a caratterizzazione meccanica, è rappresentata dalla condizione di completa saturazione $S_r = 1$.

I primi risultati che vengono riportati sono quelli relativi al processo di essiccamento condotto sul campione cilindrico $D = 11$ cm ed $H = 4$ cm. In Tabella 5.9 sono riportati i risultati ottenuti dalle ricostruzioni tomografiche sia per gli elettrodi piatti che per quelli puntuali. In questo caso, è stato possibile effettuare prove con gli elettrodi puntuali fino all'istante t_4 successivamente i troppi errori in fase di misurazione non hanno consentito di avere dati sufficiente per ottenere una ricostruzione affidabile.

Misura [gg]	$\bar{\sigma}_{\text{elettrodi piatti}}$ [mS/cm]	$\bar{\sigma}_{\text{elettrodi puntuali}}$ [mS/cm]
t_0	5.43	5.81
$t_1 = 1gg$	3.62	—
$t_2 = 2gg$	2.61	3.24
$t_3 = 3gg$	2.15	1.90
$t_4 = 4gg$	1.51	2.33
$t_5 = 5gg$	—	—
$t_6 = 7gg$	0.23	—
$t_7 = 8gg$	0.11	—
$t_8 = 9gg$	0.30	—
$t_9 = 10gg$	0.17	—

Tabella 5.9: Evoluzione nel tempo della conducibilità elettrica provino $D = 11$ cm (28gg)

Gli elettrodi piatti, invece, hanno garantito un buon risultato in termini di affidabilità poiché gli errori riscontrati in fase di misurazione, seppur crescente al procedere del processo di essiccamento, forniscono risultati ragionevoli.

In Figura 5.7 e 5.8 sono rappresentate le mappe di conducibilità ricostruita del campione in esame al procedere del processo di essiccamento. Si può osservare come la diminuzione di conducibilità elettrica sia sostanzialmente graduale fino all'istante t_4 successivamente, dall'istante t_6 in poi, si nota come la conducibilità rimanga pressoché stabile a valori inferiori. Quanto appena descritto è visibile anche nel Grafico 11 osservando la coda destra dei punti rappresentati. Tale comportamento è spiegabile dall'insorgere di fenomeni di fessurazione e fratturazione che hanno interessato il provino a partire dal 5gg e propagatesi negli istanti di tempo successivi. Lo stato fisico del campione quindi, ha abbattuto la sua capacità di condurre corrente elettrica a causa delle fessure createsi dapprima in superficie, fino poi ad interessare l'intero sviluppo in altezza del campione.

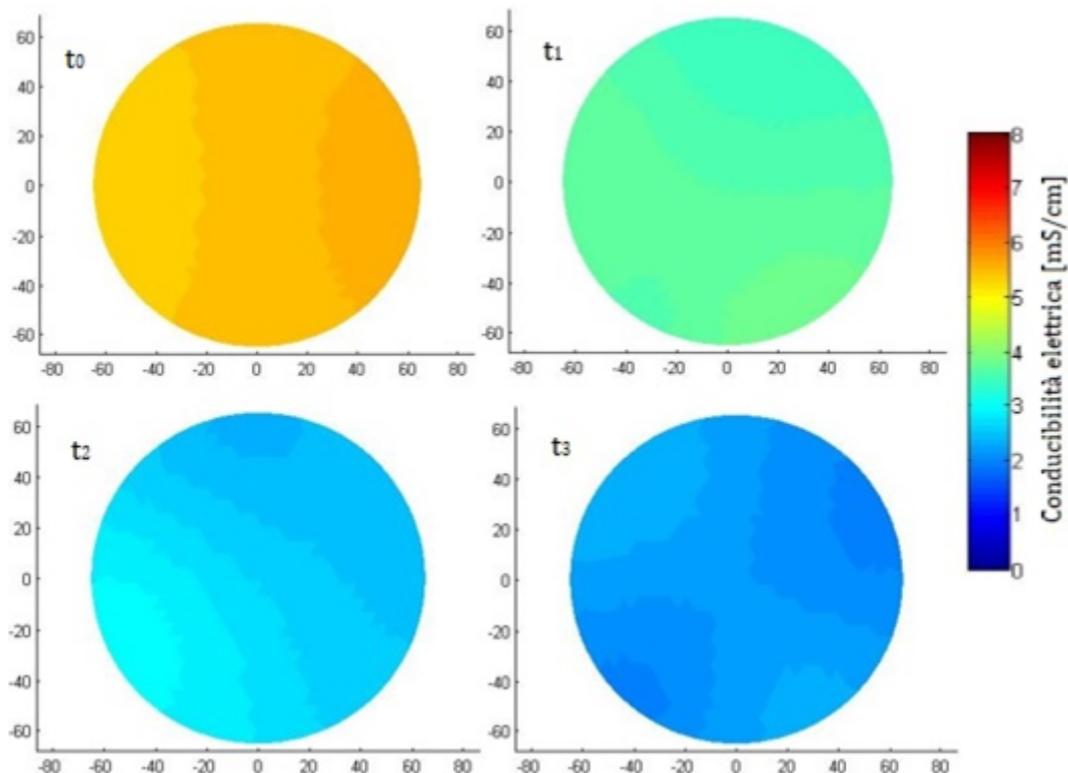


Figura 5.7: Ricostruzione tomografica campione $D = 11$ cm t_0 - t_3 (28gg)

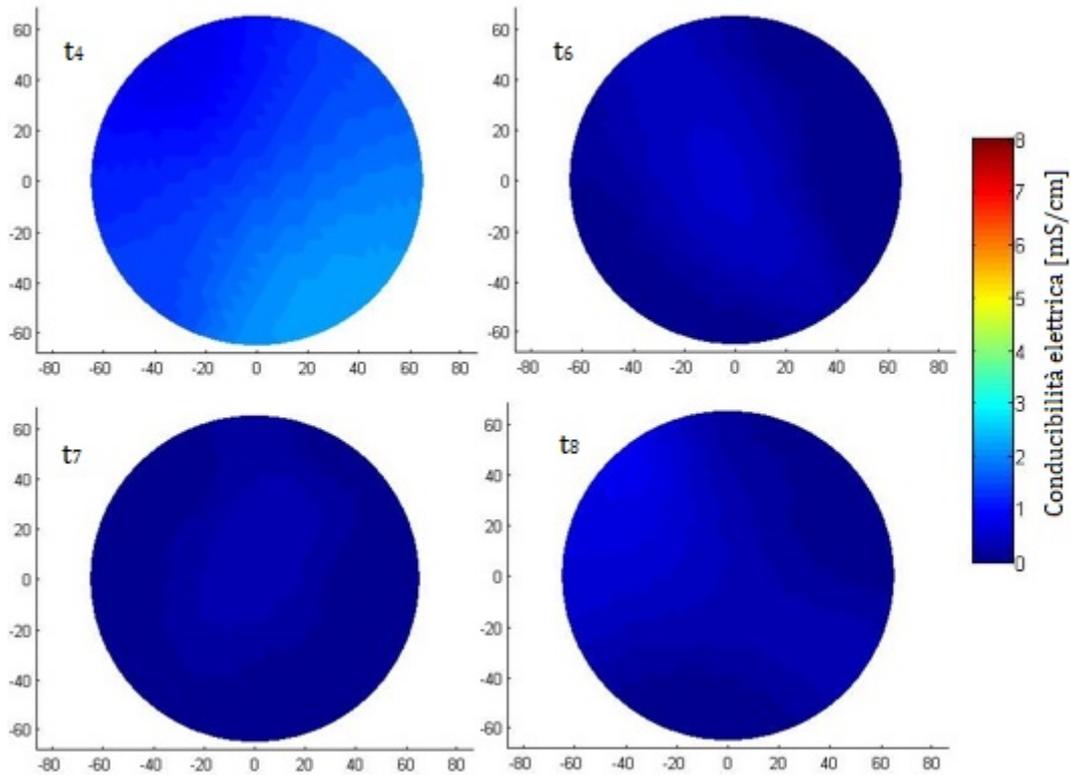


Figura 5.8: Ricostruzione tomografica campione $D = 11$ cm t_4 - t_8 (28gg)

Si ritiene quindi, limitatamente al caso in parola, che la configurazione adottata della tomografia elettrica non consente di identificare, attraverso l'immagine ricostruita, le zone di fessurazione, ma consente di ottenere dei dati, che rappresentano un abbattimento drastico della conducibilità elettrica, che è possibile associare a tale fenomeno. Quanto descritto finora è apprezzabile in Figura 5.10 dove si rappresenta lo stato fisico del campione all'istante iniziale delle prove e all'istante finale.

$$w_{stimato} = 3.00 \cdot \left(\frac{\sigma}{5.43} \right)^{0.294} \quad (5.11)$$

Attraverso l'impiego della (5.1) adimensionalizzata rispetto alle condizioni iniziali del campione in esame (5.11) è stato possibile realizzare delle mappe di contenuto d'acqua gravimetrico (Figura 5.9). Nel Grafico 5.7 sono diagrammati i dati riportati in Tabella 5.9 e sono stati interpolati mediante l'impiego di una legge esponenziale.

$$\bar{\sigma} = 5.5047 \cdot e^{-0.383 \cdot t} \quad (\text{elettrodi piatti}) \quad (5.12)$$

Il coefficiente di determinazione associato a tale legge ($R^2 = 0.9174$) ci consente di attestare l'affidabilità del modello predittivo.

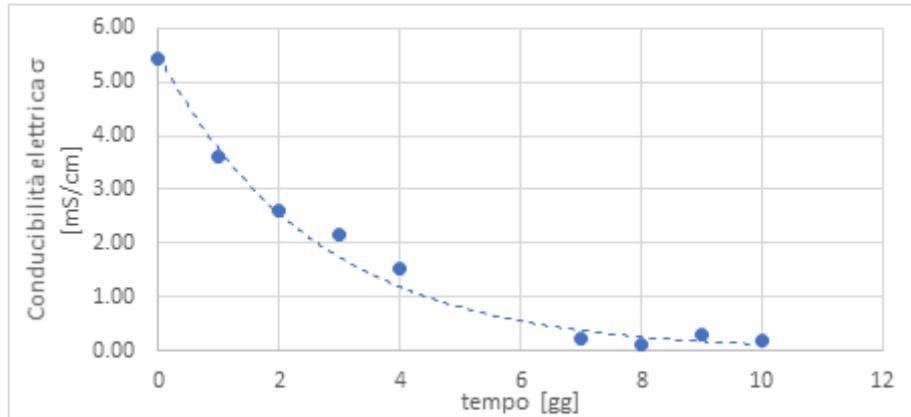


Grafico 5.7: Evoluzione della conducibilità elettrica nel tempo durante il processo di essiccamento $D = 11$ cm (28gg)

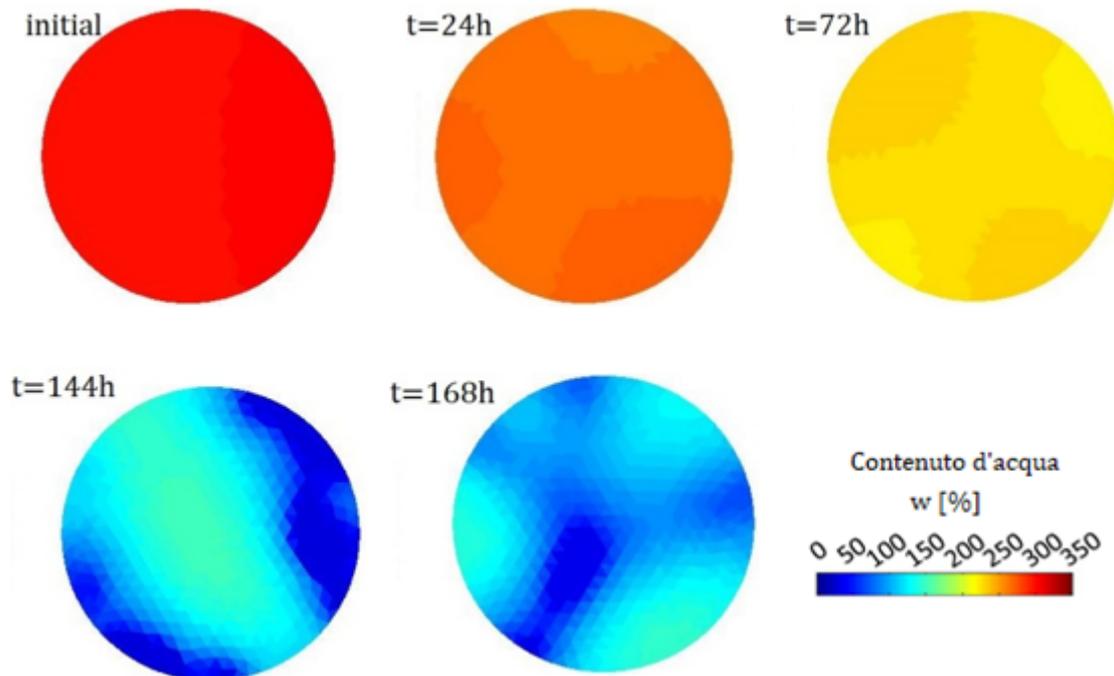


Figura 5.9: Mappe ricostruite del contenuto d'acqua gravimetrico campione $D = 11$ cm (28gg)

Lo stato finale del campione rappresentato in Figura 5.10 presenta una famiglia di fessurazioni dovute presumibilmente al ritiro del campione stesso.

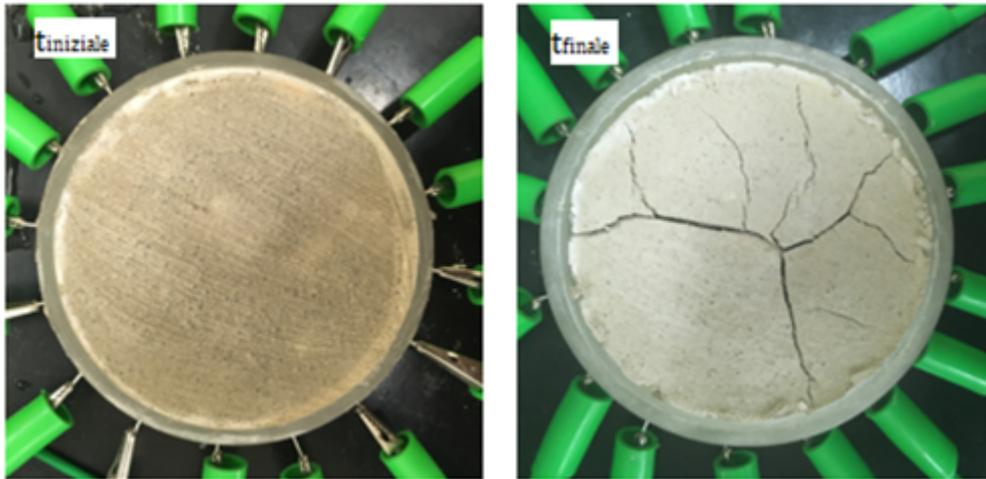


Figura 5.10: Stato fisico iniziale e finale del campione $D = 11$ cm (28gg)

La superficie posta a contatto con il bancone sul quale sono state eseguite le misure è soggetta ad una forza di attrito che opponendosi al movimento generato dal ritiro del campione esercita una sollecitazione di trazione nella porzione di superficie inferiore dello stesso. Nel momento in cui la sollecitazione supera la resistenza a trazione del materiale il campione si fessura ed il processo di essiccamento al quale è sottoposto il provino ne favorisce la propagazione fino in superficie.

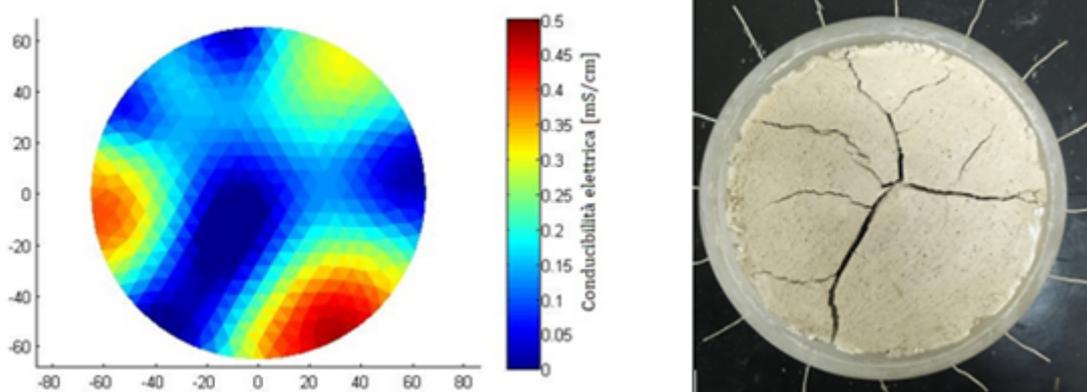


Figura 5.11: Localizzazione zone di fratturazione mediante ricostruzione tomografica campione $D = 11$ cm (28gg)

La tomografia elettrica realizzata all'istante di tempo t_9 ci indica come, seppur non è possibile risalire ad una precisa localizzazione a caratterizzazione, è possibile rilevare la presenza di zone fratturate caratterizzate da valori di conducibilità più bassi costituenti delle anomalie.

Tale risultato è osservabile in Figura 5.11 dove in colore blu sono segnalate le anomalie coincidenti con la posizione delle fratture. Le zone rosse rappresentano aree a più elevata conducibilità, coincidenti con aree integre del campione sottoposto a prova. La sperimentazione condotta sulla stessa tipologia di campioni con invecchiamento a 60gg si basa sulle stesse condizioni di prova fin qui esposte e sulle stesse metodologie sperimentali.

Nel Grafico 5.8 è rappresentata l'evoluzione della conducibilità elettrica σ mS/cm nel tempo, al progredire dell'essiccamento. Questa rappresentazione ci permette di estrapolare un modello predittivo del comportamento del materiale in funzione del tempo in una condizione di esposizione totale all'aria.

Il coefficiente di determinazione associato a tale modello ne attesta la validità.

Misura [gg]	$\bar{\sigma}_{\text{elettrodi piatti}}$ [mS/cm]	$\bar{\sigma}_{\text{elettrodi puntuali}}$ [mS/cm]
t_0	5.80	—
$t_1 = 1gg$	4.17	4.70
$t_2 = 2gg$	3.54	—
$t_3 = 3gg$	2.78	4.18
$t_4 = 4gg$	2.24	—
$t_5 = 6gg$	1.35	1.38
$t_6 = 7gg$	0.83	1.01
$t_7 = 8gg$	0.93	0.36

Tabella 5.10: Evoluzione nel tempo della conducibilità elettrica provino $D = 11$ cm (60gg)

Come è evidente, sempre dal Grafico 5.8, le misure ottenute utilizzando gli elettrodi a testa piatta forniscono un risultato più omogeneo e consentono di ottenere un modello predittivo soddisfacente. Si osserva, che ad istante di tempo $t \rightarrow \text{inf}$, rappresentate il termine del processo di essiccamento la conducibilità elettrica sarà pari a $\sigma \approx 0 \text{ mS/cm}$ ed il modello predittivo utilizzato tiene in considerazione questa condizione.

$$\bar{\sigma} = 5.6549 \cdot e^{-0.243 \cdot t} \quad (\text{elettrodi piatti}) \quad (5.13)$$

$$\bar{\sigma} = 8.9483 \cdot e^{-0.347 \cdot t} \quad (\text{elettrodi puntuali}) \quad (5.14)$$

- $\bar{\sigma}$ rappresenta la conducibilità elettrica media mS/cm;
- t rappresenta il tempo di maturazione gg.

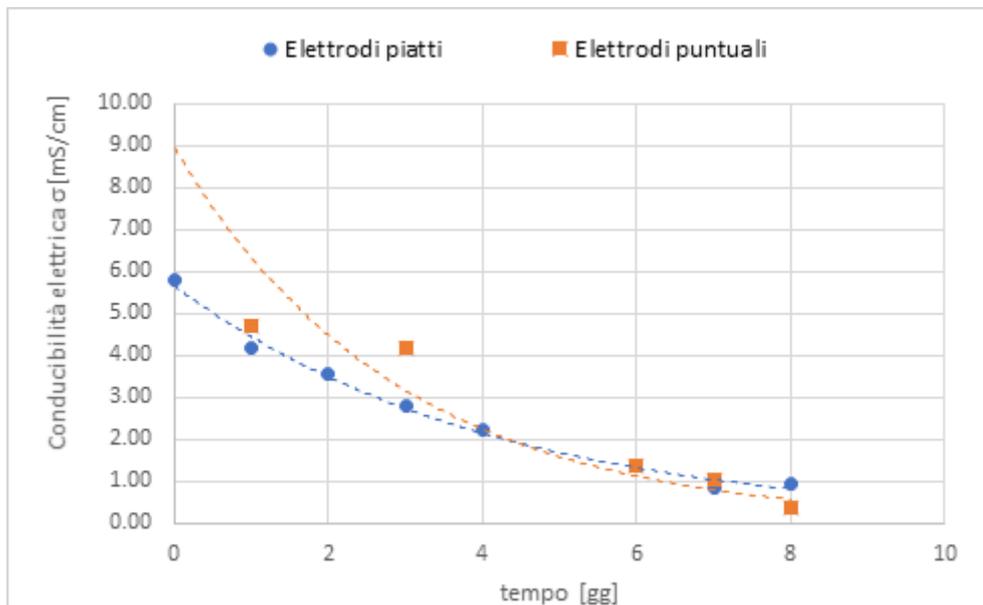


Grafico 5.8: Evoluzione della conducibilità elettrica nel tempo durante il processo di essiccamento $D = 11 \text{ cm}$ (60gg)

In Figura 5.12e Figura 5.13 sono riportate le ricostruzioni tomografiche con elettrodi piatti del provino $D = 11 \text{ cm}$ con invecchiamento a 60gg.

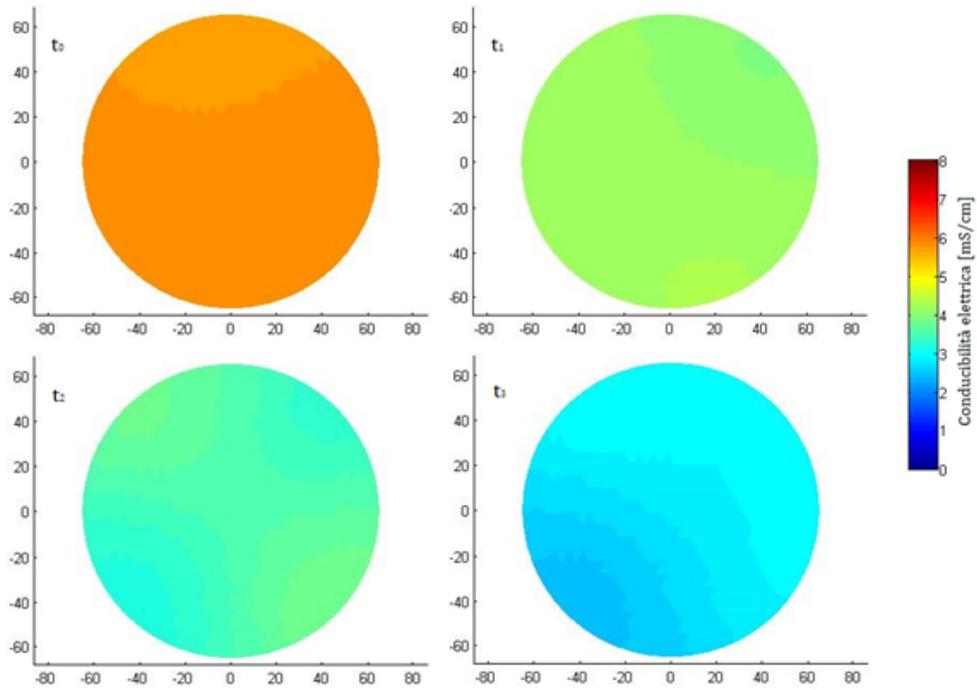


Figura 5.12: Ricostruzione tomografica campione $D = 11$ cm t_0 - t_3 (60gg)

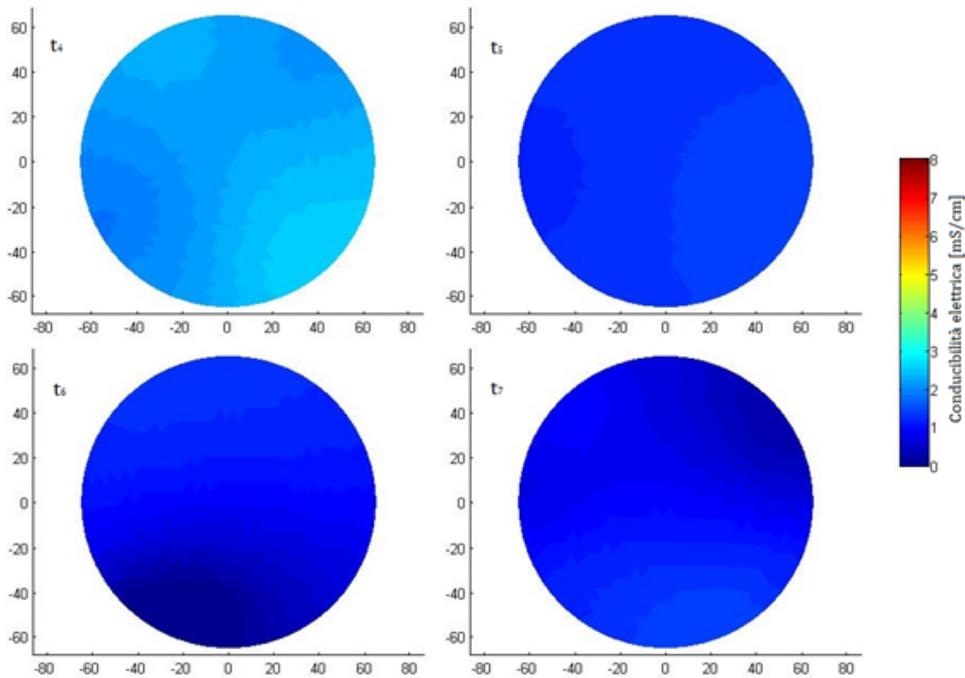


Figura 5.13: Ricostruzione tomografica campione $D = 11$ cm t_4 - t_7 (60gg)

In Figura 5.14 è riportato lo stato fisico del campione all'istante iniziale corrispondente all'inizio e delle prove di tomografia elettrica e lo stato fisico dell'istante finale corrispondente all'ultima misura elettrica eseguita.

È possibile osservare come la conducibilità elettrica risulti più omogenea agli istanti di iniziali. La progressiva disomogeneità delle distribuzioni di conducibilità elettrica può essere dovuta a molteplici fattori. Si può ipotizzare che il processo di evaporazione non sia omogeneo su tutta la superficie del campione, a causa di disomogeneità composizionali, questo però non spiegherebbe la dislocazione della zona più conduttiva in differenti punti. Pertanto, si ritiene che per la configurazione di prova adottata, al procedere dell'essiccamento non si riesce ad ottenere una misurazione affidabile a causa dell'elevato numero di errori registrato in fase di misura

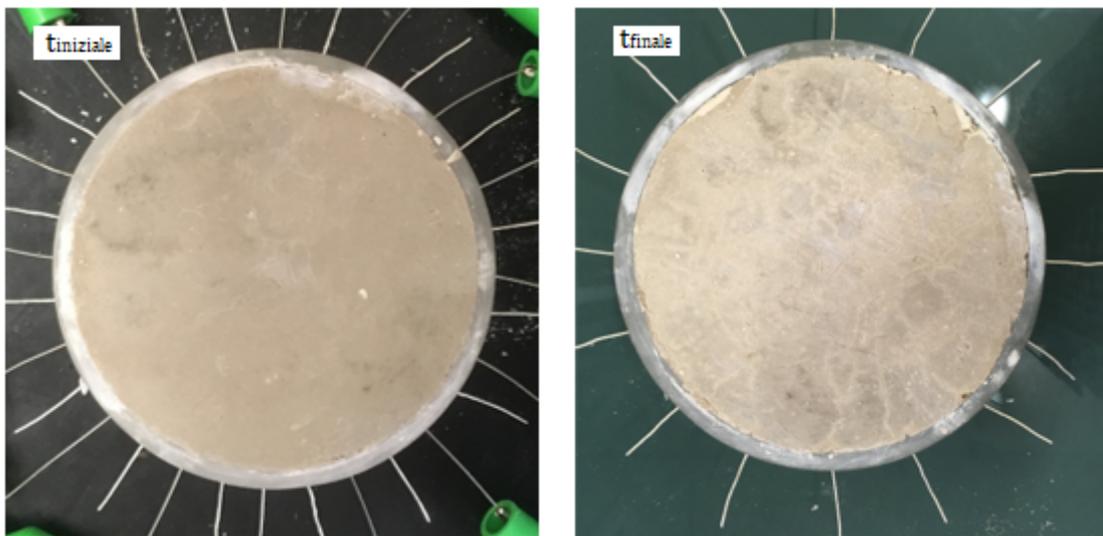


Figura 5.14: Stato fisico iniziale e finale del campione $D = 11$ cm (60gg)

È possibile osservare, coerentemente con quanto già detto, che il campione presenta una colorazione più chiara al progredire dell'essiccamento e si intravedono delle zone che lasciano presupporre una presenza di piani di debolezza lungo i quali, con il progredire dell'essiccamento, sarebbe possibile individuare delle fessure. Attraverso l'impiego della (5.1) adimensionalizzata rispetto alle condizioni iniziali del campione in esame (5.15) è stato possibile realizzare delle mappe di contenuto d'acqua gravimetrico (Figura 5.15).

$$w_{stimato} = 2.92 \cdot \left(\frac{\sigma}{5.80} \right)^{0.388} \quad (5.15)$$

La ricostruzione si basa sulle distribuzioni di conducibilità elettrica ricostruite mediante l'applicazione dell'algoritmo di risoluzione del problema inverso. Pertanto, come è visibile, queste sono condizionate dagli errori riscontrati in fase di misurazione e dalle limitazioni intrinseche del modello numerico. Tuttavia, i risultati ottenuti mostrano una visualizzazione soddisfacente della distribuzione del contenuto d'acqua per valore dello stesso prossimo alla condizione iniziale. La progressiva diminuzione del contenuto d'acqua evidenzia una distribuzione dello stesso all'interno del campione non più omogenea.

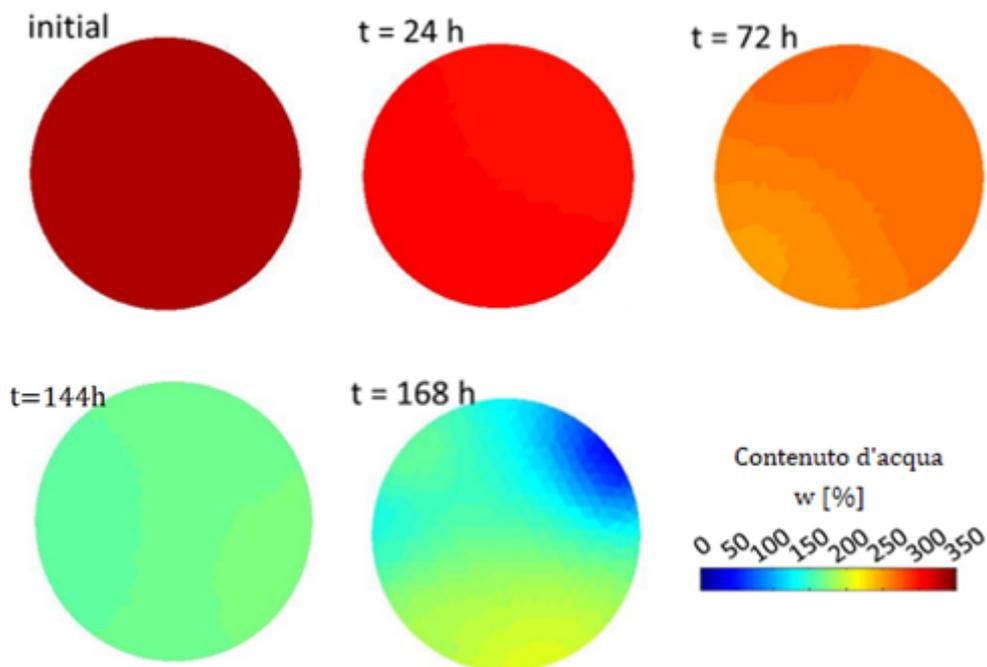


Figura 5.15: Mappe ricostruite del contenuto d'acqua gravimetrico campione $D = 11$ cm (60gg)

L'ultima fase della sperimentazione inerente all'osservazione del processo di essiccamento è relativa ai campioni $D = 19$ cm ed $H = 4$ cm.

I campioni prodotti utilizzando gli stampi di diametro pari a $D = 19$ cm ed altezza pari ad $H=4$ cm ha previsto un unico invecchiamento pari a 28 giorni. Le prove eseguite sui campioni in parola seguono lo stesso protocollo utilizzato per i campioni cilindrici di diametro pari a $D = 11$ cm.

Le tomografie di resistività elettrica realizzate sui campioni in parola hanno restituito i valori di conducibilità elettrica media riassunti in Tabella 5.11. L'andamento

dei dati risulta ragionevole per gli elettrodi piatti dove si può individuare un trend compatibile con i risultati fino ad ora ottenuti. Gli elettrodi puntuali, i quali si è riusciti ad impiegarli fino all'istante di tempo t_4 , mostrano una sostanziale discordanza con i trend individuati finora. La motivazione di tale scostamento risiede nell'elevato numero di errori riscontrati in fase di misura derivanti dalla impossibilità di garantire un contatto adeguato con il materiale a causa della geometria degli elettrodi stessi. Pertanto, come per le altre tipologie di campioni si ritengono i risultati ottenuti con gli elettrodi puntuali poco attendibili.

Tempo [gg]	$\bar{\sigma}_{\text{elettrodi piatti}}$ [mS/cm]	$\bar{\sigma}_{\text{elettrodi puntuali}}$ [mS/cm]
t_0	5.90	5.70
$t_1 = 1gg$	5.14	5.07
$t_2 = 2gg$	3.81	2.02
$t_3 = 3gg$	3.09	2.10
$t_4 = 4gg$	2.63	2.44
$t_5 = 6gg$	2.11	—
$t_6 = 7gg$	1.17	—
$t_7 = 9gg$	0.74	—

Tabella 5.11: Evoluzione nel tempo della conducibilità elettrica provino $D = 19$ cm (28gg)

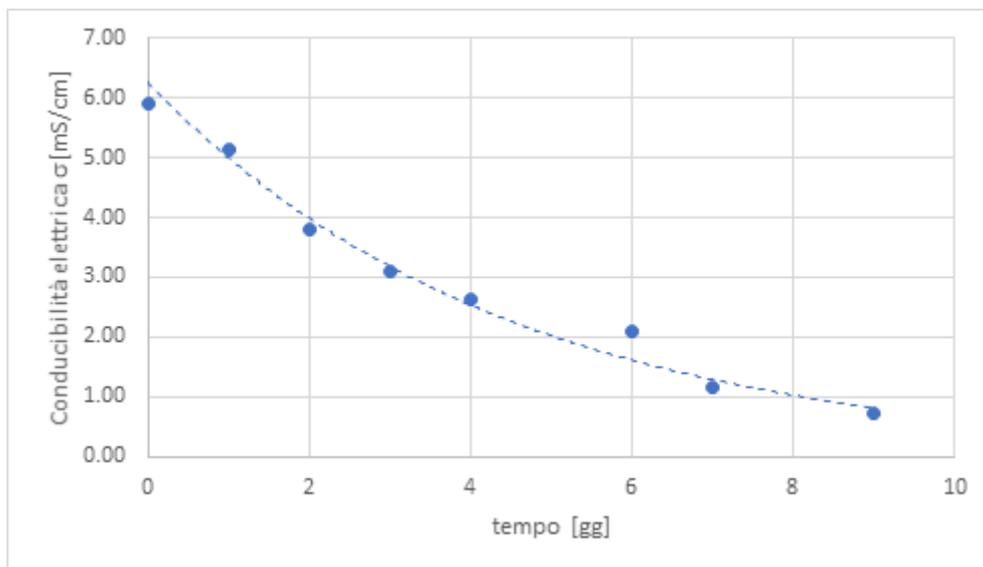


Grafico 5.9: Evoluzione nel tempo della conducibilità elettrica provino $D = 19$ cm (28gg)

Nel Grafico 5.9 sono rappresentati in un diagramma cartesiano i risultati riportati in Tabella 5.11, ed è possibile osservare come il trend individuato risulti compatibile con i risultati finora ottenuti. L'interpolante di tipo esponenziale descrive in modo soddisfacente il trend individuato essendo caratterizzata da un coefficiente di determinazione $R^2 = 0.9719$.

$$\bar{\sigma} = 6.266 \cdot e^{-0.266 \cdot t} \quad (\text{elettrodi piatti}) \quad (5.16)$$

In Figura 5.16 e Figura 5.17 sono riportate le ricostruzioni tomografiche della conducibilità elettrica dei campioni $D = 19$ cm a differenti istanti di tempo. Le immagini ricostruite rappresentano la distribuzione della conducibilità elettrica all'interno del campione (5.16 e 5.17) restituiscono una distribuzione ragionevolmente omogenea fino all'istante di tempo t_5 .

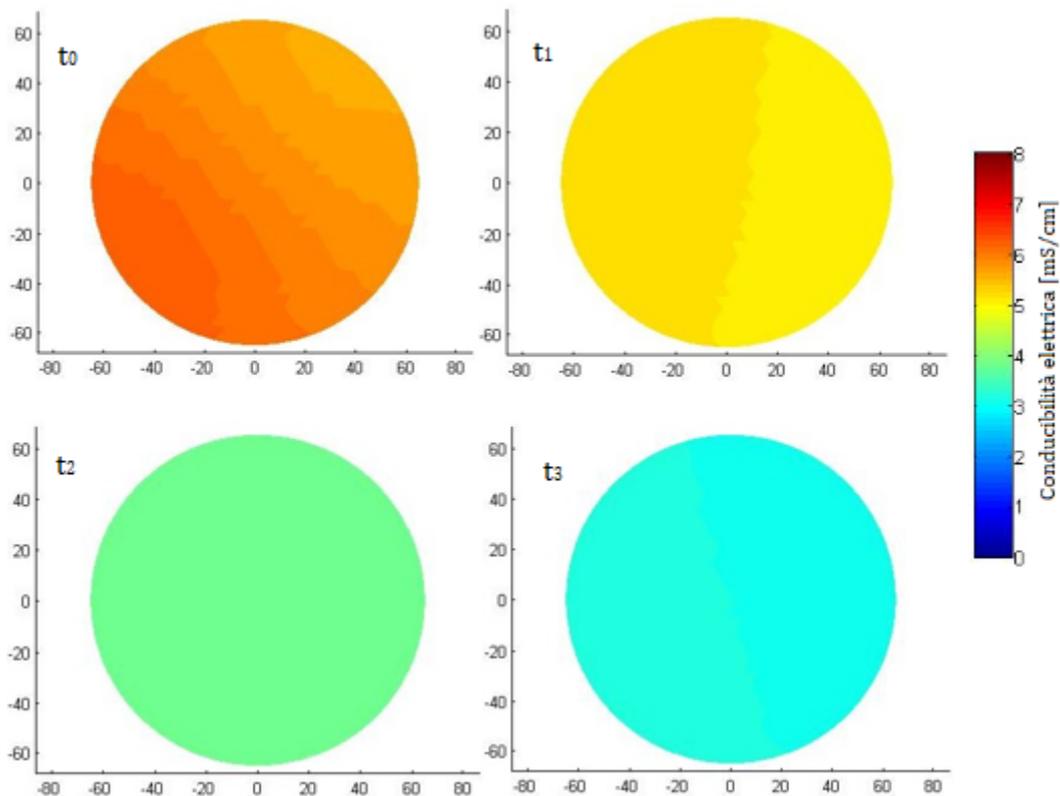


Figura 5.16: Ricostruzione tomografica campione $D = 19$ cm $t_0 - t_3$ (28gg)

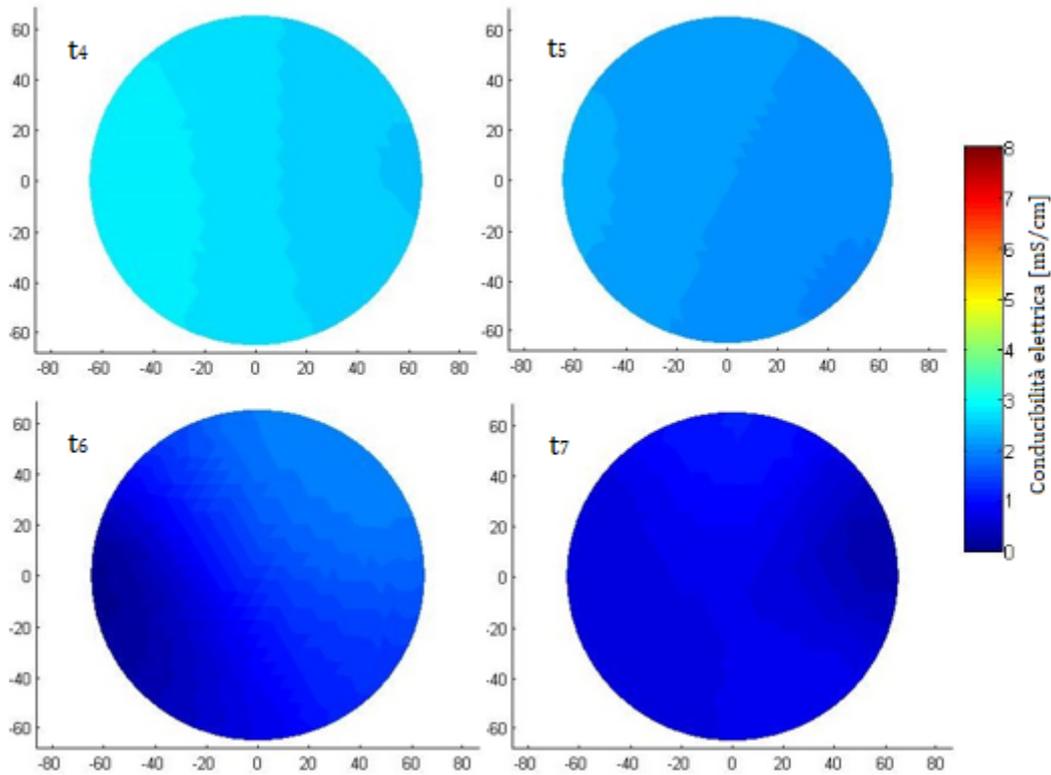


Figura 5.17: Ricostruzione tomografica campione $D = 19$ cm $t_4 - t_7$ (28gg)

Successivamente le ricostruzioni mostrano una marcata differenza cromatica rappresentate diverse conducibilità elettriche che presumibilmente è dovuta dagli errori riscontrati in fase di misura.

Questi influenzano la ricostruzione tomografica poiché rappresentano una lacuna nelle misure utilizzate dall'algoritmo di risoluzione del problema inverso. In Figura 5.18 è rappresentato lo stato fisico del campione in esame all'istante iniziale e all'istante finale delle prove di tomografia elettrica. È possibile osservare come con il progredire del processo di essiccazione il campione ha manifestato la tendenza a fessurarsi. Questo fenomeno, che si è sviluppato sulla superficie esposta all'aria del campione, non è stato rilevato dalle ricostruzioni tomografiche. La possibile spiegazione all'inefficienza del sistema di misura nel rilevare la presenza del fenomeno è dovuta alla sua natura superficiale. Infatti, il piano indagato dalla tomografia elettrica è posto a 2 cm dalla superficie e si ritiene che l'apertura e la profondità delle fessure non sia tale da alterare l'integrità fisica delle zone inferiori.

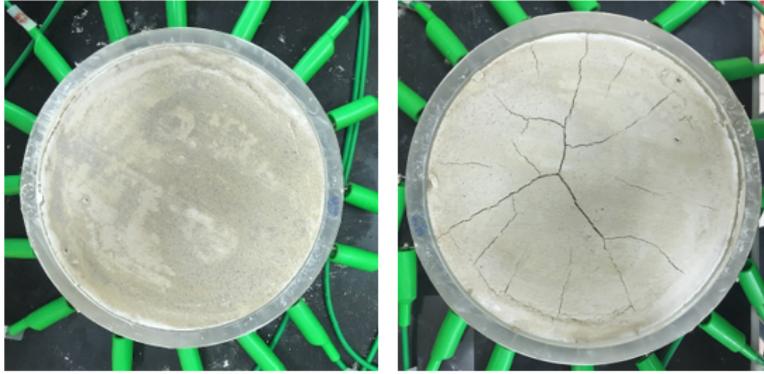


Figura 5.18: Stato fisico iniziale e finale del campione $D = 19$ cm (28gg)

In ultimo, in accordo con la procedura seguita per gli altri campioni, attraverso l'impiego della (5.1) adimensionalizzata rispetto alle condizioni iniziali del campione in esame (5.17) è stato possibile realizzare delle mappe di contenuto d'acqua gravimetrico (Figura 5.19).

$$w_{stimato} = 2.93 \cdot \left(\frac{\sigma}{5.90} \right)^{0.294} \quad (5.17)$$

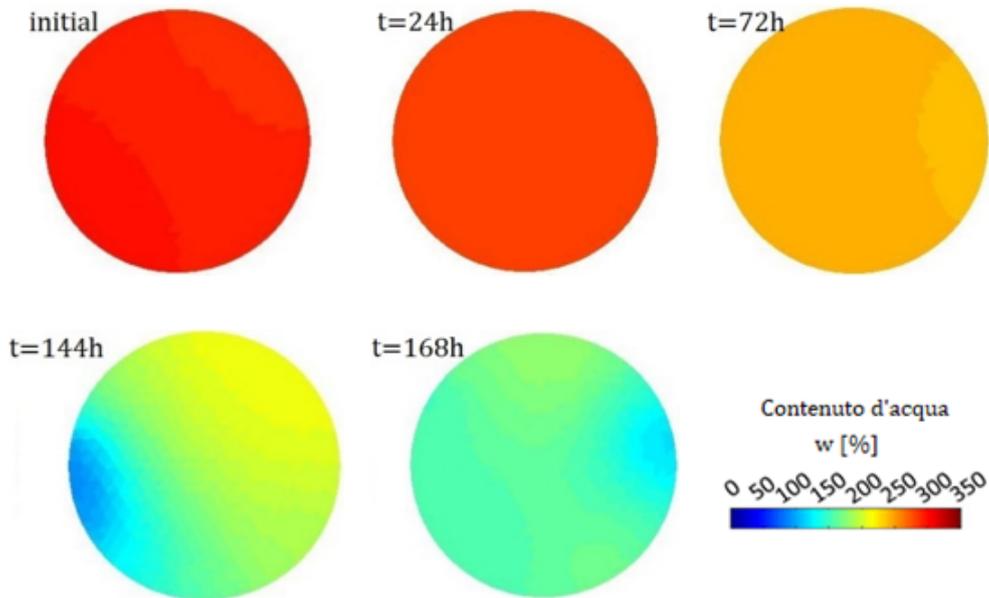


Figura 5.19: Mappe ricostruite del contenuto d'acqua gravimetrico campione $D = 19$ cm (28gg)

5.6 Confronto $w_{stimato}$ — $w_{misurato}$

In ultima analisi si riporta il confronto tra il contenuto d'acqua stimato per i tre differenti campioni attraverso le relazioni (5.11) (5.15) (5.17) ed il contenuto d'acqua misurato.

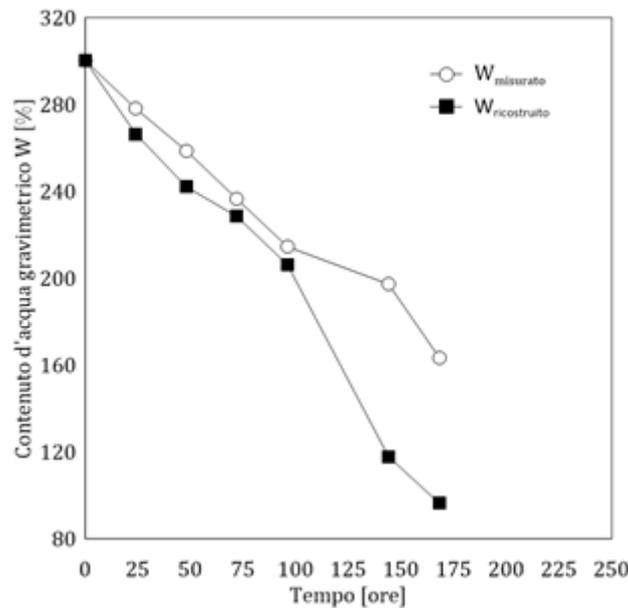


Grafico 5.10: Confronto $w_{stimato}$ — $w_{misurato}$ $D = 11$ cm (28gg)

Il Grafico 5.11 relativo ad un campione che nel corso del processo di essiccamento non ha manifestato fenomeni di fessurazione o fratturazione evidenzia come i valori di contenuto d'acqua stimato attraverso la relazione (5.15) collimano con il trend individuato dai valori di contenuto d'acqua gravimetrico misurato.

Al contrario come evidente nel Grafico 5.10 e nel Grafico 5.12 la presenza di fessure, superficiali ed interne al campione altera la misura di conducibilità elettrica sottostimando o sovrastimando il contenuto d'acqua reale. Nello specifico caso del Grafico 14 si può ipotizzare che le ultime misure siano state falsate dalla presenza di fratture ormai estese all'interno del provino, che si sono state localizzate nella ricostruzione tomografica, ma hanno alterato il valore di conducibilità elettrica media.

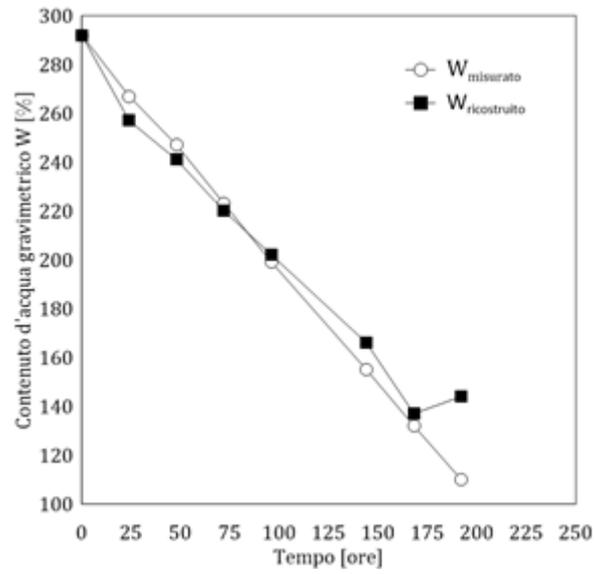


Grafico 5.11: Confronto $w_{stimato} - w_{misurato}$ $D = 11$ cm (60gg)

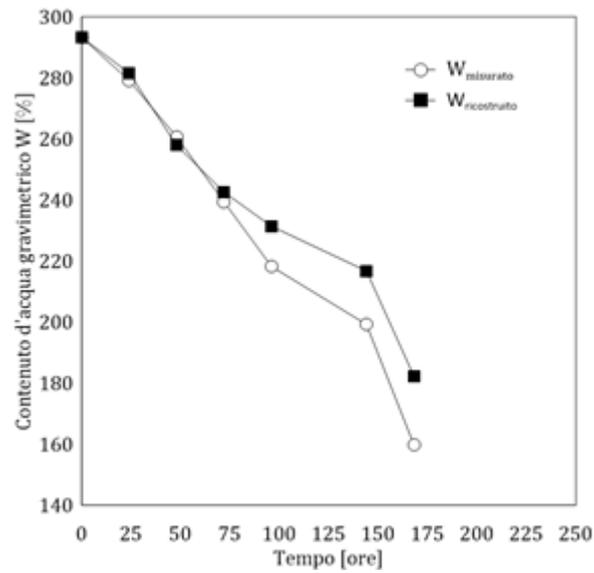


Grafico 5.12: Confronto $w_{stimato} - w_{misurato}$ $D = 19$ cm (28gg)

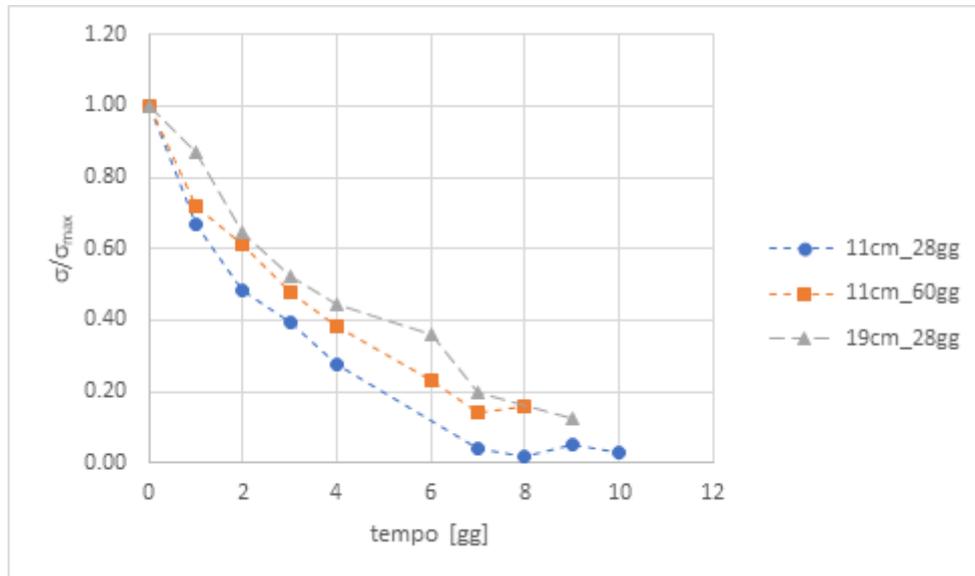


Grafico 5.13: Relazione tra σ/σ_{max} e tempo durante il processo di essiccazione su tutti i provini analizzati

In ultimo è stato riportato su un grafico la relazione che intercorre tra il rapporto σ/σ_{max} relativo ad ogni campione analizzato ed il tempo. Dal Grafico 5.13 emerge come la velocità di decrescita della conducibilità elettrica, seppur con differenze non eccessivamente marcate, dipende sia dalla dimensione dello stampo e quindi dal rapporto H/D sia dall'invecchiamento della miscela. In particolare, all'aumento dell'invecchiamento della miscela e al diminuire del rapporto H/D diminuisce la velocità di decrescita del rapporto.

5.7 Caratterizzazione meccanica speditiva

Nella fase di preparazione e realizzazione dei campioni da esaminare secondo quanto previsto dal programma di sperimentazione sono stati realizzati 3 campioni di diverse dimensioni (2 campioni $D = 11$ cm ed $H = 4$ cm ed 1 campione $D = 19$ cm ed $H = 4$ cm) da sottoporre a caratterizzazione meccanica speditiva durante il processo di essiccazione. La caratterizzazione in parola è avvenuta contestualmente all'esecuzione delle prove di tomografia elettrica sul campione gemello.

La configurazione di prova per la caratterizzazione meccanica (Figura 5.20) ha previsto di eseguire 3 prove lungo il raggio della circonferenza determinata dalla superficie laterale del campione. Questa scelta è stata fatta considerando la geometria assialsimmetrica del provino ed un possibile effetto di confinamento. Delle tre prove eseguite è stata estrapolata la media ed è stata considerata come la resistenza a penetrazione del campione all'istante di tempo t -esimo corrispondente ad un determinato contenuto d'acqua w %.

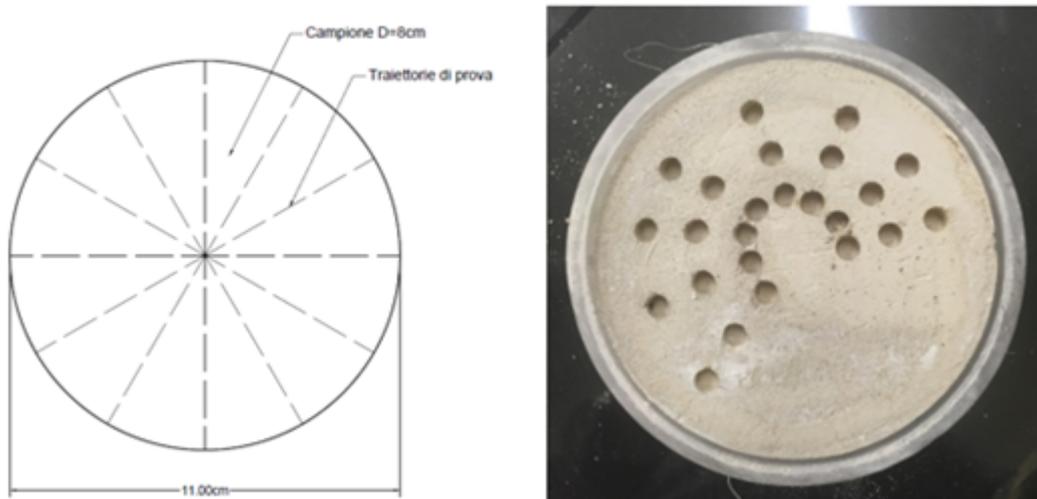


Figura 5.20: Configurazione prove penetrometriche campione $D = 11$ cm (60gg)

In Tabella 5.12 sono riportati i dati registrati durante la caratterizzazione meccanica del campione avente $D = 11$ cm ed invecchiamento 60gg. Il contenuto d'acqua è stato calcolato registrando progressivamente il peso del campione all'avanzare del processo di essiccazione. Una volta ultimato tale processo si è effettuato un passaggio in forno a 105°C per 24h al termine delle quali si è misurato il peso secco.

Misura [gg]	$w_{misurato}$ [%]	$R_{penetrazione}$ [kPa]
t_0	292	104
$t_1 = 1gg$	267	121
$t_2 = 2gg$	247	131
$t_3 = 3gg$	223	137
$t_4 = 4gg$	199	150
$t_5 = 6gg$	155	173
$t_6 = 7gg$	132	173
$t_7 = 8gg$	110	196

Tabella 5.12: Caratterizzazione meccanica speditiva campione $D = 11$ cm (60gg)

Si segnala tuttavia, che superato un determinato contenuto d'acqua di circa $w = 100\%$, il materiale ha mostrato un comportamento estremamente fragile. Infatti, ad ogni tentativo di esecuzione di prova, questa non andava a buon fine perché il campione di sgretolava. Questo trend evidenzia come in funzione di w il materiale manifesti un comportamento sempre più fragile. In ultimo, si è monitorata una fessura che si è generata contestualmente alla prima prova. Questa si è propagata e progressivamente aperta al diminuire del contenuto d'acqua, fino a generare una rottura spontanea del campione (Figura 5.21).

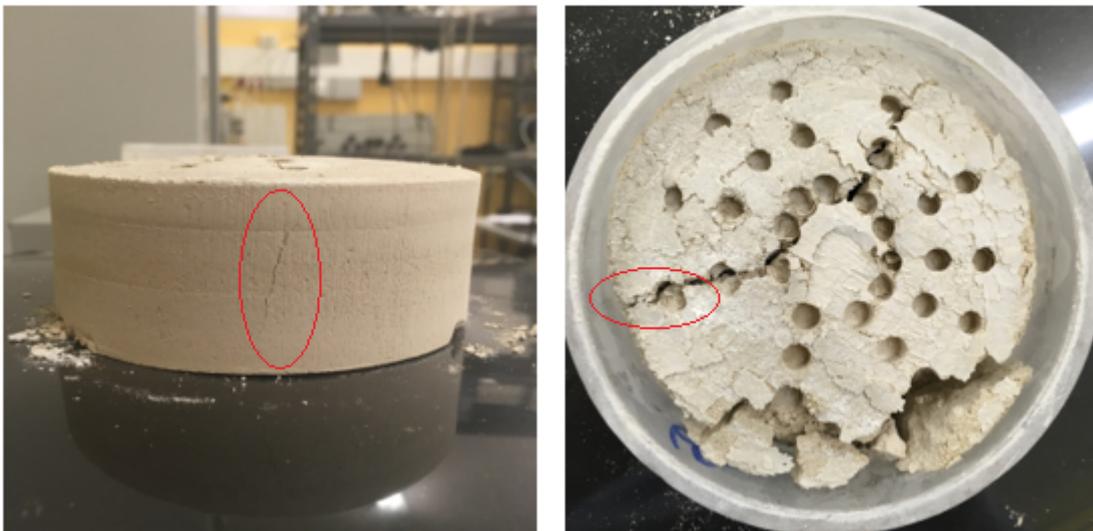


Figura 5.21: Rottura campione $D = 11$ cm (60gg)

In Figura 5.22 viene rappresentata la sequenza di misure penetrometriche effettuate sul campione $D = 11$ cm invecchiato 28gg.

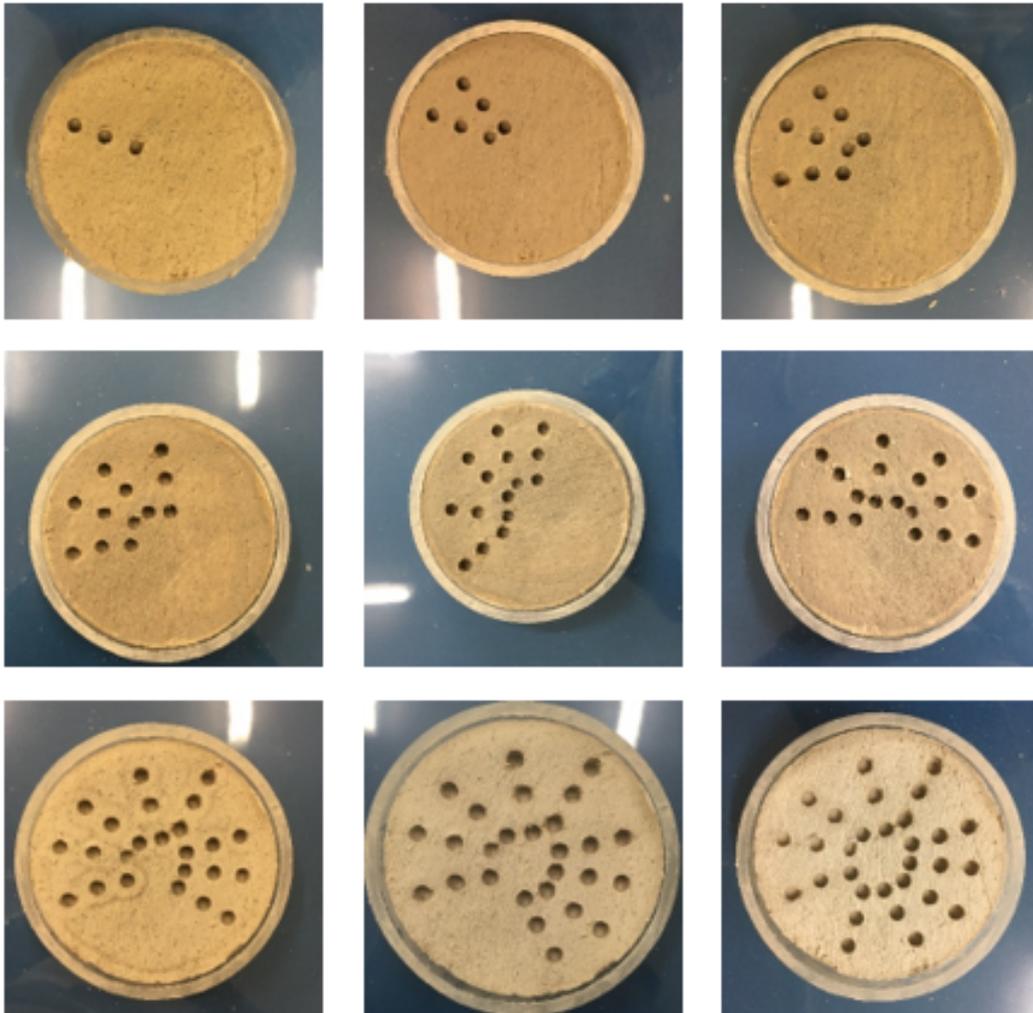


Figura 5.22: Esecuzione prova caratterizzazione meccanica $D = 11$ cm (28gg)

In Tabella 5.13 sono riportati i risultati della caratterizzazione meccanica speditiva effettuata sul campione $D=11$ cm con un invecchiamento a 28gg. I risultati evidenziano un trend positivo per la resistenza alla penetrazione in funzione del diminuire del contenuto d'acqua.

Misura [gg]	$w_{misurato}$ [%]	$R_{penetrazione}$ [kPa]
t_0	300	49
$t_1 = 1gg$	278	91
$t_2 = 2gg$	259	107
$t_3 = 3gg$	236	117
$t_4 = 5gg$	214	127
$t_5 = 5gg$	197	137
$t_6 = 7gg$	163	150
$t_7 = 8gg$	148	156
$t_8 = 9gg$	133	170
$t_9 = 10gg$	118	180

Tabella 5.13: Caratterizzazione meccanica speditiva campione $D = 11$ cm (28gg)

La caratterizzazione meccanica speditiva realizzata sul campione di diametro $D = 19$ cm è stata possibile fino all'istante t_5 dopo il quale il deterioramento fisico del campione non ha permesso di poter effettuare con successo le prove di penetrazione tramite il penetrometro tascabile. Si riportano comunque i risultati ottenuti che, coerentemente con quanto esposto finora, evidenziano un trend positivo della resistenza alla penetrazione al diminuire del contenuto d'acqua. In Tabella 5.14 e nel Grafico 5.14 sono riportati e rappresentati i risultati della caratterizzazione meccanica speditiva realizzata sul campione cilindrico $D=19$ cm con invecchiamento a 28gg.

Misura [gg]	$w_{misurato}$ [%]	$R_{penetrazione}$ [kPa]
t_0	293	58.86
$t_1 = 1gg$	279	74.48
$t_2 = 2gg$	261	88.29
$t_3 = 3gg$	239	98.10
$t_4 = 4gg$	218	117.72
$t_5 = 6gg$	199	117.72

Tabella 5.14: Caratterizzazione meccanica speditiva campione $D = 19$ cm (28gg)



Figura 5.23: Stato fisico del campione sottoposto a caratterizzazione meccanica speditiva
 $w \approx 110\%$ $D = 19$ cm (28gg)

Coerentemente con i risultati finora ottenuto ed esposti, la resistenza meccanica delle miscele cemento-bentonite è funzione del contenuto d'acqua. In particolare, la resistenza alla penetrazione aumenta considerevolmente al diminuire del contenuto d'acqua.

$$R_{p,28gg} = -62.05 \cdot w + 247.23 \quad (5.18)$$

$$R_{p,28gg} = -61.78 \cdot w + 256.03 \quad (5.19)$$

$$R_{p,60gg} = -46.60 \cdot w + 242.92 \quad (5.20)$$

Nel Grafico 5.13 è riportata la resistenza media a penetrazione manifestata dai campioni esaminati in funzione del livello di invecchiamento e del diametro. È osservabile come coerentemente con quanto ci si aspetta la resistenza meccanica aumenta al progredire dell'invecchiamento, grazie, verosimilmente, ad un incremento della cementazione. Tuttavia, superato un determinato contenuto d'acqua (circa il 70-100%) tende ad infragilirsi eccessivamente fino a presentare una struttura estremamente friabile (molto simile al gesso).

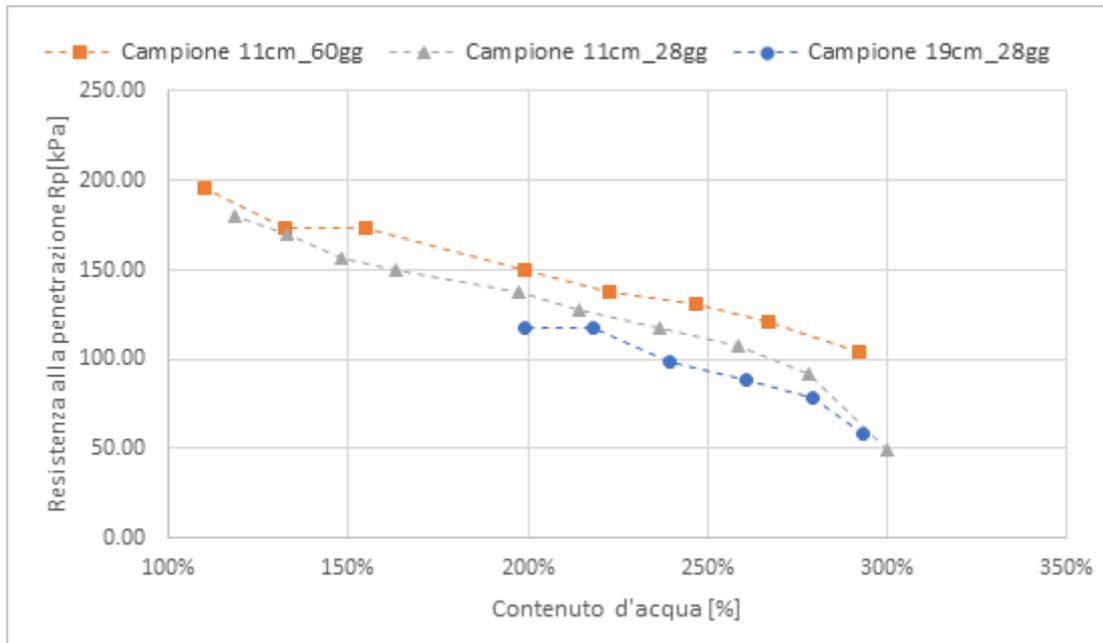


Grafico 5.14: Resistenza a penetrazione in funzione del contenuto d'acqua gravimetrico

5.8 Imbibizione campioni cilindrici

Al termine del processo di essiccamento, o comunque quando non si è stati più in grado di registrare le misure di conducibilità elettrica a causa dell'elevato numero di errori si sono posti i campioni in un recipiente contenente acqua (Figura 5.24). I campioni sono stati lasciati a contatto con un film di $H = 1$ cm d'acqua per 48ore al termine delle quali è stata eseguita una tomografia elettrica.



Figura 5.24: Campione $D = 11$ cm sottoposto ad imbibizione (60gg)

I risultati ottenuti evidenziano come al termine dell'imbibizione i campioni raggiungono un livello di omogeneizzazione del contenuto d'acqua sull'estensione areale del provino non riuscendo a recuperare il contenuto d'acqua iniziale, ma fermandosi ad un valore compreso tra l'80 – 90% di w_i .

Il campione che durante il processo di essiccamento ha manifestato un fenomeno di fratturazione spinta (Figura 5.10) ha mostrato al termine del processo di imbibizione (Figura 5.25) una omogeneizzazione del contenuto d'acqua su tutta la superficie indagata non rendendo più individuabili le fratture mediante ERT. È possibile spiegare questo risultato considerando che la resistenza posta dal materiale al passaggio di corrente elettrica al suo interno è considerevolmente diminuita ed evidentemente quelle zone che prima erano caratterizzate da un contrasto marcato di conducibilità, dopo il processo di imbibizione, sono più facilmente attraversabili dalla corrente elettrica. Questo aspetto può anche essere legato all'espansione derivante dal processo di imbibizione che ha portato ad una ricucitura parziale delle fessure. Inoltre,

al termine del processo si è misurato il contenuto d'acqua gravimetrico del campione che risulta essere pari a $w = 246 \%$.

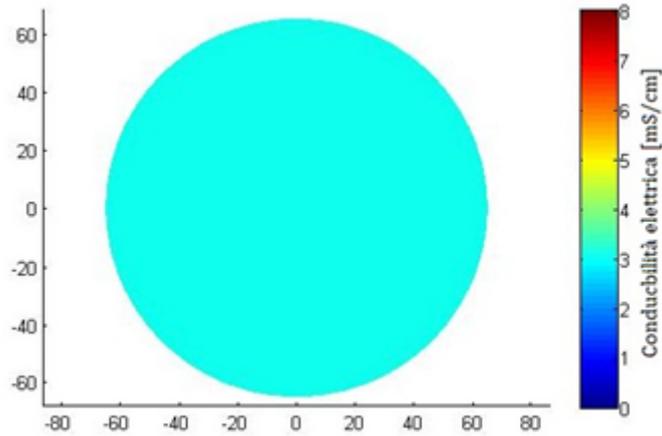


Figura 5.25: Ricostruzione tomografica dopo il processo di imbibizione (28gg)

Al fine di ottenere un riscontro sulla distribuzione spaziale del contenuto d'acqua sul campione $D = 11 \text{ cm}$ invecchiato a 60gg al termine del processo di imbibizione è stato sezionato in 6 parti delle quali si è misurato il contenuto d'acqua gravimetrico. In Figura 5.26 è stata riportata la ricostruzione tomografica la quale evidenzia come vi siano zone più conduttive di altre. Al fine di indagare questo aspetto è stato sezionato il campione in 6 parti, come rappresentato in Figura 92 delle quali è stato calcolato il contenuto d'acqua w .

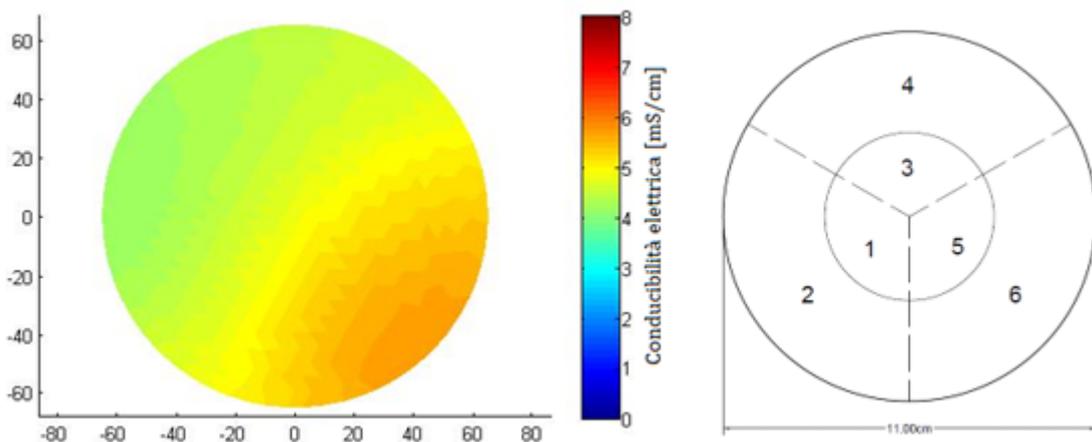


Figura 5.26: Ricostruzione tomografia dopo processo di imbibizione campione $D = 11 \text{ cm}$

Al fine di calcolare il peso secco delle varie parti componenti si è posto il materiale in forno a $105^{\circ}C$ per 24h, al termine delle quali si sono misurati i dati contenuti in Tabella 5.15. I risultati ottenuti non confermano quanto indica la ricostruzione tomografica. Si osserva che il processo di imbibizione può condurre a distribuzioni

ID	Peso umido	Peso secco	w
1	43.8215 g	12.0035 g	265 %
2	133.2816 g	36.4487 g	266 %
3	21.3095 g	5.7636 g	270 %
4	80.0620 g	21.9058 g	265 %
5	27.3278 g	7.4899 g	265 %
6	120.6199 g	33.2828 g	262 %

Tabella 5.15: Contenuto d'acqua w del campione $D = 11$ cm dopo imbibizione

di w non omogenea lungo la verticale del campione, pertanto è possibile che la tomografia, che restituisce un valore mediato riferito al piano medio del provino, non sia rappresentativa a causa di disomogeneità createsi durante il processo al di sotto del piano medio.



Figura 5.27: Campioni essiccati del provino $D = 11$ cm (60gg)

Il campione con $D = 19$ cm invecchiato 28gg ha manifestato un comportamento

singolare evidenziando una totale disomogeneità del contenuto d'acqua gravimetrico sul piano indagato (Figura 5.28). Questo aspetto può essere spiegato analizzando il numero di errori riscontrati in fase di misura (maggiori del 50%). Questa limitazione nei dati a disposizione non ha permesso una ricostruzione tomografica efficace, tuttavia nonostante questo il contenuto d'acqua medio stimato è ragionevolmente congruente con quello misurato.

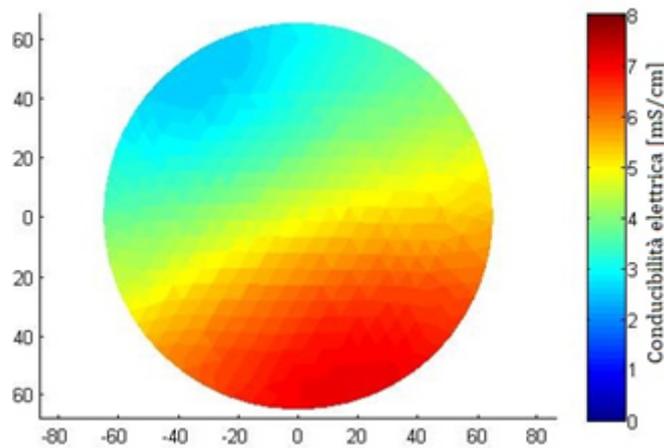


Figura 5.28: Ricostruzione tomografia dopo processo di imbibizione campione $\S D = 19$ cm (28gg)

Al termine della prova di tomografia elettrica si è misurato il contenuto d'acqua gravimetrico medio del campione in esame corrispondente all'istante di tempo in cui si è realizzata la misura e risulta essere pari a $w = 245$ %. Inoltre, al fine di indagare quale fosse la distribuzione in altezza del contenuto d'acqua gravimetrico, si sono prelevate tre porzioni di campione corrispondenti al primo, secondo e terzo medio in altezza dello stesso e si è misurato il contenuto d'acqua gravimetrico. Questa operazione ha evidenziato come la parte inferiore del campione, posta a contatto con il film d'acqua, presenta un contenuto d'acqua gravimetrico di poco maggiore rispetto alla superficie opposta. In Figura 5.29 è rappresentato uno schema della distribuzione verticale del contenuto d'acqua.

La distribuzione così rappresentata è giustificata dal fenomeno della risalita capillare. La superficie inferiore del campione, posta direttamente a contatto con il film d'acqua, presenta infatti un contenuto d'acqua maggiore, mentre progressivamente questo diminuisce con la distanza dalla superficie inferiore.

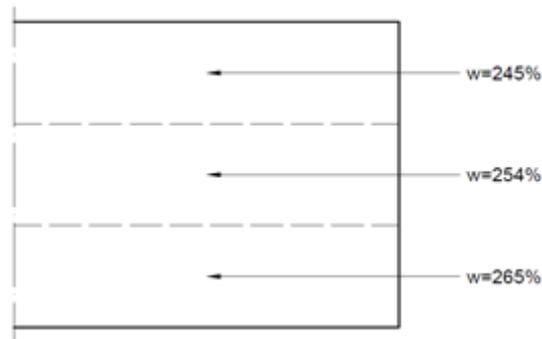


Figura 5.29: Distribuzione verticale del contenuto d'acqua campione $D = 19$ cm (28gg)

Un ulteriore prova di imbibizione è stata realizzata su un campione con la stessa geometria di quello finora descritto. Alla luce dei risultati già esposti è stato deciso di monitorare la velocità di imbibizione del campione ed è emerso che il contenuto d'acqua recuperabile dal campione pari all'80-90% di quello iniziale viene recuperato nell'arco dei primi 1-3 minuti. Tale risultato deve essere interpretato ricordando che il piano indagato con la tomografia di resistività elettrica è a soli 2 cm dal piano inferiore posto a contatto con l'acqua.

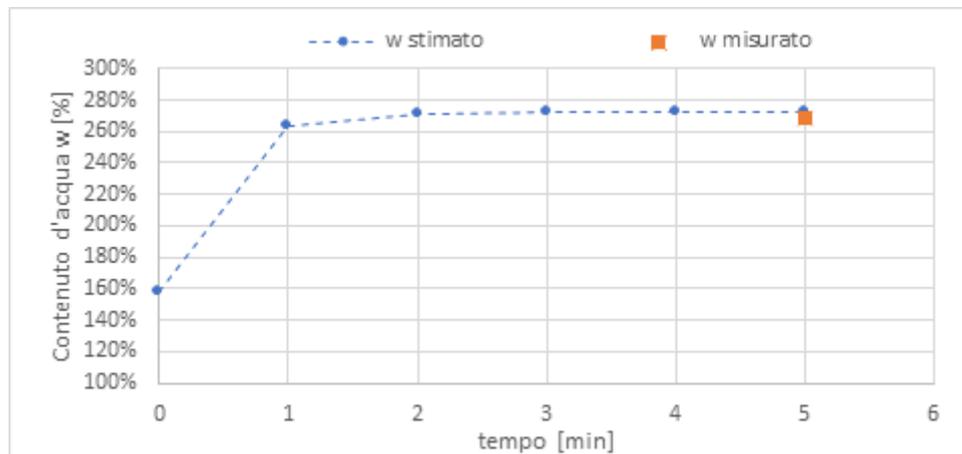


Grafico 5.15: Processo di imbibizione campione $D = 19$ cm (1-5min)

Successivamente è stata monitorata l'evoluzione della conducibilità elettrica nelle successive 48h che hanno evidenziato quanto già espresso in precedenza. Un risultato interessante ottenuto durante questa fase della sperimentazione è un'ulteriore conferma che in particolari condizioni la tomografia di resistività elettrica è in grado di individuare zone fratturate.

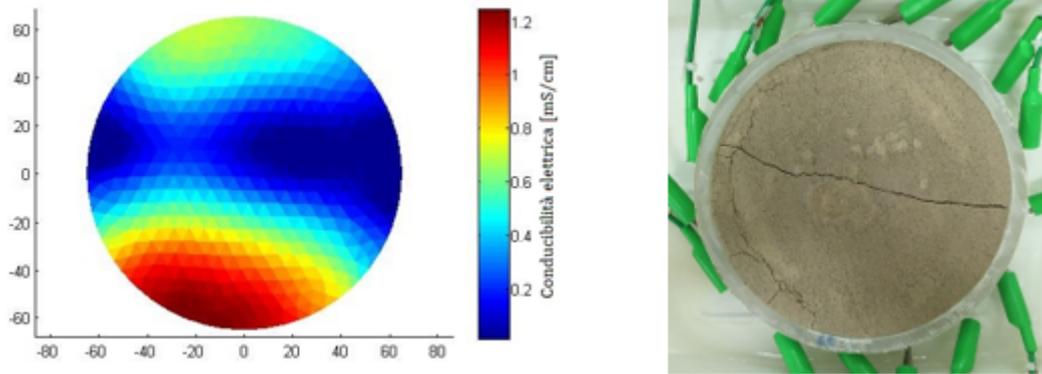


Figura 5.30: Localizzazione zone di fratturazione mediante ricostruzione tomografica

5.9 Caratterizzazione campioni colonnari

La sperimentazione condotta sulla colonna in parola è stata suddivisa in tre fasi per indagarne diversi aspetti relativi alla relazione conducibilità elettrica - contenuto d'acqua.

- 1^a Fase: al termine del tempo di maturazione previsto la colonna è stata prelevata dal bagno di maturazione e posizionata in un contenitore con un film d'acqua di altezza pari ad $H = 4$ cm e si sono monitorati i processi fisici con prove di tomografia elettrica per 33 giorni;
- 2^a Fase: al termine di questo periodo si è prelevata la colonna dal recipiente e si è sigillata la base mediante l'impiego di un foglio lucido e colla a caldo, determinando così un processo di evaporazione monodimensionale. Si è osservato il comportamento della colonna per 14 giorni. Tra l'11^{esima} e la 12^{esima} misura si è coperta la superficie superiore della colonna per 5 giorni per osservare la velocità di omogeneizzazione del contenuto d'acqua.
- 3^a Fase: al termine delle due fasi appena descritte si è realizzato un processo di imbibizione con le stesse condizioni descritte per la Fase 1 e si è monitorata l'evoluzione della conducibilità elettrica per 48 ore.

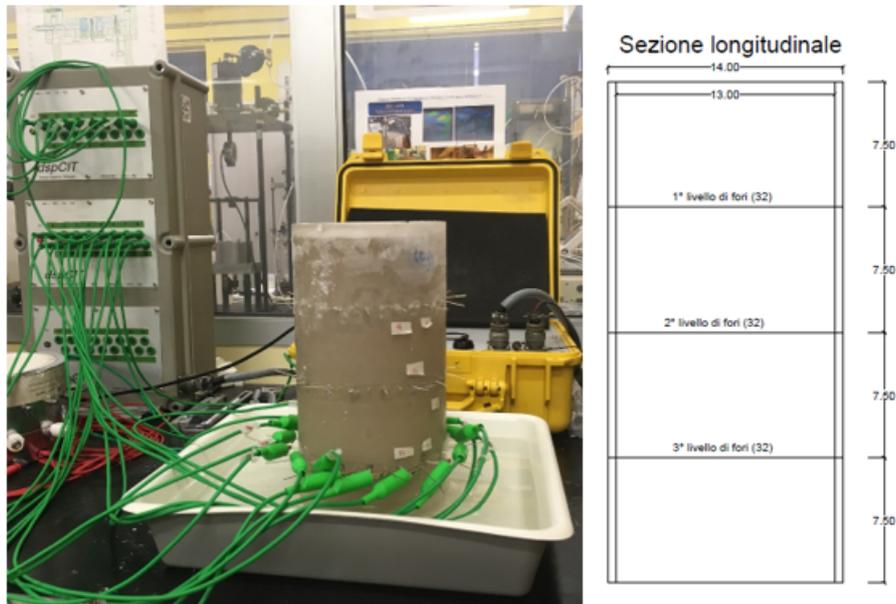


Figura 5.31: Prima fase di sperimentazione su cilindro $H = 30$ cm

In Tabella 5.16, Tabella 5.17 e Tabella 5.18 sono rappresentate le conducibilità elettriche medie calcolate mediante l'algoritmo di risoluzione del problema inverso per i tre differenti livelli di elettrodi durante la prima fase della sperimentazione.

Misura [gg]	$\bar{\sigma}_{\text{elettrodipiatti}}$ [mS/cm]	$\bar{\sigma}_{\text{elettrodipuntuali}}$ [mS/cm]
t_0	6.54	6.54
$t_1 = 2gg$	6.88	6.71
$t_2 = 5gg$	6.88	7.04
$t_3 = 16gg$	7.22	7.44
$t_4 = 22gg$	7.43	7.64
$t_5 = 33gg$	7.46	7.70

Tabella 5.16: Misurazione conducibilità elettrica 1° livello di elettrodi cilindro $H = 30$ cm

Misura [gg]	$\bar{\sigma}_{\text{elettrodipiatti}}$ [mS/cm]	$\bar{\sigma}_{\text{elettrodipuntuali}}$ [mS/cm]
t_0	8.12	8.12
t_2gg	8.22	8.16
t_5gg	8.22	8.25
t_16gg	8.25	8.01
t_22gg	8.13	9.24
t_33gg	7.75	7.99

Tabella 5.17: Misurazione conducibilità elettrica 2° livello di elettrodi cilindro $H = 30$ cm

Misura [gg]	$\bar{\sigma}_{\text{elettrodipiatti}}$ [mS/cm]	$\bar{\sigma}_{\text{elettrodipuntuali}}$ [mS/cm]
t_0	8.46	8.46
t_2gg	8.15	8.38
t_5gg	8.15	8.12
t_16gg	7.52	7.48
t_22gg	7.12	6.57
t_33gg	6.55	6.68

Tabella 5.18: Misurazione conducibilità elettrica 3° livello di elettrodi cilindro $H = 30$ cm

In Grafico 5.16, Grafico 5.17 e Grafico 5.18 sono rappresentati rispettivamente l'andamento della grandezza in esame nel tempo per il terzo, secondo e primo livello di elettrodi. I risultati ottenuti mostrano tre comportamenti differenti. Si ipotizza che il processo instauratosi prevede che la miscela cemento-bentonite eserciti un'azione di richiamo verso l'acqua presente sul fondo della bacinella dovuta alla suzione. Questo fenomeno spiega il comportamento manifestato dal campione nel tempo che ha evidenziato una diminuzione della conducibilità elettrica della parte inferiore del cilindro. Questo trend può essere spiegato considerando che l'azione di richiamo esercitata dalla miscela ha determinato una progressiva e parziale sostituzione del fluido di maturazione con l'acqua presente nella bacinella che aveva una conducibilità elettrica di circa $\sigma \approx 500 \mu\text{S}/\text{cm}$. La durata di questa fase della prova non è stata sufficiente a che questo processo risultasse significativo per la parte centrale del processo. Tuttavia, emerge come, dalle misurazioni fatte nei 10 giorni antecedenti la conclusione della prova, anche la fila centrale abbia iniziato a risentire del fenomeno di diffusione. La parte superiore, soggetta al fenomeno di evaporazione che possiamo considerare monodimensionale, nonostante fisicamente si presentasse sempre umida, mostra un andamento della conducibilità elettrica crescente nel tempo. Questo può essere spiegato ipotizzando che al progredire del fenomeno dell'evaporazione la concentrazione di sali nel fluido interstiziale aumenti, favorendo lo scambio ionico e quindi, aumentando la conducibilità elettrica.

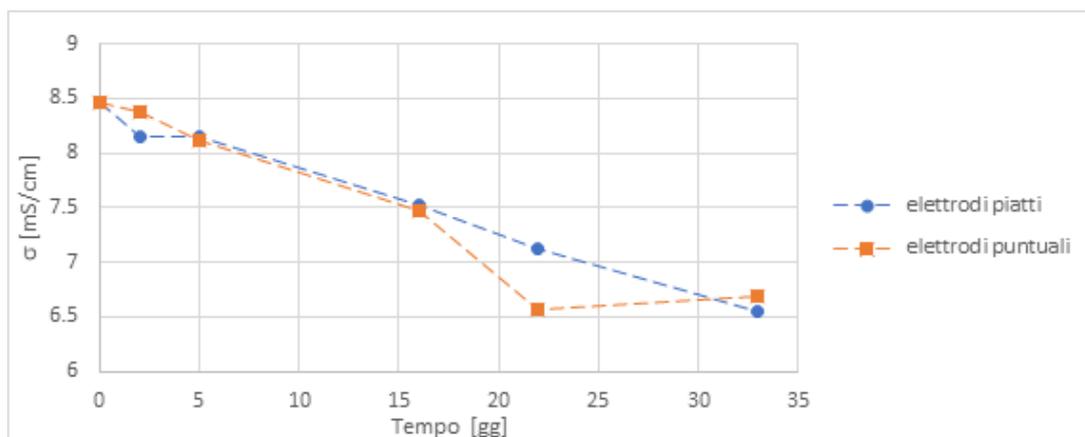


Grafico 5.16: Evoluzione temporale della conducibilità elettrica cilindro $H = 30 \text{ cm}$ 3° livello di elettrodi

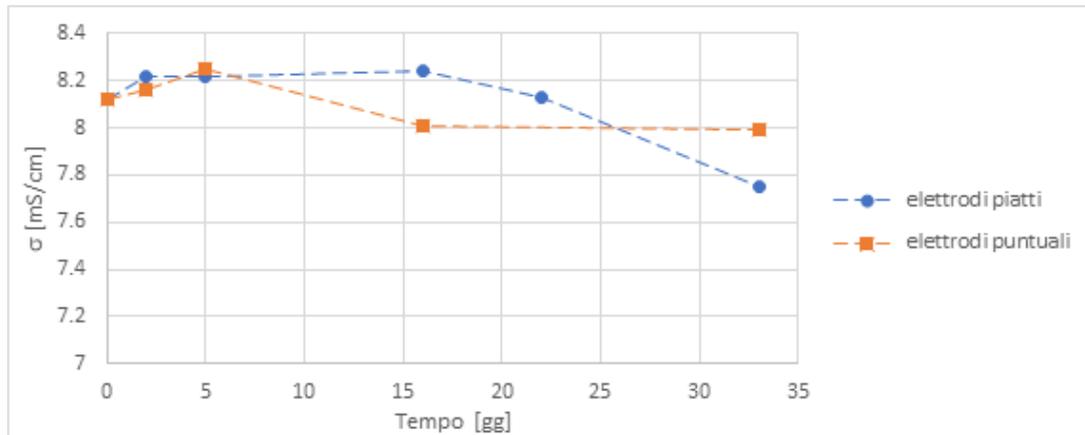


Grafico 5.17: Evoluzione temporale della conducibilità elettrica cilindro $H = 30$ cm 2° livello di elettrodi

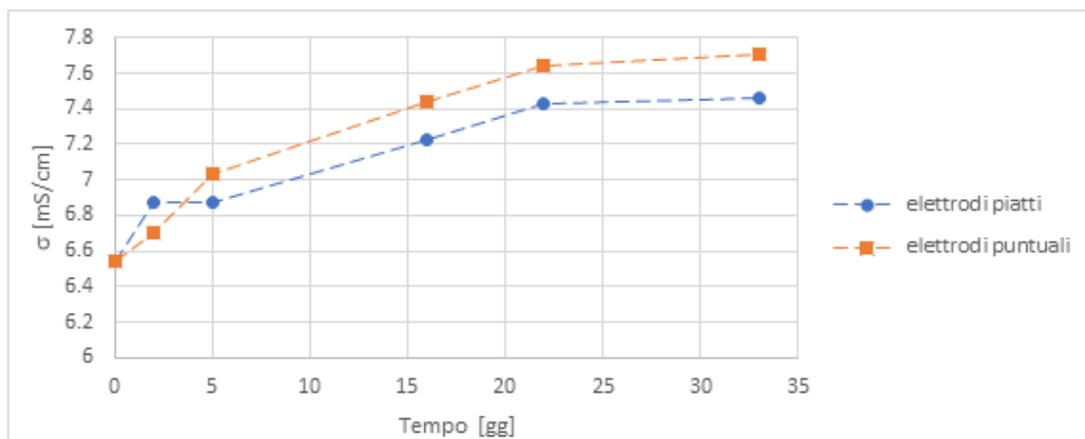


Grafico 5.18: Evoluzione temporale della conducibilità elettrica cilindro $H = 30$ cm 1° livello di elettrodi

Il Grafico 5.16 mostra l'evoluzione della conducibilità elettrica nel tempo della colonna in corrispondenza della fila centrale di elettrodi. Risulta evidente che le misure condotte utilizzando gli elettrodi piatti presentano un valore anomalo corrispondente all'istante di misura t_4 (Tabella 5.17). Tale anomalia è dovuta probabilmente ad errori di misura pertanto non essendo coerente con il trend individuato dagli elettrodi piatti non lo si considera come punto affidabile per la descrizione dell'evoluzione di conducibilità elettrica nel tempo.

Al termine del periodo di osservazione riguardante la prima fase di sperimentazione condotta sul campione colonnare si è monitorata l'evoluzione della conducibilità

elettrica nel tempo durante l'essiccamento. Durante questa fase la superficie inferiore del campione è stata sigillata mediante l'utilizzo di un foglio lucido e della colla a caldo.



Figura 5.32: Fessurazione superficiale del campione colonnare $H = 30$ cm

Già dopo le prime 24h sulla superficie esposta della colonna si sono sviluppate le prime fessure come è possibile osservare in Figura 5.32. Le zone caratterizzate da questo fenomeno presentavano una consistenza meno viscosa rispetto alle zone circostante a causa probabilmente di un accumulo di acqua in fase di maturazione. Il processo di essiccamento indotto sulla colonna è stato monitorato sempre con la tecnica ERT ed i risultati sono riportati nel Grafico 5.19.

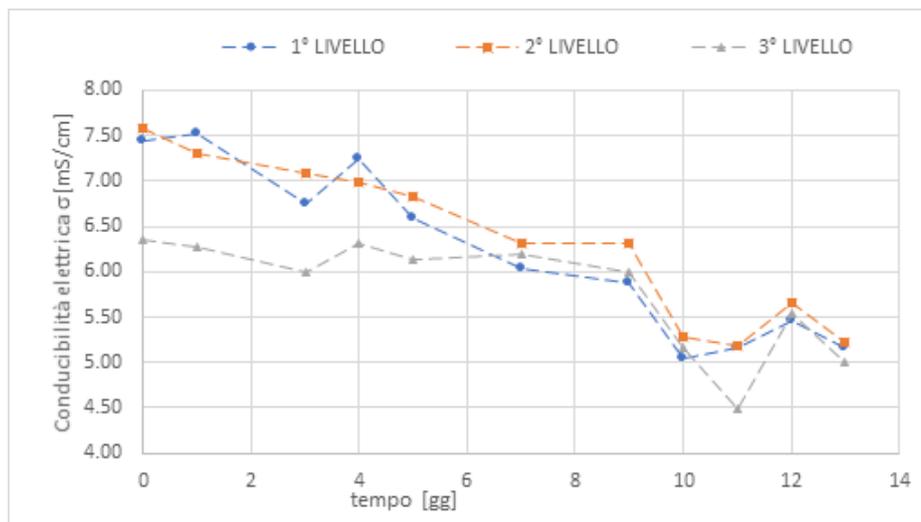


Grafico 5.19: Evoluzione della conducibilità elettrica nel tempo cilindro $H = 30$ cm durante essiccamento

Durante la fase di misurazione sono stato riscontrati errori superiori al 60%, fin dalla prima misura, con il risultato che le misure utilizzate per effettuare la ricostruzione mediante l'applicazione dell'algoritmo di risoluzione fossero insufficienti per una ricostruzione attendibile. Si è pertanto operato sui file .txt estratti dal programma di registrazione delle misure per individuare le misure affidabili sulle quali svolgere delle operazioni di affinamento per estrapolare le misure di conducibilità elettrica. I risultati che si esporranno quindi, non sono più rappresentativi di una tomografia di resistenza elettrica, ma rappresentano una media di misure puntuali. Come emerge dal Grafico 5.19 il processo di essiccamento risulta meno veloce rispetto a quanto è emerso per i campioni di dimensioni ridotte. Infatti, si nota che l'evoluzione della conducibilità elettrica per la metà superiore del cilindro presenti una decrescita sostenuta nel tempo. Questo comportamento è spiegabile considerando che il rapporto superficie esposta/volume del campione colonnare sia molto inferiore rispetto a quello per i campioni esaminati finora. Questo rapporto quindi, influenza in modo sostanziale i trend individuati e pertanto non è possibile effettuare confronti con i risultati già esposti. Si ricorda che il monitoraggio dell'evoluzione della conducibilità elettrica è avvenuto al termine del periodo di osservazione descritto nella prima fase di osservazione, pertanto valgono le considerazioni fatte in precedenza relative ai valori di conducibilità elettrica iniziale.

Al termine del periodo di osservazione del processo di essiccamento le fessure manifestatesi sulla superficie esposta del campione (Figura 5.32) si sono ulteriormente sviluppate. In Figura 5.33 è possibile osservare il reticolo generatosi durante il processo in parola caratterizzato da un'apertura delle singole fessure che varia tra $s = 1 - 3$ mm.



Figura 5.33: Stato fisico del campione colonnare al termine del processo di essiccamento

Successivamente il campione cilindrico parzialmente essiccato è stato sottoposto ad un processo di imbibizione con le stesse modalità descritte per i campioni precedenti (Figura 5.34).

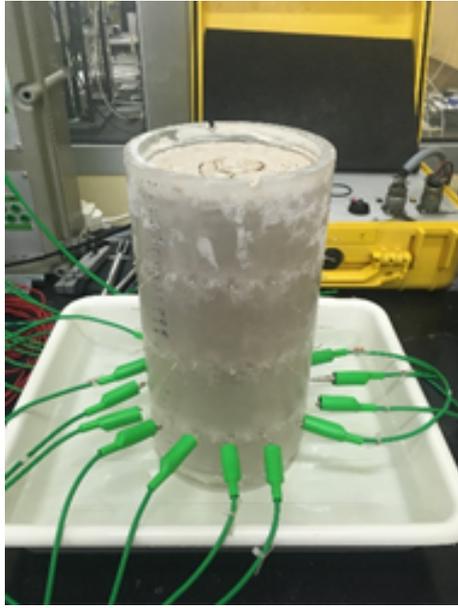


Figura 5.34: Imbibizione campione colonnare $H = 30$ cm

Durante il processo è stata monitorata la conducibilità elettrica sui tre livelli di elettrodi a diversi istanti di tempo ad intervallo crescente. Quanto misurato è riportato in Grafico 5.20 e Grafico 5.21.

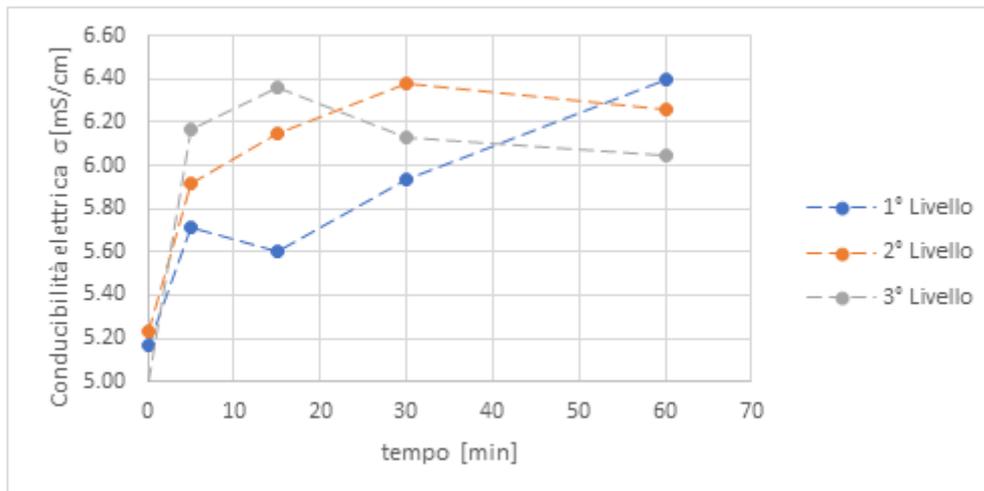


Grafico 5.20: Processo di imbibizione colonna $H = 30$ cm (0-60minuti)

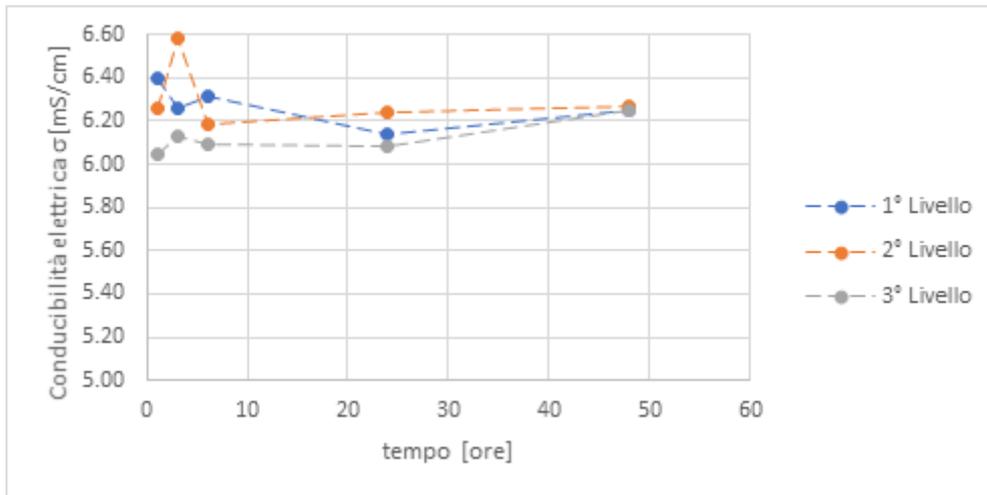


Grafico 5.21: Processo di imbibizione colonna $H = 30$ cm (1-48ore)

Risulta evidente che il processo di imbibizione avviene sostanzialmente nella prima ora di osservazione ed è compatibile con le ipotesi di comportamento formulate per i campioni precedenti. Il livello di elettrodi più vicino alla base inferiore, posta a contatto con l'acqua, recupera più velocemente contenuto d'acqua rispetto alle parti superiori che risentono in ritardo, anche se estremamente limitato, del cambio di condizioni al contorno. Al termine della sperimentazione descritta il campione, a causa dell'impossibilità di estrarlo dallo stampo, è stato carotato (Figura 5.36) estruso e successivamente sezionato ogni 4 cm per ottenere campioni rappresentativi a più livelli.



Figura 5.35: Preparazione campioni per caratterizzazione colonna $H = 30$ cm

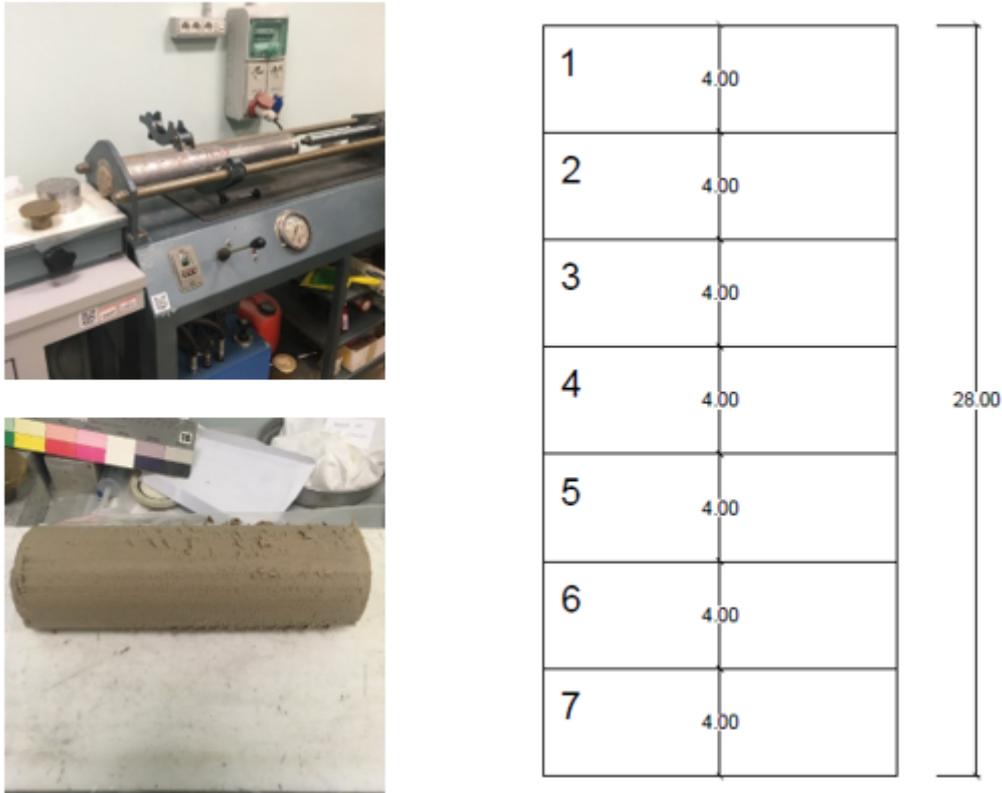


Figura 5.36: Carotaggio colonna $H = 30$ cm

I risultati ottenuti dalla caratterizzazione fisica della colonna $H=30$ cm sono riassunti in Tabella 5.19. Ciò che emerge dalle operazioni svolte conferma le ipotesi fatte sulla differenza di conducibilità iniziale relativa ai tre livelli di elettrodi. Osservando la variazione dell'indice dei vuoi con la profondità (Grafico 5.22) è possibile concludere che durante il processo di maturazione il materiale si sia progressivamente compattato sotto l'azione del peso del materiale stesso. Ciò ha comportato un aumento della densità del materiale che quindi, durante le reazioni di idratazione della componente cementizia, ha generato un aumento della concentrazione degli ioni responsabili della conducibilità elettrica. I risultati in termini di contenuto d'acqua e grado di saturazione confermano le previsioni effettuate trasformando le misure di conducibilità elettrica in contenuto d'acqua. Tuttavia, l'esposizione della colonna all'atmosfera di laboratorio ha comportato l'evaporazione di molecole di acqua da un lato, con conseguente aumento della concentrazione in testa alla colonna; mentre l'immersione della base in acqua di rubinetto ha favorito la diffusione

di ioni dalla base del campione verso la bacinella d'acqua. Queste si sono confermate dalle misure di conducibilità effettuate su campioni prelevati a vari livelli della colonna.

Dist. dalla base	w [%]	S_r [-]	e [-]	$\sigma_{fluidointerstiziale}$ [mS/cm]
26 cm	257	0.99	6.91	12.67
22 cm	287	0.93	8.25	9.84
18 cm	284	0.91	8.31	9.51
14 cm	280	0.99	7.55	8.85
10 cm	271	1.00	7.27	8.49
6 cm	278	1.00	7.19	7.92
2 cm	282	1.00	6.89	7.34

Tabella 5.19: Parametri fisici colonna $H = 30$ cm

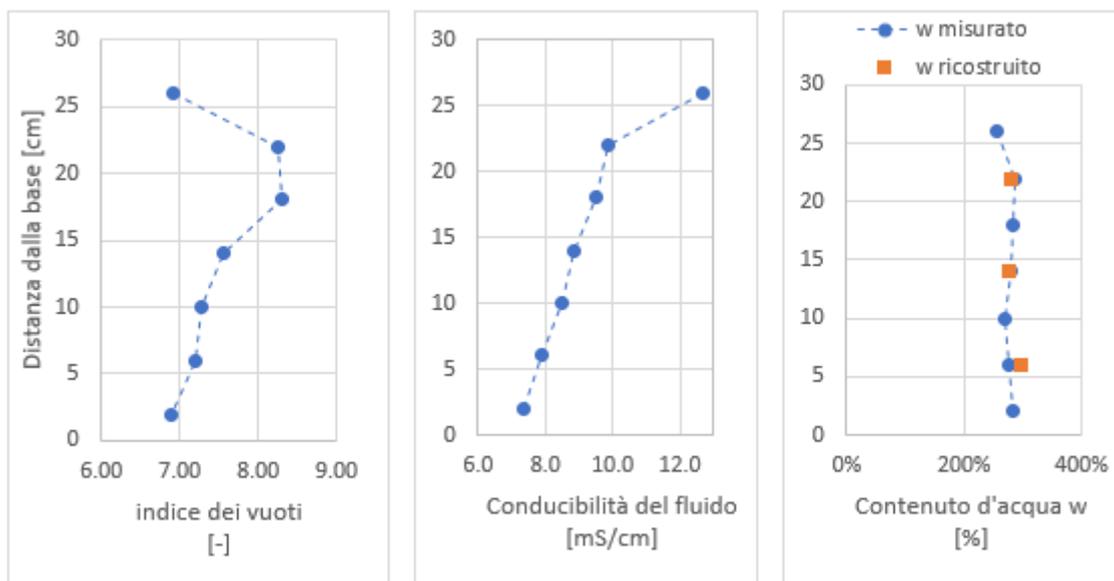


Grafico 5.22: Indice dei vuoti, Conducibilità elettrica e contenuto d'acqua colonna $H = 30$ cm

In Grafico 5.22 è possibile confrontare i risultati ottenuti dalle operazioni sulla colonna sezionata con i risultati ottenuti, in stima di contenuto d'acqua, a partire dalle misure di tomografia di resistenza elettrica.

In accordo con quanto fatto in precedenza, l'equazione ottenuta per descrivere la

relazione conducibilità-contenuto d'acqua è stata scalata in proporzione alle condizioni iniziali manifestate dal campione in termini di conducibilità elettrica e contenuto d'acqua. Le relazioni così ottenute (5.21), (5.22) e (5.23) ed applicate ci hanno permesso di ottenere una stima ragionevolmente corretta del contenuto d'acqua gravimetrico w a partire da misure di conducibilità elettrica sui tre livelli di elettrodi.

$$w = 3.00 \cdot \left(\frac{\sigma}{7.44} \right)^{0.388} \quad (5.21)$$

$$w = 3.00 \cdot \left(\frac{\sigma}{7.58} \right)^{0.388} \quad (5.22)$$

$$w = 3.00 \cdot \left(\frac{\sigma}{6.35} \right)^{0.388} \quad (5.23)$$

Il campione colonnare $H = 24$ cm e $D = 11$ cm è stato sottoposto ad un processo di essiccamento tramite esposizione alle condizioni atmosferiche di laboratorio ($T = 21^\circ C$ ed umidità relativa approssimativamente del 38%). Durante il processo di essiccamento si è monitorata l'evoluzione della conducibilità elettrica nel tempo mediante la tomografia di resistività elettrica. Come per il campione colonnare di $H=30$ cm durante la fase di esecuzione delle misure si sono riscontrati errori maggiori del 60%. Pertanto, anche in questo caso sono state effettuate delle operazioni di affinamento sulle misure di conducibilità elettrica che hanno permesso di estrapolare valori ragionevolmente attendibili.

Nel Grafico 5.23 è rappresentato il risultato di tale operazione che ha permesso di individuare i trend di conducibilità elettrica del campione sottoposto a prova all'avanzare del processo di essiccamento. I valori di conducibilità elettrica iniziali sono differenti in funzione del livello di elettrodi considerato.

I livelli inferiori di elettrodi presentano una conducibilità elettrica superiore rispetto al 1° livello di elettrodi. È possibile ipotizzare che la microstruttura della parte inferiore del campione colonnare sia differente rispetto a quella della parte superficiale a causa dell'azione di compressione esercitata dal peso del materiale. Questa dinamica può far ragionevolmente supporre che la colonna presenti una densità maggiore sul fondo che durante la fase di sviluppo delle reazioni di cementazione abbia determinato una concentrazione salina maggiore nel fluido interstiziale che si è dimostrato essere responsabile della variazione di valori di conducibilità elettrica.

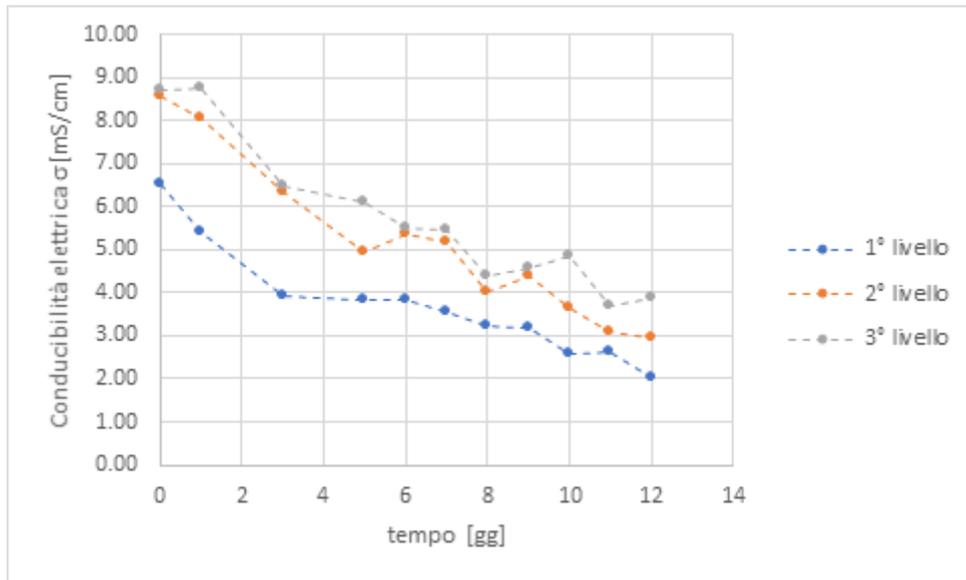


Grafico 5.23: Evoluzione della conducibilità elettrica nel tempo cilindro $H = 24$ cm

In Tabella 5.20 è riportato il confronto della conducibilità elettrica iniziale per i campioni colonnari.

Descrizione	$\sigma_{1^\circ \text{ livello}}$	$\sigma_{2^\circ \text{ livello}}$	$\sigma_{3^\circ \text{ livello}}$
Cilindro $H = 30$ cm	6.54 mS/cm	8.12 mS/cm	8.46 mS/cm
Cilindro $H = 24$ cm	6.51 mS/cm	8.57 mS/cm	8.72 mS/cm

Tabella 5.20: Confronto conducibilità elettrica iniziale campioni colonnari

Tale risultato conferma che dopo 28 giorni la conducibilità elettrica risulta approssimativamente indipendente dal grado di maturazione della miscela. Inoltre, evidenzia come le ipotesi fatte sul comportamento in fase di maturazione possano essere valide.

Capitolo 6

Conclusioni

Il presente lavoro di tesi ha previsto la caratterizzazione delle miscele ternarie acqua-cemento-bentonite mediante l'impiego della tecnica di tomografia di resistività elettrica. In particolare, si è posta l'obiettivo di monitorare il processo di desaturazione ed imbibizione di campioni cilindrici di diverse dimensioni ed invecchiamenti mediante il monitoraggio della conducibilità elettrica σ nel tempo. Le miscele utilizzate nel presente lavoro sono caratterizzate, allo stato indurito in condizioni di completa saturazione, da un elevato indice dei vuoti $e_i \approx 7.5$ che si riflette in un contenuto d'acqua gravimetrico pari a $w_i \approx 290\%$.

La conducibilità elettrica σ è legata all'organizzazione microstrutturale della miscela indurita, pertanto è stato dimostrato essere dipendente dal grado di maturazione. In particolare, si è osservato che dopo 28gg e cioè al termine della gran parte delle reazioni di idratazione del cemento, la conducibilità elettrica si stabilizzi ragionevolmente.

La conducibilità elettrica σ della miscela indurita corrispondente ad una condizione di completa saturazione non presenta un valore univoco, ma variabile da campione a campione. Tale variazione è stata dimostrata essere dovuta alla variazione di conducibilità elettrica del fluido interstiziale che dipende dalla quantità di sali disciolti derivanti dalle reazioni di idratazione sviluppatesi durante il processo di maturazione delle componenti.

I risultati ottenuti dalla tomografia di resistività elettrica hanno evidenziato la possibilità di impiegare la tecnica in esame per la misura del contenuto d'acqua gravimetrico di campioni di diverse dimensioni. Le correlazioni empiriche utilizzate

per l'esecuzione della misura vengono estrapolate dalla caratterizzazione di un elemento di volume e successivamente applicate a campioni con il medesimo grado di maturazione. Si è dimostrato inoltre, che la tomografia di resistività elettrica può essere impiegata per l'individuazione di fessure di spessore $s_{min} = 2 - 3$ mm presenti all'interno del campione. Questo risultato evidenzia come l'ulteriore sviluppo di questa metodologia sperimentale possa portare, applicata in sito, all'individuazione di zone fratturate dei diaframmi plastici.

La resistenza meccanica, misurata speditivamente con un penetrometro tascabile durante il processo di essiccamento, ha manifestato un incremento raggiungendo un picco di $R_p = 150 - 200$ kPa per un contenuto d'acqua gravimetrico $w \approx 120\%$. Contestualmente all'incremento di resistenza si è osservato un progressivo infragilimento dei campioni, infatti superato il $w \approx 100\%$ non è stato possibile acquisire ulteriori dati a causa delle rotture fragili occorse durante l'esecuzione delle prove. In alcuni campioni durante l'essiccamento si sono manifestati fenomeni di fessurazione che in alcuni casi hanno portato alla rottura spontanea dei campioni stessi. I campioni essiccati sottoposti ad un processo di imbibizione per 48 ore hanno manifestato la tendenza a non recuperare totalmente il contenuto d'acqua gravimetrico iniziale attestandosi ad un $w = 0.85 \cdot w_i$. Questo comportamento evidenzia come il processo di essiccamento abbia modificato irreversibilmente la struttura della miscela indurita.

In conclusione, è possibile affermare che il contenuto d'acqua gravimetrico governa il comportamento delle miscele cemento-bentonite ed una sua variazione può indurre fenomeni di fessurazione ed alterazioni microstrutturali irreversibili. La tomografia di resistività elettrica si presta in modo soddisfacente a monitorare le variazioni di conducibilità elettrica legate a variazioni di contenuto d'acqua, tuttavia è estremamente sensibile a piccole variazioni nelle condizioni di prova che provocano una forte alterazione dei risultati. Pertanto, risulta necessario stabilire un protocollo di prova che permetta di operare sugli elettrodi riuscendo a ripristinare il contatto con il materiale qualora perso e di inumidire la zona circostante gli elettrodi stessi per facilitare il passaggio di corrente.

Bibliografia

- [Borsic, 2002] Borsic, A. (2002). *Regularisation methods for imaging from electrical measurements*. PhD thesis, Oxford Brookes University.
- [Borsic et al., 2005] Borsic, A., Comina, C., Foti, S., Lancellotta, R., and Musso, G. (2005). Imaging heterogeneities with electrical impedance tomography: Laboratory results. *Geotechnique*, 55(7):539–547.
- [Casado et al., 2015] Casado, I., Mahjoub, H., Lovera, R., Fernández, J., and Casas, A. (2015). Use of electrical tomography methods to determinate the extension and main migration routes of uncontrolled landfill leachates in fractured areas. *Science of the Total Environment*, 506-507:546–553.
- [De Paoli et al., 1991] De Paoli, B., Mascardi, C., Paviani, A., and Marcellino, P. (1991). Le applicazioni dei diaframmi nella difesa ambientale. In *XV CICLO Conferenze di Geotecnica di Torino - "La ingegneria geotecnica nella salvaguardia e recupero del territorio*, pages 1–29, Torino.
- [Derfouf et al., 2019] Derfouf, F. E. M., Li, Z. S., Abou-Bekr, N., Taibi, S., and Fleureau, J. M. (2019). A new osmotic oedometer with electrical resistivity technique for monitoring water exchanges. *Geotechnical Testing Journal*, 43(3).
- [Evans and Opdyke, 2006] Evans, J. and Opdyke, S. (2006). Strength, permeability and compatibility of slag-cement-bentnite slurry wall mixtures for constructing vertical barriers. In *5th ICEG Environmental Geotechnics: Opportunities, Challenges and Responsibilities for Environmental Geotechnics*, pages 118–125.
- [Fratolocchi et al., 2006] Fratolocchi, E., Pasqualini, E., and Balboni, P. (2006). Performance of a cement-bentonite cut-off wall in an acidic sulphate environment. In *5th ICEG Environmental Geotechnics: Opportunities, Challenges and Responsibilities for Environmental Geotechnics*, pages 133–139.

- [Garvin and Hayles, 1999] Garvin, S. L. and Hayles, C. S. (1999). Chemical compatibility of cement-bentonite cut-off wall material. *Construction and Building Materials*, 13(6):329–341.
- [Grisolia and Napoleoni, 1997] Grisolia, M. and Napoleoni, Q. (1997). Esempio di controllo di qualità di un diaframma plastico a protezione di una discarica di rifiuti. In *Proceedings ANDIS '97-IV SIBESA Italian-Brazilian Symposium on Sanitary and Environmental Engineering, Ravello (Italia)*.
- [Jefferis, 1981] Jefferis, S. (1981). Bentonite-cement slurries for hydraulic cut-offs. In *International Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering Stockholm, June, Vol. 1*, pages 435–440.
- [Joshi et al., 2010] Joshi, K., Kechavarzi, C., Sutherland, K., Ng, M. Y. A., Soga, K., and Tedd, P. (2010). Laboratory and in situ tests for long-term hydraulic conductivity of a cement-bentonite cutoff Wall. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(4):562–572.
- [Koch, 2002] Koch, D. (2002). Bentonites as a basic material for technical base liners and site encapsulation cut-off walls. *Applied Clay Science*, 21(1-2):1–11.
- [Manassero, 1999] Manassero, M. (1999). I sistemi di incapsulamento dei siti contaminanti. In Manassero, M., editor, *Conferenze di Geotecnica di Torino, XVII Ciclo, "Controllo e gestione degli inquinanti nel sottosuolo"*, pages 1–32.
- [Seppänen et al., 2009] Seppänen, A., Karhunen, K., Lehtikainen, A., Kaipio, J. P., and Monteiro, P. J. (2009). Electrical resistance tomography imaging of concrete. *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II - Proceedings of the 2nd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, ICCRRR*, 40(1):231–232.
- [Smyl et al., 2017] Smyl, D., Rashetnia, R., Seppänen, A., and Pour-Ghaz, M. (2017). Can Electrical Resistance Tomography be used for imaging unsaturated moisture flow in cement-based materials with discrete cracks? *Cement and Concrete Research*, 91:61–72.
- [Soga et al., 2013] Soga, K., Joshi, K., and Evans, J. (2013). Cement bentonite cutoff walls for polluted sites. In Manassero, M., Dominijanni, A., Foti, S., and Musso, G., editors, *Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics: From Theoretical and Experimental Research to Practical Applications - Proceedings of the International Symposium, ISSMGE TC 215 (2013)*, pages 149–165.