



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Facoltà di
Ingegneria
Civile e Industriale



Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Ambientale
Scuola di Dottorato in Ingegneria Civile e Architettura

Dottorato di Ricerca in Ingegneria Ambientale XXV Ciclo

Il Deep Mixing per applicazioni ambientali
Aspetti progettuali e verifica delle prestazioni

Ing. Enrico Leder

Coordinatore:
Prof. Francesco Gallerano

Tutor:
Prof. Massimo Grisolia

Novembre 2012

Indice Generale

INTRODUZIONE	1
Inquadramento generale della ricerca	1
Obiettivi ed articolazione del lavoro svolto	2
Struttura della tesi	3
1. LA TECNICA DEL DEEP MIXING PER APPLICAZIONI AMBIENTALI	5
1.1 Cenni storici	5
1.2 Modalità esecutive	6
1.2.1 Wet Deep Mixing	8
1.2.2 Dry Deep Mixing	11
1.3 Classificazione Deep Mixing Method (DMM)	12
1.4 Configurazioni e Applicazioni del trattamento Deep Mixing	13
1.4.1 Barriere verticali impermeabili	14
1.4.2 Stabilizzazione di massa e Solidificazione/Stabilizzazione	17
1.5 Vantaggi	18
1.6 Fattori che influenzano il processo di miscelazione	19
1.6.1 Numero di rotazione delle lame, parametro T	19
1.6.2 Tipologie di legante	21
1.7 Proprietà dei terreni trattati	21
1.7.1 Differenze tra proprietà ricavate in laboratorio e in sito	22
1.7.2 Conducibilità idraulica	24
1.7.3 Resistenza a compressione non confinata	25
1.7.4 Modulo di elasticità	27
1.8 Durabilità dell'intervento	27
1.8.1 Meccanismi di degradazione del cemento	28
1.8.2 Meccanismi di degradazione di terreni stabilizzati non contaminati ...	29
1.8.3 Meccanismi di degradazione di terreni stabilizzati contaminati	30
1.9 Casi di studio di applicazioni ambientali	31
2. STUDIO INTERNAZIONALE SULLE PROCEDURE DI QC/QA	33
2.1 Fasi progettuali ed esecutive	33
2.2 Prove preliminari di laboratorio (QC)	35
2.2.1 Ricerca internazionale sul Deep Mixing, risultati 2005-2009	37

2.2.2	Test 1: Influenza delle tecniche di confezionamento sulla resistenza del terreno trattato	41
2.2.3	Test 2: Influenza della temperatura e del tempo di maturazione	43
2.2.4	Test 3: Influenza del tempo intercorrente tra idratazione del legante e fine compattazione	45
2.3	Controllo di qualità durante l'esecuzione (QC).....	46
2.3.1	Prelievo di campioni "wet grab"	48
2.4	Campo prova.....	50
2.5	Assicurazione di qualità (QA)	51
2.5.1	Esposizione di colonne	51
2.5.2	Prelievo di campioni di miscela indurita	53
2.5.3	Prove geotecniche	54
2.5.4	Prove geofisiche.....	55
2.6	Rapporti di visita cantieri Deep Mixing	56
2.6.1	Cantiere Wet Deep Mixing 1, zona Baraki-Nakayama	56
2.6.2	Cantiere Wet Deep Mixing 2, zona Shin-Kiba (baia di Tokyo)	58
2.7	Programma di ricerca internazionale sul Deep Mixing 2009 - 2015.....	62
2.7.1	Lavorabilità della miscela terreno-legante.....	63
3.	STUDIO SPERIMENTALE, OBIETTIVI E MATERIALI	69
3.1	Attività presso il "Soil Stabilisation group" (PARI, Giappone).....	69
3.1.1	Obiettivo dello studio sperimentale	69
3.1.2	Materiali e programma delle prove di laboratorio	72
3.2	Attività presso il "Foundation group" (PARI, Giappone)	75
3.2.1	Obiettivo dello studio sperimentale	75
3.2.2	Materiali e programma delle prove di laboratorio	75
3.3	Attività presso il DICEA - Sapienza Università di Roma	78
3.3.1	Obiettivo dello studio sperimentale	78
3.3.2	Materiali e programma delle prove di laboratorio	79
3.4	Attività in collaborazione tra DICEA (Sapienza Università di Roma), Università di Padova e Bauer Group	84
3.4.1	Obiettivo dello studio sperimentale	84
3.4.2	Materiali e programma delle prove di laboratorio	85
3.5	Prove di laboratorio	88
3.5.1	Prova di compressione ad espansione laterale libera (ELL o UCS)	89
3.5.2	Prova di conducibilità idraulica in cella triassiale	92

4. PROCEDURA PER I TEST DI MISCELAZIONE IN LABORATORIO ASSOCIATI A UN INTERVENTO DEEP MIXING	97
4.1 Attrezzature.....	97
4.1.1 Stampi	97
4.1.2 Miscelatore.....	98
4.1.3 Strumenti per il confezionamento dei provini.....	99
4.1.4 Dispositivo per la misura del momento torcente, Mt.....	100
4.1.5 Hand vane o Laboratory vane	100
4.1.6 Setaccio ASTM 3/8" (0,95mm)	100
4.1.7 Cassette di maturazione	100
4.1.8 Miscellanea	100
4.2 Materiali.....	101
4.2.1 Terreno	101
4.2.2 Legante.....	102
4.3 Calcolo delle quantità dei materiali	102
4.4 Procedura di confezionamento.....	104
4.4.1 Misura del Momento torcente a vuoto iniziale	105
4.4.2 Omogeneizzazione dei materiali	105
4.4.3 Fase di miscelazione	106
4.4.4 Valutazione della lavorabilità	106
4.4.5 Confezionamento dei provini.....	108
4.4.6 Misura Momento torcente a vuoto finale.....	111
4.4.7 Report.....	111
4.4.8 Estrazione dei provini dagli stampi.....	111
5. RISULTATI ED ANALISI.....	113
5.1 Applicabilità tecniche di confezionamento di provini di miscela terreno-cemento - Soil Stabilisation group (PARI).....	113
5.1.1 Parametro "N" - Resistenza q_u e peso di volume normalizzati	116
5.1.2 Parametro "E" - Errori relativi sulla resistenza q_u e peso di volume	118
5.1.3 Indice di Applicabilità.....	120
5.2 Effetto di "tire chips" sulle proprietà meccaniche di miscele terreno-cemento - Foundation group (PARI).....	122
5.2.1 Analisi delle tomografie ai raggi X.....	122
5.2.2 Resistenza a compressione ad espansione laterale libera.....	124
5.2.3 Conducibilità idraulica.....	126

5.3 Lavorabilità miscela terreno-legante ed applicabilità tecniche di confezionamento - Sapienza Università di Roma	128
5.3.1 Parametri normalizzati ed errori relativi	131
5.3.2 Indice di Applicabilità	133
5.3.3 Range di applicabilità delle tecniche di confezionamento (PARI+DICEA).....	135
5.3.4 Curva di calibrazione per l'estensione dei risultati.....	136
5.3.5 Conducibilità idraulica.....	141
5.4 Analisi dei dati relativi ad un campo prova CSM - Sapienza Università di Roma, Università di Padova e Bauer Group	142
CONCLUSIONI	145
<i>Lavorabilità delle miscele e Applicabilità delle tecniche di confezionamento.</i>	145
Impiego di “tire chips” nelle miscele terreno-cemento	147
Analisi dei dati relativi ad un campo prova CSM	147
Raccomandazioni per future ricerche	148
Contatti	148
APPENDICE A - Formule di passaggio laboratorio/sito	149
A.1 Definizioni	149
A.2 Calcolo densità della malta cementizia:	150
A.3 Calcolo δ rapporto in peso malta/terreno e γ_{mix} peso di volume miscela terreno-malta:	150
A.4 Calcolo volume malta in $1m^3$ di miscela terreno-malta:	150
A.5 Calcolo Volume di malta in $1m^3$ di terreno attraversato e binder factor α :	150
APPENDICE B - Integrazione dei risultati sperimentali	154
B.1 Integrazione risultati § 5.1	154
B.2 Integrazione risultati § 5.3	155
PRODOTTI DELLA RICERCA	161
ATTIVITÀ FORMATIVA.....	163
BIBLIOGRAFIA	165

Indice delle Figure

Figura 1.1 - Evoluzione dell'utensile di miscelazione, da quello a singola coclea fino a quello munito di più alberi rotanti con aste dotate di pale o eliche miscelatrici (Massarch and Topolnicky, 2005).....	6
Figura 1.2 - Fasi tipiche del trattamento Deep Mixing: posizionamento e penetrazione, estrazione a rotazione invertita, colonna completata e passaggio alla verticale successiva. L'iniezione della malta cementizia può avvenire in fase di discesa, di risalita o entrambe.	7
Figura 1.3 - Macchina Deep Mixing, impianto produzione della malta e pompe (Weatherby, 2012).....	8
Figura 1.4 - Metodi wet mixing in Giappone, U.S.A. ed Europa (Yoshida, 2002; Burke, 2002; Topolnicky, 2003).....	9
Figura 1.5 - Metodo TRD: schema, elementi del cutter post e lavorazione in corso (Sehn, 2012).	9
Figura 1.6 - Metodo Trenchmix, Soletanche Bachy, wet method (Borel, 2007).....	10
Figura 1.7 - Testa miscelatrice e sequenza costruttiva (Mosser e Arcos, 2012).....	10
Figura 1.8 - Cutter Soil Mixing, CSM, tecnologia Bauer e Soletanche Bachy (Deschamps 2012).....	10
Figura 1.9 - Trattamento dry mixing (Bohem, 2012).	11
Figura 1.10 - Tecnologia ALLU per la stabilizzazione di massa (ALLU, 2007). ...	12
Figura 1.11 - Classificazione aggiornata DMM (adattata da Bruce, 2011).	13
Figura 1.12 - Configurazioni tipiche di terreno trattato.....	14
Figura 1.13 - Schema semplificato di cinturazione mediante barriera verticale.	14
Figura 1.14 - Cinturazione mediante barriera verticale in Deep Mixing.....	15
Figura 1.15 - Controllo della verticalità sul piano trasversale e longitudinale (CSM).	15
Figura 1.16 - Confronto CSM con metodi DM colonnari nell'esecuzione di barriere verticali.	16
Figura 1.17 - Schemi di fratturazione nel diaframma per carichi asimmetrici.	17
Figura 1.18 - Produzione di tire chips.	17
Figura 1.19 - Applicazioni Deep Mixing per la stabilizzazione/solidificazione di terreni contaminati.....	18
Figura 1.20 - Relazione tra il blade rotation number T e la deviazione standard della resistenza di terreno trattato in sito σ (CDIT 2002).....	21
Figura 1.21 - Permeabilità di terreni stabilizzati misurati in diverse investigazioni in relazione alla resistenza q_{uc} dei terreni stabilizzati. ■●◆ provini laboratorio; □○◇ colonne sito (Åhnberg, 2003).....	23
Figura 1.22 - Relazione tra i valori di resistenza in sito rispetto quelli ricavati su provini di laboratorio in funzione dei diversi studi (Larsson, 2005).	24
Figura 1.23 - Influenza del tempo di maturazione e del tipo e quantità di legante sulla permeabilità k di argille stabilizzate (Brandl, 1999; Åhnberg, 2003).....	24
Figura 1.24 - Resistenze misurate nel tempo in relazione a diversi leganti per (a) argilla di Löftabro e (b) argilla di Linköping (Åhnberg et al., 2003).....	26

Figura 1.25 - Resistenze a compressione UCS misurate nel tempo in relazione a diversi leganti (cemento Portland, CEM I; cemento composito CEM II; cemento con scorie d’altoforno CEM III) per Argilla limosa e Torba (Van Impe et al., 2007).	26
Figura 1.26 - Distribuzione con la profondità della resistenza q_u a diversi tempi di maturazione (Onimaru et al., 2009).	28
Figura 1.27 - da sinistra verso destra: provini di argilla stabilizzata con PC e immersi in soluzione di solfato sodico per 18 giorni e soluzione di acido solforico per 36 giorni; provini di argilla stabilizzata con PC-bentonite immersi per 4 giorni in soluzione di solfato sodico; soluzione di acido solforico (Osman, 2007).	30
Figura 1.28 - da sinistra verso destra: provini di argilla stabilizzata con PC-cenere volante e esposti a soluzione di solfato di sodio 10% di cenere volante per 68 giorni e 50% di cenere volante per 12 giorni; provini di argilla stabilizzata con PC-zeoliti immersi per 1.5 anni in soluzione di solfato sodico e soluzione di acido solforico (Osman, 2007).	30
Figura 1.29 - A sinistra: Trivelle in lavorazione e planimetria dell’intervento a Long Eaton (Al Tabbaa e Evans, 2003); a destra: schema del funzionamento del sistema di Soft Soil Improvement (Marconi e Mosca, 2010).	32
Figura 2.1 - Diagramma di flusso per la progettazione ed esecuzione di un intervento Deep Mixing (adattato da Filz, 2012).	34
Figura 2.2 - Prove di laboratorio nelle procedure di QC/QA relative a un intervento Deep Mixing (adattato da Saitoh et al., 1996).	35
Figura 2.3 – Resistenza a compressione UCS ottenuta in tre laboratori diversi utilizzando la stessa dose di legante (cemento) pari a 150 kg/mc. (Jacobson, 2005).	36
Figura 2.4 - Stampi monouso in metallo e plastica.	37
Figura 2.5 - Miscelatore utilizzato per amalgamare acqua e legante, miscelatore (Virginia Tech.) Hobart per miscelare terreno e legante (Helsinki University of Technology), miscelatore per omogeneizzare il campione di terreno (Swedish Geotechnical Institute).	40
Figura 2.6 - Compattazione dinamica e Compattazione statica (SGI institute), Tapping (Helsinki University of Technology).	40
Figura 2.7 - Tapping tramite tavolo con sistema di caduta: caduta da 10 cm di altezza per 100 volte (Dong-Ah); Rodding (Cambridge University).	40
Figura 2.8 - condizioni di maturazione in presenza di sovraccarico (SGI), in camera umida a temperatura costante, all’interno di contenitori sigillati con strato d’acqua al di sotto dei provini.	41
Figura 2.9 - Influenza della tecnica di confezionamento sulla resistenza q_u : q_u -tecnica di compattazione; q_u normalizzato-tecnica di confezionamento.	42
Figura 2.10 - Influenza della tecnica di confezionamento sulle proprietà fisiche del terreno trattato: contenuto d’acqua; peso di volume.	43
Figura 2.11 - Aumento di resistenza con il tempo di maturazione e effetto della temperatura di maturazione per terreni argillosi ad alta plasticità (PARI, DJM) ; argillosi a bassa plasticità (Dong, CU); torba (CERI, SGI). Le resistenze sono normalizzate rispetto al valore a 20°/28giorni.	44
Figura 2.12 - Relazione q_u normalizzata/tempo di riposo della malta cementizia; relazione q_u normalizzata/tempo di riposo della miscela terreno legante.	46
Figura 2.13 - Baroid Mud Balance.	47
Figura 2.14 - Schermo a disposizione dell’operatore e restituzione cartacea dei dati di produzione (Deschamps, 2012; Bringiotti, 2010).	48

Figura 2.15 - Tipi di campionatori utilizzati per prelievo di miscela fresca (Deschamps 2012).	49
Figura 2.16 - Due tipologie di campionatori a sezione circolare e rettangolare (Kitazume 2012).	49
Figura 2.17 - Esempi di stampi e tecnica di confezionamento impiegati in un cantiere.	50
Figura 2.18 - Esempi di colonne e pannello esposti.	52
Figura 2.19 - Pannello CSM estratto ed ingrandimento di inclusione di terreno soffice non trattato (Denies et al., 2012b).	52
Figura 2.20 - Colonna Deep Mixing estratta ed esecuzione prova di compressione (Bruce 2012).	52
Figura 2.21 - Campionatore Schnabel per il prelievo di una verticale di terreno trattato (Weatherby, 2012).	53
Figura 2.22 - Disturbo dei campioni (Weatherby, 2012).	53
Figura 2.23 - Valutazione delle proprietà di una colonna di terreno trattato mediante prova CPT eseguita 5 mesi dopo la realizzazione (Van Impe et al., 2007).	54
Figura 2.24 - Penetrometro utilizzato nel PORT.	55
Figura 2.25 - Penetrometro utilizzato nel PRT.	55
Figura 2.26 - Vista globale del cantiere e partecipanti. Da sinistra verso destra: Mr. Tokunaga (CDM); Dr. Fukushima (Fudo Tetra corporation); Mr. Taguchi (TOA corporation); Prof. Kitazume (PARI); Dr. Ming (ReCeSS Malesia); il sottoscritto; Dr. Kilpenainen (VTT); Prof. Heikkila (University of Oulu).	56
Figura 2.27 - Macchinario CDM impiegato, particolare delle lame miscelatrici rotanti.	57
Figura 2.28 - Unità di trattamento, schema planimetrico e sezione del trattamento.	57
Figura 2.29 - Display operatore: Colonne dei parametri operativi in giallo (da sinistra verso destra profondità (m), velocità (m/min) e portate iniezione (l/m)) e grafico dell'andamento con il tempo, con evidenziata la fase di bottoming.	58
Figura 2.30 - Impianto di produzione della malta cementizia.	58
Figura 2.31 - Sezione della barriera prevista per la futura area di smaltimento, con evidenziato l'intervento di Deep Mixing.	59
Figura 2.32 - Vista del cantiere mobile POCM-12 e particolare lame miscelatrici e dei 6 ugelli impiegati, di cui 4 posizionati sopra le lame e 2 all'estremità delle stesse.	59
Figura 2.33 - Schema del trattamento "lattice type" previsto.	60
Figura 2.34 - Display operatore con andamento della lavorazione con il tempo.	61
Figura 2.35 - Particolare silos, vasca di raccolta e tubazioni impiegati.	61
Figura 2.36 - Concetto qualitativo di lavorabilità.	63
Figura 2.37 - Hand vane e Laboratory vane impiegati nello studio sperimentale.	64
Figura 2.38 - Misurazione mediante cono svedese.	65
Figura 2.39 - Misurazioni mediante cono di Marsh e cono di Abrams.	66
Figura 2.40 - Strumento Tattersall Two-Point e Reometro IBB.	67
Figura 3.1 - Schema dei due tipi di approccio allo studio per il Test series 1.	71
Figura 3.2 - Lista dei partecipanti e programma delle prove di laboratorio (Test Series 1).	72
Figura 3.3 - Tecniche di confezionamento, da sinistra: N.C., TA., RO., S.C.25, S.C.50, D.C.	74

Figura 3.4 - Elementi costituenti il terreno artificiale e tire chips impiegati.....	76
Figura 3.5 - Fasi di confezionamento dei provini di miscela terreno-cemento-tire chips (aggiunta di tire chips, aggiunta malta cementizia e confezionamento mediante Tapping) e serie di provini per le prove di permeabilità in fase di compressione testati a 7 e 28 giorni.	77
Figura 3.6 - CT scanner raggi X, pannello, cella triassiale e pressa impiegati.	78
Figura 3.7 - Dispositivo coppia-angolo USAG e collegamento al miscelatore.	79
Figura 3.8 - Area romana prima degli insediamenti umani.....	80
Figura 3.9 - Cassette di terreni campionati nell'area di Malagrotta, Roma Ovest (si riconoscono i terreni RL, SL, SG ed AP).....	81
Figura 3.10 - Cassette di terreni prelevati nei cantieri della Metro C, Roma Est (si riconoscono i terreni PN, PR e TF).	81
Figura 3.11 - Distribuzione granulometrica dei sette terreni romani analizzati.	82
Figura 3.12 - Tecniche di confezionamento adottate, da sinistra: <i>N.C.</i> , <i>TA.</i> , <i>RO</i>	83
Figura 3.13 - Area di cantiere vista generale e particolare.	85
Figura 3.14 - Alcuni dati di produzione riferiti al pannello X1.....	86
Figura 3.15 - Prelievo di campioni wet grab in sito, successivamente carotati, e fasi di confezionamento dei provini in laboratorio.	87
Figura 3.16 - Valutazione del binder factor e binder content a partire dai dati di produzione.....	88
Figura 3.17 - Determinazione del diametro (media 6 misure) e dell'altezza (media 3 misure) dei provini mediante calibro.	89
Figura 3.18 - Macchinari impiegati per le prove di compressione ELL.	90
Figura 3.19 - Tipico foglio di acquisizione dati con grafico sforzi-deformazioni. .	91
Figura 3.20 - Pannello Belladonna, celle di carico, valvole del plinto di base e prove in parallelo in corso (DICEA).	93
Figura 3.21 - Attrezzatura impiegata presso il PARI.	93
Figura 3.22 - Saturazione del plinto inferiore; posizionamento della carta filtro-pietra porosa-carta filtro; posizionamento del provino e degli O-ring; inserimento della carta filtro-pietra porosa-carta filtro e testina superiore; inserimento O-ring superiori; provino installato; riempimento della cella triassiale con acqua; prova in corso (DICEA).	94
Figura 3.23 - Fasi di preparazione della prova presso il PARI.	95
Figura 3.24 - Tipico foglio di acquisizione dati prova di conducibilità idraulica. ..	96
Figura 4.1 - Stampi cilindrici impiegati nello studio sperimentale.	98
Figura 4.2 - Miscelatori impiegati.	98
Figura 4.3 - Curva di livello del miscelatore Kenwood.	99
Figura 4.4 - Strumenti per il confezionamento dei provini.	99
Figura 4.5 - dispositivo coppia angolo USAG e collegamento al miscelatore.....	100
Figura 4.6 - Preparazione dei terreni per lo studio sperimentale: KC, RL, SL, SG, APL, PN, PR, TF (§ 3.1.2, 3.3.2).	101
Figura 4.7 - Cemento tipo Portland e legante Blitzdammer®.....	102
Figura 4.8 - Esempio foglio dati relativi alla miscelazione in laboratorio.	104
Figura 4.9 - Aggiunta di acqua al terreno ed omogeneizzazione (miscelatori Kenwood e PARI).	105
Figura 4.10 - Preparazione malta cementizia (acqua più cemento) o cemento asciutto.	105

Figura 4.11 - Aggiunta del legante in forma di malta oppure a secco; pausa per distaccare il materiale attaccato alla lama e alle pareti della ciotola (presso DICEA e presso PARI).....	106
Figura 4.12 - Misurazione del livello e determinazione M_t	107
Figura 4.13 - Misurazione mediante Hand vane e Laboratory vane.....	107
Figura 4.14 - Applicazione grasso spray, inizio confezionamento (presso DICEA e presso PARI) e schema disposizione della miscela nello stampo in tre strati.....	108
Figura 4.15 - Tecniche Nessuna Compattazione (N.C.) e Tapping (TA.).....	109
Figura 4.16 - Tecniche Rodding RO. e Compattazione Statica S.C.25 e S.C.50. ed esempio di provino difettoso (S.C.25 - m2).....	110
Figura 4.17 - Tecnica Compattazione Dinamica, D.C.; esempio di espulsione di miscela (D.C. - m2).	110
Figura 4.18 - Livellamento della superficie del generico provino.....	110
Figura 4.19 - Disposizione dei provini opportunamente sigillati all'interno della cassetta di maturazione.....	111
Figura 4.20 - Fasi di estrazione dei provini dalle due tipologie di stampo, con eventuale trimming.....	112
Figura 5.1 - Valori di resistenza qu per le diverse tecniche di confezionamento in funzione della lavorabilità della miscela a 7 e 28 giorni.	114
Figura 5.2 - Valori di peso di volume γ per le diverse tecniche di confezionamento in funzione della lavorabilità della miscela a 7 e 28 giorni.	114
Figura 5.3 - Valori di resistenza qu normalizzata qu_N per le diverse tecniche di confezionamento in funzione della lavorabilità della miscela a 7 e 28 giorni.	117
Figura 5.4 - Valori di peso di volume γ normalizzato γ_N per le diverse tecniche di confezionamento in funzione della lavorabilità della miscela a 7 e 28 giorni.	117
Figura 5.5 - Applicabilità di ciascuna tecnica di confezionamento rispetto al parametro N	118
Figura 5.6 - Errori relativi sulla resistenza qu , E_{qu} per le diverse tecniche di confezionamento in funzione della lavorabilità della miscela a 7 e 28 giorni.	119
Figura 5.7 - Errori relativi sul peso di volume E_γ per le diverse tecniche di confezionamento in funzione della lavorabilità della miscela a 7 e 28 giorni.	119
Figura 5.8 - Applicabilità di ciascuna tecnica di confezionamento rispetto al parametro E	120
Figura 5.9 - Indice di Applicabilità - miscele testate presso il PARI.	121
Figura 5.10 - Sezioni trasversali centrali dei provini testati.	122
Figura 5.11 - Relazione di calibrazione livello di grigio e peso di volume.....	123
Figura 5.12 - Sezioni longitudinali e distribuzione del peso di volume dei provini testati.....	123
Figura 5.13 - Curve tensione deformazione per i provini testati, a 7 e 28 giorni di maturazione.	124
Figura 5.14 - Sezioni trasversali centrali dei provini al variare della deformazione.	125
Figura 5.15 - Sezioni longitudinali centrali dei provini a fine prova.....	126
Figura 5.16 - Relazione tra conducibilità idraulica iniziale e la deformazione assiale per le diverse miscele analizzate.	127
Figura 5.17 - Andamenti della conducibilità idraulica con il volume delle fessure.	127

Figura 5.18 - Resistenza qu per le diverse tecniche di confezionamento in funzione della lavorabilità della miscela (terreno RL, riporto limoso).....	128
Figura 5.19 - Parametri normalizzati per le tre tecniche di compattazione impiegate.	132
Figura 5.20 - Errori relativi sulla resistenza qu e peso di volume in funzione della lavorabilità delle miscele testate per le tre tecniche di compattazione impiegate.....	133
Figura 5.21 - Indice di Applicabilità - miscele testate presso il DICEA.....	134
Figura 5.22 - Indice di applicabilità in funzione della lavorabilità per le diverse tecniche di confezionamento.....	135
Figura 5.23 - Caolino impiegato nello studio sperimentale.	137
Figura 5.24 - Caratteristiche tecniche del Caolino CAM40 macinato extra white (Bal-Co S.p.a.).....	137
Figura 5.25 - Relazione Momento torcente-lettura laboratory vane per $w_n > 50\%$	139
Figura 5.26 - Curva di calibrazione del metodo, riferita al materiale Caolino, fissando i parametri del miscelatore: $V_{m0} = 3dm^3$; S_{h0} = forma di “K” Kenwood; $R_{s0} = 10rpm$	140
Figura 5.27 - Schema tipo per il confronto con altri laboratori.....	141
Figura 5.28 - Valori di conducibilità idraulica in funzione della lavorabilità delle miscele e delle le tecniche di confezionamento a 28 giorni di maturazione.	142
Figura 5.29 - Sezioni tomografiche trasversale e 3D di un provino proveniente dalla miscela di laboratorio.	142
Figura 5.30 - Andamento della resistenza a compressione non confinata, qu	143
Figura 5.31 - Andamento della conducibilità idraulica, k	143
Figura A.1 - Parametri relativi alla miscelazione in laboratorio.	151
Figura A.2 - Parametri relativi alla miscelazione in sito, ottenuti a partire dallo studio di laboratorio (Figura A.1).	152
Figura A.3 - Schemi relativi alla miscelazione in sito.....	153
Figura B.1 - Peso di volume, γ , vs resistenza a compressione qu per i tre gruppi di miscele.....	154
Figura B.2 - Relazioni tra Modulo secante, E_{50} , e resistenza a compressione qu per i tre gruppi di miscele.....	154
Figura B.3 - Resistenza qu per le diverse tecniche di confezionamento in funzione della lavorabilità della miscela (terreno RL, riporto limoso).....	155
Figura B.4 - Resistenza qu per le diverse tecniche di confezionamento in funzione della lavorabilità della miscela (terreno SL, Sabbia limosa).....	155
Figura B.5 - Resistenza qu per le diverse tecniche di confezionamento in funzione della lavorabilità della miscela (terreno SG, Sabbia ghiaiosa).....	155
Figura B.6 - Resistenza qu per le diverse tecniche di confezionamento in funzione della lavorabilità della miscela (terreno AP, argilla pliocenica).	156
Figura B.7 - Resistenza qu per le diverse tecniche di confezionamento in funzione della lavorabilità della miscela (terreno PN, Pozzolana nera).	156
Figura B.8 - Resistenza qu per le diverse tecniche di confezionamento in funzione della lavorabilità della miscela (terreno PR, Pozzolana rossa).	156
Figura B.9 - Resistenza qu per le diverse tecniche di confezionamento in funzione della lavorabilità della miscela (terreno TF, Tufi argillificati).....	157

Figura B.10 - Relazioni tra Modulo secante, E_{50} , e resistenza a compressione q_u per le miscele realizzate a partire dai sette terreni reali.....	158
Figura B.11 - Andamento dei parametri N ed E - miscele testate presso il DICEA.	159
Figura B.12 - Valori del coefficiente di permeabilità in funzione della lavorabilità delle miscele e delle le tecniche di confezionamento a 7 giorni di maturazione.....	160

Indice delle Tabelle

Tabella 1.1- Parametri operativi per il metodo wet mixing (Massarsch and Topolnicki, 2005).....	8
Tabella 1.2- Parametri operativi per il metodo dry mixing	12
Tabella 1.3 - Valori tipici per terreni trattati con il Wet Deep Mixing (Bruce e Bruce 2003).	22
Tabella 1.4 - Fattori che influenzano le proprietà del terreno trattato (Terashi, 1997).....	22
Tabella 1.5 - Rapporti di resistenza a diversi giorni di maturazione.....	25
Tabella 1.6- Relazione tra modulo di elasticità e resistenza qu per diversi terreni. 27	27
Tabella 2.1 - Procedure di laboratorio esistenti nei diversi paesi (parte1/2) (adattato da Kitazume et al., 2009b).	38
Tabella 2.2 - Procedure di laboratorio esistenti nei diversi paesi (parte2/2) (adattato da Kitazume et al., 2009b).	39
Tabella 2.3 - Lista dei partecipanti e selezione dei test eseguiti nelle diverse organizzazioni.	41
Tabella 2.4 - Definizioni della funzione di Maturazione proposte in studi precedenti.	45
Tabella 3.1 - Proprietà della Kawasaki clay.....	73
Tabella 3.2 - Caratteristiche delle miscele testate presso il PARI.....	73
Tabella 3.3 - Caratteristiche dei materiali impiegati.	75
Tabella 3.4 - Composizione delle miscele studiate (percentuale in peso).....	76
Tabella 3.5 - Caratteristiche CT scanner.	77
Tabella 3.6 - Dati tecnici dispositivo di misura del momento torcente.....	79
Tabella 3.7 - Proprietà dei sette terreni romani analizzati.....	82
Tabella 3.8 - Caratteristiche delle miscele testate presso il DICEA.....	84
Tabella 3.9 - Parametri di produzione riferiti alla quota di 2m dal p.c. per uno spessore di 1 m.	86
Tabella 3.10 - Parametri di produzione relativi alla miscelazione di laboratorio. ..	87
Tabella 4.1 - Livelli di riempimento della ciotola.....	99
Tabella 4.2 - Pesì di volume stimati per ciascuna miscela terreno-legante.....	103
Tabella 4.3 - Confronto delle misure di M_t a vuoto iniziale e finale.....	111
Tabella 4.4 - Caolino con contenuti d'acqua w_n compresi nel range 0÷90%.....	138
Tabella 5.1 - Confronto visivo provini confezionati dalle miscele m2 ed m7.	115
Tabella 5.2 - Rapporti di resistenza qu_7/qu_{28} per le miscele testate.	116
Tabella 5.3 - Valori medi ottenuti per le tre miscele.	125
Tabella 5.4 - Confronto visivo provini stabilizzati (terreno di partenza SG).	129
Tabella 5.5 - Confronto visivo provini stabilizzati (terreno di partenza AP).	129
Tabella 5.6 - Rapporti di resistenza qu_7/qu_{28} per le miscele testate.	130
Tabella 5.7 - Rapporti E_{50}/qu per le miscele testate; esempio terreno RL.	131

INTRODUZIONE

Inquadramento generale della ricerca

Il *Deep Mixing* è un metodo di consolidamento efficace ed economicamente vantaggioso che consiste nel trattamento del terreno mediante miscelazione meccanica in situ con cemento, calce o altri leganti. Tale metodo prevede generalmente l'inserimento nel terreno di un utensile rotante su cui sono calettate delle eliche e/o pale miscelatrici che assicurano la disgregazione del terreno ed il rimescolamento dello stesso con il legante inserito mediante appositi ugelli. Si viene a formare così una colonna di materiale che presenta caratteristiche di resistenza, deformabilità e permeabilità migliori del terreno circostante non trattato.

Negli ultimi anni si va sempre più affermando l'impiego di tale metodologia per la realizzazione di diverse configurazioni di consolidamento dei terreni, considerando i numerosi vantaggi offerti se paragonata con le altre disponibili quali elevata produttività e limitata produzione di materiale di risulta, che ne favoriscono l'impiego soprattutto per applicazioni ambientali.

Una intensa attività di laboratorio a supporto delle procedure di *QC/QA* (controllo e assicurazione di qualità) accompagna le diverse fasi di progettazione, esecuzione e monitoraggio di un intervento *Deep Mixing* e riguarda per esempio i test di miscelazione per il confezionamento di provini di miscela terreno-legante o il prelievo di campioni di miscela fresca o indurita in situ su cui eseguire le opportune prove di laboratorio.

Pur dimostrandosi di assoluta importanza ai fini del buon esito di un intervento di *Deep Mixing*, le relative procedure di laboratorio impiegate nei processi di *QC/QA* non risultano essere ancora standardizzate a livello nazionale ed internazionale, con evidenti impatti e ricadute. Tale problematica è stata esposta nel corso della conferenza "*Deep Mixing 2005 - The International Conference on Deep Mixing Recent Advances and Best practice*" (Stockholm, Svezia) durante la quale è stato impostato uno studio internazionale, tutt'ora in corso, che ha visto la pubblicazione dei primi risultati ottenuti nella conferenza: "*Deep Mixing 2009 - International Symposium on Deep Mixing & Admixture Stabilization*", (Okinawa, Giappone).

Il programma di ricerca internazionale "*International Collaborative Study on Deep Mixing Method*" attualmente in fase di svolgimento e a cui partecipano tutti gli esperti nel settore *Deep Mixing* è coordinato dal Prof. Kitazume (Tokyo Institute of Technology, ex Port and Airport Research Institute). Lo studio mira in particolare alla standardizzazione delle procedure di *QC/QA* sui terreni stabilizzati mediante *Deep Mixing*. Gli obiettivi principali della ricerca internazionale all'interno dei quali si colloca il presente lavoro di tesi di dottorato, sono: provvedere alla redazione di standard internazionali sulla progettazione, l'esecuzione e il controllo di qualità; condurre un programma di prove di laboratorio comuni al fine di valutare l'effetto delle

procedure e condizioni di prova sulle proprietà dei terreni stabilizzati; eseguire e comparare prove in sito e in laboratorio; stimare le proprietà meccaniche e durabilità in sito mediante prove su miscele confezionate in laboratorio o a partire da campioni prelevati in sito. I risultati ottenuti dai vari soggetti partecipanti nel corso degli anni 2009 - 2015 saranno presentati nella prossima “*International Conference on Deep Mixing - 2015*”, San Francisco, USA.

Obiettivi ed articolazione del lavoro svolto

Il presente studio sperimentale si propone di fornire utili indicazioni e valido supporto verso la standardizzazione delle procedure di laboratorio impiegate nei processi di *QC/QA* (controllo ed assicurazione di qualità) associate ad un intervento di Deep Mixing. Sono in particolare affrontate la fase di miscelazione e confezionamento dei provini di miscela terreno-legante e definiti i concetti di “lavorabilità” della miscela e di “applicabilità” della tecnica di confezionamento dei provini stabilizzati. Obiettivi paralleli, comunque rientranti nell’ambito della ricerca internazionale, sono rappresentati dallo studio dell’impiego di nuovi additivi per migliorare le caratteristiche fisico-meccaniche delle miscele terreno-legante e dalla analisi comparativa fra i risultati ottenuti a partire da campioni prelevati in sito e da provini confezionati in laboratorio.

Lo studio sperimentale effettuato può essere schematicamente suddiviso in quattro parti principali che si distinguono essenzialmente per gli obiettivi preposti, per i materiali utilizzati e per i luoghi in cui si sono svolte.

La prima parte dello studio è stata eseguita presso il *Port and Airport Research Institute* (PARI), Tokyo, Giappone (Ottobre 2010 – Marzo 2011). Il lavoro svolto in una prima fase temporale è stato condotto presso il *Soil Stabilisation Group*. Lo studio mira a definire l’“applicabilità” di differenti tecniche di confezionamento dei provini stabilizzati da sottoporre alle diverse prove di laboratorio, largamente impiegate nelle varie fasi di un intervento di Deep Mixing. Il concetto di applicabilità di una tecnica di confezionamento è collegato a quello di ripetibilità dei risultati associati alla tecnica stessa e di omogeneità dei provini realizzati. A tal fine sono state confezionate nove miscele a diversa lavorabilità, impiegando come terreno l’argilla “Kawasaki Clay”, e applicando cinque tecniche di confezionamento dei provini, denominate Nessuna Compattazione, Tapping, Rodding, Compattazione Statica e Compattazione Dinamica. Sono stati ottenuti 400 provini, testati mediante prove a compressione ELL a diversi giorni di maturazione.

È stato inoltre possibile instaurare una collaborazione con il *Foundation Group* (PARI), per uno studio sull’utilizzo di nuovi materiali in ingegneria geotecnica ambientale. Scopo dello studio è quello di indagare l’effetto dell’aggiunta di “tire chips” (granulato di copertone) sulle proprietà meccaniche di una miscela terreno-cemento, da impiegare nella realizzazione di una barriera impermeabile, al fine di valutarne il mantenimento dell’efficienza prestazionale in presenza di elevate deformazioni.

Una terza parte dello studio sperimentale è stata svolta presso il laboratorio di Geotecnica del Dipartimento di Ingegneria Edile e Ambientale (DICEA) della Sapienza, Università di Roma. Questa fase ha come obiettivo l’estensione e la validazione dei risultati ottenuti nella precedente esperienza presso il PARI verso la standardizzazione delle procedure di laboratorio per differenti tipologie di terreno e lavorabilità della miscela terreno legante. Il termine “lavorabilità” è stato assunto come “la proprietà delle

miscele di essere miscelate in un contenitore e disposte in uno stampo con facilità”. La lavorabilità è un parametro di difficile quantificazione e valutazione tramite i metodi comunemente utilizzati, pertanto nel presente lavoro è stata analizzata tale problematica, proponendo una nuova procedura di misura.

Tale procedura è stata poi applicata ai casi precedentemente studiati presso il PARI (miscele a base di Kawasaki clay) e su miscele terreno-cemento realizzate a partire da sette terreni reali tipici dell’area romana per determinare le lavorabilità delle miscele. Sono così stati confezionati ulteriori 450 provini impiegando le tre tecniche Nessuna Compattazione, Tapping e Rodding, successivamente testati mediante prove di compressione ELL e prove di permeabilità a diversi giorni di maturazione.

È stata infine avviata una collaborazione con l’Università di Padova e la Bauer Group per uno studio relativo ad un campo prova di Cutter Soil Mixing in Zandvoort (Olanda). A partire dai dati di produzione dei pannelli di prova sono stati correlati i parametri di miscelazione in sito e in laboratorio. Sono state effettuate prove meccaniche e fisiche su provini di miscela terreno-legante realizzati in laboratorio seguendo il medesimo mix design.

Unitamente all’attività di laboratorio è stata condotta una ricerca bibliografica aggiornata al 2012 sullo stato dell’arte della tecnologia del Deep Mixing con particolare riguardo alle ultime innovazioni tecnologiche e alle recenti procedure di QC/QA, basata sulle più importanti pubblicazioni scientifiche e su contatti diretti con ricercatori del settore.

Struttura della tesi

La tesi è suddivisa in 5 Capitoli e 2 Appendici. Nel primo Capitolo è concentrata l’attenzione sull’impiego vantaggioso della metodologia del Deep Mixing per la realizzazione di diverse configurazioni di consolidamento dei terreni e soprattutto per applicazioni ambientali quali la realizzazione di barriere verticali impermeabili e gli interventi di Solidificazione/Stabilizzazione in presenza di siti contaminati. Nel Capitolo 2 sono descritte in dettaglio le procedure di QC/QA relative alle diverse fasi progettuali ed esecutive di un intervento Deep Mixing insieme con i risultati preliminari e gli obiettivi futuri associati allo studio internazionale. Nel Capitolo 3 sono descritti gli obiettivi, i materiali impiegati ed il programma delle prove di laboratorio relative alle diverse fasi dello studio sperimentale, schematizzabile in quattro parti principali. Le procedure di laboratorio impiegate per la valutazione della “lavorabilità” della miscela terreno-legante e per il confezionamento di provini stabilizzati vengono descritte al Capitolo 4. Infine nel Capitolo 5 sono descritti e discussi in dettaglio i risultati ottenuti nelle diverse attività sperimentali, e successivamente sono presentate le conclusioni del lavoro insieme ad una serie di raccomandazioni ed indirizzi per future ricerche ed una lista di utili riferimenti bibliografici. In Appendice A sono riportate le formule impiegate per il passaggio dei parametri di miscelazione dal laboratorio al sito, mentre in Appendice B è presentata un’integrazione ai risultati sperimentali descritti al Capitolo 5.

1. LA TECNICA DEL DEEP MIXING PER APPLICAZIONI AMBIENTALI

In base alla classificazione dei metodi di consolidamento dei terreni adottata dal Technical Committee TC 211 (ex TC 17) - Ground Improvement (riportata in Chu et al., 2009), la tecnologia del Deep Mixing rientra all'interno della Categoria "D: Consolidamento con aggiunta di miscele" ed è definita come: "trattamento del terreno mediante miscelazione meccanica in situ con cemento, calce o altri leganti".

Il Deep Mixing è un metodo di consolidamento efficace ed economicamente vantaggioso che consiste nell'inserimento nel terreno di un utensile rotante su cui sono calettate delle eliche e/o pale miscelatrici, che assicurano la disaggregazione del terreno ed il rimescolamento dello stesso con il legante inserito mediante appositi ugelli. Si viene a formare così una colonna di materiale che presenta caratteristiche di resistenza, deformabilità e permeabilità migliori del terreno circostante.

Come illustrato nel capitolo, il termine "Deep Mixing Method", DMM, comprende una serie di metodi che sfruttano lo stesso principio ma differiscono per gli utensili di miscelazione, per la modalità di inserimento della malta cementizia nel terreno, etc.

In particolare in questo capitolo si concentra l'attenzione sull'impiego vantaggioso della metodologia del Deep Mixing per la realizzazione di diverse configurazioni di consolidamento dei terreni e soprattutto per applicazioni ambientali quali la realizzazione di barriere verticali impermeabili e gli interventi di Solidificazione/Stabilizzazione in presenza di siti contaminati. Sono inoltre riportati alcuni studi relativi alle proprietà fisiche e meccaniche dei terreni trattati e alla loro durabilità nel tempo e in presenza di ambienti aggressivi.

1.1 Cenni storici

Il principio del metodo ebbe origine negli Stati Uniti dove, nel 1954, una singola coclea fu utilizzata per mescolare il legante con il terreno (Figura 1.1). In Svezia ebbe inizio nel 1967 l'utilizzo del metodo delle colonne di calce, basato sulla miscelazione in situ del terreno con calce viva per formare colonne indurite. In Giappone negli anni '60 fu sviluppato il metodo del MIP (Mixed In Place), negli anni '70 il CMC (clay mixing consolidation method), mentre nel 1975 fu messo a punto il metodo "per via umida", DCM (Deep Cement Mixing), in cui il legante veniva premiscelato con acqua e successivamente iniettato nel terreno. Il primo grande progetto offshore che ha visto l'impiego di tale metodo è il "Daikoku Pier" del 1977, durato circa 10 anni. Nel 1978 gli ingegneri giapponesi iniziarono lo studio della miscelazione meccanica profonda "a secco", su modello svedese, che portò alla messa a punto del metodo DJM (Dry Jet Mixing), il cui primo impiego risale al 1981.

Negli USA la Geocon Inc. introdusse nel 1987-89 i metodi DSM (Deep Soil Mixing) e SSM (Shallow Soil Mixing), in particolare impiegati per la realizzazione di

diaframmi di sostegno allo scavo. Lo sviluppo in Europa iniziò negli anni '80, inizialmente come alternativa economica alla tecnologia del jet grouting, in particolare MIP (Bauer, 1987), Colmix (Soletanche, 1988), Trevimix (Trevi, 1991), Keller (1995). Successivamente a questi primi sviluppi, un gran numero di aziende hanno ideato ed ottimizzato propri processi di miscelazione, elaborando un'ampia varietà di tecniche. Le terminologie impiegate per le diverse tecnologie sono riportate in Porbaha (1998) e Bruce (2005, 2011).



Figura 1.1 - Evoluzione dell'utensile di miscelazione, da quello a singola coclea fino a quello munito di più alberi rotanti con aste dotate di pale o eliche miscelatrici (Massarch and Topolnicky, 2005).

1.2 Modalità esecutive

La miscelazione meccanica del terreno avviene tipicamente tramite l'impiego di alberi rotanti cavi, dotati di uno strumento di taglio all'estremità inferiore; l'asta al di sopra dello strumento può essere munita di ulteriori pale o eliche miscelatrici che assicurino la corretta miscelazione tra il terreno e le malte introdotte. Gli alberi rotanti sono montati verticalmente su di un mezzo adatto (solitamente munito di ruote cingolate per poter lavorare sui diversi terreni) e possono essere in numero da uno a otto (tipicamente da due a quattro) per mezzo, in funzione del progetto, della variante del metodo usato e del fornitore. Il trattamento viene di solito portato a termine in due fasi. Nella prima fase l'utensile è fatto avanzare nel suolo fino alla profondità voluta, disgregando e miscelando meccanicamente il terreno; nella seconda fase, si preleva lo strumento miscelatore invertendo il verso di rotazione (Figura 1.2). L'iniezione della malta può avvenire in fase di discesa, di risalita o entrambe seguita dalla miscelazione della stessa con il suolo. Lo scopo del processo di miscelazione è quello di diffondere il legante nel terreno in modo da creare le condizioni migliori affinché avvengano le reazioni chimiche di idratazione. È molto importante quindi che le particelle di legante siano uniformemente distribuite nel volume della colonna, sia in direzione longitudinale sia trasversale, per ottenere ovunque le medesime caratteristiche di resistenza e deformazione. Si possono anche effettuare dei cicli continui di penetrazione e recupero, per migliorare la disgregazione del terreno e aumentare il grado di omogeneizzazione della miscelazione. Questo obiettivo può essere raggiunto anche modificando i parametri operativi della macchina: velocità di penetrazione e rotazione, numero di rotazioni delle lame, quantità di legante iniettato.

Ripetendo la sequenza costruttiva (le infissioni adiacenti vengono, per sicurezza, parzialmente sovrapposte), è possibile ottenere per esempio una barriera continua, formata da una serie di colonne.

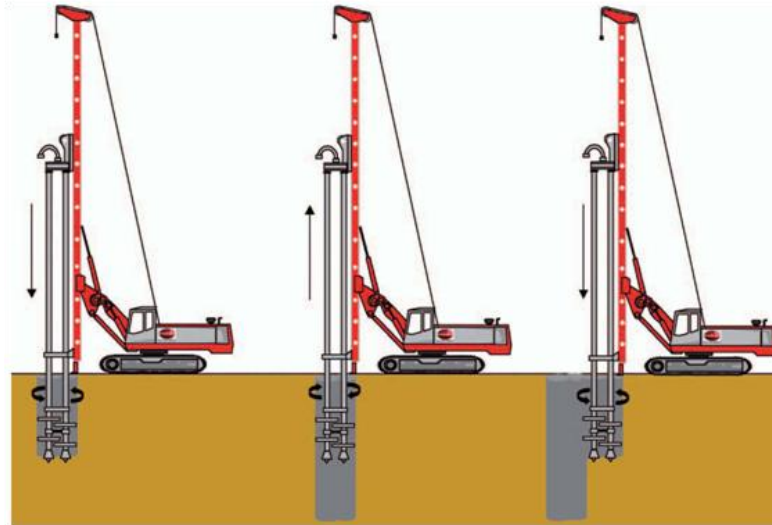


Figura 1.2 - Fasi tipiche del trattamento Deep Mixing: posizionamento e penetrazione, estrazione a rotazione invertita, colonna completata e passaggio alla verticale successiva. L'iniezione della malta cementizia può avvenire in fase di discesa, di risalita o entrambe.

Nel corso degli anni sono state ideate e realizzate diverse tecnologie di Deep Mixing, che possono essere suddivise in due grandi famiglie in funzione del metodo di miscelazione: per via umida, Wet Deep Mixing, in cui il legante viene introdotto miscelato con acqua; per via secca, Dry Deep Mixing in cui il legante, granulare o in polvere, viene introdotto mediante aria compressa (Porbaha et al., 1998). Le due alternative offrono vantaggi diversi, devono quindi essere valutate individualmente in relazione alle specifiche condizioni di sito. Oltre alla calce ed al cemento, possono essere impiegati altri agenti quali ad esempio gesso, fly ash, scorie d'alto forno, etc.

Le caratteristiche ottenibili dipendono soprattutto dal tipo di suolo di partenza, dalle variabili costruttive (principalmente il metodo di miscelazione), dai parametri operativi (come per esempio la velocità di penetrazione e di risalita, velocità di rotazione, numero di rotazione delle lame T - vedi § 1.6.1, quantità di legante introdotta e fasi di iniezione) e dalle caratteristiche dell'agente legante. E' necessario minimizzare e quantificare l'incertezza nella conoscenza dell'influenza di tali caratteristiche, tramite l'applicazione di opportune procedure di QC/QA (controllo di qualità e assicurazione di qualità) durante tutte le diverse fasi di un intervento di Deep Mixing, che includano procedure e prove di laboratorio appropriate e test in sito (§ 2).

I principi della progettazione geotecnica sono attualmente riportati nell'Eurocodice 7 ENV 1997-1 1993. Gli aspetti di progettazione relativi all'esecuzione del Deep Mixing sono descritti nelle European Standard prEn 14679 "Execution of special geotechnical works – Deep Mixing" (2004), in cui sono presenti i requisiti di costruzione e supervisione, tra cui il metodo di installazione, la scelta del legante, prove di laboratorio e in sito e i loro effetti sul comportamento finale della colonna di terreno trattato. Nella norma manca comunque la parte relativa alle procedure di laboratorio associate alle fasi di QC/QA di un intervento Deep Mixing, che quindi non risultano essere standardizzate.

1.2.1 Wet Deep Mixing

Il Wet Deep Mixing consiste nella miscelazione in sito del terreno con una miscela di acqua e legante (generalmente cemento) ed eventualmente additivi.

L'attrezzatura è costituita da una macchina operatrice con una torre di perforazione costituita da una o più aste attrezzate con porzioni di spirale (terreni incoerenti) o lame (terreni coesivi). Ogni batteria termina con un utensile di perforazione provvisto di ugelli che consentono la fuoriuscita della malta cementizia necessaria. Il legante viene precedentemente miscelato con additivi e acqua e quindi stoccato in opportuni silos. L'impianto di confezionamento e pompaggio del legante prevede un agitatore per la realizzazione della malta che successivamente passa alla pompa per l'invio alle batterie di perforazione (Figura 1.3). La quantità di legante immesso può essere modificata in funzione della tipologia di terreno incontrato.



Figura 1.3 - Macchina Deep Mixing, impianto produzione della malta e pompe (Weatherby, 2012).

Sono molteplici le tecnologie disponibili, di cui si riportano alcuni esempi in Figura 1.4. La malta cementizia può essere iniettata nel terreno in fase di penetrazione ed estrazione (*sistema mono-fase*). In tal caso è garantita una elevata velocità di estrazione ed una maggiore produttività rispetto al metodo che prevede invece l'impiego di un latte bentonitico in fase di discesa per agevolare l'inserimento delle aste miscelatrici e la successiva iniezione della malta cementizia solo in fase di risalita (*sistema bi-fase*); tale sistema garantisce però una maggiore sicurezza per lavori ad elevate profondità o in caso di interruzioni del lavoro e talvolta risulta essere l'unico metodo praticabile in presenza di terreni consistenti (Bringiotti, 2010). I valori tipici dei parametri operativi utilizzati per la realizzazione di interventi di Deep Mixing con il metodo wet in Europa e in Giappone sono riportati nella Tabella 1.1.

Tabella 1.1- Parametri operativi per il metodo wet mixing (Massarsch and Topolnicki, 2005)

Parametro	Europa	Giappone	Giappone (mare)
Velocità di penetrazione (m/min)	0.5 ÷ 1.5	1.0	1.0
Velocità di recupero (m/min)	3.0 ÷ 5.0	0.7 ÷ 1.0	1.0
Velocità di rotazione delle lame (riv/min)	25 ÷ 50	20 ÷ 40	20 ÷ 60
Quantità di legante iniettato (kg/m ³)	80 ÷ 450	70 ÷ 300	70 ÷ 300
Fase di iniezione	Penetrazione e/o recupero	Penetrazione e/o recupero	Penetrazione e/o recupero



Figura 1.4 - Metodi wet mixing in Giappone, U.S.A. ed Europa (Yoshida, 2002; Burke, 2002; Topolnicky, 2003).

Un metodo di miscelazione del terreno per eseguire setti continui nel sottosuolo sviluppato di recente è il metodo TRD (Trench cutting Remixing Deep wall method, Kamon, 2000; Sehn, 2012). Attraverso il movimento continuo della catena montata sul “cutter post”, la miscela intorno alla fresa forma vortici e avviene una miscelazione turbolenta che coinvolge l’intera verticale di trattamento, con possibilità di aumentare il grado di omogeneizzazione della miscela terreno-legante anche in presenza di terreni stratificati e annullando la presenza di giunti (elementi di debolezza del sistema). La profondità dello strumento miscelatore viene modificata inserendo o eliminando gli elementi che costituiscono il cutter post (Figura 1.5).



Figura 1.5 - Metodo TRD: schema, elementi del cutter post e lavorazione in corso (Sehn, 2012).

Sviluppo parallelo del metodo è rappresentato dalla tecnologia Trench mixing (Borel, 2007), in cui viene utilizzato un elemento miscelatore continuo e non scomponibile, che può essere impiegato fino a profondità di circa 8 m (Figura 1.6). È possibile inviare sia una malta cementizia (wet method) che prevedere l’impiego di un legante in polvere che viene disposto nella trincea di guida (dry method). Tali tecnologie possono essere adoperate con successo per interventi di cinturazione di siti contaminati, come per esempio riportato da Al Tabbaa et al. (2009), per i vantaggi insiti nella creazione di un diaframma continuo in assenza di giunzioni (§ 1.4.1). Borel (2007) e Mosser e Arcos (2012) riportano anche l’impiego di uno strumento miscelatore avente due lame miscelatrici che si espandono alla profondità desiderata mediante l’azionamento di molle (Figura 1.7). Tale strumento viene in particolare utilizzato per il consolidamento di rilevati ferroviari, visto che permette l’esecuzione di fori di installazione di dimensioni ridotte (diametro 168mm) che garantiscono una maggiore

semplicità di inserimento attraverso il ballast, riducendo il rischio di collasso del foro e garantendo un diametro delle colonne di terreno trattato pari a circa 400mm.

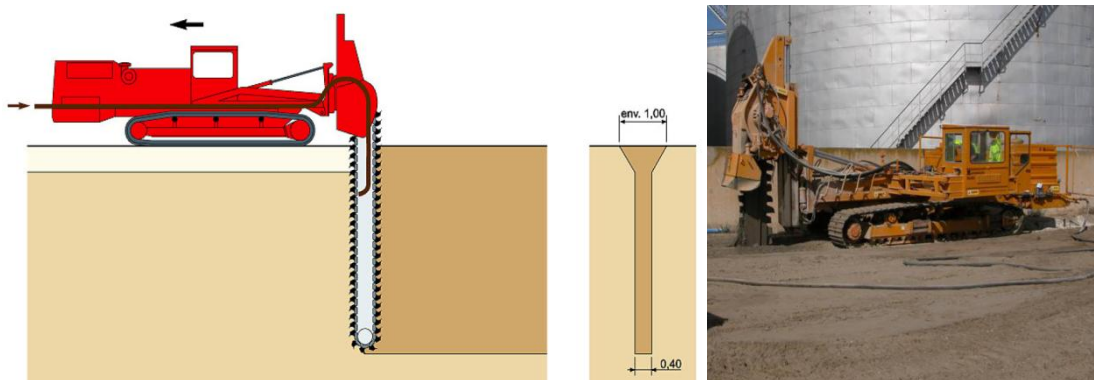


Figura 1.6 - Metodo Trenchmix, Soletanche Bachy, wet method (Borel, 2007).

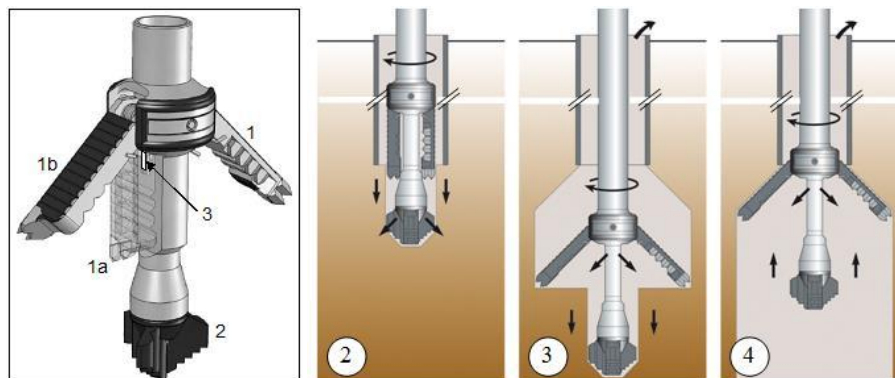


Figura 1.7 - Testa miscelatrice e sequenza costruttiva (Mosser e Arcos, 2012).

La possibilità di adottare le classiche tecnologie del Deep Mixing è fortemente legata alla stratigrafia del sito. Infatti l'avanzamento con le eliche o pale, può essere molto difficoltoso in terreni con frazioni ghiaiose dell'ordine del 30% e, in alcuni casi, in corrispondenza di livelli francamente ghiaiosi e/o litoidi, l'avanzamento può essere addirittura impedito. Il metodo *Cutter Soil Mixing*, CSM, sviluppato da una collaborazione tra Bauer e Soletanche Bachy iniziata nel 2003, estende l'utilizzo della tecnica wet mixing anche ai terreni più consistenti e alle rocce tenere (Figura 1.8).



Figura 1.8 - Cutter Soil Mixing, CSM, tecnologia Bauer e Soletanche Bachy (Deschamps 2012).

La tecnologia CSM fa uso di due set di ruote fresanti che girano su di un asse orizzontale; due sistemi di trasmissione sono connessi ad uno speciale supporto il quale,

a sua volta, viene collegato e connesso ad un sistema di prolunga *kelly*. Il kelly è montato sul mast principale della macchina di scavo per mezzo di due slitte che guidano ed estraggono l'utensile e, se necessario, lo ruotano. Durante la fase di discesa delle teste fresanti il terreno viene frantumato e disgregato dalle ruote mentre al contempo il latte bentonitico o la malta cementizia viene iniettata da un apposito ugello situato tra le teste stesse; durante la fase di estrazione la rotazione è regolata in maniera tale da mescolare il legante con il terreno e formare un pannello rettangolare.

1.2.2 Dry Deep Mixing

Nel Dry Deep Mixing il presupposto affinché possano avvenire le reazioni chimiche che legano le molecole d'acqua presenti nel terreno alle molecole di legante è ovviamente che il terreno sia immerso in falda o che comunque presenti un livello d'umidità sufficiente al completo sviluppo delle reazioni di idratazione. L'attrezzatura necessaria è di dimensioni decisamente inferiori rispetto a quella richiesta per il wet mixing, ed è costituita dal gruppo principale di perforazione e trattamento, da un gruppo di stoccaggio ed invio del legante in polvere e da un gruppo di stoccaggio dell'aria compressa (Figura 1.9); se necessario è presente anche un gruppo di alimentazione d'acqua per umidificare eventuali livelli aridi. Tale metodo prevede generalmente l'immissione del legante in fase di risalita, per evitare che la miscela terreno-legante inizi a far presa già in fase di penetrazione e si possano quindi avere problemi nel recuperare l'utensile miscelatore. Le quantità di refluo prodotto sono notevolmente inferiori (a volte pari a zero) rispetto all'impiego del metodo wet mixing.



Figura 1.9 - Trattamento dry mixing (Bohem, 2012).

Le due principali tecniche di miscelazione a secco sono la DJM Dry Jet Mixing ed il metodo della colonna calce-cemento, oggi definite rispettivamente come tecnica "giapponese" e "nordica" secondo la norma UNI EN 14679 (2005). Sono riportate in Tabella 1.2 le principali differenze tra i due metodi.

I macchinari impiegati per il metodo Wet montano generalmente il motore elettrico sopra le aste rotanti, in modo da agevolare con il peso proprio la fase di penetrazione; ciò porta ad eventuali problemi di instabilità del macchinario quando l'asta è alzata del tutto (massa concentrata) e a una maggiore potenza dei motori impiegati, per estrarre le aste (e il motore) una volta raggiunta la profondità di

trattamento. Nei macchinari impiegati per il metodo Dry, tipicamente più leggeri, il motore è generalmente posizionato in basso, quindi è necessario considerare una spinta aggiuntiva in fase di penetrazione, perché il peso delle sole aste potrebbe non essere sufficiente.

Tabella 1.2- Parametri operativi per il metodo dry mixing

Parametro	Nord Europa	Giappone
Velocità di penetrazione (m/min)	2.0 ÷ 6.0	1.0 ÷ 2.0
Velocità di recupero (m/min)	1.5 ÷ 6.0	0.7 ÷ 0.9
Velocità di rotazione delle lame (riv/min)	100 ÷ 200	24 ÷ 64
Quantità di legante iniettato (kg/m ³)	100 ÷ 250	100 ÷ 300
Fase di iniezione	Recupero	Penetrazione e/o Recupero

Un innovativo macchinario Dry mixing è quello utilizzato per la stabilizzazione di massa (§ 1.4.2) (Figura 1.10), che prevede l'attacco di un opportuno utensile miscelatore su di un escavatore con iniezione del legante nel terreno in corrispondenza del tamburo rotante miscelatore (Hoikkala et al., 1996). Tale strumentazione di miscelazione superficiale si rivela particolarmente economica per profondità fino a 3-5m ed in presenza di aree di trattamento estese. Un recente sviluppo è rappresentato dall'unità di miscelazione ALLU PMX, dotato di rulli inclinati e struttura affusolata che garantiscono una penetrazione ottimale anche attraverso le superfici più dure (ALLU, 2007).



Figura 1.10 - Tecnologia ALLU per la stabilizzazione di massa (ALLU, 2007).

1.3 Classificazione Deep Mixing Method (DMM)

Esistono all'incirca 24 metodi che vanno sotto il nome di Deep Mixing. In Figura 1.11 è rappresentata la classificazione dei Deep Mixing Method (DMM) secondo Bruce (2011), che aggiorna la precedente catalogazione del 2005, basata sulle seguenti caratteristiche:

- a) Il mezzo con cui viene introdotto il legante: aria compressa nel caso del Dry mixing (D) o miscela d'acqua nel caso del Wet mixing (W).
- b) Il metodo di penetrazione nel terreno e/o di immissione dell'agente legante: sfruttando solamente la rotazione con il legante introdotto ad una pressione relativamente bassa (R) o rotazione della trivella con jet-iniezione della miscela ad alte pressioni (J).

c) La posizione, o distanza verticale degli ugelli che immettono la miscela nel terreno: in alcuni sistemi, la miscela è immessa solamente alla estremità dell'asta (o entro un diametro di colonna da tale estremità) (E), mentre in altri sistemi la miscelazione avviene per tutta la lunghezza (o per una porzione significativa) dell'asta (S).

La classificazione del 2011 tiene in conto l'introduzione di tecnologie innovative quali il CSM e il TRD, descritte in precedenza (§1.2.1). Viene quindi operata una distinzione circa l'orientamento dell'asse di rotazione delle eliche disgregatrici: verticale, orizzontale o creazione di una trincea continua. Segue la classica distinzione tra Wet e Dry mixing, a Rotazione (R) e a Jettinazione (J) esclusivamente per le eliche ad asse di rotazione verticale.

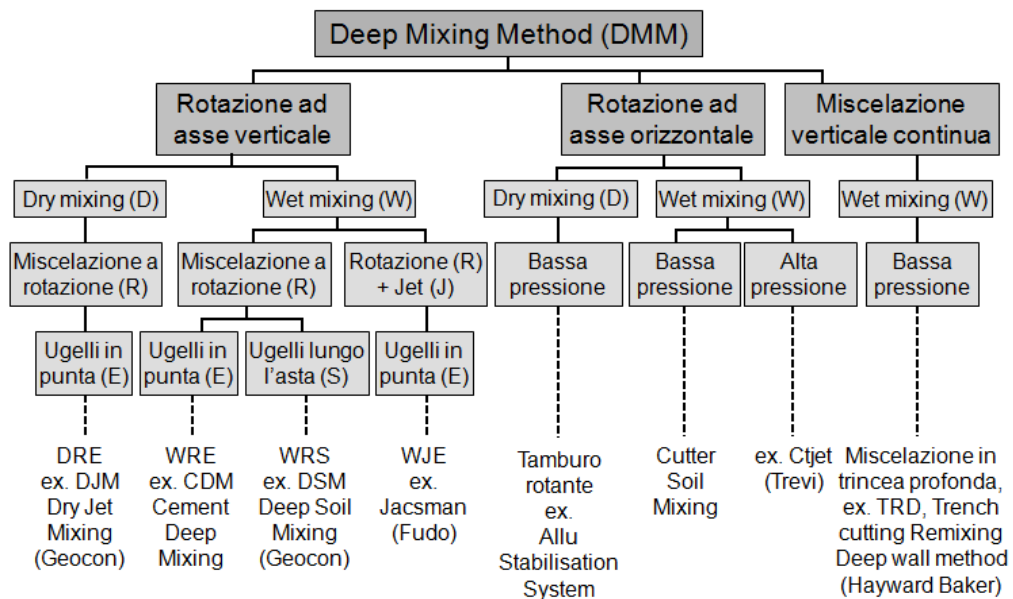


Figura 1.11 - Classificazione aggiornata DMM (adattata da Bruce, 2011).

1.4 Configurazioni e Applicazioni del trattamento Deep Mixing

In funzione delle applicazioni, gli elementi colonnari di terreno trattato possono essere realizzati secondo molteplici geometrie, mostrate in Figura 1.12, che prevedono l'esecuzione di singoli elementi (fondazioni di opere), la realizzazione di file continue di colonne sovrapposte (sostegno allo scavo, stabilità di argini, barriere verticali), il trattamento a griglia (riduzione rischio di liquefazione) o il trattamento massivo (consolidamento dei terreni, stabilizzazione di terreni contaminati) (Porbaha et al. 1998).

La geometria scelta dipende, oltre che dallo scopo dell'intervento di miglioramento dei terreni, anche dalle capacità meccaniche e dalle caratteristiche del metodo di Deep Mixing utilizzato.

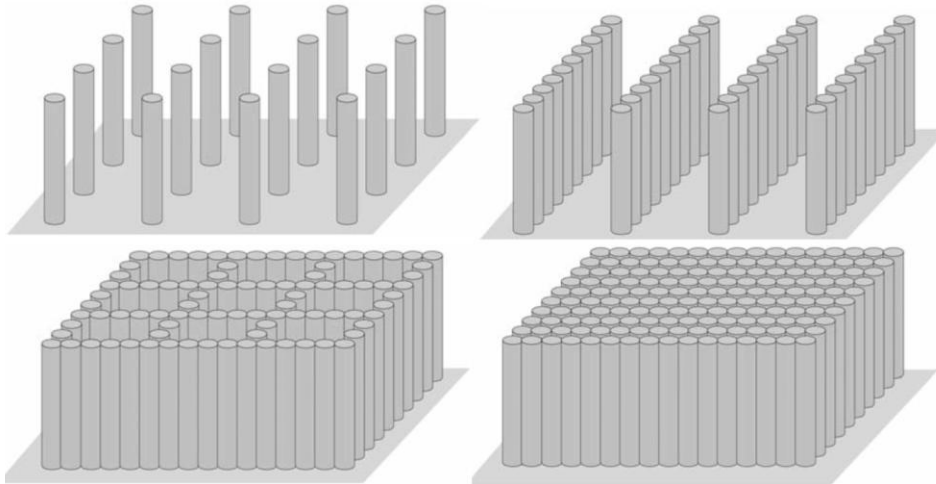


Figura 1.12 - Configurazioni tipiche di terreno trattato.

Per quanto riguarda le applicazioni ambientali, si fa riferimento in particolare alle barriere verticali impermeabili e al trattamento di stabilizzazione/solidificazione.

1.4.1 Barriere verticali impermeabili

Il confinamento dei siti contaminati mediante cinturazione con diaframmi verticali, rappresenta uno degli interventi più diffusi per contenere e delimitare flussi di sostanze inquinanti nel sottosuolo (Figura 1.13) Il loro utilizzo è previsto nel caso in cui la bonifica di un'area contaminata risultasse impraticabile, per via dei rischi connessi alle operazioni di scavo e trasporto, o nel caso l'estensione della contaminazione sia tale da rendere gli altri provvedimenti troppo costosi (D.lgs 152/2006).

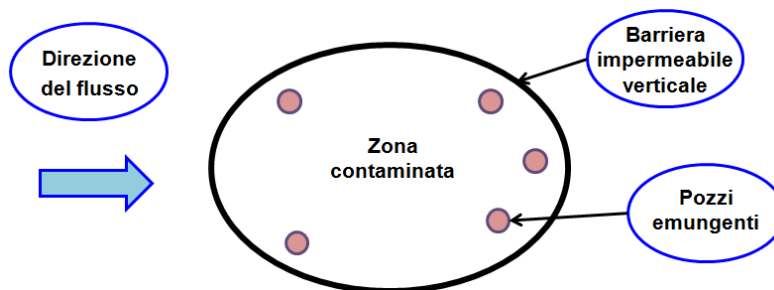


Figura 1.13 - Schema semplificato di cinturazione mediante barriera verticale.

Tra le varie tecnologie esecutive disponibili per la costruzione dei diaframmi, l'impiego del Deep Mixing è confermato essere una delle scelte più efficaci (Al-Tabbaa et al., 2011). L'impiego di tale tecnica presenta diversi vantaggi legati alla possibilità di realizzare una barriera continua senza asportazione e movimentazione del terreno inquinato. Ulteriori vantaggi sono legati alla maggiore velocità di produzione, elevato controllo di qualità, minore rumore rispetto alle tecniche convenzionali dei diaframmi plastici o delle barriere ad infissione (palancolati) (Day and Ryan, 1995). Tali paratie sono create da una serie di colonne di terreno trattato a bassa permeabilità sovrapposte tra loro in modo tale da intercettare i moti di filtrazione dell'acqua (Figura 1.14).

La barriera continua di colonne sovrapposte può avere uno spessore variabile tra i 50 e 90 cm per profondità anche di 40 m. Il coefficiente di permeabilità è fortemente influenzato dal tipo di terreno: valori inferiori a $1 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ possono comunque essere raggiunti. Si richiama il fatto che i diaframmi con funzione di barriera idraulica di

protezione ambientale devono avere, secondo normativa, un coefficiente di permeabilità a 28 giorni inferiore a 1×10^{-9} m/s.

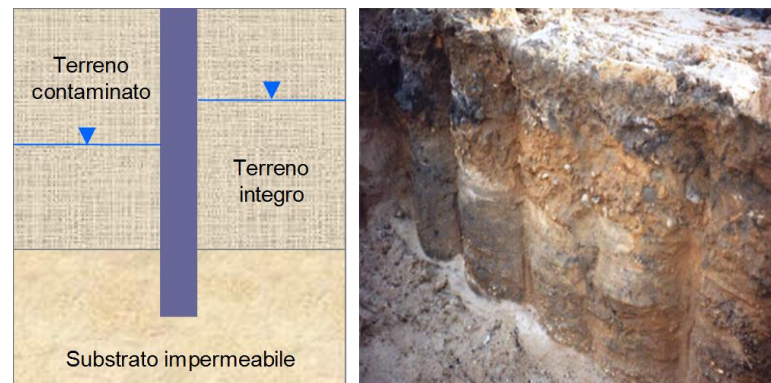


Figura 1.14 - Cinturazione mediante barriera verticale in Deep Mixing.

Le colonne attraversano generalmente gli strati più permeabili per andare ad intestarsi nel substrato impermeabile. Spesso si prevedono dei cicli aggiuntivi di penetrazione e recupero concentrati nella parte inferiore della colonna per assicurare una migliore miscelazione e omogeneità di trattamento in corrispondenza dell'immorsamento con il substrato: tale fase viene comunemente denominata "bottoming". Le miscele da impiegare nel trattamento possono essere addizionate con una serie di reagenti per ridurre la dispersione del suolo contaminato. Assolutamente necessari si rivelano essere quindi gli studi preliminari in laboratorio per la scelta della miscela di progetto (Al-Tabbaa e Evans, 1999).

Per assicurare la continuità strutturale ed idraulica del diaframma, i singoli pannelli devono essere scavati in modo da risultare verticali, con una tolleranza non superiore allo 0,2% in entrambe le direzioni (parallela x e perpendicolare y all'asse del diaframma, Figura 1.15, riferita all'impiego del metodo CSM).

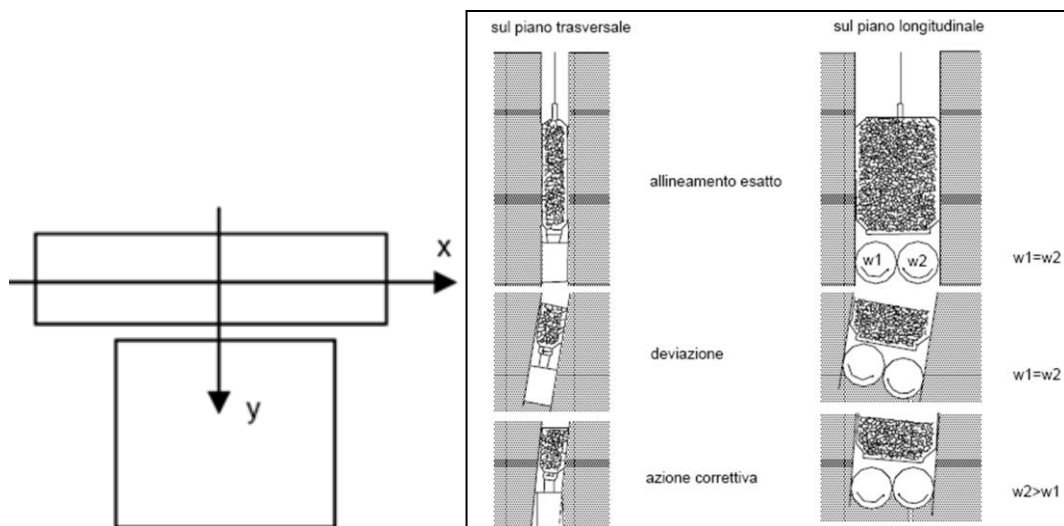


Figura 1.15 - Controllo della verticalità sul piano trasversale e longitudinale (CSM).

Per rispettare questi valori, il pannello viene scavato monitorando in maniera accurata e continua, in funzione della profondità, ogni deviazione dalla verticale in entrambe le direzioni, per consentire all'operatore di intervenire immediatamente e

correggere ogni tendenza ad ulteriori deviazioni dalla verticale. Considerando il caso dell'impiego del metodo CSM, è possibile cambiare l'inclinazione del pannello:

- per correggere la deviazione lungo la x, modificando la direzione di rotazione delle ruote o la velocità di rotazione delle stesse.

- per intervenire lungo la y, si può interrompere l'avanzamento, eseguire un breve tratto in risalita e vibrare leggermente il mast; successivamente riprendere l'avanzamento.

Rispetto alle realizzazioni Deep Mixing con tecniche rotary tradizionali, con il CSM si possono ottenere direttamente paratie e diaframmi di geometria regolare evitando gli elevati sfridi classici delle tecniche a rotazione. Quando consideriamo un muro di colonne secanti, i diametri delle colonne devono essere più grandi dello spessore del pannello rettangolare per produrre una sezione di larghezza equivalente. Questo significa che quando usiamo la tecnica CSM tratteremo una quantità minore di terreno per ottenere lo stesso effetto; chiaramente questo significa risparmiare energia e materiale (Figura 1.16). Riguardo i diaframmi idraulici nei quali è di fondamentale importanza la corretta realizzazione dei giunti ai fini della tenuta, la tecnologia CSM permette la realizzazione di elementi continui con adeguate sovrapposizioni dei pannelli senza particolari problemi. Nei diaframmi di colonne intersecanti, invece, ottenere la continuità risulta più difficoltoso essendo maggiori il numero di giunzioni presenti a parità di estensione del diaframma. Maggiormente vantaggioso sotto tale aspetto risulta essere l'impiego delle tecnologie TRD o Trenchmix (§ 1.2.1), mediante le quali è possibile realizzare una barriera continua in assenza di giunti, anche se sono presenti delle limitazioni relativamente agli spessori della diaframma e alle profondità raggiungibili.

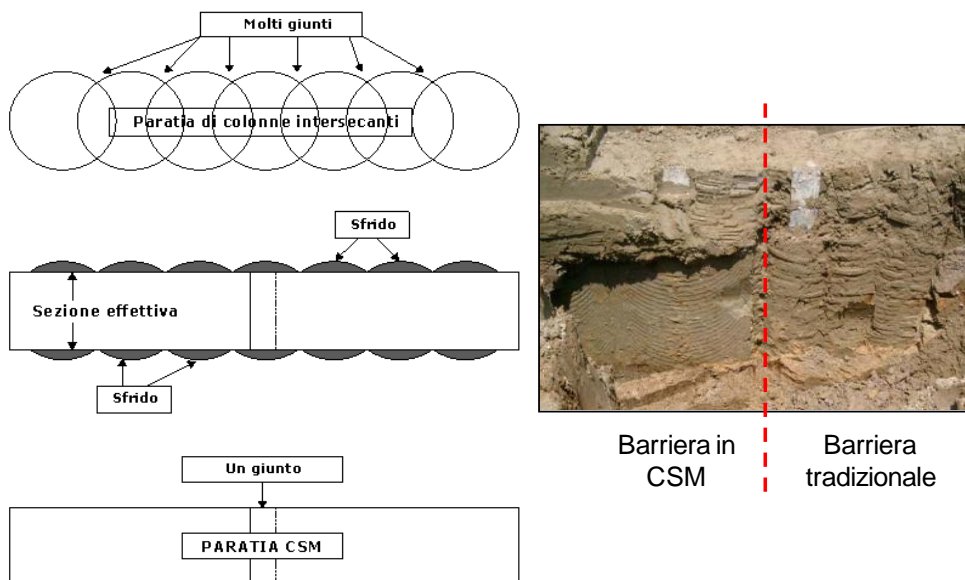


Figura 1.16 - Confronto CSM con metodi DM colonnari nell'esecuzione di barriere verticali.

In alcuni casi i diaframmi realizzati possono essere soggetti a fratturazione originata da movimenti del terreno con componente trasversale alla barriera che possono accadere in seguito all'applicazione di carichi asimmetrici o forti differenze di gradiente tra monte e valle dell'opera (Figura 1.17). Tale problema può compromettere l'integrità e la funzionalità della barriera.

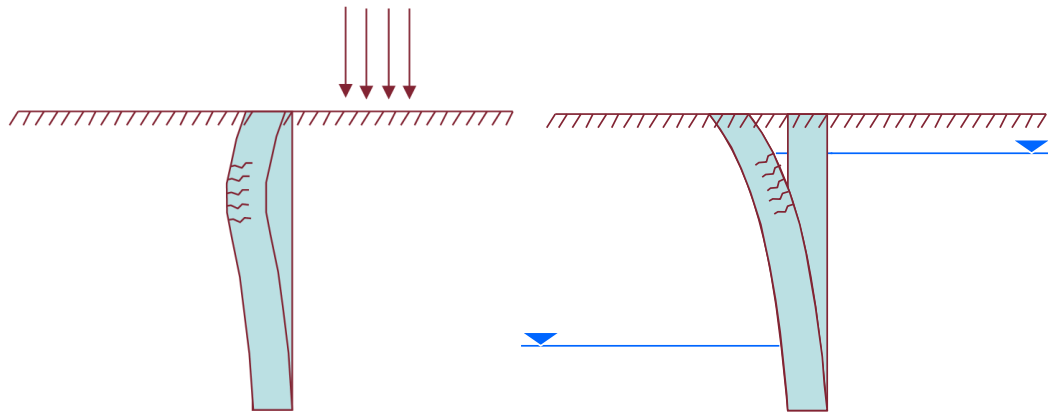


Figura 1.17 - Schemi di fratturazione nel diaframma per carichi asimmetrici.

Yasuhara (2007) Hazarika et al. (2010) propongono a tal fine l'impiego di "tire chips" (granulato di copertone) in aggiunta a miscele terreno-cemento al fine di aumentarne la duttilità, evitando il comportamento fragile e con la possibilità quindi di garantire l'efficienza prestazionale in presenza di elevate deformazioni. Le "tire chips" sono realizzate separando automaticamente la gomma del copertone dal ferro e dalla fibra tessile in modo da formare un prodotto finale di gomma caratterizzato da opportune granulometrie (Figura 1.18). Ulteriori applicazioni geotecniche di tale materiale riguardano l'impiego come materiale di riempimento per rilevati o a tergo di muri di sostegno, strato di smorzamento delle vibrazioni, strato di isolamento antigelo, strato drenante nelle discariche (Humphrey, 2003).



Figura 1.18 - Produzione di tire chips.

1.4.2 Stabilizzazione di massa e Solidificazione/Stabilizzazione

La stabilizzazione di massa è un metodo veloce ed economico per il miglioramento della capacità portante di un terreno per mezzo dell'aggiunta di legante nel terreno da trattare, in particolare impiegata per diverse tipologie di argilla, torba e altri terreni dalle caratteristiche scadenti. Questo metodo può essere altresì utilizzato per la lavorazione di materiali contaminati e l'incapsulazione di agenti contaminanti, e in tal caso si parla di Solidificazione/Stabilizzazione (S/S). L'obiettivo dei processi di S/S, è ridurre la mobilità dei contaminanti presenti nel terreno, prevenendo o limitando al minimo il loro trasferimento nell'ambiente. Tale obiettivo viene conseguito riducendo la superficie disponibile per la percolazione, mediante la creazione di una matrice solida compatta (solidificazione) e/o legando chimicamente il contaminante alla matrice solida (stabilizzazione). Tale applicazione è nata inizialmente come soluzione per il trattamento di rifiuti preliminarmente al loro smaltimento in discarica, ultimamente è stata mutuata in una tecnica di bonifica dei suoli e dei sedimenti contaminati come

quelli portuali. La tecnica di S/S può essere applicata secondo due modalità ‘in situ’ ed ‘ex situ’. La prima modalità riguarda l’impiego della tecnologia del DM, attraverso la penetrazione dell’utensile in profondità, l’iniezione dell’additivo (ad esempio cemento, calce viva, composti a base di Ferro zero-valente o a base di Idrossido di Ferro, zeoliti e ceneri volanti) e la sua miscelazione con il terreno inquinato. Un estensivo stato dell’arte riguardo l’impiego della tecnologia del Deep Mixing ai fini della stabilizzazione/solidificazione è riportato da Al-Tabbaa e Perera (2005a; 2005b; 2005c) e Perera et al. (2005a; 2005b; 2005c). La modalità ‘ex situ’ prevede l’asportazione di materiale e il trasporto verso aree di trattamento e la successiva ricollocazione in sito. Le diverse movimentazioni non fanno che aumentare l’onere economico a carico di un progetto del genere, motivo per cui si preferisce il trattamento di S/S in situ.

Wilk (2012) riporta diversi casi reali che hanno previsto l’impiego della tecnologia del Deep Mixing per la stabilizzazione/solidificazione di terreni contaminati, con profondità tipiche di circa 7÷9m (Figura 1.19). In presenza di terreni da trattare superficiali (fino a 3-5m) può risultare conveniente ricorrere alla stabilizzazione di massa mediante l’utensile miscelatore illustrato in Figura 1.10.



Figura 1.19 - Applicazioni Deep Mixing per la stabilizzazione/solidificazione di terreni contaminati.

1.5 Vantaggi

Come illustrato nel paragrafo precedente, il metodo Deep Mixing appare particolarmente versatile per le diverse applicazioni di ingegneria civile e ambientale. Tuttavia tale metodo risulta applicabile con successo, a prescindere da considerazioni di tipo economico, in presenza di terreni né troppo rigidi né troppo densi, che non contengano massi o ostruzioni. I vantaggi principali del metodo sono di seguito elencati:

- Scarse vibrazioni e rumore medio-basso: gli scavi possono essere eseguiti anche in prossimità di fondazioni di edifici;
- Bassi costi di smaltimento: dal momento che il suolo è trattato in-situ, la quantità di materiale rimosso è generalmente pari al volume di miscela addizionata, tra il 10% e 30 % del volume trattato, che può anche risultare nulla in caso di trattamento Dry mixing. Se si ha a che fare con suoli contaminati è ovvio che il risparmio dei costi di smaltimento è significativo;
- Capacità di raggiungere elevate profondità: le profondità tipiche di trattamento sono intorno ai 25 m, ma con le più recenti tecnologie possono anche essere

raggiunte profondità pari a 60 m. I limiti sono principalmente legati al tempo e alla tipologia di terreni;

- Minor ingombro di cantiere: dal momento che le lavorazioni sono effettuate in sito non vi è bisogno di spazi in superficie per la miscelazione;
- Possibilità di controllo “real time” del trattamento e alta produttività, soprattutto per i più recenti macchinari.

1.6 Fattori che influenzano il processo di miscelazione

La tecnica di installazione è essenziale per poter assicurare una miscelazione omogenea ed efficace in sito. Sono ancora pochi gli studi condotti sul processo, sui meccanismi di miscelazione e sulle tecniche di installazione. Vi sono due categorie di requisiti che riguardano i processi di installazione e i fattori che necessitano considerazione (Larsson, 2005):

- a) Fattori che influenzano l’installazione che dovrebbero essere studiati simultaneamente:
 - Geometria dello strumento di miscelazione;
 - Tasso di risalita;
 - Velocità di rotazione;
 - Pressione d’alimentazione e quantità d’aria;
 - Diametro dell’ugello di fuoriuscita del legante;
 - Tipo di macchina e operatore;
 - Stato tensionale in sito durante l’installazione.
- b) Ulteriori fattori che influenzano il processo di miscelazione e che devono essere valutati:
 - Proprietà reologiche del terreno, sia trattato sia non trattato;
 - Tipo e quantità di legante;
 - Stato tensionale in sito durante la maturazione.

I fattori della categoria (b) sono stati studiati in laboratorio da molti ricercatori e saranno discussi più avanti e nei paragrafi § 3.4 e 5. La conoscenza riguardo i fattori appartenenti alla categoria (a) è basata solo su prove di laboratorio e sono poche le prove in sito eseguite, tuttavia alcuni dei parametri menzionati compaiono nella “numero di rotazione delle lame, T (o Blade Rotation Number, BRN), discusso nel paragrafo seguente.

1.6.1 Numero di rotazione delle lame, parametro T

E’ oggi ben noto che lo sforzo efficace ha influenza sul processo di miscelazione e sui relativi risultati: un tempo di miscelazione maggiore aumenta lo sforzo efficace trasmesso e la diffusione del legante nel terreno. Nei paesi scandinavi il valore di recupero (mm/giro) dell’utensile viene collegato al tempo di miscelazione, mentre l’intensità di miscelazione è funzione della velocità di rotazione. In Giappone, invece, il tempo di miscelazione viene connesso con la velocità di penetrazione, la velocità di recupero e di rotazione. Un’idea comune dei ricercatori per aumentare la resistenza e migliorare la qualità della miscela è quella di dotare l’utensile di numerose lame o pale in modo da realizzare più lavoro di miscelazione.

Per fornire una misura del tempo di miscelazione questi parametri sono correlati nel Blade Rotation Number (espresso in giri/m), comunemente chiamato T (Yoshizawa et al., 1997) o anche BRN (Bohem, 2012). Un valore più alto di tale parametro è indice di una migliore qualità del trattamento.

La formulazione generale riportata da Hayashi & Nishikawa (1999) prevede la possibilità di iniezione (parziale o totale) del legante durante la penetrazione (ugelli attivati al di sotto delle lame) ed iniezione della quantità di legante rimanente durante la risalita (ugelli attivati al di sopra delle lame):

$$T = M \times \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{N_d}{V_d} \right) \times \left(\frac{W_i}{W} \right) + \left(\frac{N_u}{V_u} \right) \right]$$

dove:

n rappresenta il numero di cicli di miscelazione completa (penetrazione più recupero) che in alcuni casi possono essere in valore maggiore di 1;

M è il numero di pale dell'utensile;

Nd/Nu sono le velocità di rotazione dell'utensile durante le fasi di penetrazione/recupero [giri/min];

Vd/Vu sono le velocità di penetrazione/recupero dell'utensile [m/ min];

Wi è la quantità di legante immesso durante la penetrazione [kg/m³], mentre W è la quantità totale di legante immesso [kg/m³]. Nel caso di completa iniezione della malta cementizia durante la penetrazione il termine Wi/W vale quindi 1.

Nel caso di completa iniezione della malta cementizia durante la risalita l'equazione si semplifica quindi in:

$$T = M \times \sum_{i=1}^n \left(\frac{N_u}{V_u} \right).$$

Dalle equazioni sopra riportate si nota come a parità di numero di pale dell'utensile e di velocità di risalita, vi sia bisogno di una maggiore velocità di rotazione, nel metodo ad iniezione durante la fase di risalita, per ottenere un grado di miscelazione comparabile con quello del metodo ad iniezione durante la fase di penetrazione.

Una serie di prove di laboratorio hanno dimostrato che il grado di miscelazione ed il numero di giri rivestono importanza fondamentale per la resistenza finale, e hanno portato alla definizione di un valore limite del parametro T che possa assicurare un buon trattamento Deep Mixing. Da esperienze di campo su sabbie sciolte e argille giapponesi trattate mediante metodo Wet il valore di T = 360 giri/m è stato definito come limite minimo corrispondente ad una accettabile variazione della resistenza a compressione lungo la colonna di terreno trattato, e tale valore viene spesso considerato come riferimento per garantire una miscelazione omogenea ed uniforme (CDIT, 2002; Figura 1.20).

Per il metodo Dry, Bohem (2012) consiglia valori variabili in funzione del tipo di terreno: per Torbe e terreni organici: T > 400; per Limi e Argille sabbiose: T > 300; per Argille e Argille limose: T > 200. Topolnicky (2012), basandosi su 66 prove su provini cubici (lato 20 cm) prelevati in sito, suggerisce un valore di T > 430 giri/m al

fine di garantire una corretta miscelazione e in particolare una buona omogeneizzazione del materiale terreno-legante, associata ad una minore variabilità nei risultati.

In Svezia, invece, per la misura del tempo di miscelazione viene utilizzata la velocità di recupero (mm/giro) dell'utensile. I numeri di cicli per metro di colonna T possono essere calcolati come (Larsson, 2005):

$$T = M \times \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{s} \right)$$

dove: s è la velocità di recupero dell'utensile [mm/giro].

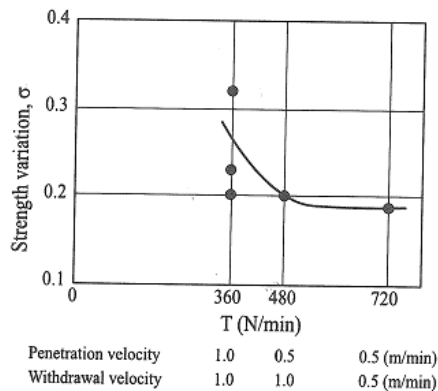


Figura 1.20 - Relazione tra il blade rotation number T e la deviazione standard della resistenza di terreno trattato in sito σ (CDIT 2002).

1.6.2 Tipologie di legante

I leganti più usati per il trattamento dei terreni sono il cemento e la calce. Tuttavia si assiste ad una continua innovazione in tale ambito, con uno sviluppo di nuovi composti, anche miscele di più leganti sempre più diffuso, come testimoniato dai numerosi studi presenti in letteratura (Brandl, 1999; CDIT, 2002; Åhnberg et al., 2003; Al Tabbaa, A. e Perera, A.S.R., 2005b e 2005c; Larsson, 2005; Yi et al. 2012). Una trattazione estesa dei principali leganti impiegati, dei principi che regolano il consolidamento e dei processi di stabilizzazione dei terreni è riportata da Larsson (2005) e Marzano (2009). Alcune indicazioni riguardo l'influenza del tipo e della quantità di legante sulle proprietà fisiche e meccaniche dei terreni trattati sono riportate in § 1.7.

1.7 Proprietà dei terreni trattati

Sono stati svolti molti studi sulle proprietà fisiche e meccaniche dei terreni stabilizzati (particolarmente argille), sulle interazioni tra terreno trattato e non, sui metodi di progettazione e di esecuzione e sul controllo di qualità. Quando la malta cementizia è mescolata con il terreno, si arriva a produrre un materiale che possiede migliori caratteristiche di resistenza, permeabilità e compressibilità rispetto al suolo di partenza, sebbene il peso dell'unità di volume totale possa risultare inferiore. Le caratteristiche ottenute rispecchiano quelle del terreno nativo, della tecnica di Deep Mixing utilizzata, delle fasi operative e delle caratteristiche del legante. Secondo Bruce e Bruce (2003) i valori tipici del terreno trattato sono tipicamente compresi nei range

riportati in Tabella 1.3, che rivela che i terreni coesivi hanno bisogno di un maggiore quantità di legante per fornire valori comparabili di resistenza rispetto a quelli granulari.

Tabella 1.3 - Valori tipici per terreni trattati con il Wet Deep Mixing (Bruce e Bruce 2003).

Proprietà	Range tipici
Resistenza a compressione ELL, qu , a 28 giorni (MPa)	0.5 - 5 in terreni granulari e 0.2 - 2 terreni coesivi
Rapporto qu 28 giorni: qu 7 giorni	1.4 - 1.5 per limi e argille, 2 per sabbie
Rapporto qu 60 giorni: qu 28 giorni	1.5, il rapporto 15anni:60giorni può essere > 3
Coefficiente di Permeabilità (m/s)	1×10^{-6} - 1×10^{-9}
Modulo secante E_{50}	(350 - 1000) x qu per campioni di laboratorio e (150 - 500) x qu per campioni in sito
Resistenza a trazione	Tipicamente 0.08 - 0.14 x qu

1.7.1 Differenze tra proprietà ricavate in laboratorio e in sito

Le proprietà di un terreno trattato dipende da numerosi fattori, come riassunto da Terashi (1997) (Tabella 1.4). Secondo l'autore il processo di miscelazione non può essere simulato correttamente in laboratorio, ad eccezione della quantità e tipo di legante e tempo di maturazione. Ad esempio in laboratorio i provini vengono di norma mescolati molte volte di più rispetto a quanto si faccia effettivamente in sito.

Tabella 1.4 - Fattori che influenzano le proprietà del terreno trattato (Terashi, 1997).

I	Caratteristiche dell'agente di indurimento	1. Tipo dell'agente di indurimento; 2. Qualità; 3. Acqua e additivi di miscelazione.
II	Caratteristiche e condizioni del terreno (importante specialmente per le argille)	1. Proprietà fisiche, chimiche e biologiche del suolo; 2. Contenuto organico; 3. Ph dell'acqua nei pori; 4. Contenuto d'acqua.
III	Condizioni di miscelazione	1. Grado di miscelazione; 2. Durata della miscelazione/ri-miscelazione; 3. Qualità dell'agente di indurimento.
IV	Condizioni di maturazione	1. Temperatura; 2. Tempo di maturazione; 3. Umidità; 4. Cicli di gelo/disgelo, imbibizione/essiccamento, etc.

Tuttavia le indicazioni ottenibili dallo studio preliminare di laboratorio (§ 2.1, 2.2) forniscono una preziosa stima preliminare delle proprietà del terreno trattato raggiungibili in sito e la possibilità di valutare la tipologia e il dosaggio dei leganti da utilizzare e quindi individuare i parametri del trattamento. Inoltre possono essere sviluppate relazioni empiriche indicative delle differenze riscontrate tra sito e laboratorio, e a tal fine risulta necessario applicare una procedura di confezionamento standardizzata per ottenere risultati consistenti e comparabili. Sebbene le procedure di

miscelazione e confezionamento dei provini in laboratorio influenzano fortemente i risultati ottenibili, non sono attualmente disponibili degli standard di riferimento. Questo aspetto, alla base della ricerca internazionale attualmente in corso, è ampiamente trattato in § 2.2, 2.7, 3.1. Nonostante le problematiche riportate, sono disponibili alcuni studi in letteratura che si propongono di comparare i risultati ottenuti da prove in situ e in laboratorio e possono fornire alcune indicazioni in merito.

Åhnberg (2003) ha studiato la conducibilità idraulica di argille svedesi stabilizzate. In Figura 1.21 è mostrato un confronto tra i valori di coefficiente di permeabilità k ricavati in situ e in laboratorio relativamente a terreni svedesi stabilizzati con calce, calce-cemento e cemento. La resistenza dei terreni stabilizzati è stata determinata in laboratorio tramite prove ELL e in situ tramite test penetrometrici sulle colonne trattate. Come è possibile vedere in figura, i valori di k ricavati in situ risultano maggiori rispetto a quelli di laboratorio, sebbene le differenze siano contenute. Questo perché la permeabilità in situ è in genere influenzata negativamente da una distribuzione e miscelazione irregolare dei leganti e dallo sviluppo di microfratture e fessure nelle colonne; dopo il ritiro della sbarra di installazione possono inoltre presentarsi una zona più porosa o vuoti lasciati aperti al centro della colonna. La variabilità dei risultati ottenuti in situ è dovuta ai diversi metodi utilizzati per il calcolo della permeabilità che per esempio impieghino permeametri. Risulta anche importante considerare il punto di prova, in quanto (Bergwall e Falksund, 1996) hanno riscontrato una differenza di ben 20 volte tra la permeabilità di campioni prelevati nella zona centrale e quelli presi a metà strada fra il centro e la periferia della colonna di calce-cemento.

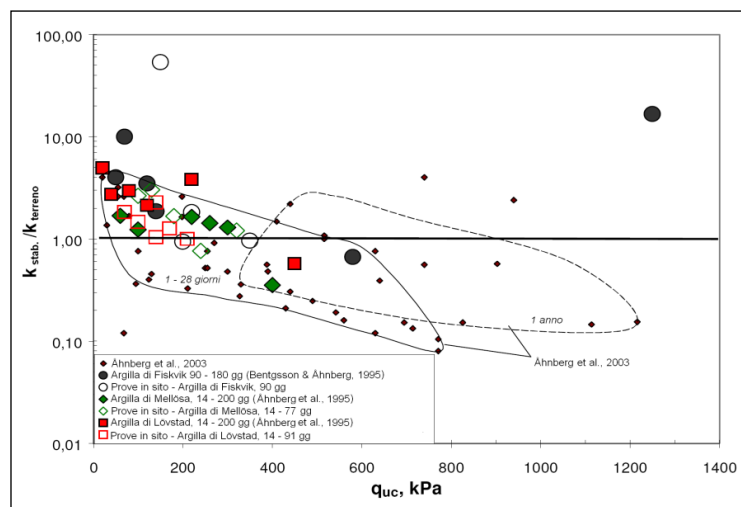


Figura 1.21 - Permeabilità di terreni stabilizzati misurati in diverse investigazioni in relazione alla resistenza q_{uc} dei terreni stabilizzati. ■●◆ provini laboratorio; □◇ colonne sito (Åhnberg, 2003).

La resistenza finale dei terreni trattati in situ è influenzata da molti fattori: tecnica esecutiva utilizzata, condizioni ambientali, parametri esecutivi e soprattutto eterogeneità del terreno trattato. Per tali motivi la resistenza ottenuta in situ risulta essere generalmente minore rispetto quello trovata in laboratorio. La Figura 1.22 rappresenta il rapporto tra resistenza in situ e in laboratorio in funzione dei diversi autori di studi. Come si può notare è difficile ricavare una relazione empirica tra le due resistenze poiché nella variabilità intervengono, oltre ai fattori strettamente legati al processo di miscelazione, altri fattori come ad esempio la tecnica di confezionamento utilizzata, strettamente dipendente dal laboratorio in cui vengono eseguiti gli studi.

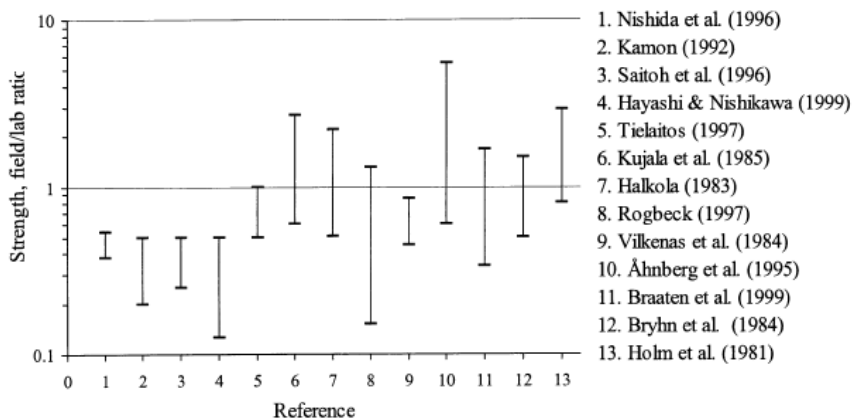


Figura 1.22 - Relazione tra i valori di resistenza in sito rispetto quelli ricavati su provini di laboratorio in funzione dei diversi studi (Larsson, 2005).

Esistono molti studi che affrontano il tema della valutazione della resistenza in sito a partire da quella trovata in laboratorio, tematica di assoluta importanza in fase di progettazione. Porbaha et al (2000) ed EuroSoilStab (2001) riportano i valori del rapporto di resistenze qu_f/qu_l (valori di resistenza qu in sito /valori di resistenza qu in laboratorio) variabili nel range 1/5-1/2 ottenuti per terreni Giapponesi e Svedesi.

Secondo JGS0821 (2000), il rapporto di resistenze qu_f/qu_l varia in funzione del tipo di terreno, ed è pari a 1/3-1 per terreni argillosi e 1/2-1 per terreni sabbiosi. Terashi (2005) riporta una correlazione simile per terreni argillosi, per il Wet e Dry mixing: per entrambe le tecniche i valori del rapporto qu_f/qu_l sono compresi tra 1 e 1/3.

1.7.2 Conducibilità idraulica

La conducibilità idraulica (o coefficiente di permeabilità, k) di un terreno trattato è un aspetto principale della progettazione di diaframmi con funzione di barriera verticale. Tale parametro è fondamentale anche per valutare qualunque disturbo arrecato alle limitrofe acque di falda. Possono infatti verificarsi abbassamenti nella pressione artesiani o possibili infiltrazioni delle sostanze usate come leganti dalle colonne. La Figura 1.23 mostra una diminuzione della permeabilità di un'argilla trattata all'aumentare del contenuto di cemento o calce (Brandl, 1999; Åhnberg et al., 2003).

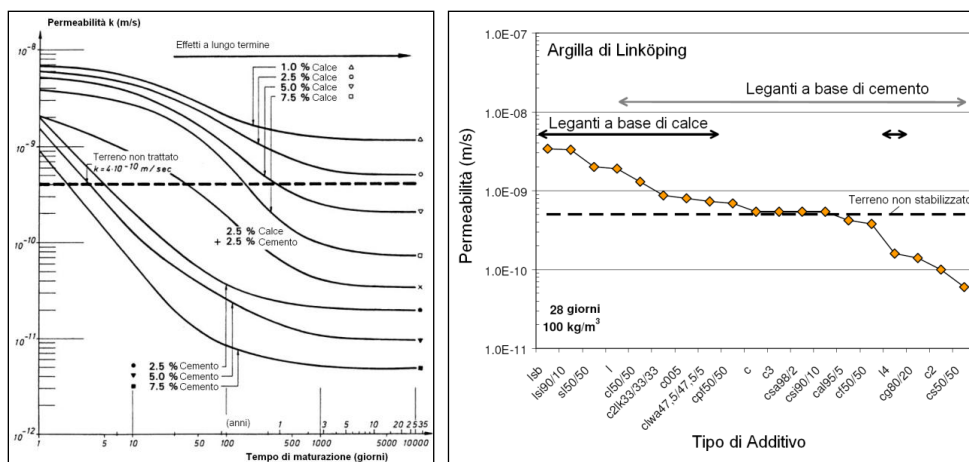


Figura 1.23 - Influenza del tempo di maturazione e del tipo e quantità di legante sulla permeabilità k di argille stabilizzate (Brandl, 1999; Åhnberg, 2003).

Brandl (1999) riporta una riduzione pari a un ordine di grandezza quando il contenuto di cemento passa da 2,5% a 7,5% e una diminuzione del coefficiente di permeabilità nel tempo dopo la stabilizzazione fino a raggiungere valori minori di 10^{-11} m/s dopo un anno con un contenuto di cemento pari al 7,5%. Åhnberg et al. (2003) hanno studiato la permeabilità di una argille svedese (Linköping) stabilizzata. Sono stati utilizzati leganti tradizionali, come cemento e calce viva, ma anche leganti basati su scorie di altoforno e fly ash. Sono state usate diverse quantità di legante, come 50 kg/m^3 o 150 kg/m^3 , ma principalmente una quantità pari a 100 kg/m^3 . I valori di conducibilità idraulica individuati per le argille stabilizzate a 28 giorni sono riportati in Figura 1.23. Come osservato da entrambi gli autori, la permeabilità dei provini stabilizzati mediante calce è nella maggior parte dei casi più alta di quelli stabilizzati tramite l'uso di leganti a base di cemento e anche di quella del terreno di partenza non trattato.

Yi (2012) suggerisce l'impiego di Magnesia reattiva (MgO) al posto di cemento Portland e Calce additivati alle scorie d'altoforno (GGBS) per la stabilizzazione di terreni sabbiosi, con vantaggi di tipo prestazionale ed economici. La miscela terreno-GGBS-MgO ha fornito infatti maggiori valori di resistenza e minori valori di coefficienti di permeabilità specialmente a lungo termine (90 giorni), garantendo inoltre costi inferiori rispetto al cemento Portland.

1.7.3 Resistenza a compressione non confinata

La prova a compressione ad espansione laterale libera (prova ELL o UCS), che permette la determinazione della resistenza q_u (§ 3.5.1) è il test più usato, sia per la sua semplicità sia per i bassi costi. Bisogna comunque tener conto dei limiti di tale prova soprattutto per quanto riguarda l'assenza di confinamento che non permette quindi di simulare le reali condizioni in situ. Il valore della resistenza q_u dipende principalmente dal tipo e quantità di legante usato, dalle proprietà chimiche e geotecniche del terreno e dal tempo di maturazione.

La resistenza dei terreni trattati con il cemento aumenta con il tempo, in maniera analoga a quanto succede per il calcestruzzo. Diversi autori hanno ottenuto delle relazioni riportate in Tabella 1.5 che legano i valori di resistenza a diversi tempi di maturazione (7, 28, 60 e 91 giorni). Tali relazioni, pur essendo state valutate in laboratorio, possono essere impiegate per ottenere una rapida stima dell'andamento della resistenza in sito con il tempo, per esempio eseguendo delle prove su campioni prelevati in fase di campo prova a 7 giorni di maturazione (§ 2.4). Le relazioni riportate differiscono tra loro, sia per i diversi tipi di terreni testati sia per le diverse quantità di cemento usate per la stabilizzazione.

Tabella 1.5 - Rapporti di resistenza a diversi giorni di maturazione.

Autore	q_{u7}/q_{u28}	q_{u60}/q_{u28}	q_{u91}/q_{u28}	Terreno
Kawasaki et al. (1981)	0,50 - 0,70	1,17	-	Argille marine
CDM (1994)	0,64 - 0,68	-	1,20 - 1,33	Terreni argillosi
Åhnberg et al. (2003)	0,40 - 0,70	-	1,20 - 1,40	Argilla
Suzuki e Kawamura (2009)	0,50 - 0,60	1,20 - 1,40	1,60 - 2,20	Argilla limosa

q_{u7} , q_{u28} , q_{u60} e q_{u91} = valori di resistenza del terreno trattato dopo 7, 28, 60 e 91 giorni

Il tipo di legante (e gli eventuali additivi) ha diversi effetti sulla resistenza dei terreni trattati, a seconda delle diverse reazioni che possono manifestarsi. Åhnberg et al. (2003) e Van Impe et al. (2007) hanno studiato l'effetto del tempo e del tipo di legante su diversi terreni stabilizzati, ed è possibile notare in Figura 1.24 e Figura 1.25 gli andamenti della resistenza col tempo. È possibile constatare come l'incremento di resistenza diminuisca con il tempo. Dallo studio di Åhnberg et al. (2003) appare evidente l'iniziale rapido aumento della resistenza per i leganti a base cementizia. Per quanto riguarda la calce (l), essa presenta un incremento lineare di resistenza su un lungo periodo di tempo. Si può inoltre notare che: il legante cemento-fly ash (cf) porta ai minori valori di resistenza; l'utilizzo di scorie-calce (sl) porta a risultati molto diversi in relazione al tipo di terreno, in particolare porta ad un aumento considerevole di resistenza dopo tre mesi per l'argilla Loftabro. Dai risultati di Van Impe et al. (2007) si nota come i valori di resistenza ottenuti per la Torba siano sensibilmente inferiori rispetto agli altri terreni.

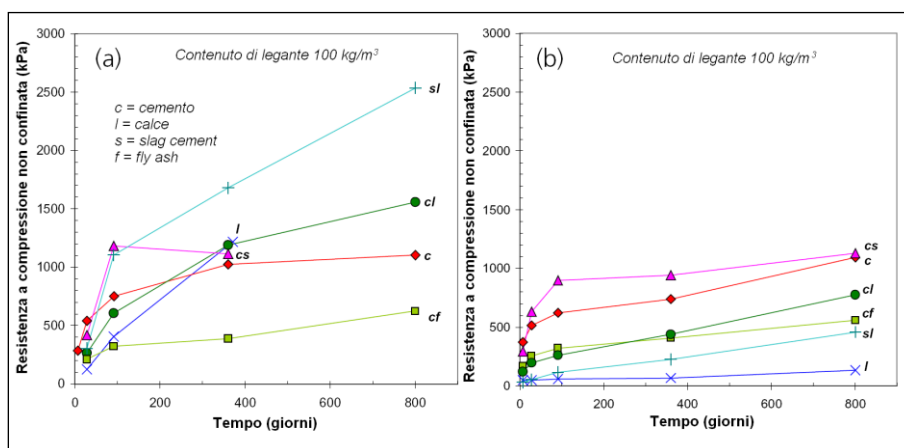


Figura 1.24 - Resistenze misurate nel tempo in relazione a diversi leganti per (a) argilla di Löftabro e (b) argilla di Linköping (Åhnberg et al., 2003).

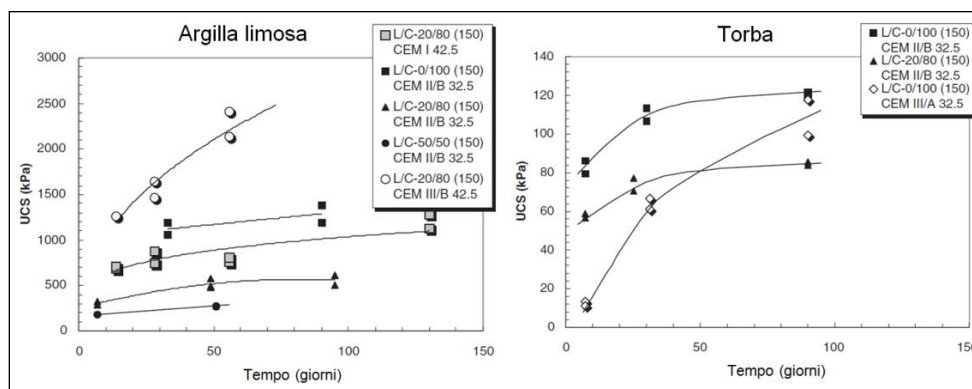


Figura 1.25 - Resistenze a compressione UCS misurate nel tempo in relazione a diversi leganti (cemento Portland, CEM I; cemento composito CEM II; cemento con scorie d'altoforno CEM III) per Argilla limosa e Torba (Van Impe et al., 2007).

Per quanto riguarda l'effetto della temperatura di maturazione in letteratura si possono trovare svariati studi in base ai quali l'aumento della temperatura di maturazione si riflette in una accelerazione dei processi di idratazione e quindi nel tasso di incremento della resistenza del terreno trattato. Tale aspetto è anche trattato in § 2.2.3.

1.7.4 Modulo di elasticità

Molti autori riportano una correlazione tra il modulo di elasticità E_{50} (secante al 50% della deformazione ultima) per i terreni stabilizzati e i valori UCS, per diversi tipi di terreni e contenuti di legante (Porbaha et al., 2000). Va notato che la relazione tra l' E_{50} e i valori UCS è una funzione del contenuto d'acqua dell'argilla originaria e della quantità di legante usata per la stabilizzazione.

In Tabella 1.6 si riportano alcune relazioni da letteratura. I dati riportati da Saitoh et al. (1980) sono stati ottenuti a partire dai risultati relativi ad argille soffici di aree portuali in Giappone trattate con cemento Portland. Le relazioni riportate da Bruce e Bruce (2003) si riferiscono sia a provini confezionati in laboratorio che a campioni prelevati in sito. O'Rourke et al. (1998) riportano valori relativi all'argilla blu di Boston stabilizzata con cemento (GeoTesting Express, 1996).

Tabella 1.6- Relazione tra modulo di elasticità e resistenza q_u per diversi terreni.

Relazioni	Riferimento
$350 q_u < E_{50} < 1000 q_u$	Saitoh et al. (1980)
$100 q_u < E_{50} < 250 q_u$	Futaki et al. (1996)
$140 q_u < E_{50} < 500 q_u$	Asano et al. (1996)
$50 q_u < E_{50} < 150 q_u$	GeoTesting Express (1996)
$150 q_u < E_{50} < 400 q_u$	Goh et al. (1999)
$75 q_u < E_{50} < 1000 q_u$	Terashi et al. (1977)
$350 q_u < E_{50} < 1000 q_u$ da provini laboratorio	Bruce e Bruce (2003)
$150 q_u < E_{50} < 500 q_u$ da campioni in sito	
$E_{50} = 110 q_u$	Van Impe et al. (2007)
$60 q_u < E_{50} < 250 q_u$	Grisolia et al. (2010)

1.8 Durabilità dell'intervento

Con il termine durabilità si intende l'abilità del materiale a mantenere la propria stabilità e integrità negli anni di esposizione ai vari ambienti aggressivi e alle varie condizioni climatiche. Esistono diversi meccanismi di degradazione che possono influenzare le proprietà a lungo termine di un materiale stabilizzato. È perciò di vitale importanza identificare e comprendere questi meccanismi potenzialmente distruttivi, che possono essere fisici, chimici o biologici. È possibile effettuare una suddivisione in azioni intrinseche o estrinseche. Azioni intrinseche sono per esempio il risultato di una lavorazione inadeguata, di una progettazione carente, delle reazioni tra i leganti e i componenti dei rifiuti e delle reazioni tra diversi componenti dei rifiuti. Azioni estrinseche sono invece un risultato dell'ambiente a cui è sottoposto il materiale trattato, come per esempio alterazioni fisiche e chimiche, danneggiamenti meccanici, attacco biologico e attacco di acque aggressive. Le ragioni di una progettazione e lavorazione scadenti vanno individuate e superate all'inizio del programma di lavoro, altrimenti possono portare direttamente (si intende il caso di cedimenti differenziali, di riduzione o non uniformità della resistenza, dovuti a una miscelazione non adeguata, ad una più alta porosità, ad una più alta percolazione, etc.) o indirettamente (più alta percolazione dei contaminanti dovuta ad una più alta porosità, miscelazione impropria, etc.) al malfunzionamento del sistema. Le carenze nella progettazione possono essere superate

conducendo studi appropriati sui leganti e sui contaminanti coinvolti e sulla quantità di acqua usata. Sebbene tali studi siano condotti su una scala temporale ristretta, se eseguiti correttamente risultano sufficienti a capire il comportamento iniziale delle miscele ed eliminano le avversità che possono manifestarsi. Una lavorazione inadeguata può essere evitata eseguendo dei campi prova per capire quali sono i problemi che si potrebbero incontrare nella lavorazione, ad esempio scarsa miscelazione dovuta a insufficienza d'acqua. L'adozione di procedure di controllo di qualità idonee riduce notevolmente le conseguenze negative associate a una non corretta lavorazione.

Onimaru et al. (2009) riporta un confronto tra i valori di resistenza a compressione a lungo termine (fino a circa 8,5 anni) relativi a campioni carotati in sito. In tale occasione era stato impiegato un cemento Portland con scorie di alto forno tipo B per stabilizzare un terreno costituito da alternanze di sabbia fina con limo argilloso, con falda acquifera presente a 1,0m dal piano campagna. Nella Figura 1.26 è illustrata la distribuzione con la profondità dopo 28, 60 giorni e 8,5 anni dall'esecuzione, dalla quale si evince non solo il mantenimento della resistenza iniziale ma addirittura un incremento della stessa pari in alcuni punti a 1,50 - 2 volte.

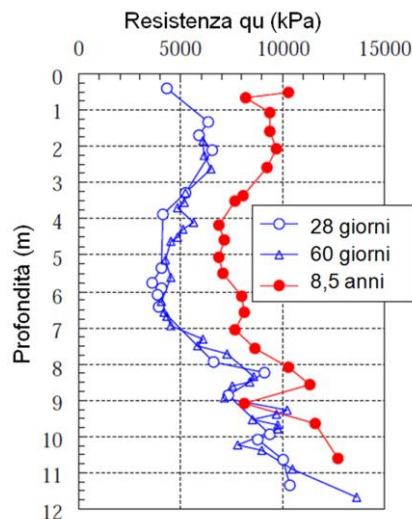


Figura 1.26 - Distribuzione con la profondità della resistenza q_u a diversi tempi di maturazione (Onimaru et al., 2009).

1.8.1 Meccanismi di degradazione del cemento

Le principali forme di attacco sono state schematizzabili in due principali categorie: meccanismi di degradazione primaria e secondaria. Si procede di seguito con una breve descrizione dei principali fattori.

Meccanismi di degradazione primaria:

Carbonatazione: E' il processo in cui l'anidride carbonica reagisce con i prodotti dell'idratazione dei materiali trattati con cemento, tra cui l'idrato calcio-silicato (CSH) e idrossido di calcio (Ca(OH)_2) formando il carbonato di calcio (CaCO_3). Come conseguenza il pH del fluido nei pori interstiziali diminuisce. La velocità a cui avviene la reazione di carbonatazione dipende da molti fattori come ad esempio la concentrazione di CO_2 , l'umidità dell'atmosfera limitrofa, la permeabilità dei materiali, la temperatura e la tipologia di leganti usati. La carbonatazione di per sé non causa il

deterioramento del materiale ma può avere un effetto negativo sulla microstruttura (Neville, 1997). Può ad esempio causare variazioni di volume, aumento di permeabilità e fessurazione e quindi una diminuzione di resistenza. Di contro si verifica un aumento della resistenza a causa della precipitazione di CaCO_3 negli spazi interstiziali. Il predominio di uno dei due eventi dipende dalle circostanze della situazione. La riduzione di pH causa una corrosione di eventuali rinforzi in acciaio presenti nel cemento e, come già visto precedentemente, determina una maggiore solubilità dei metalli pesanti, evento ancora più grave che potrebbe portare a livelli inaccettabili la dispersione di inquinanti nell'ambiente circostante.

Attacco dei solfati: è il processo naturale per cui i solfati presenti nel legante (es : gesso) reagiscono chimicamente con i composti presenti nel cemento. La velocità a cui avviene la reazione dipende da molti fattori come ad esempio concentrazione e tipo di solfato, quantità di idrossido di calcio e di alluminio, contenuto di cemento, rapporto acqua/cemento, porosità e permeabilità. L'attacco dei solfati nel calcestruzzo è caratterizzato dall'espansione, che causa perdita di resistenza e rigidità, fratture e spalling (rottura per trazione) ed eventuale disintegrazione. Il cemento Portland è particolarmente suscettibile a tali attacchi motivo per cui sono stati introdotti dei cementi pozzolanici e cemento Portland con scorie di alta fornace per minimizzare gli effetti.

Meccanismi di degradazione secondaria:

Danni causati da cicli di gelo e disgelo: Secondo tale processo, l'acqua presente nei pori ghiaccia quando la temperatura scende, andando ad aumentare il suo volume di circa il 9% e successivamente si scioglie con l'aumentare della temperatura. La ciclicità del processo non fa che aumentare i danni causati al materiale. I fattori che influenzano il processo sono: la quantità di acqua ghiacciabile, le condizioni di esposizione, la dimensione dei pori e la porosità in relazione alla permeabilità, il tasso di assorbimento e il grado di saturazione. L'azione di gelo causa fessure e fratture che dipartono dalla superficie e gradualmente si espandono all'interno. Il principale accorgimento da adottare per contrastare il fenomeno è diminuire la permeabilità del materiale e l'assorbimento. Altre forme di contrasto possono essere la protezione del materiale al di sotto di uno spessore di terreno (generalmente 1 m).

Danni causati da cicli di essiccazione e imbibimento: Anche questo fenomeno è ciclico causato da fluttuazione del livello di falda. I danni si presentano sotto forma di fratture causate dall'espansione del materiale dovuta all'assorbimento di acqua da parte del cemento. Può essere contrastato diminuendo la permeabilità del materiale e utilizzando cemento di ottima qualità.

1.8.2 Meccanismi di degradazione di terreni stabilizzati non contaminati

Sherwood (1993) ha delineato i fattori predominanti che incidono sulla resistenza di terreno trattato con calce o cemento: la composizione chimica e fisica del suolo e le condizioni del terreno circostante, in particolare temperatura e umidità del suolo. I costituenti del terreno sono suddivisi in dannosi e vantaggiosi a seconda dell'effetto chimico che hanno sul suolo stabilizzato; appartengono alla prima categoria la sostanza organica, i solfati e i solfuri e l'anidride carbonica. Esistono ad oggi pochi studi che affrontano la diminuzione nel tempo della resistenza di colonne trattate di terreno non contaminato dovuta a meccanismi di degradazione; tra questi ad esempio

Baghdadi (2001), Kitazume et al. (2003) e Hayashi et al (2003). Il meccanismo di degradazione menzionato in queste referenze sembrerebbe collegato principalmente all'ambiente circostante e causato dal filtraggio del calcio dal materiale trattato a quello non trattato. Tale fenomeno si verifica a causa della presenza di calce libera e per la degradazione dei principali prodotti della reazione di idratazione. Kitazume et al (2003) hanno studiato come generalmente i meccanismi di degradazione inizino alle estremità della colonna per poi penetrare all'interno con l'andare del tempo. Hayashi et al.(2003) hanno condotto studi di campo su colonne Deep Mixing di 17 anni di età: il filtraggio del calcio era avvenuta dal materiale trattato a quello non trattato ma la riduzione di resistenza della zona più esterna era esigua. Inoltre la resistenza del centro della colonna era aumentata con il passare del tempo a conferma del fatto che la regione esterna è quella maggiormente soggetta a meccanismi di degradazione.

Osman (2007) riporta l'effetto di una parziale sostituzione del cemento con zeoliti (minerali costituiti da una struttura cristallina a base di alluminosilicati) sulla durabilità di argille stabilizzate. Sono stati preparati provini di argilla stabilizzati con cemento portland ordinario (PC), PC con aggiunta di bentonite, PC e cenere volante e infine PC e zeoliti. Tali provini sono stati immersi in una soluzione di solfato di sodio (5% di concentrazione) e acido solforico (0,5% di concentrazione) per un tempo prefissato. Le Figura 1.27 e Figura 1.28 mostrano l'evidente degradazione di tutti i provini fatta eccezione di quelli stabilizzati con PC- zeoliti.



Figura 1.27 - da sinistra verso destra: provini di argilla stabilizzata con PC e immersi in soluzione di solfato sodico per 18 giorni e soluzione di acido solforico per 36 giorni; provini di argilla stabilizzata con PC-bentonite immersi per 4 giorni in soluzione di solfato sodico; soluzione di acido solforico (Osman, 2007).



Figura 1.28 - da sinistra verso destra: provini di argilla stabilizzata con PC-cenere volante e esposti a soluzione di solfato di sodio 10% di cenere volante per 68 giorni e 50% di cenere volante per 12 giorni; provini di argilla stabilizzata con PC-zeoliti immersi per 1.5 anni in soluzione di solfato sodico e soluzione di acido solforico (Osman, 2007).

1.8.3 Meccanismi di degradazione di terreni stabilizzati contaminati

Esistono molteplici meccanismi di degradazione che potrebbero influenzare il comportamento di sedimenti o terreno contaminato stabilizzati /solidificati mediante calce o cemento. È quindi di vitale importanza cercare di identificarli e capire quale

potrebbe essere quello potenzialmente più distruttivo, causato da azioni fisiche, chimiche o biologiche. I meccanismi di degradazione riguardano soprattutto un ritardo (e in alcune volte un mancato) nell'inizio della reazione di idratazione che corrisponde quindi ad una riduzione di valori di resistenza rispetto a quelli ottenuti con legante non contaminato. Nonostante questo, le condizioni per l'esecuzione di un buon trattamento sono garantite dal momento che i contaminanti sono stabilizzati e immobilizzati da una serie di meccanismi man mano che si verifica l'idratazione permettendo comunque di ridurre il potenziale inquinante. Va ricordato che non tutti i contaminanti sono distruttivi, anzi, alcuni amplificano le proprietà dei leganti, specialmente la resistenza. Tashiro et al. (1997) hanno constatato come la presenza di zinco nel terreno vada ad influenzare negativamente la resistenza a breve termine ma non quella a lungo termine (90 giorni), per di più è stata registrata una diminuzione della permeabilità con il passare del tempo. Conner (1990) riporta un esteso studio relativo agli effetti di contaminanti organici ed inorganici su un terreno stabilizzato con cemento, e ha riportato come sia preferibile avere un pH alto nel sistema poiché la maggior parte dei metalli diminuiscono la propria solubilità per pH compresi tra 7.5 e 11.

1.9 Casi di studio di applicazioni ambientali

Sono di seguito riportati, a titolo di esempio, un paio di casi di studio di applicazioni ambientali della tecnica del Deep Mixing.

Il primo riguarda la costruzione di una barriera impermeabile per il contenimento di suoli contaminati a Long Eaton (Nottingham, UK). In tale sito sono state svolte delle operazioni di bonifica del terreno da 1.1 milioni di sterline per la costruzione di un nuovo centro commerciale (Al Tabbaa ed Evans, 2003). Il sito era stato precedentemente usato come discarica di combustibili e per questo motivo sia il terreno che l'acqua sotterranea erano stati contaminati da idrocarburi di petrolio. Le operazioni di bonifica hanno riguardato in particolare l'installazione di una barriera di contenimento, immersa nel substrato di base a 8 m di profondità al fine di controllare la migrazione della falda inquinata. Il progetto prevedeva l'installazione di una barriera di contenimento reattiva in Deep Mixing lunga 550 m, formata da due sezioni: la prima, passiva, avente conducibilità idraulica minore di 10^{-9} m/s e resistenza superiore a 150 kPa, aveva il compito di direzionare l'acqua sotterranea inquinata verso una sezione reattiva e permeabile composta da argille modificate, avente permeabilità dello stesso ordine di grandezza di quella del terreno in sito in modo tale da ridurre gli effetti sul regime idraulico di falda. Due trivelle da 1.2 m di diametro sono state costruite appositamente per il progetto al fine di accelerare l'esecuzione del trattamento e sono state usate per costruire circa 600 colonne da 8 m di lunghezza (Figura 1.29). I primi risultati dell'attività di monitoraggio hanno mostrato un sostanziale e continuo miglioramento della qualità delle acque sotterranee al di fuori della barriera trattata.

Il secondo progetto, riportato in Marconi e Mosca (2010), riguarda la bonifica del sito denominato "Cargovil" (Belgio) mediante Stabilizzazione/Solidificazione dei sedimenti contaminati. Data l'elevata estensione volumetrica della contaminazione (presenza di elevate concentrazioni di Arsenico e di altri metalli pesanti) e a causa delle difficoltà logistiche di gestione del sedimento ex situ, la modalità di intervento migliore è risultata quella in situ. La tecnica esecutiva applicata è un misto tra le tecniche Deep Mixing e Jet Grouting: lo "Swamp Excavator", un escavatore dotato di cingoli molto larghi e bassi (somiglianti a dei "pattini"), onde evitare lo sprofondamento della

macchina, equipaggiato con un'asta rotante verticale dotata all'estremità bassa di una lama miscelante e di ugelli dai quali fuoriesce la malta cementizia ad alta pressione (Figura 1.29). Gli ugelli sono posizionati in maniera tale da assolvere due funzioni: quelli posizionati alle estremità delle lame (jet) facilitano la rotazione di esse nel sedimento molle, mentre quelli posizionati a poca distanza dall'asta infissa trattano il volume di terreno intorno all'asse dell'asta. Caratteristica della strumentazione utilizzata è un sistema di funzionamento completamente automatizzato. La fase operativa di cantiere è stata preceduta da un campo prove durante il quale è stato possibile determinare il volume effettivo della colonna di sedimento stabilizzata al variare della velocità di penetrazione, della pressione di iniezione e della velocità di rotazione della lama. In tal modo si è determinato l'interasse delle colonne al fine di riuscire a trattare l'intera volumetria contaminata mediante l'ottenimento di colonne limitrofe leggermente intersecanti. Per la stabilizzazione dei metalli pesanti responsabili della contaminazione in tale situazione, è stata utilizzata una miscela a forte prevalenza di cemento d'altoforno. In tale progetto sono stati trattati circa 30000 m³ di sedimento in 6 mesi (inclusi i test pilota, le prove di laboratorio e quelle on site). Test di campo e di laboratorio sul sedimento trattato hanno evidenziato un incremento delle resistenza a compressione di diversi ordini di grandezza (da pochi kPa nella situazione iniziale fino a circa 5 MPa) ed una riduzione della mobilità dei contaminanti compresa tra l'80% ed il 95%.

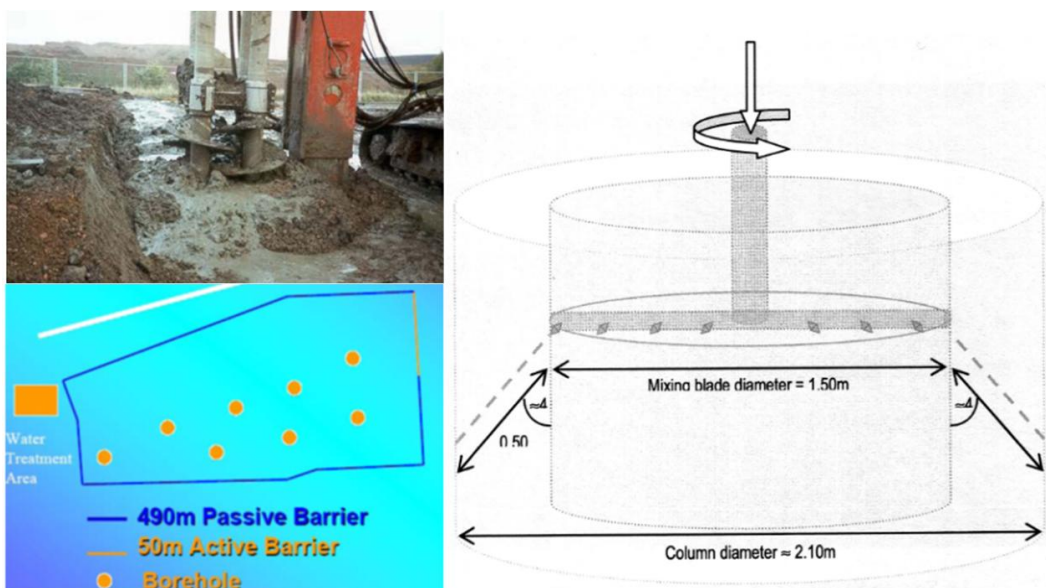


Figura 1.29 - A sinistra: Trivelle in lavorazione e planimetria dell'intervento a Long Eaton (Al Tabbaa e Evans, 2003); a destra: schema del funzionamento del sistema di Soft Soil Improvement (Marconi e Mosca, 2010).

2. STUDIO INTERNAZIONALE SULLE PROCEDURE DI QC/QA

Pur dimostrandosi di assoluta importanza ai fini del buon esito di un intervento Deep Mixing, le relative procedure di laboratorio a supporto dei processi di controllo ed assicurazione di qualità (QC/QA) non sono attualmente standardizzate a livello internazionale. Tale problematica è stata trattata nel corso della conferenza “Deep Mixing 2005 - The International Conference on Deep Mixing Recent Advances and Best practice” (Stockholm, Svezia) durante la quale è stato impostato uno studio internazionale, tutt’ora in corso, che ha visto la pubblicazione dei primi risultati ottenuti nella conferenza: “Deep Mixing 2009 - International Symposium on Deep Mixing & Admixture Stabilization”, (Okinawa, Giappone). Il programma di ricerca internazionale “*International Collaborative Study on Deep Mixing Method*” attualmente in fase di svolgimento è coordinato dal Prof. Kitazume (Tokyo Institute of Technology, ex Port and Airport Research Institute).

Il presente lavoro di tesi contribuisce allo studio internazionale menzionato. I risultati ottenuti dai vari soggetti partecipanti nel corso degli anni 2009 - 2015 saranno presentati nella futura “*International Conference on Deep Mixing - 2015*”, San Francisco, USA. Nel capitolo sono descritte in dettaglio le procedure di QC/QA relative alle diverse fasi progettuali ed esecutive di un intervento Deep Mixing insieme con i risultati preliminari e gli obiettivi futuri dello studio internazionale (Terashi e Kitazume, 2009; 2011).

2.1 Fasi progettuali ed esecutive

Le fasi progettuali ed esecutive di un lavoro di Deep Mixing sono presentate nella norma European Standard En 14679 “Execution of special geotechnical works - Deep Mixing” (2003) e aggiornate da Filz (2012), come riportato schematicamente in Figura 2.1. I vincoli del sito in esame, come ad esempio la possibilità di accedere al sito e le condizioni di stabilità dello stesso influenzano la scelta della tecnica, Wet o Dry mixing. Di utile riferimento possono essere i progetti precedenti effettuati in prossimità del sito in esame o su stratigrafie simili. I test di miscelazione in laboratorio effettuati a partire da campioni di terreno prelevati in sito sono decisivi per comprendere la tipologia e la quantità di legante, ma anche l’energia di miscelazione e la tipologia di utensile da utilizzare, al fine di stimare le proprietà ottenibili con il trattamento e compilare il progetto. Tali test sono condotti relativamente ai diversi strati di terreno ritenuti rappresentativi e sono generalmente eseguiti nella fase di progettazione ma possono essere anche condotti nella fase iniziale di raccolta dati. Nel progetto esecutivo si definiscono le proprietà del terreno trattato, la geometria e le dimensioni del trattamento e le modalità costruttive, lasciando dei margini di operatività che andranno affinati dall’installazione del campo prova. Infatti per via dell’incertezza relativa alle reali condizioni riscontrate in sito è consigliabile programmare un campo prova che permetta di verificare che i parametri operativi decisi mediante le prove preliminari di laboratorio siano applicabili al sito in esame e permetta l’ottimizzazione dei parametri

del trattamento. Il programma di controllo qualità deve essere parte integrante del progetto.

Tutte le fasi del processo sono accompagnate da un'intensa attività di laboratorio, che riguarda sia i test di miscelazione per il confezionamento di provini, sia il prelievo di campioni di miscela fresca o indurita direttamente in sito su cui eseguire opportune prove di laboratorio.

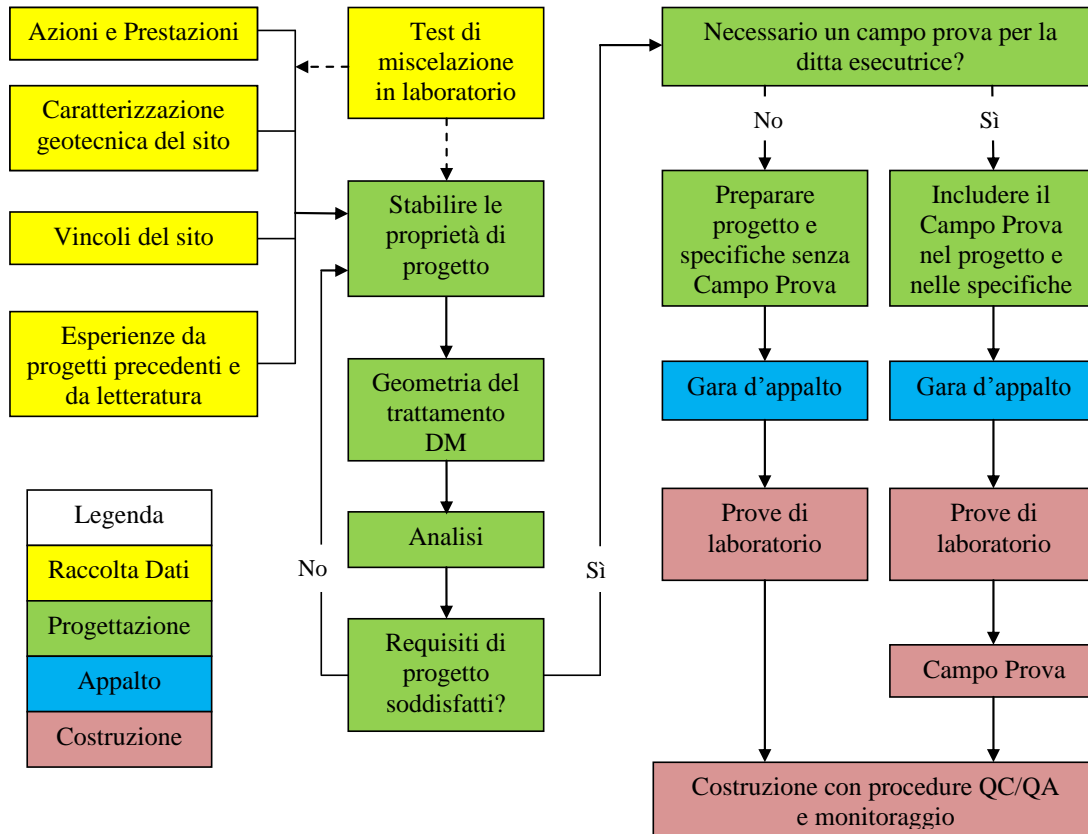


Figura 2.1 - Diagramma di flusso per la progettazione ed esecuzione di un intervento Deep Mixing (adattato da Filz, 2012).

Rigorese procedure di controllo qualità sono necessarie durante la fase di costruzione per garantire che l'intervento di Deep Mixing sia eseguito come definito in fase progettuale. Tali procedure possono essere distinte in due fasi: la fase di controllo qualità (QC) e la fase di verifica della qualità (QA).

Il Controllo Qualità (QC, Quality Control) interessa sia la fase di progettazione sia la fase esecutiva dell'intervento: esso comprende la valutazione e il controllo della proprietà di progetto (ex. resistenza), della qualità e quantità della malta cementizia impiegata, dell'efficienza di miscelazione (velocità di penetrazione/estrazione e numero di rotazioni dell'utensile di miscelazione) e la definizione e il controllo delle caratteristiche geometriche della colonna trattata (lunghezza, diametro e interdistanza delle colonne). A tal fine sono previste prove di laboratorio su campioni prelevati in sito da miscela fresca ("wet grab") o indurita.

L'Assicurazione di Qualità (QA, Quality Assurance o Verification) riguarda le prove di verifica della qualità a posteriori, eseguite al fine di convalidare le prestazioni delle colonne stabilizzate mediante DM. Vengono per esempio condotte prove di

laboratorio su campioni di terreno trattato prelevato in sito ad opportuni tempi di maturazione e/o prove in sito su colonne già realizzate.

A lungo termine è necessario verificare la bontà dell'opera mediante un piano di monitoraggio che preveda per esempio la misura dei livelli piezometrici o dei cedimenti in superficie a secondo dello scopo dell'intervento.

Le prove laboratorio sono parte fondamentale delle procedure QC/QA e intervengono in tutte le fasi contribuendo a fornire dati estremamente importanti: nella fase preliminare intervengono per la stima delle proprietà del terreno trattato (es. resistenza di progetto) e per l'identificazione dei parametri operativi del trattamento (es. rapporti acqua/cemento) in relazione alle diverse caratteristiche dei terreni presenti (test su provini confezionati in laboratorio); nell'allestimento dei campi prova intervengono per l'ottimizzazione dei parametri operativi, in relazione alle caratteristiche del sito (prove su campioni "wet grab"); nella fase di esecuzione contribuiscono al controllo delle caratteristiche del terreno trattato (prove su campioni wet grab e campioni estratti); a lungo termine intervengono assicurando che sia stata raggiunta la resistenza definita in fase progettuale (prove su campioni estratti) (Figura 2.2).

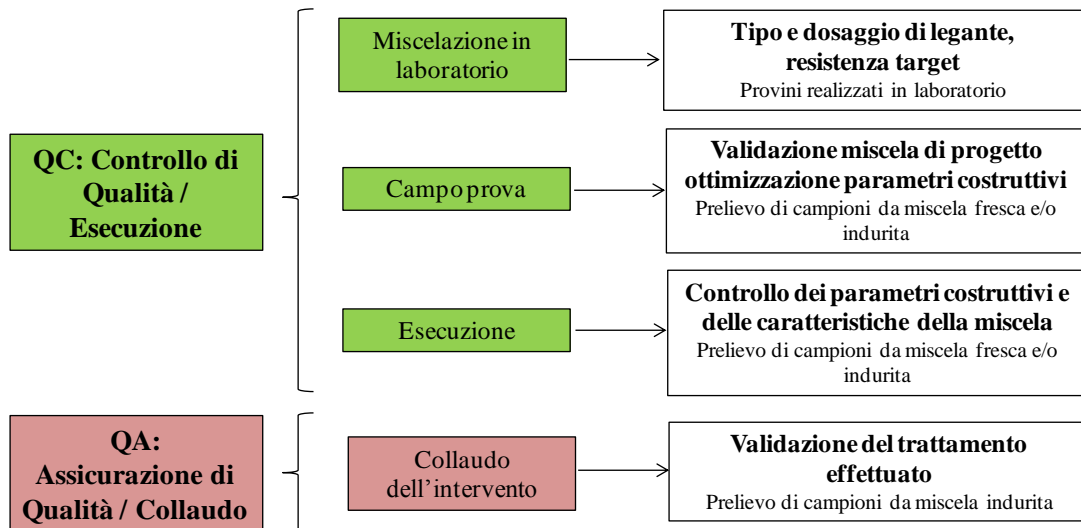


Figura 2.2 - Prove di laboratorio nelle procedure di QC/QA relative a un intervento Deep Mixing (adattato da Saitoh et al., 1996).

2.2 Prove preliminari di laboratorio (QC)

Un trattamento mediante Deep Mixing prevede in una fase iniziale una serie di indagini geologiche e geotecniche per capire la successione stratigrafica e le caratteristiche dei terreni. In tale fase devono anche essere prelevati dei campioni dei terreni significativamente interessati dall'intervento per l'esecuzione di test di miscelazione in laboratorio che giocano un ruolo importantissimo per le procedure di QC/QA. I test di miscelazione hanno lo scopo di fornire una stima preliminare delle proprietà del terreno trattato raggiungibili in sito e la possibilità di valutare la tipologia e il dosaggio dei leganti da utilizzare e quindi individuare i parametri del trattamento. In questa fase vengono confezionate una serie di miscele terreno-legante in diverse proporzioni, i provini prodotti vengono fatti maturare e sottoposti a prove di laboratorio. Le prove di laboratorio da condurre si differenziano in funzione dell'applicazione Deep Mixing (§ 1.4) specifica per il sito in esame; comunque le prove maggiormente

impiegate risultano essere: prova di compressione ELL (economica e rapida), prove di conducibilità idraulica, prove di percolazione, prove di estrazione, prove di durabilità.

Nei paesi del Nord Europa e in Giappone, ove il DM ha una lunga storia di applicazione, si riscontra la presenza di alcuni standard o linee guida relativi ai test di laboratorio. Nei mercati ove il DM è emerso da poco, come in Europa, le procedure di laboratorio sono basate sull'esperienza o il giudizio dei singoli ingegneri.

A tal riguardo si ricorda lo studio di Jacobson (2005) sui fattori che influenzano la resistenza di colonne trattate con cemento a partire da limi organici. Le prove di compressione ELL effettuate dall'autore e da altri due laboratori diversi (nell'articolo chiamati A e B) fornirono risultati notevolmente diversi fino a circa il 400% (Figura 2.3), con evidenti gravi ricadute nel caso di un ipotetico impiego dei dati ottenuti per la progettazione dell'intervento Deep Mixing. Le differenze riscontrate nelle resistenze erano strettamente legate alle diverse procedure utilizzate per la preparazione e la maturazione dei provini. Il laboratorio B aveva lasciato i provini all'aria prima della prova, aveva assegnato un contenuto d'acqua ben maggiore di quello naturale del terreno in esame e aveva fissato la temperatura di maturazione a 15 °C, diversa da quella fissata dal laboratorio A pari a 25°C e dallo studio dell'autore pari a 20°C. Il laboratorio A aveva definito la dose di legante come rapporto tra peso del legante e volume di terreno trattato, mentre per l'autore e lo studio B tale dose era stata definita come rapporto tra peso di legante e volume di terreno non trattato. Pertanto lo studio A aveva aggiunto una maggiore percentuale di legante. Tali motivi spiegherebbero la maggior resistenza misurata nel laboratorio A e le marcate differenze ottenute dai tre laboratori. Da tale esempio si capisce la necessità di uno standard relativo alle procedure connesse con il confezionamento di provini di miscela terreno-legante, connesse in particolare con le fasi di miscelazione, preparazione e maturazione.

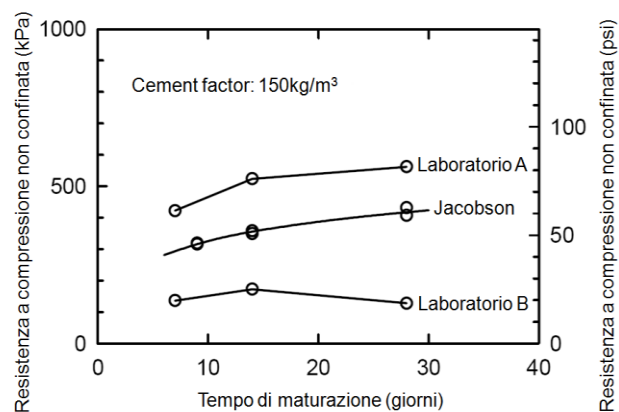


Figura 2.3 – Resistenza a compressione UCS ottenuta in tre laboratori diversi utilizzando la stessa dose di legante (cemento) pari a 150 kg/mc. (Jacobson, 2005).

Dalla necessità di standardizzare a livello internazionale le procedure di QC/QA è iniziato uno studio internazionale, tutt'ora in corso, che è stato impostato durante la conferenza "Deep Mixing 2005 - The International Conference on Deep Mixing Recent Advances and Best practice", Stockholm, Svezia e ha visto la pubblicazione dei primi risultati ottenuti nella conferenza: "Deep Mixing 2009 - International Symposium on Deep Mixing & Admixture Stabilization", Okinawa, Giappone, presentati sinteticamente nel paragrafo seguente. Gli obiettivi e il programma della ricerca internazionale in corso sono specificati in § 2.7, 3.1.

2.2.1 Ricerca internazionale sul Deep Mixing, risultati 2005-2009

Lo studio a livello mondiale si è proposto di ordinare lo stato dell'arte relativo alle procedure di miscelazione e confezionamento dei provini di miscela terreno-legante per le prove di laboratorio, impiegando dati forniti dalle 36 organizzazioni prese in esame (di cui 23 giapponesi), come riportato in Kitazume et al. (2009a). L'analisi è stata portata avanti mediante la compilazione di un questionario suddiviso in tre parti principali, ciascuna riguardante (i) l'organizzazione generale dei test di laboratorio in relazione ai progetti relativi al DM, in particolare quando e per conto di chi sono progettati, eseguiti e garantiti i test, (ii) le procedure dettagliate e gli utensili utilizzati nei test, (iii) la descrizione dei test eseguiti per la valutazione delle proprietà meccaniche del terreno stabilizzato. Ove possibile, ai partecipanti è stato chiesto di fornire documentazione ulteriore, come foto, esempi di file usati etc.

Nel mettere a confronto i diversi protocolli seguiti dalle organizzazioni mondiali, sono stati considerati i seguenti aspetti:

- a) Modalità di prelievo del terreno da trattare;
- b) Soggetti incaricati di eseguire i test di laboratorio;
- c) Preparazione del terreno da miscelare e leganti utilizzati;
- d) Tipologia e forma dello stampo;
- e) Fase di miscelazione e utensile utilizzato;
- f) Disposizione della miscela all'interno degli stampi;
- g) Condizioni di maturazione;
- h) Metodi di calcolo delle proprietà meccaniche dei suoli stabilizzati.

Nelle Tabella 2.1 e Tabella 2.2 si riportano le diverse informazioni raccolte grazie a questo studio e alcune illustrazioni relative alle attrezzature impiegate dalle varie organizzazioni per le fasi di miscelazione, confezionamento e maturazione dei provini di miscela terreno-legante (Figura 2.4, Figura 2.5, Figura 2.6, Figura 2.7, Figura 2.8).



Figura 2.4 - Stampi monouso in metallo e plastica.

Tabella 2.1 - Procedure di laboratorio esistenti nei diversi paesi (parte1/2) (adattato da Kitazume et al., 2009b).

Parte 1/2	Linee guida				Pratiche diffuse				
Protocollo	JGS0821 (JP)	SGI (Svezia)	EuroSoilStab (EU)		Finlandia	USA (Virginia Tech)		USA (Raito)	Cambridge (UK)
Anno	2000	2006	2001		-	-		-	-
Applicazione	DMM	Dry DM	DM colonnare	DM di massa	Dry DM	Dry DM	Wet DM	Wet DM	Wet DM
Applicabilità terreni	Tutti	Argilla,Limo,Torba,Gyttja	Terreni coesivi e organici		-	Terreni inorganici		-	-
Setacciatura	Rimozione parti d > 1/5 stampo	Raccomandano di eliminare manualmente i grandi trovanti ed oggetti				ASTM n.4 4,75mm		Rimozione parti d > 1/4 stampo	
Dimensioni dello stampo	φ50mm x h100mm; stampo più grande per ghiaie, h/φ=2-2,5	φ50mm x h170mm in generale; φ50mm x h>200mm per le torbe	φ50mm x h100mm; o stampo più grande	φ68mm x h200-300mm; o stampo più grande	φ45-50mm x h125-170mm	φ50mm x h100mm		φ50mm x h100mm o φ75mm x h150mm	φ50mm x h100mm o φ100mm x h100mm
Miscelatore	Mixer tipo Hobart	Miscelatore da cucina	Miscelatore da cucina. Da decidere in base all'esperienza		Miscelatore da cucina	Miscelatore da cucina. Utensile ad uncino per terreni coesivi e piatto per non plastici		Mixer tipo Hobart	Miscelatore da cucina
Preparazione campione di terreno	Mantenuto al contenuto d'acqua naturale. Omogeneizzato.	L'acqua persa non viene addizionata. Omogeneizzazione. Conservare Torba a 7°	In presenza di Torba tempo omogeneizzazione limitato		Omogeneizzare per 6min	Omogeneizzare per 3-4min	Conservare in camera umida. Omogeneizzare per 3min	Mantenuto al contenuto d'acqua naturale. Omogeneizzato.	
Preparazione del legante	Conservato asciutto. Impiego polvere o malta				-		Conservato asciutto. Impiego malta		
Acqua	Acqua rubinetto o acqua marina	-				-		Acqua rubinetto o sito	Acqua rubinetto o deionizzata
Espressione legante	Contenuto di legante (%) o Fattore legante (kg/m ³)	Fattore legante (kg/m ³)	-	Fattore legante (kg/m ³)				Contenuto di legante (%)	

Tabella 2.2 - Procedure di laboratorio esistenti nei diversi paesi (parte2/2) (adattato da Kitazume et al., 2009b).

Parte 2/2	Linee guida				Pratiche diffuse				
Protocollo	JGS0821 (JP)	SGI (Svezia)	EuroSoilStab (EU)		Finlandia	USA (Virginia Tech)		USA (Raito)	Cambridge (UK)
Anno	2000	2006	2001		-	-		-	-
Miscelazione	10min con pausa per miscelazione manuale. Velocità 60-260rpm	Generalmente 5min. per i terreni organici 2-5min per evitare distruzione delle fibre	Generalmente 5min con intervento manuale		Tra 2 e 6min con intervento manuale	Tra 3 e 5min	10min	Tra 7 e 10min	Non specificato
Tecnica confezionamento	Miscela disposta in 3 strati. Rimuovere aria mediante TA. o vibrazione.	Miscela disposta in 3 strati. Utilizzo RO., poi S.C. 100kPa per 5sec. Per la Torba N.C. se è liquida, altrimenti disporre 5-6 strati e usare RO. o D.C.	Strati di 25mm. S.C. 100kPa per 2sec (6 per strato). Per miscele liquide uso N.C.	N.C.. Se miscela consistente suddividere in 5-6 strati e compattare. Scarificazione interfaccia tra 2 strati.	Strati di 25mm. S.C. 100kPa per 6sec, altrimenti TA. o D.C.	Strati di 25mm. impiego TA. se liquido. RO. 25 colpi ed S.C. 100kPa per 2-5sec se consistente.	Miscela disposta in 3 strati ed impiego RO. o TA.	Miscela disposta in 3 strati per $\phi = 50\text{mm}$ e 5 strati per $\phi = 75\text{mm}$. Impiego TA. oppure RO. se consistente	Miscela disposta in 3 strati ed impiego RO.
Tempi di confezionamento	Prima possibile	Entro 20-30min dalla miscelazione con il legante						Entro 45min da fine miscelazione con il legante	
Estrazione provino	Quando acquisisce resistenza	-	Dopo completa maturazione		-	Dopo completa maturazione		-	-
Maturazione	Sigillato con pellicola, maturazione (da 1 a 28 giorni) in contenitore sigillato a $T=20\pm 3^{\circ}\text{C}$	Sigillato in stanza a 7°C . per la calce maturazione (da 14 a 180 giorni) a T ambiente. Per Torba applicazione 18kPa. $T=20\pm 2^{\circ}\text{C}$ in acqua	Sigillato a $T=18-22^{\circ}\text{C}$	Sigillato a $T=18-22^{\circ}\text{C}$, in acqua e carico 18kPa	Maturazione in cassetta con umidità >95%. Cemento: $T=20^{\circ}\text{C}$ primi 7 giorni poi $T=6-8^{\circ}\text{C}$	Sigillato e mantenuto in camera umida a $T=20^{\circ}\text{C}$. Periodi di maturazione: 7, 14, 28, 56 giorni		$T=23\pm 3^{\circ}\text{C}$, umidità >95%. Periodi di maturazione: 3, 7, 14, 28 giorni	$T=20-21^{\circ}\text{C}$, umidità >98%
Num provini	≥ 3	≥ 1	-		1-4	2		1-2	3
Prove	Compressione ELL ($v=1\%/min$) ed altre	Compressione ELL ($v=1,5\%/min$), edometrica, triassiali	Compressione ELL, edometrica, triassiali, taglio diretto, permeabilità		Compressione e ELL ($v=0,2-1\%/min$)	Compressione ELL ($v=1\%/min$) ed altre		Compressione ELL ($v=0,25\%/min$)	Compressione e ELL ($v<2\%/min$)



Figura 2.5 - Miscelatore utilizzato per amalgamare acqua e legante, miscelatore (Virginia Tech.) Hobart per miscelare terreno e legante (Helsinki University of Technology), miscelatore per omogeneizzare il campione di terreno (Swedish Geotechnical Institute).



Figura 2.6 - Compattazione dinamica e Compattazione statica (SGI institute), Tapping (Helsinki University of Technology).

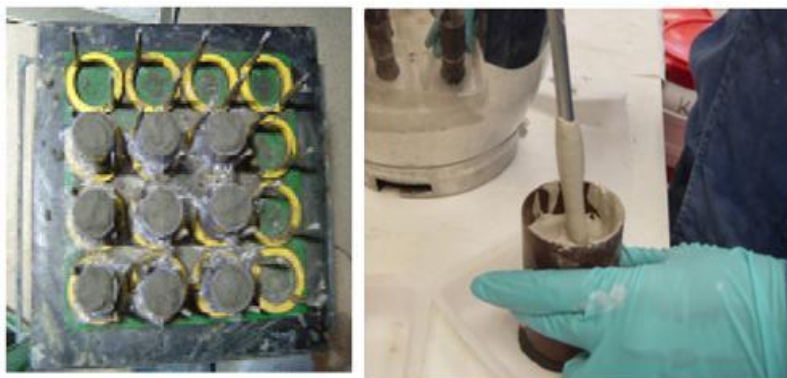


Figura 2.7 - Tapping tramite tavolo con sistema di caduta: caduta da 10 cm di altezza per 100 volte (Dong-Ah); Rodding (Cambridge University).



Figura 2.8 - condizioni di maturazione in presenza di sovraccarico (SGI), in camera umida a temperatura costante, all'interno di contenitori sigillati con strato d'acqua al di sotto dei provini.

Lo studio internazionale condotto sulle diverse procedure di laboratorio ha evidenziato che esse differiscono persino nei due paesi pionieri del metodo DM, Giappone ed USA.

Una seconda fase dello studio internazionale ha previsto una serie di prove condotte dalle diverse organizzazioni partecipanti, con lo scopo principale di capire come e quanto le procedure di confezionamento e le condizioni di ambientazione avessero effetti sui risultati di prove di laboratorio condotte sui provini di terreno stabilizzato. Sono stati eseguiti tre test sui seguenti argomenti: studio dell'influenza della tecnica di confezionamento sulla resistenza, densità e modulo di deformazione; studio dell'influenza della temperatura e del tempo di maturazione sulla resistenza; studio dell'influenza del tempo intercorrente tra l'inizio dell'idratazione del legante fino al completamento dei provini. La descrizione dettagliata della ricerca ed i risultati ottenuti sono riportati in Kitazume et al. (2009b).

Sette organizzazioni hanno preso parte ai test (Tabella 2.3). Va ricordato che ogni organizzazione ha portato avanti tali test utilizzando i terreni e i leganti disponibili in loco.

Tabella 2.3 - Lista dei partecipanti e selezione dei test eseguiti nelle diverse organizzazioni.

Paese di origine	Corea	Giappone				Svezia	UK
Organizzazione	Dong-Ah GE	PARI	CERI	CDM	DJM	SGI	CU
Test 1		*			*	*	*
Test 2	*	*	*		*	*	*
Test 3	*	*		*		*	*

Dong-Ah GE: Dong-Ah Geological Engineering Co. Ltd

CERI: Engineering Research Institute of Cold Region

DJM: Associazione Dry Jet Mixing

CU: Università di Cambridge

PARI: Port and Airport Research Institute

CDM: Associazione Cement Deep Mixing

SGI: Swedish Geotechnical Institute

Vengono di seguito descritti i test eseguiti e i risultati ottenuti.

2.2.2 Test 1: Influenza delle tecniche di confezionamento sulla resistenza del terreno trattato

Il principale scopo di questo test è stato quello di capire l'effetto delle tecniche di confezionamento sui risultati ottenuti in termini di densità e resistenza del terreno trattato.

I test sono stati effettuati da quattro organizzazioni, Port and Airport Research Institute (PARI), Dry Jet Mixing Association (DJM), Swedish Geotechnical Institute

(SGI), Cambridge University (CU), su tre diverse tipologie di terreni: Gyttya (SGI), terreno argilloso ad alta plasticità (PARI, DJM) e terreno argilloso a bassa plasticità (CU). Il contenuto d'acqua è stato fissato pari al limite di liquidità nella maggior parte dei casi. Solo per i test eseguiti a Cambridge il w_n è stato variato, per modificare la consistenza dei terreni sottoposti a test.

Per quanto riguarda la tipologia di legante, esso è stato scelto in base all'esperienza locale, variando il contenuto di cemento (rapporto tra peso di legante secco e peso di terreno asciutto) tra il 5 e 37 %. Il tempo di maturazione è stato fissato a 28 giorni.

La miscela è stata riposta all'interno degli stampi in tre strati successivi. Sono state usate cinque tecniche di confezionamento:

(1) Compattazione Dinamica: Prevede la compattazione di ciascuno strato mediante una massa battente. PARI ha testato miscele liquide, pertanto ha impiegato un'asta metallica con la funzione di pestello di diametro 3cm battuta 50 volte per strato; (2) Compattazione Statica: compressione di ciascuno strato di miscela attraverso una pressione statica. L'entità della pressione e il tempo di applicazione variano in funzione dell'esperienza locale delle organizzazioni partecipanti (PARI e DJM: applicazione 100kPa mediante pressa per 15sec; CU: applicazione 666g per 30sec); (3) Tapping: Consistente nel battere ciascuno strato sul piano lavoro un certo numero di volte dipendente dall'esperienza locale delle organizzazioni (PARI ed SGI: 50 colpi per strato; DJM: 10 colpi per strato); (4) Rodding: Ogni strato è stato compattato usando un'asta metallica, detta rod. Il numero di battute e il diametro del rod sono scelti in base all'esperienza locale (SGI, CU: asta 8mm, 30 battute); (5) Nessuna compattazione: consistente semplicemente nel riempire lo stampo versando la miscela evitando qualsiasi tipo di compattazione (CU).

I grafici riepilogativi riportati in Figura 2.9 mostrano l'andamento della resistenza non confinata q_u (sia in valore assoluto sia in valore normalizzato rispetto a quello ottenuto con la tecnica Tapping o Rodding) con il variare delle tecniche di compattazione.

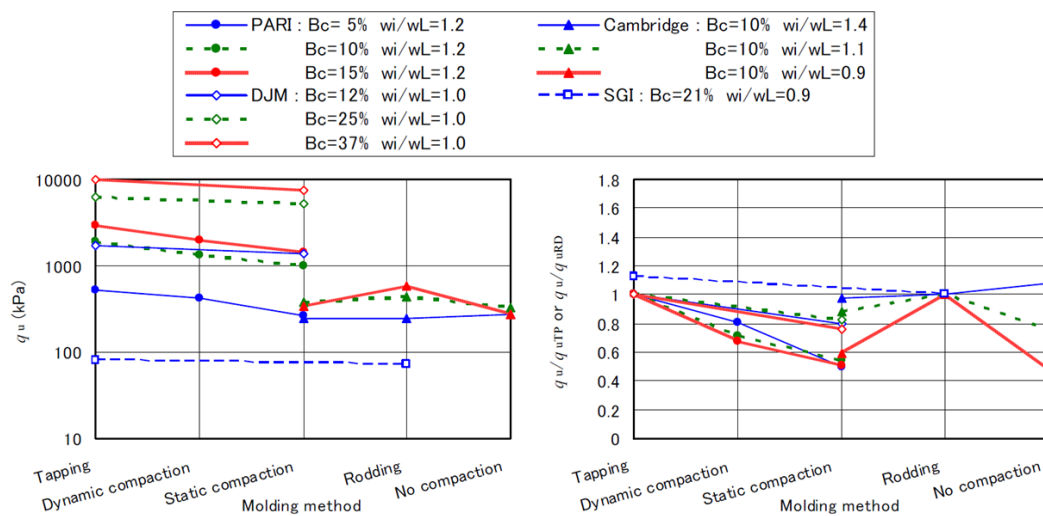


Figura 2.9 - Influenza della tecnica di confezionamento sulla resistenza q_u ; q_u - tecnica di compattazione; q_u normalizzato-tecnica di confezionamento.

Come si può notare dai risultati delle organizzazioni DJM, CU e PARI risulta che la compattazione dinamica e statica fornisca dei valori di resistenza minori del 20-50% rispetto quelli ottenuti con Tapping e Rodding. È stato inoltre notato che al variare del contenuto di legante non si ha una variazione significativa di resistenza (DJM), andamento che è stato invece riscontrato variando il contenuto d'acqua iniziale (CU). Si è inoltre constatato che non vi è alcuna influenza della tecnica di compattazione sul contenuto d'acqua: non si verifica alcuna perdita d'acqua anche dopo l'applicazione del carico statico o dinamico (Figura 2.10). Il modulo secante E_{50} segue lo stesso andamento della resistenza. Rapportando l' E_{50} alla q_u si nota come questo vari poco al variare della tecnica di confezionamento, fatta esclusione per i risultati di PARI dove si verifica un aumento di tale rapporto per la compattazione dinamica e statica per i motivi sopra descritti.

Per quanto riguarda la densità si può dire che in linea generale essa non è influenzata dalla tecnica di compattazione. L'unico andamento anomalo si riscontra nei risultati del PARI che registrano una minore densità relativamente ai provini confezionati con la compattazione dinamica e statica (forte presenza di vuoti d'aria all'interno dei provini). Mettendo a confronto tali dati con quelli di resistenza ottenuti sempre con l'organizzazione PARI, si nota che questi ultimi seguono lo stesso andamento: ad una diminuzione di densità corrisponde una minore resistenza q_u .

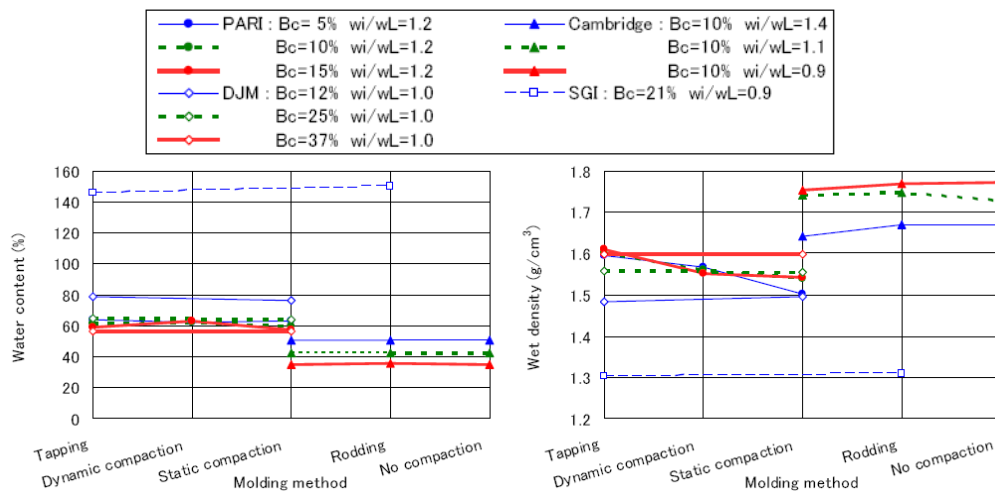


Figura 2.10 - Influenza della tecnica di confezionamento sulle proprietà fisiche del terreno trattato: contenuto d'acqua; peso di volume.

2.2.3 Test 2: Influenza della temperatura e del tempo di maturazione

L'influenza della temperatura di maturazione sui terreni trattati con la tecnologia del Deep Mixing risulta essere un elemento di rilevante importanza nelle applicazioni pratiche. E' stato osservato che esiste una distinta differenza di temperatura di maturazione tra regioni con clima freddo e temperato. L'obiettivo principale di questa serie di prove (TS2) è stato quello di esaminare l'influenza della temperatura sull'andamento della resistenza nel tempo.

Le organizzazioni partecipanti sono 6: PARI e DJM (test su terreni argillosi ad elevata plasticità), Dong-Ah GE e CU (test su terreni argillosi a bassa plasticità), Engineering Research Institute of Cold Region (CERI) ed SGI (test eseguiti su torba). Il contenuto d'acqua iniziale e il contenuto di legante sono stati variati.

In linea generale si verifica che, dopo un prefissato periodo di maturazione, una maggiore temperatura di maturazione fornisce dei valori di resistenza maggiori a parità di tipologia e contenuto di legante. Non segue questo andamento la torba sperimentata dall'organizzazione svedese SGI che, maturando ad una temperatura di 40°C, non mostra alcun aumento di resistenza nel tempo a causa delle condizioni intrinseche della torba; pertanto non per tutti i terreni un aumento di temperatura provoca un incremento di resistenza.

In generale lo studio mostra l'esistenza di una relazione quasi lineare tra l'incremento di resistenza ed il logaritmo del tempo di maturazione, a prescindere dalla temperatura di maturazione, dalla tipologia di legante e dalla percentuale di legante. Nello studio vengono riportati anche grafici che mostrano la relazione tra la resistenza q_u normalizzata con la q_u a 20°/28d, ed il logaritmo del tempo di maturazione per le diverse temperature (Figura 2.11), interpolati successivamente da alcune funzioni di "Maturazione" M , in gradi/giorni (°/gg), che combinano gli effetti del tempo di maturazione e della temperatura (Tabella 2.4).

Tali funzioni possono essere impiegate per stimare il valore di resistenza q_u a 20°/28gg impiegando una maggiore temperatura di maturazione e tempi minori.

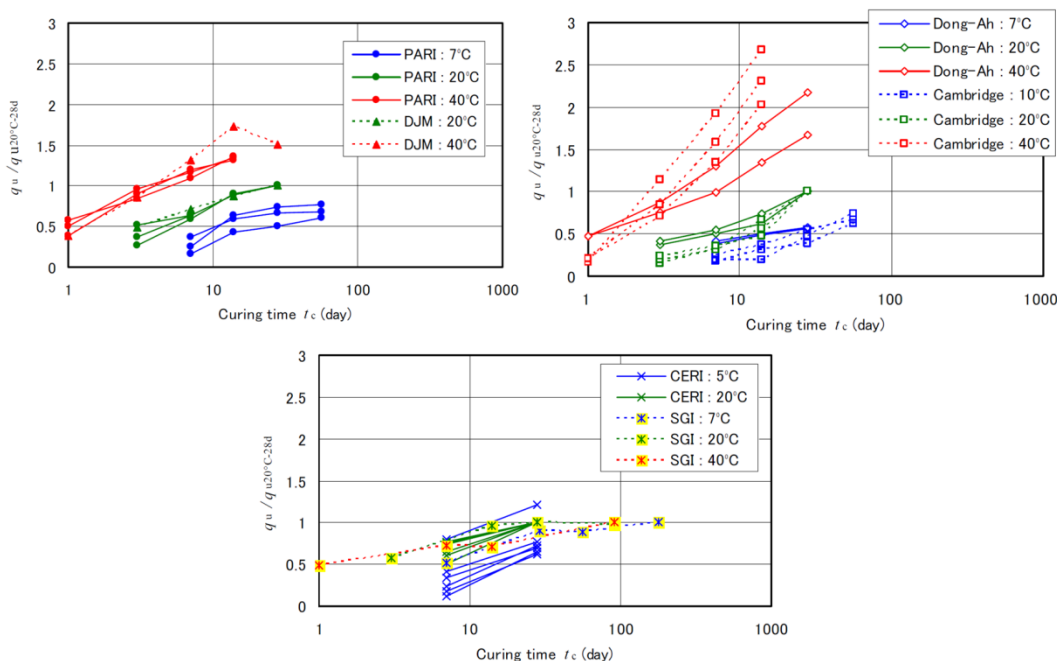


Figura 2.11 - Aumento di resistenza con il tempo di maturazione e effetto della temperatura di maturazione per terreni argillosi ad alta plasticità (PARI, DJM) ; argillosi a bassa plasticità (Dong, CU); torba (CERI, SGI). Le resistenze sono normalizzate rispetto al valore a 20°/28giorni.

Per i terreni argillosi la resistenza normalizzata la Maturazione espressa da M_1 non viene considerata rappresentativa dell'effetto combinato di tempo e temperatura di maturazione sull'incremento della resistenza. Le funzioni $M_{3,4}$ mostrano un unico andamento positivo rispetto alla resistenza normalizzata, a prescindere dalla temperatura di maturazione; per questo le definizioni 3 e 4 vengono considerate più adatte negli studi che coinvolgono terreni argillosi a bassa o elevata plasticità. Per esempio il valore di resistenza q_u a 20°/28gg può essere ottenuto impiegando una temperatura di maturazione di 40°C in 5,5 giorni (M_3) o 3,8 giorni (M_4). Per quanto

riguarda la torba le tre definizioni della maturazione $M_{1,3,4}$ non mostrano particolari differenze se messe in relazione con la qu normalizzata; in tutti e tre i casi la relazione è lineare.

Tabella 2.4 - Definizioni della funzione di Maturazione proposte in studi precedenti.

Maturazione [°/gg]	Formula	Autore
M_1	$\Sigma(T-T_0) \cdot t_c$	Definizione generale per cemento/calcestruzzo
M_2	$2.1 \exp((T-T_0)/10) \cdot t_c$	Nakama, Saitoh, Babasaki (2003)
M_3	$(20+0.5 \cdot (T-20))2 \cdot \sqrt{t_c}$	Åhnberg & Holm (1984)
M_4	$2 \exp((T-T_0)/10) \cdot t_c$	JGS TC Report (1996)

dove T è la temperatura di maturazione [°C], $T_0 = -10^\circ\text{C}$, t_c è il periodo di maturazione [gg, giorni]

2.2.4 Test 3: Influenza del tempo intercorrente tra idratazione del legante e fine compattazione

La correlazione tra le proprietà geotecniche e i “tempi di attesa” è molto importante. Infatti in sito quando si va ad eseguire materialmente il trattamento con Deep Mixing, è normale avere alcuni periodi di attesa dopo l'idratazione del cemento (o più in generale del legante) prima dell'inizio delle operazioni di mixing. Questo per svariati motivi tra cui il fatto che l'idratazione della miscela viene effettuata su una grande quantità che non viene utilizzata tutta in una volta, ad esempio per la realizzazione della prima colonna, ma andrà ad alimentare una serie di verticali. Oltre a questo, risulta molto importante studiare l'effetto del tempo di attesa dopo la miscelazione (ovvero della realizzazione delle colonne di terreno trattato) prima del campionamento a fresco di provini da testare in laboratorio. Questo è utile a dare delle linee guida per le operazioni di controllo di qualità dell'opera realizzata.

Lo scopo di questa serie di prove è quello di investigare l'effetto del tempo di attesa: A) dalla preparazione (ovvero idratazione) del legante alle operazioni di mixing con il terreno; B) dalla fine delle operazioni di mixing alla realizzazione dei provini (campionamento in sito), sulla resistenza del terreno trattato.

Tale test ha visto la partecipazione di 5 organizzazioni: Dong-Ah GE, PARI, CDM, SGI, CU. I terreni oggetto delle prove sono 3: Gitty, terreni argillosi a bassa ed elevata plasticità.

I risultati, illustrati in Figura 2.12, mostrano una leggera variazione (generalmente inferiore al 20%) dei valori di resistenza normalizzati rispetto al caso di assenza di ritardo (tempo di attesa = 0) in entrambi i casi A (fino a 120min) e B (fino a 60min).

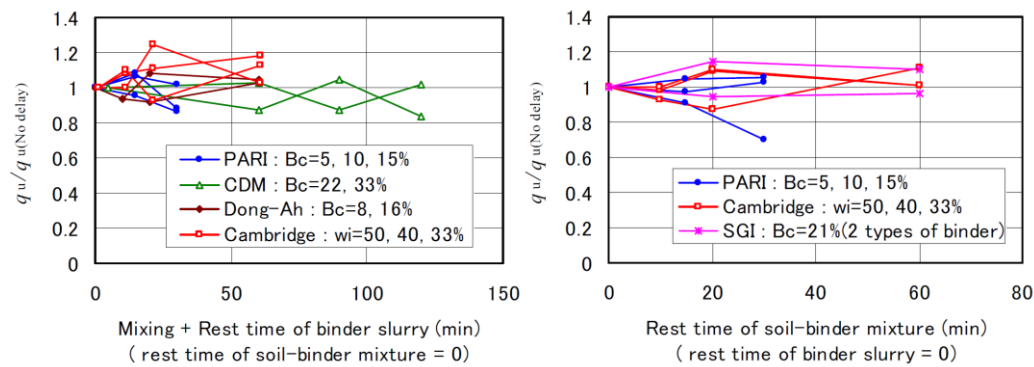


Figura 2.12 - Relazione q_u normalizzata/tempo di riposo della malta cementizia; relazione q_u normalizzata/tempo di riposo della miscela terreno legante.

Pertanto dagli effetti osservati Kitazume et al. (2009b) raccomandano di terminare la fase di confezionamento entro 30-45 minuti dall'aggiunta del legante al terreno.

2.3 Controllo di qualità durante l'esecuzione (QC)

Il controllo della qualità durante il processo di esecuzione della colonna risulta essere un elemento essenziale per assicurare la bontà del lavoro. Durante tale processo vanno eseguite le seguenti verifiche da parte della ditta esecutrice dei lavori:

- ✓ Prove sul legante e/o sulla malta cementizia seguendo le raccomandazioni del programma di controllo di qualità. Tali prove includono: peso specifico, viscosità, resistenza a compressione;
- ✓ Controllo dei parametri di produzione visualizzati, modificati e registrati dal computer della macchina operatrice (quando disponibile):
 - Posizione e profondità di ogni pannello;
 - Flusso e quantità totale di malta iniettata;
 - Pressione del flusso della malta;
 - Pressione della miscela terreno/cemento a vari livelli nel pannello;
 - Volume malta/tempo e volume malta/profondità;
 - Deviazioni dalla verticale lungo gli assi x ed y ;
 - Velocità di rotazione delle ruote e altri parametri.
 - Parametro T, Blade rotation number (§ 1.6.1)

In particolare il parametro T, (dipendente da fattori come velocità di penetrazione/risalita dell'utensile e velocità di rotazione dell'utensile durante la penetrazione/risalita, § 1.6.1), viene monitorato durante tutta la fase di esecuzione del trattamento per poter assicurare la corrispondenza con il valore stabilito in fase progettuale, e quindi valutare la qualità della miscelazione eseguita. Bruce et al. (2000) distingue tre livelli di controllo più o meno approfondito e dipendente dalla tecnologia impiegata, sommariamente descritti di seguito:

Livello 1: I parametri di miscelazione e iniezione del legante sono controllati attraverso semplice strumentazione e possono essere visualizzati dal personale su

indicatori analogici o digitali. Le proprietà della miscela, come ad esempio la densità e la viscosità, sono misurate manualmente in sito mediante l'uso di particolari strumenti, come ad esempio il Baroid Mud Balance per la misura della densità (Figura 2.13).



Figura 2.13 - Baroid Mud Balance.

I principali parametri di perforazione sono visualizzati all'interno della cabina e sono controllati manualmente dall'operatore stesso: egli è in grado di evidenziare dei cambiamenti nei parametri di perforazione e iniezione in relazione agli input che gli vengono dall'impianto di miscelazione a cui è collegato telefonicamente.

Livello 2: I parametri di iniezione e miscelamento sono controllati automaticamente da un computer e sono preimpostati per ottenere un certo rapporto di volume (definito come il rapporto tra il volume di miscela iniettato e il volume di terreno da trattare espresso in %) e il cement factor (definito come il rapporto tra il peso del legante introdotto nel terreno e il volume del terreno da trattare). Contemporaneamente questi dati sono immediatamente visualizzati sul display presente all'interno della cabina e confermano la bontà delle caratteristiche della miscela. È comunque possibile correggere manualmente tali parametri. Alla fine della perforazione è possibile avere un grafico che mostra l'andamento nel tempo dei principali parametri di perforazione. Il sistema computerizzato del metodo CDM (Yano et al., 1996) è stato inizialmente implementato per garantire un'alta qualità di esecuzione delle colonne. Esso è costituito da una sezione in cui è posto un sensore e da un'altra adibita alla gestione dell'esecuzione della colonna trattata. La prima include i sensori per il monitoraggio della profondità, della velocità di penetrazione e estrazione, della velocità di rotazione dell'utensile e della portata del legante immesso, mentre la sezione di gestione include gli strumenti di elaborazione, monitoraggio e registrazione. Tale sezione controlla che durante la perforazione i parametri di perforazione rispettino gli standard. Alla fine della perforazione si può disporre di un report giornaliero e il report totale di produzione che include il numero di colonne, la loro lunghezza e la quantità di cemento utilizzata. Diversi metodi hanno implementato e ulteriormente modificato e approfondito questo livello di controllo, come riportato di seguito.

Livello 3: I più recenti macchinari per interventi di Deep Mixing presentano il più alto livello di controllo attualmente disponibile (Al-Tabbaa et al., 2009; Bringiotti, 2010; Deschamps, 2012; Gerressen, 2012; Quasthoff 2012). Per esempio la macchina CSM dispone di un microprocessore che misura ogni 3-6 secondi fino a 50 differenti parametri, quali la velocità angolare dell'utensile, la velocità di penetrazione, il momento torcente, la spinta, la densità della miscela e la pressione (Figura 2.14). Il computer può modificare i parametri di iniezione in base alle caratteristiche del terreno attraversato in modo tale da mantenere degli standard per ogni strato attraversato.

L'operatore controlla i dati attraverso un touch screen. Questo livello è inoltre caratterizzato da una registrazione continua dei dati per ogni colonna installata. Tali record possono essere stampati su formati diversi per produrre un archivio di assicurazione della qualità per ogni colonna eseguita, visualizzando l'andamento dei parametri in funzione del tempo o della profondità.

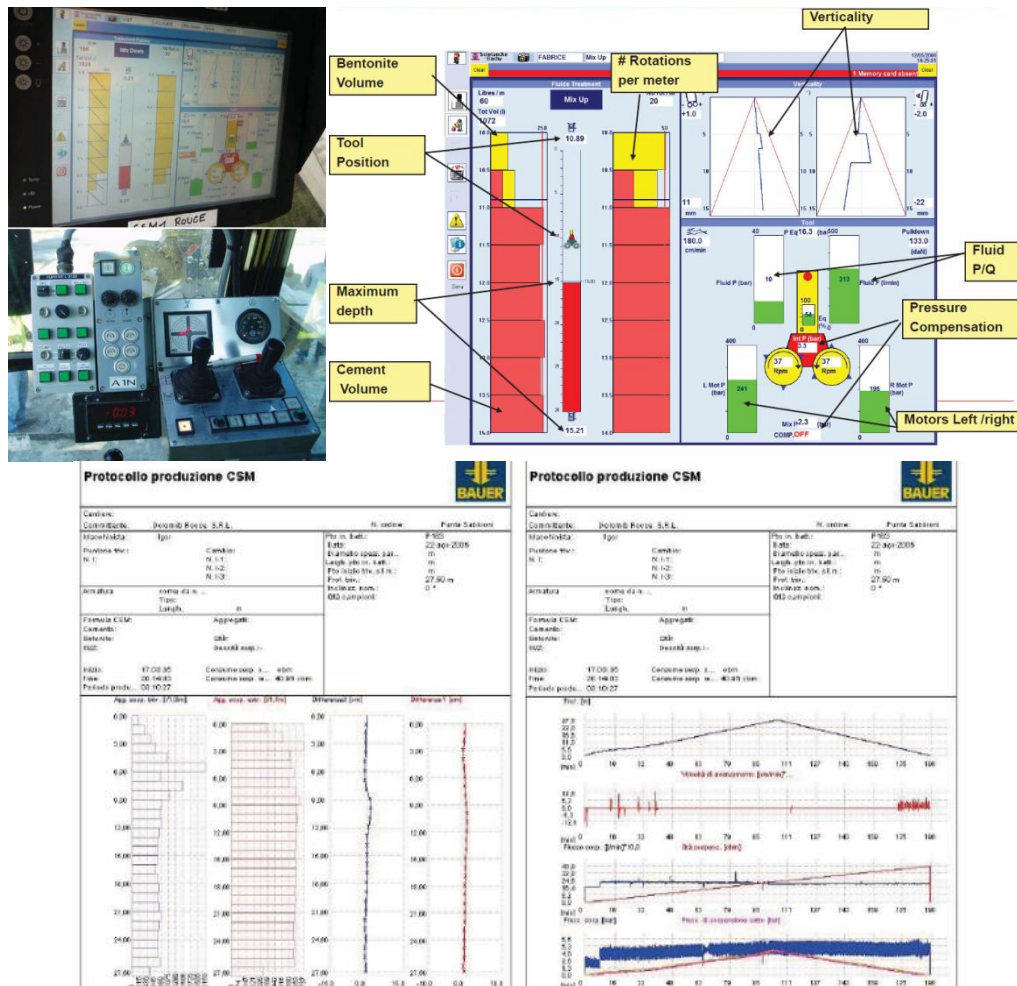


Figura 2.14 - Schermo a disposizione dell'operatore e restituzione cartacea dei dati di produzione (Deschamps, 2012; Bringiotti, 2010).

2.3.1 Prelievo di campioni "wet grab"

Durante l'esecuzione delle colonne o pannelli di Deep Mixing si prelevano campioni di miscela terreno cemento da sottoporre a prove specifiche, quali resistenza a compressione. Il prelievo di tali campioni viene eseguito con appositi campionatori inseriti nella colonna appena realizzata tramite l'ausilio di un mezzo di sollevamento: lo strumento fissato generalmente sulla fine dell'organo penetra sino alla profondità richiesta. In seguito all'apertura dell'apposita valvola, la miscela entra all'interno. In seguito al riempimento del campionatore, viene richiusa la valvola e si recupera l'utensile. Sequenze tipiche di campionamento sono di una al giorno ovvero uno ogni 500m³ circa di terreno trattato. La miscela viene poi disposta all'interno di un secchio e vengono successivamente confezionati i provini che sono fatti maturare in condizioni controllate (generalmente in laboratorio) e testati ad opportuni tempi di maturazione.

Deschamps (2012) riporta l'impiego di due diversi campionatori per il prelievo di miscela terreno-cemento fresca: un campionatore meccanico, facile da riempire soprattutto in presenza di miscele liquide, per raccogliere materiale a basse profondità in quantità sufficiente a preparare 10 provini e un campionatore pesante che prevede la presenza di due valvole idrauliche, con possibilità di realizzare fino a 16 provini e raggiungere profondità di 12 m (Figura 2.15).



Figura 2.15 - Tipi di campionatori utilizzati per prelievo di miscela fresca (Deschamps 2012).

Kitazume (2012) riporta invece l'impiego di due campionatori di dimensioni inferiori: il primo ha forma geometrica circolare (diametro 200mm), per l'impiego in presenza di miscele aventi comportamento molto fluido, è dotato di un tappo all'estremità che può essere momentaneamente separato da operazioni attraverso le aste cave per permettere il riempimento con la miscela. Il secondo ha forma rettangolare (lati 200mm x 150mm) ed è dotato di una valvola idraulica sul fondo che rimane aperta per permettere l'ingresso della miscela in continuo in fase di discesa sino alla profondità voluta e che si richiude con l'iniziare della fase di risalita. I campionatori sono ancora in fase di studio (Figura 2.16).



Figura 2.16 - Due tipologie di campionatori a sezione circolare e rettangolare (Kitazume 2012).

Campioni del reflusso dal pannello possono essere prelevati per eseguire ulteriori prove in laboratorio.

Al-Tabba (2012) riporta i margini di errore associati a prove condotte a partire da campioni wet grab, compresi nel range 10-25 % relativamente a prove ELL e nel range 10-20% per prove di lisciviazione.

Non sono attualmente disponibili procedure standardizzate per il prelievo di campioni di miscela fresca e il confezionamento dei provini in sito (Figura 2.17), che quindi presentano le stesse problematiche riscontrate e descritte precedentemente per i provini confezionati in laboratorio (§ 2.2).



Figura 2.17 - Esempi di stampi e tecnica di confezionamento impiegati in un cantiere.

Alcune volte i campioni di miscela fresca possono essere prelevati ed inseriti all'interno di contenitori ermetici e successivamente carotati in seguito all'indurimento della miscela per realizzare un provino di opportune dimensioni (Bellato et al., 2012a).

2.4 Campo prova

Il campo prove gioca un ruolo fondamentale nella progettazione di interventi di Deep Mixing, come descritto in § 2.1. Infatti, grazie ad una sua corretta esecuzione da parte della ditta incaricata dei lavori e alle prove in situ eseguibili possono essere individuati tutta una serie di accorgimenti e di procedure operative in grado di garantire un migliore risultato dell'intervento ed ottimizzare i parametri operativi del trattamento e quindi confermare che determinati requisiti di progetto possano realmente essere raggiunti in sito. Oltre a questo, il campo prova è necessario anche per determinare i criteri per le procedure QC/QA. Il campo prova consiste nella installazione di colonne o pannelli dimostrativi usando gli stessi metodi, materiali, tecniche e procedure previste per l'esecuzione dei lavori. Generalmente si realizzano 4 o 5 colonne/pannelli in una zona che permetta anche di esporli in modo tale da valutare la loro qualità visiva e provvedere al prelievo di campioni.

Aspetti principali da considerare, ricavati dai test sul campo prova, sono:

- ✓ Proprietà di resistenza e rigidità del terreno stabilizzato (possibilmente valutandone l'andamento con la profondità, soprattutto in presenza di terreni stratificati) e variazione nel tempo;
- ✓ Omogeneità del terreno trattato;
- ✓ Impatto ambientale del terreno trattato;

- ✓ Considerazioni di tipo economico (i.e. costo legante, costi di installazione, etc.)

I principali parametri da settare mediante campo prova sono:

- ✓ velocità di penetrazione ed estrazione (tempo di miscelazione);
- ✓ velocità di rotazione e coppia dell'utensile miscelatore;
- ✓ sovrapposizione delle colonne/pannelli;
- ✓ portata di legante/miscela.

Quando le colonne (o i pannelli) devono essere fondate su un substrato con caratteristiche meccaniche differenti da quelle del terreno trattato ovvero se si devono trattare terreni con caratteristiche meccaniche differenti che richiedono di agire sui parametri operativi per ottenere omogeneità nel trattamento, la coppia e/o la variazione della resistenza alla penetrazione possono essere misurati per stabilire valori di controllo per la fase esecutiva. In fase di realizzazione e dopo un certo periodo di maturazione, in genere una settimana, si possono eseguire tutta una serie di prove (descritte in § 2.3 e 2.5), quali il prelievo di campioni wet grab o da miscela indurita, esposizione delle colonne, prove in sito, etc. I risultati di queste prove sono utili per ottimizzare i parametri del trattamento e preparare un programma di controllo della qualità da mantenere durante l'esecuzione del trattamento.

Spesso si fa riferimento ai risultati delle prove riferiti a 7 giorni dall'installazione della colonna/pannello, non potendo aspettare una maturazione completa a 28 giorni principalmente per motivi economici. Pertanto particolare importanza nella fase preliminare in laboratorio viene data alle prove a 7 giorni di maturazione e alle relazioni per esempio che legano le resistenze a compressione qu_7-qu_{28} (vedi § 1.7.3; le relazioni individuate nel presente studio sperimentale sono riportate ai § 5.1 e 5.3) utili a stimare l'andamento della resistenza nel tempo in sito ipotizzando sia affetto dallo stesso tasso di incremento misurato in laboratorio.

2.5 Assicurazione di qualità (QA)

Al termine del trattamento vengono svolti dei controlli da parte del committente o della stessa ditta esecutrice indirizzati alla verifica degli obiettivi di progetto. Questa operazione è in genere eseguita tramite prove in laboratorio (su campioni indisturbati o prelevati a fresco) o prove in sito. In caso di prelievo di campioni, questi dovrebbero essere tutti delle stesse forme e dimensioni e preparati nel medesimo modo.

2.5.1 Esposizione di colonne

In alcuni casi è possibile provvedere all'esposizione delle colonne eseguite per condurre un'ispezione visiva, specialmente per basse profondità. La possibilità di esporre il terreno trattato permette di osservare non solo la forma della colonna, ma anche la sua omogeneità, il diametro e la bontà della sovrapposizione con altre colonne (Figura 2.18). Permette inoltre di raccogliere campioni di qualsiasi forma e orientazione, diversamente da quanto può essere ottenuto dal carotaggio. Sul terreno esposto può essere spruzzata una soluzione di fenolftaleina per indicare la presenza di cemento all'interno della colonna e stimare l'omogeneità della miscelazione. Le singole

colonne possono essere anche completamente estratte dal terreno e successivamente testate (Figura 2.19, Figura 2.20).

I principali svantaggi di tale tecnica sono sicuramente i costi, il tempo e la logistica, ma in progetti di notevole importanza e particolarmente complessi, tale pratica si rivela un importante mezzo di verifica (in particolare impiegata durante i campi prova) e di dimostrazione della qualità dell'intervento durante la fase costruttiva.



Figura 2.18 - Esempi di colonne e pannello esposti.



Figura 2.19 - Pannello CSM estratto ed ingrandimento di inclusione di terreno soffice non trattato (Denies et al., 2012b).



Figura 2.20 - Colonna Deep Mixing estratta ed esecuzione prova di compressione (Bruce 2012).

2.5.2 Prelievo di campioni di miscela indurita

Il prelievo di campioni è considerata la prima fonte dati riguardanti le caratteristiche generali dei terreni trattati, in particolare in presenza di colonne o pannelli di notevole profondità, e che quindi non possono essere generalmente esposti. Il carotaggio del terreno trattato ed indurito, se condotto responsabilmente e con attenzione da operatori esperti, può fornire campioni rappresentativi per l'osservazione visuale e per prove di laboratorio. Le perforazioni possono essere realizzate verticalmente in posizioni diverse nei pannelli per verificare l'omogeneità del trattamento (Figura 2.21).

Qualora i pannelli siano stati eseguiti in modo da sovrapporsi uno all'altro per un certo tratto, le perforazioni possono essere eseguite in corrispondenza dei giunti. Tale metodo di controllo risulta invasivo, in quanto si va a ledere l'integrità del pannello, ma altrettanto necessario per verificare la lunghezza di sovrapposizione tra i pannelli. Tra le misure da adottare per ottenere un campionamento rappresentativo e che riduca il disturbo arrecato al materiale trattato (Figura 2.22), vi sono ad esempio l'impiego di carotieri con diametro maggiore di 76 mm, a tripla parete e lubrificazione della parte interna del campionatore.



Figura 2.21 - Campionatore Schnabel per il prelievo di una verticale di terreno trattato (Weatherby, 2012).



Figura 2.22 - Disturbo dei campioni (Weatherby, 2012).

Secondo Filz (2012), gli elementi Deep Mixing sui quali eseguire un campionamento meccanico devono essere pari a 1-3% rispetto al totale delle colonne eseguite. Nella pratica comune si usa campionare l' 1% degli elementi Deep Mixing nei progetti di grandi dimensioni, mentre il 3% è consigliato per progetti caratterizzati da maggiore incertezza (piccole dimensioni) o da gravi conseguenze in caso di fallimento.

Al-Tabba (2012) riporta i margini di errore associati a prove eseguite a partire da campioni prelevati di miscela indurita, compresi nel range 15-55 % relativamente a prove ELL e nel range 10-100% per prove di lisciviazione. Tali margini risultano essere superiori a quelli individuati per i campioni wet-grab.

2.5.3 Prove geotecniche

Specialmente nelle regioni Scandinave dove le colonne trattate hanno bassa resistenza, è comune usanza adattare le prove geotecniche esistenti per il calcolo della resistenza al taglio non drenata a partire da prove penetrometriche (per esempio prova CPT, Figura 2.23).

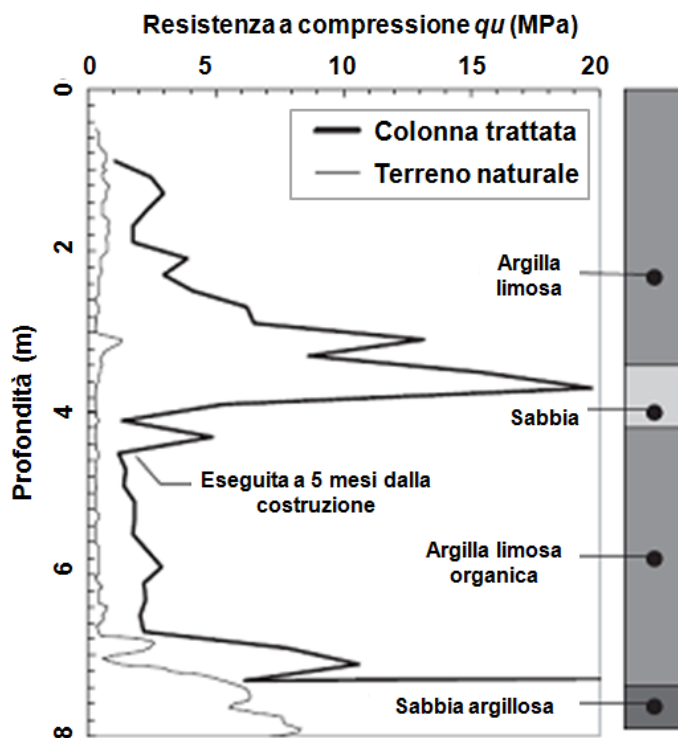


Figura 2.23 - Valutazione delle proprietà di una colonna di terreno trattato mediante prova CPT eseguita 5 mesi dopo la realizzazione (Van Impe et al., 2007).

Possono anche essere eseguite delle prove di carico statiche e/o dinamiche su di un certo numero di colonne. Secondo EuroSoilStab (2002) un numero almeno pari allo 0,5 % delle colonne prodotte dovrebbero essere testate in caso di progetti di grandi dimensioni, mentre nel caso di progetti medio-piccoli la percentuale consigliata sale all'1,5 %.

Tra le specifiche prove maggiormente eseguite vi sono:

Prova PORT (Pull Out Resistance Test): L'utensile deve essere installato in profondità nello stesso momento di esecuzione della colonna, viene estratto dopo circa

2-4 settimane dalla colonna stessa ad una velocità di 20 mm/s. Si ottiene un valor medio della resistenza a taglio mediante la formula: $q = P / (N_c A)$ [kPa] (dove: P = resistenza alla penetrazione netta; N_c = fattore di capacità tra 10-15; A = area del penetrometro).

Tale metodo può essere utilizzato anche su colonne con grande resistenza (fino 600 kPa) e lunghezza (fino a 20m). E' molto semplice da eseguire. Occorre però tenere in conto che la colonna da sottoporre al test deve essere scelta in anticipo (Figura 2.24).

Prova PRT (Push in Resistance Test): Il principio è il medesimo del PORT eccetto per il fatto che la resistenza al taglio viene misurata durante la fase di infissione (Figura 2.25). È un metodo di verifica semplice e poco costoso, funziona perfettamente per profondità minori di 5 m e resistenze comprese tra 150 e 300 kPa. Per profondità maggiori è necessario installare una guida poiché lo strumento tende a deviare dalla verticale.

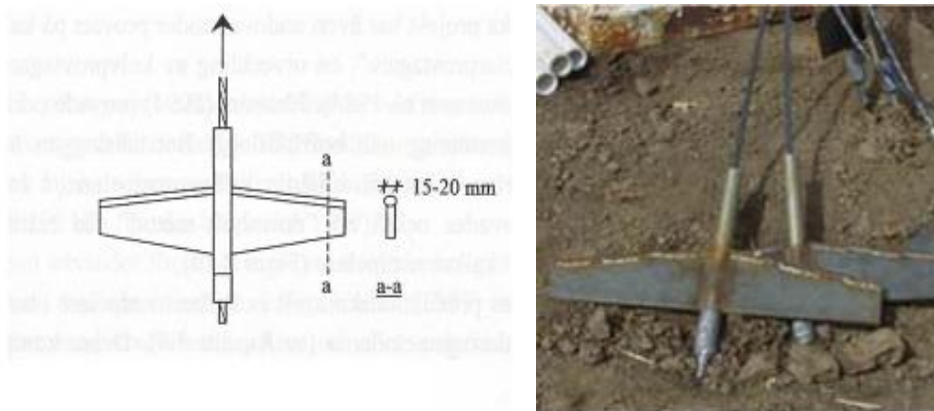


Figura 2.24 - Penetrometro utilizzato nel PORT.

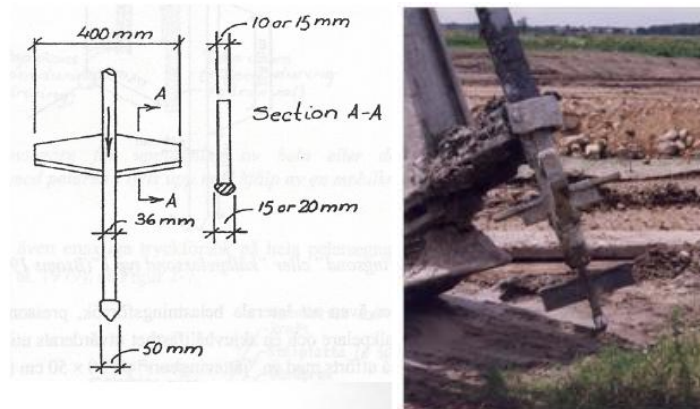


Figura 2.25 - Penetrometro utilizzato nel PRT.

2.5.4 Prove geofisiche

Le prove geofisiche sono largamente utilizzate in Giappone come mezzo di verifica della resistenza, integrità e omogeneità delle colonne trattate mediante DM. Tuttavia, nonostante siano delle prove promettenti, non sono ancora considerate prove di routine.

Tra le prove maggiormente utilizzate vi sono: prove SASW, prove downhole, uphole e crosshole eseguite per verificare la continuità del trattamento e misurare il miglioramento delle caratteristiche meccaniche del terreno trattato.

2.6 Rapporti di visita cantieri Deep Mixing

Nel corso della permanenza di sei mesi presso il Port and Airport Research Institute, è stato possibile condurre due sopralluoghi in cantieri di Deep Mixing, come descritto nei paragrafi seguenti

2.6.1 Cantiere Wet Deep Mixing 1, zona Baraki-Nakayama



Figura 2.26 - Vista globale del cantiere e partecipanti. Da sinistra verso destra: Mr. Tokunaga (CDM); Dr. Fukushima (Fudo Tetra corporation); Mr. Taguchi (TOA corporation); Prof. Kitazume (PARI); Dr. Ming (ReCeSS Malesia); il sottoscritto; Dr. Kilpenainen (VTT); Prof. Heikkila (University of Oulu).

Lavori per la realizzazione di un doppio sottovia carrabile di svincolo per l'autostrada esistente. Trattamento di Wet Deep Mixing impiegato allo scopo di contrastare possibili fenomeni di liquefazione, relativamente alle sabbie presenti al di sotto dello strato superficiale argilloso. La falda è presente a circa 2m dal p.c.

Macchinario impiegato: CDM standard provvisto di due alberi rotanti lisci e n°3 lame miscelatrici alle estremità (Figura 2.27). Diametro della singola colonna di terreno trattato: 1000 mm, interasse tra le aste: 800 mm, area dell'unità di trattamento: 1,50 m².

Profondità del trattamento: -7,30 m dal piano campagna. Impiego di Slug Cement B-type, rapporto Acqua:Cemento = 1:1, cement factor: 94kg/m³. Resistenza q_u target a 28 giorni: 250 kPa, pari a 1/3 di quella valutata mediante prove in laboratorio: 750 kPa. (In accordo alle norme JGS 0821-2000, $q_{u,field} = (1/3 - 1)q_{u,lab}$). La configurazione di trattamento scelta è del tipo a "griglia", avente dimensioni 61.5m x 12.0m, con celle di dimensioni 4.0m x 4.8m. L'interasse tra coppie di colonne di terreno trattato è di: 1600mm (Figura 2.28).



Figura 2.27 - Macchinario CDM impiegato, particolare delle lame miscelatrici rotanti.

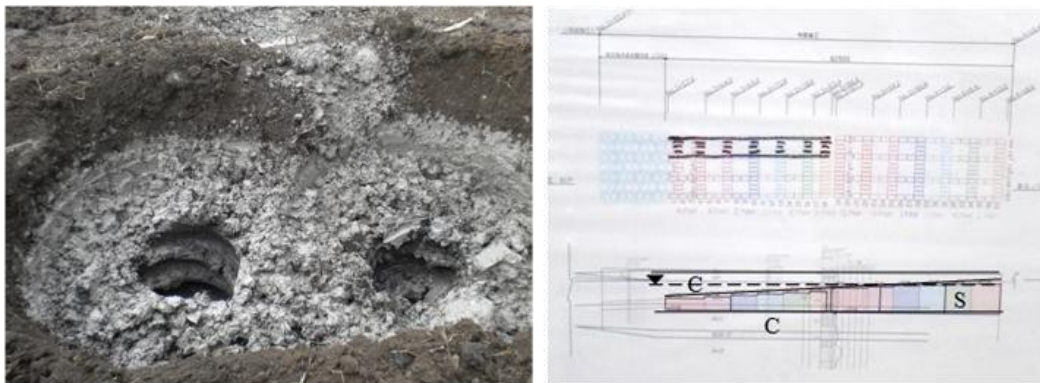


Figura 2.28 - Unità di trattamento, schema planimetrico e sezione del trattamento.

La velocità di discesa e risalita delle lame rotanti è pari a 1 m/min. In fase di discesa (velocità di rotazione pari a 20 rpm) ha luogo l'iniezione della miscela cementizia, a partire dalla sommità dello strato sabbioso sino alla profondità desiderata; successivamente avvengono una fase di bottoming (breve ciclo di salita e discesa nei pressi della base) e la risalita, a velocità di rotazione invertita e raddoppiata (40 rpm).

I valori di velocità scelti sono tali da assicurare (unitamente al numero di lame miscelatrici pari a 3, quindi $M = 6$) un valore del parametro T (numero di rotazione delle lame, § 1.6.1) superiore a 360rpm/m, pari allo standard di riferimento giapponese.

Nel caso in esame sono previsti 6 carotaggi per prelevare campioni dalle colonne di terreno trattato, sui quali effettuare prove di compressione a 28 giorni in laboratorio. Tali sondaggi verranno eseguiti a 2 settimane di distanza dal trattamento; le carote prelevate saranno poi tenute altre 2 settimane in laboratorio e successivamente testate.

Costo del singolo prelievo + relative prove: 600,000Y (circa 5,500€).

Tutti i parametri operativi della macchina sono settati automaticamente, ad eccezione della velocità di discesa e risalita delle aste rotanti controllata manualmente dall'operatore (Figura 2.29). Questo perché in caso di problemi, come ad esempio l'incontro di ostacoli o grossi trovanti, si possa decidere di ridurre la velocità o fermare l'avanzamento, evitando quindi la rottura delle aste. Qualora l'ostacolo dovesse essere

insuperabile, sono due le alternative adottate: rimozione dello stesso (se il problema è superficiale si può scavare, altrimenti viene impiegata una macchina speciale, una specie di trivella); impiego di una tecnica alternativa, ad esempio il Jet Grouting.

L'impianto per la produzione della malta cementizia prevede un Silos da 330ton di cemento, un Agitatore (aggiunta acqua), due vasche per la raccolta della malta cementizia ($V = 2 \text{ m}^3$) e una Pompa (Figura 2.30). Per il sito in esame verranno impiegate 500ton/day di cemento.



Figura 2.29 - Display operatore: Colonne dei parametri operativi in giallo (da sinistra verso destra profondità (m), velocità (m/min) e portate iniezione (l/m) e grafico dell'andamento con il tempo, con evidenziata la fase di bottoming.



Figura 2.30 - Impianto di produzione della malta cementizia.

2.6.2 Cantiere Wet Deep Mixing 2, zona Shin-Kiba (baia di Tokyo)

Lavori per la realizzazione di un'area di smaltimento di terreni dragati nel porto di Tokyo. Trattamento di Wet Deep Mixing impiegato allo scopo di migliorare le proprietà meccaniche dei terreni argillosi di fondazione dei cassoni di protezione (Figura 2.31). La profondità del fondale marino nel sito in esame è di circa 13m. Il trattamento del terreno argilloso presente inizia a -13.2m, sino a raggiungere -43m di

profondità, in corrispondenza dello strato sabbioso individuato dalla campagna di sondaggi.

In Figura 2.32 è raffigurato il macchinario impiegato, POCM – 12 (Penta-Ocean Chemical Mixing Method), direttamente montato su un battello (richiesta una profondità minima del fondale pari a 5m). Tale macchinario prevede una profondità massima raggiungibile pari a 52m, oltre i quali si possono applicare ulteriori 10m di aste. Trattamento possibile per terreni con NSPT < 30. Il macchinario POCM-12 è provvisto di quattro alberi rotanti e n°6 lame miscelatrici alle estremità. Diametro della singola colonna di terreno trattato: 1310mm, interasse tra le aste: 990mm; unità di trattamento di forma quadrata (quattro colonne parzialmente sovrapposte) di lati 2300mm ed area 4.65m².

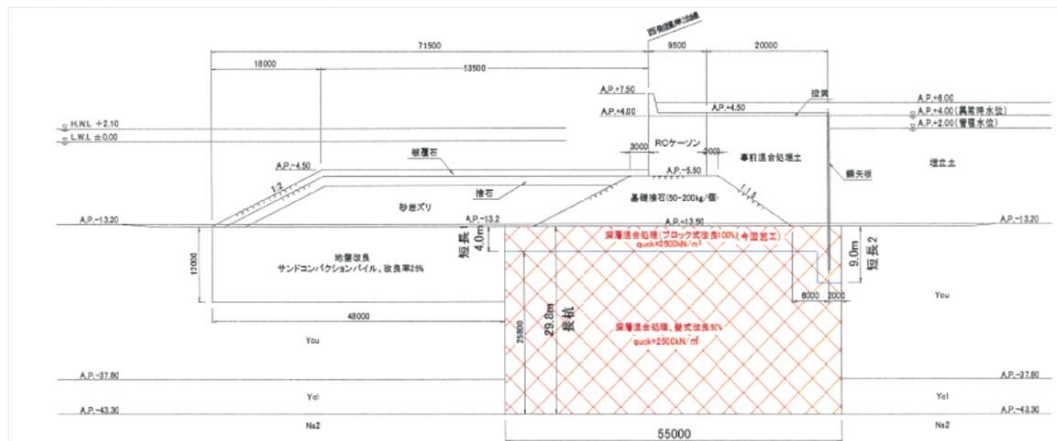


Figura 2.31 - Sezione della barriera prevista per la futura area di smaltimento, con evidenziato l'intervento di Deep Mixing.

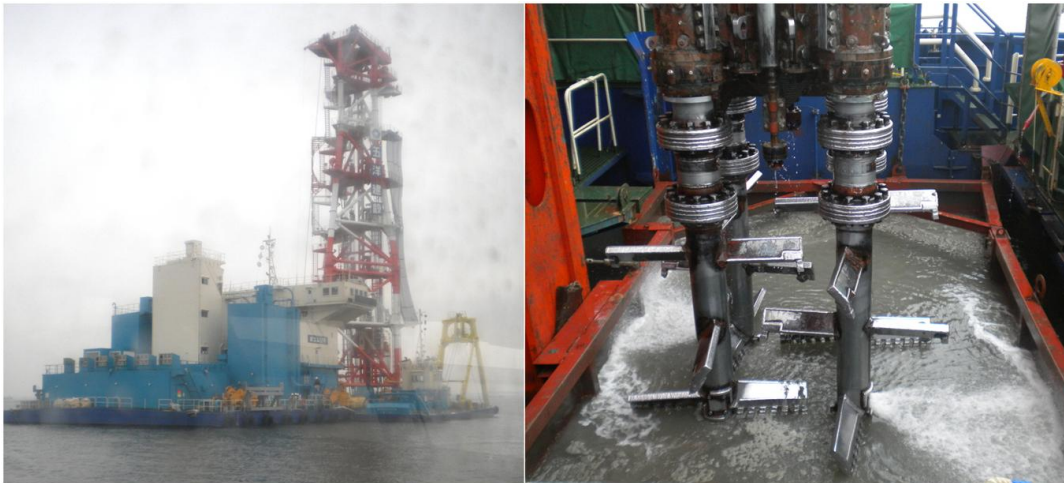


Figura 2.32 - Vista del cantiere mobile POCM-12 e particolare lame miscelatrici e dei 6 ugelli impiegati, di cui 4 posizionati sopra le lame e 2 all'estremità delle stesse.

Sono state condotte delle prove preliminari di laboratorio sui campioni di terreno prelevati in sito:

2 sondaggi x 3 profondità di prelievo x 2 campioni = 12 casi;

1 caso = 3 miscele x 2 tempi di maturazione x 3 provini.

In seguito alla caratterizzazione iniziale, è stato scelto Slug Cement B-type, con aggiunta di un agente chimico con doppia funzione di fluidificante e ritardante della presa. Tale additivo assicura quindi una riduzione dell'acqua richiesta nella miscela e previene il rischio di intasamento delle tubazioni (la distanza dall'impianto di miscelazione agli ugelli è superiore a 100m). Inoltre è stato scelto un rapporto Acqua:Cemento = 0.6 con impiego di acqua marina ed un cement factor variabile con la profondità, dal basso verso l'alto: 155, 165, 175kg/m³.

La resistenza qu target a 28 giorni risulta pari a 2,50MPa. La configurazione di trattamento scelta è "lattice type" (a reticolo), che prevede l'impiego di file di colonne alternate di lunghezza diversa (Figura 2.33). Le dimensioni del trattamento sono pari a 65,2m x 55,0m, per 29,8m di profondità. L'interasse tra le unità di trattamento è fissato in modo da assicurare una compenetrazione di 30cm (8 unità in 16m lineari).

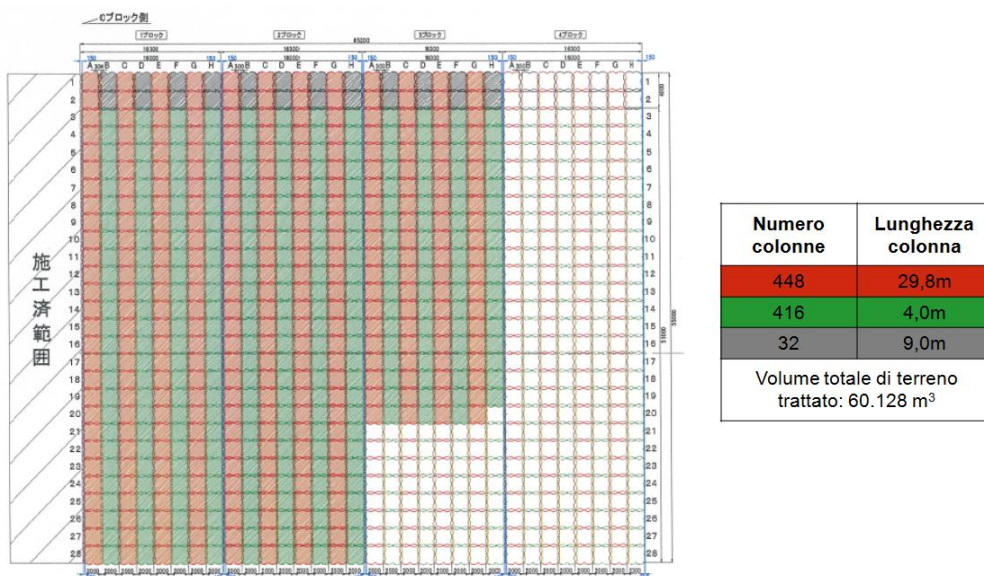


Figura 2.33 - Schema del trattamento "lattice type" previsto.

La velocità di discesa delle lame rotanti è inizialmente pari a 1m/min (velocità di rotazione pari a 50rpm) sino a ridursi alla metà a pochi metri dal fondo (velocità di rotazione pari a 40rpm). Successivamente avvengono una fase di bottoming e la risalita (seguendo le stesse velocità della fase di penetrazione) durante la quale avviene l'iniezione della miscela cementizia. Per l'esecuzione di una verticale (4 colonne) di 29,8m occorrono circa 1,5 ore.

Uno dei motivi per i quali la fase di iniezione della miscela avviene solamente in fase di risalita è quello di evitare che, nel caso di interruzione della penetrazione (dovuta ad esempio al blocco delle lame nel terreno), la miscela inviata agli ugelli possa fare presa nel circuito e intasare le tubazioni. In tal caso sarebbero costretti a cambiare l'intero circuito di mandata. Sempre al fine di evitare tale inconveniente, dopo ogni verticale di trattamento le tubazioni vengono pulite con un passaggio di acqua. Nel passaggio da una verticale alla successiva, avviene l'estrazione a giorno della lame miscelatrici, al fine di permetterne l'osservazione visiva e la pulizia (il tempo richiesto per percorrere i 13m di acqua presenti è di circa 20 minuti, quindi tale procedura è prevista a fasi alternate, una verticale si e una no, al fine di risparmiare tempo).

Sul fondo della POCM-12 sono presenti diversi compartimenti stagni per l'acqua, impiegati per bilanciare le varie forze causa di instabilità (vento, onde, svuotamento/riempimento giornaliero di 300ton di cemento, inserimento/estrazione delle aste miscelatrici) e quindi garantire la corretta verticalità della lavorazione. Nella postazione di controllo sono presenti, oltre al monitor per l'andamento in diretta della lavorazione (profondità e parametri operativi, Figura 2.34): monitor per il corretto posizionamento GPS, controllo del tiro dei 6 ancoraggi, telecamere aste miscelatrici, monitor per il controllo dei parametri dei serbatoi di bilanciamento e delle pompe.

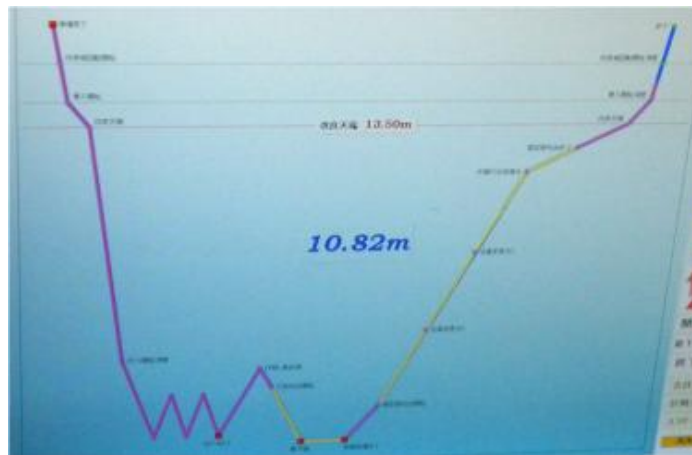


Figura 2.34 - Display operatore con andamento della lavorazione con il tempo.

L'impianto di produzione della malta cementizia prevede due silos, ciascuno da 200ton di cemento, un agitatore (aggiunta di acqua marina e dell'agente chimico fluidificante e ritardante), una vasca per la raccolta della malta cementizia (Volume = 4m^3) e 6 pompe (portata 400l/min), una per ogni ugello di emissione (Figura 2.35). Per il sito in esame sono impiegate 300ton/giorno di cemento.

Nel caso in esame sono previsti 6 carotaggi a spot (1 ogni 10.000 m^3 ; campionatore di diametro 116mm; i 6 punti casuali di prelievo sono decisi dal cliente, ma le prove sono comunque condotte dall'impresa) per prelevare campioni dalle colonne di terreno trattato, sui quali effettuare prove di compressione a 28 giorni in laboratorio. Per ciascuna verticale indagata saranno prelevati 2 campioni ogni 2m di profondità.



Figura 2.35 - Particolare silos, vasca di raccolta e tubazioni impiegati.

2.7 Programma di ricerca internazionale sul Deep Mixing 2009 - 2015

È attualmente in corso un programma di ricerca internazionale mirante alla standardizzazione delle procedure di controllo e assicurazione di qualità sui terreni stabilizzati mediante Deep Mixing, “*International collaborative study on Deep Mixing Method*” coordinato dal Prof. Kitazume (Tokyo Institute of Technology, ex Port and Airport Research Institute) e a cui partecipano tutti gli esperti nel settore Deep Mixing. La ricerca è articolata in quattro Task, schematicamente riportati nel diagramma sottostante, dai quali si vede come essa riguardi i diversi aspetti ampiamente illustrati nel presente Capitolo.

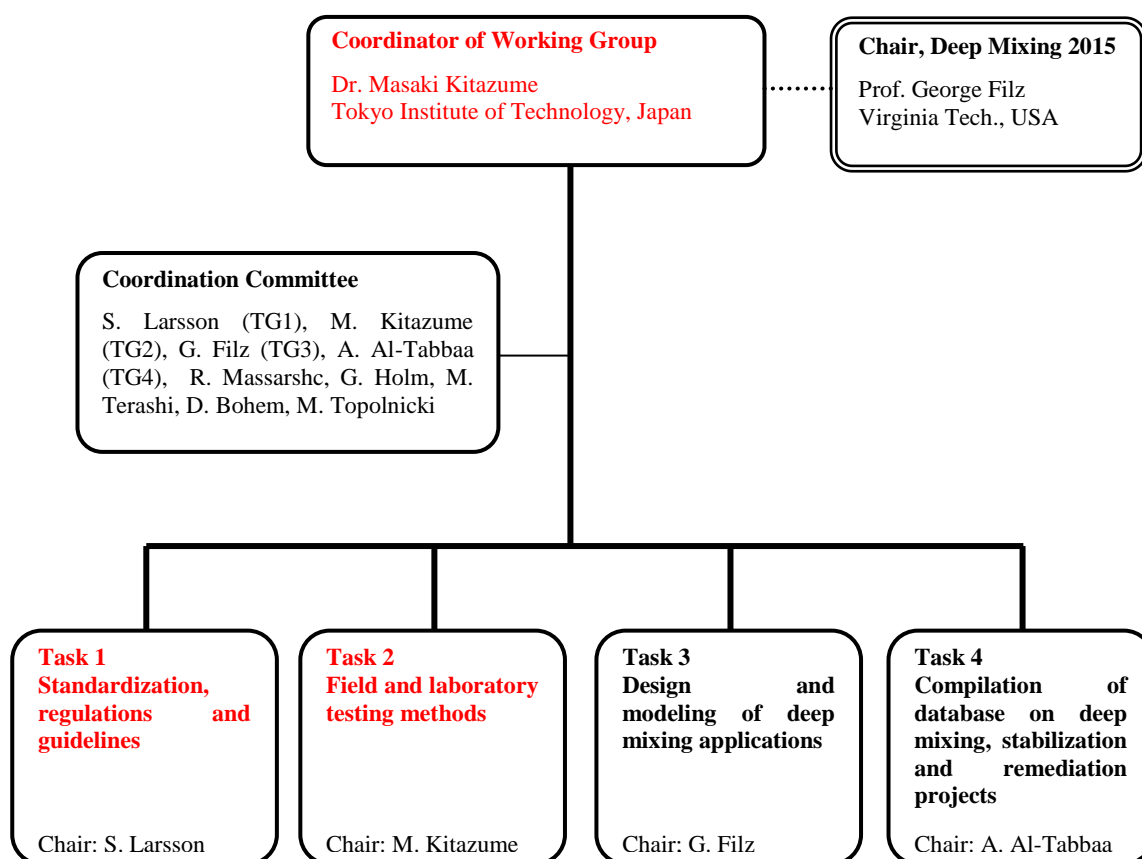


Diagramma schematico dell'attività di ricerca internazionale.

Obiettivi principali del “*Task 1, Standardizzazione, regolamenti e linee guida*”, e del “*Task 2, Metodologie di prova in sito e in laboratorio*”, all’interno dei quali si colloca il presente lavoro di tesi di dottorato, sono: provvedere alla redazione di standard internazionali sulla progettazione, l’esecuzione e il controllo di qualità; condurre un programma di prove di laboratorio comuni al fine di valutare l’effetto delle procedure e condizioni di prova sulle proprietà dei terreni stabilizzati; eseguire e comparare prove in sito e in laboratorio; stimare le proprietà meccaniche e durabilità in sito mediante prove su miscele confezionate in laboratorio o a partire da campioni prelevati in sito. Gli obiettivi del presente studio sperimentale di supporto alla ricerca internazionale sono descritti in §3.1.1.

Un aspetto da considerare risulta essere la definizione e valutazione della “*lavorabilità*” della miscela terreno-legante, ancora poco indagato, come specificato al successivo paragrafo, in quanto si ritiene che tale proprietà abbia un’influenza assolutamente decisiva nella scelta della tecnica di confezionamento per la realizzazione dei provini. I risultati presentati nel precedente paragrafo § 2.2.2 sottolineano come la tecnica di confezionamento influenzi fortemente le proprietà dei provini trattati: per la stessa miscela, una diversa tecnica fornisce diversi risultati. L’idea alla base della attuale ricerca, descritta in § 3.1, è che l’applicabilità di ogni tecnica di confezionamento analizzata sia funzione della lavorabilità della miscela, e che quindi ogni tecnica di confezionamento sia applicabile entro un certo range di lavorabilità. Un contributo in tale direzione è fornito dallo sviluppo di una procedura per la misura della lavorabilità della miscela terreno-legante, come descritto nel paragrafo 3.4.1.

2.7.1 Lavorabilità della miscela terreno-legante

Una miscela terreno-legante è un materiale complesso, caratterizzato dalla presenza di particelle aventi un ampio range di dimensioni e proprietà variabili con il tempo. Infatti può essere costituita da differenti tipi di terreno (da argille a ghiaie) e di legante, aggiunto in forma asciutta o di malta. Una volta aggiunto il legante, avvengono le reazioni che portano ad un indurimento della miscela con il tempo. La lavorabilità può rappresentare varie caratteristiche relative alle miscele fresche, difficili da misurare quantitativamente. In questo studio il termine “Lavorabilità” viene assunto come “la proprietà delle miscele terreno-legante di essere miscelate in un contenitore e disposte in uno stampo con facilità”. Una lavorabilità elevata è quindi caratteristica di miscele a comportamento “liquido”, più semplici da miscelare e maneggiare, mentre una bassa lavorabilità è associata a miscele compatte e viscosi, come illustrato qualitativamente in Figura 2.36.



Figura 2.36 - Concetto qualitativo di lavorabilità.

La lavorabilità può essere collegata al termine di “consistenza” (espresso ad esempio dai limiti di Atterberg) solo se si considerano miscele realizzate a partire da terreni coesivi. I metodi utilizzati finora per la valutazione della lavorabilità delle miscele danno qualche indicazione utile ma non possono essere considerati totalmente soddisfacenti.

Per la valutazione della lavorabilità delle miscele terreno-legante sono stati usati nelle esperienze passate parecchie metodologie, come descritto nel prosieguo; tuttavia, per diverse ragioni, nessuno dei metodi impiegati è risultato essere pienamente soddisfacente, pur fornendo utili indicazioni per l’individuazione del metodo presentato in § 3.3.

1) *prova Hand Vane*: Tale metodo è stato impiegato per la caratterizzazione delle miscele ottenute a partire dalla Kawasaki clay (§ 3.1). L'Hand vane (Figura 2.37) viene generalmente utilizzato per terreni coesivi e fornisce indicazioni riguardo la resistenza al taglio in condizioni non drenate c_u , che può essere usata per la valutazione della consistenza del terreno (ASTM D2573-08). Il dispositivo consiste in due palette montate perpendicolarmente l'una con l'altra all'estremità di un'asta cilindrica, solidale con una molla per la misura della coppia necessaria alla rotazione. Il test viene eseguito dopo la fase di miscelazione del terreno con il legante, a miscela omogeneizzata. Il dispositivo (diametro 20 mm) viene infisso nella miscela che si trova all'interno di una ciotola e si dà inizio alla misurazione; viene misurato il momento torcente che è collegato alla consistenza della miscela. La misura è afflitta da errore umano (verticalità delle palette, velocità di rotazione non uniforme), così vengono effettuate 3÷5 misurazioni per ogni miscela in differenti punti della ciotola. È un metodo rapido, semplice ed economico; tuttavia è un metodo statico, non dinamico, perciò risulta influenzato dalla tixotropia delle miscele terreno-legante. È stato osservato che, specialmente per miscele più consistenti, il materiale nella ciotola poteva essere costituito da grumi o presentare grandi vuoti, quindi non era possibile ottenere risultati significativi se non compattandolo in qualche modo. Perfino in questo caso viene quindi evidenziata la necessità di compattare il materiale con il già ricordato problema della scelta di una appropriata tecnica di confezionamento, che può essere funzione della lavorabilità della miscela. Nello studio sperimentale al fine di avere risultati comparabili per tutte le misure è stato deciso di compattare il materiale nel contenitore facendo del Tapping (10 colpi) sul piano di lavoro e livellando la superficie con una spatola.

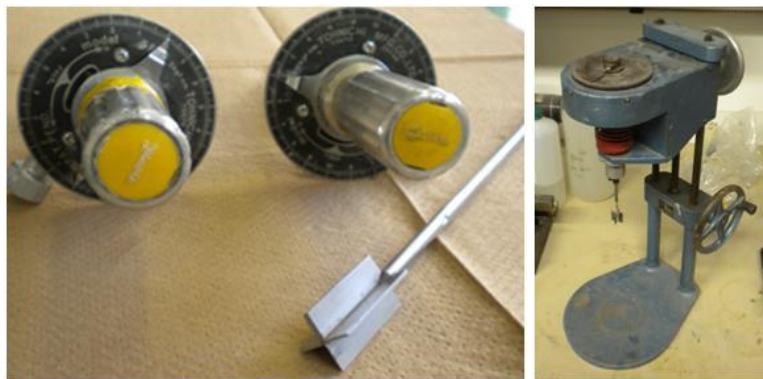


Figura 2.37 - Hand vane e Laboratory vane impiegati nello studio sperimentale.

2) *prova Laboratory Vane*: Tale metodo è stato impiegato sulle miscele realizzate a partire dai terreni dell'area romana (§ 3.3), Figura 2.37. L'apparecchiatura è dotata di un'asta con quattro alette alle estremità poste a croce, del tutto analoga a quella dell'Hand Vane pertanto presenta vantaggi e svantaggi simili, ma le caratteristiche della strumentazione riducono l'errore umano aumentando il grado di affidabilità della misura (ASTM D4648-00). Mediante una vite collegata ad una manopola si può regolare l'altezza dell'asta, che viene fatta calare all'interno della scodella metallica, e quindi viene infissa nella miscela. Dopodiché facendo ruotare con velocità costante un'altra manopola posta nella parte posteriore dello strumento si fa ruotare l'asticella con le alette che taglia il cilindro di materiale corrispondente; si va a misurare così lo spostamento angolare compiuto dalle lame. Lo spostamento angolare ($^{\circ}$) moltiplicato per la costante della molla (0,174) fornisce direttamente il valore di c_u in kPa. Nello studio sperimentale, tale prova è stata applicata anche a terreni a carattere

granulare al fine di avere un'idea della lavorabilità, con la consapevolezza dei limiti di tale misurazione. Per alcune misure è stato osservato che le letture erano influenzate dalla presenza di particelle sabbiose e ghiaiose, in funzione della dimensione relativa tra le alette dell'asta e la dimensione dei grani.

3) *prova cono svedese*: la prova con il cono svedese (Fall Cone) viene generalmente utilizzata per determinare il limite di liquidità di un terreno coesivo saturo (Sherwood e Ryley, 1970). L'impiego positivo di tale metodo per valutare la consistenza di miscele terreno argilloso-cemento è riportato da Marzano et al.(2009) (Figura 2.38). È stato osservato come le misurazioni fossero invece pesantemente influenzate dalla presenza di particelle sabbiose e ghiaiose. Il test è rapido, semplice ed economico. Il campione da testare necessita di essere compattato attraverso l'uso di una spatola, rivelando simili problemi di confezionamento a quelli descritti per l'Hand vane.



Figura 2.38 - Misurazione mediante cono svedese.

4) *Cono di Marsh*: Il test con il cono di Marsh (ASTM 6910) viene generalmente usato per la misura della reologia di paste e malte cementizie. L'apparecchiatura è composta da un imbuto con un lungo collo che ha un'apertura di 5 mm. Una base tiene lo strumento in piedi al di sopra di un contenitore cilindrico graduato di vetro (Figura 2.39). Dopodiché 1 litro di pasta cementizia viene messa nel cono; il foro alla base del collo è aperto. Viene misurato il tempo che il volume di malta cementizia impiega per defluire fuori dal foro di uscita dell'imbuto. Il test è semplice da usare, rapido e molto economico. Tale metodo non è utilizzabile per tutte le miscele, in quanto eventuali particelle sabbiose e ghiaiose intaserebbero l'imbuto e non fluirebbero con continuità dal foro di uscita; esso può essere utilizzato soltanto per miscele altamente lavorabili e formate con terreni coesivi (a grana fine). Una possibile soluzione potrebbe essere quella di aumentare la dimensione del foro di uscita dall'imbuto. Inoltre per miscele terreno-cemento c'è anche il problema per cui il materiale non può essere facilmente recuperato dall'interno del cono: ciò può implicare modifiche nella composizione della miscela, ad esempio con la perdita di frazione fine che non verrebbe coinvolta nel confezionamento dei provini di terreno stabilizzato. Quindi l'applicazione di tale metodo per valutare la lavorabilità può comportare perdite di materiale significative.

5) *cono di Abrams*: il test con il cono di Abrams è la prova più conosciuta ed ampiamente usata per la valutazione della lavorabilità del calcestruzzo fresco (ASTM C143). È una prova semplice e robusta. L'apparecchiatura consiste in uno stampo a forma di tronco di cono; lo stampo viene riempito con tre successivi strati di calcestruzzo di volume uguale, ognuno dei quali viene compattato tramite i colpi di un asta metallica. Lo stampo viene poi sollevato verticalmente verso l'alto, e viene

misurata la variazione di altezza della forma di calcestruzzo (Figura 2.39). Generalmente la prova viene effettuata direttamente in cantiere. Se effettuata per miscele terreno-legante, la prova può presentare le stesse problematiche di confezionamento rilevate per l'Hand Vane e il cono svedese, dato che le modalità di riempimento del cono influenzano i risultati. Se venisse effettuato in laboratorio il consumo di materiale sarebbe eccessivo (non potrebbe essere riutilizzato); inoltre le miscele molto lavorabili non sarebbero facilmente misurabili.



Figura 2.39 - Misurazioni mediante cono di Marsh e cono di Abrams.

6) *Altri metodi*: Ammettendo una somiglianza di base tra le miscele terreno-legante ed il calcestruzzo fresco, è stata effettuata una ricerca bibliografica che ha portato all'individuazione dei 61 metodi esistenti (tra cui il cono di Abrams) di valutazione della lavorabilità del calcestruzzo (Koehler & Fowler, 2003), utile per ottenere informazioni per la definizione di nuove metodologie per la valutazione della lavorabilità di miscele terreno-legante. È da notare come pur essendo il calcestruzzo un materiale ben noto nelle applicazioni ingegneristiche, non esistano metodi validi per una misura quantitativa della sua lavorabilità, spesso stimata mediante semplici metodi empirici. L'approccio più promettente sembra essere comunque quello dei reometri rotazionali relativi, come il dispositivo "Tattersall Two-Point" (Tattersall and Banfill, 1983) ed il reometro "IBB" (Beaupre and Mindness 1994), mostrati in Figura 2.40. Tali dispositivi possono essere usati per misurare parametri connessi ma non generalmente uguali ai parametri reologici. A differenza di reometri tradizionali, dove la variazione della deformazione di taglio è del tutto nota, una sua misurazione intorno alla lama di miscelazione è molto complessa e fundamentalmente impossibile da valutare analiticamente. Secondo Schramm (1994), la resistenza offerta dal campione che viene mescolato è funzione della viscosità dello stesso. Tattersall e Banfill (1983) hanno misurato la coppia torcente necessaria per girare la lama miscelatrice nel calcestruzzo, sviluppando un ordinario mixer da cucina attrezzato con un gancio per agitare il materiale, connesso a sua volta con un dinamometro. Il reometro IBB presenta delle modifiche, principalmente legate alle maggiori dimensioni e alla possibilità di misurazione digitale della velocità di miscelazione e della resistenza opposta alla rotazione della lama miscelatrice a forma di H, che ruota in movimento planetario e assiale. Nelle sue dimensioni attuali lo strumento è troppo grande per un uso in sito.

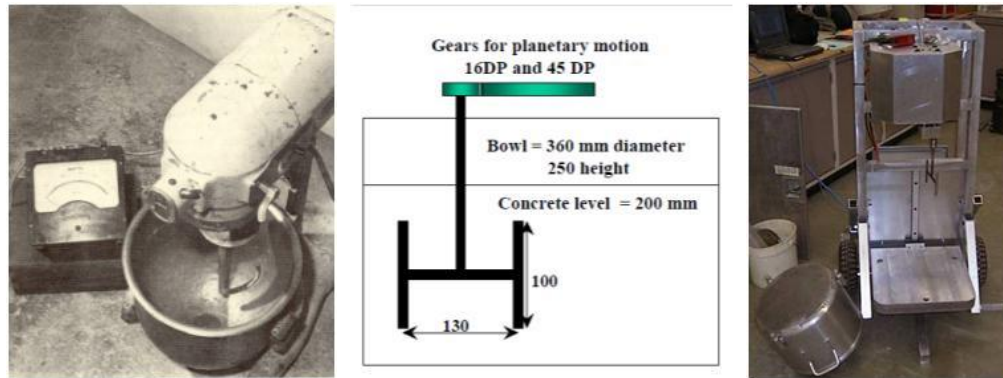


Figura 2.40 - Strumento Tattersall Two-Point e Reometro IBB.

Per quanto detto in questo paragrafo, appare evidente la necessità di trovare un metodo per la valutazione della lavorabilità delle miscele che possa essere usato con efficienza per diversi tipi di miscela (dalle liquide alle più viscosi, di composizione coesiva o granulare), con lo scopo di definire il range di lavorabilità in cui ciascuna tecnica di confezionamento risulti essere applicabile.

3. STUDIO SPERIMENTALE, OBIETTIVI E MATERIALI

Lo studio sperimentale effettuato può essere schematicamente suddiviso in quattro parti principali che si distinguono essenzialmente per gli obiettivi preposti, per i materiali utilizzati e per i luoghi in cui si sono svolte.

La prima parte dello studio è stata eseguita presso il Port and Airport Research Institute (PARI), Tokyo, Giappone (Ottobre 2010 - Marzo 2011). Il lavoro svolto in una prima fase temporale è stato condotto presso il *Soil Stabilisation Group*, direttamente impegnato in diversi ambiti di ricerca sulla tecnologia del Deep Mixing, ed è parte del programma di ricerca internazionale sulla standardizzazione delle procedure di miscelazione in laboratorio (§ 2.7). Lo studio mira a definire l'applicabilità di diverse tecniche di confezionamento dei provini stabilizzati che vanno poi sottoposti alle prove di laboratorio, largamente impiegate nelle diverse fasi di un intervento di Deep Mixing.

È stato inoltre possibile instaurare una collaborazione con il *Foundation Group* (PARI), per uno studio sull'utilizzo di nuovi materiali in ingegneria geotecnica ambientale, nello specifico sull'impiego di "Tire chips" (granulato di copertone) come additivo a miscele terreno-cemento al fine di aumentarne la duttilità, evitando il comportamento fragile. Scopo dello studio è stato quello di indagare l'effetto dell'aggiunta di tire chips sulle proprietà meccaniche di una miscela terreno-cemento, da impiegare nella realizzazione di una barriera impermeabile, al fine di valutarne il mantenimento dell'efficienza prestazionale in presenza di elevate deformazioni.

Una terza parte dello studio sperimentale è stata svolta presso il laboratorio di Geotecnica del Dipartimento di Ingegneria Edile e Ambientale (DICEA) della Sapienza, Università di Roma. Questa fase ha avuto come obiettivo l'estensione e la validazione dei risultati ottenuti nella precedente esperienza presso il PARI verso la standardizzazione delle procedure di laboratorio per differenti tipologie di terreno e lavorabilità della miscela terreno legante, quest'ultima proprietà valutata mediante una innovativa procedura di misura.

È stato inoltre possibile instaurare una collaborazione con l'Università di Padova e la Bauer Group per uno studio relativo ad un campo prova di Cutter Soil Mixing in Zandvoort (Olanda). A partire dai dati di produzione dei pannelli di prova sono stati correlati i parametri di miscelazione in sito e in laboratorio ed eseguite prove meccaniche e fisiche su provini di miscela terreno-legante realizzati in laboratorio seguendo il medesimo mix design.

3.1 Attività presso il "Soil Stabilisation group" (PARI, Giappone)

3.1.1 Obiettivo dello studio sperimentale

Uno degli obiettivi dello "International collaborative study on Deep Mixing Method" (§ 2.7) è quello di definire e quantificare il range di applicabilità delle diverse tecniche di confezionamento dei provini di miscela terreno-legante da sottoporre alle prove di laboratorio, largamente impiegate nelle diverse fasi di un intervento di Deep

Mixing. Fondamentale è il ruolo giocato dalla “*lavorabilità*” della miscela, definita in § 2.7.1.

La proprietà della “*applicabilità*” non è definita con riguardo alla tecnica di confezionamento dei provini che fornisca la massima corrispondenza con le condizioni in sito, bensì con la tecnica che possa produrre i provini “migliori” (sulla definizione di tale proprietà è lasciata libera scelta alle organizzazioni partecipanti allo studio internazionale) che rappresentino quindi un estremo superiore ottenibile, utile per realizzare correlazioni tra sito e laboratorio del tipo riportate in § 1.7.1.

Nel presente studio sono stati considerati “migliori” i provini realizzati con una specifica tecnica di confezionamento che presentassero il maggior grado di omogeneità e quindi le migliori caratteristiche fisiche e meccaniche rispetto ai provini realizzati con altre tecniche di confezionamento per la stessa miscela. Inoltre è stata considerata applicabile la tecnica che potesse garantire una maggiore ripetibilità dei risultati ad essa associati (§ 5.1 e 5.3).

Idea alla base del “Test series 1” dello studio è che quando la lavorabilità della miscela terreno-legante al momento del confezionamento del provino è alta (liquida o facilmente liquefacibile attraverso scuotimento/vibrazioni) per la realizzazione dei provini siano applicabili tutte le tecniche disponibili; quando invece la lavorabilità risulta bassa (miscela plastica e più consistente) debbano essere utilizzate specifiche tecniche di confezionamento, in grado di garantire una maggiore energia di compattazione. Per giustificare tali ipotesi è necessario eseguire una serie di prove da parte delle organizzazioni partecipanti alla ricerca internazionale.

Sono due gli approcci proposti per il Test series 1, come illustrato in maniera qualitativa in Figura 3.1, che prevedono l’impiego di cinque tecniche di confezionamento (Nessuna compattazione, Tapping, Rodding, Compattazione Statica e Dinamica, § 4.4):

a) valutazione del range di applicabilità della specifica tecnica di confezionamento variando la lavorabilità della miscela: tale approccio prevede la realizzazione di almeno 3 miscele a diversa lavorabilità ottenute variando il contenuto d’acqua o di legante a partire da una miscela terreno-legante di base. I relativi provini realizzati mediante una specifica tecnica di confezionamento sono poi sottoposti a prove di compressione ELL a 7 e 28 giorni.

b) valutazione comparativa dell’applicabilità delle varie tecniche di confezionamento per la stessa lavorabilità della miscela: tale approccio prevede l’impiego di almeno due tecniche di confezionamento per realizzare dei provini a partire da una medesima miscela terreno-legante di base. Tali provini sono poi sottoposti a prove di compressione ELL a 7 e 28 giorni.

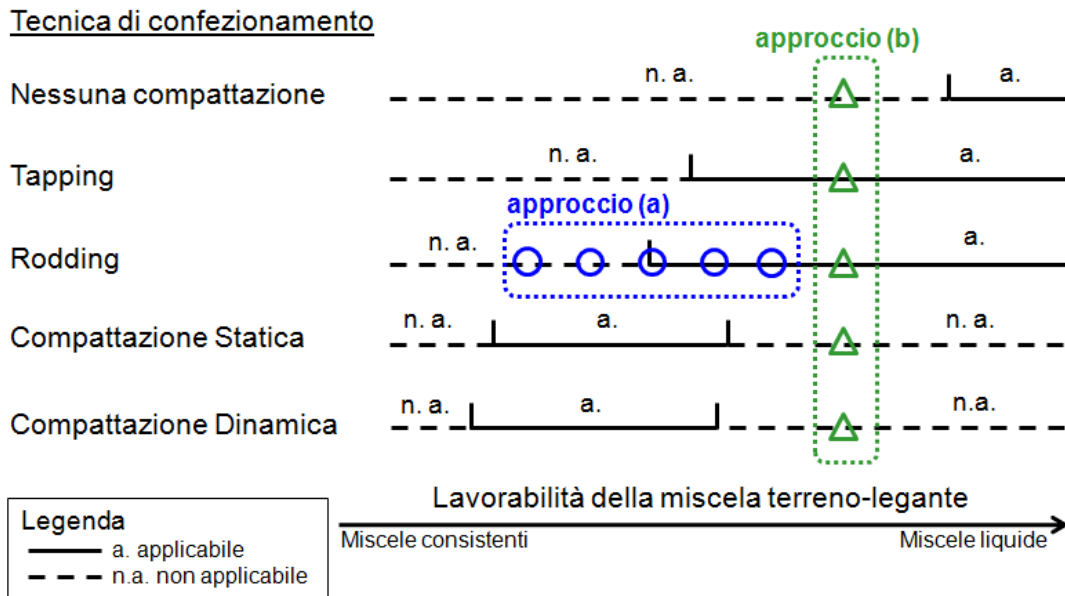


Figura 3.1 - Schema dei due tipi di approccio allo studio per il Test series 1.

In Figura 3.2 è riportato uno schema qualitativo relativo al programma delle prove di laboratorio proposto ai diversi partecipanti al Test series 1.

In particolare nel lavoro svolto presso il *Soil Stabilisation Group* è stato possibile seguire entrambi gli approcci proposti dalla ricerca internazionale e arrivare alla definizione della “applicabilità” di una tecnica di confezionamento. A tal fine sono state testate nove miscele a diversa consistenza applicando tutte le cinque tecniche di confezionamento dei provini. I risultati preliminari ottenuti sono stati successivamente integrati con quelli relativi allo studio sperimentale sui sette terreni dell’area romana (§ 3.3), che ha anche portato alla messa a punto di un metodo per la valutazione quantitativa della lavorabilità, utile all’interpretazione dei risultati complessivamente ricavati.


Paese	Germania	Austria	Portogallo	Italia&Giappone	Svezia	Malesia	Cina
Istituzione	Bauer	Keller	Univ. Coimbra	Sapienza, Univ. Roma & Port and Airport Research Institute	Swedish Geotechnical Institute	Univ. Tun Hussein Onn	-
Persone	Franz – Werner Gerresen	C. Signmund & A. Zöhrer	P. da Venda Oliveira & A. Alberto Correia	M. Grisolia, E.Leder, I.P. Marzano & M. Kitazume, Y. Morikawa	Helen Åhnberg & Mattias Andersson	Chee-Ming Chan & Bee-Lin Tang	Yan-Jun Du
Tipi di terreno da testare							
	Torba					X	
	Gitty						
	Argilla naturale			X	X		X
	Argilla artificiale						
	Altro	X (Limo, Sabbia e Ghiaia)	X (terreno soffice organico limoso argilloso)	X (7 terreni reali di natura alluvionale e piroclastica)		X (Argilla organica)	
Condizione di stoccaggio dei terreni							
	Contenuto naturale d'acqua	X	X	X	X		X
	Altro			X (in contenitori ermetici)		X (in contenitori ermetici, T = 25°)	
Tipo di legante							
	Calce						
	Miscela calce-cemento		X (ca. 20%)		X		
	Cemento Portland		X	X		X	X
	ceneri volanti e cemento		X (ca. 10%)				
	Altro	X		X (P.C./scorie (3:1))			
Approccio e tecniche di confezionamento							
	(a) variazione lavorabilità	X	X	X	X	X	X
	(b) variazione tecnica				X	X	X
(a) variazione lavorabilità della miscela terreno-legante, mantenendo costante la tecnica di confezionamento. Tecnica usata:							
	Dynamic Compaction			X			
	Static Compaction		X	X	X	X	
	Tapping			X	X	X (+ Rodding)	X
	Rodding			X			
	No Compaction	X	X	X		X	
(b) variazione della tecnica di confezionamento mantenendo costante la lavorabilità della miscela. Tecniche usate:							
	Dynamic Compaction			X			
	Static Compaction			X	X		
	Tapping			X	X		
	Rodding			X			X
	No Compaction			X			X
Tempo di maturazione							
	7 giorni		X (8%)		X	X	X
	28 giorni		X (90%)	X	X	X	X
	91 giorni		X (2%)	X			
	Altro	X	X (<1%)			X (14 giorni)	
Resistenza target a 28 giorni							
	100kPa			X		X	
	500kPa						
	2Mpa						
	Altro	X	X (1 ÷ 8 MPa)	X	X (200 ÷ 300 kPa)		X
Numero dei provini confezionati per ciascuna condizione							
	5 provini			X	X		
	Altro	X	X (3 provini)	X (3 provini)		X (3 provini)	X

Figura 3.2 - Lista dei partecipanti e programma delle prove di laboratorio (Test Series 1).

3.1.2 Materiali e programma delle prove di laboratorio

Per la realizzazione delle miscele terreno-legante sono stati impiegati l'argilla "Kawasaki clay" (KC), terreno prelevato dalla baia di Tokyo le cui proprietà sono illustrate in Tabella 3.1 (Takahashi et al., 2010) e cemento tipo Portland in polvere, addizionato asciutto ($w/c = 0$).

Tabella 3.1 - Proprietà della Kawasaki clay.

Contenuto naturale d'acqua w_n (%):	57,0	
Limite Liquido w_L (%):	48,6	
Limite plastico w_P (%):	23,0	
Contenuto sabbia (%), 75 μ m – 2mm:	14,0	
Contenuto limo (%), 5 μ m – 75 μ m:	42,0	
Contenuto argilla (%), <5 μ m:	44,0	

Sono state confezionate nove miscele terreno-cemento a diversa lavorabilità, variando il contenuto d'acqua del terreno e il contenuto di cemento impiegato, a_c (%) (rapporto del peso del cemento secco rispetto al peso del terreno asciutto) seguendo la procedura descritta al § 4. Le caratteristiche delle miscele sono riportate in Tabella 3.2. La consistenza di ciascuna miscela è stata valutata prima della fase di realizzazione dei provini mediante l'hand vane (§ 2.7.1), misurando quindi la resistenza al taglio in condizioni non drenate, c_u (kPa) (Figura 4.13). I valori di resistenza ottenuti per le miscele fresche sono in un ampio range, di 3÷29kPa. Le miscele ottenute sono state suddivise in tre gruppi, in base alla consistenza iniziale. In tabella è presente anche il rapporto cemento su acqua della miscela, C/Mw (%) (rapporto del peso del cemento secco rispetto al peso dell'acqua totale della miscela).

In accordo alla procedura descritta al § 4, la fase di preparazione dei materiali ha previsto l'aggiustamento del contenuto d'acqua dell'argilla, l'omogeneizzazione del terreno nel miscelatore e la successiva aggiunta di cemento Portland secco. Il materiale è stato poi miscelato per il tempo standard di 10 minuti. La resistenza a taglio non drenata e il contenuto d'acqua della miscela sono stati determinati prima di iniziare la fase di confezionamento dei provini. L'argilla stabilizzata era disposta in tre strati all'interno dello stampo cilindrico (50mm di diametro e 100mm di altezza) per tutte le tecniche impiegate.

Tabella 3.2 - Caratteristiche delle miscele testate presso il PARI.

Gruppo	Miscela	Contenuto cemento, a_c (%)	Contenuto acqua, w_n (%)	Resistenza a taglio, c_u (kPa)	Cemento/acqua totale, C/Mw (%)
A (c_u : 3-10kPa)	m1	5	72	3.01	7.10
	m2	5	66	5.79	7.69
	m3	5	60	7.46	8.63
B (c_u : 10-20kPa)	m4	20	60	13.15	36.18
	m5	30	60	15.49	53.36
	m6	20	54	18.84	38.79
C (c_u : 20-30kPa)	m7	30	54	21.75	57.21
	m8	20	49	24.76	42.43
	m9	30	49	28.54	63.92

Le tecniche di confezionamento adottate, riportate in dettaglio al § 4.4, sono (Figura 3.3):

- Nessuna Compattazione, *N.C.*: semplicemente è consistita nel riempire lo stampo versando la miscela (se a comportamento liquido) o tramite l'utilizzo di una spatola in caso di più elevata consistenza;
- Tapping, *TA.*: In seguito alla disposizione di ciascuno strato, lo stampo veniva battuto contro il piano di lavoro per 50 volte.
- Rodding, *RO.*: Ogni strato è stato compactato con trenta movimenti verticali punzonanti di un'asta cilindrica di metallo.
- Compattazione Statica, *S.C.* (*S.C.25* e *S.C.50*): Consistente in una compressione statica impressa da un cilindro metallico applicato per un tempo di 10 secondi. Sono state applicate due diverse pressioni: 25 e 50 kPa. (Mediante la tecnica *S.C.50* sono stati confezionati provini da testare solo a 28 giorni)
- Compattazione Dinamica, *D.C.*: Ha previsto la compactazione di ciascuno strato mediante una massa battente di 1,5kg utilizzando un apposito apparato. L'altezza di caduta è stata di 10cm, il numero di battute è stato pari a 5.



Figura 3.3 - Tecniche di confezionamento, da sinistra: *N.C.*, *TA.*, *RO.*, *S.C.25*, *S.C.50*, *D.C.*

Relativamente all'impiego delle tecniche *D.C.* ed *S.C.* in presenza di miscele più lavorabili (poco consistenti) sono stati riscontrati un intrappolamento del dispositivo usato per la compactazione, una fuoriuscita della miscela dallo stampo e presenza di vuoti intorno al provino. La tecnica *TA.* ha rilevato alcuni problemi in presenza di miscele maggiormente consistenti. L'impiego della tecnica *RO.* ha portato in alcune condizioni al sollevamento del materiale all'interno dello stampo in fase di estrazione dell'asta al termine della compactazione. L'applicazione della tecnica *N.C.* ha evidenziato le maggiori problematiche ad eccezione della sua applicazione in miscele più "liquide" (§ 4.4.5).

I provini ottenuti sono stati inseriti all'interno di cassette di maturazione e mantenuti in condizioni di temperatura 20°C e umidità relativa 95%. In seguito al tempo di maturazione fissato pari a 7 e 28 giorni il generico provino è stato estratto dallo stampo, misurato e pesato (§ 3.5). Mediante la tecnica *S.C.50* sono stati confezionati provini da testare solo a 28 giorni, mancano quindi i dati relativi a 7 giorni di maturazione. In laboratorio sono stati confezionati circa 400 provini, sui quali sono state condotte prove di compressione ELL. Per ciascun caso di prova sono stati prodotti e testati tre provini.

3.2 Attività presso il “Foundation group” (PARI, Giappone)

3.2.1 Obiettivo dello studio sperimentale

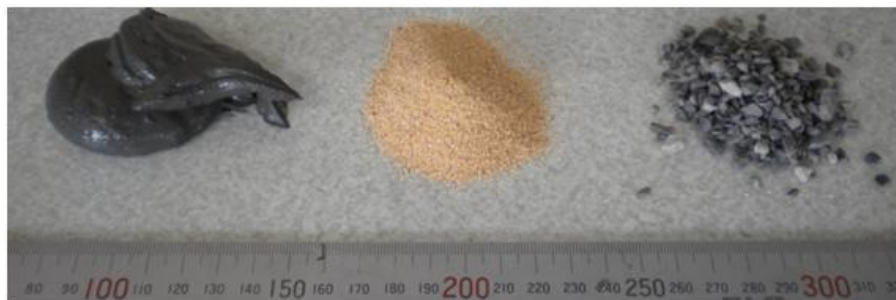
È attualmente in fase di studio l’impiego del granulato di gomma, denominato “tire chips” (realizzato separando automaticamente la gomma del copertone dal ferro e dalla fibra tessile in modo da formare un prodotto finale di gomma caratterizzato da opportune granulometrie) per applicazioni di ingegneria civile (Humphrey, 2003; Yasuhara, 2007). Scopo dello studio condotto presso il Foundation Group è stato quello di indagare l’effetto dell’aggiunta di tire chips sulle proprietà fisiche e meccaniche di una miscela terreno cemento, da impiegare nella realizzazione di una barriera impermeabile (§ 1.4.1), al fine di valutarne il mantenimento dell’efficienza prestazionale in presenza di elevate deformazioni. È stato anche possibile impiegare un Micro-Focus X-ray Computed Tomography (CT) scanner per eseguire delle tomografie ai raggi X dei provini di miscela testati.

3.2.2 Materiali e programma delle prove di laboratorio

Il terreno studiato è una Sabbia argillosa artificiale, caratterizzata da un contenuto d’acqua del 16% e costituita dal 64% di Sabbia “Soma sand”, 27% di Argilla “Kawasaki clay” e 9% di Ghiaia. Le caratteristiche dei materiali impiegati sono riportate in Tabella 3.3. Le tire chips impiegate (Figura 3.4) sono caratterizzate da una dimensione media di 2mm, densità 1,15 g/cm³, Modulo di Elasticità E = 4-6 MPa (Yajima & Kobayashi, 2008).

Tabella 3.3 - Caratteristiche dei materiali impiegati.

Kawasaki clay	w _n (%)	w _L (%)	w _P (%)	75µm - 2mm	5µm - 75µm	< 5µm
	57	48,6	23	14	42	44
Soma Sand	D ₆₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₁₀ (mm)	U _c = D ₆₀ /D ₁₀	Ghiaia	2,5mm - 5mm
	0,37	0,35	0,25	1,5		100



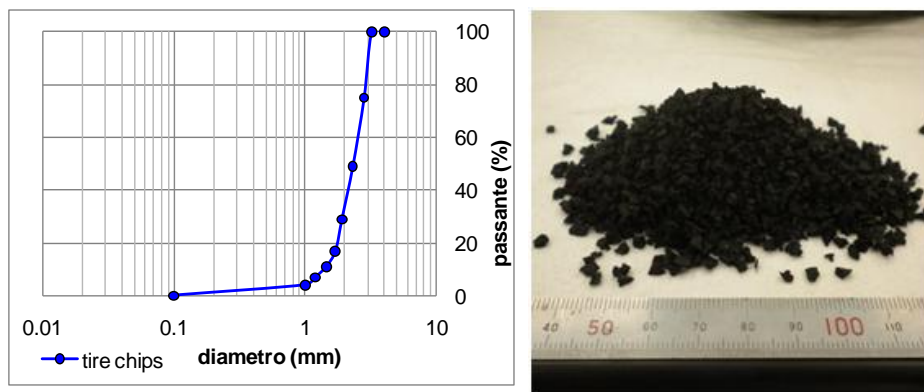


Figura 3.4 - Elementi costituenti il terreno artificiale e tire chips impiegati.

Le caratteristiche delle tre miscele ottenute sono riportate in Tabella 3.4. Sono stati impiegati tre diversi tenori di tire chips, pari a 0, 10 e 20% del peso secco del terreno additivati alla medesima miscela terreno-cemento di partenza. Come legante è stato impiegato cemento tipo Portland, additivato al 10% rispetto al peso secco del terreno e miscelato con acqua in rapporto 1:1 fino ad ottenere una miscela omogenea. La malta cementizia così ottenuta è stata successivamente aggiunta ai campioni di terreno insieme alla dose di tire chips prevista, ed è stata condotta la miscelazione per il tempo standard di 10 minuti utilizzando un idoneo mixer, tipo Hobart (seguendo la procedura riportata al § 4) (Figura 3.5).

Tabella 3.4 - Composizione delle miscele studiate (percentuale in peso).

Miscela	Argilla [%]	Limo [%]	Sabbia [%]	Ghiaia [%]	Acqua [%]	Cemento [%]	Tire chips [%]
M-I, tc = 0	8,61	8,36	48,97	6,52	20,29	7,25	0,00
M-II, tc = 10%	8,14	7,90	46,29	6,16	17,81	6,85	6,85
M-III, tc = 20%	7,62	7,39	43,32	5,77	16,67	6,41	12,82

La miscela ottenuta è stata disposta in appositi stampi cilindrici di diametro 5 cm e altezza 10 cm in tre strati compattati mediante la tecnica di confezionamento Tapping (§ 4.4). I provini ottenuti sono stati infine inseriti all'interno di cassette di maturazione e mantenuti in condizioni di temperatura 20°C e umidità relativa 95% ed estratti dagli stampi in corrispondenza del tempo di maturazione previsto (Figura 3.5).

In corrispondenza dei tempi di maturazione 7 e 28 giorni, sono state eseguite prove di conducibilità idraulica e scansioni ai raggi X mediante CT-scan (solo a 28 giorni di maturazione) durante i diversi step di carico di un processo di compressione ELL, utilizzando apposita apparecchiatura triassiale (Figura 3.6), seguendo le procedure descritte in § 3.5.2. Le prove di permeabilità sono state condotte impiegando una pressione di cella pari a 40kPa e una pressione di flusso dal basso verso l'alto pari a 20 kPa. In seguito all'esecuzione della scansione ai raggi X e della prova di permeabilità, si provvedeva all'annullamento della pressione di cella ed alla applicazione del successivo gradino di carico previsto per la prova di compressione. Tale procedura veniva ripetuta fino al raggiungimento di una resistenza post-picco pari ai 2/3 di quella massima (JIS 1216).

Le caratteristiche del CT-scan impiegato sono sinteticamente riportate in Tabella 3.5 e descritte in dettaglio in Kikuchi et al. (2007). Sono state condotte prove di

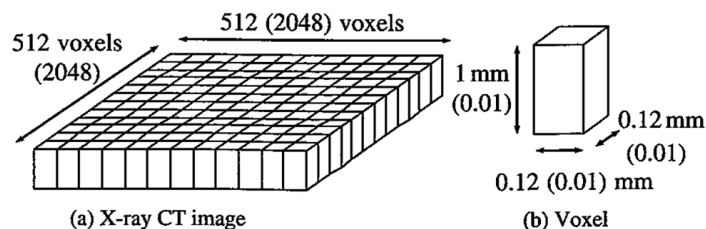
compressione ELL di confronto su ulteriori sei provini per tipo di miscela (a 7 e 28 giorni).



Figura 3.5 - Fasi di confezionamento dei provini di miscela terreno-cemento-tire chips (aggiunta di tire chips, aggiunta malta cementizia e confezionamento mediante Tapping) e serie di provini per le prove di permeabilità in fase di compressione testati a 7 e 28 giorni.

Tabella 3.5 - Caratteristiche CT scanner.

		Tipo
Unità X-ray	Voltaggio	30-225kV
	Corrente	10-1000 μ A
	Massimo output	135W
	Minimo focus	4 μ m
	Angolo irradiazione X-ray	60° in forma conica
provino	Dimensioni massime	Φ 250 x h800mm
	Peso massimo	600N
	Apparecchio X-ray	Dimensioni
	Peso	45100N



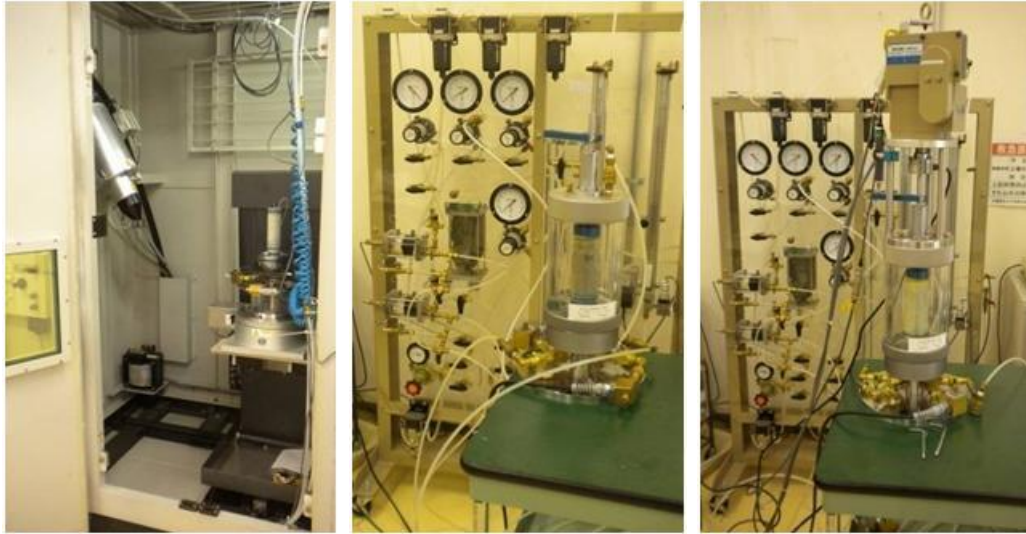


Figura 3.6 - CT scanner raggi X, pannello, cella triassiale e pressa impiegati.

3.3 Attività presso il DICEA - Sapienza Università di Roma

3.3.1 Obiettivo dello studio sperimentale

Presso il laboratorio di Geotecnica del Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Ambientale (DICEA) della Università di Roma Sapienza sono state condotte una serie di prove su ventuno miscele terreno-legante realizzate a partire da sette terreni reali tipici della realtà Romana per la validazione e l'estensione dei risultati ottenuti sulle miscele a base di Kawasaki clay studiate nel corso della prima fase, al fine di considerare l'effetto di diversi tipi di terreno e lavorabilità della miscela.

È stata prima sperimentata una innovativa procedura per la misura della lavorabilità della miscela terreno-legante. La nuova procedura doveva presentare le seguenti caratteristiche, individuate sulla base delle indicazioni ottenute dalle esperienze passate e dalla ricerca bibliografica (§ 2.7.1):

- Ampio range di misura della lavorabilità;
- Nessuna restrizione per quanto riguarda la dimensione delle particelle di terreno;
- Ripetibilità della misurazione e minima dipendenza dall'operatore;
- Breve durata della prova e costo contenuto;
- Minimo consumo di materiale ma campione rappresentativo;
- Semplicità del test, senza la necessità di calcoli eccessivamente complessi;
- Numero minimo di persone impegnate nell'esecuzione: possibilmente il test andrebbe eseguito da un solo operatore;
- Possibile adattabilità al cantiere (confezionamento di provini di miscela fresca in sito), quindi per esempio dimensioni e peso contenuti.

La procedura per la valutazione della lavorabilità della miscela, descritta in dettaglio in § 4, si è dimostrata fondamentale per l'interpretazione dei risultati ottenuti nello studio sperimentale.

3.3.2 Materiali e programma delle prove di laboratorio

Per ottenere una misura della lavorabilità delle miscele terreno-legante analizzate nello studio sperimentale, si è pensato di misurare il Momento torcente (M_t) necessario per ruotare la lama del miscelatore a contatto con la generica miscela all'interno della ciotola di miscelazione. Lo scopo finale è ottenere dei valori di riferimento della coppia torcente che siano indicatori del range di applicabilità per ogni tecnica di confezionamento analizzata. È stato impiegato un dispositivo coppia-angolo USAG 814A 200 (dati tecnici in Tabella 3.6), applicato direttamente sullo stesso mixer da cucina utilizzato nei test di miscelazione per la produzione di provini di terreno stabilizzato con legante (Figura 3.7). Le modalità di esecuzione della misura sono descritte in dettaglio in § 4.

Tabella 3.6 - Dati tecnici dispositivo di misura del momento torcente.

Precisione coppia	Scala di misura	Attacco bussola	Range di misurazione	Unità di misura	Temperatura di utilizzo	Drop test
±4%	0,1N·m	1/2"	Fino a 200N·m	N·m; kg·cm; ft·lb; in·lb; °	-10° → 60°	1m



Figura 3.7 - Dispositivo coppia-angolo USAG e collegamento al miscelatore.

Questo metodo ha il vantaggio di fornire la possibilità di misurare la lavorabilità della miscela mentre si trova ancora nel contenitore del mixer, eliminando tutti i problemi di confezionamento discussi al § 2.7.1 e garantendo un consumo di materiale pari a zero. Dal momento che il miscelatore presenta movimenti planetari, la misura viene fatta continuamente sull'intera miscela (massima rappresentatività del campione) e quindi fornisce risultati affidabili. Inoltre è un metodo rapido, visto che è richiesto circa 1 minuto. Il test è pensato per essere effettuato subito dopo la completa omogeneizzazione del terreno con il legante allo scopo di valutare la lavorabilità della miscela appena prima della fase di confezionamento negli stampi e quindi fornire indicazioni riguardo la tecnica di confezionamento applicabile per quella miscela.

Sulla base del metodo proposto la lavorabilità viene quindi espressa come *Momento torcente* (M_t) applicato ad un certo quantitativo di miscela (V_m), con una fissata *forma della lama miscelatrice* (S_h) e *velocità di rotazione* (R_s).

Una volta tarata la procedura di misura della lavorabilità, sono state condotte una serie di prove su miscele terreno-legante realizzate a partire da sette terreni reali tipici della realtà Romana.

L'area romana è caratterizzata da una particolare eterogeneità legata alle più recenti fasi geologiche che hanno creato ambienti di sedimentazione molto vari. Fino a circa un milione di anni fa, l'area era in gran parte sommersa dal mare, situazione che favoriva l'accumulo di sedimenti sul fondo del bacino in zone che sono successivamente emerse. Da questi sedimenti depositi in ambiente marino si è formata l'Unità del Monte Vaticano che consiste in un grosso e continuo strato di quasi 800 m di spessore di Argille che rappresentano il substrato di riferimento romano. Nel Pleistocene inferiore il livello del mare è andato progressivamente diminuendo, con il conseguente allontanamento ed innalzamento della foce del Paleo-Tevere. Il fiume ha scavato profondamente i sedimenti marini accumulatisi nella fase precedente, creandosi un alveo molto più ampio e profondo di quello attuale. Nello stesso tempo, sull'ampia zona liberata dalla regressione marina si depositavano sedimenti di tipo continentale. I sedimenti depositati in un mare che diventava sempre meno profondo, per il progressivo diminuire della quantità d'acqua nei bacini nei periodi glaciali, o all'interno di zone paludose oppure su nuove porzioni di terre emerse sono di due differenti tipi e daranno origine a altrettante formazioni. I primi sono sabbie e argille che costituiscono l'Unità di Monte Mario, i secondi sono argille che formano l'Unità di Monte delle Picche. Le due Unità sono separate da un deposito di tipo continentale che testimonia una temporanea emersione dell'area (Unità di Monte Ciocci). A partire da 800.000 anni fa l'area romana è interessata principalmente da sedimentazione di tipo fluviale e palustre. Un grosso fiume, il Paleo-Tevere, trasporta e sedimenta grandi quantità di materiali erosi dalla catena appenninica. Intorno a 600.000 anni fa ha inizio l'attività vulcanica dei due distretti vulcanici dell'area romana (Sabatini a Nord-Ovest e Colli Albani a Sud-Est), i cui prodotti si distribuiscono nella piana, alterandone profondamente la morfologia e causando variazioni nel percorso del Paleo-Tevere. Una grande quantità di materiale vulcanico, spesso incoerente e facile da erodere, viene trasportata e sedimentata dalla corrente. Durante l'ultima glaciazione (Wurm, circa 18.000 anni fa) l'alveo del Tevere si approfondisce nell'area della odierna città di Roma fino a 50 m sotto il livello del mare. Questo ampio e profondo solco rappresenta il contenitore al cui interno si depositeranno tutti i materiali delle alluvioni nel successivo periodo interglaciale. La forma pianeggiante derivante dal riempimento dell'antico alveo rappresenterà in epoca storica la zona di massimo sviluppo della città (Figura 3.8).

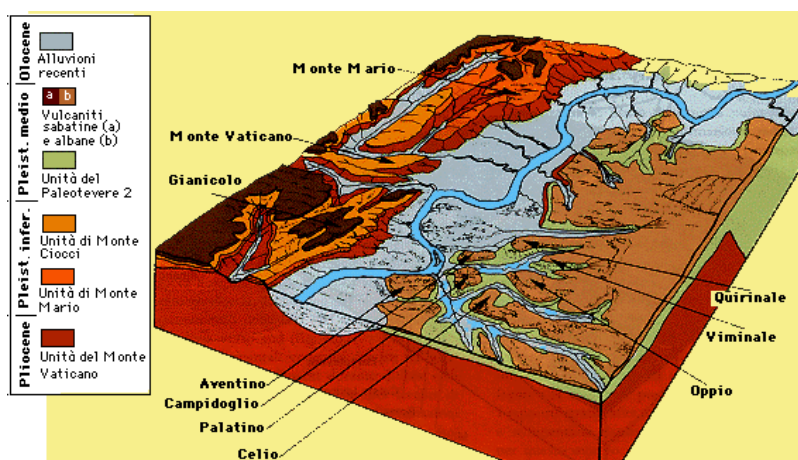


Figura 3.8 - Area romana prima degli insediamenti umani.

Dalla pur breve descrizione riportata relativa al caso romano, si capisce la difficoltà nella progettazione di un intervento Deep Mixing che vada ad interessare dei

contesti reali spesso eterogenei, caratterizzati dalla presenza di terreni stratificati di caratteristiche fisiche e meccaniche anche molto diverse. Nello studio sperimentale sono stati impiegati sette terreni, in particolare quattro provenienti dalla zona di Malagrotta, situata ad Ovest del comune di Roma (Figura 3.9), mentre i restanti tre di origine vulcanica provengono dall'area Est della città, dai cantieri delle stazioni Alessandrino e Gardenie della futura Metro C (Figura 3.10):

- RL: Terreni di Riporto, limi argillosi avana e grigi misti a sabbie e ghiaie;
- SL: Sabbie limose argillose marrone scuro con ghiaie scarsamente evolute morfologicamente di natura da calcarea a silicea;
- SG: Sabbie e ghiaie eterometriche da 0,5 a 3 cm di diametro in matrice sabbiosa di colore da grigio ad avana chiaro;
- AP: Argilla limosa pliocenica grigio azzurra, omogenea e plastica;
- PN: Pozzolana Nera, di colore scuro tendente al nero violaceo, si presenta a grana piuttosto fine, composizione leucitica con tendenza a vesuvitica;
- PR: Pozzolana Rossa, di colore rosso violaceo, tufo incoerente di composizione leucitica;
- TF: Tufi Argillificati, di colore marrone chiaro tendente all'arancione.



Figura 3.9 - Cassette di terreni campionati nell'area di Malagrotta, Roma Ovest (si riconoscono i terreni RL, SL, SG ed AP).



Figura 3.10 - Cassette di terreni prelevati nei cantieri della Metro C, Roma Est (si riconoscono i terreni PN, PR e TF).

Le proprietà fisiche dei terreni analizzati sono state determinate presso il laboratorio di Geotecnica e Geologia applicata (Sapienza), impiegando in particolare la ASTM D422-98 per la determinazione della distribuzione granulometrica e la ASTM D4318-00 per la determinazione dei limiti di Atterberg (Tabella 3.7, Figura 3.11).

Tabella 3.7 - Proprietà dei sette terreni romani analizzati.

Terreno	w _L [%]	w _P [%]	Percentuali G-S-L-A (%)	W _n [%]	USCS	Peso di volume [kN/m ³]	Permeabilità in sito [m/s]
RL	37	19	18-24-34-24	30	CL	19,0	1x10 ⁻⁰⁶
SL	49	21	22-40-20-18	30	CL/ML	19,5	2x10 ⁻⁰⁶
SG	14	ND	33-40-14-13	8	SM	21,0	4x10 ⁻⁰⁴
AP	38	19	00-00-64-36	60	CL	18,0	8x10 ⁻¹¹
PN	-	-	08-49-38-05	30	SM	15,0	6x10 ⁻⁰⁶
PR	-	-	11-58-24-07	32	SM	18,2	2x10 ⁻⁰⁴
TF	34	25	02-47-39-12	52	ML	16,6	9x10 ⁻⁰⁷

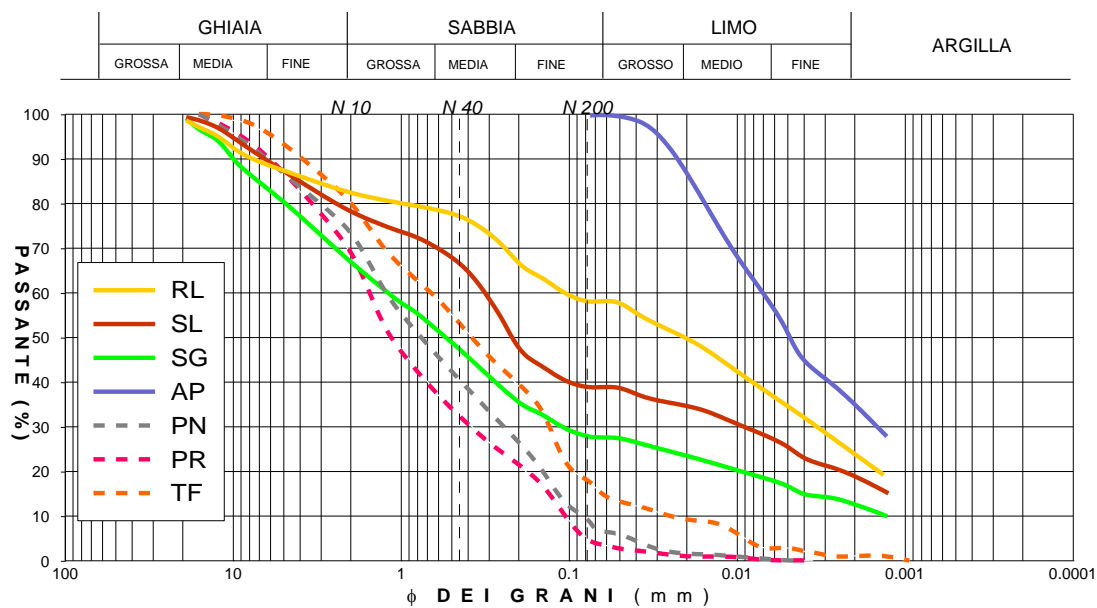


Figura 3.11 - Distribuzione granulometrica dei sette terreni romani analizzati.

Seguendo la procedura riportata al § 4 sono state realizzate in totale ventuno miscele terreno-legante, tre per ciascun terreno, variando il contenuto d'acqua e i parametri della malta cementizia, come riportato in Tabella 3.8. Sono stati impiegati dei miscelatori da cucina tipo Kenwood e Hobart (Figura 4.2). In seguito all'omogeneizzazione del terreno, veniva aggiunta la malta a base di cemento Portland e acqua. In Tabella 3.8 compaiono anche i valori del parametro M_t (ottenuto applicando la procedura per la valutazione della lavorabilità, come specificato nel prosieguo) e del parametro T (laboratory vane), entrambi misurati prima della fase di confezionamento

dei provini (§ 4). La miscela stabilizzata veniva inserita all'interno degli stampi in PVC in tre strati, compattati mediante tre tecniche di confezionamento (§ 4.4):

- Nessuna Compattazione, *N.C.*: semplicemente è consistita nel riempire lo stampo versando la miscela (se a comportamento liquido) o tramite l'utilizzo di una spatola in caso di più elevata consistenza;
- Tapping, *TA.*: In seguito alla disposizione di ciascuno strato, lo stampo veniva battuto contro il piano di lavoro per 50 volte.
- Rodding, *RO.*: Ogni strato è stato compattato con trenta movimenti verticali punzonanti di un'asta cilindrica di metallo.



Figura 3.12 - Tecniche di confezionamento adottate, da sinistra: *N.C.*, *TA.*, *RO.*.

I provini sono stati disposti all'interno di cassette di maturazione sigillate e testati mediante prove di compressione ELL (in numero di 378) e prove di permeabilità in cella triassiale (in numero di 68, numero limitato dai tempi maggiori richiesti dalla prova) a opportuni tempi di maturazione, variabili tra 7 e 28 giorni (vedi §5.3.5).

Per ciascuna condizione di prova venivano prodotti 3 provini da testare mediante prova ELL, più uno aggiuntivo per l'eventuale prova di conducibilità idraulica.

Le miscele terreno-legante analizzate presentano valori di M_t inferiori a 15Nm, che rappresenta un limite meccanico del miscelatore Kenwood impiegato, che risulterebbe danneggiato da una miscelazione della durata di 10min in presenza di miscele aventi $M_t > 15Nm$ (per le miscele più consistenti realizzate a partire dal terreno *KC* era stato impiegato un miscelatore a potenza maggiore). Inoltre le miscele testate rientrano nei valori tipici del trattamento Deep Mixing in Europa. Pertanto le miscele testate presso il DICEA sono caratterizzate da valori relativamente alti di lavorabilità, associabili in alcuni casi a miscele dal comportamento liquido, quindi le tecniche di compattazione dinamica e statica, pur capaci di assicurare una maggiore energia di compattazione, non sono state impiegate perché non applicabili in queste condizioni, per i problemi evidenziati in § 4.4 e i risultati presentati al § 5.1.

Applicando la procedura descritta in § 4 è stato possibile ottenere una misura della lavorabilità anche per le miscele associate al terreno *KC* (materiale gentilmente inviato dal *PARI*) come riportato in Tabella 3.8, utile per poter confrontare i dati ottenuti nelle due fasi di studio presso il *PARI* e presso il *DICEA*.

Per permettere l'estensione verso altri laboratori dei risultati complessivamente ricavati è stata infine elaborata una *curva di calibrazione* graficando il parametro di

lavorabilità M_t con il contenuto d'acqua w_n di un terreno facilmente disponibile come il Caolino, usando parametri fissati V_{m0} , R_{s0} , S_{h0} , come riportato al § 5.3.4 cui si rimanda.

Tabella 3.8 - Caratteristiche delle miscele testate presso il DICEA.

Tipo terreno	Contenuto acqua, w_n (%)	Parametri malta cementizia	Lavorabilità, M_t (Nm)	Laboratory vane, T (°)
RL	20		13,55	10,0
	30		4,81	5,0
	40		2,23	3,0
SL	35	$a_c = 10\%$	9,08	9,0
	40		4,88	6,0
	45		3,76	3,0
SG	6	$w/c = 1$	11,28	10,0
	8		5,11	6,0
	10		3,51	3,0
AP	50		10,16	9,0
	60		5,76	4,0
	70		2,34	2,0
PN	25		6,97	3,0
	30		2,37	1,5
	35		0,21	0,7
PR	20	$a_c = 10\%$	8,34	6,0
	26		1,60	2,0
	32		1,08	1,0
TF	44	$w/c = 0,5$	8,22	8,0
	48		0,60	2,0
	53		0,20	1,0
KC	72	$w/c = 0$	5,32	5,0
	66	$a_c = 5\%$	8,47	7,0
	60		17,40	12,0
		$w/c = 0$		
		$a_c = 20\%$	29,00	23,0
	$a_c = 30\%$	40,00	33,0	
	$a_c = 20\%$	61,00	59,0	

3.4 Attività in collaborazione tra DICEA (Sapienza Università di Roma), Università di Padova e Bauer Group

3.4.1 Obiettivo dello studio sperimentale

È stato inoltre possibile instaurare una collaborazione con l'Università di Padova e la Bauer Group per uno studio relativo ad un campo prova di Cutter Soil Mixing in Zandvoort (Olanda), installato per la realizzazione di un edificio multipiano dotato di parcheggio interrato, destinato ad accogliere attività commerciali al piano terreno e unità residenziali ai piani superiori. L'obiettivo della collaborazione è stato quello di individuare delle correlazioni tra i parametri di miscelazione in sito e in laboratorio a partire dai dati di produzione dei pannelli CSM di prova ed effettuare dei confronti tra i risultati ottenuti da prove su campioni prelevati in sito e su provini di laboratorio,

realizzati in un fase successiva a scopo di ricerca (nei comuni indirizzi progettuali la fase di laboratorio precede quella costruttiva, § 2.1). La collaborazione Università di Roma Sapienza, Università di Padova e Bauer Group ha portato alla pubblicazione preliminare di due note, riportate in bibliografia (Bellato et al., 2012a; 2012b).

3.4.2 Materiali e programma delle prove di laboratorio

Le indagini geotecniche condotte in sito (prove penetrometriche statiche e sondaggi stratigrafici) e le prove di laboratorio hanno permesso di individuare nei terreni di imposta la prevalenza di sabbia da fine a media e di densità da media ad elevata. I profili CPT hanno evidenziato la presenza di uno strato di sabbia densa tra 3.0÷3.5 m e 9 m di profondità. La falda è stata incontrata a circa 2.2 m dal piano campagna.

I lavori di costruzione dell'edificio multipiano prevedevano la produzione dei pannelli Cutter Soil Mixing a sostegno del futuro scavo di 4 m destinato ad accoglierne il parcheggio interrato.

L'unità CSM, installata su un carro BAUER RTG RG 21 T, è stata equipaggiata con una testa miscelante BCM 5, in grado di produrre pannelli rettangolari di dimensioni in pianta pari a 2.4x0.55 m². La profondità di progetto era di circa 11.5 m, raggiunti seguendo la procedura a singola fase, cioè iniettando fin dalla fase di penetrazione la miscela legante di progetto. I pannelli sono stati realizzati uno di seguito all'altro, seguendo il cosiddetto metodo "fresh in fresh", con una sovrapposizione di circa 20 cm. Ciascun pannello è stato, infine, rinforzato con 2 profilati in acciaio IPE 220 di lunghezza 8.5 m. In cantiere è stata utilizzata una miscela cementizia caratterizzata da un rapporto acqua/cemento (w/c) pari a 1.25 e, come legante, un cemento speciale chiamato "Blitzdämmer HS738S" (Figura 3.13).



Figura 3.13 - Area di cantiere vista generale e particolare.

Durante la produzione dei sei pannelli CSM di prova è stato registrato a prefissati intervalli di tempo (generalmente 3 s) un significativo numero di dati operativi, quali: velocità di rotazione delle ruote miscelanti, velocità di penetrazione e risalita della testa miscelante, coppia torcente utilizzata, deviazioni planimetriche dalla verticale dell'unità CSM, etc., alcuni dei quali sono riportati a titolo di esempio in Figura 3.14: andamenti con il tempo della profondità raggiunta, della velocità di rotazione e del momento torcente delle ruote, della malta iniettata.

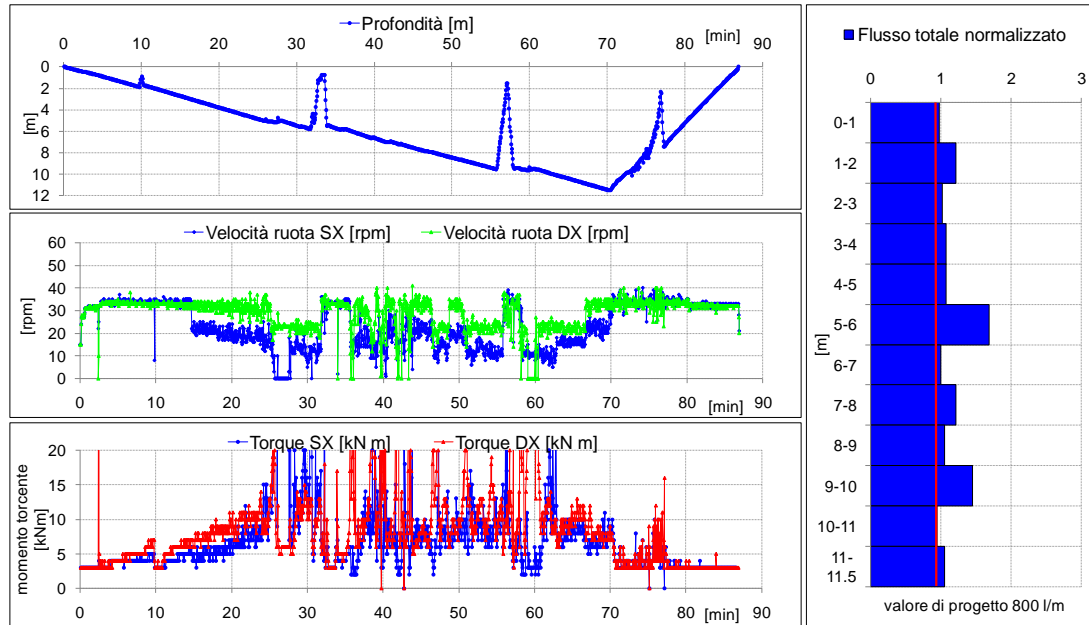


Figura 3.14 - Alcuni dati di produzione riferiti al pannello X1.

In Tabella 3.9 sono riportati alcuni dei parametri di produzione relativi al pannello X1 (riferiti alla quota di circa 2 m da p.c.).

Tabella 3.9 - Parametri di produzione riferiti alla quota di 2m dal p.c. per uno spessore di 1 m.

Pannello	X1
Quantitativo di malta per metro lineare (l/m)	973.7
Velocità di rotazione media ruote fase discesa (U/min)	30
Tempo miscelazione fase discesa (secondi)	2077
Coppia T media fase discesa (kN·m)	13,27
Velocità di rotazione media ruote fase risalita (U/min)	33
Tempo miscelazione fase risalita (secondi)	591
Coppia T media fase risalita (kN·m)	8,39
Contenitori ermetici riempiti di miscela	12

Terminata la fase di risalita e di installazione dell'armatura, si è proceduto al prelievo di campioni "wet grab" di miscela terreno-cemento dalla profondità di circa 2 m da p.c., sigillati in contenitori di latta ermetici (Figura 3.15). I campioni così ottenuti sono stati mantenuti in condizioni di temperatura e umidità relativa costanti per tutta la durata del periodo di maturazione, fino alla data di esecuzione delle prove.

Una parte dei contenitori ermetici con la miscela prelevata dal sito sono stati conservati all'interno di una camera in condizioni ambientali controllate per un periodo di 40 giorni, mentre la restante parte è ivi rimasta fino a 125 giorni. Al termine di ciascuno dei due periodi di maturazione, i corrispondenti campioni di materiale sono stati estratti e carotati al fine di ottenere provini di diametro pari a 37 mm e 54 mm. Le basi sono infine state rifinite garantendo un rapporto di forma altezza/diametro (h/D) rispettivamente pari a 2 e 1.5.



Figura 3.15 - Prelievo di campioni wet grab in sito, successivamente carotati, e fasi di confezionamento dei provini in laboratorio.

A partire dai dati di produzione relativi al pannello X1 è stato possibile individuare il binder content effettivo, utile per ricreare il medesimo mix design in laboratorio, impiegando il terreno prelevato in sito e il legante utilizzato in cantiere secondo gli stessi dosaggi. (Figura 3.16, formule riportate in Appendice A). (Nei comuni indirizzi progettuali la fase preliminare di miscelazione in laboratorio precede quella costruttiva, § 2.1). Per quanto riguarda i provini prodotti in laboratorio, è stata quindi seguita la procedura descritta in § 4. In particolare, la fase di preparazione dei materiali ha previsto l'omogeneizzazione del terreno proveniente dai contenitori ermetici nel miscelatore e la successiva aggiunta di malta cementizia con proporzioni analoghe a quelle utilizzate in sito. È stato possibile misurare il momento torcente (M_t) esercitato dal mixer. I parametri di produzione relativi alla miscelazione sono riportati in Tabella 3.10. La miscela terreno-legante è stata poi versata in stampi cilindrici. I provini ottenuti sono stati inseriti all'interno di cassette di maturazione e mantenuti in condizioni di temperatura 20°C e umidità relativa 95% per un tempo variabile tra 7 e 125 giorni (Figura 3.15), prima di essere testati.

Tabella 3.10 - Parametri di produzione relativi alla miscelazione di laboratorio.

Volume (dm ³)	Velocità di rotazione (U/min)	Tempo miscelazione (min)	Parametro M_t (N·m)
3	94	10	4

Sulle due serie di provini sono stati condotte micro-tomografie a raggi X, prove di resistenza a compressione non confinata e conducibilità idraulica (mediante permeametro a pareti flessibili con gradienti idraulici variabili tra 100 e 250). Le prove sono state condotte presso l'Università di Padova e il laboratorio di Geotecnica e Geologia applicata del DICEA (Sapienza). I risultati riportati in § 5.4 si riferiscono ai soli provini di laboratorio.

Parametri miscelazione in sito - Pannello XX

Tipo legante	Cemento Blitzdammer ®		Nome terreno	Sabbia Zandvoort		
Parametri malta cementizia			Caratteristiche terreno			
ρ_w acqua	1.0	kg/dm ³	Argilla (%)	Limo (%)	Sabbia (%)	Ghiaia (%)
ρ_c legante	3.0	kg/dm ³	5	10	70	15
w/c	1.12	rapporto in peso	w_n (%)	12	%	
ρ_{malta}	1.46	kg/dm ³	peso volume	19	kN/m ³	
peso legante	690.0	kg/m³ malta				
litri acqua	770.0	l/m³ malta				

dati da inserire
formule

Dimensioni macchinario			
nome	spessore S [m]	floor area A [m ²]	L [m]
tipoXX	0.55	1.32	2.4

Parametri operativi miscelazione		
Riferimento a 1m lineare di trattamento		
quantità malta (QC)	973.7	l/m
Volume legante	224.0	l/m
Peso legante	671.9	kg/m
litri acqua malta	749.7	l/m
Riferimento a 1m ³ di terreno attraversato		
Area pannello	1.32	m ²
Volume malta	737.65	l/m ³ terreno
Binder factor	509.0	kg/m³ terreno
litri acqua malta	568.0	l/m ³ terreno
Riferimento al singolo pannello		
Profondità trattamento	11.5	m
Quantità malta totale	11198	l/pannello
Consumo legante	7727	kg/pannello
Consumo litri acqua malta	8622	l/pannello
peso terreno secco	1696.43	kg
binder content	30.00	%

Figura 3.16 - Valutazione del binder factor e binder content a partire dai dati di produzione.

3.5 Prove di laboratorio

Sono state condotte prove di laboratorio sui circa 1000 provini di miscela terreno-legante. Prima della generica prova si procede alla misura del peso, del diametro e dell'altezza secondo le modalità schematizzate in Figura 3.17. Dai dati ricavati è possibile calcolare il peso di volume del provino: $\gamma = P/V$ (kN/m³)

La misura dell'altezza del provino fornisce anche indicazioni su eventuali fenomeni di bleeding (separazione di una parte dell'acqua di impasto dalla miscela con la formazione di uno strato d'acqua e cemento o boiaccia) sulla superficie superiore del provino).

È bene riportare eventuali irregolarità nel provino (superfici non piane, eccessiva presenza di vuoti, etc.).

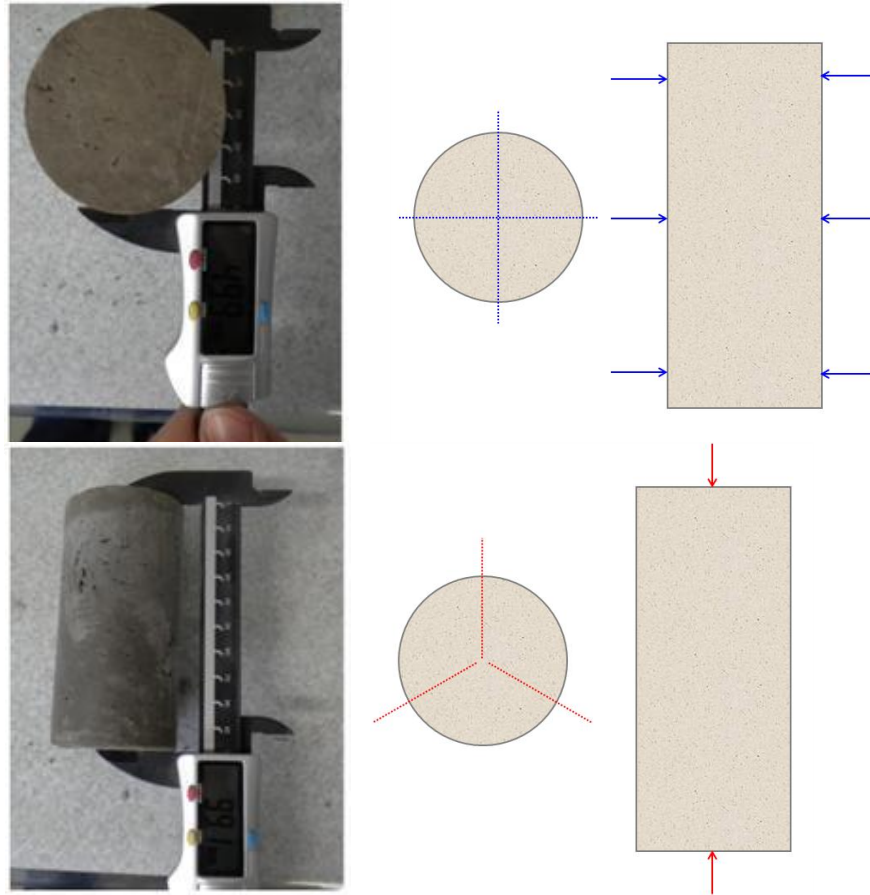


Figura 3.17 - Determinazione del diametro (media 6 misure) e dell'altezza (media 3 misure) dei provini mediante calibro.

3.5.1 Prova di compressione ad espansione laterale libera (ELL o UCS)

La prova di compressione ad Espansione Laterale Libera ELL (ASTM D2166) serve a determinare la resistenza a compressione q_u (denominata anche UCS, unconfined compressive strength) di un provino in seguito all'applicazione di un carico verticale. Dalla curva sforzi-deformazioni è possibile determinare il valore massimo della resistenza q_u , il corrispondente valore di deformazione a rottura ε_f ed il modulo elastico secante E_{50} .

I vantaggi nell'impiego di tale prova risiedono nella economicità e rapidità di esecuzione.

In Figura 3.18 sono illustrate le diverse presse impiegate nello studio sperimentale, che si differenziano in due gruppi, quelle di più recente produzione (laboratorio Soil Stabilisation Group, PARI e Laboratorio di Strade, DICEA Sapienza) che prevedono l'acquisizione dei dati in formato digitale mediante l'uso di trasduttori elettrici per la lettura degli spostamenti verticali e del carico applicato, e quelli che prevedono la lettura manuale (pressa tipo Belladonna del Laboratorio Geotecnica e Geologia applicata, DICEA Sapienza) del comparatore per gli spostamenti verticali e del comparatore montato sull'anello dinamometrico.



Figura 3.18 - Macchinari impiegati per le prove di compressione ELL.

Le letture sono state eseguite ogni 2sec in digitale e ogni 0,1mm di abbassamento verticale in manuale. La velocità di prova è stata fissata pari a 1mm/min per tutte le apparecchiature impiegate. La prova si è ritenuta conclusa quando si è verificata una delle seguenti condizioni:

- La lettura del carico è scesa in seguito alla rottura del provino al di sotto dei 2/3 del carico massimo registrato durante la prova;
- La deformazione ha superato il 15% dell'altezza iniziale del provino.

Conclusa la prova si è proceduto con l'estrazione del provino e con l'analisi della superficie di rottura. Infine è stato determinato il contenuto d'acqua del provino prendendone una parte rappresentativa in un apposito contenitore ed essiccandola in forno a 110 °C.

La prova fornisce i dati in termini di forza applicata, F (kN) e spostamenti registrati, δ (mm).

Lo sforzo agente (kPa) è pari a: $\sigma = \frac{F}{A}$; la deformazione ε è pari a: $\varepsilon = \frac{\delta}{h}$

Dove A è l'area del provino cilindrico e h l'altezza.

In corrispondenza del massimo valore della resistenza a compressione qu , è individuato il valore di deformazione a rottura ε_f (%). Il modulo elastico secante E_{50} si trova invece come valore di resistenza pari al 50% della resistenza qu diviso la relativa deformazione, come illustrato in Figura 3.19, relativa ad una generica prova.

Tale tipologia di prova risulta essere quella maggiormente applicata nello studio sperimentale internazionale, essendo adatta per testare grandi quantità di provini in tempi e costi ragionevoli.

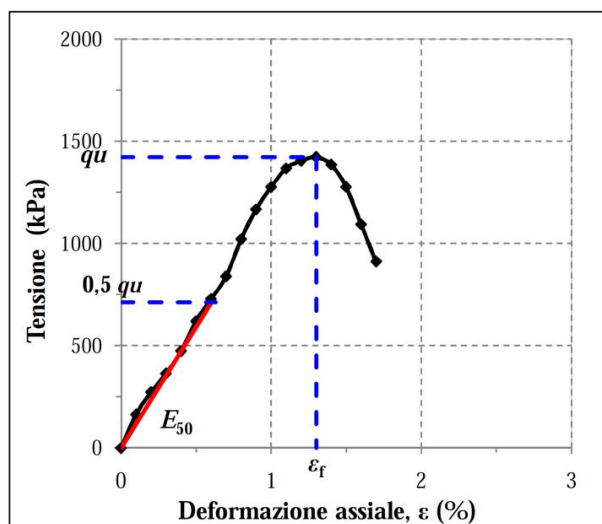
Prova di compressione ELL			
Forza	Spostamento	Deformazione, ε	Tensione
(kN)	(mm/100)	(%)	(kPa)
0.00	0	0.00	0.00
9.00	10	0.10	164.04
15.00	20	0.20	273.41
20.00	30	0.30	364.57
26.00	40	0.40	473.96
34.00	50	0.50	619.83
40.00	60	0.60	729.25
46.00	70	0.70	838.67
56.00	80	0.80	1021.05
64.00	90	0.90	1166.97
70.00	100	1.00	1276.44
75.00	110	1.10	1367.69
77.00	120	1.20	1404.23
78.00	130	1.30	1422.54
76.00	140	1.40	1386.13
70.00	150	1.50	1276.77
60.00	160	1.60	1094.43
50.00	170	1.70	912.07

Codice provino		XX-YY-ZZ-WW
Data confezionamento	07/03/2012	
Data prova	04/04/2012	
Periodo maturazione	28	
Temperatura maturazione (°C)	20	
Umidità (%)	98	

velocità abbassamento	1	mm/min
Trattamento estremità:	X	Nessuno
		Trimming
Diametro (mm)	49.8	
Altezza (mm)	100.07	
Area (cm ²)	19.48	
Volume (cm ³)	194.92	
Peso (g)	350	
Peso di volume, γ (kN/m³)	17.62	

Resistenza q_u (kPa)	1,422.54
Deformazione a rottura, ε_r (%)	1.20
Modulo secante, E₅₀ (Mpa)	118.63

determinazione contenuto d'acqua	
numero contenitore	25
peso tara (g)	19.65
tara + materiale umido (g)	70.89
tara + materiale secco (g)	58.76
contenuto d'acqua, w (%)	31.02



Note/Commenti:



Figura 3.19 - Tipico foglio di acquisizione dati con grafico sforzi-deformazioni.

3.5.2 Prova di conducibilità idraulica in cella triassiale

Le prove di conducibilità idraulica (o permeabilità) in cella triassiale sono state condotte in maggior parte presso il laboratorio di Geotecnica e Geologia applicata (DICEA, Sapienza) e relativamente alle miscele terreno-cemento-tire chips presso il laboratorio del Foundation Group (PARI), in entrambi i casi in accordo alla ASTM D5084.

In particolare viene descritta l'attrezzatura di prova utilizzata presso il DICEA (Figura 3.20), caratterizzata da una tecnologia meno recente rispetto a quella impiegata presso il PARI (che prevedeva un controllo mediante centralina elettronica dei diversi parametri della prova, Figura 3.6, Figura 3.21) e perciò avente carattere più generale e comprensiva della stessa. L'attrezzatura impiegata consiste in:

- Pannello triassiale tipo Belladonna, comprensivo di dispositivi per la regolazione delle pressioni, di burette volumetriche di lettura e di serbatoio d'acqua esterno, con annesse celle di carico;
- Cella triassiale, con funzione di contenere il provino, di permettere l'applicazione di una pressione isotropa, di realizzare la saturazione attraverso appositi circuiti di drenaggio; alla base della cella triassiale sono collegate 4 valvole: Valvola (A) collegata all'interno della cella triassiale, per il riempimento della stessa e per l'applicazione della pressione idraulica; Valvole (B e D) collegata al plinto di base, per la saturazione o il drenaggio dello stesso e per l'applicazione della pressione di flusso dal basso verso l'alto; Valvola (C) che collega tramite apposito tubicino la testina per il drenaggio superiore con la buretta di lettura.
- Il plinto di base, che deve essere dello stesso diametro del provino ed è stato realizzato su misura (diametro 5cm);
- La testina superiore, anch'essa di diametro pari a quello del provino, che è perforata e collegata alla linea di drenaggio superiore con un tubicino sufficientemente flessibile e indeformabile;
- Coppia di pietre porose dello stesso diametro del provino (diametro 5cm), in materiale non attaccabile chimicamente dal fluido interstiziale e dai minerali costituenti il provino, che possiedano un coefficiente di permeabilità superiore a quella del materiale provato;
- Foglio di carta da filtro, da cui ricavare 4 dischi della stessa dimensione dei dischi porosi;
- Coppia di membrane in lattice di gomma naturale di diametro non inferiore al 95% di quello del provino; la tenuta idraulica della membrana intorno al provino viene realizzata attraverso 4 appositi anelli di gomma, O ring, sufficientemente rigidi, di diametro compreso tra l'80 e il 90% di quello del provino;
- Acqua distillata;
- Contasecondi.



Figura 3.20 - Pannello Belladonna, celle di carico, valvole del plinto di base e prove in parallelo in corso (DICEA).



Figura 3.21 - Attrezzatura impiegata presso il PARI.

La fase di preparazione della prova prevede la predisposizione dell'attrezzatura, la saturazione dei circuiti, del plinto inferiore e superiore, la preparazione del provino e della cella.

1) *Predisposizione dell'attrezzatura:* Le pietre porose e i dischi di carta filtro sono stati immersi in acqua distillata. In seguito al posizionamento del plinto di base sono stati collegati i diversi circuiti. Sono state collegate: la cella di carico n°4 al rubinetto A, la cella n°1 al rubinetto B, la valvola C è collegata alla buretta di lettura; per l'altra cella triassiale è stata collegata la cella n° 2 al rubinetto B, gli altri collegamenti rimangono invariati.;

2) *Saturazione dei circuiti e del plinto inferiore:* Per saturare il circuito della Back Pressure ed il plinto inferiore è stato aperto il rubinetto collegato al serbatoio d'acqua. Dopo aver chiuso il rubinetto A, è stata assegnata la pressione di 2 bar; in

seguito tale rubinetto è stato riaperto e si è aspettata la fuoriuscita di un po' d'acqua. Tale procedura è stata eseguita sino a quando nella fuoriuscita d'acqua sono risultate assenti bolle d'aria. Le operazioni sopra descritte sono state eseguite anche per eliminare l'aria presente nel circuito della cella e l'altra entrata del plinto inferiore (rubinetto D);

3) *Saturazione del plinto superiore:* Le due filettature alle estremità del tubicino (che collega il plinto inferiore al superiore) sono state avvolte con il teflon e inserite poi nel foro della piastra della cella (che immette nel rubinetto C) e nel plinto superiore; è stata poi assegnata una pressione fino a 3 bar ed è stato aperto il rubinetto C per verificare la tenuta delle guarnizioni e far fuoriuscire l'aria presente. Eseguita la saturazione sono stati inseriti gli O ring nel tubicino (serviranno successivamente a bloccare la membrana che avvolge il provino nella parte superiore);

4) *Preparazione del provino:* Il generico provino è stato pesato e misurato (§ 3.5); è stato poi avvolto nella membrana. Successivamente alla saturazione sono stati sistemati sul plinto inferiore in quest'ordine: disco di carta filtro, pietra porosa, disco di carta filtro. La carta filtro ha la funzione di impedire l'intasamento dei dischi porosi. Il generico provino è stato poi disposto al di sopra e l'estremità inferiore della membrana è stata fissata al plinto inferiore mediante 2 O-ring. Sul provino sono poi stati posizionati un disco di carta filtro, la pietra porosa, un altro disco di carta filtro ed il plinto superiore, e successivamente la membrana è stata tesa sul plinto superiore e sono stati inseriti gli O ring precedentemente disposti (Figura 3.22);

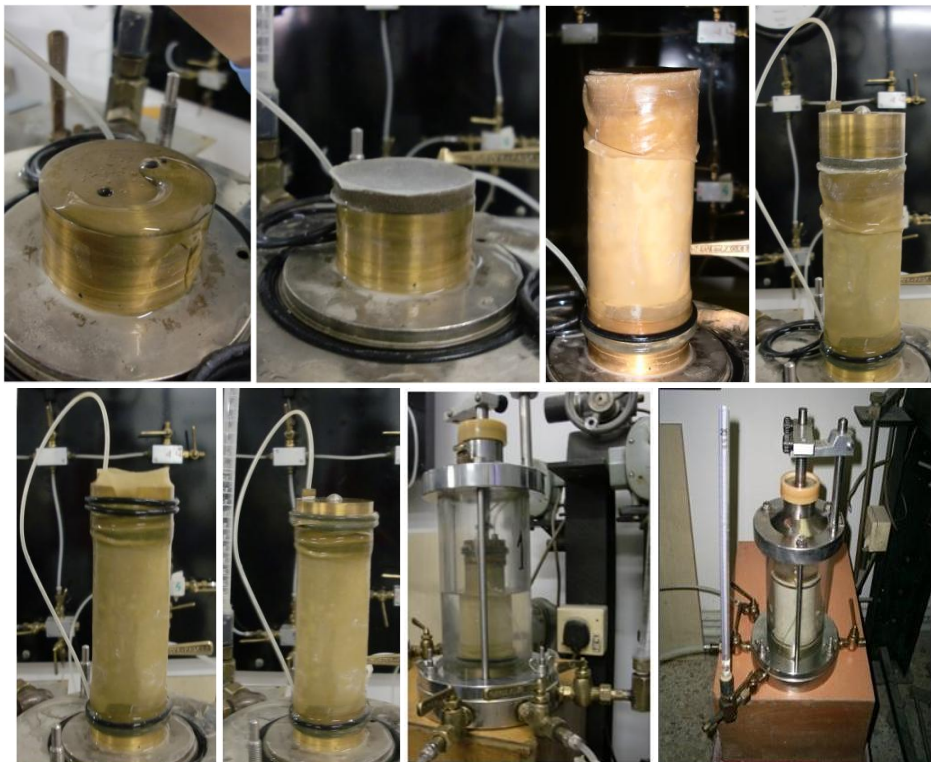


Figura 3.22 - Saturazione del plinto inferiore; posizionamento della carta filtro-pietra porosa-carta filtro; posizionamento del provino e degli O-ring; inserimento della carta filtro-pietra porosa-carta filtro e testina superiore; inserimento O-ring superiori; provino installato; riempimento della cella triassiale con acqua; prova in corso (DICEA).

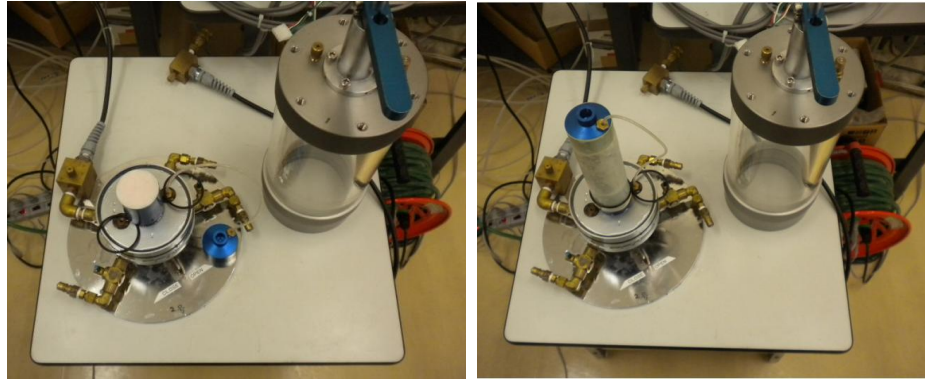


Figura 3.23 - Fasi di preparazione della prova presso il PARI.

5) *Preparazione della cella*: Dopo aver predisposto il provino, la cella è stata chiusa adoperando contemporaneamente le tre viti poste sulla base inferiore ed è stata immessa acqua nella cella (dopo aver aperto il rubinetto collegato al serbatoio d'acqua e il rubinetto A). Appena fuoriuscita una goccia d'acqua dalle valvole superiori, esse sono state chiuse mediante le apposite viti. Terminata la preparazione della cella, inizia la fase di prova.

La prova consiste nell'assegnare un determinato gradiente idraulico in modo da creare un flusso ascendente all'interno del provino. Si inizia con l'assegnare la pressione di cella chiudendo il collegamento con il serbatoio esterno, aprendo il rubinetto di collegamento con la cella di carico, posto sul pannello Belladonna e aprendo il rubinetto A relativo alla cella. Successivamente si gira la manopola di comando in senso orario al fine di assegnare una pressione di 2bar (per quanto riguarda le prove presso il PARI, la pressione di cella era fissata pari a 40kPa). Si assegna poi la pressione di flusso alla base del plinto, aprendo il rubinetto sul pannello relativo alla pressione di flusso e aprendo contemporaneamente i rubinetti B e C (di entrata ed uscita, rispettivamente). La manopola caricherà la cella fino ad una pressione impostata ad 1bar (per quanto riguarda le prove presso il PARI, la pressione di flusso era fissata pari a 20kPa). In seguito all'applicazione delle due pressioni si instaura un flusso dal basso verso l'alto a causa della differenza di pressione tra la base e la testa del provino, pari a $\Delta = 1\text{bar}$. È stato segnato il valore iniziale della buretta di lettura e si è proceduto alla lettura dello stesso ad istanti prefissati.

È possibile calcolare la conducibilità idraulica (o coefficiente di permeabilità, k) considerando un andamento lineare della pressione idraulica:

$$Q = \text{portata media del flusso, espressa in cm}^3/\text{sec: } Q = \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

$$v = \text{velocità media del flusso, espressa in m/sec: } v = \frac{Q}{A \cdot 100}$$

$$i = \text{cadente piezometrica (adimensionale): } i = \frac{\Delta P}{H \cdot 100}$$

Il valore del coefficiente di permeabilità, espresso in m/s, è dato dalla seguente relazione: $k = \frac{v}{i}$

Dove: ΔV : volume totale di acqua fluito nel provino, in cm^3 ; Δt : tempo totale trascorso dall'inizio della prova, in secondi; A = area trasversale del provino, espressa in cm^2 ; ΔP = differenza di pressione tra le due facce del provino, nel caso studiato è pari a 1bar (10,20m c.a.); H = altezza del provino, espressa in cm.

La prova è considerata terminata quando siano ottenuti quattro valori costanti di conducibilità idraulica (range $\pm 25\%$) in letture successive e l'andamento k-tempo presenti un asintoto orizzontale (ASTM D5084). Nel range di valori di coefficiente di permeabilità misurati, pari a circa 10^{-07} - 10^{-10} m/s sono stati impiegati generalmente da 2 a 7 giorni. In Figura 3.24 è riportato un tipico foglio di acquisizione dati.

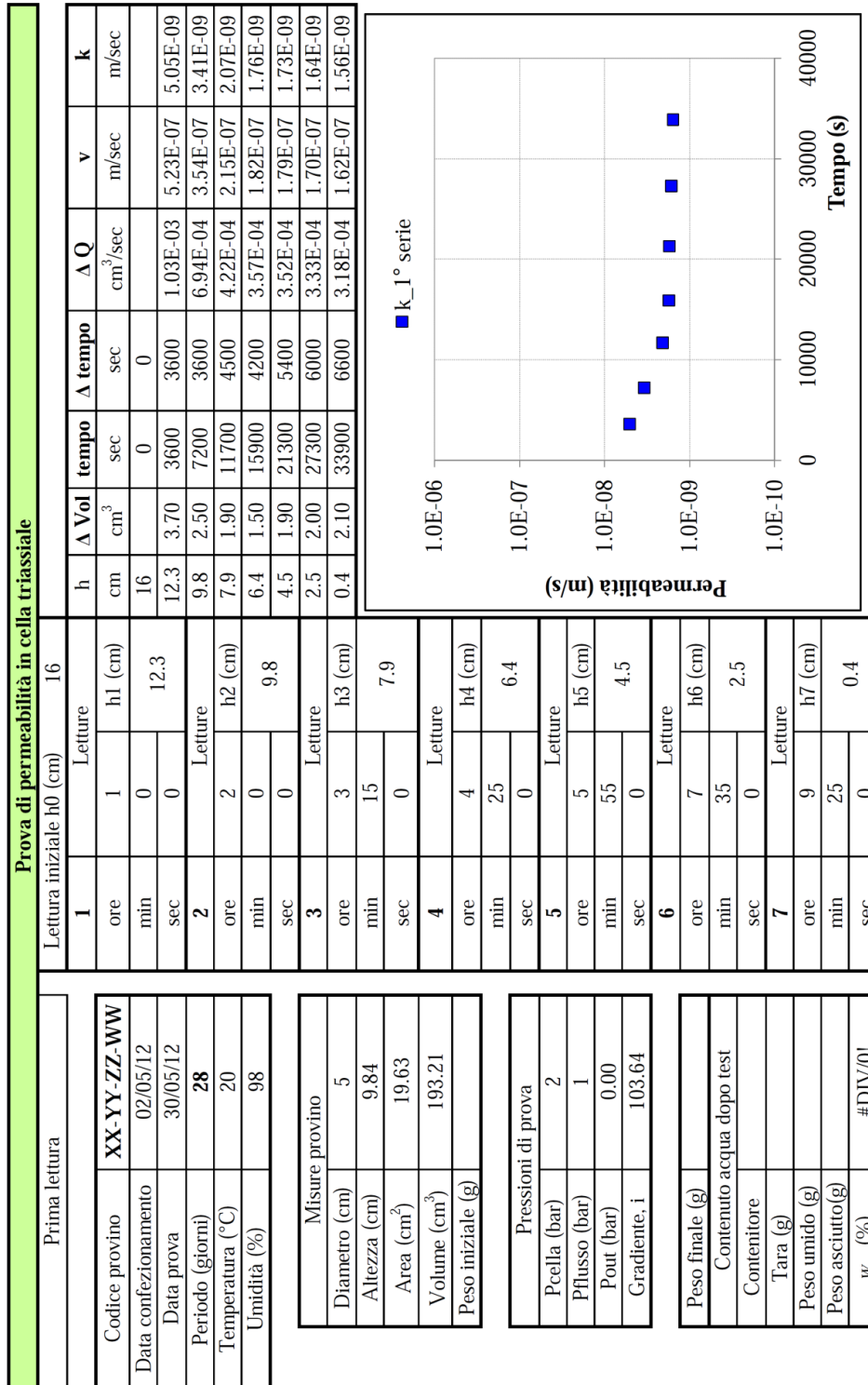


Figura 3.24 - Tipico foglio di acquisizione dati prova di conducibilità idraulica.

4. PROCEDURA PER I TEST DI MISCELAZIONE IN LABORATORIO ASSOCIATI A UN INTERVENTO DEEP MIXING

In questo capitolo viene descritta la procedura impiegata nei test di miscelazione associati a un intervento Deep Mixing per il confezionamento di miscele terreno-legante da cui ricavare provini stabilizzati da sottoporre alle prove di laboratorio. In particolare sono descritte le apparecchiature e i materiali impiegati, la fase di miscelazione, la metodologia per la misura della lavorabilità della miscela, le tecniche di confezionamento per la realizzazione dei provini e le condizioni di maturazione. Le linee guida JGS 0821 (2000) ed EuroSoilStab (2001) costituiscono la base di partenza della procedura di seguito riportata. I provini realizzati, di forma cilindrica, vengono sottoposti alle prove di laboratorio (prova di compressione ELL, prove triassiali, prove di conducibilità idraulica, etc.) dalle quali ricavare utili indicazioni sulle proprietà dei terreni trattati.

I risultati ottenuti applicando questa procedura non sembrerebbero essere del tutto rappresentativi delle reali condizioni del terreno trattato in sito, viste le differenti condizioni di miscelazione e maturazione, ma più un limite superiore. Infatti Porbaha et al. (2000) ed EuroSoilStab (2001) riportano valori del rapporto di resistenze qu_s/qu_l (valori di resistenza a compressione qu in sito /valori di resistenza qu in laboratorio) variabili nel range 1/5-1/2 ottenuti per terreni Giapponesi e Svedesi. Secondo JGS0821 (2000), il rapporto di resistenze qu_s/qu_l varia in funzione del tipo di terreno, ed è pari a 1/3-1 per terreni argillosi e 1/2-1 per terreni sabbiosi. Tali relazioni risultano di utile riferimento ai fini progettuali. Un programma comparativo di prove di laboratorio su un certo numero di provini preparati variando per esempio il tipo e il dosaggio dell'agente legante ed il tempo di maturazione rappresenta un utile ed indispensabile strumento di conoscenza per la fase di progettazione di un intervento di Deep Mixing, sia per la stima delle proprietà geotecniche del terreno trattato sia per indirizzare il campo prova verso la scelta dei parametri operativi del trattamento. Inoltre possono essere sviluppate relazioni empiriche che siano maggiormente indicative delle reali differenze riscontrate tra sito e laboratorio, e a tal fine risulta necessario applicare una procedura di confezionamento standardizzata che sia adottabile dai diversi laboratori per ottenere risultati consistenti e comparabili e quindi che possano essere di riferimento progettuale.

Le procedure descritte sono state applicate presso il Port and Airport Research Institute (PARI), Tokyo, Giappone e presso il laboratorio di Geotecnica del Dipartimento di Ingegneria Edile e Ambientale (DICEA) della Sapienza, Università di Roma, cui si riferiscono le varie immagini riportate.

4.1 Attrezzature

4.1.1 Stampi

Gli stampi adottati sono in PVC di forma cilindrica del diametro interno di 5 cm e di altezza pari a 10 cm, sigillati alla estremità inferiore mediante tappo ed

eventualmente silicone al fine di evitare la perdita di materiale. Per facilitare la successiva operazione di estrazione del provino, possono presentare delle aperture a strappo ai lati (stampi usa e getta tipo “NifCO”) oppure un’unica apertura continua, che viene sigillata mediante nastro adesivo (stampi riutilizzabili) (Figura 4.1). È preferibile impiegare stampi come quelli descritti che permettano l’estrazione del provino evitando invece quelli che ne prevedano l’estrusione applicando una forza ad una base, procedura che può arrecare un sensibile disturbo del provino.



Figura 4.1 - Stampi cilindrici impiegati nello studio sperimentale.

4.1.2 Miscelatore

Impiegato per miscelare il terreno e il legante. Le parti principali sono il motore, la lama e la ciotola di miscelazione. Sono stati impiegati un miscelatore potente, avente una capacità superiore ai 20 litri (tipo Hobart, presso il PARI) e un miscelatore di dimensioni ridotte per volumi di materiale fino a 6 litri (tipo Kenwood o Hobart, presso il DICEA) (Figura 4.2). Fondamentale ai fini di una miscelazione omogenea risulta essere il movimento planetario combinato con quello rotativo. In Figura 4.2 è anche riportato il mixer impiegato per la preparazione della malta cementizia.



Figura 4.2 - Miscelatori impiegati.

Le misure di lavorabilità, eseguite mediante la procedura riportata nel prosieguo, sono state tutte effettuate mediante il miscelatore Kenwood. Al fine di eseguire le misure di coppia in maniera consistente per le diverse miscele analizzate è stato fissato un livello della miscela pari ad $h_1 = 11\text{cm}$ (a partire dal fondo della ciotola) corrispondente ad un volume $V = 3\text{dm}^3$, come raffigurato nello schema di Figura 4.3.

Tabella 4.1 - Livelli di riempimento della ciotola.

h_1 [cm]	11
h_{ciotola} [cm]	21,6

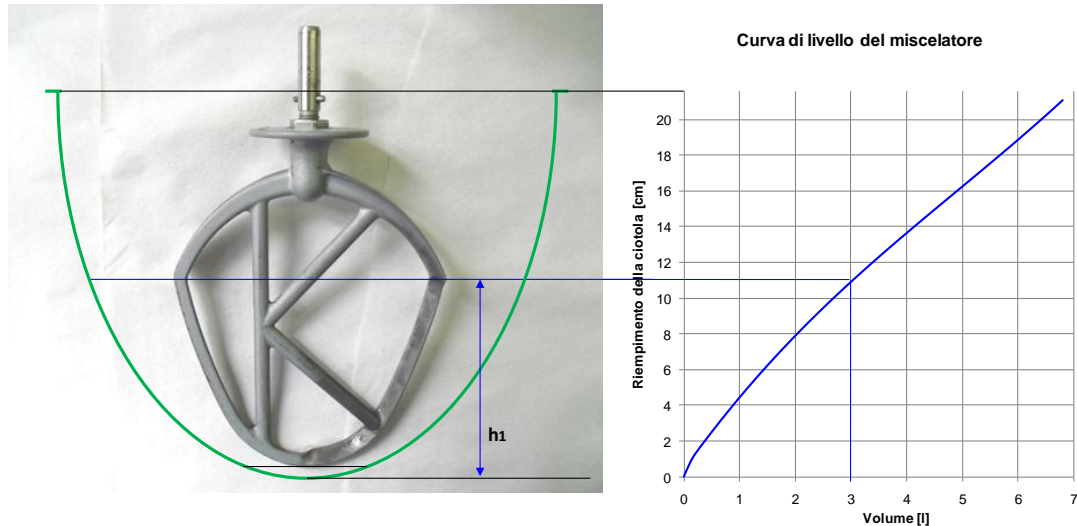


Figura 4.3 - Curva di livello del miscelatore Kenwood.

4.1.3 Strumenti per il confezionamento dei provini

In base alla tecnica di confezionamento impiegata, varieranno gli strumenti adoperati. Nella Figura 4.4 sono riportati i dispositivi utilizzati per le tecniche Rodding (aste metalliche di diametro 8mm ed altezza 200mm), Compattazione Statica (cilindro grigio di diametro 4,90cm, del peso di 4,90kg e dischi da 2,50kg; alternativamente può essere impiegata una pressa), Compattazione Dinamica (dispositivi in nero: base massiva in cui viene alloggiato lo stampo e massa battente cilindrica che scorre su di un'asta per la compattazione degli strati di miscela). Le tecniche Nessuna Compattazione e Tapping non richiedono strumenti appositi. Per tutte le tecniche si impiegano un set di spatole per il livellamento finale della superficie e pellicola trasparente per il rivestimento dell'estremità scoperta del provino.



Figura 4.4 - Strumenti per il confezionamento dei provini.

4.1.4 Dispositivo per la misura del momento torcente, M_t

Dispositivo digitale coppia-angolo USAG 814A 200, applicato mediante apposito collegamento all'albero motore del miscelatore (caratteristiche § 3.3.2). Lo strumento è predisposto per essere collegato ad una leva per la rotazione manuale della pala del miscelatore in fase di misura. La misura del momento torcente, M_t è associata alla lavorabilità della miscela (vedi § 3.3.2). L'unità di misura scelta per lo studio è il [N·m]; il limite massimo impostato è di 80N·m, corrispondente al limite meccanico della giunzione tra il pezzo metallico a cui è assicurato il dispositivo (maschio) e l'attacco anteriore per le basse velocità del mixer (femmina). È possibile prevedere una telecamera disposta in asse alla rotazione per la videoregistrazione, utile per visionare la misurazione appena effettuata e conservarne il dato ricavato.



Figura 4.5 - dispositivo coppia angolo USAG e collegamento al miscelatore.

4.1.5 Hand vane o Laboratory vane

Impiegati (facoltativamente) per avere indicazioni sulla lavorabilità della miscela (§ 2.7.1).

4.1.6 Setaccio ASTM 3/8" (0,95mm)

È raccomandabile che la massima dimensione dei costituenti la miscela sia inferiore ad 1/5 del diametro interno dello stampo. In presenza di terreni aventi frazioni non trascurabili di particelle ghiaiose si consiglia di impiegare stampi di dimensioni maggiore (JGS-0821) senza la necessità di setacciare il terreno.

4.1.7 Cassette di maturazione

Sono stati preparati dei contenitori stagni, sul fondo dei quali era disposto uno strato d'acqua di circa 5 cm, non a diretto contatto con il piano di appoggio dei provini, per assicurare un'umidità costante pari a circa il 98% durante tutto il periodo di maturazione. La cassetta riempita di provini veniva sigillata e sistemata in un luogo opportuno che assicurasse condizioni di temperatura costanti intorno ai 20°C. La temperatura influisce sull'incremento di resistenza con il tempo (§ 2.2.3).

4.1.8 Miscellanea

Bilancia (precisione 0,1g), contenitori in alluminio per la determinazione del contenuto d'acqua (ASTM D2216), spatola in plastica per la malta, forno, etichette, nastro isolante, silicone, contasecondi, termometro per la camera di maturazione.

4.2 Materiali

4.2.1 Terreno

Il terreno impiegato era stato prelevato in sito mediante sondaggi meccanici a carotaggio continuo (§ 3). È consigliabile prelevare un campione rappresentativo di terreno per ciascuno strato significativo interessato dal trattamento. È preferibile conservare il campione di terreno mantenendone il contenuto naturale d'acqua. Per una stima approssimativa delle quantità di terreno necessarie si possono considerare circa 400g di terreno per la realizzazione di un provino, pertanto in base al numero di provini, n , serviranno $(400 \times n)$ g di terreno. I terreni impiegati nello studio sperimentale sono raffigurati in Figura 4.6.



Figura 4.6 - Preparazione dei terreni per lo studio sperimentale: KC, RL, SL, SG, APL, PN, PR, TF (§ 3.1.2, 3.3.2).

Nello studio sperimentale si è reso necessario variare il contenuto d'acqua dei terreni, pertanto il generico terreno è stato prima disgregato e fatto essiccare in forno e in seguito è stato vagliato tramite setaccio 3/8" ASTM (procedura non necessaria per i terreni argillosi). Successivamente si è provveduto alla eventuale nuova aggiunta d'acqua in funzione delle condizioni di prova.

4.2.2 Legante

Sono stati usati cemento tipo Portland (tipo II-LL, classe 32,5R) e legante Blitzdammer®. Nel caso di impiego di malta cementizia, è stata usata acqua di rubinetto, addizionata in base al rapporto acqua:cemento (w:c) scelto. Particolare attenzione è stata posta alla conservazione del legante al fine di evitare il contatto con l'umidità presente nell'aria o la vicinanza ad alte temperature, per non influenzarne la reattività. Per esempio un cemento degradato si presenta in grani.

Le quantità di legante necessarie dipendono dal “*binder content*” (a_c , contenuto di legante, in %), definito come il rapporto del peso del legante secco rispetto al peso del terreno asciutto, parametro generalmente adottato in laboratorio (Filz et al., 2005).

Si può anche fare riferimento al “*binder factor*” (α , fattore legante, in kg/m^3), definito come il rapporto del peso del legante secco rispetto al volume di terreno da trattare, parametro maggiormente adottato in sito in fase di esecuzione (Filz et al., 2005):

$$a_c = \frac{W_{binder}}{W_{soil}}, (\%)$$
$$\alpha = \frac{W_{binder}}{V_{soil}}, (kg/m^3)$$

È bene che il legante o il composto di leganti da impiegare per la miscelazione sia lo stesso di quello da adottare in sito (se già scelto) oppure sia tra quelli facilmente disponibili.



Figura 4.7 - Cemento tipo Portland e legante Blitzdammer®.

4.3 Calcolo delle quantità dei materiali

Per la valutazione del materiale (terreno, acqua, legante) da utilizzare il punto di partenza è la stima iniziale del peso di volume della miscela γ_{mix} ; la Tabella 4.2 mostra i range di valori valutati per le miscele terreno-legante oggetto dello studio.

Tabella 4.2 - Pesì di volume stimati per ciascuna miscela terreno-legante.

Terreno base miscela	AK	RL	SL	SG	APL	PN	PR	TF
$\gamma_{\text{mix}} [\text{g}/\text{cm}^3]$	1,50÷1,90	1,9÷2,1	1,6÷1,8	2,0÷2,2	1,7÷1,9	1,7÷1,9	1,7÷1,9	1,5÷1,7

Se non si dovesse disporre dei pesi di volume della miscela, è possibile ottenerli mediante le formule riportate in appendice a partire dalla densità della malta cementizia e dal peso di volume del terreno.

Il peso totale della miscela può essere scelto in funzione del numero di provini (n) da realizzare o del volume di materiale che si vuole miscelare (V).

Il peso totale P_{tot} della miscela per il confezionamento dei provini è calcolato con la formula:

$$P_{\text{tot}} = \gamma_{\text{miscela}} \cdot n \cdot V_{\text{stampo}} \quad \text{oppure} \quad P_{\text{tot}} = \gamma_{\text{miscela}} \cdot V \quad [\text{g}]$$

Dove: $V_{\text{stampo}} = \left(\frac{d}{2}\right)^2 \times \pi \times h \quad [\text{cm}^3]$ è il volume del singolo stampo cilindrico; d (diametro) ed h (altezza) sono le dimensioni dello stampo pari rispettivamente a 5cm e 10cm.

È consigliabile preparare un quantitativo maggiore di miscela rispetto a quello necessario (per esempio tenendo in conto un provino o circa 500g di materiale in più) per considerare le eventuali perdite di materiale connesse per esempio con la determinazione del contenuto d'acqua oppure con la presenza di materiale che rimane attaccato alla ciotola o alla lama miscelatrice.

Dal peso totale della miscela (terreno-acqua-cemento) posso calcolare il peso del solo terreno secco con la formula:

$$P_s = \frac{P_{\text{tot}}}{\left(1 + a_c + \frac{w}{c} a_c + w_n\right)} \quad [\text{g}]$$

Dove:

w_n è il contenuto d'acqua assegnato al terreno, pertanto il peso dell'acqua da aggiungere sarà: $P_w = P_s \cdot w_n$; a_c è il contenuto di legante o binder content, consistente nel rapporto tra i pesi asciutti del legante e del terreno, pertanto il peso di legante per trattare il terreno è dato da: $P_b = P_s \cdot a_c$; w/c è il rapporto acqua cemento caratteristico della malta cementizia (nel caso di trattamento dry mixing è pari a zero), pertanto l'acqua da aggiungere è pari a: $P_{b,w} = P_b \cdot \frac{w}{c}$.

Se il legante è composto da più elementi, ad esempio cemento e bentonite in proporzione $C:B = 95:5$, allora il peso del cemento (P_c) e della bentonite (P_{bent}) sono dati da:

$$P_c = \frac{C}{100} \cdot P_b \quad ; \quad P_{\text{bent}} = \frac{B}{100} \cdot P_b$$

Sono presentate in appendice A ulteriori formule utili per il passaggio dai parametri di miscelazione in laboratorio ai parametri operativi in sito.

Miscelazione in laboratorio						
Tipo legante	Cemento Portland		Nome terreno	Sabbia Limosa SL		
Parametri malta cementizia			Caratteristiche terreno			
ρ_w acqua	1.0	kg/dm ³	Argilla (%)	Limo (%)	Sabbia (%)	Ghiaia (%)
ρ_c legante	3.0	kg/dm ³	18	20	40	22
w/c	1.00	rapporto in peso	contenuto acqua	45	%	
ρ_{malta}	1.50	kg/dm ³	peso volume	18	kN/m ³	
Stime peso di volume e quantità miscela terreno-legante						
binder content (%)	10.00	% in peso rispetto terreno secco				
peso di volume miscela	17.57	kN/m ³	misurato o stimato			
Numero provini	12	-	dati da inserire formule			
Diametro	5	cm				
Altezza	10	cm	malta cementizia= acqua + legante;			
Peso provino	345	g				
Peso totale materiali	4.141	kg	miscela= terreno + acqua + malta			
Parametri effettivi miscelazione						
aggiunta (taratura 1'mix)	500	g	parametro Mt a vuoto (N·m)			
peso totale materiali	4640.8	g				
peso terreno secco	2812.6	g	6.70			
peso acqua terreno	1265.7	g				
peso legante*	270.9	g				
peso acqua malta	270.9	g				
Contenuto d'acqua Terreno effettivo (%)						
contenitore	peso contenitore (g)	contenitore + peso umido (g)	contenitore + peso secco (g)	contenuto acqua, w_n (%)	Da determinare in seguito all'omogeneizzazione del terreno, prima dell'aggiunta della malta	
116	20.86	46.18	38.29	45.27		
118	28.49	63.16	52.34	45.37		
125	30.17	68.26	56.29	45.83		
Contenuto d'acqua terreno medio effettivo (%)				45.49%		
* da considerare nel calcolo del peso legante un consumo di circa 150g di terreno umido per determinare w_n						
Contenuto d'acqua Miscela terreno-legante effettivo (%)						
orario aggiunta malta			11:15			
contenitore	peso contenitore (g)	contenitore + peso umido (g)	contenitore + peso secco (g)	contenuto acqua (%)	Da valutare in seguito alla miscelazione dei materiali, prima del confezionamento o dei provini	
504	26.19	76.17	58.93	52.66		
508	31.43	77.69	61.87	51.97		
526	31.36	68.62	55.91	51.77		
Contenuto d'acqua miscela medio effettivo (%)				52.13%		
Livello miscela nella ciotola, cm (dal bordo superiore)				9.5		
Lavorabilità miscela terreno-legante, parametro Mt (N·m) (oppure ex. Hand vane, Laboratory vane)				10.1		
				netto: 3.40		
Tempo di confezionamento (t inizio-t fine), min				36		

Figura 4.8 - Esempio foglio dati relativi alla miscelazione in laboratorio.

4.4 Procedura di confezionamento

Le quantità di terreno e legante per la miscelazione sono state determinate dalle condizioni di prova, che hanno previsto la variazione del contenuto di acqua e di legante, del rapporto w/c, del tempo di maturazione e la realizzazione da tre a cinque provini per caso testato (vedi § 3).

4.4.1 Misura del Momento torcente a vuoto iniziale

Lo scopo di questa operazione è quello di misurare il valore di M_t dovuto alla resistenza meccanica del motore del miscelatore, in modo da portare in conto questo dato e sottrarlo a quello della coppia relativa al materiale. Il dispositivo viene impostato (80N·m) e agganciato al miscelatore (Figura 4.5), che viene fissato al piano di lavoro. In seguito l'operatore comincia a ruotare la leva collegata alla lama del miscelatore con velocità costante per un numero totale di giri pari a 10; all'interno della scodella metallica non vi è materiale. Il tempo necessario alla misura (che sarà quindi una media su 10 giri) è di circa 1 minuto. Successivamente il dispositivo viene scollegato.

4.4.2 Omogeneizzazione dei materiali

La quantità di terreno per la miscelazione viene posta nel miscelatore e si aggiunge la quantità d'acqua necessaria a conferire al campione di terreno il contenuto d'acqua desiderato. Il miscelatore viene poi azionato sino al raggiungimento dell'omogeneità tra i due componenti (sono generalmente richiesti dai 3 ai 5 minuti, Figura 4.9). Vengono infine prelevati tre campioni di terreno per la determinazione del contenuto d'acqua. A parte si prepara il legante in forma asciutta o di malta, a seconda delle necessità (Dry o Wet mixing, Figura 4.10). Per realizzare la malta cementizia, può essere impiegato un mixer del tipo riportato in Figura 4.2 oppure si può provvedere ad una miscelazione manuale, impiegando una spatola di plastica e una ciotola metallica.



Figura 4.9 - Aggiunta di acqua al terreno ed omogeneizzazione (miscelatori Kenwood e PARI).



Figura 4.10 - Preparazione malta cementizia (acqua più cemento) o cemento asciutto.

4.4.3 Fase di miscelazione

Una volta omogeneizzato, al terreno presente nel miscelatore viene aggiunto il legante annotando l'orario. Successivamente il miscelatore viene acceso, per una durata totale della miscelazione pari a 10 minuti (JGS 0821), suddivisi in tre intervalli di tempo di circa 3 minuti. Durante la pausa tra due intervalli, si provvede a distaccare il materiale aderente alle pareti del contenitore e alle pale del mixer per aggiungerlo al resto del materiale, al fine di favorire una miscelazione il più possibile omogenea (Figura 4.11). Vengono infine prelevati tre campioni di miscela per la determinazione del contenuto d'acqua (ASTM D2216). In presenza di terreno torboso, EuroSoftSoil (2001) raccomanda di limitare il tempo di miscelazione per evitare la rottura delle fibre. Vengono infine prelevati tre campioni di miscela per la determinazione del contenuto d'acqua.



Figura 4.11 - Aggiunta del legante in forma di malta oppure a secco; pausa per distaccare il materiale attaccato alla lama e alle pareti della ciotola (presso DICEA e presso PARI).

4.4.4 Valutazione della lavorabilità

Terminata la fase di miscelazione si provvede a misurare il livello della miscela all'interno della ciotola, allo scopo di controllare che nel recipiente vi sia sempre lo stesso volume di materiale (tutte le misure di M_t effettuate devono riferirsi allo stesso quantitativo di materiale vedi § 4.1.2; si consiglia in fase di preparazione di prevedere un maggiore quantitativo di miscela al fine di poter procedere con una eventuale asportazione nel caso in cui il volume all'interno del recipiente risultasse troppo elevato, essendo maggiormente complicata l'aggiunta di materiale nel caso contrario). Sottraendo all'altezza della ciotola la misura del livello, eseguita dal bordo della ciotola, si ottiene il livello di riempimento della stessa. Si procede poi con la misura della lavorabilità, secondo le stesse modalità riportate per la misura del M_t a vuoto:

l'operatore inizia a ruotare la leva collegata alla lama miscelatrice a diretto contatto con il materiale all'interno del contenitore, che opporrà una certa resistenza e quindi restituirà un valore maggiore di M_t rispetto alla lettura a vuoto (velocità 10rpm). La misura di M_t associata alla generica miscela terreno-legante sarà quindi pari a quella ottenuta in questa fase depurata del valore a vuoto relativo al miscelatore (per i limiti meccanici della strumentazione impiegata (§ 4.1.4), la massima lavorabilità misurabile è pari a $80Nm-M_{tvuoto}$).

Per quanto descritto, la nuova procedura per la misura della lavorabilità delle miscele terreno-legante ha il vantaggio di fornire la possibilità di misurare la lavorabilità della miscela mentre si trova ancora nel contenitore del mixer, eliminando tutti i problemi di confezionamento discussi al § 2.7.1 e garantendo un consumo di materiale pari a zero. Dal momento che il miscelatore presenta movimenti planetari, la misura viene fatta continuamente sull'intera miscela (massima rappresentatività del campione) e fornisce risultati affidabili, essendo una media su dieci giri. Inoltre è un metodo rapido, visto che è richiesto circa 1 minuto.

Sulla base del metodo proposto la lavorabilità viene quindi espressa come *Momento torcente* (M_t) applicato ad un certo *quantitativo di miscela* (V_m), con una fissata *forma della lama miscelatrice* (S_h) e *velocità di rotazione* (R_s). Nel presente studio sperimentale i parametri sono: $V_{m0} = 3dm^3$; S_{h0} = forma di "K" Kenwood; $R_{s0} = 10rpm$.

È anche possibile integrare la misura di M_t con l'Hand vane o il Laboratory vane (tenendo presente i limiti di tale prove, riportati al § 2.7.1) effettuando almeno 3 misurazioni, lontane dai bordi del contenitore (Figura 4.13).



Figura 4.12 - Misurazione del livello e determinazione M_t .



Figura 4.13 - Misurazione mediante Hand vane e Laboratory vane.

4.4.5 Confezionamento dei provini

Prima dell'utilizzo ad ogni stampo è applicato del grasso spray al fine di limitare al massimo gli effetti di disturbo del provino (distorsioni, distacco dal provino di lenti di materiale ecc.) dovuti alle successive operazioni di estrazione di miscele particolarmente delicate (Figura 4.14). La miscela terreno-legante omogeneizzata viene disposta all'interno dello stampo cilindrico in tre strati (di spessore paria circa 3 cm, Figura 4.14). Ciascuno strato viene poi compattato con lo scopo di minimizzare la presenza di bolle d'aria impiegando una tecnica di confezionamento che secondo i risultati del presente studio sperimentale andrebbe scelta in funzione della lavorabilità della miscela (range di applicabilità delle tecniche di confezionamento riportati in § 5.3.3), o una tecnica di confezionamento ritenuta opportuna in base all'esperienza.



Figura 4.14 - Applicazione grasso spray, inizio confezionamento (presso DICEA e presso PARI) e schema disposizione della miscela nello stampo in tre strati.

Le cinque tecniche adottate nel presente studio sono tra quelle maggiormente impiegate in ambito internazionale (Kitazume et al., 2009b):

- Nessuna Compattazione, *N.C.*: consiste nel riempire lo stampo versando la miscela (se a comportamento liquido) o tramite l'utilizzo di una spatola o un cucchiaio in caso di più elevata consistenza (Figura 4.15).

- Tapping, *TA.*: In seguito alla disposizione di ciascuno dei tre strati, lo stampo viene battuto contro il piano di lavoro rigido per un numero di volte sufficiente a far fuoriuscire le bolle di aria eventualmente presenti. L'altezza di caduta corrisponde a circa 5cm, pari a metà altezza del provino. Lo stampo viene battuto 50 volte, numero ritenuto un buon compromesso tra grado di compattazione e tempo di realizzazione del provino. In presenza di miscele liquide è consigliabile disporre un tappo paraschizzi sull'estremità superiore del provino (Figura 4.15).



Figura 4.15 - Tecniche Nessuna Compattazione (N.C.) e Tapping (TA.).

- Rodding, *RO.*: Ogni strato va opportunamente compattato con l'uso di un'asta metallica cilindrica (8mm di diametro) che viene immersa verticalmente per 30 volte, distribuendo i colpi sull'intera area del materiale all'interno dello stampo. Il materiale eventualmente rimasto attaccato all'asta viene spinto manualmente in basso. Durante le operazioni di costipamento dei successivi due strati non si deve andare a forare il precedente strato costipato (Figura 4.16).

- Compattazione Statica, *S.C.*: Consistente in una compressione statica, pari a 25 o 50kPa (rispettivamente *S.C.25* ed *S.C.50*) impressa da una massa applicata per un tempo di 10 secondi per strato. Per facilitare l'applicazione della pressione necessaria è stato realizzato un cilindro metallico di peso opportuno per la tecnica *S.C.25*, che prevedeva la possibilità di aggiungere ulteriori dischi per la tecnica *S.C.50*. Prima della realizzazione dello strato successivo la superficie superiore del precedente viene resa scabra tramite l'uso di una spatola (Figura 4.16). Particolarmente in presenza di miscele a comportamento liquido l'inserimento del cilindro nello stampo con conseguente espulsione di aria può causare una parziale estrazione della miscela compattata per effetto del vuoto creatosi o comunque generare uno spazio anulare intorno ai provini che saranno quindi non omogenei e caratterizzati da un diametro inferiore a quello previsto (Figura 4.16).

- Compattazione Dinamica, *D.C.*: Prevede la compattazione di ciascuno strato mediante una massa battente utilizzando un apposito apparato (§ 4.1). Prima della realizzazione dello strato successivo la superficie superiore del precedente viene resa scabra tramite l'uso di una spatola. I parametri operativi quali massa, altezza di caduta e numero di battute possono essere modificati per variare l'energia di compattazione, quelli adottati nello studio sperimentale sono: massa battente di 1,5kg, altezza di caduta pari a 10cm, numero di battute pari a 5 (Figura 4.17). In Figura è anche rappresentato uno dei problemi tipici dell'applicazione di tale metodo in presenza di miscele più lavorabili, che può comportare l'espulsione del materiale al di fuori dello stampo e quindi una impossibilità pratica di realizzare il provino, unitamente ai problemi precedentemente richiamati per la tecnica di Compattazione Statica.

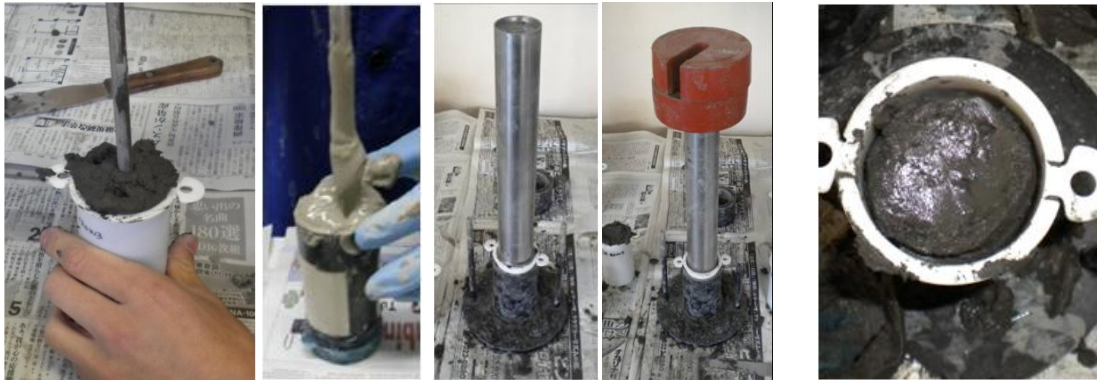


Figura 4.16 - Tecniche Rodding RO. e Compattazione Statica S.C.25 e S.C.50. ed esempio di provino difettoso (S.C.25 - m2).



Figura 4.17 - Tecnica Compattazione Dinamica, D.C.; esempio di espulsione di miscela (D.C. - m2).

È preferibile applicare a ciascuno stampo un'etichetta identificativa, con riportate per esempio la data e le caratteristiche della miscela impiegata. In seguito alla compattazione, la faccia esposta del generico provino viene livellata (Figura 4.18) tramite l'utilizzo di una spatola idonea, ed in seguito coperta da una pellicola in plastica assicurata mediante elastici in gomma.

I provini così confezionati sono successivamente disposti all'interno dei contenitori di maturazione precedentemente preparati (Figura 4.19). Si annota l'orario relativo alla fine del confezionamento: la lavorabilità di una miscela terreno-legante varia con il tempo, pertanto da risultati sperimentali Kitazume et al. (2009b) raccomandano di terminare la fase di confezionamento entro 30-45 minuti dall'aggiunta del legante (§ 2.2.4).



Figura 4.18 - Livellamento della superficie del generico provino.



Figura 4.19 - Disposizione dei provini opportunamente sigillati all'interno della cassetta di maturazione.

4.4.6 Misura Momento torcente a vuoto finale

Questa misura viene effettuata per avere un valore di controllo in quanto sono state ottenute per M_t a vuoto finale delle variazioni rispetto al valore iniziale, probabilmente dovute al differente attrito delle componenti meccaniche del motore del mixer. In generale, si registrano valori maggiori di M_t nei vuoti iniziali, effettuati prima delle misure sui materiali, piuttosto che nei vuoti finali, con variazioni dell'ordine dei $0,12 \div 1,24 \text{ N}\cdot\text{m}$, di media $0,52 \text{ N}\cdot\text{m}$, come mostrato in Tabella 4.3. La seconda lettura della coppia a vuoto risulta inoltre condizionata dalla tempistica con cui viene effettuata, infatti dopo circa 20 minuti di non utilizzo del mixer i due valori tendono a coincidere.

Tabella 4.3 - Confronto delle misure di M_t a vuoto iniziale e finale.

Misurazione	1	2	3	4	5	6	7	8	Media
M_t Vuoto iniziale [N·m]	6,92	6,68	6,61	6,32	7,5	6,37	6,92	7,5	6,85
M_t Vuoto finale [N·m]	6,39	6,56	6,39	5,93	6,26	5,87	6,35	6,9	6,33

4.4.7 Report

È bene redigere un report relativo alla miscelazione eseguita, in cui siano presenti: classificazione del terreno e del legante utilizzati, quantità impiegate, contenuti d'acqua effettivi del terreno e della miscela, tecnica di confezionamento impiegata, condizioni di maturazione (del tipo riportato in Figura 4.8).

4.4.8 Estrazione dei provini dagli stampi

Alla fine del periodo di maturazione i provini sono estratti dagli stampi (Figura 4.20). È anche possibile estrarre gli stampi dopo pochi giorni, purché abbiano maturato un sufficiente livello di resistenza. Qualora le estremità dei provini non fossero piane, è possibile eseguire un eventuale "trimming" delle superfici, al fine di assicurare la planarità delle stesse. Nel caso in cui non vengano testati subito, i provini estratti possono essere avvolti in una pellicola e riposti nuovamente nella cassetta di maturazione (Figura 4.19).

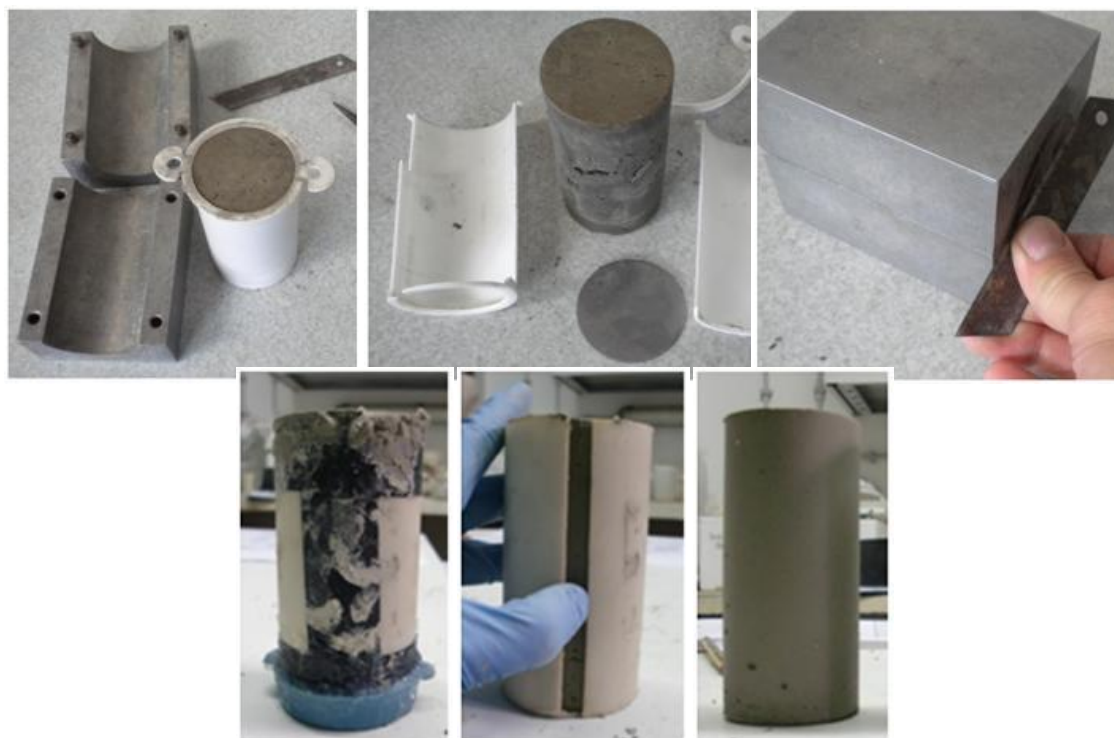


Figura 4.20 - Fasi di estrazione dei provini dalle due tipologie di stampo, con eventuale trimming.

5. RISULTATI ED ANALISI

Nel presente capitolo sono riportati in maniera critica i risultati ottenuti dalle prove di laboratorio eseguite nelle quattro fasi costituenti lo studio sperimentale, presentate e descritte al Capitolo 3 nell'ordine cronologico in base al quale sono state affrontate. I risultati sono suddivisi in quattro paragrafi principali: il primo e il terzo riguardano direttamente lo studio internazionale volto alla definizione dell'applicabilità di diverse tecniche di confezionamento dei provini stabilizzati da sottoporre alle prove di laboratorio, largamente impiegate nelle diverse fasi di un intervento di Deep Mixing; nel secondo viene discusso l'effetto dell'aggiunta di tire chips sulle proprietà meccaniche di una miscela terreno-cemento, da impiegare nella realizzazione di una barriera impermeabile; nel quarto sono infine descritti i risultati relativi ad un campo prova di Cutter Soil Mixing in Zandvoort (Olanda) e relativo studio di laboratorio, ottenuti in collaborazione con l'Università di Padova e la Bauer Group.

5.1 Applicabilità tecniche di confezionamento di provini di miscela terreno-cemento - Soil Stabilisation group (PARI)

I risultati presentati in questa sezione si riferiscono alle nove miscele caratterizzate da diversa lavorabilità analizzate al § 3.1.2. Prima della fase di realizzazione dei provini ciascuna miscela è stata sottoposta all'Hand vane test e quindi caratterizzata da un valore di resistenza al taglio in condizioni non drenate, c_u (kPa), associabile alla lavorabilità o consistenza della miscela stessa. Pertanto nei grafici che seguono, si riporta il valore di c_u (kPa) sull'asse delle ascisse. Inoltre nella presentazione dei risultati generali, le miscele studiate sono state suddivise in tre gruppi (A, B e C) in base alla lavorabilità iniziale, passando dalle miscele più lavorabili (Gruppo A) a quelle più consistenti (Gruppo C). Sono infine riportati in appendice (§ B.1) ulteriori risultati.

Sono illustrati in Figura 5.1 e Figura 5.2 i valori ottenuti in termini di resistenza q_u e peso di volume (indice della densità del provino) per i provini testati relativi a ciascuna tecnica di confezionamento impiegata, a 7 e 28 giorni di maturazione. I valori di resistenza q_u sono compresi in un ampio range variabile tra 138kPa e 8.560kPa. I risultati mostrano come la tecnica di confezionamento abbia influenza non solo sui valori di resistenza ma anche sulla loro variazione nel tempo. Considerando la stessa tecnica di confezionamento, si riscontra un aumento dei valori di resistenza q_u passando da 7 a 28 giorni, come atteso a causa del processo di idratazione del cemento (Porbaha, 2000). Per quanto riguarda il peso di volume, i valori ottenuti sono compresi nel range 14,03 – 16,94 kN/m³, escludendo quelli relativi alla tecnica *N.C.* (valore inferiore pari a 11.6kN/m³). È stata riscontrata una minima variazione tra 7 e 28 giorni, probabilmente legata alle condizioni di maturazione. È possibile constatare un andamento non lineare delle proprietà analizzate con la consistenza, quest'ultima dipendente in maniera maggiore dal contenuto d'acqua e minore dal cemento presente (Tabella 3.2). A parità di miscela e tempo di maturazione appaiono evidenti delle sensibili differenze nei valori ottenuti associati alle diverse tecniche di confezionamento utilizzate, anche legate alle

problematiche riscontrate nel loro impiego (descritte § 3.1.2). I valori di resistenza relativi alle miscele $m1$, $m2$ ed $m3$, caratterizzate da un basso contenuto di cemento, risultano nettamente inferiori rispetto agli altri. Confrontando i risultati associati alle due tecniche di compattazione statica ($S.C.25$ ed $S.C.50$), la maggiore energia fornita dalla tecnica $S.C.50$ sembra comportare una traslazione della relativa curva verso valori di resistenza e densità maggiori rispetto a quella ottenuta per $S.C.25$.

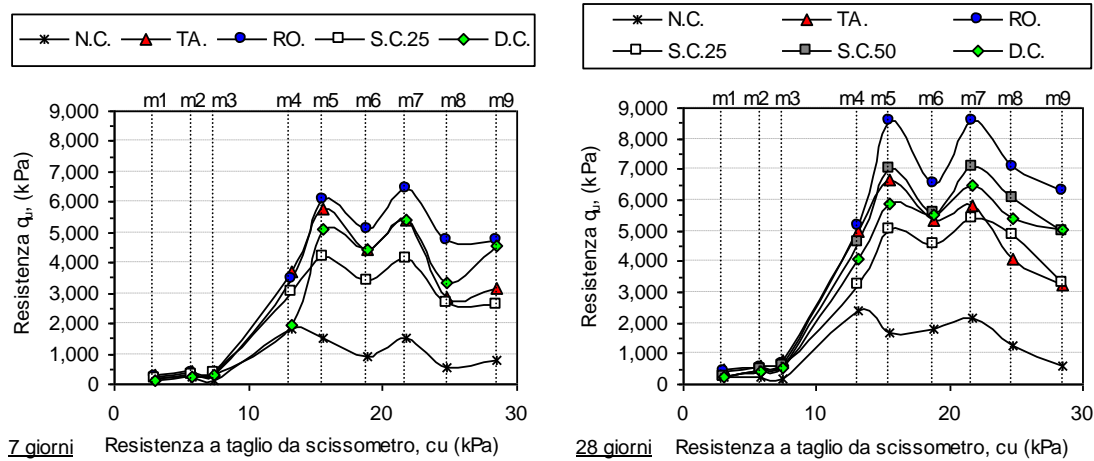


Figura 5.1 - Valori di resistenza q_u per le diverse tecniche di confezionamento in funzione della lavorabilità della miscela a 7 e 28 giorni.

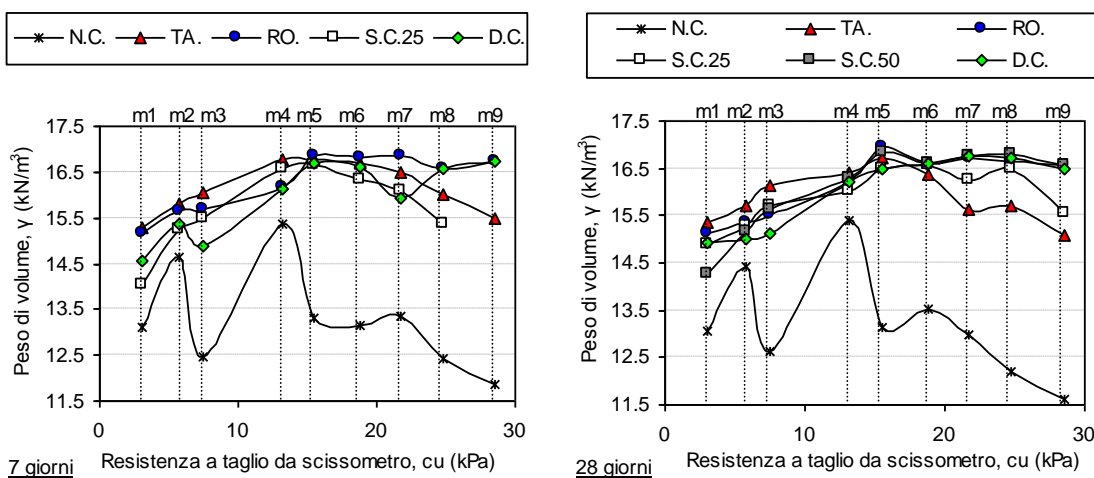






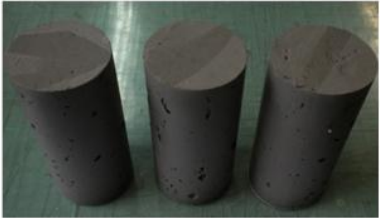
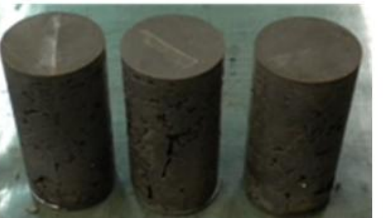



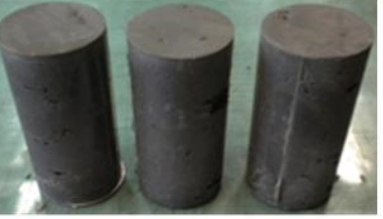
Figura 5.2 - Valori di peso di volume γ per le diverse tecniche di confezionamento in funzione della lavorabilità della miscela a 7 e 28 giorni.

Al fine di permettere un confronto visivo diretto dell'effetto di diverse tecniche di confezionamento sulla qualità dei provini, sono raffigurati in Tabella 5.1 i provini ottenuti per le due miscele $m2$ ed $m7$ (caratterizzate da alta e bassa lavorabilità rispettivamente): per esempio considerando la tecnica TA , nel caso della miscela $m2$, i provini realizzati appaiono essere omogenei e privi di difetti, mentre nel caso della miscela $m7$ è evidente la presenza di ampi vuoti; viceversa vale per la tecnica $D.C.$.

In Tabella 5.2 sono riportate per confronto con § 1.7.3 le relazioni tra le resistenze qu_7 e qu_{28} per le miscele testate. I valori medi per tipo di miscela e tecnica risultano compresi nel range $qu_7/qu_{28} = 0,59 \div 0,93$. È possibile constatare una forte

influenza sui valori ottenuti sia della tecnica di confezionamento sia della lavorabilità della miscela, che rendono maggiormente cautelativo l'impiego delle relazioni riportate in letteratura nelle quali spesso non si conoscano le condizioni effettive in cui siano state determinate.

Tabella 5.1 - Confronto visivo provini confezionati dalle miscele m2 ed m7.

Tecnica confezionamento	Miscela <i>m2</i>	Miscela <i>m7</i>
Nessuna Compattazione, <i>N.C.</i>		
Tapping, <i>TA.</i>		
Rodding, <i>RO.</i>		
Compattazione Statica, <i>S.C.50</i>		
Compattazione Dinamica, <i>D.C.</i>		

È stata osservata una relazione tra la lavorabilità della miscela terreno-cemento e le proprietà meccaniche dei provini ottenuti mediante le diverse tecniche. Le analisi presentate nei paragrafi seguenti riguardano l'adozione di due parametri, impiegati per ottenere alcune indicazioni riguardo l'applicabilità della specifica tecnica di confezionamento: parametro "*N*", resistenza a compressione *qu* e peso di volume normalizzati, e parametro "*E*", errori relativi sulla resistenza a compressione *qu* e peso di volume. Tali parametri sono stati successivamente incorporati nell' "indice di

applicabilità, I_A ”, utile per la valutazione dell’applicabilità di ciascuna tecnica di confezionamento (considerando l’omogeneità dei provini e la ripetitività dei risultati ad essa associati) in funzione della lavorabilità della miscela.

Tabella 5.2 - Rapporti di resistenza qu_7/qu_{28} per le miscele testate.

Gruppo	Miscela	Rapporti qu_7/qu_{28}					Media miscela
		D.C.	S.C.25	TA.	RO.	N.C.	
A	m1	0,57	0,60	0,64	0,57	0,73	0,62
	m2	0,63	0,61	0,65	0,63	1,10	0,72
	m3	0,58	0,59	0,62	0,50	0,67	0,59
B	m4	0,47	0,94	0,75	0,68	0,77	0,72
	m5	0,88	0,83	0,86	0,71	0,88	0,83
	m6	0,81	0,76	0,83	0,78	0,52	0,74
C	m7	0,84	0,76	0,93	0,75	0,69	0,80
	m8	0,62	0,56	0,70	0,67	0,56	0,59
	m9	0,90	0,81	0,98	0,76	1,19	0,93
	Media tecnica	0,70	0,72	0,77	0,67	0,79	0,73

5.1.1 Parametro “N” - Resistenza qu e peso di volume normalizzati

Al fine di permettere un confronto tra i risultati relativi alle nove diverse miscele, i valori di resistenza a compressione qu e il peso di volume dei provini sono stati normalizzati rispetto a quelli massimi ottenuti per ciascuna miscela, come riportato nelle equazioni seguenti e illustrato in Figura 5.3 e Figura 5.4.

$$\text{Resistenza } qu \text{ normalizzata: } q_{uN} = \left(\frac{q_u}{q_{u \max}} \right)_{m\#}, \quad 0 < q_{uN} < 1 \quad (5.1)$$

$$\text{Peso di volume normalizzato: } \gamma_N = \left(\frac{\gamma}{\gamma_{\max}} \right)_{m\#}, \quad 0 < \gamma_N < 1 \quad (5.2)$$

Dove qu_{\max} e γ_{\max} sono rispettivamente il valore massimo di resistenza qu e peso di volume ottenuti con una delle cinque tecniche disponibili e riferiti alla specifica miscela $m\#$.

Esaminando i valori normalizzati è possibile ravvisare degli andamenti delle proprietà indagate con la consistenza delle miscele che non apparivano chiari in precedenza, specialmente per le miscele del Gruppo A (Figura 5.1). Rispetto alle miscele più lavorabili, la tecnica TA. è risultata essere la migliore in termini di resistenza e densità ottenute, seguita dalla tecnica RO.. Nel caso di miscele più consistenti, le tecniche RO. ed S.C.50 sono risultate prevalere sulle altre. È interessante notare come i provini relativi alle miscele del gruppo A realizzati mediante Compattazione Statica presentino valori pressoché identici indipendentemente dalla pressione applicata di 25 o 50kPa, mentre sono visibili sensibili differenze per le altre miscele. Si nota anche una minore influenza delle tecniche di confezionamento sui valori di peso di volume rispetto a quelli di resistenza, visto che tutti i valori ad eccezione di quelli relativi alla tecnica N.C. sono vicino ad 1.

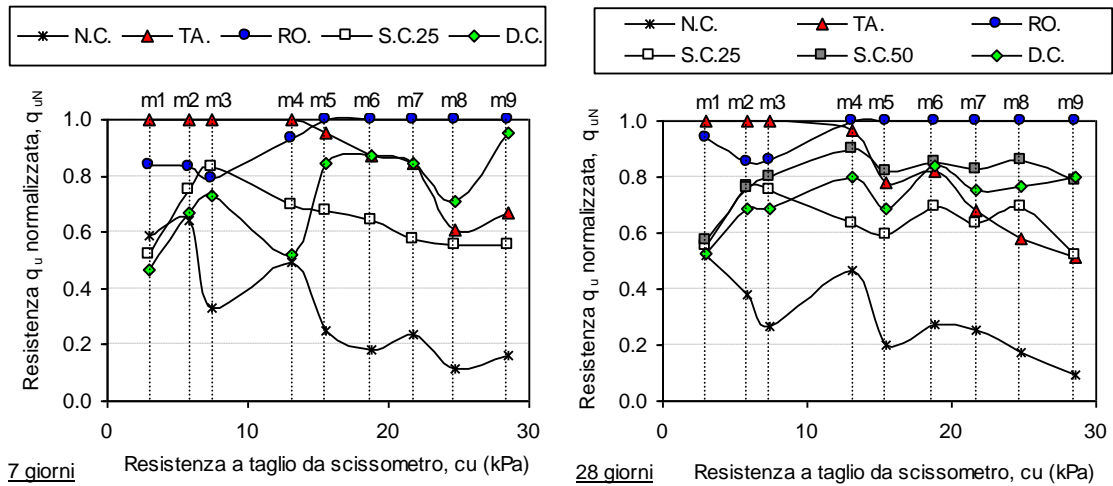


Figura 5.3 - Valori di resistenza q_u normalizzata q_{uN} per le diverse tecniche di confezionamento in funzione della lavorabilità della miscela a 7 e 28 giorni.

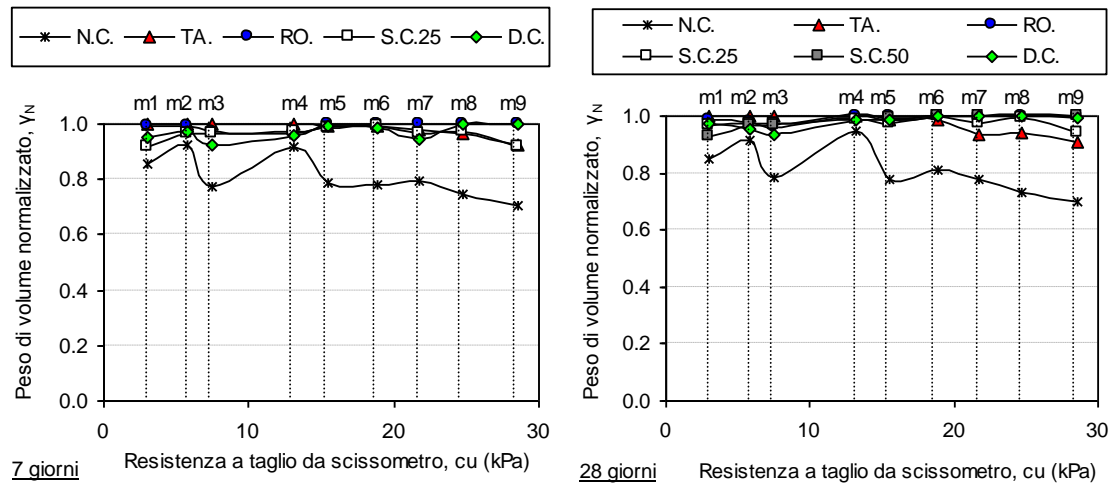


Figura 5.4 - Valori di peso di volume γ normalizzato γ_N per le diverse tecniche di confezionamento in funzione della lavorabilità della miscela a 7 e 28 giorni.

Gli andamenti ottenuti risultano essere generalmente coerenti tra 7 e 28 giorni, pur presentando delle leggere variazioni.

Considerando la stessa miscela, un provino ben fatto è caratterizzato da una bassa presenza di vuoti e/o bolle d'aria e pertanto da densità maggiore rispetto a un provino di cattiva qualità (Tabella 5.1); avrà inoltre generalmente una resistenza maggiore, essendo possibile constatare una certa correlazione tra i valori di peso di volume e resistenza ottenuti nello studio sperimentale (Figura B.1). Tuttavia i provini realizzati mediante le diverse tecniche di confezionamento hanno mostrato valori molto differenti di resistenza a compressione pur in presenza di valori simili di peso di volume. Pertanto è stato deciso di condensare le informazioni fornite dai parametri normalizzati q_{uN} e γ_N all'interno del parametro N , definito in eq. (5.3).

$$N = \text{Media} [q_{uN}; \gamma_N] \quad (5.3)$$

Il parametro N fornisce un'indicazione riguardo l'applicabilità di una tecnica di confezionamento: la generica tecnica viene ritenuta applicabile quando i provini che produce abbiano le migliori proprietà meccaniche (in termini di maggiore resistenza a

compressione) e fisiche (in termini di maggiore densità) rispetto ai provini prodotti mediante le altre tecniche. A tal fine viene introdotto un criterio per la scelta della tecnica applicabile relativamente alla consistenza considerata, fissando un valore di soglia minimo di $N = 0,9$, al di sotto del quale una tecnica non è ritenuta applicabile.

I risultati ottenuti per le nove miscele indagate sono stati mediati nei tre gruppi di consistenza, come illustrato in Figura 5.5. I valori mostrano quali tecniche diano i migliori risultati considerando il parametro N : le tecniche TA. e RO. per il Gruppo A, RO., TA. ed S.C.50 per il Gruppo B e RO. ed S.C.50 per il Gruppo C.

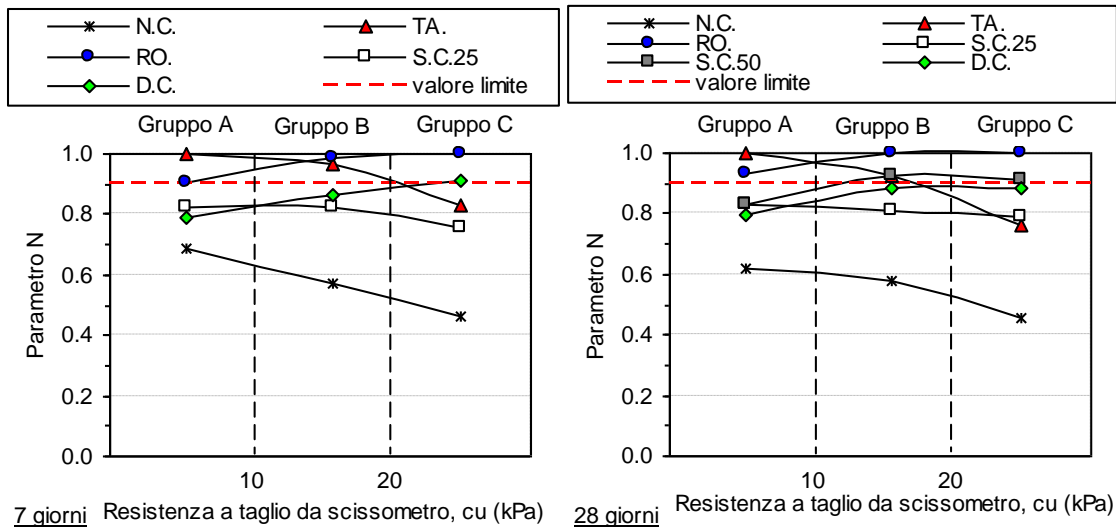


Figura 5.5 - Applicabilità di ciascuna tecnica di confezionamento rispetto al parametro N .

5.1.2 Parametro "E" - Errori relativi sulla resistenza q_u e peso di volume

Una generica tecnica di confezionamento può essere considerata applicabile per una data lavorabilità se è capace di garantire una "ripetibilità" dei risultati ottenibili mediante il suo impiego (Ismail et al., 2000). Pertanto come ulteriori parametri indicativi dell'applicabilità di un metodo di confezionamento si è ipotizzato di utilizzare gli errori relativi sulla resistenza q_u e peso di volume, E_{q_u} ed E_γ , definiti nelle eq. 5.4 e 5.5. I valori ottenuti sono illustrati in Figura 5.6 e Figura 5.7.

$$E_{q_u} = \frac{0,5 \times (q_{u \max} - q_{u \min})}{q_{u \text{ medio}}} \quad (5.4)$$

$$E_\gamma = \frac{0,5 \times (\gamma_{\max} - \gamma_{\min})}{\gamma_{\text{ medio}}} \quad (5.5)$$

Gli errori relativi sono quindi definiti come la semidifferenza fra il valore massimo ed il valore minimo registrati (semidispersione) rapportata al valore medio. All'interno dell'errore c'è sia l'errore proprio della tecnica di confezionamento sia quello associato al tecnico che la applica; per ridurre quest'ultimo fattore, ogni tecnica veniva eseguita dal medesimo operatore. Si ricorda che per ciascuna condizione di prova sono stati impiegati tre provini gemelli (§ 3.1.2).

Alcuni valori di E_{qu} determinati per i metodi D.C. ed S.C.25 per le miscele a più bassa consistenza sono risultati considerevolmente elevati, probabilmente per i problemi riscontrati in fase di confezionamento come la fuoriuscita di miscela o intrappolamento del dispositivo di compattazione, riportati al § 4.4.5. I valori maggiori di E_{qu} sono stati ottenuti per la tecnica N.C. ad eccezione di quelli relativi alle miscele m1 ed m2, aventi un comportamento più “liquido” e quindi caratterizzate da una maggiore semplicità di disposizione all’interno dello stampo in assenza di compattazione, che quindi risultava essere meno dipendente dall’operatore. Per le diverse miscele e tecniche utilizzate nei casi rimanenti, i valori di E_{qu} sono generalmente risultati inferiori a 0,10, con valori leggermente maggiori a 7 giorni di maturazione. I valori di E_{γ} sono generalmente molto bassi, se paragonati a quelli di E_{qu} , e ciò è probabilmente dovuto al fatto che dentro al termine E_{qu} è presente anche l’errore insito nelle apparecchiature impiegate per la prova di compressione ad espansione laterale libera. Tuttavia i due tipi di errore relativo mantengono andamenti simili e per entrambi è possibile constatare una maggiore dispersione dei dati a 7 giorni rispetto a quelli a 28 giorni di maturazione (scala dell’asse delle ordinate modificata).

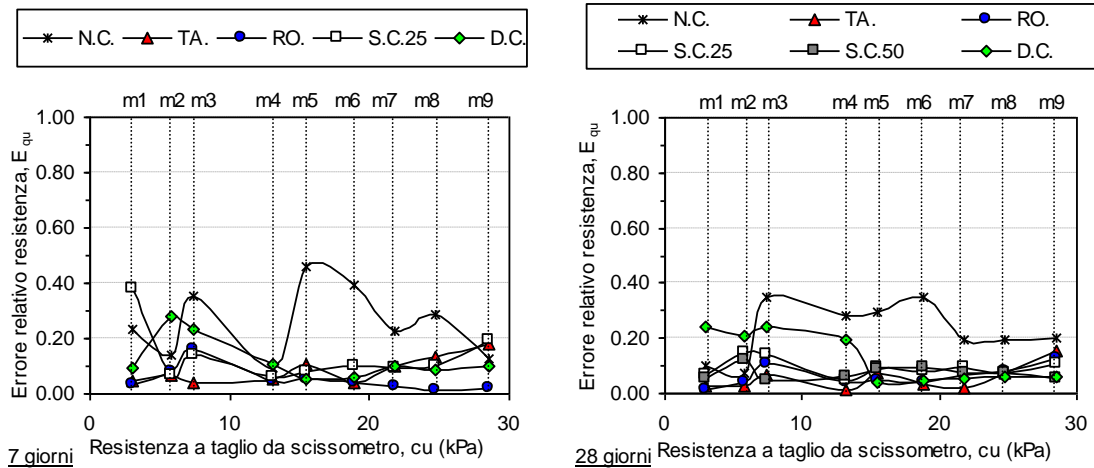


Figura 5.6 - Errori relativi sulla resistenza qu , E_{qu} per le diverse tecniche di confezionamento in funzione della lavorabilità della miscela a 7 e 28 giorni.

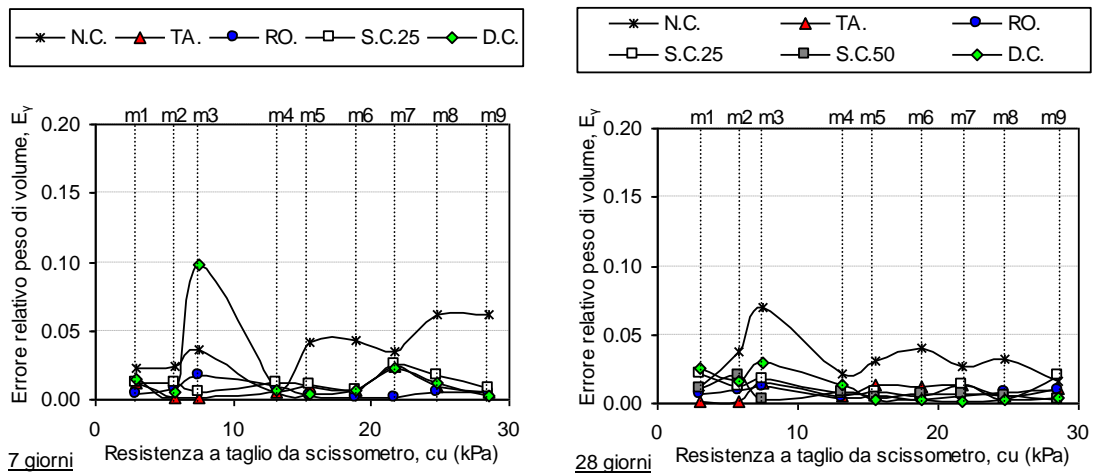


Figura 5.7 - Errori relativi sul peso di volume E_{γ} per le diverse tecniche di confezionamento in funzione della lavorabilità della miscela a 7 e 28 giorni.

I risultati ottenuti sono stati poi integrati nel parametro E , definito nella eq. 5.6:

$$E = \text{Media} [E_{\mu} ; E_{\gamma}] \quad (5.6)$$

In base al parametro E , se i provini realizzati mediante una specifica tecnica di confezionamento risultano avere una bassa variabilità (in termini di errore relativo) delle proprietà fisiche e meccaniche, i risultati saranno caratterizzati dalla massima ripetibilità. Relativamente alla accuratezza e ripetibilità dei risultati nelle prove geotecniche in laboratorio, Richards and Reddy (2010) riportano un valore di errore percentuale pari al 10%, ritenuto accettabile. Al Tabbaa et al. (2012) riferiscono un valore dell'errore pari al 5-15%, relativo ai provini di terreno stabilizzato testati mediante prova di compressione ELL.

Pertanto è stato deciso di considerare come applicabili le tecniche che riportassero un valore di E inferiore a 0,1 (in percentuale < 10%). In Figura 5.8 sono illustrati i valori medi di E riferiti ai tre gruppi di consistenze. I grafici presentano una scala delle ordinate variabile tra 0 e 0,20 al fine di visualizzare meglio i risultati.

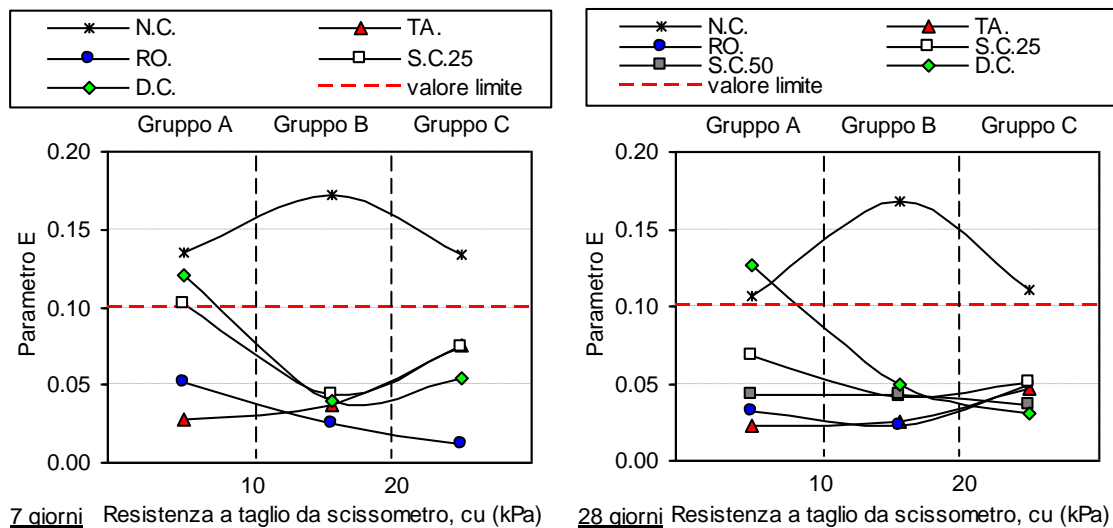


Figura 5.8 - Applicabilità di ciascuna tecnica di confezionamento rispetto al parametro E .

È possibile vedere come tutte le tecniche impiegate riportino valori di E al di sotto del limite imposto e siano quindi considerate applicabili, ad eccezione delle tecniche $D.C.$ ed $S.C.$ relativamente alle miscele del Gruppo A e della tecnica $N.C.$ per tutte le miscele studiate.

5.1.3 Indice di Applicabilità

In merito alle diverse tecniche di confezionamento adottate, è stato possibile effettuare alcune considerazioni relative agli andamenti dei parametri N ed E descritti ai paragrafi precedenti, anche associabili ai problemi riscontrati in fase di preparazione dei provini.

Al fine di integrare le indicazioni fornite dai due parametri N ed E , è stato proposto un indice di applicabilità, così definito (eq. 5.6):

$$I_A = \frac{N}{1+E}, \quad 0 < I_A < 1 \quad (5.7)$$

L'indice I_A fornisce l'indicazione sulla tecnica di confezionamento capace sia di produrre provini aventi le migliori proprietà fisico-meccaniche (in termini di densità e resistenza a compressione qu) sia di assicurare la massima ripetibilità dei risultati rispetto le altre (in termini di minimi errori relativi). Se la tecnica di confezionamento ha una elevata riproducibilità (E piccolo o prossimo a zero), il termine $(1+E)$ al denominatore non influirà sul valore di I_A che sarà quindi dipendente dal solo parametro N . Scopo dell'indice è quello di permettere un più agevole confronto tra diverse tecniche di confezionamento e facilitare la scelta della tecnica che sia maggiormente applicabile in funzione della lavorabilità della miscela terreno-cemento. Inserendo nell'equazione i valori limite per i due parametri N ed E precedentemente definiti, si ottiene $I_A = 0.82$, considerato come valore limite inferiore di applicabilità. L'andamento dell'indice di applicabilità per i tre gruppi di consistenza è riportato in Figura 5.9 sia a 7 sia a 28 giorni, con andamenti simili.

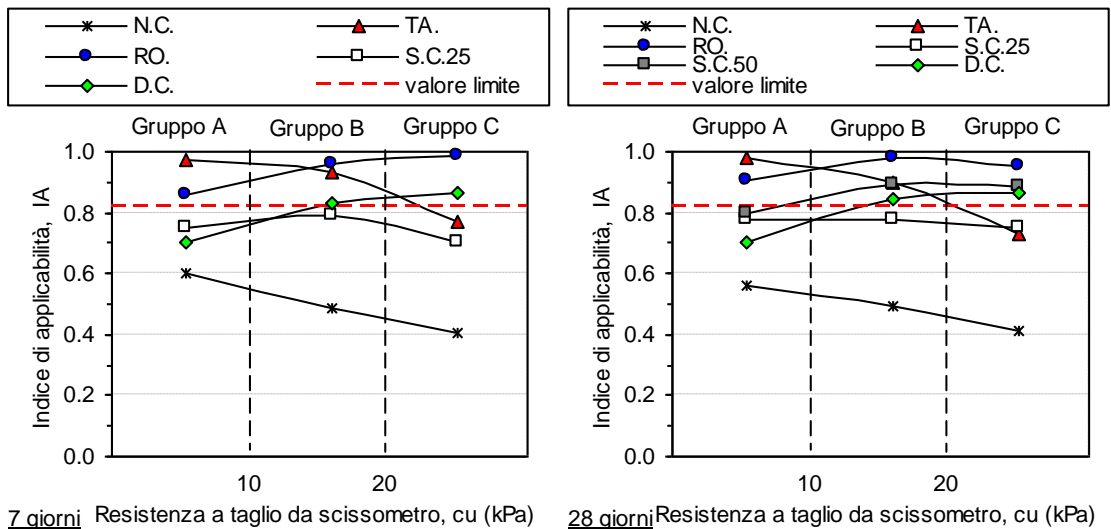


Figura 5.9 - Indice di Applicabilità - miscele testate presso il PARI.

Dalla Figura 5.9 è possibile notare come la tecnica *RO.* sia l'unica applicabile per tutti i gruppi di lavorabilità, ed in particolare per le miscele dei Gruppi *B* e *C*. La tecnica *TA.* è risultata essere maggiormente applicabile per le miscele del Gruppo *A*, mentre la sua applicabilità si riduce all'aumentare della consistenza delle miscele. Le tecniche *N.C.*, *S.C.25* non sono mai risultate applicabili nel range di consistenze considerato. Il valore dell'indice di applicabilità relativamente alla tecnica *D.C.* aumenta notevolmente con la consistenza della miscela, fino a risultare applicabile per le miscele meno lavorabili. L'analisi dei dati relativi alla tecnica *S.C.50* rispetto a quelli ottenuti per *S.C.25* suggerisce come in presenza di miscele maggiormente consistenti possa essere adottata con successo una maggiore energia di compattazione. A titolo di esempio potrebbero essere ulteriormente modificati i parametri operativi relativi alle tecniche *D.C.* ed *S.C.* aumentando l'altezza di caduta o la massa battente o la pressione statica. Si sottolinea l'attenzione sul fatto che nel presente studio sono state analizzate le tecniche maggiormente utilizzate nei laboratori di deep mixing, così come richiesto

dallo studio internazionale, non andando ad indagare la possibilità di impiego di una nuova tecnica.

Nella successiva e complementare serie di prove condotte presso il DICEA è stato possibile misurare il parametro di lavorabilità M_t (momento torcente) associato alle miscele $m1 \div m6$, che ha permesso un confronto diretto e l'integrazione con i dati ricavati nel corso della terza fase dello studio sperimentale (§ 5.3).

5.2 Effetto di “tire chips” sulle proprietà meccaniche di miscele terreno-cemento - Foundation group (PARI)

Sono riportati di seguito i risultati ottenuti dallo studio sperimentale, evidenziando l'effetto dell'aggiunta di tire chips e del tempo di maturazione sulle proprietà fisiche e meccaniche del terreno trattato. Per ciascuna miscela confezionata è stato impiegato un provino sul quale condurre le tomografie ai raggi X e le prove di conducibilità idraulica durante i diversi step di carico a deformazione controllata e ulteriori sei provini per l'esecuzione di prove di compressione ELL a 7 e 28 giorni. Per le analisi delle immagini è stato impiegato il software open source “ImageJ” (Rasband, 1997-2012).

5.2.1 Analisi delle tomografie ai raggi X

Ciascun provino è stato scansionato dal basso verso l'alto, ottenendo 500 immagini distanziate di 0,2mm. In Figura 5.10 si riportano a titolo di esempio le sezioni trasversali riferite alla metà altezza dei provini (M-1 senza tire chips, M-2 ed M-3 aventi contenuto di tire chips = 10 e 20% rispettivamente).

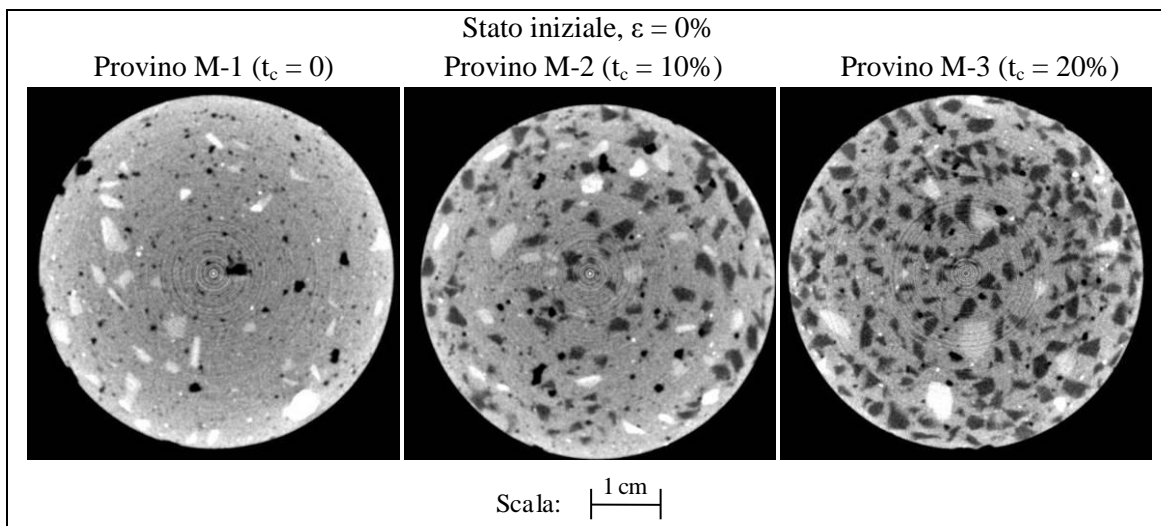


Figura 5.10 - Sezioni trasversali centrali dei provini testati.

Le immagini ricavate possono essere valutate quantitativamente mediante il “grey level” o livello di grigio, che è un numero proporzionale alla densità del materiale. Le regioni scure rappresentano zone a bassa densità, viceversa le regioni chiare rappresentano quelle ad alta densità. Pertanto le bolle d'aria e le fessure appaiono in nero, le tire chips in grigio scuro, la matrice terreno-cemento in grigio chiaro e parti di cemento puro ed elementi di ghiaia risultano essere bianchi. È stata individuata una relazione tra il livello di grigio medio iniziale ed il peso di volume dei provini analizzati

(Figura 5.11), utile per la valutazione della densità dei provini nelle diverse fasi della prova.

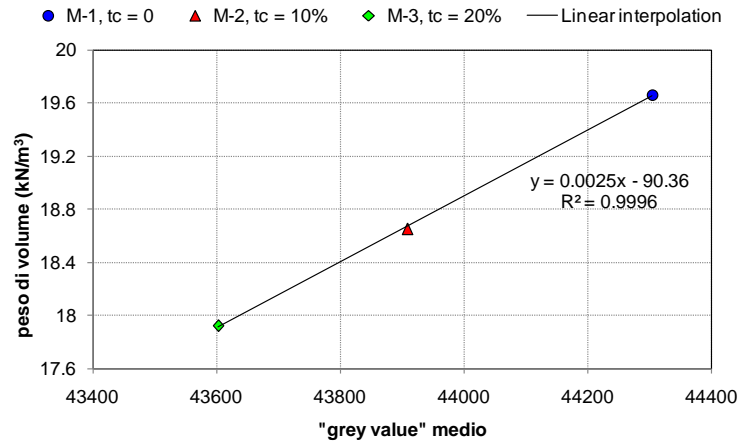


Figura 5.11 - Relazione di calibrazione livello di grigio e peso di volume.

In Figura 5.12 sono illustrati gli andamenti dei pesi di volume dei provini con l'altezza, riferiti allo stato iniziale e alle condizioni di picco.

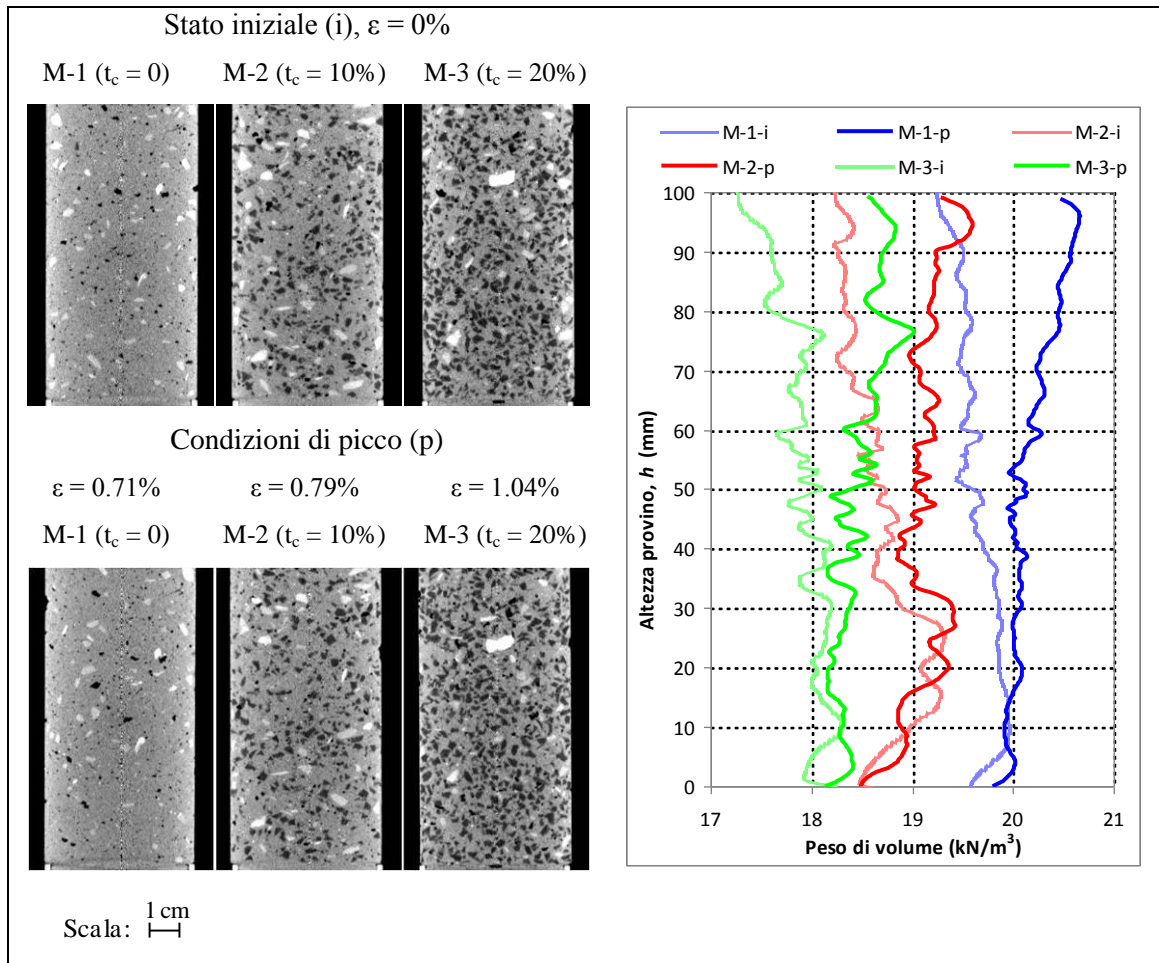


Figura 5.12 - Sezioni longitudinali e distribuzione del peso di volume dei provini testati.

I differenti provini presentano valori diversi di peso di volume ma variazioni con l'altezza comparabili, quindi le tire chips risultano essere omogeneamente disperse nei provini M-2 ed M-3.

Durante la prova di compressione la densità dei provini varia lungo l'altezza, in particolare si assiste ad un incremento di densità nella parte superiore dei provini, a diretto contatto con la parte in movimento della pressa.

5.2.2 Resistenza a compressione ad espansione laterale libera

Dalle prove di compressione ELL è stato possibile determinare la resistenza qu a 7 e 28 giorni di maturazione per i tre tipi di miscela studiati. Le curve sforzi deformazioni ottenute sono riportate in Figura 5.13, dalle quali si nota come le miscele testate siano caratterizzate da un comportamento incrudente negativo. Le prove di conducibilità idraulica e le tomografie ai raggi X (solo a 28 giorni) sono state condotte in corrispondenza dei punti segnati con il simbolo "•". Dalla forma delle curve relative ai provini sottoposti alle prove di permeabilità si nota un certo disturbo del provino, probabilmente dovuto all'esecuzione ripetuta di cicli di carico e scarico. Tuttavia gli andamenti ricavati risultano essere comparabili con quelli relativi ai provini sottoposti unicamente a prova di compressione ELL.

I risultati ottenuti indicano come la resistenza e la rigidezza dei provini testati si riducano con l'incremento di tire chips, che conferiscono una maggiore deformazione a rottura e quindi un comportamento duttile. Tale circostanza è risultata maggiormente evidente per i provini maturati a 28 giorni.

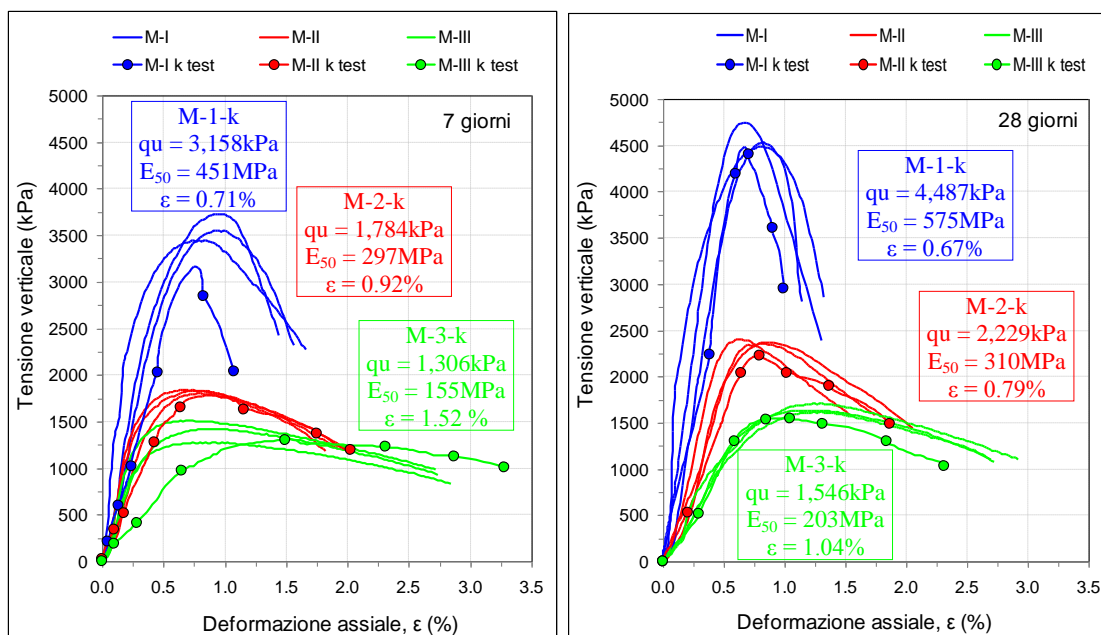


Figura 5.13 - Curve tensione deformazione per i provini testati, a 7 e 28 giorni di maturazione.

In Tabella 5.3 sono riassunti i risultati ottenuti (valori medi su tre provini) in base ai quali è possibile notare come per ciascuna miscela la resistenza e la rigidezza dei provini siano aumentate con il tempo di maturazione, mentre i valori di deformazione a rottura diminuiscano passando da 7 a 28 giorni.

Tabella 5.3 - Valori medi ottenuti per le tre miscele.

Codice miscela	resistenza q_u (kPa)	Modulo secante, E_{50} (Mpa)	Deformazione a rottura, ϵ_f (%)	Coefficiente permeabilità, k (m/s)	Rapporto q_{u28}/q_{u7}	Rapporto k_{28}/k_7
M-1,7gg	3573.7	654.4	0.88	2.46E-10	-	-
M-2,7gg	1824.2	334.8	0.81	4.14E-10	-	-
M-3,7gg	1403.8	319.7	1.02	2.72E-10	-	-
M-1,28gg	4,584.9	839.6	0.76	9.65E-11	1.28	0.39
M-2,28gg	2,373.5	394.9	0.78	1.41E-10	1.30	0.34
M-3,28gg	1,650.6	231.5	1.20	9.65E-11	1.18	0.35

L'analisi delle tomografie ai raggi X ha evidenziato come subito dopo le condizioni di picco iniziassero a formarsi piccole fessure nei provini, che poi iniziavano a propagarsi ed aumentare di dimensione con l'aumentare della deformazione. In Figura 5.14 e Figura 5.15 sono riportate le sezioni trasversali e longitudinali dei provini per i diversi valori di deformazione, dalla quale si nota l'influenza delle tire chips sul meccanismo di fessurazione dei provini. Per il provino M-1, privo di tire chips, è stato individuato un unico crack continuo per quasi tutta l'altezza di dimensioni via via maggiori con l'aumentare della deformazione, mentre i provini M-2 ed M-3 hanno presentato fessure di dimensioni minori che si sono sviluppate progressivamente in maniera diffusa ed omogenea per tutta la sezione del provino.

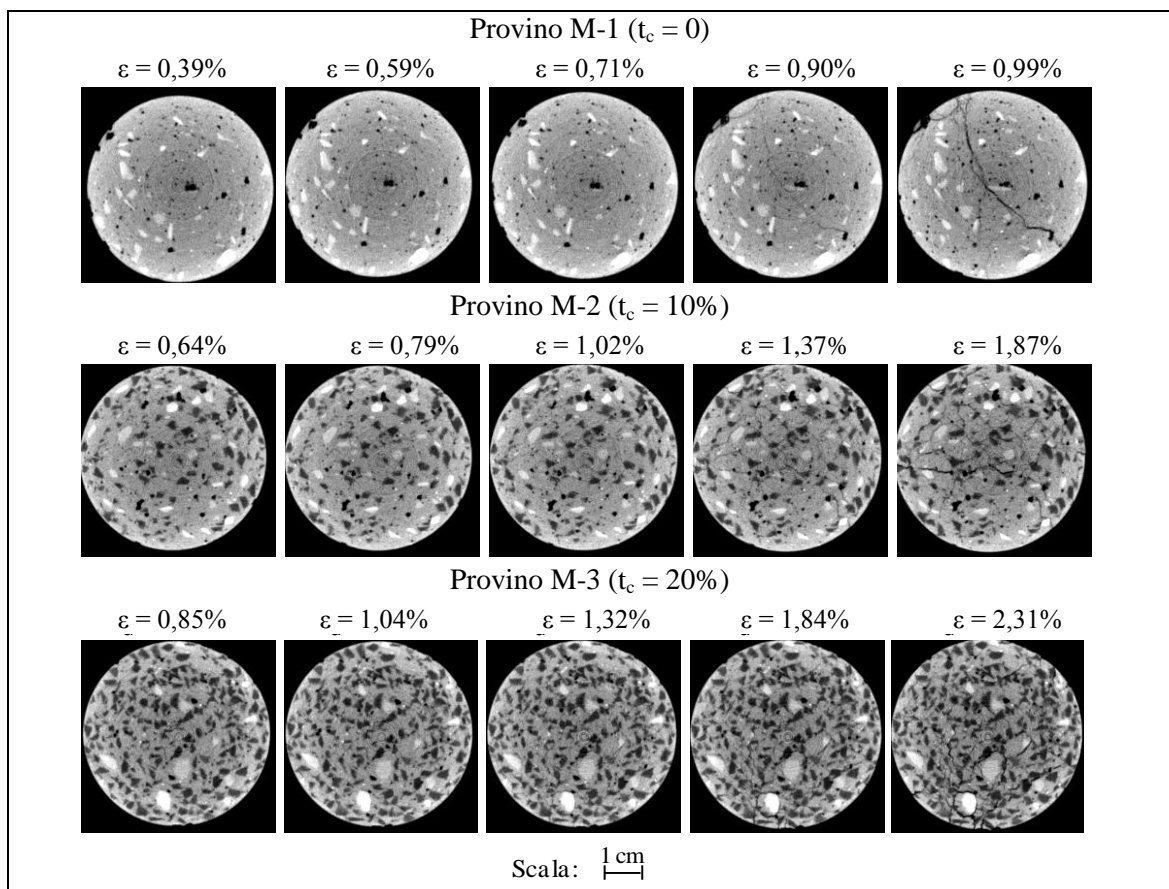


Figura 5.14 - Sezioni trasversali centrali dei provini al variare della deformazione.

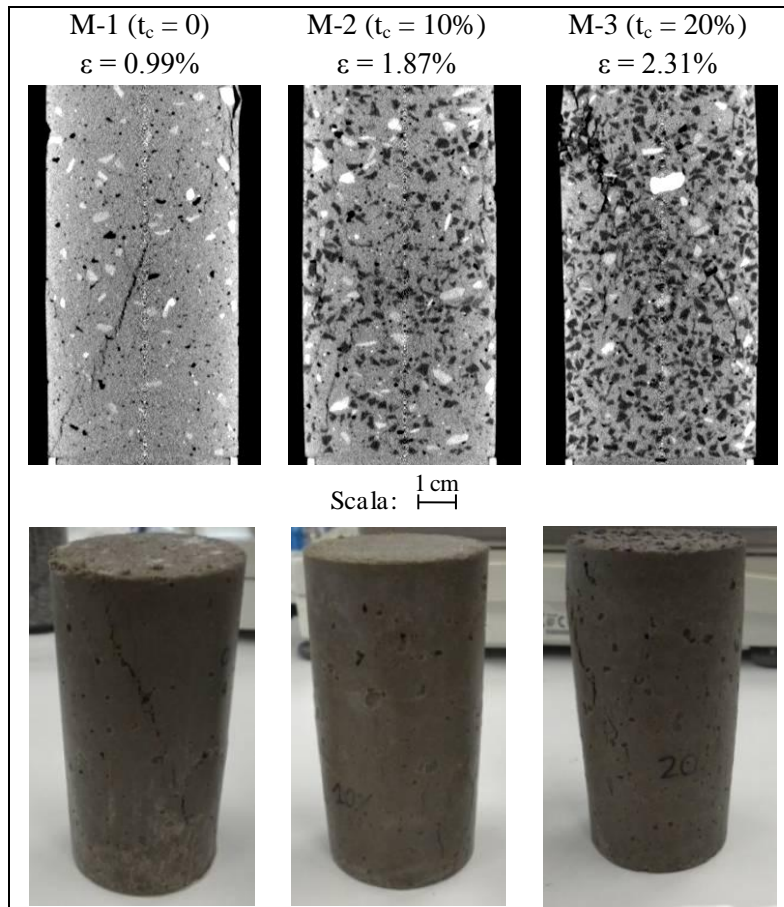


Figura 5.15 - Sezioni longitudinali centrali dei provini a fine prova.

5.2.3 Conducibilità idraulica

Sono stati ottenuti simili valori e andamenti del coefficiente di permeabilità k con il tempo di maturazione, indipendentemente dal contenuto di tire chips (Tabella 5.3). Sono stati riscontrati per le diverse miscele (a 7 e 28 giorni di maturazione) valori di conducibilità idraulica inferiori al limite imposto dalla normativa $k = 1 \times 10^{-9}$ m/s.

La Figura 5.16 riporta l'andamento del coefficiente di permeabilità con le deformazioni subite dai provini nel corso della prova di compressione. La conducibilità idraulica è aumentata con il processo di compressione, con andamenti diversi a seconda della quantità delle tire chips presenti. Gli incrementi maggiori sono stati generalmente riscontrati in corrispondenza delle condizioni di picco, con l'iniziare della propagazione delle fessure nel generico provino. Nei provini con aggiunta di tire chips (M-2 ed M-3) è stata osservata un minore aumento della permeabilità a parità di step deformativo rispetto a quelli della miscela M-1. Per la miscela M-3 sono state in particolare ottenuti valori di permeabilità, che a 28 giorni rimangono inferiori a $k = 1 \times 10^{-9}$ m/s, anche in corrispondenza di deformazioni pari all'1%. La formazione del crack continuo individuato nel provino M-1 (a 28 giorni) è verosimilmente responsabile del maggiore incremento di conducibilità idraulica, mentre i provini M-2 ad M-3, per i quali è stato osservato lo sviluppo progressivo di piccole fessure diffuse di dimensioni inferiori hanno riportato valori inferiori di permeabilità a parità di deformazione.

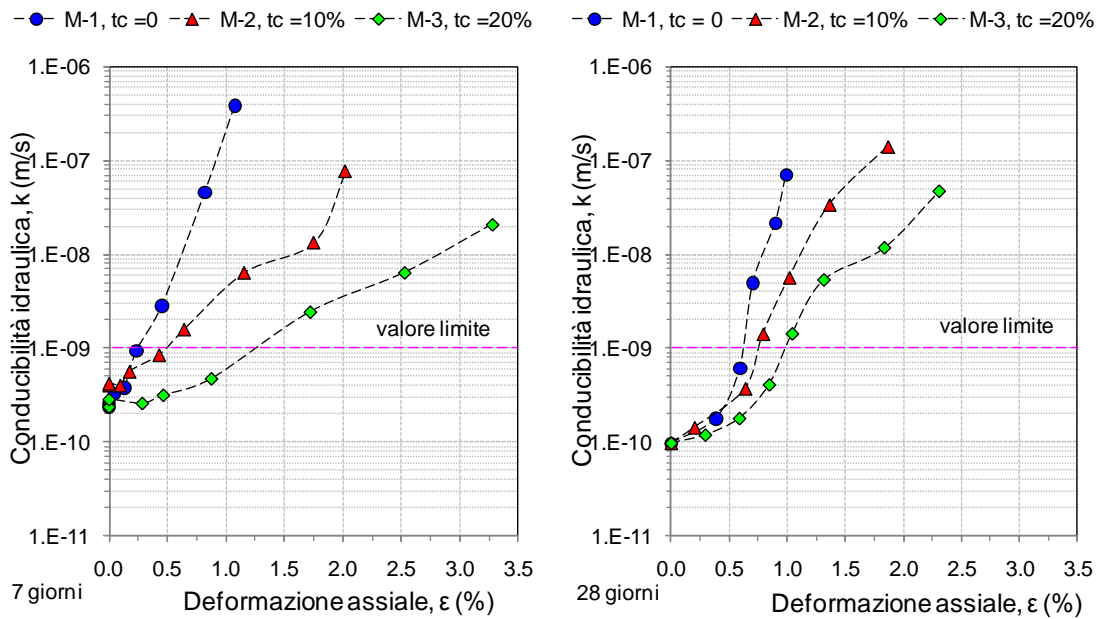


Figura 5.16 - Relazione tra conducibilità idraulica iniziale e la deformazione assiale per le diverse miscele analizzate.

In Figura 5.17 sono riportati gli andamenti ottenuti della conducibilità idraulica con il volume delle fessure sviluppatesi nei provini in fase di compressione. Si nota come i valori del coefficiente di permeabilità aumentino in maniera sensibile nella fase iniziale, in corrispondenza dello sviluppo delle prime fessure. A parità di volume delle fessure, i valori maggiori di permeabilità sono stati riscontrati per il provino M-1, in assenza di tire chips, per le considerazioni riportate in precedenza.

Dal confronto dei tre andamenti ricavati per i provini senza e con tire chips, si intuisce come la forma delle fessure abbia maggiore influenza sulla conducibilità idraulica piuttosto che il volume complessivo delle stesse.

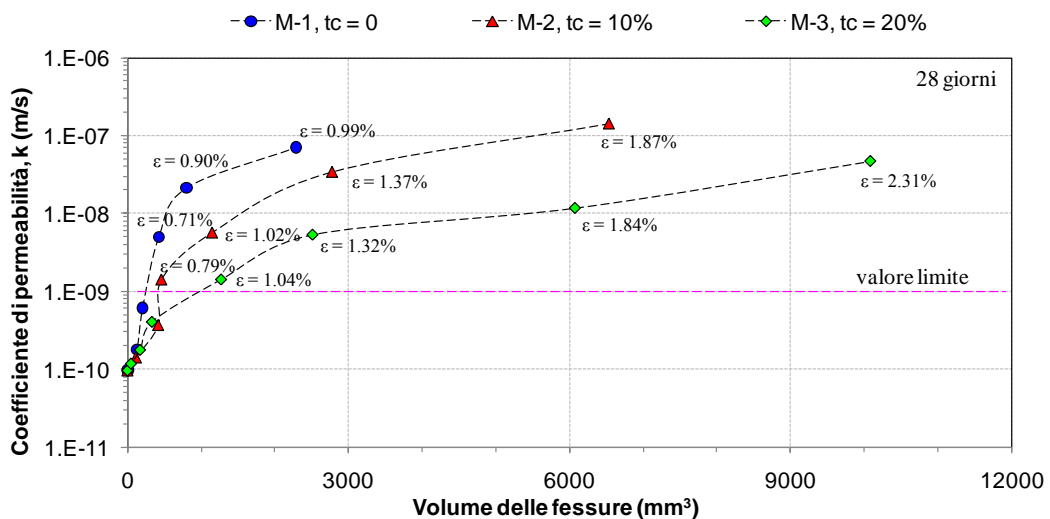


Figura 5.17 - Andamenti della conducibilità idraulica con il volume delle fessure.

5.3 Lavorabilità miscela terreno-legante ed applicabilità tecniche di confezionamento - Sapienza Università di Roma

I risultati presentati in questa sezione si riferiscono alle 21 miscele realizzate a partire dai sette terreni reali dell'area romana. Nella rappresentazione dei risultati compare il parametro di lavorabilità M_t (momento torcente) valutato per ciascuna miscela e indice della lavorabilità della stessa (§3.3.2). È stato inoltre possibile valutare la lavorabilità delle miscele realizzate a partire dal terreno *KC* (Kawasaki clay), il che ha permesso un diretto confronto con i dati ricavati nelle due fasi sperimentali condotte presso il PARI e il DICEA, necessario per generalizzare i risultati ottenuti.

Nel presente paragrafo sono descritti in maniera sintetica ma esaustiva i risultati ottenuti, rimandando all'appendice (§ B.2) la presentazione di tutti i dati ricavati dallo studio sperimentale.

I valori di resistenza qu sono compresi in un ampio range variabile tra 61kPa e 3.457kPa, con i valori minori associati alle miscele realizzate a partire dal terreno *AP* (Argilla Pliocenica, valori compresi tra 61 ÷ 251kPa). Per quanto riguarda il peso di volume, i valori ottenuti sono compresi nel range 13,60 ÷ 21,20 kN/m^3 , variabili in funzione del tipo di terreno di partenza.

A titolo di esempio sono riportati in Figura 5.18 i valori ottenuti in termini di resistenza a compressione qu e peso di volume a 7 e 28 giorni per le tre miscele relative al terreno *RL* (Riporto Limoso). I risultati si riferiscono alle tre tecniche di confezionamento impiegate, *N.C.*, *TA*, ed *RO*. Per tutte le miscele testate si nota come ci siano delle sensibili differenze nei valori associati alle diverse tecniche impiegate in maniera più o meno evidente in funzione della lavorabilità della miscela (Figura B.3 - Figura B.9), in particolare per alti valori del parametro M_t . I valori inferiori sono generalmente associati alla tecnica *N.C.*. Passando da 7 a 28 giorni si assiste ad un aumento dei valori di resistenza a compressione e ad una mantenimento dei valori di peso di volume, ad eccezione di alcuni casi in cui un valore minore di γ a 28 giorni di maturazione può essere associato ad un lieve essiccamento dei provini.

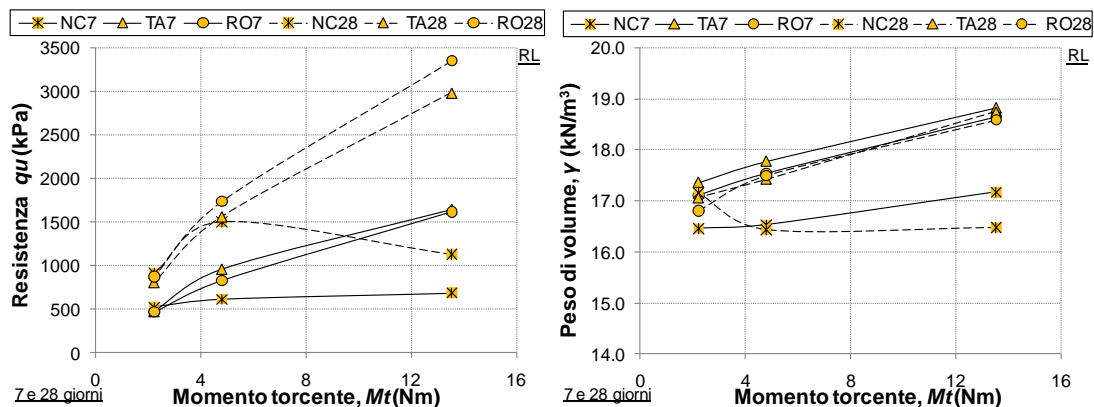


Figura 5.18 - Resistenza qu per le diverse tecniche di confezionamento in funzione della lavorabilità della miscela (terreno RL, riporto limoso).

Nelle Tabella 5.4 e Tabella 5.5 sono riportati i provini realizzati per due delle miscele relative ai terreni *SG* (Sabbia e Ghiaia) ed *AP* dal cui confronto visivo è possibile effettuare alcune considerazioni.

Tabella 5.4 - Confronto visivo provini stabilizzati (terreno di partenza SG).













Terreno Sabbia e Ghiaia, SG - malta cementizia: $a_c = 10\%$, $w/c = 1$		
Tecnica	w_n terreno = 10%	w_n terreno = 6%
Nessuna Compattazione, N.C.		
Tapping, TA.		
Rodding, RO.		

Tabella 5.5 - Confronto visivo provini stabilizzati (terreno di partenza AP).

Terreno Argilla pliocenica, AP - malta cementizia: $a_c = 10\%$, $w/c = 1$		
Tecnica	w_n terreno = 70%	w_n terreno = 50%
Nessuna Compattazione, N.C.		
Tapping, TA.		
Rodding, RO.		

Nel caso delle miscele più lavorabili (maggiore contenuto d'acqua) le 3 tecniche producono provini simili, diversamente per le miscele meno lavorabili appaiono evidenti delle differenze nella qualità dei provini in termini di maggiore presenza di vuoti o imperfezioni, in particolare per i provini relativi alla tecnica *N.C.*; per tale tecnica infatti sono state evidenziate difficoltà nella realizzazione dei provini, in quanto la bassa lavorabilità della miscela non ha permesso una disposizione omogenea del materiale all'interno dello stampo. Relativamente all'impiego delle tecniche *TA.* ed *RO.* non sono stati riscontrati dei problemi in fase di confezionamento dei provini, fatto che ha poi influito positivamente sui risultati come descritto nel prosieguo.

In Tabella 5.4 sono presentati i rapporti di resistenza qu_7/qu_{28} , relazioni originali non presenti in letteratura riferite a terreni reali ed eterogenei. I valori riportati per le diverse miscele presentano evidenti variazioni dovute sia alle differenze nei terreni di partenza sia alle diverse tecniche impiegate; è stato ottenuto un valore medio globale pari a $qu_7/qu_{28} = 0,63$, con variazioni comprese nel range $0,42 \div 0,92$.

Tabella 5.6 - Rapporti di resistenza qu_7/qu_{28} per le miscele testate.

Tipo terreno	Contenuto acqua, w_n (%)	Parametri malta cementizia	Lavorabilità, M_t (Nm)	Rapporti qu_7/qu_{28}			
				N.C.	TA.	RO.	Media
RL	20		13,55	0,57	0,59	0,54	0,57
	30		4,81	0,41	0,61	0,48	0,50
	40		2,23	0,61	0,55	0,48	0,55
SL	35	$a_c = 10\%$	9,08	0,92	0,49	0,61	0,67
	40		4,88	0,77	0,57	0,59	0,64
	45		3,76	0,93	0,60	0,51	0,68
SG	6	$w/c = 1$	11,28	0,57	0,55	0,51	0,54
	8		5,11	1,00	0,80	0,68	0,83
	10		3,51	0,97	0,96	0,83	0,92
AP	50		10,16	0,43	0,41	0,41	0,42
	60		5,76	0,58	0,55	0,63	0,59
	70		2,34	0,87	0,78	0,61	0,75
PN	25		6,97	0,47	0,63	0,35	0,48
	30		2,37	0,48	0,33	0,47	0,43
	35		0,21	0,59	0,63	0,60	0,61
PR	20	$a_c = 10\%$	8,34	0,73	0,86	0,52	0,70
	26		1,60	0,51	0,64	0,59	0,58
	32	$w/c = 0,5$	1,08	0,60	0,74	0,72	0,69
TF	44		8,22	0,75	0,73	0,69	0,72
	48		0,60	0,74	0,78	0,69	0,74
	53		0,20	0,43	0,82	0,74	0,66
			Media tecnica	0,66	0,65	0,58	0,63

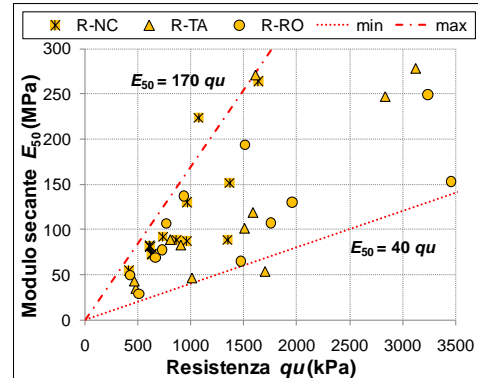
Le relazioni generali ottenute tra modulo secante E_{50} e resistenza a compressione qu , riportate in Tabella 5.7, risultano essere consistenti con i valori riportati in letteratura (§ 1.7.4). Tali relazioni sono presentate per esteso e suddivise in funzione del tipo di tecnica di confezionamento impiegata in Appendice B.

Come già osservato per le miscele realizzate a partire dal terreno *KC* (§ 5.1), è stata osservata una relazione tra la lavorabilità della miscela terreno-cemento e le proprietà meccaniche dei provini ottenuti mediante le diverse tecniche. I risultati

presentati nel seguito riprendono le definizioni dei parametri precedentemente descritte nelle eq. 5.1÷5.6, impiegate poi per ottenere l'indice di applicabilità (eq. 5.7).

Tabella 5.7 - Rapporti E_{50}/qu per le miscele testate; esempio terreno RL.

Tipo terreno	Contenuto acqua, w_n (%)	Parametri malta cementizia	Rapporti E_{50}/qu	
			min	max
RL	20 - 40		40	170
SL	35 - 45	$a_c = 10\%$	40	130
SG	6 - 10	$w/c = 1$	50	170
AP	50 - 60		50	180
PN	25 - 35	$a_c = 10\%$	40	150
PR	20 - 32		30	160
TF	44 - 53	$w/c = 0,5$	30	110



5.3.1 Parametri normalizzati ed errori relativi

Al fine di ottenere indicazioni riguardo l'applicabilità delle diverse tecniche di confezionamento, sono stati impiegati i medesimi parametri definiti alle eq. 5.1 e 5.2., resistenza a compressione qu e peso di volume normalizzati ed eq. 5.4 e 5.5, errori relativi sulla resistenza a compressione qu e peso di volume, che possono poi essere associati nei parametri "N" ed "E" ed infine nell'indice di Applicabilità (eq. 5.7). Nelle figure riportate compaiono anche gli andamenti relativi alle miscele realizzate a partire dalla Kawasaki clay, a titolo di confronto.

Sono illustrati in Figura 5.19 i valori di resistenza qu e peso di volume normalizzati in funzione della lavorabilità della miscela suddivisi per le tre tecniche di confezionamento impiegate e riferiti a 28 giorni di maturazione. Le tecniche TA. ed RO. forniscono i valori maggiori nel range di lavorabilità indagato, e risultati comparabili sono anche visibili per la tecnica N.C. per valori di M_t inferiori a 3. Si nota anche una minore influenza delle tecniche di confezionamento sui valori di peso di volume rispetto a quelli di resistenza, visto che tutti i valori ad eccezione di quelli relativi alla tecnica N.C. sono vicino all'unità.

Sono presentati in Figura 5.20 gli andamenti degli errori relativi sulla resistenza a compressione qu e peso di volume in funzione della lavorabilità della miscela per le tre tecniche di confezionamento impiegate, riferiti a 28 giorni di maturazione. La scala dell'asse delle ordinate presenta valori compresi tra 0 e 0,20 per meglio visualizzare i risultati ottenuti. Per le tecniche TA. ed RO. si riscontrano generalmente valori di $E_{qu} = 0,05$ ed $E_\gamma = 0,01$, mentre valori pari a circa il doppio sono associati alla tecnica N.C..

Si nota come, a parità di tecnica, le miscele testate siano caratterizzate da un minore errore sui risultati rispetto a quelli ottenuti per le miscele testate presso il PARI e ciò è probabilmente dovuto alla loro maggiore lavorabilità.

Gli andamenti dei parametri N ed E valutati per il calcolo dell'indice di applicabilità sono illustrati in Figura B.11.

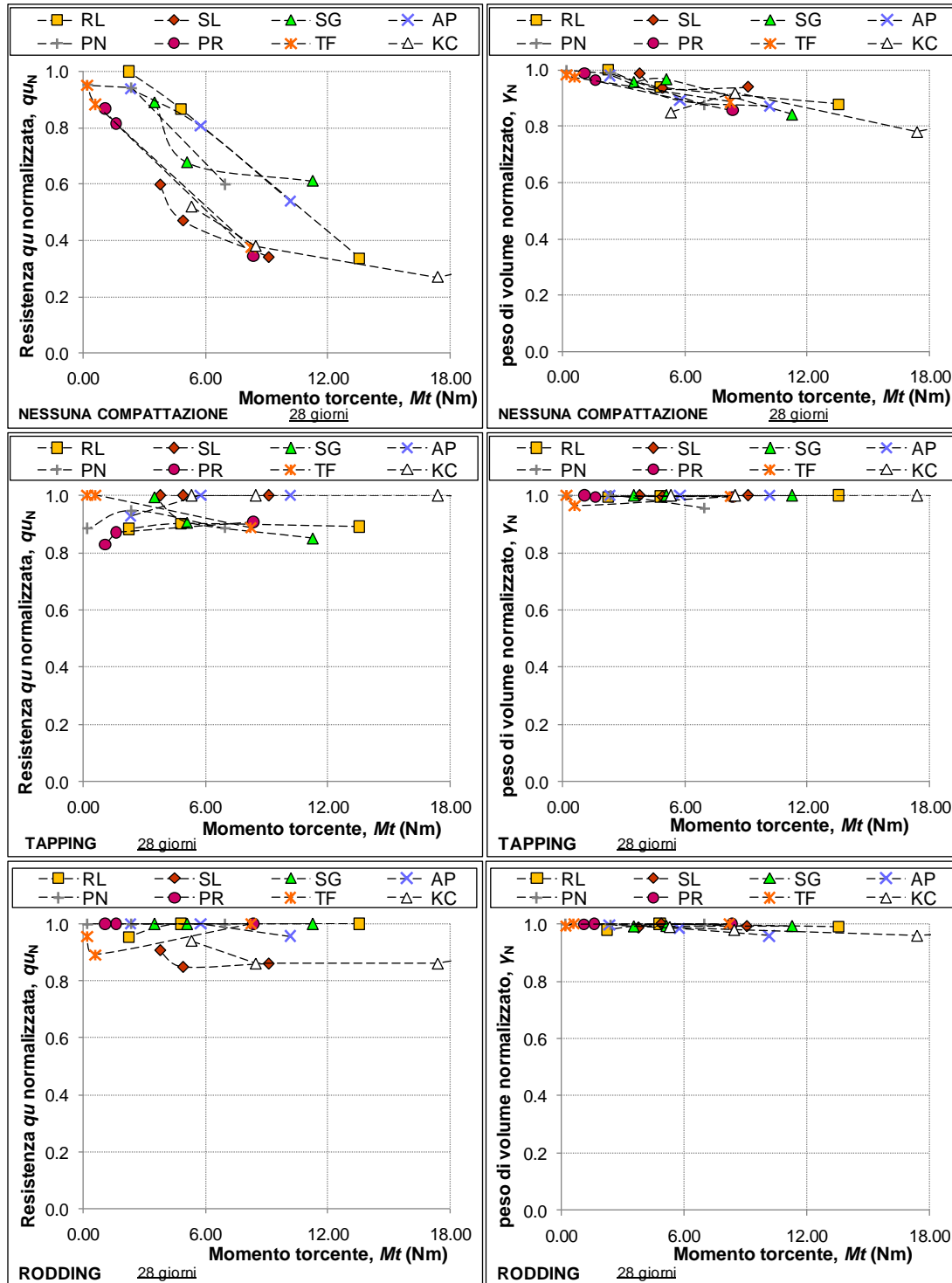


Figura 5.19 - Parametri normalizzati per le tre tecniche di compattazione impiegate.

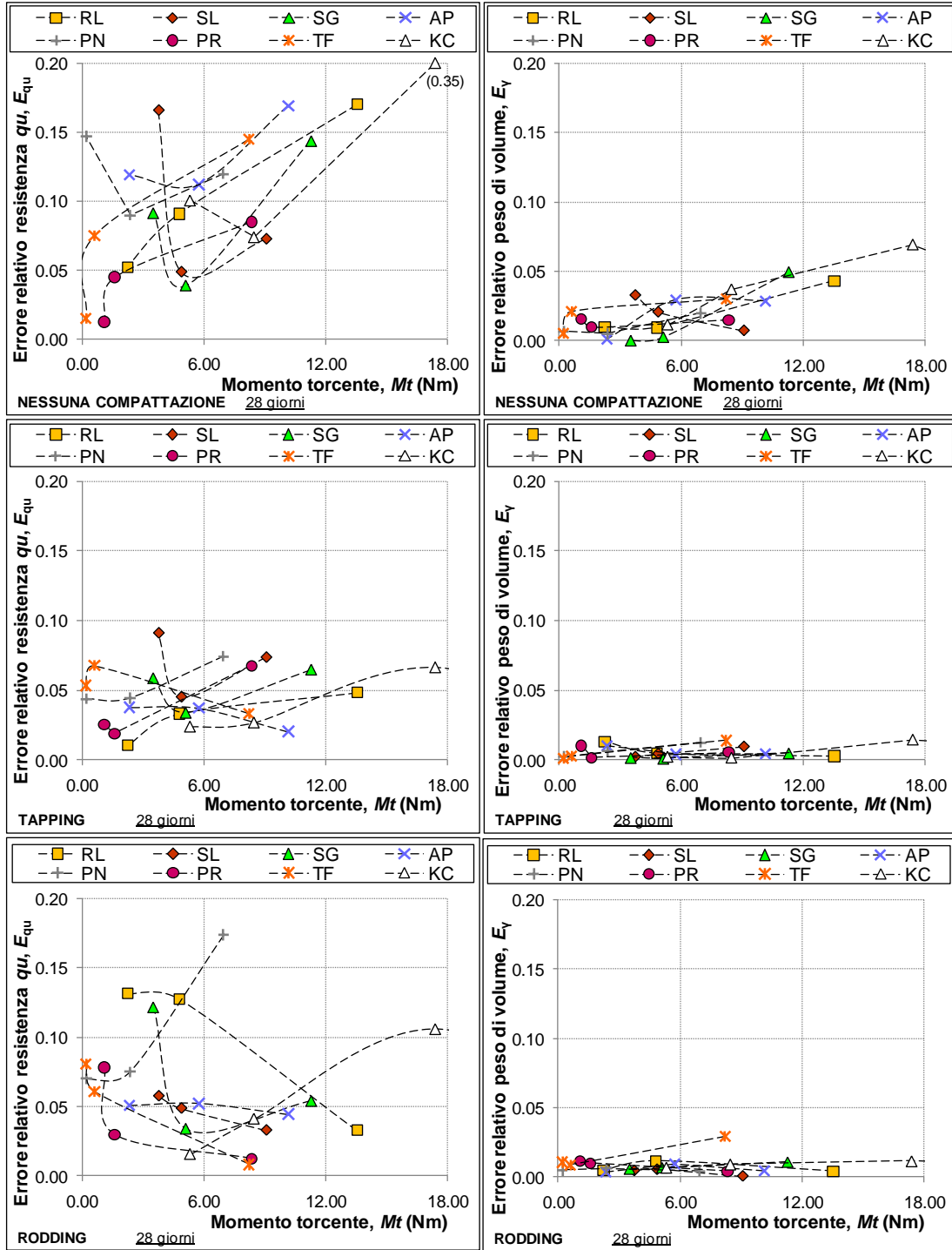


Figura 5.20 - Errori relativi sulla resistenza q_u e peso di volume in funzione della lavorabilità delle miscele testate per le tre tecniche di compattazione impiegate.

5.3.2 Indice di Applicabilità

Adottando l'eq. 5.7, sono stati ricavati gli andamenti dell'indice di applicabilità con la lavorabilità delle miscele per le diverse tecniche di confezionamento impiegate, come raffigurato in Figura 5.21.

Impiegando la procedura descritta al § 4.4.4 è stato inoltre possibile valutare anche la lavorabilità delle miscele $m1\div m6$ realizzate a partire dal terreno *KC* (Kawasaki clay) inviato direttamente dal PARI al laboratorio di Roma (la lavorabilità delle miscele $m7\div m9$ non è determinabile per i limiti tecnici della strumentazione impiegata presso il DICEA), e pertanto graficare l'andamento dell'indice di applicabilità con la lavorabilità (Figura 5.21) anche per i dati ottenuti nella prima fase di studio. Dall'andamento dei dati sperimentali ottenuti, è stato comunque possibile associare alle miscele $m7\div m9$ un intervallo del parametro di lavorabilità M_t pari a $75\div 120$ Nm.

Relativamente alle miscele analizzate si nota come le tecniche *TA*, ed *RO*, presentino i valori massimi di applicabilità, sempre al di sopra del limite di accettabilità e con valori congruenti rispetto a quelli ricavati precedentemente relativi a miscele di terreno *KC*. I valori ottenuti appaiono indipendenti dalla tipologia di terreno di partenza, ma solo dalla lavorabilità della miscela (rappresentata dal parametro momento torcente, M_t). La tecnica *N.C.* risulta essere applicabile per valori di $M_t < 3$ Nm, e non applicabile per valori di $M_t > 6$ Nm. Nel range $M_t = 3\div 6$ Nm, non essendo possibile ricavare indicazioni univoche dai dati, tale tecnica può essere considerata parzialmente applicabile.

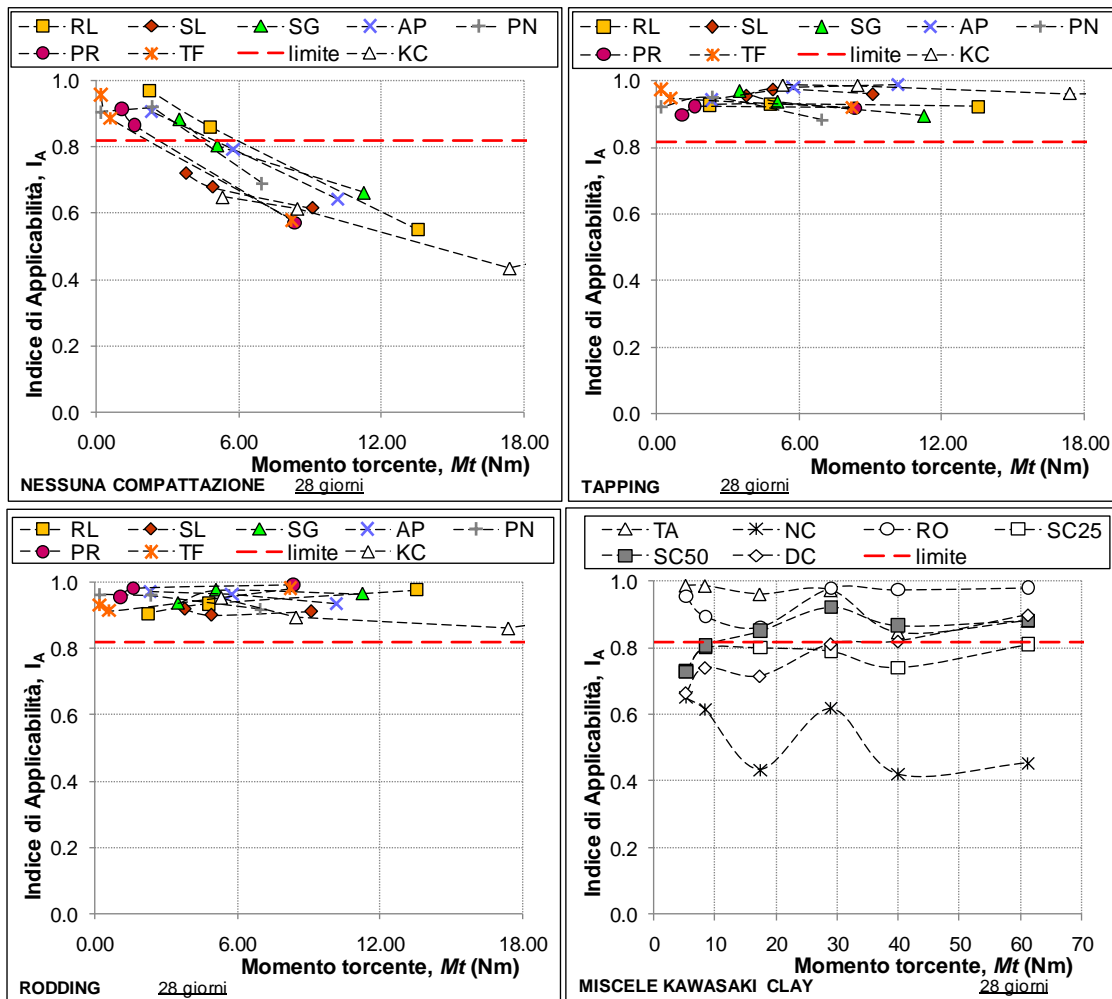


Figura 5.21 - Indice di Applicabilità - miscele testate presso il DICEA.

5.3.3 Range di applicabilità delle tecniche di confezionamento (PARI+DICEA)

In questo paragrafo finale di sintesi sono riportati i risultati ricavati dalla sovrapposizione ed integrazione dei dati complessivamente ottenuti nelle diverse fasi dello studio sperimentale condotto presso il PARI (Soil Stabilisation Group) e presso il DICEA che hanno portato alla determinazione dei range di applicabilità di ciascuna tecnica di confezionamento in funzione della lavorabilità della miscela espressa dal parametro M_t (Momento torcente). I range di applicabilità sono illustrati in Figura 5.22.

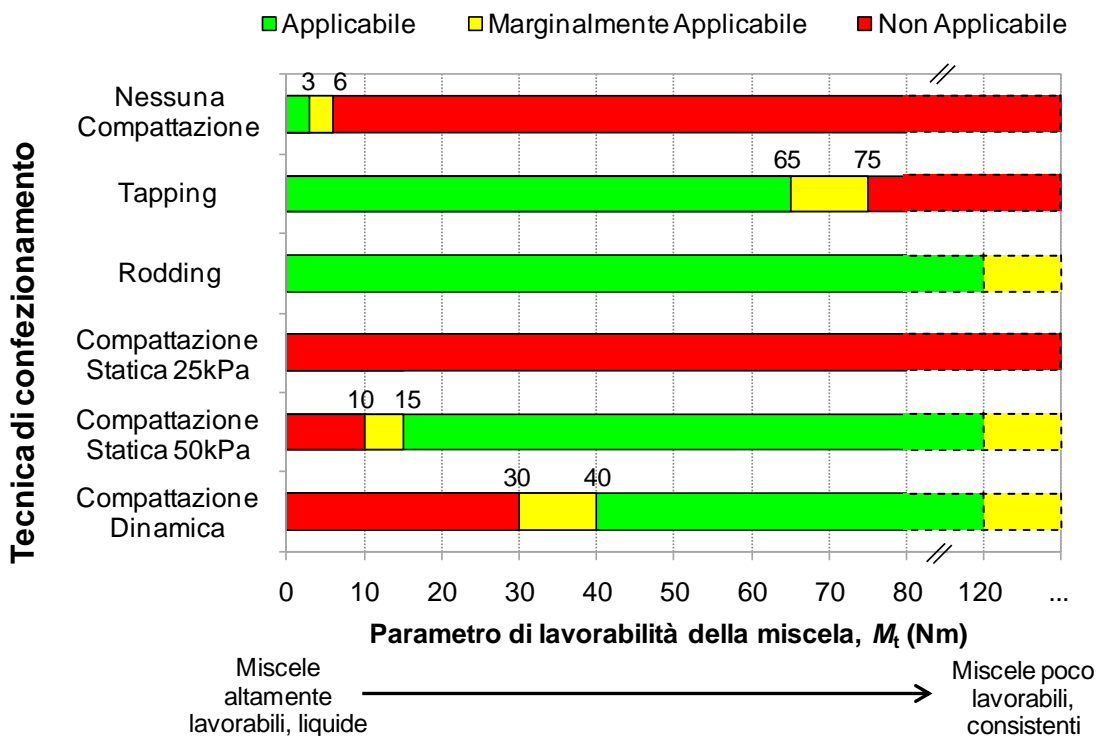


Figura 5.22 - Indice di applicabilità in funzione della lavorabilità per le diverse tecniche di confezionamento.

L'applicazione della tecnica *N.C.* ha evidenziato le maggiori problematiche nella realizzazione dei provini, che non hanno permesso una disposizione omogenea del materiale all'interno dello stampo con conseguente presenza di bolle d'aria o macrovuoti ad eccezione delle miscele più lavorabili. La tecnica *N.C.* è risultata quindi essere applicabile per valori di $M_t < 3\text{Nm}$, e non applicabile per valori di $M_t > 6\text{Nm}$. Nel range $M_t = 3\div 6\text{Nm}$, non essendo possibile ricavare indicazioni univoche dai dati, tale tecnica può essere considerata marginalmente applicabile.

La tecnica *TA.* è risultata quasi sempre applicabile, in particolare per le miscele altamente lavorabili, rilevando alcuni problemi in presenza di miscele maggiormente consistenti, per le quali le condizioni di prova non garantivano una buona omogeneizzazione dei provini. I dati raccolti suggeriscono come tale tecnica diventi marginalmente applicabile nel range $M_t = 65\div 75\text{Nm}$ (intervallo di passaggio da applicabile a non applicabile), per diventare poi non applicabile per $M_t > 75\text{Nm}$.

L'impiego della tecnica *RO.* ha portato in alcune condizioni di lavorabilità al sollevamento del materiale all'interno dello stampo in fase di estrazione dell'asta al

termine della compattazione, ma nonostante ciò ha fornito generalmente i migliori risultati, risultando sempre applicabile nel range $M_t = 0\div 120\text{Nm}$.

Relativamente all'impiego delle tecniche *S.C* e *D.C.* in presenza di miscele più lavorabili (poco consistenti) sono stati riscontrati un intrappolamento del dispositivo usato per la compattazione, una fuoriuscita della miscela dallo stampo e presenza di vuoti intorno al provino, che hanno portato a un ridotto valore di resistenza e peso di volume ed una maggiore variabilità nei risultati con conseguente non applicabilità per valori di $M_t < 10\div 30\text{Nm}$. Le medesime tecniche hanno invece dato risultati maggiormente soddisfacenti in presenza di miscele maggiormente consistenti. I dati ottenuti suggeriscono come l'adozione di una maggiore energia di compattazione, quando utilizzabile, dia effetti positivi, così come indicato dal confronto tra i valori ottenuti per le tecniche *S.C.25* e *S.C.50.*: la prima tecnica risulta sempre non applicabile, mentre *S.C.50* risulta applicabile in un ampio range $M_t = 15\div 120\text{Nm}$. La tecnica *D.C.* risulta invece applicabile per valori di $M_t > 40\text{Nm}$.

La tecnica *RO.* ha mostrato i più ampi range di applicabilità in quanto risulta essere sia lavorabilità sia operatore dipendente: quando tale tecnica viene impiegata per le miscele molto lavorabili (a comportamento liquido) permette di applicare una energia bassa ma sufficiente alla compattazione (assenza dei problemi riscontrati per tecniche *S.C* e *D.C.*), mentre man mano che la lavorabilità diminuisce l'energia fornita aumenta proporzionalmente, perché il materiale è in grado di assorbirne una maggiore aliquota. Tali considerazioni valgono in parte anche per la tecnica *TA.*, ma il limite di applicabilità è risultato essere più basso perché legato al mantenimento dell'integrità degli stampi impiegati per applicazione di sollecitazioni eccessive. Le altre tecniche risultano essere operatore-dipendenti ma non lavorabilità-dipendenti, perché forniscono sempre la stessa energia allo strato di miscela da compattare. Quindi la tecnica *RO.* risulta maggiormente applicabile perché permette di adattare l'energia di confezionamento alla lavorabilità della miscela.

Non avendo dati sperimentali per valori di $M_t > 120\text{Nm}$, le tre tecniche *RO.*, *S.C.50.* e *D.C.* sono state considerate marginalmente applicabili oltre tale limite.

È stata infine determinata una curva di calibrazione, presentata nel paragrafo seguente, per rendere fruibili da altri laboratori i risultati complessivamente ottenuti.

5.3.4 Curva di calibrazione per l'estensione dei risultati

Al fine di permettere l'estensione dei risultati conseguiti in termini di range di applicabilità delle tecniche di confezionamento verso altri laboratori di Deep Mixing, è stata elaborata una *curva di calibrazione* (Figura 5.26) misurando l'andamento del parametro di lavorabilità M_t con il contenuto d'acqua w_h di un terreno facilmente disponibile come il Caolino, usando parametri fissati: $V_{m0} = 3\text{dm}^3$; S_{h0} = forma di "K" Kenwood; $R_{s0} = 10\text{rpm}$.

Le caratteristiche del Caolino impiegato (Figura 5.23, fornito dalla Bal-Co S.p.A. di Sassuolo, che si ringrazia) sono riportate in Figura 5.24. Presso il laboratorio del DICEA sono inoltre stati determinati i limiti di Atterberg liquido e plastico, pari rispettivamente a: $w_L = 40.7\%$ e $w_P = 30.9\%$.



Figura 5.23 - Caolino impiegato nello studio sperimentale.

analisi chimica										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O			P.F.
media	48,5	35,5	1,00	0,80	0,40	0,20	1,50			12,00
min	47,0	34,0	0,90	0,70			1,00			11,00
max	50,0	37,0	1,10	0,90	0,50	0,30	2,00			13,00

analisi mineralogica	
	media
Caolinite	87
Quarzo	3
Muscovite	4,5
Feldspato	4
Altri	1,5

ALTRE CARATTERISTICHE		
	medio	
Residuo a 45 µm	0,7	%

Figura 5.24 - Caratteristiche tecniche del Caolino CAM40 macinato extra white (Bal-Co S.p.a.).

Per la determinazione dei punti sperimentali della curva, si è partiti dal materiale secco ($w_n = 0\%$) provvedendo poi ad aggiungere opportune quantità di acqua (fino ad avere $w_n = 90\%$) e seguendo la procedura descritta al § 4.4.1 ÷ 4.4.6, senza ovviamente aggiungere legante o confezionare dei provini, ma prevedendo solo la valutazione della lavorabilità della miscela terreno-acqua. Le immagini relative alle diverse miscele di Caolino testate sono riportate Tabella 5.8.

La misura del momento torcente relativo alla generica miscela è stata sempre affiancata da una misura eseguita mediante Laboratory vane test, al fine di garantire un utile confronto con un metodo standardizzato (ASTM D4648-00, vedi §2.7.1) e di comprovata validità e capace di fornire indicazioni sulla lavorabilità di una miscela.

Bisogna comunque considerare come il Laboratory vane test sia fortemente influenzato dalle caratteristiche della miscela di Caolino: come si può osservare nelle immagini riportate in Tabella 5.8, le miscele aventi un w_n compreso tra 0÷50% risultano caratterizzate da uno stato semi-solido o plastico, non siano omogenee, siano caratterizzate dalla presenza di agglomerati di forma sferica ($w_n = 10\div20\%$) o di forma irregolare ($w_n = 30\div45\%$), alternati a vuoti di piccole-medie dimensioni. Pertanto la prova fornirà risultati molto variabili a seconda se le alette del Laboratory vane si infiggano all'interno di un massa di materiale oppure coinvolgano un vuoto di dimensioni non trascurabili.

Tabella 5.8 - Caolino con contenuti d'acqua w_n compresi nel range 0-90%.

	$w_n=0\%$	
		
$w_n=10\%$	$w_n=20\%$	$w_n=30\%$ ($\approx w_p$)
		
$w_n=35\%$	$w_n=40\%$ ($\approx w_L$)	$w_n=45\%$
		
$w_n=50\%$	$w_n=55\%$	$w_n=60\%$
		
$w_n=65\%$	$w_n=70\%$	$w_n=75\%$
		
$w_n=80\%$	$w_n=85\%$	$w_n=90\%$
		

Gli errori relativi sulle misure di Laboratory vane ottenute per $w_n < 50\%$, sono mediamente pari al 29%, con punte del 44%, mentre quelli relativi alle miscele aventi $w_n > 50\%$ risultano essere tutti inferiori al 10% e quindi indice di una ottima affidabilità del metodo di misura per le miscele più liquide (si ricorda che la procedura prevedeva da tre a cinque misure mediante Laboratory vane test per miscela).

Nel range in cui il Laboratory vane risulta essere applicabile (contenuto d'acqua pari o superiore al 50%) è possibile quindi confrontare le misure di Momento torcente M_t eseguite per le medesime miscele (Figura 5.25). Come si può vedere dalla figura, la correlazione lineare tra i due metodi è caratterizzata da un valore di R^2 pari a 0,97, indice di una ottima connessione tra i dati.

Essendo quella del Laboratory vane Test una metodologia riconosciuta dalla comunità scientifica internazionale, regolamentata dall'ASTM D4648-00, la forte correlazione riscontrata con il nuovo metodo proposto in questo studio risulta importante ai fini del riconoscimento dell'efficacia del metodo stesso, che può inoltre essere impiegato anche nei casi in cui il Laboratory vane non risulti affidabile, per i vantaggi (elencati in § 4.4.4) relativi alla misura in continuo sulla miscela (media su più giri) e associati alla massima rappresentatività del campione.

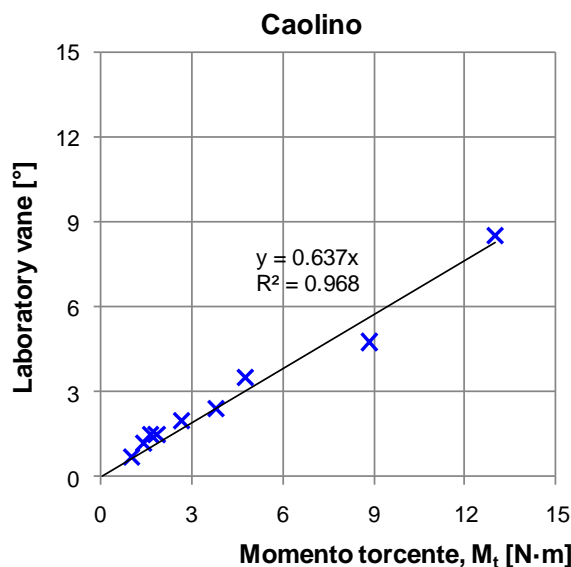


Figura 5.25 - Relazione Momento torcente-lettura laboratory vane per $w_n > 50\%$.

A valle delle considerazioni espresse nel presente paragrafo si riporta in Figura 5.26 la curva di calibrazione del nuovo metodo proposto per la misura della lavorabilità. I dati sperimentali ottenuti nel range di contenuto d'acqua 0-90% si dispongono lungo una campana, con valore massimo tra limite plastico e limite liquido.

Si è deciso di considerare come curva di calibrazione il solo ramo discendente della campana, per la difficoltà pratica di ottenere miscele sufficientemente omogenee in corrispondenza di valori di contenuto d'acqua inferiori al limite liquido. Al ramo discendente della curva vengono affiancati i dati ricavati mediante Laboratory vane test nel campo di applicabilità di tale misura.

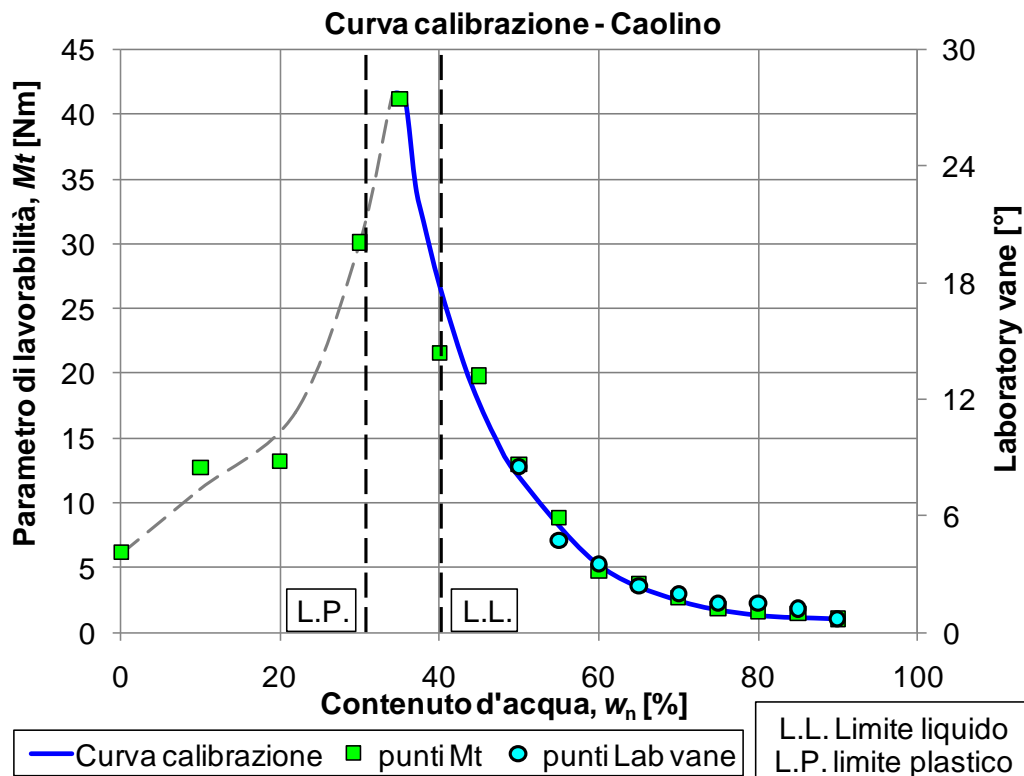


Figura 5.26 - Curva di calibrazione del metodo, riferita al materiale Caolino, fissando i parametri del miscelatore: $V_{m0} = 3\text{dm}^3$; S_{h0} = forma di “K” Kenwood; $R_{s0} = 10\text{rpm}$.

La curva riportata è suscettibile di affinamento al fine di aumentarne l’affidabilità nei punti sperimentali non indagati e per diversi Volumi di partenza V_{m0} .

La curva di calibrazione ottenuta può essere sfruttata per estendere i risultati ottenuti nel presente studio verso altri laboratori impieganti propri dispositivi di miscelazione caratterizzati da differenti set di parametri: volume di miscela (V_m), forma della lama miscelatrice (S_h) e velocità di rotazione (R_s).

Per esempio, in seguito alla determinazione da parte di un qualunque Laboratorio “X” della propria curva del Caolino, da riportare sullo stesso grafico di Figura 5.26, è possibile ricavare i nuovi valori dei range di applicabilità delle tecniche di confezionamento riportati in § 5.3.3: al generico valore di M_t^* è possibile infatti associare un nuovo valore del parametro $M_t(\text{Lab X})$ misurato per lo stesso contenuto d’acqua w_n^* della curva di calibrazione originaria, così come schematizzato in Figura 5.27.

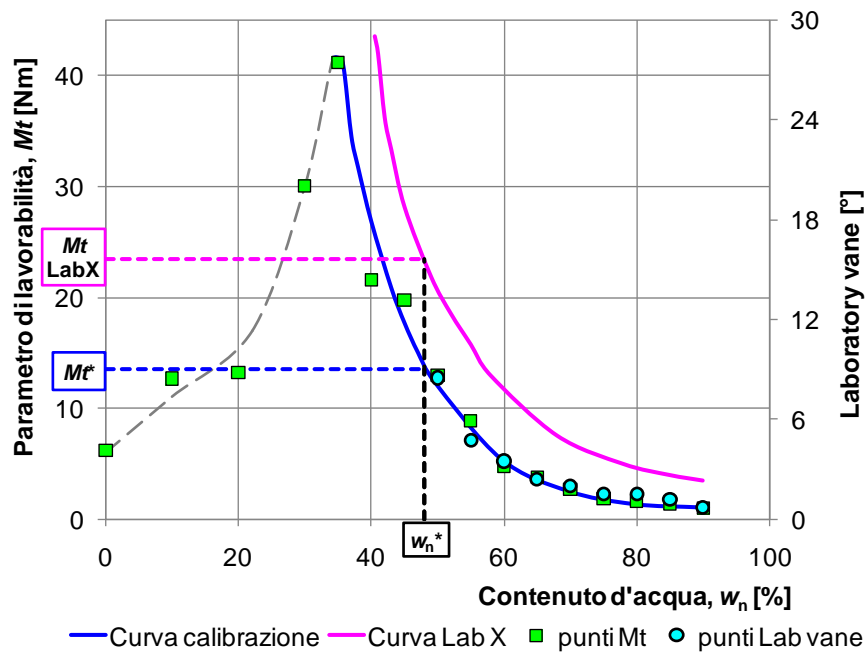


Figura 5.27 - Schema tipo per il confronto con altri laboratori.

5.3.5 Conducibilità idraulica

Sui provini di miscela terreno-legante sono state condotte 68 prove di conducibilità idraulica in cella triassiale, in numero quindi nettamente inferiore rispetto alle prove ELL. Tale circostanza è legata al tempo maggiore di esecuzione richiesti dalla prova di permeabilità, che non ha quindi permesso di ottenere dati per tutte le miscele e tecniche di confezionamento, ma solo per alcune condizioni, generalmente escludendo dalle prove i provini realizzati con la tecnica *N.C.*, spesso caratterizzati da evidenti difetti di fattura se associati a miscele poco lavorabili. I provini *N.C.* testati sono infatti riferiti a miscele aventi $M_t < 6\text{Nm}$. Dagli andamenti parziali non è stato quindi possibile eseguire delle analisi in parallelo con quelli relativi alle prove ELL.

In Figura 5.28 sono illustrati i risultati ottenuti a 28 giorni di maturazione, mentre quelli riferiti a 7 giorni sono riportati in appendice (Figura B.12). Sono raffigurati gli andamenti del coefficiente di permeabilità in funzione della lavorabilità delle miscele, confrontando i valori ottenuti per le tre tecniche di confezionamento impiegate. È anche riportato il limite di $k = 1 \times 10^{-09}$ m/s, indicato dalla normativa come limite di riferimento per i diaframmi con funzione di barriera idraulica di protezione ambientale.

Confrontando i dati relativi alle tecniche *TA.* ed *RO.* è possibile notare come in linea di massima siano stati ottenuti valori confrontabili di coefficiente di permeabilità a parità di miscela, con valori generalmente inferiori per i provini realizzati mediante *TA.*, pur tuttavia ricordando il ridotto numero di provini testati. Entrambe le tecniche risultano applicabili nel range di lavorabilità indagato.

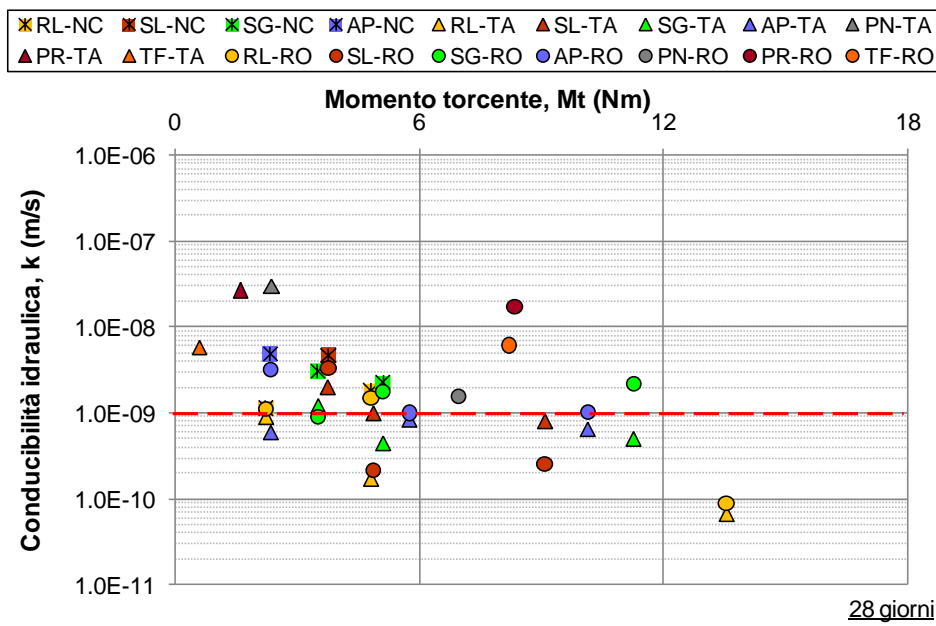


Figura 5.28 - Valori di conducibilità idraulica in funzione della lavorabilità delle miscele e delle le tecniche di confezionamento a 28 giorni di maturazione.

5.4 Analisi dei dati relativi ad un campo prova CSM - Sapienza Università di Roma, Università di Padova e Bauer Group

Le analisi di microtomografie computerizzate a raggi X riportate in Figura 5.29, condotte su un provino cilindrico di 8mm prelevato da un provino di laboratorio, hanno evidenziato una matrice compatta ed omogenea, indice di una buona miscelazione dei materiali, con presenza di vuoti d'aria di forma regolare e arrotondata che conferiscono al provino un valore di porosità pari a circa l'8%.

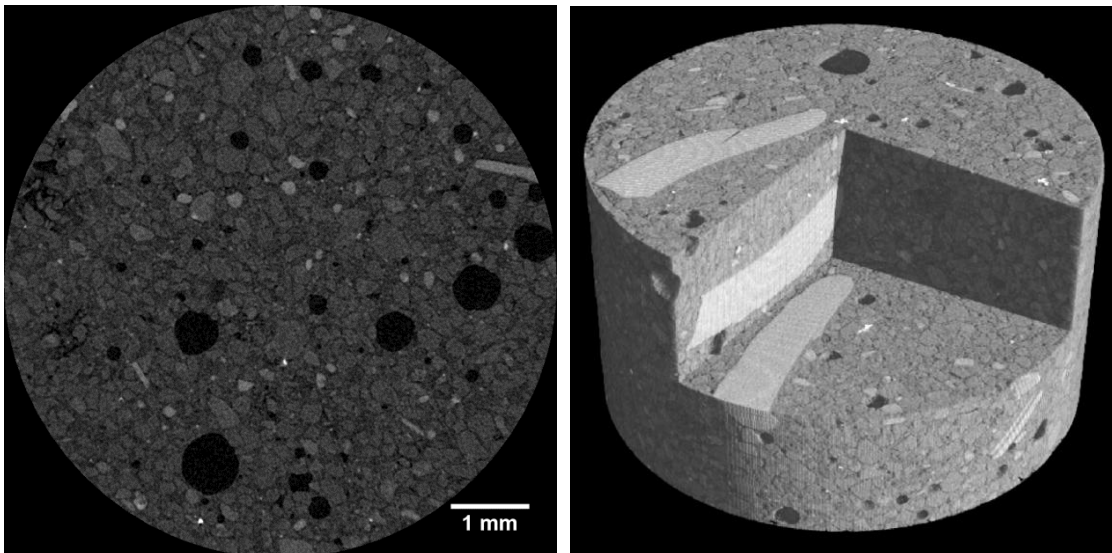


Figura 5.29 - Sezioni tomografiche trasversale e 3D di un provino proveniente dalla miscela di laboratorio.

Si riportano in Figura 5.30 i risultati relativi alle prove di compressione non confinata eseguite a diversi tempi di maturazione, dai quali si riscontra un incremento di resistenza significativo anche dopo 28 giorni di maturazione, tempo associato all'esaurimento delle reazioni di idratazione del cemento. Questo fenomeno è dovuto alla presenza di elementi di origine pozzolanica nell'agente legante "Blitzdammer®" responsabili delle reazioni a lungo termine.

I valori di resistenza q_u ottenuti risultano essere considerevoli ($q_u = 10\text{MPa}$ a 120giorni) sia per l'elevato quantitativo di legante introdotto, pari a circa 500kg/m^3 , sia per le caratteristiche del terreno di partenza, di natura granulare (Sabbia).

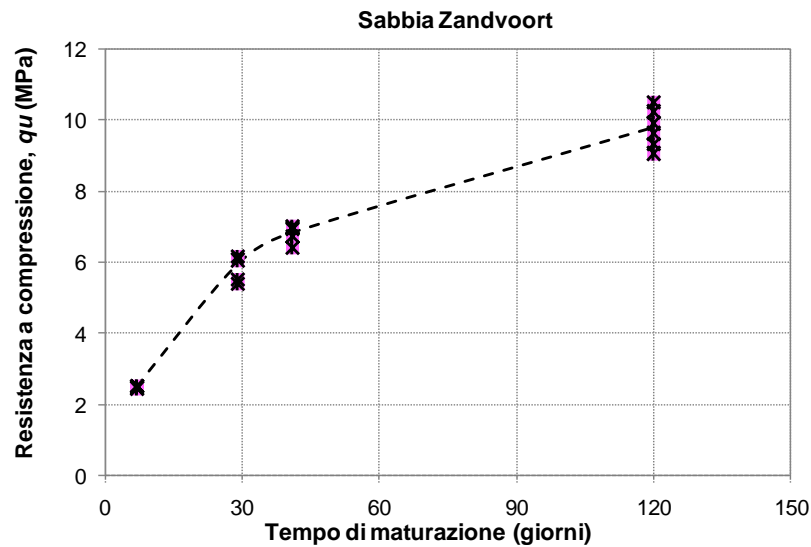


Figura 5.30 - Andamento della resistenza a compressione non confinata, q_u .

In Figura 5.31 sono illustrati i valori della conducibilità idraulica ottenuti per due provini gemelli, per i quali si riscontrano valori inferiori a $1 \times 10^{-09}\text{m/s}$ già intorno ai 28 giorni, che arrivano a $1.7 \times 10^{-10}\text{m/s}$ a 120 giorni di maturazione.

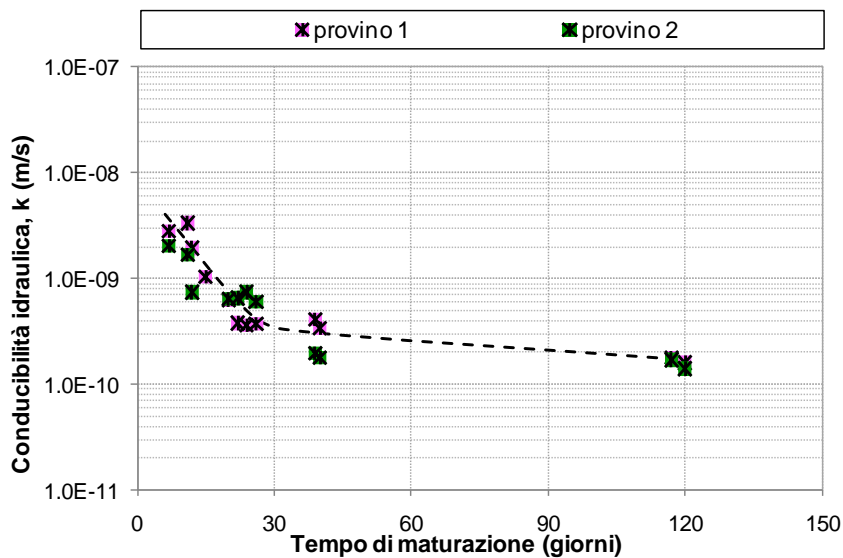


Figura 5.31 - Andamento della conducibilità idraulica, k .

I dati riportati andranno integrati e confrontati con quelli ricavati a seguito di simili prove di laboratorio su campioni prelevati “wet grab” e di opportune prove in sito sui pannelli CSM in vera grandezza, al fine di valutare l’influenza sui risultati della procedura di prelievo di campioni in cantiere e delle condizioni effettivamente presenti in sito, quali temperatura di maturazione, condizioni di confinamento, eventuale drenaggio di acqua ad opera degli strati sabbiosi, etc..

CONCLUSIONI

Scopo dello studio sperimentale è stato quello di fornire utili indicazioni e valido supporto verso la standardizzazione a livello nazionale ed internazionale delle procedure di laboratorio impiegate nei processi di QC/QA (controllo ed assicurazione di qualità) associate ad un intervento di Deep Mixing, così come richiesto dallo “*International collaborative study on Deep Mixing*” attualmente in corso, di cui la presente tesi è parte integrante.

A tal fine sono state condotte due fasi di ricerca presso il *Soil Stabilisation Group* ed il *Foundation Group* del *Port and Airport Research Institute* (PARI) di Tokyo, cui è seguita una fase di estensione e validazione dei risultati presso il DICEA (Sapienza), ed una ulteriore fase in collaborazione con l’Università di Padova e la Bauer Group.

Sono di seguito riportate le conclusioni relative ai risultati ottenuti nelle parti che hanno costituito lo studio sperimentale, unitamente a delle raccomandazioni per future ricerche ed approfondimenti.

Lavorabilità delle miscele e Applicabilità delle tecniche di confezionamento

Si riportano in un unico paragrafo le conclusioni relative allo studio iniziato presso il Soil Stabilisation Group (PARI) e continuato poi in una successiva fase temporale presso il DICEA (prima e terza parte dello studio sperimentale).

In particolare sono state messe a punto due procedure di laboratorio tra loro collegate per la valutazione della lavorabilità di miscele terreno-legante e per il confezionamento di provini stabilizzati da sottoporre alle diverse prove di laboratorio, largamente impiegate nelle varie fasi di un intervento di Deep Mixing. Tali procedure saranno proposte per una successiva standardizzazione a livello nazionale ed internazionale.

La procedura nuova ed alternativa per la misura della lavorabilità, basata sulla misura diretta del momento torcente (M_t) necessario per ruotare la lama di un miscelatore a contatto con la generica miscela all’interno della ciotola di miscelazione, ha consentito di superare i limiti degli attuali dispositivi sperimentali basati sull’impiego del “Laboratory vane”. La nuova metodologia proposta garantisce una buona ripetibilità della misura in un più ampio range di lavorabilità e di caratteristiche dei terreni compresi quelli a struttura granulare.

La nuova procedura è stata utilizzata per misurare la lavorabilità di miscele terreno-legante, realizzate impiegando il terreno Kawasaki clay (presso il PARI, sono state testate 9 miscele) e sette terreni reali tipici dell’area romana (presso il DICEA, sono state realizzate 21 miscele), a partire dalle quali sono stati realizzati circa 850 provini stabilizzati mediante diverse tecniche di confezionamento, successivamente sottoposti a prove di laboratorio.

Le tecniche di confezionamento impiegate, così come indicato nello studio internazionale, sono state: Nessuna Compattazione (*N.C.*), Tapping (*TA.*), Rodding (*RO.*), Compattazione Statica (*S.C.25* ed *S.C.50*) e Compattazione Dinamica (*D.C.*).

È stato quindi definito un indice di applicabilità (I_A) in grado di permettere la scelta della più idonea tecnica di confezionamento per una data lavorabilità della miscela terreno-legante. L'indice I_A fornisce l'indicazione sulla tecnica di confezionamento capace sia di assicurare la massima ripetibilità dei risultati rispetto le altre (in termini di minimi errori relativi) sia di produrre provini maggiormente omogenei e quindi aventi le migliori proprietà fisico-meccaniche (in termini di densità e resistenza a compressione qu).

Dai dati sperimentali ottenuti, l'applicabilità di ciascuna tecnica di confezionamento per la preparazione di provini di miscela terreno-legante è risultata funzione della lavorabilità della miscela.

Considerando i dati complessivamente ottenuti presso il PARI e presso il DICEA è stato quindi possibile definire i range di applicabilità delle tecniche di confezionamento in funzione della lavorabilità delle miscele terreno-legante (espressa dal parametro M_t , momento torcente).

In particolare: la tecnica *N.C.* è risultata essere applicabile per valori di $M_t < 3\text{Nm}$, e non applicabile per valori di $M_t > 6\text{Nm}$. Nel range $M_t = 3\div 6\text{Nm}$, non essendo possibile ricavare indicazioni univoche dai dati, tale tecnica può essere considerata marginalmente applicabile. La tecnica *TA.* è risultata applicabile per valori di $M_t < 65\text{Nm}$, marginalmente applicabile nel range $M_t = 65\div 75\text{Nm}$ e non applicabile per $M_t > 75\text{Nm}$. L'impiego della tecnica *RO.* ha fornito generalmente i migliori risultati, risultando sempre applicabile nel range $M_t = 0\div 120\text{Nm}$. I dati ottenuti suggeriscono come l'adozione di una maggiore energia di compattazione, quando utilizzabile, dia effetti positivi, così come indicato dal confronto tra i valori ottenuti per le tecniche *S.C.25* e *S.C.50.*: la prima tecnica risulta sempre non applicabile, mentre *S.C.50* risulta applicabile in un ampio range $M_t = 15\div 120\text{Nm}$, e non applicabile per $M_t < 10\text{Nm}$. La tecnica *D.C.* risulta infine applicabile per valori di $M_t > 40\text{Nm}$ e non applicabile per $M_t < 30\text{Nm}$. La tecnica *RO.* ha garantito il più ampio range di applicabilità in quanto permette di adattare l'energia di confezionamento alla lavorabilità della miscela, mentre le altre tecniche forniscono sempre la stessa energia allo strato di miscela da compattare.

Applicando la procedura di misura della lavorabilità a miscele a base di un materiale altamente reperibile come il Caolino (variando il suo contenuto d'acqua nel range $0\div 90\%$), è stata ricavata una *curva di calibrazione*, utile per rendere fruibili da parte di altri laboratori di Deep Mixing i risultati ottenuti nello studio sperimentale.

I dati e le relazioni ricavati risultano essere originali in quanto riferiti a terreni reali ed eterogenei raramente trattati in letteratura Deep Mixing ma di frequente presenza nelle applicazioni in sito.

Unitamente all'attività di laboratorio è stata condotta una ricerca bibliografica aggiornata al 2012 sullo stato dell'arte della tecnologia del Deep Mixing con particolare riguardo alle ultime innovazioni tecnologiche e alle recenti procedure di QC/QA, di utile riferimento per gli studiosi del settore.

L'estensivo programma di laboratorio svolto ha consentito di ottenere alcune utili indicazioni riguardo l'influenza delle tecniche di confezionamento sulla rappresentatività delle prove preliminari di laboratorio così come condotte in un trattamento di Deep Mixing.

I risultati ottenuti costituiranno una base suscettibile di integrazione con i dati ricavati dalle diverse organizzazioni partecipanti al programma di ricerca internazionale e riferiti ad altri terreni tipici.

Impiego di “tire chips” nelle miscele terreno-cemento

Scopo della seconda parte di ricerca è stato quello di indagare l'effetto dell'aggiunta di tire chips (granulato di copertone) sulle proprietà meccaniche di una miscela terreno-cemento, da impiegare nella realizzazione di una barriera impermeabile, al fine di valutarne il mantenimento dell'efficienza prestazionale in presenza di elevate deformazioni.

Dalle prove di laboratorio eseguite nel corso dello studio condotto in collaborazione con il Foundation Group (PARI) è risultato come l'aggiunta di tire chips a miscele di terreno-cemento abbiano l'effetto di contenere l'aumento della permeabilità in presenza di deformazioni da stress. Sono state ottenute utili informazioni dalle analisi delle tomografie ai raggi X condotte sui diversi provini di miscela di supporto ai risultati conseguiti.

La conducibilità idraulica dei provini testati è aumentata con il processo di compressione, con andamenti diversi a seconda della quantità delle tire chips presenti. Nei provini con aggiunta di tire chips (contenuto pari al 10 e 20%) è stato osservato lo sviluppo progressivo di piccole fessure diffuse, verosimilmente responsabile del minore aumento della permeabilità a parità di step deformativo rispetto a quelli della miscela che ne era priva, per i quali si è verificata la formazione di un unico crack continuo di dimensioni maggiori. Per la miscela al 20% di tire chips sono state in particolare ottenuti valori del coefficiente di permeabilità che a 28 giorni rimangono inferiori a $k = 1 \times 10^{-9}$ m/s anche in corrispondenza di deformazioni pari all'1%.

I risultati ottenuti costituiscono una utile base di conoscenza, anche se allo stato attuale limitata e da ampliare e validare mediante ulteriori studi e approfondimenti. Da questi primi risultati c'è comunque da ritenere che le tire chips addizionate alle miscele terreno-cemento possano essere impiegate con successo in applicazioni di ingegneria geotecnica ambientale al fine di minimizzare la possibilità di perdita di tenuta della barriera verticale impermeabile nei casi di deformazioni considerevoli dovute a cedimenti differenziali o eventi sismici.

Analisi dei dati relativi ad un campo prova CSM

A partire dalle misure ottenute “real time” dei parametri di produzione di alcuni pannelli CSM di prova è stato possibile individuare il binder content effettivo, utile per ricreare il medesimo mix design in laboratorio, impiegando il terreno prelevato in sito e il legante utilizzato in cantiere secondo gli stessi dosaggi.

Sui provini confezionati in laboratorio sono state condotte prove meccaniche e fisiche i cui risultati andranno integrati e confrontati con quelli ricavati a seguito di simili prove di laboratorio su campioni prelevati “wet grab” e di opportune prove in sito

sui pannelli CSM in vera grandezza, al fine di valutare l'influenza sui risultati della procedura di prelievo di campioni in cantiere e delle condizioni effettivamente presenti in sito, quali: temperatura di maturazione, condizioni di confinamento, eventuale drenaggio di acqua ad opera degli strati sabbiosi, etc..

Raccomandazioni per future ricerche

La ricerca presentata nel lavoro, focalizzata sulla standardizzazione delle procedure di laboratorio impiegate nei processi di QC/QA, può essere approfondita ed ampliata in diversi modi. Si ricorda come i risultati ottenuti costituiranno una base suscettibile di integrazione con i dati ricavati dalle diverse organizzazioni partecipanti al programma di ricerca internazionale che saranno presentati nella futura "*International Conference on Deep Mixing - 2015*", San Francisco, USA.

I principali campi delle possibili future ricerche includono:

1. Studio comparativo tra i risultati ottenuti in laboratorio e quelli in sito a seguito di campi prova in vera grandezza al fine di ottenere utili indicazioni verso l'individuazione delle procedure di laboratorio maggiormente rappresentative delle reali condizioni sito-specifiche (es. condizioni di confinamento, effetto della falda) e su come pianificare al meglio le operazioni progettuali;
2. Studio degli effetti a breve e lungo termine di contaminanti organici ed inorganici anche in combinazione con le possibili condizioni ambientali (es. temperatura) sulla degradazione delle caratteristiche fisiche e meccaniche dei terreni trattati e degli eventuali additivi presenti (quali ad esempio le tire chips, granulato di copertone);
3. Sperimentazione di nuovi leganti o additivi performanti che possano risultare maggiormente ecocompatibili e a ridotto consumo di CO₂ rispetto al cemento Portland.

Contatti

enrico.leder@email.it

enrico.leder@pec.ording.roma.it

APPENDICE A - Formule di passaggio laboratorio/sito

Le formule riportate nella presente appendice sono impiegate per la valutazione dei parametri di miscelazione in laboratorio e per il passaggio ai rispettivi parametri in sito. In particolare si fa riferimento all'impiego di una malta cementizia binaria costituita da acqua e legante. Per quanto riguarda l'applicazione in sito ci si riferisce alla tecnologia del Cutter Soil Mixing e al metodo monofase, che prevede l'iniezione della malta sia in fase di discesa sia di risalita.

A.1 Definizioni

Parametri relativi alla malta cementizia:

P = peso malta cementizia [kg]

V = volume malta cementizia [l – dm³]

P_c , P_w = peso legante, acqua [kg]

V_c , V_w = Volume legante, acqua [l – dm³]

ρ_c , ρ_w = densità legante, acqua [kg/dm³]

$\frac{P_w}{P_c} = \chi$ = rapporto in peso acqua legante (w/c) [-]

ρ_{malta} = densità malta cementizia [kg/dm³]

Parametri relativi alla miscela terreno-malta:

P_T = peso terreno secco [kg]

P_{TU} = peso terreno umido [kg]

w_n = contenuto acqua terreno [%]

a_c = *binder content*, contenuto legante (rapporto peso legante rispetto al peso secco del terreno) [%]

δ = rapporto in peso malta/terreno [-]

γ_{TU} = peso di volume terreno [kN/m³]

γ_{malta} = peso di volume malta = $\rho_{malta} \times 10$ [kN/m³]

γ_{mix} = peso di volume miscela terreno-malta [kN/m³]

P_{T1} = peso terreno secco in 1m³ di miscela terreno-malta [kg]

$V_{malta}(1m^3)$ = Volume malta in 1m³ di miscela terreno-malta [l/m³ miscela]

V_{malta} = Volume malta in 1m³ di terreno attraversato [l/m³ terreno]

α = *binder factor*, fattore legante (kg legante rispetto 1m³ di terreno attraversato) [kg/m³ terreno]

A.2 Calcolo densità della malta cementizia:

$$P = 1 \quad ; \quad P_c + P_w = 1$$

$$P_c = \frac{1}{1 + \chi}, \quad P_w = \frac{\chi}{1 + \chi}$$

$$V_c = \frac{P_c}{\rho_c} = \frac{1}{\rho_c(1 + \chi)} \quad ; \quad V_w = \frac{P_w}{\rho_w} = \frac{\chi}{\rho_w(1 + \chi)}$$

$$\rho_{malta} = \frac{P}{V} = \frac{1}{V_c + V_w} = \frac{1}{\frac{1}{\rho_c(1 + \chi)} + \frac{\chi}{\rho_w(1 + \chi)}} = \frac{\rho_c \cdot \rho_w(1 + \chi)}{\chi \cdot \rho_c + \rho_w}$$

A.3 Calcolo δ rapporto in peso malta/terreno e γ_{mix} peso di volume miscela terreno-malta:

$$P_T = 1 \quad ; \quad P_{TU} = 1 + 1 \cdot \frac{w_n}{100}$$

$$P_c = 1 \cdot \frac{a_c}{100}, \quad ; \quad P_w = 1 \cdot \frac{a_c}{100} \cdot \chi$$

$$\delta = \frac{P_c + P_w}{P_{TU}}$$

$$\gamma_{mix} = \frac{\gamma_{TU} \cdot \gamma_{malta}(1 + \delta)}{\delta \cdot \gamma_{TU} + \gamma_{malta}} \quad (\text{stessa formula impiegata per il calcolo di } \rho_{malta})$$

A.4 Calcolo volume malta in $1m^3$ di miscela terreno-malta:

$$P_T(1m^3) = \frac{1 \cdot \gamma_{mix} \cdot 100}{\left(1 + \frac{a_c}{100} + \frac{a_c}{100} \cdot \chi + \frac{w_n}{100}\right)}$$

$$P_c = P_T(1m^3) \cdot \frac{a_c}{100} \quad ; \quad P_w = \chi \cdot P_c$$

$$V_{malta}(1m^3) = V_c + V_w = \frac{P_c}{\rho_c} + \frac{P_w}{\rho_w}$$

A.5 Calcolo Volume di malta in $1m^3$ di terreno attraversato e binder factor α :

$$V_{malta} = \frac{V_{malta}(1m^3) \times 1000}{1000 - V_{malta}(1m^3)}$$

$$P_w = \chi \cdot \alpha$$

$$V_{malta} = V_c + V_w = \frac{\alpha}{\rho_c} + \frac{P_w}{\rho_w} = \frac{\rho_w + \rho_c \cdot \chi}{\rho_c \cdot \rho_w} \cdot \alpha$$

$$\alpha = \frac{\rho_c \cdot \rho_w}{\rho_w + \rho_c \cdot \chi} \cdot V_{malta}$$

Miscelazione in laboratorio						
Tipo legante	Cemento Blitzdammer ®		Nome terreno	Sabbia Zandvoort		
Parametri malta cementizia			Caratteristiche terreno			
ρ_w acqua	1.0	kg/dm ³	Argilla (%)	Limo (%)	Sabbia (%)	Ghiaia (%)
ρ_c legante	3.0	kg/dm ³	5	10	70	15
w/c	1.12	rapporto in peso	contenuto acqua	12	%	
ρ_{malta}	1.46	kg/dm ³	peso volume	19	kN/m ³	misurato o stimato
Stime peso di volume e quantità miscela terreno-legante						
binder content (%)		30.00	% in peso rispetto terreno secco			
malta/terreno	0.567		in peso			
peso di volume miscela	17.13		kN/m ³			
Numero provini	16		-			
Diametro	5		cm			
Altezza	10		cm			
Peso provino	336		g			
Peso totale materiali	5.382		kg			
Parametri effettivi miscelazione						
aggiunta (taratura 1°mix)	500		g			
peso totale materiali	5882.3		g			
peso terreno secco	3352.2		g			
peso acqua terreno	402.3		g			
peso legante*	965.5		g			
peso acqua malta	1077.4		g			
Contenuto d'acqua Terreno effettivo (%)						
contenitore	peso contenitore (g)	contenitore + peso umido (g)	contenitore + peso secco (g)	contenuto acqua, w_n (%)	Da determinare in seguito all'omogeneizzazione del terreno, prima dell'aggiunta della malta	
503	31.94	82.04	76.75	11.81		
514	22.83	70.33	65.14	12.27		
526	31.41	82.97	77.46	11.97		
Contenuto d'acqua terreno medio effettivo (%)				12.01%		
* consumo di circa 150g di terreno omogeneizzato per determinare w_n , da considerare nel calcolo del peso legante						
Contenuto d'acqua Miscela terreno-legante effettivo (%)						
orario aggiunta malta		10:35				
contenitore	peso contenitore (g)	contenitore + peso umido (g)	contenitore + peso secco (g)	contenuto acqua (%)	Da valutare in seguito alla miscelazione dei materiali, prima del confezionamento o dei provini	
7	20.36	69.96	60.23	24.40		
501	31.98	82.81	72.45	25.60		
518	30.19	77.13	67.83	24.71		
Contenuto d'acqua miscela medio effettivo (%)				24.90%		
Livello miscela nella ciotola, cm (dal bordo superiore)				8.0		
Lavorabilità miscela terreno-legante, parametro Mt (N·m) (oppure ex. Hand vane, Laboratory vane)				10.8		
				netto: 4.00		
Tempo di confezionamento (t inizio-t fine), min				40		

Figura A.1 - Parametri relativi alla miscelazione in laboratorio.

Parametri miscelazione in sito						
Tipo legante	Cemento Blitzdammer ®		Nome terreno	Sabbia Zandvoort		
Parametri malta cementizia			Caratteristiche terreno			
ρ_w acqua	1.0	kg/dm ³	Argilla (%)	Limo (%)	Sabbia (%)	Ghiaia (%)
ρ_c legante	3.0	kg/dm ³	5	10	70	15
w/c	1.12	rapporto in peso	w_n (%)	12	%	
ρ_{malta}	1.46	kg/dm ³	peso volume	19	kN/m ³	
peso legante	690.0	kg/m ³ malta				
litri acqua	770.0	l/m ³ malta				
binder content	30.00	%				
					dati da inserire formule	
Dimensioni macchinario						
nome	spessore S [m]	floor area A [m ²]	L [m]			
tipoXX	0.55	1.32	2.4			
Parametri operativi miscelazione						
Riferimento a 1m ³ di miscela (terreno+acqua+malta)						
Peso di volume miscela	17.13		kN/m ³			
Malta in 1m ³ di miscela	424.51		l/m ³ miscela			
Riferimento a 1m ³ di terreno attraversato						
Volume malta	737.65		l/m ³ terreno			
Binder factor	509.0		kg/m³ terreno			
Riferimento a 1m lineare di trattamento						
Area pannello	1.32		m ²			
Quantità malta / m lineare	973.7		l/m			
Peso legante	671.9		kg/m			
Litri acqua malta	749.7		l/m			
Riferimento al singolo pannello						
Profondità trattamento	11.5		m			
Quantità malta totale	11198		l/pannello			
Consumo legante	7727		kg/pannello			
Consumo litri acqua malta	8622		l/pannello			
Dimensionamento portata della pompa						
Riferimento a una verticale di trattamento						
Profondità trattamento	11.5		m			
Massima portata pompa	220		l/min			
Tempo minimo iniezione	50.9		min			
Tempo di produzione	90		min			
Portata pompa (minima)	124.42		l/min			
Compenetrazione pannelli, C						
			20		cm	
Fattore amplificazione consumi						
			1.22		-	

Figura A.2 - Parametri relativi alla miscelazione in sito, ottenuti a partire dallo studio di laboratorio (Figura A.1).

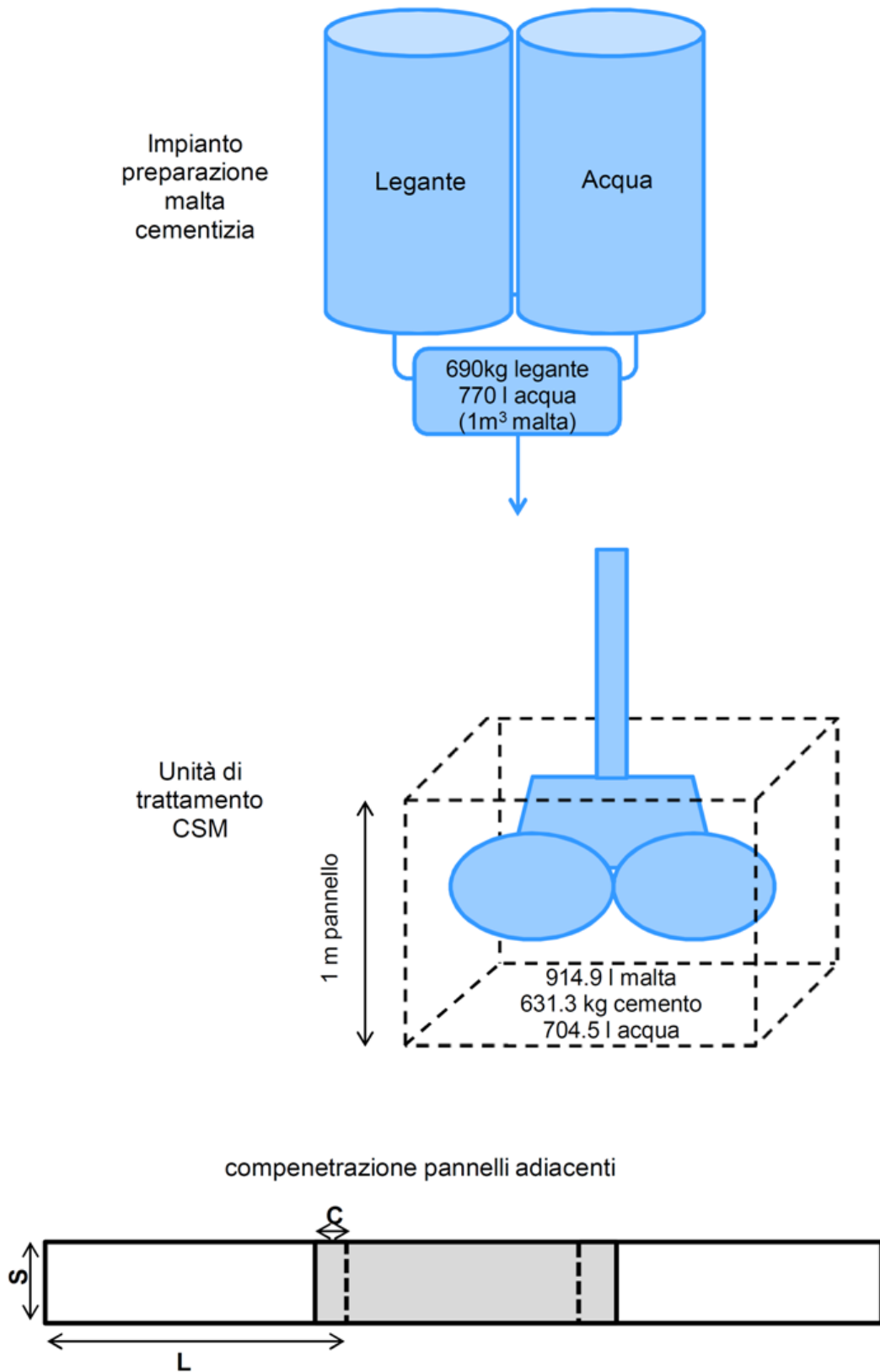


Figura A.3 - Schemi relativi alla miscelazione in sito.

APPENDICE B - Integrazione dei risultati sperimentali

B.1 Integrazione risultati § 5.1

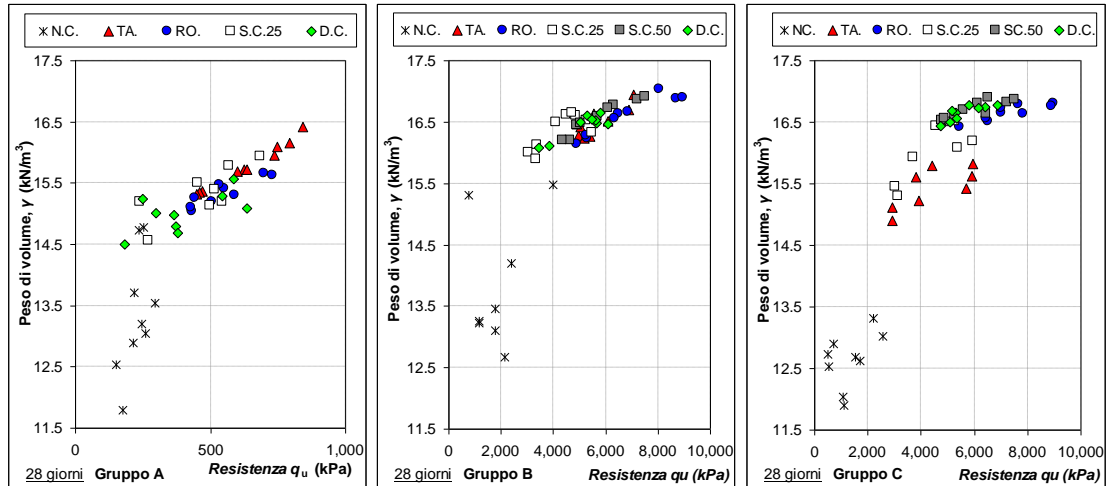


Figura B.1 - Peso di volume, γ , vs resistenza a compressione q_u per i tre gruppi di miscele.

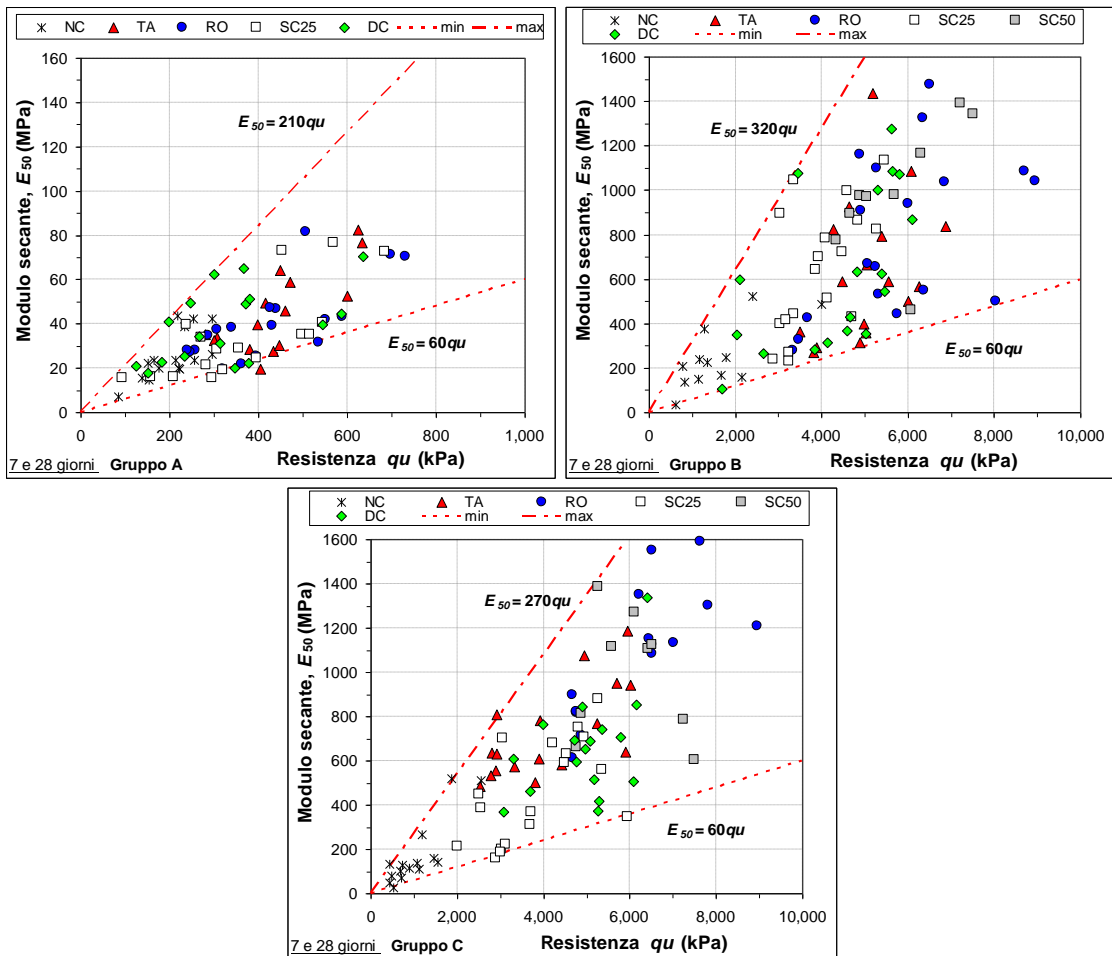


Figura B.2 - Relazioni tra Modulo secante, E_{50} , e resistenza a compressione q_u per i tre gruppi di miscele.

B.2 Integrazione risultati § 5.3

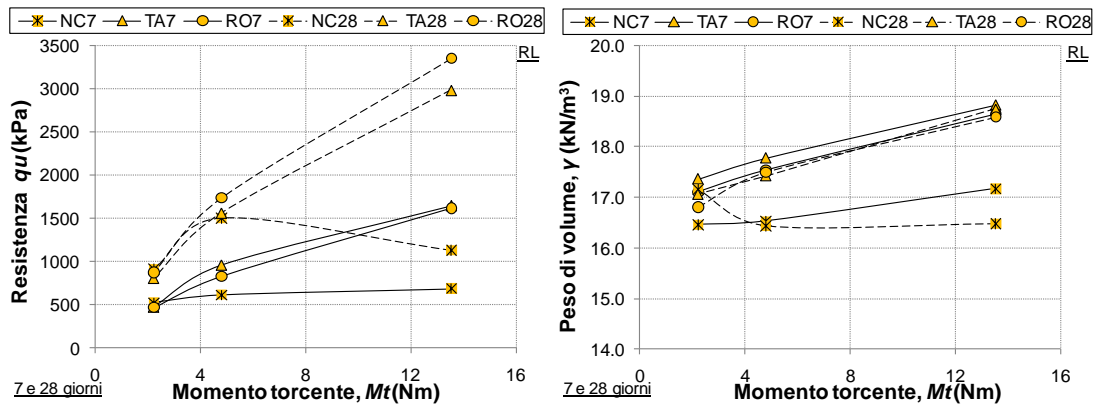


Figura B.3 - Resistenza q_u per le diverse tecniche di confezionamento in funzione della lavorabilità della miscela (terreno RL, riporto limoso).

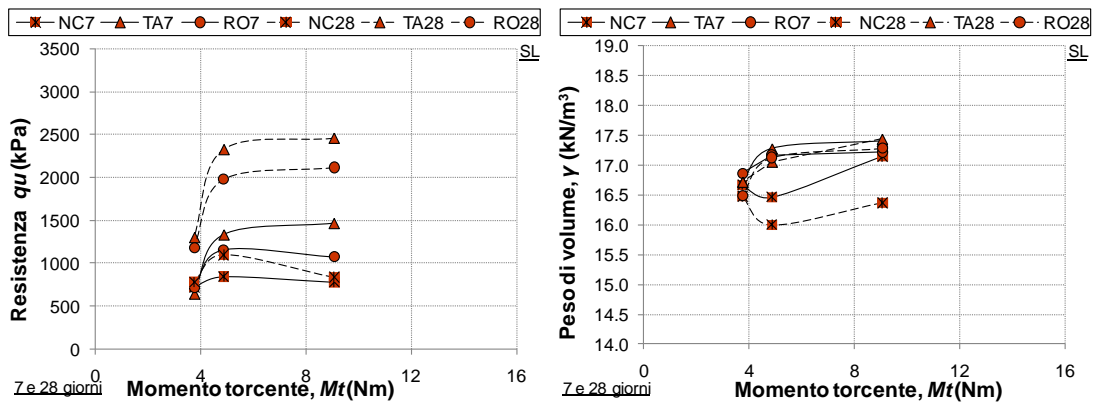


Figura B.4 - Resistenza q_u per le diverse tecniche di confezionamento in funzione della lavorabilità della miscela (terreno SL, Sabbia limosa).

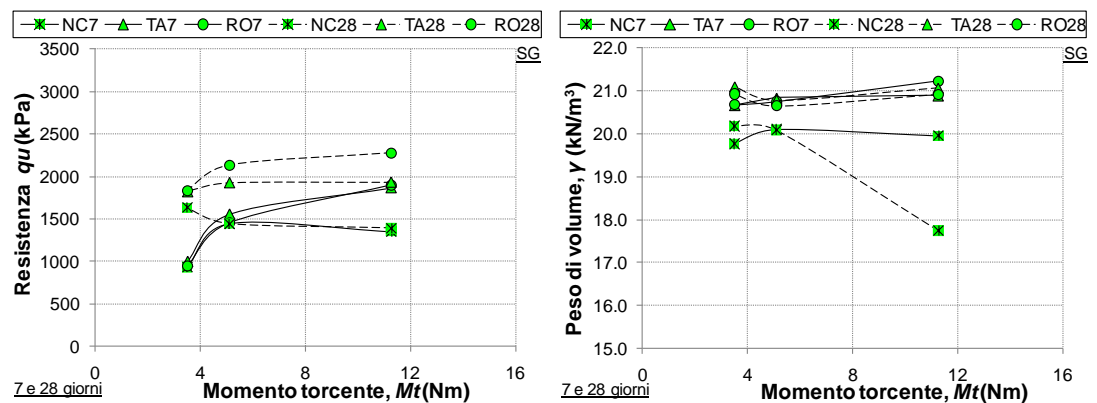


Figura B.5 - Resistenza q_u per le diverse tecniche di confezionamento in funzione della lavorabilità della miscela (terreno SG, Sabbia ghiaiosa).

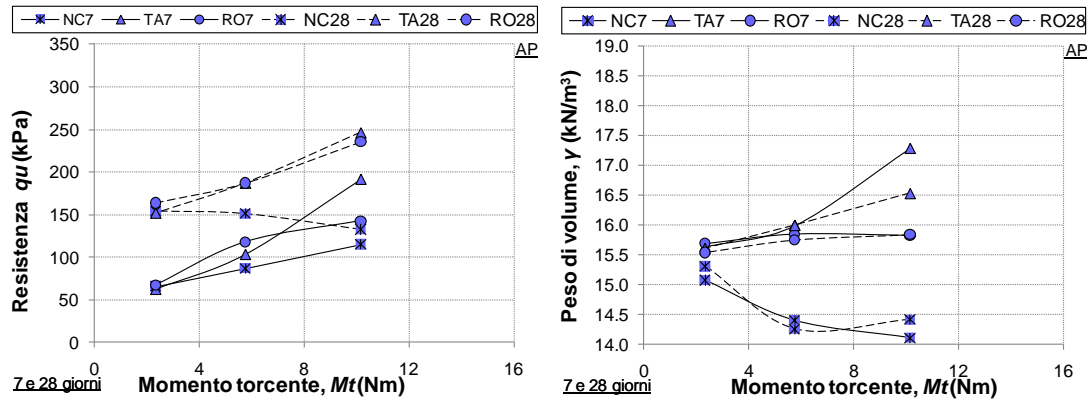


Figura B.6 - Resistenza q_u per le diverse tecniche di confezionamento in funzione della lavorabilità della miscela (terreno AP, argilla pliocenica).

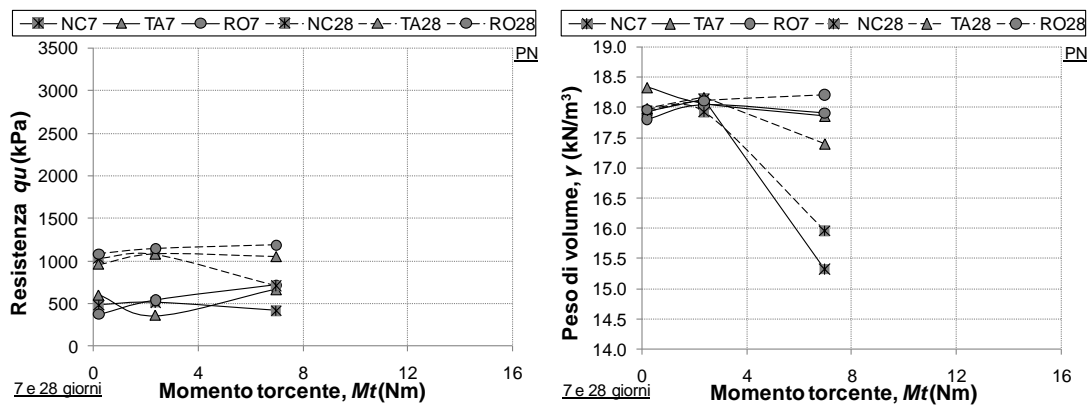


Figura B.7 - Resistenza q_u per le diverse tecniche di confezionamento in funzione della lavorabilità della miscela (terreno PN, Pozzolana nera).

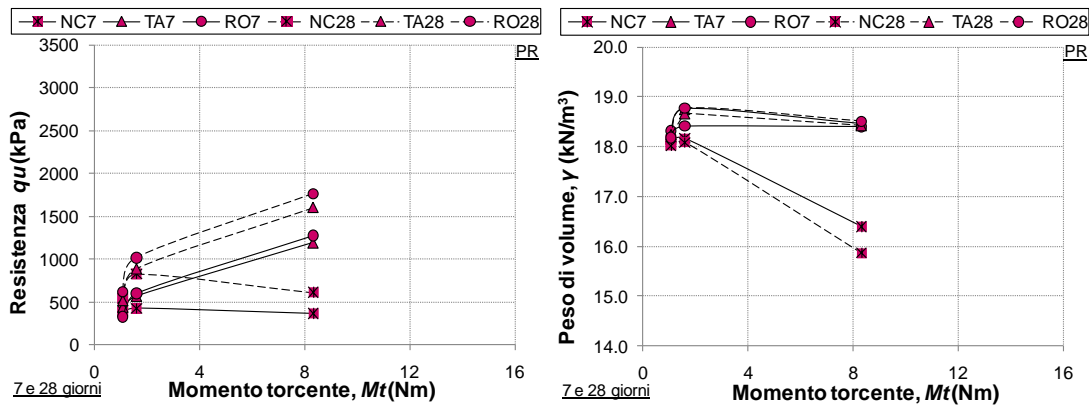


Figura B.8 - Resistenza q_u per le diverse tecniche di confezionamento in funzione della lavorabilità della miscela (terreno PR, Pozzolana rossa).

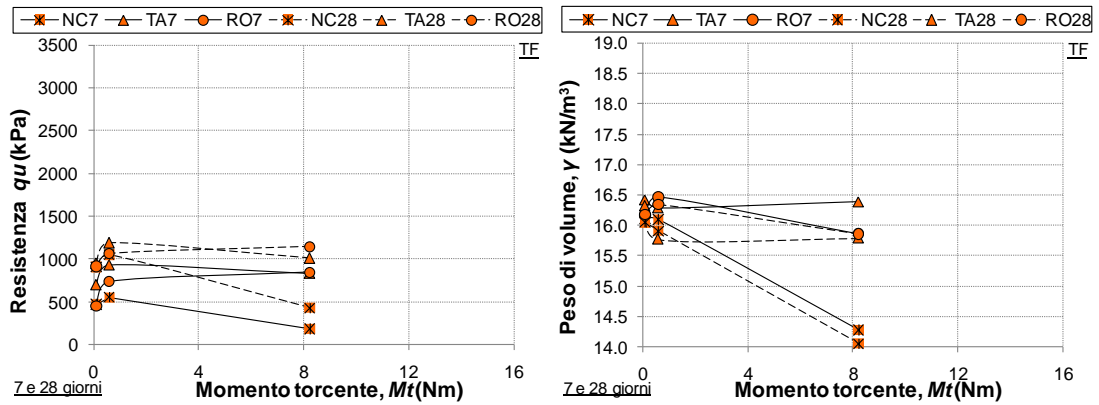


Figura B.9 - Resistenza q_u per le diverse tecniche di confezionamento in funzione della lavorabilità della miscela (terreno TF, Tufi argillificati).

Tabella B.1 - Rapporti E_{50}/q_u in funzione delle tecniche di confezionamento per i terreni miscelati con malta cementizia.

Tipo terreno	Contenuto acqua, w_n (%)	Parametri malta cementizia	Rapporti E_{50}/q_u							
			N.C.		TA.		RO.		Globale	
			min	max	min	max	min	max	min	max
RL	20 - 40	$a_c = 10\%$	60	170	40	110	40	140	40	170
SL	35 - 45		50	130	40	100	40	80	40	130
SG	6 - 10		50	130	50	170	70	140	50	170
AP	50 - 60	$w/c = 1$	60	180	80	180	50	180	50	180
PN	25 - 35		40	90	40	100	40	150	40	150
PR	20 - 32		30	140	30	160	40	100	30	160
TF	44 - 53	$w/c = 0,5$	30	90	30	80	40	110	30	110

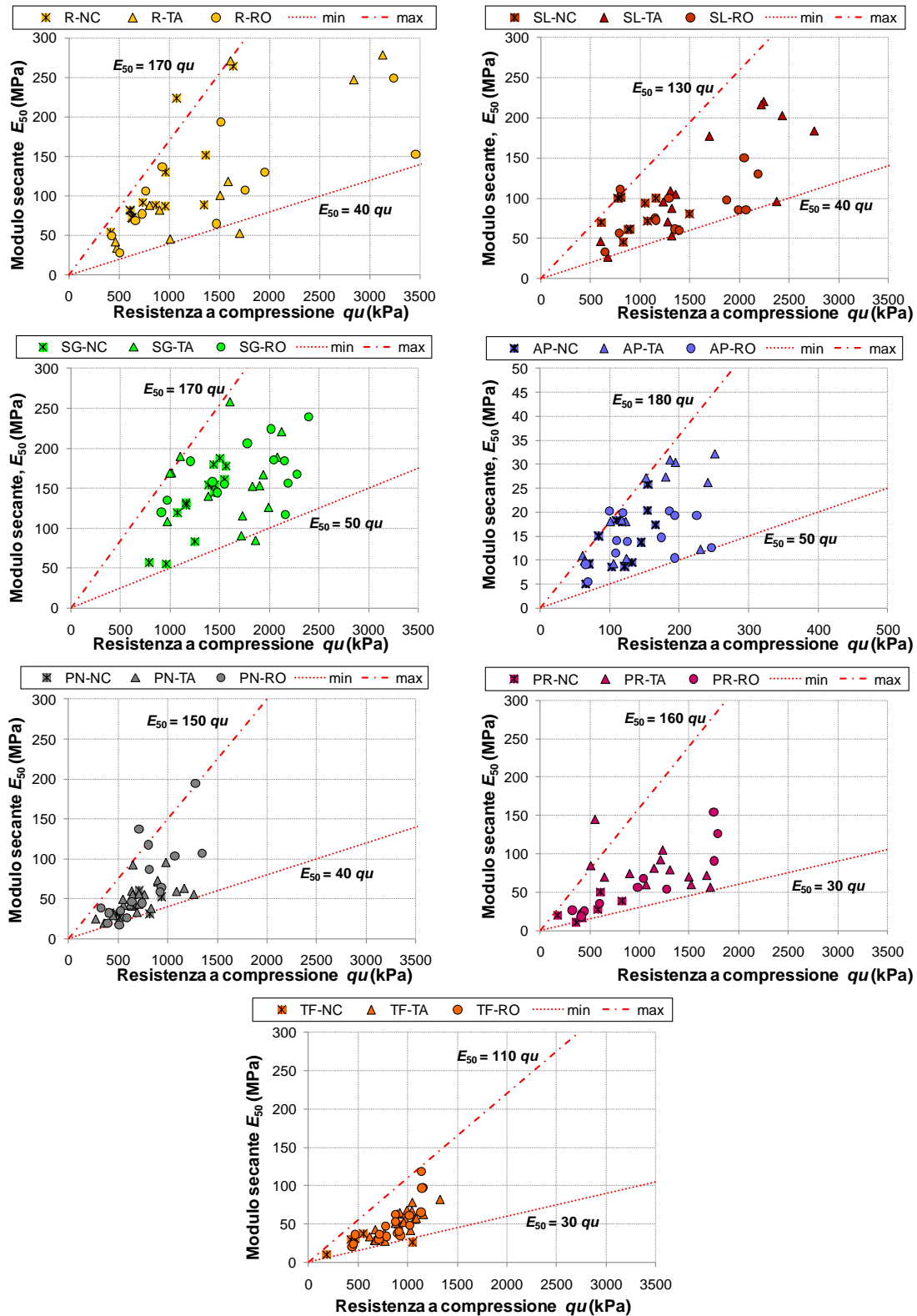


Figura B.10 - Relazioni tra Modulo secante, E_{50} , e resistenza a compressione q_u per le miscele realizzate a partire dai sette terreni reali.

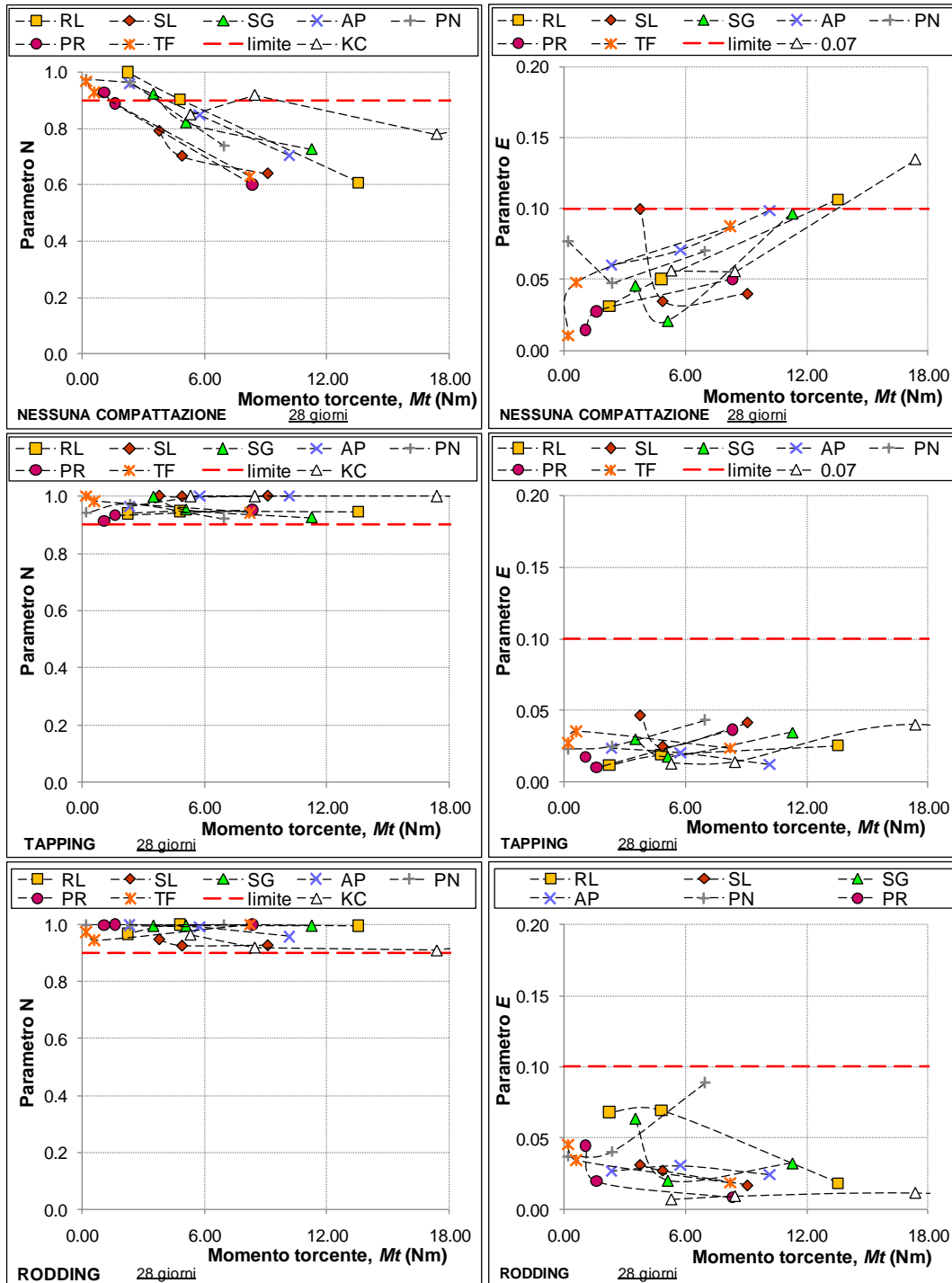


Figura B.11 - Andamento dei parametri N ed E - miscele testate presso il DICEA.

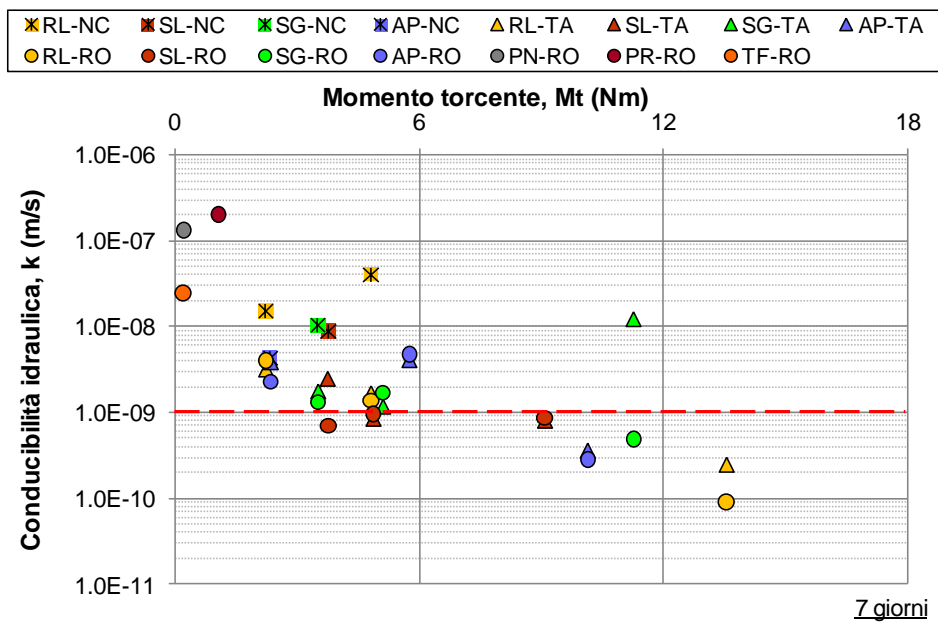


Figura B.12 - Valori del coefficiente di permeabilità in funzione della lavorabilità delle miscele e delle le tecniche di confezionamento a 7 giorni di maturazione.

PRODOTTI DELLA RICERCA

Conferenze internazionali

1) GRISOLIA M., **LEDER E.**, MARZANO I.P. (2013) “Standardization of the molding procedures for stabilized soil specimens as used for QC/QA in Deep Mixing application” Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ICSMGE), 02-06 Set. 2013 Paris, France.

2) BELLATO D., SIMONINI P., GRISOLIA M., **LEDER E.**, MARZANO I.P. (2013) “Quality control of Cutter Soil Mixing (CSM) technology – a case study” Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ICSMGE), 02-06 Set. 2013, Paris, France.

3) BELLATO D., SIMONINI P., MARZANO I.P., **LEDER E.**, GRISOLIA M., VOHS T., GERRESSEN F.W (2012) “Mechanical and physical properties of a CSM cut-off/retaining wall” International Conference on Ground Improvement and Ground Control (ICGI 2012), 30 Oct. - 2 Nov. 2012, University of Wollongong, Australia.

4) MARZANO I.P., **LEDER E.**, GRISOLIA M., DANISI C., (2012). “Laboratory study on the molding techniques for QC/QA process of a Deep Mixing work”. 3rd International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 28-30 June 2012, Near East University, Nicosia, North Cyprus. ISBN 975-8359-28-2.

5) GRISOLIA M., KITAZUME M., **LEDER E.**, MARZANO I.P., MORIKAWA Y. (2012) “Laboratory study on the applicability of molding procedures for the preparation of cement stabilised specimens” Int. Symp. on Recent Research, Advances & Execution Aspects of ground improvement works, Brussels.

6) GRISOLIA M., **LEDER E.**, MARZANO I.P., MIZUTANI T., MORIKAWA Y. (2012) “Influence of tire chips on the mechanical properties of cement treated soil” Int. Symp. on Recent Research, Advances & Execution Aspects of ground improvement works, Brussels.

7) GRISOLIA M., MARZANO I.P., DE LENTINIS D., **LEDER E.** (2010). “Performance of CSM stabilised soils for application in geotechnical complex formations”. Proc. Geotechnical Challenges in Megacities, Moscow, Russia. ISBN 978-5-9902005-2-4.

Convegni nazionali

1) BELLATO D., GERRESSEN F.W., GRISOLIA M., **LEDER E.**, MARZANO I.P., SIMONINI, P., VOHS T. (2012). “Procedure di QC/QA per trattamenti di tipo soil mixing - Considerazioni energetiche”. IARG 2012, Padova, 2 - 4 Luglio 2012. ISBN: 978-88-89524-67-1.

2) GRISOLIA M., **LEDER E.**, MARZANO I.P. (2012). “Applicabilità delle tecniche di confezionamento dei provini per miscele terreno cemento” IARG 2012, Padova, 2 - 4 Luglio 2012. ISBN: 978-88-89524-67-1.

3) GRISOLIA M., MARZANO I.P., **LEDER E.** (2011) “Tecniche di cinturazione dei siti contaminati”. In: convegni nazionali, RemTech 2011, Ferrara. ISBN 978-88-904428-5-8.

4) GRISOLIA M., KITAZUME M., **LEDER E.**, MARZANO I.P. (2011) “Studio comparativo sulla standardizzazione internazionale delle procedure di laboratorio per il confezionamento di miscele terreno cemento”. IARG 2011, Torino.

5) GRISOLIA M., **LEDER E.**, MARZANO I.P., MIZUTANI T. (2011) “Effetto di “tire chips” sulle proprietà meccaniche di miscele terreno cemento per applicazioni di geotecnica ambientale”. IARG 2011, Torino.

6) **LEDER E.**, KITAZUME M., GRISOLIA M., MORIKAWA Y., MARZANO I.P., NINOMIYA Y., KUWAHARA T. (2011) “Applicability of different molding procedures for the preparation of stabilised specimens”. The 46th Japan National Conference on Geotechnical Engineering (CD-ROM), Kobe, Giappone.

Rivista

1) GRISOLIA M., KITAZUME M., **LEDER E.**, MARZANO I.P., MORIKAWA Y. (2013). “Laboratory techniques for cement soil stabilisation” *Geotechnical Testing Journal*, under review.

2) GRISOLIA M., **LEDER E.**, MARZANO I.P., (2013). “Standardization of the laboratory procedures as used for QC/QA in Deep Mixing application” *Canadian Geotechnical Journal*, under review.

Report

1) MARZANO I.P., **LEDER E.**, GRISOLIA M., (2012). “Report on current and future research activity” *Int. collaborative study on Deep Mixing - Task 2: Field and laboratory testing methods*.

ATTIVITÀ FORMATIVA

Partecipazione a conferenze internazionali

- International Symposium & short courses on Recent Research, Advances & Execution Aspects of GROUND IMPROVEMENT WORKS. ISSMGE Technical Committee TC 211 Ground Improvement. Bruxelles, Belgio, 30 Maggio – 1 Giugno 2012.

- 4th International Conference on Grouting and Deep Mixing. Marriott, New Orleans, Louisiana, USA, 15-18 Febbraio 2012.

- 8th Conference on Urban Earthquake Engineering. Center for Urban Earthquake Engineering, Tokyo Institute of Technology. Tokyo, Giappone, 7-8 Marzo 2011.

- International Symposium on Recent and Future Technology in Coastal Development. Port and Airport Research Institute (PARI), Kanto Regional Development Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT). Yokohama, Giappone, 14-16 Dicembre 2010.

Partecipazione a conferenze nazionali

- Ciclo di conferenze Alta Scuola 2012. Nuove Tecnologie per l'Ingegneria l'Ambiente ed il Territorio. SAIE, Bologna 18-21 Ottobre 2012.

- IARG 2012, Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica. Centro culturale San Gaetano, Padova 2-4 Luglio 2012.

- XXIII Ciclo delle conferenze di Geotecnica di Torino. Opere di sostegno e stabilizzazione dei pendii: principi teorici, aspetti progettuali ed esempi applicativi. Politecnico di Torino, Torino 23-24 Novembre 2011.

- Remtech 2011 – Remediation Technology. 5° salone sulle Bonifiche dei Siti Contaminati e sulla Riqualificazione del Territorio. Ferrara fiere congressi, Ferrara 28-30 Settembre 2011.

- IARG 2011, Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica. Politecnico di Torino, Torino 4-6 Luglio 2011.

- Workshop SiCon 2010 - SITI CONTAMINATI Esperienze negli interventi di risanamento. Sapienza, Università di Roma. Roma, Italia, 11-12 Febbraio 2010.

- IARG 2009, Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica, Sapienza, Università di Roma. Roma, Italia, 9 - 11 Settembre 2009.

BIBLIOGRAFIA

Åhnberg, H. (2003). "Measured Permeabilities in Stabilized Swedish Soils." Proceedings of 3rd International Conference on Grouting and Ground Treatment, New Orleans, ASCE Special Publication, Vol. 1, pp. 622-633.

Åhnberg, H., Holm, G., (2009): "Influence of laboratory procedures on properties of stabilised soils specimens," International Symposium on Deep Mixing & Admixture Stabilization, Okinawa, Japan, 19-21 May 2009. CD-ROM, IC-9.

Al-Tabbaa, A., Evans, C.W. (1999): "Laboratory-scale soil mixing of a contaminated site" ICE Journal of Ground Improvement, 3, No. 3, 119-134.

Al-Tabbaa, A. e Evans C.W. (2003): "Deep soil mixing in the UK: geoenvironmental research and recent applications". Journal of Land Contamination and Reclamation, EPP Publications, (11): 1, pp 1-14, 2003

Al Tabbaa, A. e Perera, A.S.R. (2005a): "State of practice report, UK stabilisation/solidification treatment and remediation, part I: binders and technologies – basic principles". In: The International Conference on Stabilisation/Solidification Treatment and Remediation, Cambridge, UK pp. 365-385.

Al Tabbaa, A. e Perera, A.S.R. (2005b): "State of practice report, UK stabilisation/solidification treatment and remediation, part II: binders and technologies – research". In: The International Conference on Stabilisation/Solidification Treatment and Remediation, Cambridge, UK pp. 387-397.

Al Tabbaa, A. e Perera, A.S.R. (2005c): "State of practice report, UK stabilisation/solidification treatment and remediation, part III: binders and technologies - applications" In: The International Conference on Stabilisation/Solidification Treatment and Remediation, Cambridge, UK pp. 365-385.

Al-Tabbaa, A., Barker, P., Evans, C.W. (2009): "Innovation in soil mix technology for remediation of contaminated land". International Symposium on Deep Mixing & Admixture Stabilization, Okinawa, Japan, 19-21 May 2009. CD-ROM, IC-9.

Al-Tabbaa, A., Barker, P, Evans C.W. (2011): "Soil Mix Technology for Land Remediation: Recent Innovations". ICE Journal of Ground Improvement, 164(3), pp 127-138.

Al-Tabbaa, A. (2012): "Innovation in soil mix technology for contaminated land reclamation" Deep Mixing short course, International Symposium on Recent Research, Advances & Execution Aspects of Ground Improvement Works, Brussels, Belgium 30 Maggio - 1 Giugno, 2012.

ALLU, (2007): "ALLU Stabilisation System", Sales Manual in English, Spanish and Portuguese. Free downloads in [<http://www.allu.net/en/downloads.php>]

ASTM C143/C143M (2000). "Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete". ASTM International, West Conshohocken, DOI: 10.1520/C0143_C0143M-00, www.astm.org.

ASTM D422 (1998): “Particle-Size Analysis of Soils”, American Standard Test Methods. www.astm.org

ASTM D2216 (1998): “Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass”, American Standard Test Methods. www.astm.org

ASTM D2166 (2000): “Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil”, American Standard Test Methods. www.astm.org

ASTM D4318 (2000): “Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils”, American Standard Test Methods. www.astm.org

ASTM D4648 (2000). “Standard Test Method for Laboratory Miniature Vane Shear Test for Saturated Fine-Grained Clayey Soil” ASTM International, West Conshohocken, DOI: 10.1520/D4648-00, www.astm.org.

ASTM D5084 (2000): “Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter”, American Standard Test Methods. www.astm.org

ASTM D6910/D6910M (2009). “Standard Test Method for Marsh Funnel Viscosity of Clay Construction Slurries”. ASTM International, West Conshohocken, DOI: 10.1520/ D6910/D6910M-09, www.astm.org.

Bellato, D., Gerressen, F.W., Grisolia, M., Leder, E., Marzano, I.P., Simonini, P., Vohs T. (2012a): “*Procedura di QC/QA per trattamenti di tipo soil mixing - Considerazioni energetiche*”. IARG 2012, Padova, 2 - 4 Luglio 2012.

Bellato, D., Simonini, P., Marzano, I.P., Leder, E., Grisolia, M., Vohs T., Gerressen, F.W. (2012b): “*Mechanical and physical properties of a CSM cut-off/retaining wall*” International Conference on Ground Improvement and Ground Control (ICGI 2012), University of Wollongong, Australia 30 Ott. - 2 Nov. 2012.

Bergwall, M. and Falksund, M. (1996): “Permeabilitetens och styvhetens inverkan på konsolideringsförloppet i kalkcementpelarförstärkt lera” (Consolidation of Lime/Cement Columns, Effects on Permeability and Stiffness). Final Year Project, 1996:1, Chalmers Technological University, Department of Geotechnical Engineering, Gothenburg, Sweden, 105 pp.

Boehm, D.W., (2012): “Dry Deep and Mass Mixing – current Methods and Applications”. Deep soil mixing specialty short course, forth International conference on Grouting and Deep Mixing, Marriott New Orleans, LA February 16-18, 2012.

Borel, S. (2007): Soil mixing innovations: Geomix, SpringSol and Trenchmix. Presentation at Joint BGA/CFMS meeting, London

Borel, S. (2012): “Deep Mixing Equipment: Solétanche Bachy” Deep Mixing short course, International Symposium on Recent Research, Advances & Execution Aspects of Ground Improvement Works, Brussels, Belgium 30 Maggio - 1 Giugno, 2012.

Brandl, H. (1999): “Long-Term Behaviour of Soils Stabilised with Lime and With Cement.” Proceedings of Geotechnics for Developing Africa, Durban, pp. 219-232 (cited in Åhnberg, 2003).

Bringiotti, M. (2010): "Geotecnica & macchine da perforazione. Metodologie ed innovazioni". Libro edito da PEI, 752 pp.

Bruce, D.A., Bruce, M.E.C., DiMillio, A.F.. (2000): "Deep Mixing: QA/QC and Verification Methods." Grouting Soil Improvement, Geosystems Including Reinforcement. Proceedings of the 4th International Conference on Ground Improvement Geosystems. Finnish Geotechnical Society, Helsinki, Finland, Giugno 7-9, pp. 11-22.

Bruce, D. and Bruce M., (2003): "The Practitioner's Guide to Deep Mixing" Proceedings of the Third International Conference on Grouting and Ground Treatment, New Orleans, ASCE Special Publication, Vol. 1, pp. 474-488.

Bruce, D.A., Cali., P.R. (2005): "State of Practice Report: Session 3 - Design of Deep Mixing Implications," International Conference on Deep Mixing, Swedish Geotechnical Institute, Stockholm Sweden, 23 - 25 Maggio, 12 pp.

Bruce, D. (2011): "Deep Mixing Methods used for levee and dam remediation: an updated classification for U.S. Practice". The association of state dam safety officials- Dam safety conference- Washington D.C. 25-29 Settembre 2011.

Bruce, D., (2012): "The Deep Mixing Methods - background and history of usage in U.S.". Deep soil mixing specialty short course, forth International conference on Grouting and Deep Mixing, Marriott New Orleans, LA February 16-18, 2012.

Burke, G.K., Sehn, A.L. (2005): "An analysis of single axis wet mix performance". Proc. Int. Conf. On Deep Mixing - Best Practice and Recent Advances. Swedish Deep Stabilization Research Centre, Stockholm: 41-46.

Cecchi A. (2010): "Prove di laboratorio per trattamenti di Deep Mixing", Tesi di Laurea triennale, Relatore Prof. Grisolia, Correlatore Ing. Marzano.

Chu, J., Varaksin, S., Klotz, U., Mengé, P., (2009): " Construction Processes" Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, M. Hamza et al. Eds, Alexandria, Egitto, 5-9 Ottobre 2009.

CDIT, Coastal Development Institute of Technology (2002): "The Deep Mixing Method - principle, design and construction," A.A. Balkema Publishers, Lisse, Abingdon, Exton (PA), Tokyo, p. 123.

Cement Deep mixing Association of Japan (1994): "Publication of CDM Association of Japan", Tokyo, pp. 1-94 (in Japanese) (citato in Porbaha, 2000).

Danisi C. M. (2012): "La tecnica del Deep Mixing per applicazioni ambientali", Tesi di Laurea Specialistica, Relatore Prof. Grisolia, Correlatore Ing. Leder.

Day, S. R. and Ryan, C. R. (1995): "Containment, Stabilisation and treatment of contaminated soils using in situ soil mixing" ASCE Geotechnical Special Publication, 46, Characterisation, Containment, Remediation, and Performance in Environmental Geotechnics (Geoenvironment 2000) 1349-1365.

Denies, N. and Van Lysebetten, G. (2012a): "General Report Session 4 – Soil Mixing 2 – Deep Mixing" International Symposium on Recent Research, Advances & Execution Aspects of Ground Improvement Works, Brussels, Belgium 30 Maggio - 1 Giugno, 2012.

Denies, N., Huybrechts, N., De Cock, F., Lameire, B., Vervoort, A., Maertens, J. (2012b): “Mechanical characterization of Deep Soil Mix material – procedure description”. International Symposium on Recent Research, Advances & Execution Aspects of Ground Improvement Works, Brussels, Belgium 30 Maggio - 1 Giugno, 2012.

Deschamps, R., (2012): “An overview of the Cutter Soil Mixer and its application”. Deep soil mixing specialty short course, forth International conference on Grouting and Deep Mixing, Marriott New Orleans, LA February 16-18, 2012.

DGSSS, EuroSoilStab, (2001): “Design Guide: Soft Soil Stabilization.” Development of Design and Construction Methods to Stabilize Soft Organic Soils. CT97-0351. Project No.: BE 96-3177 pp. 94.

EuroSoilStab (2002): “Design guide: soft soil stabilisation. EuroSoilStab: development of design and construction methods to stabilise soft organic soils”. Building Research Establishment Press, ISBN: 978-1-86081-599-7.

Filz, G.M., Hodges, D.E., Weatherby, D.E., and Marr, W.A. (2005): “Standardized Definitions and Laboratory Procedures for Soil-Cement Specimens Applicable to the Wet Method of Deep Mixing,” Innovations in Grouting and Soil Improvement, GSP 136, ASCE, Reston, Virginia, 13 p.

Filz, G., Adams, T., Navin, M., Templeton, A.E., (2012): “Design of Deep Mixing for Support of Levees and Floodwalls” Forth International conference on Grouting and Deep Mixing, Marriott New Orleans, LA February 16-18, 2012.

GeoTesting Express (1996): “Geotechnical Tests on Soil Cement Mix for Central Artery/Tunnel project”. GeoTesting Express, final report to Bechtel/Parsons Brinckerhoff (cited in Porbaha et al., 2000).

Gerressen, F.W. (2012): “Deep Mixing Equipment: Bauer” Deep Mixing short course, International Symposium on Recent Research, Advances & Execution Aspects of Ground Improvement Works, Brussels, Belgium 30 Maggio - 1 Giugno, 2012.

Grisolia, M., Marzano, I.P., De Lentinis, D., Leder, E. (2010): “Performance of CSM stabilised soils in geotechnically complex formations”. Proc. Geotechnical challenges in megacities. 7-10 Giugno 2010.

Hayashi, H., and Nishikawa, J., (1999): “Mixing efficiency of dry jet mixing methods applied to peat soft ground” Proc. Int. Conf. on Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization, Stockholm, 333-338.

Hayashi, H., Nishikawa, J., Ohishi, K., Terashi, M. (2003): “Field observation of long-term strength of cement treated soils” Proceeding of the 3rd International Conference on Grouting and Ground Treatment. ASCE. New Orleans, USA, pp. 598-609.

Ismail, M.A., Joer, H.A. and Randolph, M.F., (2000) : “Sample Preparation Technique for Artificially Cemented Soils,” Geotechnical Testing Journal, ASTM, Vol. 23, pp. 171-177.

Hazarika, H., Yasuhara, K., Kikuchi, Y., Karmokar, A.K., Mitarai, Y. (2010): “Multifaceted potential of tire-derived three dimensional geosynthetics in geotechnical

applications and their evaluation”, *Geotextiles and Geomembranes* 28, 2010, pp. 303 - 315.

Hoikkala, S. Leppänen, M. and Lahtinen, P. (1996): “Mass stabilization of peat in road construction”. Proc. 12th Nordic Geotechnical Meeting, Reykjavik, 391-395.

Humphrey, D.N. (2003): “Civil Engineering applications of tire shreds”. Report, California Intergrated Waste Management Board. California Environmental Protection Agency.

Jacobson, J.R., Filz, G., Mitchell, J.K. (2005): “Factors Affecting Strength of Lime-Cement Columns Based on a Laboratory Study of Three Organic Soils” International Conference on Deep Mixing - Recent Advances and Best practice, Stockholm, Sweden, 23-25 Maggio 2005.

JGS 0821-00 (2000): “Practice for Making and Curing Stabilised Soil Specimens Without Compaction” (Translated version). Geotechnical Test Procedure and Commentary, Japanese Geotechnical Society.

JIS A 1216-09 (2009): “Method for unconfined compression test of soils”. Japanese Geotechnical Society.

Kikuchi, Y., Nagatome, T., Mitarai, Y. (2007): “Change of engineering properties of cement treated clay by mixed with tire chips”, Proc. Int. Workshop on Scrap Tire Derived Geomaterials – Opportunities and Challenges, Hazarika, Yasuhara Editors, Taylor & Francis Group, London, pp. 139 - 148.

Kitazume, M., Nakamura, T., Terashi, M., Ohishi, K. (2003): “Laboratory tests on long-term strength of cement treated soil” Proceeding of the 3rd International Conference on Grouting and Ground Treatment. ASCE. New Orleans, USA, pp. 586-597.

Kitazume, M. & Nishimura, S., Terashi, M., Ohishi, K., (2009a): “International Collaborative Study Task 1: Investigation into Practice of Laboratory Mix Tests as Means of QC/QA for Deep Mixing Method” International Symposium on Deep Mixing & Admixture Stabilization, Okinawa, Japan, 19-21 May 2009. CD-ROM, IC-2.

Kitazume, M., Ohishi, K., Nishimura, S., Terashi, M., (2009b): “International Collaborative Study Task 2 Report: Interpretation of comparative test program” International Symposium on Deep Mixing & Admixture Stabilization, Okinawa, Japan, 19-21 May 2009. CD-ROM, IC-3.

Kitazume, M., (2012): “An Application of Wet Grab Sampling to Quality Assurance of DEEP-Mixed Soil” forth International conference on Grouting and Deep Mixing, Marriott New Orleans, LA February 16-18, 2012.

Koehler, E.P. & Fowler, D.W. (2003): “Summary of Concrete Workability Test Methods”. Research Report, International Center for Aggregates Research The University of Texas at Austin.

Larsson S. (2005): “State of Practice Report – Execution, monitoring and quality control”. International Conference on Deep Mixing - Recent Advances and Best practice, Stockholm, Sweden, 23-25 Maggio 2005.

Lattarulo S. (2010): “Consolidamento di terreni vulcanici con miscele cementizie”, Tesi di Laurea triennale, Relatore Prof. Grisolia, Correlatore Ing. Marzano.

Leder E. (2008): “Il Cutter Soil Mixing per Interventi di messa in sicurezza- Ottimizzazione del trattamento in terreni complessi”, Tesi di Laurea Specialistica, Relatore Prof. Grisolia, Correlatore Dott. Scarapazzi.

Marconi C.A. e Mosca, D. (2010): “Stabilizzazione/solidificazione: una tecnica di trattamento per il riutilizzo dei fanghi di dragaggio e la gestione delle CDF (Confined Disposal Facilities) in ambito portuale”. Atti Workshop SiCon 2010, Roma, pp. 260-271.

Marzano I.P. (2009): “La tecnica del Soil Mixing per la cinturazione di siti contaminati”, Tesi di Dottorato, Sapienza Università di Roma.

Massarsch, K. and Topolnicki, M. (2005): “Regional Report: European Practise of Soil Mixing Technology.” Proceedings of the International Conference on Deep Mixing – Best Practice and Recent Advances, Deep Mixing’05, Stockholm, Sweden, May 23 – 25, pp. R19-R45.

Mosser, J.F. e Arcos, J.L. (2012): “Deep mixing columns with a spreadable tool” forth International conference on Grouting and Deep Mixing, Marriott New Orleans, LA February 16-18, 2012

Onimaru, S., Suzuki, Y., Hijikata, K., Sugiyama, T., Ishida, T., Saitoh, S. (2009): “ Aging Effects of High Strength Improved Soil by Deep Mixing Method”. International Symposium on Deep Mixing & Admixture Stabilization, Okinawa, Japan, 19-21 May 2009.

Osman, A. (2007): “Durability and mechanical properties of deep-mixed clays”, PhD Thesis, University of Cambridge, UK.

Perera, A.S.R., Al Tabbaa, A., Reid, J.M., Stegemann, J.A. (2005a): “State of practice report UK stabilisation/solidification treatment and remediation, part IV: testing and performance criteria”. In: The International Conference on Stabilisation/Solidification Treatment and Remediation, Cambridge, UK pp. 415-435.

Perera, A.S.R., Al Tabbaa, A., Reid, J.M., Johnson, D. (2005b): “State of practice report UK stabilisation/solidification treatment and remediation, part V: long-term performance and environmental impact”. In: The International Conference on Stabilisation/Solidification Treatment and Remediation, Cambridge, UK pp. 437-457.

Perera, A.S.R., Al Tabbaa, A., Johnson, D. (2005c): “State of practice report UK stabilisation/solidification treatment and remediation, part VI: quality assurance and quality control”. In: The International Conference on Stabilisation/Solidification Treatment and Remediation, Cambridge, UK pp. 459-468.

Porbaha, A. (1998): “State of the Art in Deep Mixing Technology, Part I: Basic Concepts and Overview.” Ground Improvement, 2, pp. 81-92.

Porbaha A., Tanaka H., Kobayashi M. (1998): “State of the Art in Deep Mixing Technology. Part II: Applications”. Ground Improvement, vol. 2, pp. 125-139.

Porbaha, A., Shibuya, S., Kishida, T., (2000): “State of the art in deep soil mixing technology. Part III: geomaterial characterization” Journal of Ground Improvement, Vol. 104, pp. 91-110.

prEN 14679 (2004): “ Execution of Special Geotechnical Works - Deep Mixing”. AFNOR/CEN TC 288: 2004-04. TC 288 WI 011. 50 p.

Richards, K. S., Reddy, K. R., (2010): “True triaxial piping test apparatus for evaluation of piping potential in earth structures”. *Geotechnical Testing Journal*, 33(1): 1-13.

Quasthoff, D. (2012): “Deep Mixing Equipment: Liebherr” Deep Mixing short course, International Symposium on Recent Research, Advances & Execution Aspects of Ground Improvement Works, Brussels, Belgium 30 Maggio - 1 Giugno, 2012.

Rasband, W.S. (1997-2012): “ImageJ”, U. S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, <http://imagej.nih.gov/ij/>

Saitoh, S., Suzuki, Y., Nishioka, S. E Okumura, R. (1996): “Required strength of cement improved ground”. *Grouting and Deep Mixing, IS-Tokyo '96, The Second International Conference on Ground Improvement Geosystems, Tokyo, Vol. 1, pp. 557-662.*

Sherwood, P. (1993): “Soil Stabilization with Cement and Lime.” Transport Research Laboratory, Department of Transport, London pp. 153.

Suzuki, K., Kawamura, S. (2009): “Compression strength of cement stabilized clay - two cases in the south of Vietnam”. *International Symposium on Deep Mixing & Admixture Stabilization, Okinawa, Japan, 19-21 May 2009.*

Takahashi H., Morikawa Y., Ichikawa E., Hayano K., Ohkusa Y. (2010): “Model tests on compressibility and bearing capacity of lean-mixed granular cement treated soil”. *Journal of Japan Society of Civil Engineers (2010,C) - vol. 66 No. 2 pp.236-249.*

Taki A., Bell R. A. (1997): “Booklet on soil-cement pile/column”. SCC Technology Inc.

Tashiro, C., Takahashi, H., Kanaya, M., Khrakida, I., Yoshida, R. (1977): “Hardening property of cement mortar adding heavy metal compounds and solubility of heavy metals from hardened mortar” *Cement and Concrete Research*, Vol. 7, No. 3, pp. 283-290.

Tattersall, G.H., & Banfill, P.F.G. (1983): “The Rheology of Fresh Concrete”. Marshfield, MA: Pitman Publishing.

Terashi, M. Okumura, T. and Mitsumoto, T. (1977): “Fundamental Properties of Lime Treated Soil (1st report).” Report of the Port and Harbour Research Institute, 16(1):3-28 (in Japanese) (citato in Coastal Development Institute of Technology, 2002).

Terashi, M. (2005): “Keynote Lecture: Design of deep mixing in infrastructure applications”. *Proc. Int. Conf. on Deep Mixing Best Practice and Recent Advances, Stockholm, 1, K25-K45.*

Terashi, M. & Kitazume, M., (2009): “Keynote Lecture: Current Practice and Future Perspective of QA/QC for Deep-Mixed Ground,” *International Symposium on Deep Mixing & Admixture Stabilization, Okinawa, Japan, 19-21 May 2009. CD-ROM, KL-3.*

Terashi, M., and Kitazume, M. (2011): “QA/QC for deep-mixed ground: current practice and future research needs”. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Ground Improvement 164(3): 161–177.*

Tocci F. (2012): “Procedure di laboratorio per la qualificazione di interventi di Deep Mixing”, Tesi di Laurea Specialistica, Relatore Prof. Grisolia, Correlatore Ing. Leder.

Van Impe, W.F., Verastegui Flores, R.D., Mengé, P., Van den Broeck, M. (2007): “Ground Improvement by Deep Mixing”. Taylor & Francis Group, LLC.

Weatherby, D. (2012): “Design and Construction Deep Soil Mixing Excavation Support Systems” Deep soil mixing specialty short course, forth International conference on Grouting and Deep Mixing, Marriott New Orleans, LA February 16-18, 2012.

Wilk, C. (2012): “Solidification/Stabilization Treatment of Contaminated Soil Using Soil Mixing Techniques” Deep soil mixing specialty short course, forth International conference on Grouting and Deep Mixing, Marriott New Orleans, LA February 16-18, 2012.

Yajima, J. & Kobayashi, N. (2008): “Isotropic pressure loop test and constant effective stress test on used tire rubber chips”. Scrap Tire Derived Geomaterials – Opportunities and Challenges. Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-46070-5.

Yano, S., Tokunaga, S., Shima M., Manimura, K. (1996): “Centralized control system of CDM Method”. Grouting and Deep Mixing, Proc. Of IS-Tokyo’96, The Second International Conference on Ground Improvement Geosystems, Tokyo, Maggio 14-17, pp. 681-687.

Yasuhara, K. (2007): “Recent Japanese experiences on scrapped tires for geotechnical applications”. Scrap Tire Derived Geomaterials – Opportunities and Challenges. Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-46070-5.

Yoshizawa, H., Okumura, R., Hosya, Y., Sumi, M. and Yamada, T. (1997): “JGS TC Report: Factors affecting the quality of treated soil during execution of DMM”. Proc. Of the IS-Tokyo’96, 2nd Int. Conf. on Ground Improvement Geosystems, Tokyo, 1996, 2, 931-937.