

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA SPECIALISTICA IN INGEGNERIA CIVILE

DICAM – Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali

TESI DI LAUREA

in

Costruzione di Strade, Ferrovie e Aeroporti L-S

**STUDIO DELLE PROCEDURE DI PROGETTAZIONE E
CONTROLLO TRADIZIONALI E INNOVATIVE PER LE
STABILIZZAZIONI A CALCE DI TERRENI ARGILLOSI**

CANDIDATO
Alessandro Magi

RELATORE:
Chiar.mo Prof. Giulio Dondi

CORRELATORI
Prof. Ing. Andrea Simone
Dott. Ing. Claudio Lantieri
Dott. Ing. Roberto Cancellieri

Anno Accademico 2010/11

Sessione II

PAROLE CHIAVE

Stabilizzazione a calce

Pre-qualifica

Mix Design

Controlli in Sito

Termocamera

INDICE

INTRODUZIONE	1
Capitolo 1 – STUDIO DEI TRATTAMENTI A CALCE DI TERRENI	
ARGILLOSI	3
1.1 Materiali che compongono la miscela terra-calce	3
1.1.1 Argilla.....	3
1.1.1.1 Classificazione delle argille.....	6
1.1.2 Calce	8
1.1.2.1 Calce idraulica.....	10
1.1.3 Acqua.....	10
1.2 Effetti del trattamento a calce	10
1.2.1 Effetti microscopici	11
1.2.2 Effetti macroscopici.....	12
1.3 Ambiti stradali di utilizzo dei trattamenti a calce	15
1.4 La norma <i>UNI 14227-11 (2006): Terra trattata con calce</i>.....	18
1.5 Panoramica della ricerca	19
1.5.1 Procedura di progettazione e controllo di un trattamento a calce.....	19
1.5.2 Attività di ricerca specifica: studio della reazione esotermica.....	23
Capitolo 2 - PRE-QUALIFICA DEI MATERIALI	25
2.1 Campionamento e riduzione dei campioni.....	28
2.2 Classifica del terreno	28
2.2.1 Analisi granulometrica per setacciatura.....	29
2.2.2 Limiti di Atterberg.....	30
2.3 Caratteristiche fisiche.....	30
2.3.1 Prova dell'equivalente in sabbia.....	30
2.3.2 Prova al blu di metilene	31
2.4 Caratteristiche chimiche	31
2.4.1 Contenuto di sostanze che influenzano il trattamento a calce	31
2.4.2 Contenuto iniziale di calce.....	32
2.4.3 Pre-qualifica della calce.....	33

2.5 Schede Tecniche relative alla procedura di pre-qualifica.....	34
2.5.1 Campionamento in sito	34
2.5.2 Riduzione del campione in porzioni di prova.....	36
2.5.3 Calcolo dell'umidità in laboratorio.....	39
2.5.4 Analisi granulometrica per setacciatura.....	41
2.5.5 Determinazione dei limiti di Atterberg con il metodo di Casagrande	45
2.5.6 Determinazione dei limiti di Atterberg attraverso il metodo con punta conica.....	47
2.5.7 Prova dell'equivalente in sabbia.....	51
2.5.8 Prova del blu di metilene	53
2.5.9 Contenuto di sostanze organiche	55
2.5.10 Percentuale di sostanze organiche	56
2.5.11 Contenuto di sostanze solubili in acido	58
2.5.12 Contenuto iniziale di calce.....	60
2.5.13 Pre-qualifica della calce: contenuto di ossido di calcio.....	62
2.5.14 Pre-qualifica della calce: contenuto di calce libera nelle calce aeree.....	63
2.6 Attività di Ricerca inerenti alla Pre-qualifica dei materiali	64
2.6.1 Scheda di ricerca: <i>Pre-qualifica dei materiali</i>	65
Capitolo 3 – STUDIO DELLA MISCELA.....	67
3.1 Miscelazione	69
3.2 Il costipamento delle terre in laboratorio.....	70
3.2.1 Costipamento con apparecchiatura Proctor	70
3.2.2 Costipamento con Pressa Giratoria.....	73
3.3 Parametri meccanici.....	77
3.3.1 Indice di portanza immediata <i>IPI</i>	77
3.3.2 Indice di portanza <i>CBR</i>	78
3.3.3 Rigonfiamento lineare	79
3.3.4 Rigonfiamento volumetrico	79
3.3.5 Resistenza a compressione	80
3.4 Schede tecniche relative alla fase di studio della miscela.....	81
3.4.1 Procedimento operativo per la realizzazione dei provini.....	81
3.4.2 Costipamento con attrezzatura Proctor	83
3.4.3 Costipamento con Pressa Giratoria.....	86
3.4.4 Calcolo dell'indice di portanza immediata	89
3.4.5 Calcolo dell'indice di portanza <i>CBR</i>	91

3.4.6	Calcolo del rigonfiamento lineare	93
3.4.7	Calcolo del rigonfiamento volumetrico	95
3.4.8	Calcolo della resistenza a compressione.....	98
3.4.9	Procedura per la preparazione dei provini per lo studio dell'assorbimento.....	100
3.5	Attività di Ricerca inerenti allo studio della miscela.....	102
3.5.1	Studio di comparazione tra i metodi di costipamento delle terre.....	103
3.5.1.1	Scheda di ricerca: <i>Confronto tra le modalità di compattazione</i>	111
3.5.2	Valutazione delle caratteristiche dinamiche	113
3.5.2.1	Scheda di ricerca: <i>Valutazione delle caratteristiche dinamiche</i>	121
3.5.3	Assorbimento dell'acqua di reazione.....	122
3.5.3.1	Scheda di ricerca: <i>Valutazioni inerenti all'assorbimento dell'acqua di reazione</i>	124
Capitolo 4 – PROCEDURE IN SITO PER IL CONTROLLO <i>PRE, IN</i>		
<i>ITINERE E POST LAVORAZIONI</i>.....		
4.1	Operazioni e relativi controlli.....	127
4.1.1	Approvvigionamento e stoccaggio della calce	127
4.1.2	Scarificazione del suolo naturale	128
4.1.3	Controllo dell'umidità in sito del terreno non trattato	129
4.1.4	Spandimento della calce	130
4.1.4.1	Controllo del dosaggio	131
4.1.5	Miscelazione terreno-calce	131
4.1.5.1	Verifiche e controlli all'atto della miscelazione.....	132
4.1.6	Costipamento e regolarizzazione dello strato trattato.....	135
4.1.6.1	La compattazione tradizionale.....	136
4.1.6.2	La compattazione intelligente.....	140
4.1.7	Controlli sullo strato trattato.....	144
4.1.8	Controlli della densità in sito e dello spessore.....	144
4.1.9	Controllo della portanza	148
4.1.9.1	Controlli tradizionali per la valutazione della portanza.....	148
4.1.9.2	Controlli innovativi per la valutazione della portanza.....	153
4.1.10	Protezione e maturazione degli strati lavorati.....	159
4.2	Schede tecniche relative a controlli e verifiche	161
4.2.1	Controllo dell'umidità in sito.....	161
4.2.2	Controllo dell'umidità in sito con Adek Percometer	163

4.2.3	Controllo del dosaggio di calce	164
4.2.4	Grado di polverizzazione.....	165
4.2.5	Costipabilità mediante MCV	166
4.2.6	Compattazione intelligente e controllo continuo della compactazione	168
4.2.7	Analisi termica mediante sistema Pave-IR.....	169
4.2.8	Controllo dello spessore per reazione all'agente chimico	170
4.2.9	Controllo della densità in sito	171
4.2.10	Densità e umidità in sito attraverso metodo dell'impedenza elettrica	172
4.2.11	Verifiche in sito con Grounding Penetrating Radar.....	174
4.2.12	Prova di carico con piastra.....	176
4.2.13	Portanza con Falling Weight Deflectometer.....	178
4.2.14	Portanza con Light Falling Weight Deflectometer	179
4.2.15	Valutazione della rigidità del terreno con <i>Clegg Impact Soil Tester</i>	181
4.2.16	Caratteristiche meccaniche con Dynamic Cone Penetrometer	182
4.2.13	Portanza in sito con <i>CBR</i> dinamico	184
4.3	Attività di ricerca relativa a operazioni e controlli in sito	186
4.3.1	Attività di ricerca preliminari	189
4.3.2	Sperimentazioni sull'utilizzo di dispositivi LFWD	193
4.3.3	Confronto tra i metodi di compactazione intelligente e test con LFWD.....	200
4.3.4	Utilizzo dei sistemi IC – CCC integrati a prove deflettometriche	203
4.3.5	Scheda di Ricerca: <i>Procedure in sito per il controllo PRE, IN ITINERE e POST lavorazioni</i>	208

Capitolo 5	– STUDIO SPERIMENTALE DELLA REAZIONE ESOTERMICA.....	211
5.1	Analisi in laboratorio della temperatura interna con strumentazione classica	211
5.2	Sperimentazione innovativa sull'analisi superficiale della temperatura	214
5.2.1	La termocamera a infrarossi	215
5.3	Studio degli andamenti interno e superficiale della temperatura in laboratorio.....	220
5.3.1	Fasi della sperimentazione.....	220
5.3.2	Terreno analizzato	223
5.3.2.1	Pre-qualifica del materiale.....	224

5.3.3	Risultati sperimentali ottenuti.....	233
5.3.3.1	Prima fase: <i>Controllo della temperatura sulla miscela di progetto</i>	233
5.3.3.2	Seconda fase: <i>Controllo della temperatura su miscela a contenuto variabile di calce ed umidità</i>	236
5.3.4	Conclusioni sulla sperimentazione in laboratorio.....	263
5.4	Studio sperimentale della reazione esotermica superficiale in sito.....	269
5.4.1	Primo Sito visitato: Borgo Panigale (Bo), 11/04/2011	270
5.4.1.1	Esiti della visita al sito di Borgo Panigale.....	271
5.4.2	Secondo sito: Granarolo dell'Emilia, 25/07/2011	273
5.4.2.1	Risultati ottenuti dalla sperimentazione in sito presso Granarolo dell'Emilia	284
5.5	Conclusioni dell'attività sperimentale	290
5.6	Scheda di ricerca: <i>Studio della reazione esotermica</i>.....	293
 CONCLUSIONI		 295
 BIBLIOGRAFIA		 307

INTRODUZIONE

Negli ultimi decenni, grazie all'incremento demografico e alle trasformazioni economiche, lo stile di vita ha imposto un ruolo rilevante alle infrastrutture e un aumento del traffico veicolare e dell'impatto sociale delle problematiche ad esso correlate.

Si è dunque rafforzata l'esigenza di nuove infrastrutture e di una valida gestione del patrimonio stradale esistente, al fine di soddisfare le sempre crescenti richieste prestazionali, anche in termini ambientali e di sicurezza.

Le pavimentazioni stradali risultano maggiormente sollecitate rispetto al passato ma devono comunque garantire una vita utile adeguata, che è fortemente condizionata dalla capacità portante e dalla qualità del sottofondo e degli strati più profondi.

Il terreno presente sul luogo di inserimento della pavimentazione spesso può non possedere i requisiti per l'utilizzo nella costruzione di questi strati; in passato la soluzione era costituita dalla sostituzione di questo terreno con materiale di cava opportunamente scelto.

Le politiche economiche e ambientali che si sono sviluppate negli ultimi anni prevedono la riduzione dell'utilizzo di materiale sostitutivo e hanno dato impulso allo sviluppo di metodologie alternative come la stabilizzazione del terreno in sito con leganti idraulici (calce e/o cemento).

Le tecniche di stabilizzazione del terreno con leganti idraulici sono numerose e tutte portano al miglioramento delle resistenze meccaniche e della durabilità a breve e a lungo termine, sulla base del quantitativo di legante inserito nel terreno.

Tale studio ha come oggetto il trattamento a calce di terreni argillosi e si pone all'interno della convenzione di ricerca DICAM – Strade e la ditta CGS Group S.p.A. che ha come obiettivo lo studio e il miglioramento di questa particolare metodologia.

Grazie all'analisi dei precedenti studi inseriti nella stessa convenzione, alla ricerca bibliografica e allo studio della normativa nazionale e straniera e delle pratiche esecutive si è definita una procedura completa per la realizzazione di questo metodo di trattamento dei terreni.

La procedura creata prevede due fasi di laboratorio, finalizzate a qualificare i materiali utilizzati (terreno, acqua e calce) ed a stabilire l'idoneità del trattamento e i contenuti di

acqua e calce per ottenere un prodotto finale ottimale, ed una fase in sito in cui vengono effettuate le operazioni e i controlli prima, durante e al termine del trattamento.

Per ciascuna delle tre fasi è stato definito il procedimento da seguire, specificando le prove da effettuare, le attrezzature necessarie, i riferimenti normativi e i risultati finali da ottenere per poter proseguire con la fase successiva.

Le prove di laboratorio e le verifiche in sito sono descritte in apposite schede tecniche che prendono spunto dalle normative di riferimento e dall'esperienza pratica. I riferimenti normativi presenti nella dissertazione sono aggiornati alle ultime versioni delle norme considerate.

Si è previsto, oltre a prove tradizionali e standardizzate, l'utilizzo di procedure e apparecchiature innovative; alcune di queste sono più affermate nella pratica comune, altre sono ancora in fase di sperimentazione o di attestazione della propria utilità in questo specifico campo.

In questo ambito è inserita la parte di ricerca specifica svolta e riportata nell'ultimo capitolo di questo studio, che ha visto la sperimentazione dell'uso della tecnica delle immagini ad infrarossi per effettuare valutazioni qualitative sul trattamento a calce, sfruttando la produzione di calore dovuta alla reazione chimica che si instaura durante la miscelazione dei materiali.

La sperimentazione comprende prove in laboratorio e in sito attraverso l'utilizzo di una termocamera a infrarossi denominata FLIR P620.

Ponendosi nella fase conclusiva della convenzione DICAM – Strade e CGS Group S.p.A. questo studio fornisce delle schede di ricerca in cui sono sintetizzati i risultati delle varie attività di ricerca svolte internamente al DICAM sul trattamento a calce di terreni e su argomenti correlati ad esso.

Capitolo 1 – STUDIO DEI TRATTAMENTI A CALCE DI TERRENI ARGILLOSI

L'ingegneria stradale prevede applicazioni in ambiti territoriali in cui spesso i materiali presenti non soddisfano le caratteristiche prestazionali richieste; per questo motivo nella realizzazione di nuove infrastrutture è consuetudine prevedere scavi considerevoli per rimuovere il materiale in sito ed utilizzare inerti da cave in sostituzione di esso.

Tuttavia la limitata disponibilità degli inerti sostitutivi, i costi e le limitazioni ambientali sempre più in crescita hanno evidenziato la necessità di utilizzare i materiali naturali pre-esistenti negli strati più profondi delle pavimentazioni stradali.

La maggior parte dei terreni è priva di caratteristiche uniformi a causa di mancata compattazione, bassa capacità portante, elevata deformabilità e suscettibilità alla presenza di acqua.

I leganti idraulici come il cemento e la calce portano sensibili benefici ai terreni naturali altrimenti inadeguati all'utilizzo in ambito stradale, modificandone le caratteristiche fisiche e meccaniche e realizzando un consolidamento permanente del suolo.

Il trattamento a calce dei terreni argillosi è una delle metodologie più diffuse in questo settore, in quanto questo tipo di legante reagisce sia fisicamente che chimicamente con i terreni contenenti argille e fornisce miscele di ottime qualità. In questo capitolo introduttivo si analizzeranno i materiali che compongono la miscela, gli effetti del trattamento, gli ambiti di utilizzo ed i riferimenti normativi.

1.1 Materiali che compongono la miscela terra-calce

1.1.1 Argilla [1]

L'argilla è un sedimento non litificato estremamente fine, i cui granuli hanno dimensioni inferiori a 2 μm , costituito in prevalenza da minerali argillosi con cristalli di dimensioni colloidali, che chimicamente sono allumino-silicati idrati con altri ioni metallici.

I minerali argillosi appartengono alla classe dei fillosilicati, ovvero silicati caratterizzati da una struttura a strati a simmetria tetraedrica in cui ogni tetraedro tende a legarsi con altri tre tramite degli ossigeni ponte.

La formula chimica di questi particolari silicati è $(Si_2O_5)^-$. Generalmente sono teneri con basso peso specifico.

La maggior parte dei fillosilicati contengono ossidrili (OH^-) collocati all'interno degli anelli esagonali di tetraedri e vengono classificati in quattro gruppi principali in base alla struttura cristallografica:

- a due strati T-O (tetraedrico – diottaedrico), ad esempio **caoliniti**;
- a tre strati T-O-T (tetraedrico – diottaedrico – tetraedrico), ad esempio **montmorilloniti**;
- a quattro strati T-O-T-O (tetraedrico – diottaedrico – tetraedrico – triottaedrico), ad esempio **cloriti**;
- a strati misti, ad esempio illiti – montmorilloniti, le **caoliniti – montmorilloniti**, **illiti – cloriti – montmorilloniti**, le **cloriti-vermiculiti**.

I silicati possono formare coppie, anelli, nastri o sviluppi bidimensionali e tridimensionali di tetraedri e a ogni configurazione cristallografica corrispondono classi di minerali molto diversi.

I fillosilicati (“silicati a foglia”) presentano uno sviluppo bidimensionale dei tetraedri Silicio – Ossigeno. Si tratta di catene di tetraedri affiancate, unite fra loro sullo stesso piano a formare una maglia ad anelli generalmente di simmetria pseudo esagonale. In tre dimensioni (Fig. 1.1), la struttura cristallografica di un fillosilicato è costituita da piani bidimensionali di tetraedri a maglia ciclica (strati a T) sovrapposti a strati ottaedrici (strati O) costituiti da cationi, prevalentemente di Magnesio (Mg^{++}), Calcio (Ca^{++}), Sodio (Na^+), Potassio (K^+), Ferro (Fe^{+++}) e Alluminio (Al^{++}).

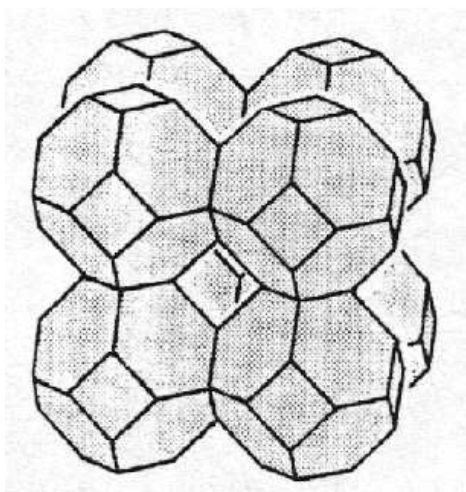


Fig. 1.1 - Struttura dei fillosilicati

I fillosilicati sono una classe molto numerosa con due sottoclassi principali: i minerali argillosi e le miche.

In base alla coordinazione fra gli strati T e O e al tipo di strato ottaedrico, derivano le combinazioni che definiscono i quattro gruppi di minerali argillosi esaminati precedentemente.

Gli ioni con carica positiva (cationi di silicio, alluminio, potassio, magnesio ecc..) occupano una posizione interna nel reticolo, mentre i gruppi ossidrilici o gli anioni di ossigeno (con carica negativa) occupano la parte esterna. La particella d'argilla quindi, pur essendo elettricamente neutra, presenta una carica negativa superficiale che permette l'interazione con l'acqua e con gli ioni che sono in essa.

D'altro canto l'influenza della carica elettrica è legata direttamente alla superficie della particella e quindi alla superficie specifica.

Pertanto risulta di notevole importanza per i minerali argillosi il parametro **superficie specifica**, che aiuta a capire il comportamento regolato sia dalle forze di massa (gravità e quindi peso proprio), sia da quelle di superficie.

E' evidente che quanto maggiore è la superficie specifica, tanto maggiori sono le forze di superficie. La caolinite ha una superficie specifica dell'ordine di 15 m²/g, l'illite dell'ordine di 80 m²/g e la montmorillonite dell'ordine di 800 m²/g; si tenga presente che la sabbia ha una superficie di 2 x 10⁻⁴ m²/g.

A causa delle cariche negative superficiali, vi è attrazione tra le particelle d'argilla e l'idrogeno delle molecole d'acqua, la forza di legame è inversamente proporzionale alla distanza tra le particelle.

L'insieme dello strato elettrico negativo superficiale della particella argillosa e dello strato elettrico positivo dell'acqua è detto doppio strato.

Nel loro insieme le forze di superficie sono costituite dalle forze di repulsione dovute in prevalenza alle cariche elettriche e dalle forze di attrazione di Van der Waals generate dal campo magnetico prodotto dal moto degli elettroni attorno ai nuclei.

Le mutue azioni di repulsione e di attrazione danno luogo ad una struttura dispersa, quando si ha prevalenza di azioni repulsive, o flocculata, quando prevalgono le azioni attrattive.

I minerali argillosi hanno caratteristiche fisico - chimiche peculiari che comportano notevoli capacità di assorbimento d'acqua, scambio ionico e fissazione di cationi.

Queste caratteristiche conferiscono al sedimento argilloso una sensibile plasticità, se miscelato con acqua, e refrattarietà, se disidratato.

Le argille, a causa della ridottissima dimensione dei granuli e dell'elevata capacità di assorbimento, sono terreni coesivi, ovvero terre le cui caratteristiche meccaniche dipendono dalla coesione fra i granuli (e quindi dallo stato di idratazione) piuttosto che dal reciproco attrito (che è praticamente ininfluenza).

Un materiale così sensibile alle condizioni ambientali è evidentemente di difficile impiego nelle costruzioni stradali. Occorre perciò trattarlo con dei leganti idraulici per migliorarne le caratteristiche meccaniche ed il comportamento nei confronti dell'acqua.

1.1.1.1 Classificazione delle argille

Un sistema di classificazione rappresenta un metodo per suddividere il terreno in gruppi e sottogruppi in accordo con il suo probabile comportamento.

Dal punto di vista prettamente dimensionale i terreni sono suddivisi, in tutte le teorie di classificazione attualmente in uso, in quattro classi:

- Ghiaia
- Sabbia
- Limo
- Argilla

Attualmente si utilizzano due sistemi di classificazione: il sistema *USCS* riportato in Italia nelle raccomandazioni *AGI* e il sistema *AASHTO*. Nel sistema *USCS*, sviluppato da Casagrande, le argille rientrano tra le terre a grana fine (passante al vaglio da 0,075 mm – n. 200 superiore al 50%) e come tutte le terre di questa categoria vanno classificate sulla base delle caratteristiche di plasticità, aiutandosi con il diagramma di Casagrande.

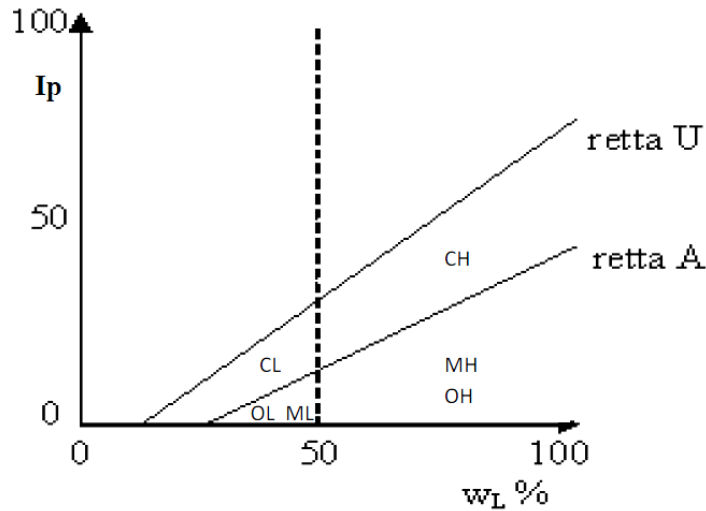


Fig. 1.1 – Diagramma di plasticità

L'area del diagramma è suddivisa in settori tramite due rette le cui equazioni sono:

- Retta U: $I_p = 0,9 (w_L - 20)$
- Retta A: $I_p = 0,73 (w_L - 20)$

La retta A divide i limi dalle argille ed i materiali organici (torbe) dagli inorganici; i punti sopra la retta A rappresentano le argille, fanno eccezione le argille e i limi organici che cadono sotto di essa.

La retta U nel diagramma di plasticità costituisce il limite superiore del limite di liquidità e dell'indice di plasticità; vicino a questa linea ricadono argille attive come la bentonite.

Dell'altro sistema di classificazione *AASHTO* si farà una breve descrizione nel capitolo successivo.

Un terreno è comunemente composto da frazioni di particelle di diverse dimensioni; per questo motivo esso dovrà essere soggetto a setacciatura al fine di studiarne la granulometria. L'analisi granulometrica del terreno permette di individuare quali sono le diverse frazioni costituenti il materiale, fornendo così la corrispondente curva rappresentativa dell'assortimento granulometrico del materiale, la quale, a seconda della dispersione delle parti componenti, può essere continua, discontinua con prevalenza di fine oppure discontinua con prevalenza di grosso.

Nei prossimi capitoli si farà sempre riferimento a terreni a grana fine, in particolare a terreni di natura argillosa. Questi terreni modificano il proprio comportamento a

seconda del contenuto d'acqua presente: all'aumentare del contenuto d'acqua aumenta anche la porosità del terreno e quindi i grani si distanziano tra loro modificando la loro mutua interazione (diminuisce lo sforzo tangenziale tra essi esercitato).

Per uno stesso tipo di argilla possono essere distinti diversi stati di comportamento e il passaggio dall'uno all'altro avviene in corrispondenza di un determinato valore del contenuto d'acqua. Questi valori possono cambiare da un tipo di argilla a un altro; per questo motivo un metodo valido per la classificazione dei terreni argillosi è valutare i limiti di Atterberg.

I limiti di Atterberg rappresentano dei contenuti d'acqua determinati in laboratorio con procedure standardizzate che meglio rappresentano i passaggi critici di comportamento del terreno. Saranno trattati nello specifico nel prossimo capitolo.

1.1.2 Calce [2]

La calce è il legante che presenta i risultati migliori nel trattamento dei terreni argillosi.

Calce è un termine molto generico che comprende tutti i prodotti e le forme chimiche e fisiche sotto le quali possono presentarsi gli ossidi e/o idrossidi di calcio e/o magnesio. Nell'ambito specifico delle calci da costruzione, con “calce” o meglio “calce aerea” si indicano due prodotti ottenuti dalla cottura di calcari puri, ad alto contenuto di carbonato di calcio:

- la calce *viva*, costituita prevalentemente da ossido di calcio;
- la calce *idrata* o *spenta*, costituita prevalentemente da idrossido di calcio.

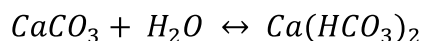
Dalla cottura dei calcari dolomitici e delle dolomie, che contengono oltre al carbonato di calcio anche il carbonato di magnesio, si ottiene ancora ‘calce viva’ e successivamente ‘calce spenta’, che conterrà insieme all'ossido/idrossido di calcio, l'ossido e l'idrossido di magnesio.

Quando si vuole verificare la presenza del solo calcio, oppure del calcio e del magnesio insieme, si ricorre agli aggettivi ‘calcico’ e ‘magnesiaco’ o ‘dolomitico’.

L'impiego di termini quali aerea, viva, caustica, spenta, estinta, calcica, magnesiaca, dolomitica, consente dunque di distinguere diversi prodotti, tutti riferiti alle calci aeree da costruzione, così come vengono definiti dalla norma europea **UNI EN 459-1 (2010): Calci da costruzione**. Esistono diversi tipi di leganti ognuno adatto ad un determinato tipo di utilizzo, per questo e altri motivi le calci ‘aeree’ qui analizzate non vanno

confuse con le ‘calci idrauliche’, leganti assolutamente diversi e i cui meccanismi di funzionamento sono molto simili a quelli del cemento.

Il carbonato di calcio è presente in quasi tutte le rocce di formazione geologica appartenente al periodo cambrico ed è prevalentemente di natura organogena, mentre una parte minore si è formata per precipitazione di soluzioni acquose sovra sature contenenti bicarbonato di calcio secondo la relazione:



Il carbonato di calcio può presentarsi in quattro modificazioni la cui stabilità aumenta secondo l'ordine: calcio amorfo, vaterite, aragonite, calcite, tuttavia solo le ultime due rivestono interesse nella formazione delle rocce. Con il termine calcare si comprendono altresì anche le dolomie, rocce aventi come componente principale il carbonato di magnesio, presente in natura nelle due modificazioni di dolomite ($CaMg$) e magnesite ($MgCO_3$).

La temperatura di cottura del calcare che porta alla formazione di ossido di calcio (calce viva) deve essere di circa 900°C. L'effetto dell'alta temperatura porta il carbonato di calcio (o di magnesio) a dissociarsi formando ossido di calcio (o di magnesio) chiamato anche calce viva.

Per poter utilizzare la calce come legante, tuttavia, è necessaria l'aggiunta di acqua; tale processo è denominato spegnimento della calce e come risultato finale fornisce la formazione di idrossido di calcio (o di magnesio). Gli idrossidi di calcio e magnesio prendono il nome di calce idrata se l'acqua impiegata è quella stechiometrica, mentre se la quantità di acqua è in eccesso (1,5 m³ per 500 kg di calce) si ottiene una pasta plastica e untuosa, detta grassello; se invece l'acqua è in forte eccesso si ottiene una sospensione di idrato di calce in acqua detto latte di calce.

A seconda del comportamento allo spegnimento, una calce può essere definita grassa o magra: in genere un forte sviluppo di calore e un notevole aumento di volume sono ritenuti indicativi per definire una calce grassa, in genere ottenuta con materiali più puri. Una calce grassa deve avere una resa in grassello di almeno 2,5 m³/t, una magra invece 1.5 m³/t.

Si osserva che gli idrossidi di calcio e magnesio miscelati con acqua creano una massa plastica capace di indurire all'aria combinandosi con il biossido di carbonio.

1.1.2.1 Calce idraulica

Le calci idrauliche differiscono da quelle aeree appena descritte per origine, chimismo e processi di presa ed indurimento. La calce idraulica si distingue dalla calce aerea perché i suoi impasti possono indurire a contatto con l'acqua.

L'idraulicità garantisce un graduale indurimento anche in condizioni in cui sono limitate le possibilità di scambio con l'anidride carbonica presente nell'aria, che consente le reazioni d'indurimento della calce aerea.

Le calci idrauliche sono materiali da costruzione tradizionali e costituiscono una tappa fondamentale della storia dei leganti impiegati in architettura prima dell'avvento del cemento Portland.

1.1.3 Acqua

L'acqua eventualmente utilizzata per conferire agli impasti terra-calce il tenore di umidità ottima di costipamento e per mantenere questo tenore durante l'eventuale periodo di maturazione degli strati compattati deve essere dolce, limpida, esente da impurità dannose (oli, acidi, alcali, cloruri, solfati, materie organiche) e da qualsiasi altra sostanza nociva alle reazioni terra-calce.

1.2 Effetti del trattamento a calce

Il trattamento a calce produce una modificazione strutturale rispetto al materiale originario con conseguenti variazioni del comportamento in presenza di acqua e con accrescimento lento nel tempo delle caratteristiche di resistenza meccanica.

Si osservano effetti microscopici che riguardano la reazione chimica che si instaura subito dai primi istanti del processo e per questo motivo possono essere anche definiti effetti a breve termine ed effetti macroscopici, o anche a lungo termine, che non sono altro che le caratteristiche proprie, modificate, del prodotto finale.

1.2.1 Effetti microscopici

- *Reazioni di scambio cationico sulla superficie dei minerali di argilla*

Gli effetti a breve termine sono caratterizzati da un fenomeno di adsorbimento fisico degli ioni presenti nella soluzione acqua-calce sulle particelle di argilla e dalla conseguente primitiva formazione di composti silico-alluminati idrati con deboli caratteristiche leganti.

Tali leganti consentono una prima cementazione delle particelle di argilla, flocculate a causa dell'effetto modificante degli elettroliti sulla distribuzione delle cariche elettriche delle particelle stesse; microscopicamente ciò corrisponde agli effetti di primo momento.

La presenza nella soluzione acquosa di grosse quantità di ioni calcio o magnesio provenienti dalla dissociazione della calce consente, qualora vi siano materiali saturi di cationi scambiabili (H^+ , K^+ , Na^+), un processo di trasferimento dei cationi calcio (Ca^{++}) nelle posizioni occupate dagli altri ioni positivi che a loro volta passano in soluzione.

- *Fenomeni di agglomerazione delle particelle di argilla e distribuzione granulometrica [3]*

Le particelle inferiori a 2 μm (convenzionalmente definite argille), si trovano di norma in uno stato disperso nel quale sono plastiche e soggette a variazioni di volume al contatto con l'acqua. Una caratteristica delle argille è quella di essere in natura, per la loro struttura, allo stato colloidale. L'azione della calce produce la flocculazione e l'agglomerazione delle particelle di argilla modificandone la granulometria e aumentando l'indice dei vuoti della miscela.

La sostituzione in tali terreni dei cationi presenti (sodio, potassio, idrogeno) con gli ioni Ca^{++} , avente una maggiore capacità flocculante dei primi, produce una agglomerazione delle particelle che passano dallo stato disperso a quello flocculato. Nell'argilla "tal quale" i cristalli di argilla (fillosilicati) sono allineati e scorrono facilmente gli uni sugli altri; ciascun cristallo trattiene una notevole quantità d'acqua. Nell'argilla "trattata" i cristalli di argilla si dispongono reciprocamente con gli spigoli puntati verso le altre superfici piane (Fig. 1.3) ed il volume d'acqua trattenuto da ciascuna particella è ridotto.

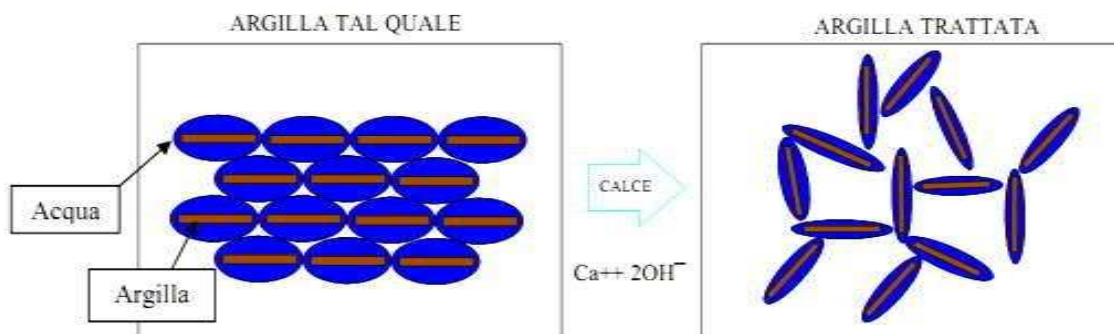


Fig. 1.3 – Fenomeno di agglomerazione delle particelle di argilla

- *Indice di plasticità e indici di Atterberg [4]*

L'indice di plasticità IP di una terra argillosa diminuisce significativamente dopo il trattamento con calce; il limite liquido LL , per cui a parità di contenuto d'acqua W_n il terreno passa dallo stato plastico a quello solido, cresce sensibilmente a causa del trattamento.

L'aggiunta di calce aumenta la lavorabilità del materiale, aumentando il campo di umidità nel quale il materiale presenta uno stato solido, da ricondursi ad una crescita del limite plastico LP della terra. Altrettanto accelerata è la diminuzione del campo di umidità nel quale la terra ha un comportamento plastico.

Essendo l'indice di plasticità combinazione lineare del limite liquido e di quello plastico ($IP = LL - LP$), la sua diminuzione può essere dovuta a andamenti diversificati dei due limiti.

La sensibilità del limite liquido e di quello plastico alla calce è da correlare alla qualità e quantità di cationi presenti nell'argilla trattata, cioè dipende dal tipo di argilla (illiti, montmorilloniti).

Si osserva anche un aumento del valore del limite di ritiro rispetto a quello del materiale originario.

1.2.2 Effetti macroscopici

- *Variazioni di umidità e volume*

La calce aggiunta al terreno capta le molecole d'acqua per completare l'idratazione; ciò comporta una diminuzione dell'umidità naturale dello strato. Il fenomeno è

particolarmente evidente qualora si impieghi calce viva il cui calore di idratazione provoca una sensibile evaporazione.

Il potenziale rigonfiamento delle terre coesive viene fortemente ridotto con il trattamento con calce; ciò è dovuto sia alla diminuzione dell'affinità all'acqua delle argille trattate, sia alla formazione di legami stabili nelle miscele i quali si oppongono agli aumenti di volume. Il ritiro connesso alla perdita di umidità nelle miscele terra-calce è un fenomeno di scarso rilievo; la calce migliora le caratteristiche delle argille originarie anche da questo punto di vista.

- *Caratteristiche del costipamento*

Gli effetti dell'aggiunta della calce al terreno sono:

- aumento del valore dell'umidità ottima;
- diminuzione del valore della densità massima del terreno (per ottenere valori di γ_s uguali variando la percentuale di calce è necessaria una maggiore energia di costipamento);
- appiattimento della curva Proctor.

L'entità con cui si manifestano i suddetti fenomeni non ha un andamento proporzionale al contenuto di calce.

Nella Fig. 1.4 sono riportate, a parità di energia di costipamento, alcune curve di addensamento di miscele terra – calce al variare del contenuto di calce.

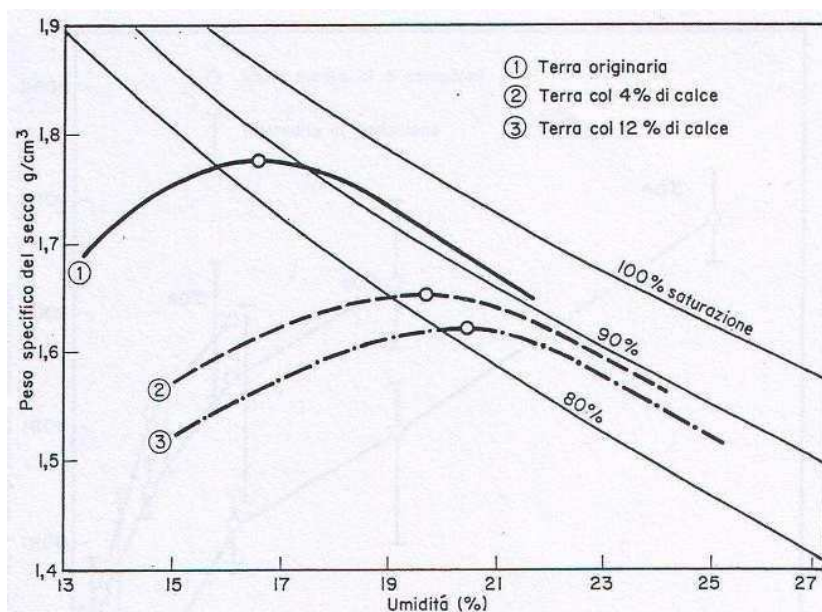


Fig. 1.4 – Influenza del contenuto di calce sulla compattazione di una terra

- *Caratteristiche meccaniche*

L'aggiunta di calce modifica la natura del terreno e quindi le sue intrinseche caratteristiche meccaniche. L'aspetto principale del trattamento a calce consiste nell'azione cementante che essa svolge. L'ossido di calcio migliora in generale le caratteristiche meccaniche del terreno sottoposto a trattamento. La causa di tale effetto è da attribuirsi in parte alla modificazione della natura del terreno, che si traduce in una variazione dei parametri meccanici intrinseci, ed in parte all'effetto legante che, a parità di altre condizioni, ne aumenta notevolmente il campo tensionale e limite. Tutto questo a discapito di una struttura "metastabile" soggetta ad importanti e repentine variazioni di volume, una volta superata la tensione di snervamento.

La miscelazione con calce induce cambiamenti profondi nella curva sforzi/deformazioni del materiale trattato ed incrementi sensibili nei valori della resistenza al taglio del materiale, aumentandone considerevolmente la coesione ed in parte anche l'angolo d'attrito interno (ϕ'). L'entità di tali incrementi dipende ovviamente dal tipo di materiale trattato, dalla temperatura e dai tempi della stagionatura.

- *Durabilità sotto l'azione dell'acqua e del gelo*

Prolungate immersioni in acqua non producono sensibili effetti negativi nelle miscele con calce, al contrario di quanto avviene nei materiali coesivi di partenza. Estese sperimentazioni realizzate negli Stati Uniti hanno mostrato che i rapporti tra le resistenze a compressione dei campioni prima o dopo lunghi periodi di immersione in acqua (8 giorni) sono risultati elevati e variabili tra il 70 e l'80%.

Gli effetti del gelo sui materiali trattati consistono in un aumento del volume e in una diminuzione delle resistenze meccaniche; peraltro, essi sono funzione del tipo di stagionatura del materiale prima del sopravvenire delle temperature inferiori allo zero.

Alcuni autori hanno riscontrato che i trattamenti con calce di terre reattive possono dispiegare, se sottoposti al gelo, proprietà di autoriparazione, nel qual caso la terra tende a recuperare la portanza con il tempo, quindi i danni prodotti durante il gelo invernale possono essere parzialmente o totalmente recuperati nei periodi in cui si abbiano condizioni climatiche favorevoli allo sviluppo dei legami resistenti.

- *Comportamento a fatica*

La risposta che il materiale fornisce ai carichi ripetuti assume interesse quando si intenda impiegare il trattamento con calce nella realizzazione di strati della sovrastruttura stradale. Dalle “curve di fatica” delle miscele con calce si ricava che le resistenze di queste, dopo cinque milioni di cicli, variano dal 41% al 66% della resistenza flessionale statica con un valor medio del 54%.

Ancora in merito alla capacità dei materiali trattati con calce di rispondere alle sollecitazioni a fatica, va osservato che questi materiali incrementano nel tempo le loro resistenze meccaniche mentre il livello delle sollecitazioni permane più o meno costante nel corso dell’esercizio. L’aumento della resistenza ultima contestuale alla diminuzione della sollecitazione, espressa come quota parte della resistenza al collasso, induce un allungamento della vita del materiale.

1.3 Ambiti stradali di utilizzo dei trattamenti a calce [5]

Questa tecnica può essere utilizzata in diversi strati del solido stradale, in particolare nei sottofondi, nei rilevati e negli strati profondi. Le possibilità di utilizzo sulle terre sono:

- *Bonifica dei sottofondi*

Il sottofondo è lo strato su cui poggia la struttura e nel quale le tensioni prodotte dai carichi transitanti sul piano di rotolamento assumono ancora valori significativi. Le caratteristiche fondamentali che un sottofondo deve possedere sono elevata rigidità, soddisfacente stabilità al passare del tempo, regolarità superficiale accettabile.

E’ abbastanza frequente, in Italia, imbattersi in sottofondi che presentino caratteristiche mediocri o scadenti essendo costituiti da materiali non conformi e dunque non idonei a fornire le necessarie garanzie di portanza e di stabilità sotto l’azione dei carichi e degli agenti atmosferici.

In questi casi si opera mediante un intervento che può realizzarsi sostituendo il materiale in sito con un congruo spessore di materiale di qualità. Questa operazione comporta una elevata onerosità economica e grave disturbo all’ambiente.

Nel caso in cui, invece, il materiale sia trattabile, esso può essere miscelato con calce, che per questi impieghi viene aggiunta in percentuali solitamente modeste (1,5 ÷ 2% in peso sul secco). Essa esplicando i cosiddetti “effetti a breve termine”, consentendo una

maggior lavorabilità della terra ed un immediato miglioramento delle condizioni di agibilità del cantiere. Qualora ci si trovi a trattare terre calcareo-argillose reattive (cioè ad elevato *IP*), a quegli effetti iniziali fanno seguito gli incrementi indotti dalle resistenze del materiale. Questi ultimi producono un sensibile miglioramento delle condizioni di esercizio del complesso struttura-sottofondo.

Il trattamento con calce dei terreni plastici di sottofondo comporta una diminuzione degli spessori dei costosi strati strutturali sovrastanti che ne giustifica ampiamente l'impiego.

Talvolta i vincoli di progetto rendono necessario poggiare il rilevato su suoli cedevoli che possono subire assestamenti inaccettabili alla luce delle finalità dello stesso.

Qualora non risulti possibile allontanare lo strato in cui si concentrano i cedimenti o apportare modifiche alla geometria d'asse, si tenta di stabilizzare il comportamento del terreno mediante varie tecniche. Tra queste di particolare interesse risulta essere la tecnologia dello slurry, cioè tramite l'utilizzo di colonne stabilizzanti. Consiste nell'impiego della calce sotto forma di miscela con acqua (già sperimentata in Italia e recentemente ripresa e sviluppata in Svezia e in Giappone) che perviene ad un sostanziale miglioramento della resistenza al taglio e delle caratteristiche di compressibilità del materiale d'appoggio, attraverso la realizzazione nello strato in questione, di colonne costituite da miscele di argilla e calce viva. Questo metodo, i cui risultati migliori sono stati ottenuti lavorando argille limose con modesto *IP*, risulta particolarmente appropriato al trattamento dei suoli in prossimità delle costruzioni esistenti o in presenza di scavi allorché occorre ridurre al minimo l'effetto di disturbo.

- *Costruzione di rilevati*

I rilevati sono manufatti in terra costituenti la gran parte della struttura del corpo stradale; per assolvere compiutamente alle loro funzioni essi debbono possedere scarpate stabili e subire nel tempo assestamenti modesti o comunque accettabili in relazione alle finalità dell'opera.

I fenomeni d'instabilità delle scarpate, che possono interessare tratti limitati o porzioni notevoli del manufatto, sono causati dalla insufficiente resistenza a taglio del terreno costituente; a sua volta tale scarsa resistenza alle sollecitazioni di taglio è da imputarsi alla natura dei terreni e/o alla loro non corretta messa in opera. La natura e l'entità dei

cedimenti di un rilevato risultano fortemente influenzati dal tipo di materiale costituente e dall'addensamento raggiunto, oltre che dalla natura del piano di appoggio.

In relazione alla natura delle terre impiegate nella costruzione dei rilevati, i capitolati d'appalto fissano, in genere con riferimento alla classifica AASTHO, le terre utilizzabili sia che queste provengano dagli scavi effettuati per eseguire l'opera stessa, sia che provengano dalle cosiddette cave di prestito. Le difficoltà nel reperimento delle terre tecnicamente idonee e la necessità ormai indifferibile di limitare l'impatto complessivo della strada sull'ambiente, concorrono a far ricercare un più elevato rendimento interno dei movimenti di terra del cantiere. Ciò è ottenibile anche mediante un più diffuso reimpiego attraverso l'uso delle tecniche di stabilizzazione con calce di quei materiali non conformi solitamente conferiti in discarica. Anche in questi casi le percentuali di calce da aggiungere vanno determinate caso per caso; in linea di massima esse oscillano tra l'1,5 ed il 3% in peso.

- *Costruzione degli strati profondi della struttura*

Gli impieghi delle stabilizzazioni con calce per quanto attiene alle strutture sono limitati agli strati di fondazione e, per certe miscele, a quelli di base.

Il materiale maggiormente utilizzato nella realizzazione delle fondazioni, in Italia, è lo stabilizzato granulometrico. L'uso di questo materiale è vincolato al rispetto di rigorosi limiti di accettazione e la sua messa in opera è controllata mediante la determinazione del Modulo di deformazione M_d del complesso "fondazione-sottofondo".

L'uso di miscele legate in fondazione permette di realizzare strutture notevolmente "bilanciate" nelle quali le rigidità dei singoli strati variano, senza sensibili discontinuità, con noti benefici in esercizio e dunque nella vita della struttura stessa.

Per lo strato di base il prezzo dei materiali bitumati e, soprattutto, l'adozione di norme di salvaguardia ambientale sempre più limitative impongono, con carattere di urgenza, il ricorso a strategie costruttive fondate sulla utilizzazione di materiali reperibili a costo contenuto e migliorabili con opportuni trattamenti. I requisiti richiesti ad uno strato di base inducono a limitare i trattamenti con calce alle sole terre "reattive" o ai prodotti a deciso comportamento pozzolanico miscelati con quantità modeste di inerti (20÷30% in peso), rilevando altresì l'esigenza che a queste miscele vengano sovrapposti strati bitumati di congruo spessore.

1.4 La norma UNI 14227-11 (2006): Terra trattata con calce

E' la norma di riferimento per il trattamento a calce delle terre e si applica ai terreni naturali utilizzabili nella costruzione di strade, aeroporti e altre zone soggette a traffico. Vengono specificati i requisiti per la classificazione e composizione delle prestazioni in laboratorio delle miscele terra-calce.

Il trattamento a calce è possibile in due diverse modalità:

- *Miglioramento*: creazione di una miscela terra-calce che incrementi le prestazioni meccaniche del terreno al fine di agevolare la lavorazione con mezzi meccanici, di una maggior tolleranza dei carichi dovuti al traffico dei mezzi pesanti di cantiere, di una corretta compattazione a strati e di preparare il suolo a successivi interventi strutturali.
- *Stabilizzazione*: sensibile miglioramento delle prestazioni meccaniche del terreno, soprattutto riguardo all'azione dell'acqua e del gelo, durante tutta la vita utile dell'opera.

La miscela, per essere ritenuta idonea, deve soddisfare determinati requisiti, i cui valori sono riportati in varie tabelle e differenziate sulla base della modalità di trattamento.

Le caratteristiche per cui è richiesta una valutazione sono elencate nella Tab. 1.1; la norma precisa per ciascuna di esse la specifica tecnica da seguire per una corretta determinazione del parametro richiesto.

<i>PARAMETRO DA VALUTARE</i>	<i>NORMA DI RIFERIMENTO</i>
Indice di portanza immediato <i>IPI</i>	<i>UNI EN 13286-47 (2006)</i>
Indice di portanza <i>CBR</i>	<i>UNI EN 13286-47 (2006)</i>
Costipabilità mediante <i>MCV</i>	<i>UNI EN 13286-46 (2003)</i>
Grado di compattazione <i>DC</i>	<i>UNI EN 13286-2 (2010)</i>
Rigonfiamento lineare	<i>UNI EN 13286-47 (2006)</i>
Rigonfiamento volumetrico	<i>UNI EN 13286-49 (2006)</i>
Grado di polverizzazione	<i>UNI EN 13286-48 (2005)</i>
Contenuto d'acqua	<i>UNI EN 13286-2 (2010)</i>
Resistenza a compressione	<i>UNI EN 13286-41 (2006)</i>
Resistenza al gelo	-

Tab 1.1 – Requisiti specificati nella UNI EN 14227-11 (2006).

Oltre al riferimento normativo vengono fornite tabelle per ciascun parametro, per entrambe le modalità di trattamento, in cui la miscela ottenuta viene classificata sulla base del valore del parametro considerato.

Tali classificazioni si rivelano di importanza strategica in quanto è sulla base di esse che si potrà verificare l' idoneità all' utilizzo della miscela; infatti all' interno dei Capitolati Prestazionali si farà riferimento proprio alle espressioni riportate nelle varie tabelle nel momento in cui sarà richiesto il rispetto di valori minimi o massimi relativi alle caratteristiche viste sopra.

Le considerazioni relative ai singoli parametri saranno approfondite nel capitolo relativo allo studio della miscela.

1.5 Panoramica della ricerca

Lo studio descritto nei capitoli successivi si pone a conclusione di una ricerca più ampia svolta all' interno della convenzione di ricerca DICAM – Strade e la ditta CGS Group S.p.A., che ha come obiettivo la progettazione di trattamenti dei terreni con leganti in grado di fornire risultati altamente prestazionali.

Con questa tesi si riassumono, riordinano, aggiornano e completano tutti i risultati ottenuti grazie a questa attività di ricerca.

1.5.1 Procedura di progettazione e controllo di un trattamento a calce

Il risultato finale che si ottiene da questo studio è la procedura completa da seguire durante l' esecuzione di un trattamento di stabilizzazione o miglioramento a calce di un terreno argilloso: dalla scelta e controllo dei materiali iniziali (terreno, acqua e calce), alle verifiche ed ai controlli finali in sito sullo strato di miscela terra – calce inserito in opera.

Si riporta di seguito la Flow Chart che sintetizza il procedimento da seguire, così come è stato elaborato dagli studi dell' Università di Bologna; lo schema riassuntivo della procedura di trattamento a calce, come è possibile osservare nella Fig. 1.5, è stato suddiviso in tre fasi principali:

- 1) Pre-qualifica dei materiali.
- 2) Studio della miscela.
- 3) Controlli in sito.

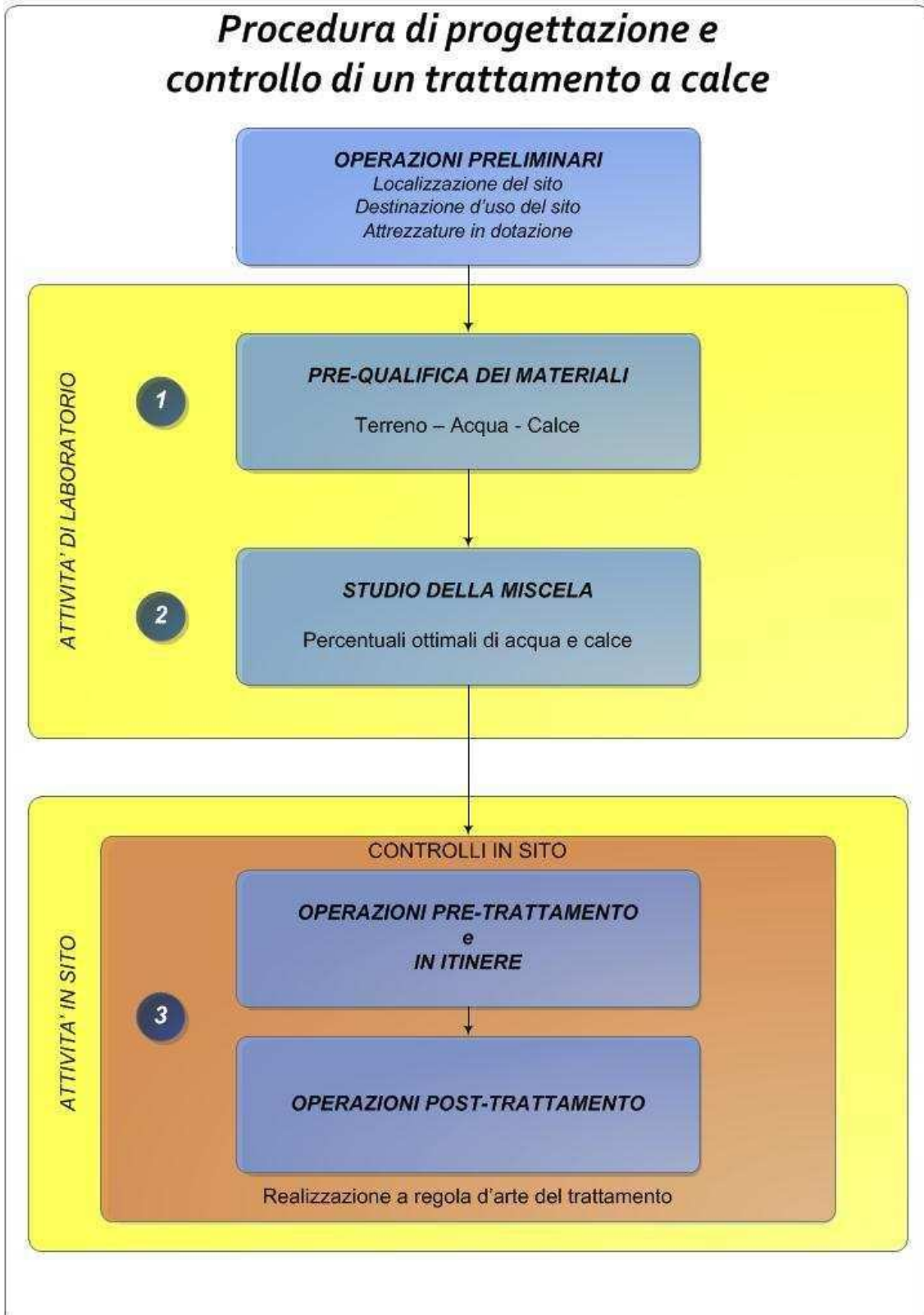


Fig. 1.5 – Flow Chart riassuntiva della procedura di trattamento a calce di un terreno argilloso

I capitoli successivi tratteranno ciascuno un passo della procedura, rimandiamo quindi ad essi per la descrizione specifica di ogni singola fase del trattamento. Dopo una sintesi delle operazioni da eseguire in ogni fase sono state realizzate e inserite le schede tecniche di tutte le prove da realizzare secondo l'ordine temporale previsto dalla procedura.

Le schede tecniche si basano sulle normative di riferimento, sull'esperienza maturata grazie all'attività di ricerca e sugli studi realizzati da altri Enti o Università; il loro scopo è quello di rendere schematizzati e leggibili tutti i passaggi previsti per poter realizzare le operazioni a regola d'arte, tenendo anche conto del fatto che chi realizza materialmente le prove potrebbe non essere un tecnico specializzato.

Lo “schema tipo” a tabella di una scheda tecnica è il seguente:

PROVA DESCRITTA
OBIETTIVI E CONTENUTO
RIFERIMENTI NORMATIVI
APPARECCHIATURA
PROCEDURA
OPERAZIONI FINALI, RAPPORTI, MARCATURE

Tab. 1.2 – Schema tipo di una scheda tecnica.

Le prove inserite nella procedura possono essere distinte in tradizionali e innovative; le prime provengono dalla normativa nazionale ufficiale o trattano controlli già previsti nella pratica comune della stabilizzazione a calce delle terre, le seconde sono state aggiunte come aggiornamenti (*Upgrade*) grazie all'attività di ricerca svolta o a normative estere. Gli aggiornamenti sono contraddistinti tramite il simbolo grafico riportato in Fig. 1.6.

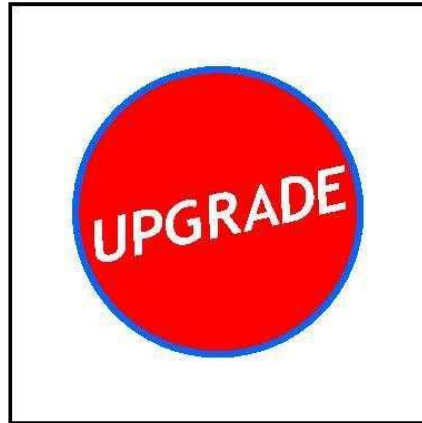


Fig. 1.6 – Simbolo per le schede tecniche inserite come aggiornamento.

In seguito alle schede tecniche in ogni capitolo vi sarà un paragrafo relativo a tutte le ricerche svolte all'interno della convenzione DICAM – CGS Group, in cui verranno riassunti i temi analizzati, i risultati ottenuti e le conclusioni acquisite, insieme all'elenco di tutte le pubblicazioni svolte sul tema dal personale docente e dagli studenti laureandi del DICAM. La suddivisione dell'attività di ricerca rispecchia quella dei capitoli ed è quindi realizzata in base alle varie fasi della procedura del trattamento a calce.

Si sottolinea che la procedura completa relativa alla progettazione e al controllo delle stabilizzazioni a calce dei terreni argillosi proposta dall'Università di Bologna ha visto la redazione definitiva grazie a questa tesi di laurea.

1.5.2 Attività di ricerca specifica: studio della reazione esotermica

La seconda parte della ricerca svolta in questo studio prevede l'analisi ed elaborazione dei dati ottenuti sulla reazione esotermica mediante l'uso di una termocamera a infrarossi (Fig. 1.7).



Fig 1.7 – Termocamera FLIR P620.

La reazione chimica che si instaura per la miscelazione di terra, calce ed acqua produce un aumento di temperatura significativo e che è stato studiato in laboratorio nelle ricerche precedenti a questa tesi.

Nell'attività specifica di questo studio si è ricercata una relazione tra la temperatura superficiale misurata tramite termocamera e quella all'interno dello strato per mezzo di prove di laboratorio finalizzate allo studio dell'andamento nel tempo della temperatura nei primi minuti successivi alla miscelazione.

Parallelamente si è svolta una ricerca in sito per valutare la fattibilità dell'utilizzo della termocamera in cantiere al fine di verificare la possibilità di ottenere informazioni sulla qualità del trattamento. Tra questi dati ricordiamo l'uniformità della stesa, la verifica dell'avvenuta reazione chimica e il numero di passaggi della fresa miscelatrice necessari per ottenere un mescolamento ottimale, in base ai valori sulla temperatura superficiale dello strato misurati con questo strumento.

Sulla base degli studi più avviati sull'utilizzo della termocamera ad infrarossi relativi agli strati bituminosi si è dunque cercato di fornire lo stesso tipo di analisi sugli strati di

terreno legati a calce, consci del fatto che le temperature con cui si ha a che fare sono decisamente inferiori a quelle che si raggiungono nella produzione e stesa dei conglomerati bituminosi.

L'attività di ricerca svolta nel complesso della convenzione DICAM – CGS Group sullo studio dell'andamento della temperatura di reazione sarà trattata nell'ultimo capitolo di questa tesi, in cui vengono riportati anche i risultati specifici sulla sperimentazione dell'uso della termocamera.

Capitolo 2 – PRE-QUALIFICA DEI MATERIALI

L'obiettivo della prima fase del processo è qualificare il materiale presente in sito e il legante al fine di studiarne le caratteristiche fisico-chimiche, valutarne la compatibilità con il trattamento a calce e stabilire le proporzioni indicative con le quali avviare lo studio delle miscele di laboratorio.

Si effettuano dunque dei test su terreno e calce che sono la base da cui partire per poter ottenere tutte le informazioni necessarie ad effettuare il trattamento e un risultato finale di qualità.

Lo studio di pre-qualifica di questi materiali sarà effettuato come primo atto dell'operazione di miglioramento o stabilizzazione di un terreno con calce.

La procedura di pre-qualifica di un terreno è stata estrapolata da una serie di norme guida sulla caratterizzazione dei terreni:

- ***UNI EN 13242 (2008): Aggregati per materiali non legati e legati con leganti idraulici per l'impiego in opere di ingegneria civile e nella costruzione di strade.***
- ***UNI EN 13285 (2010): Miscele non legate – Specifiche.***
- ***UNI EN ISO 14688-1: 2003 e UNI EN ISO 14688-2: 2004: Identificazione e Classificazione dei terreni.***

Queste norme attualmente in vigore hanno sostituito la ***UNI 10006 (2002): Costruzione e manutenzione delle strade - Tecniche di impiego delle terre***, che rimane comunque un punto di riferimento per operare a regola d'arte nell'ambito geotecnico stradale.

Il processo di pre-qualifica si realizza attraverso una serie di prove di laboratorio che nell'attività di ricerca svolta sono state raggruppate in quattro parti fondamentali:

- Reperimento dei campioni di terreno dal sito in esame in quantità e numero idonei a realizzare tutte le prove di laboratorio necessarie per la pre-qualifica.
- Classifica del materiale, che richiede la realizzazione delle prove per determinare la granulometria e i limiti di Atterberg.
- Caratterizzazione fisica del terreno attraverso prove che valutino la presenza di materiale finissimo e le caratteristiche microscopiche.
- Caratterizzazione chimica, che ha lo scopo di valutare l'attitudine del terreno al trattamento con legante idraulico e determinare la quantità iniziale di calce necessaria.

A questa serie di prove viene aggiunta all'interno del procedimento la norma relativa alla determinazione dell'umidità, regolarizzata dalla norma **UNI EN 17892-1 (2005): Prove di laboratorio sui terreni – Determinazione del contenuto d'acqua**. Il calcolo dell'umidità è una valutazione fondamentale che viene spesso richiesta precedentemente o durante l'esecuzione di prove sui terreni e non sempre i tecnici eseguono questo calcolo seguendo le indicazioni normative in quanto le procedure date dall'esperienza sono numerose; per questo si è deciso di inserire nella procedura la descrizione del metodo normato.

Tutti i procedimenti di pre-qualifica sono regolati da norme, alcune delle quali sono entrate a far parte della normativa nazionale cogente come norme **EN** recepite **UNI**, altre sono specificate nella normativa statunitense **ASTM** e per questo saranno denominate Upgrade, cioè aggiornamenti della procedura nei confronti del riferimento normativo italiano.

La Fig. 2.1 riporta lo schema riassuntivo della procedura di pre-qualifica, che verrà approfondita in questo capitolo.

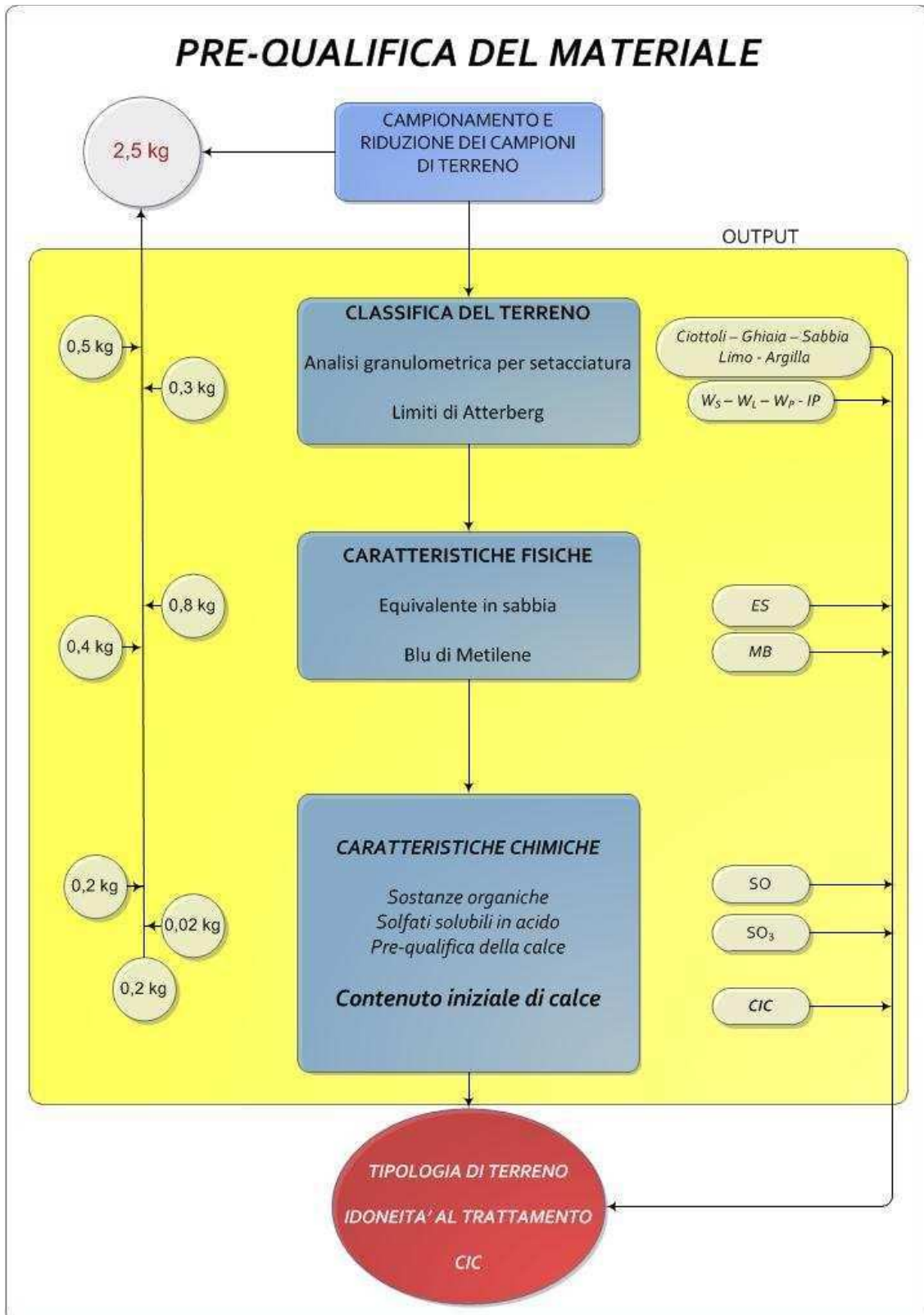


Fig. 2.1 – Flow Chart riassuntiva della pre-qualifica dei materiali.

2.1 Campionamento e riduzione dei campioni

La fase di campionamento e riduzione delle porzioni di prova rappresenta un prerequisito basilare per un'analisi in grado di dare risultati rappresentativi delle condizioni in sito e non falsati. Essa è regolata da due norme specifiche:

- ***UNI EN 932-1 (1998): Metodi di campionamento.***
- ***UNI EN 932-2 (2000): Metodi per la riduzione dei campioni di laboratorio.***

A queste norme fanno riferimento tutte le altre specifiche tecniche che saranno trattate nel capitolo; in esse sono riportati i principi, le procedure e le apparecchiature necessarie per il campionamento, le modalità di riduzione dei campioni ai fini dell'utilizzo in laboratorio e quelle relative alla marcatura e al trasporto del materiale prelevato. Inoltre è descritto il metodo di calcolo della variabilità del campionamento necessario per controllare che il numero dei prelievi effettuati per ottenere il campione principale risulti adeguato al metodo di prova usato.

Il concetto che deve entrare nell'ottica comune riguarda l'organizzazione anticipata di un piano di campionamento, tenendo conto della dimensione dell'aggregato, della natura e dimensione del lotto, delle circostanze ambientali e degli scopi del campionamento, come prerogativa fondamentale per il corretto proseguimento dello studio di pre-qualifica.

2.2 Classifica del terreno

Il secondo passo è quello relativo alla classificazione del terreno, con riferimento alle indicazioni presenti nella norma di buona regola ***UNI 10006 (2002)***; i terreni adatti ad essere trattati con calce sono quelli di tipo A6 e A7, vale a dire quelli con prevalenza di componenti limose e argillose.

Per valutare il tipo di terreno da trattare si eseguono due prove, l'analisi granulometrica per setacciatura e la determinazione dei limiti di Atterberg, entrambe descritte da una specifica norma:

- ***UNI EN 933-1 (2009): Determinazione della distribuzione granulometrica – Analisi granulometrica per setacciatura.***
- ***UNI CEN ISO/TS 17892-12: Prove di laboratorio sui terreni – Determinazione dei limiti di Atterberg.***

2.2.1 Analisi granulometrica per setacciatura

Lo scopo dell'analisi granulometrica è raggruppare in classi di grandezza le particelle che costituiscono un terreno e determinare successivamente le percentuali in peso secco del campione iniziale. I metodi utilizzati sono due: l'analisi con setacciatura per aggregati con particelle di dimensioni diametrali superiori a 0,063 mm e l'analisi per sedimentazione per quelli le cui dimensioni sono inferiori a 0,063 mm.

L'analisi granulometrica per setacciatura si applica agli aggregati di origine naturale o artificiale, inclusi gli aggregati leggeri, fino ad una dimensione nominale di 90 mm, esclusi i fillers.

Il criterio di prova prevede la scelta di una massa del campione in base al diametro massimo delle particelle; questo andrà poi essiccato e lavato prima di essere passato ai setacci. Per i terreni argillosi il risultato finale che più interessa è la quantità di fini (passante al setaccio da 0,063 mm), che viene calcolata come percentuale del loro peso rispetto al totale. Per lo studio del trattamento a calce la porzione di riferimento che ritornerà più volte durante la procedura è quella passante al setaccio da 0,4 mm.

La normativa **ASTM D2487-10** suddivide le particelle caratterizzanti il terreno in determinate classi a seconda dei loro diametri D:

- Ciottoli: $D > 60$ mm.
- Ghiaia: $60 \text{ mm} > D > 2$ mm.
- Sabbia: $2 \text{ mm} > D > 0,06$ mm.
- Limo: $0,06 \text{ mm} > D > 0,002$ mm.
- Argilla: $D < 0,002$ mm.

Tramite l'analisi granulometrica si riesce a denominare un terreno a seconda delle percentuali delle classi granulometriche che lo compongono[7]:

NOME	“Con”	“-oso”	“Debolmente -oso”	Non inserito
Classe con percentuale maggiore	Classi secondarie > 25%	Classi secondarie tra 15% e 25%	Classi secondarie tra 5% e 15%	Classi secondarie < 5%

Tab.2.1 – Terminologia ASTM per definire un terreno.

2.2.2 Limiti di Atterberg

Il contenuto d'acqua influenza il comportamento dei terreni argillosi; se esso cresce si ha un aumento di volume del terreno, le particelle si distanziano tra loro modificando la loro mutua interazione e diminuisce lo sforzo tangenziale.

Si definiscono limiti di Atterberg i contenuti d'acqua, determinati in laboratorio con procedure standardizzate, che rappresentano i passaggi critici di comportamento di un terreno a grana fine.

Il contenuto d'acqua che separa il passaggio dal solido fragile al semisolido è detto limite di ritiro w_s , quello dal semisolido al plastico limite plastico w_p e quello dallo stato plastico allo stato fluido limite liquido w_L . Infine si definisce l'indice di plasticità IP, che rappresenta l'ampiezza dell'intervallo plastico del terreno.

La scheda della prova tratta la norma ritirata **CNR UNI 10014: 1964**, che contiene la descrizione del metodo con Cucchiario di Casagrande, riconosciuto di buona regola e ancora oggi usato abitualmente per effettuare questo tipo di prova. La scheda relativa alla norma UNI attualmente in vigore è stata inserita come aggiornamento, in quanto il metodo descritto (metodo con punta conica) non è ancora entrato a tutti gli effetti a far parte della pratica comune.

2.3 Caratteristiche fisiche

Le principali caratteristiche fisiche di un terreno vengono valutate attraverso due prove, descritte in due norme nazionali specifiche:

- **UNI EN 933-8 (2000): Valutazione dei fini – Prova dell'equivalente in sabbia.**
- **UNI EN 933-9 (2009): Valutazione dei fini – Prova del blu di metilene.**

Tramite queste due prove è possibile rendersi conto di come e quanto il comportamento di un materiale è influenzato dal tenore di frazione finissima presente e dalle sue caratteristiche microscopiche.

2.3.1 Prova dell'equivalente in sabbia

Tale prova si propone di valutare l'equivalenza in sabbia della classe granulometrica 0/2 mm, negli aggregati naturali fini e misti.

Una porzione di prova di sabbia ed una piccola quantità di soluzione flocculante vengono versati in un cilindro graduato ed agitati per rimuovere il rivestimento argilloso

dalle particelle di sabbia. Irrigando la sospensione con altra soluzione flocculante si fanno salire le particelle argillose sopra quelle di sabbia. Dopo 20 minuti si calcola il valore dell'equivalente in sabbia (SE) come percentuale della frazione sabbiosa sull'altezza del materiale flocculato. Se tale valore tende al 100% allora è prevalente la frazione sabbiosa; se tende al valore nullo prevale il materiale di natura argillosa.

2.3.2 Prova al blu di metilene

La prova al blu di metilene quantifica in maniera diretta la capacità di adsorbimento dei terreni misurando la quantità di blu di metilene necessaria per ricoprire la superficie totale delle particelle argillose.

Il “valore al blu” MB ricavato riflette la quantità e la tipologia dei minerali argillosi presenti ed è un buon indicatore della variazione percentuale di volume e dell'angolo di attrito residuo dei terreni argillosi studiati.

La capacità di adsorbimento di acqua di un terreno, a parità di percentuale di argilla presente e di composizione del mezzo acquoso, è funzione della tipologia del minerale argilloso; essa aumenta in funzione della superficie specifica e della carica particellare (massima per le smectiti, minima per le caoliniti).

Dai parametri calcolati grazie a questa prova si può ricavare sperimentalmente la superficie specifica totale S_a , che corrisponde alla superficie accessibile all'acqua; una superficie molto elevata indica sempre la presenza di materiali argillosi attivi ($S_a = 800 \text{ m}^2/\text{g}$ per la montmorillonite).

2.4 Caratteristiche chimiche

2.4.1 Contenuto di sostanze che influenzano il trattamento a calce

Il trattamento a calce influisce sulla sensibilità all'acqua di terreni limo-argillosi, diminuendola; le reazioni chimiche che si instaurano sono fortemente condizionate (in maniera negativa) dalla presenza nel terreno di particolari sostanze, tra cui polvere, colloidali, sostanze organiche, sali minerali.

Le impurità più dannose ai fini della stabilizzazione a calce sono le sostanze organiche e i solfati; le sostanze organiche nascono come prodotto della decomposizione di residui animali e vegetali e la loro presenza può compromettere l'efficacia dell'intervento di

stabilizzazione; per valutarne la presenza in un terreno si effettua un semplice test del pH; i solfati invece sono causa di rigonfiamenti locali che riducono le proprietà meccaniche del terreno trattato; se ne valuta la quantità grazie alla loro solubilità in acido.

Le prove per determinare queste due proprietà sono descritte rispettivamente dalle parti 15 e 12 della norma nazionale *UNI EN 1744-1 (2010): Prove per determinare le proprietà chimiche degli aggregati – Analisi chimica*.

Ad esse ne viene aggiunta una terza che porta a determinare la percentuale di sostanze organiche presenti nel terreno; tale determinazione si effettua solamente nel caso in cui il precedente test del pH abbia rivelato la presenza di sostanze organiche.

La norma che regola questa particolare prova è la *ASTM D2974 – 07a: Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils*; non esiste ad oggi una corrispondente norma nazionale.

L'introduzione di questa verifica all'interno del procedimento di prequalifica e più in generale di tutta la procedura del trattamento a calce è uno degli aggiornamenti inseriti grazie all'attività di ricerca del DICAM su questo tema.

2.4.2 Contenuto iniziale di calce

L'ultimo passo per la prequalifica dei materiali consiste nella determinazione del contenuto iniziale di calce (*CIC*), cioè la percentuale minima di calce necessaria affinché il trattamento interessi tutto il terreno e permetta di pervenire alle proprietà meccaniche e di durabilità richieste.

La prova viene effettuata realizzando miscele terra – acqua – calce con diverse percentuali di legante ed il minimo tenore identificato per la stabilizzazione del terreno è quello fornito dal provino che raggiunge un pH di 12.4.

Il pH della miscela deve essere abbastanza elevato da garantire le reazioni chimiche necessarie per stabilizzare il terreno.

Il test aggiorna la procedura rispetto al quadro normativo nazionale; infatti la prova è descritta nella normativa statunitense *ASTM D 6276 – 99a (2006): Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization*.

2.4.3 Pre-qualifica della calce

Nella fase di pre-qualifica sono possibili analisi chimiche condotte sulla calce, per valutarne la qualità e soprattutto la reattività una volta inserita nella miscela.


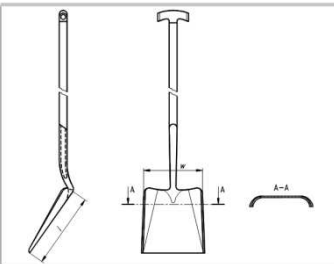
Con riferimento ai parametri presi tipicamente come riferimento dai Capitolati Prestazionali per qualificare la calce e per valutare la sua idoneità all'utilizzo nei trattamenti di terreni, sono state introdotte all'interno della procedura due prove, relative alla valutazione del contenuto di Ossido di Calcio e di Calce Libera nelle calce aeree.

Le analisi chimiche sulle calce sono specificate dalla serie di norme: **UNI EN 459-1/2/3 (2010): Calce da costruzione**. Nel caso specifico si fa riferimento alla **Parte 2: Metodi di prova** e alla norma **UNI EN 196-2 (2007): Metodi di prova dei cementi – Analisi chimica dei cementi**.

2.5 Schede Tecniche relative alla procedura di pre-qualifica

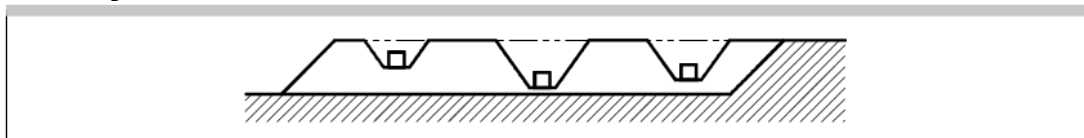
Si riportano di seguito tutte le schede tecniche complete e aggiornate relative alla procedura di pre-qualifica del materiale che sono state brevemente descritte in questo capitolo.

2.5.1 Campionamento in sito

PROVA DESCRITTA												
<u>CAMPIONAMENTO IN SITO – UNI EN 932-1 (1998)</u>												
OBIETTIVI E CONTENUTO												
Ottenere un campione globale che sia rappresentativo della media delle proprietà del lotto. I metodi descritti in questa norma europea sono adatti anche per ottenere prelievi che possono essere sottoposti a prova separatamente.												
RIFERIMENTI NORMATIVI												
<i>prEN 932-5; prEN 1097-3; ISO 1988 (1975); ISO 3082 (1987).</i>												
APPARECCHIATURA												
Paletta 	Pala 	Contenitori I contenitori per il trasporto devono essere puliti, impermeabili, non assorbenti, quali per esempio sacchi di plastica di almeno 100 µm di spessore o secchielli.										
PROCEDURA												
<ul style="list-style-type: none"> Campione globale, quantità La quantità del campione globale deve essere calcolata tenendo conto della natura e del numero delle prove, delle dimensioni degli aggregati e della loro massa volumica. Massa minima di un campione globale: $M = 6 * \sqrt{D} * \rho_B$ dove: M = massa del campione, in kilogrammi; D = dimensione massima dei granuli, in millimetri; ρ_B = massa volumica in mucchio, [kg / m³]. <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>Materiale</th> <th>ρ_B (kg / m³)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Ghiaia</td> <td>1500 ÷ 1800</td> </tr> <tr> <td>Sabbia</td> <td>1200 ÷ 2100</td> </tr> <tr> <td>Argilla</td> <td>1800 ÷ 2000</td> </tr> <tr> <td>Calcere</td> <td>2500 ÷ 2700</td> </tr> </tbody> </table>			Materiale	ρ _B (kg / m ³)	Ghiaia	1500 ÷ 1800	Sabbia	1200 ÷ 2100	Argilla	1800 ÷ 2000	Calcere	2500 ÷ 2700
Materiale	ρ _B (kg / m ³)											
Ghiaia	1500 ÷ 1800											
Sabbia	1200 ÷ 2100											
Argilla	1800 ÷ 2000											
Calcere	2500 ÷ 2700											
<ul style="list-style-type: none"> Numero dei prelievi Prelevare in doppio campioni globali in almeno 15 occasioni. Ogni campione globale deve essere ridotto a campione di laboratorio, dopo di che si ottengono due porzioni di prova da 												

ogni campione di laboratorio. Su ogni porzione di prova si ottiene un risultato impiegando la procedura scelta allo scopo. Le occasioni di campionamento possono essere distribuite lungo un periodo di tempo esteso.

- **Campionamento da mucchi**



Devono essere prelevati campioni di dimensioni approssimativamente uguali da punti differenti a differenti altezze o profondità distribuite su tutto il mucchio.

L'ubicazione e il numero di prelievi deve tener conto del modo in cui il mucchio è stato realizzato, della sua forma e della possibilità di segregazione nell'ambito del mucchio.

OPERAZIONI FINALI, RAPPORTI, MARCATURE

- **Riduzione dei campioni**

Tecniche per la preparazione delle porzioni di prova dal campione globale.

- **Marcatura, imballaggio e spedizione dei campioni**

I campioni o i contenitori devono essere marcati in modo chiaro e indelebile.

La marcatura deve comprendere:

- a) un codice unico;
- b) l'identificazione dei campioni di laboratorio, il luogo e la data di campionamento e la designazione del materiale.


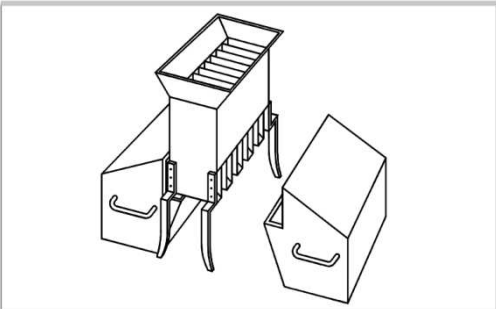
I campioni di laboratorio devono essere imballati e trasportati in modo da conservare la loro condizione al momento del campionamento (se necessario i contenitori devono avere chiusura ermetica).

- **Rapporto di campionamento**

L'addetto al campionamento deve predisporre un rapporto di campionamento per ogni campione di laboratorio o per ogni gruppo di campioni di laboratorio provenienti da una unica fonte. Questo rapporto deve indicare:

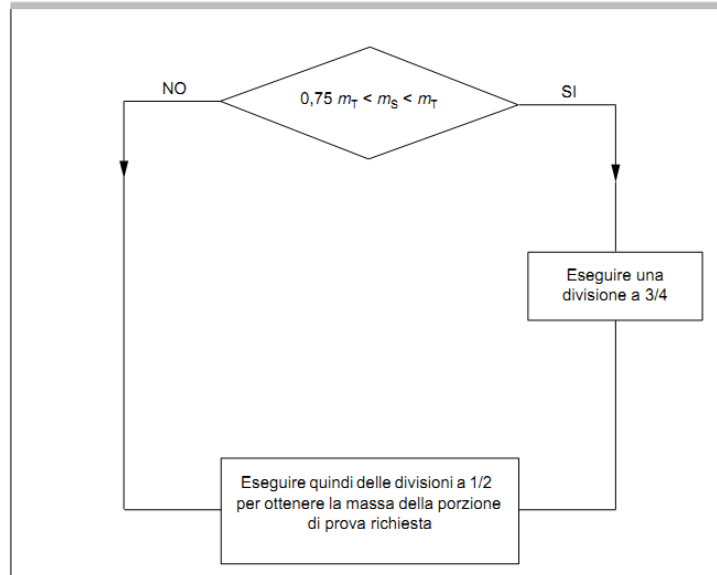
- L'identificazione del rapporto di campionamento (numero di serie);
- La marcatura e l'identificazione del campione di laboratorio;
- La data e il luogo del campionamento;
- Il tipo di classificazione e le dimensioni del lotto;
- Il punto di campionamento o l'identificazione del lotto campionato;
- Un riferimento al piano di campionamento;
- Il nome dell'esecutore/i della campionatura.

2.5.2 Riduzione del campione in porzioni di prova

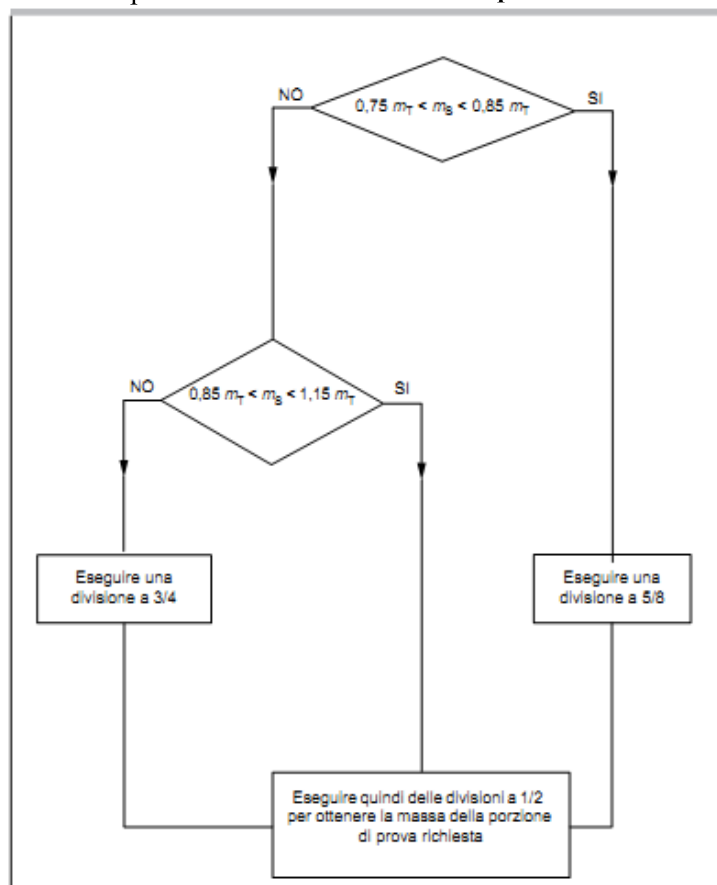
PROVA DESCRITTA	
<u>RIDUZIONE DEI CAMPIONI – UNI EN 932-2 (2000)</u>	
OBIETTIVI E CONTENUTO	
<p>Preparazione di campioni di laboratorio da campioni globali di aggregati, quando la massa della porzione di prova è:</p> <ul style="list-style-type: none"> • prescritta con un preciso limite inferiore; • prescritta con tolleranza attorno a una massa desiderata; • determinata con precisione dalle prescrizioni di un metodo di prova. 	
RIFERIMENTI NORMATIVI	
<i>prEN 932-1; prEN 932-5.</i>	
APPARECCHIATURA	
Paletta e/o sessola	Telo o piano liscio
	<p>Bacinella per campionamento in materiale liscio resistente alla corrosione e abbastanza grande per poter mescolare il campione senza trascinamenti</p>
PROCEDURA	
<ul style="list-style-type: none"> • Definizioni utili: <ul style="list-style-type: none"> ▪ m_L massa dei campioni di laboratorio (g o kg); ▪ m_S massa del campione ridotto (g o kg); ▪ m_T massa della porzione di prova specificata (g o kg). • Riduzione mediante divisore rotante Metodo preferito nei casi in cui sia specificata una massa minima o una larga tolleranza sulla massa della porzione di prova. <ul style="list-style-type: none"> ▪ Scegliere una configurazione del divisore che garantisca l'ottenimento delle porzioni entro un valore m_S compreso tra il 100% e il 150% o tra l'85% e il 115% di m_T, come più appropriato secondo le prescrizioni del metodo di prova. ▪ Porre il campione nella tramoggia ed avviare il rotore. Quando raggiunge la sua velocità operativa, avviare l'alimentatore vibrante. ▪ Controllare che siano state completate almeno 35 rotazioni prima che il campione di laboratorio sia tutto passato. Se questo non si è verificato, rimescolare i campioni ridotti e ripetere la riduzione del campione a velocità di alimentazione minore. • Riduzione del campione con campionatore a scatola 	
	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Porre il campione in uno dei recipienti del campionatore a scatola. Stendere 	

uniformemente il materiale su tutta la lunghezza del recipiente.

- Mettere in posizione gli altri due recipienti.
- Far scendere il campione dalla parte lunga del recipiente verso la linea centrale del campionatore a scatola.
- Ottenere la massa richiesta della porzione di prova m_S da suddivisioni in parti uguali della massa dei campioni di laboratorio m_L .
- Se m_S è compresa tra il 100% e il 150% di m_T procedere come segue:



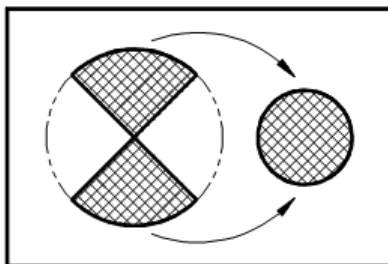
- Se m_S è invece compresa tra l'85% e il 115% di m_T :



- **Riduzione di un campione mediante quartatura**

Metodo alternativo da utilizzare nel caso di larghe tolleranze accettate sulla massa della porzione di prova.

- Collocare il campione globale sul piano di lavoro e mescolarlo a fondo ammassandolo a forma di cono, quindi rovesciarlo con una paletta per formare un nuovo cono.
- Ripetere l'operazione tre volte.
- Nel formare il cono depositare ogni palata sulla sommità del nuovo cono in modo che l'aggregato scorra tutto intorno al cono stesso e che gli aggregati con differenti dimensioni siano uniformemente distribuiti e le varie granulometrie ben mescolate.
- Appiattire il terzo cono inserendo la paletta ripetutamente e verticalmente nella sommità del cono, formando un mucchio piano di spessore e diametro uniformi.
- Quartare il mucchio piano lungo due diagonali intersecandole ad angoli retti.



- Scartare un paio di quarti opposti e ammassare il rimanente.
 - Ripetere il processo di miscelazione e di quartatura fino ad ottenere la quantità richiesta per il campione di laboratorio.
- **Riduzione del campione in una porzione di prova avente tolleranza minima sulla massa specificata**
 - Utilizzare uno dei metodi descritti in cui la massa ottenuta sia compresa tra il 100% e il 150% di m_T .
 - Rovesciare il campione ridotto sulla superficie di lavoro, mescolare con attenzione e formare una striscia di aggregato attraverso la superficie di lavoro.
 - Iniziando da una parte della striscia, ed utilizzando una paletta con fondo piatto o un raschietto, continuare a prelevare aggregato da quella parte, fino a quando non si è ottenuta una porzione di prova avente massa sufficiente.

2.5.3 Calcolo dell'umidità in laboratorio

PROVA DESCRITTA															
<p>CONTENUTO D'ACQUA (UMIDITA') <u>UNI CEN ISO/TS 17892-1 (2005)</u></p>															
OBIETTIVI E CONTENUTO															
<p>Metodo di buona pratica per determinare in laboratorio il contenuto d'acqua (umidità) di un provino di terreno mediante essiccamento in forno.</p>															
RIFERIMENTI NORMATIVI															
<p><i>prEN1997-1; prEN1997-2.</i> Trattano lo stesso tema: <i>ASTM D 2216-10</i> e <i>UNI EN 1097-5(2010)</i></p>															
APPARECCHIATURA															
<ul style="list-style-type: none"> • Stufa di essiccamento, in grado di mantenere la temperatura di 105 °C ± 5 °C. • Bilancia con accuratezza di: <ul style="list-style-type: none"> ▪ ±0,03 g per provini di massa minore o pari a 200 g; ▪ ±0,3 g per provini di massa compresa tra 200 g e 1000 g; ▪ ±3 g per provini di massa maggiore a 1000 g. • Contenitori di vetro o di metallo anticorrosione con coperchio a chiusura ermetica. • Essiccatore (solo se si usano contenitori privi di coperchi). 															
PROCEDURA															
<ul style="list-style-type: none"> • Preparazione e massa minima dei provini umidi 															
<p>Prima della prova conservare i campioni in contenitori anticorrosione, a tenuta d'aria, ad una temperatura compresa tra i 3 °C e 30 °C circa, in un luogo senza luce diretta del sole.</p> <p>E' bene eseguire la prova il prima possibile dopo aver prelevato i campioni.</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>D₉₀ [mm]</th> <th>Massa min [g]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1,0</td> <td>25</td> </tr> <tr> <td>2,0</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td>4,0</td> <td>300</td> </tr> <tr> <td>16,0</td> <td>500</td> </tr> <tr> <td>31,5</td> <td>1500</td> </tr> <tr> <td>63,0</td> <td>5000</td> </tr> </tbody> </table>	D ₉₀ [mm]	Massa min [g]	1,0	25	2,0	100	4,0	300	16,0	500	31,5	1500	63,0	5000
D ₉₀ [mm]	Massa min [g]														
1,0	25														
2,0	100														
4,0	300														
16,0	500														
31,5	1500														
63,0	5000														
<ul style="list-style-type: none"> • Esecuzione della prova <ul style="list-style-type: none"> ▪ Collocare il provino in un contenitore pulito e asciutto di massa nota, quindi chiuso con il coperchio, ben fissato, dopodiché deve essere determinata la massa complessiva del contenitore e del provino umido m₁. Questi valori devono essere registrati. ▪ Campioni di grandi dimensioni vanno adagiati in contenitori a superficie ampia (come una padella) e il terreno frantumato in aggregati più piccoli. ▪ Il coperchio deve essere rimosso e il contenitore con il provino umido deve essere collocato in una stufa di essiccamento mantenuta a 105 °C ± 5 °C per essere essiccato fino a massa costante. ▪ Nella maggior parte dei casi, per l'essiccamento di un provino sono sufficienti da 16 h a 24 h. Qualora sussistano dei dubbi relativamente all'adeguatezza dell'essiccamento, si dovrebbe continuare l'essiccamento fino a quando, dopo due periodi di essiccamento in successione (maggiori di 1 h), la variazione di massa risulta trascurabile (meno dello 0,1% circa della massa provino). 															

- Rimuovere il contenitore dalla stufa.
- Riporre il coperchio nel contenitore e lasciare raffreddare fino a temperatura ambiente (valutazione a mano). Se il contenitore è privo di coperchio effettuare l'operazione all'interno di un essiccatore.
- Valutare e registrare la massa del provino essiccato e contenitore m_2 .

OPERAZIONI FINALI, RAPPORTI, MARCATURE

- **Contenuto d'acqua**

$$w(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_c} \times 100 = \frac{m_w}{m_d} \times 100$$

Dove

m_c : massa del contenitore [g].


m_d : massa dell'acqua [g].

- **Rapporto di prova** per attestare la realizzazione a norma del procedimento eseguito.

- **Osservazione**

Per terreni contenenti gesso o altri minerali caratterizzati da una significativa quantità di acqua chimicamente legata, o terreni caratterizzati da un contenuto significativo di sostanza organica il contenuto di acqua non può essere sempre ottenuto mediante essiccamento in stufa a $105 \text{ °C} \pm 5 \text{ °C}$. Per questi tipi di terreno potrebbe essere più appropriato mantenere una temperatura più bassa (per esempio 40 °C) nella stufa di essiccamento.

2.5.4 Analisi granulometrica per setacciatura

PROVA DESCRITTA		
<u>ANALISI GRANULOMETRICA PER SETACCIATURA</u> <u>UNI EN 933-1 (2009)</u>		
OBIETTIVI E CONTENUTO		
Metodo per la determinazione della distribuzione granulometrica degli aggregati mediante setacciatura. Si applica agli aggregati di origine naturale o artificiale, inclusi gli aggregati leggeri, fino ad una dimensione nominale di 90 mm, esclusi i fillers.		
RIFERIMENTI NORMATIVI		
<i>EN 932-2 (1999); EN 932-5; EN 1097-6; ISO 3310-1 (1990); ISO 3310-2 (1990).</i> Trattano lo stesso tema: <i>CNR BU 23/71 e ASTM D422-63 (2007)</i>		
APPARECCHIATURA		
<ul style="list-style-type: none"> • Setacci di prova 		
	Apertura Setacci	
	SERIE	D (mm)
	UNI/CNR	40
	UNI/CNR	31,5
	UNI/CNR	20
	UNI/CNR	16
	UNI	14
	UNI/CNR	12,5
	UNI	10
	UNI/CNR	8
	UNI	6,3
	UNI/CNR	4
	UNI/CNR	2
	UNI/CNR	1
	UNI	0,5
	CNR	0,4
	UNI/CNR	0,25
UNI/CNR	0,125	
CNR	0,075	
UNI	0,063	
<ul style="list-style-type: none"> • Recipienti e coperchi adatti ai setacci. • Stufa ventilata, regolata da termostato in grado di mantenere una temperatura di (110 ± 5) °C. • Apparecchiatura per il lavaggio. • Bilance o bascule, con accuratezza pari a $\pm 0,1\%$ della massa del campione di prova. • Recipienti, spazzole 		

PROCEDURA

• **Massa della porzione di prova**

<table border="1"> <thead> <tr> <th>Dmax [mm]</th> <th>Massa min [kg]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>90.0</td> <td>80</td> </tr> <tr> <td>63.0</td> <td>40</td> </tr> <tr> <td>32.0</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>16.0</td> <td>2.6</td> </tr> <tr> <td>8.0</td> <td>0.6</td> </tr> <tr> <td>< 4</td> <td>0.2</td> </tr> </tbody> </table>	Dmax [mm]	Massa min [kg]	90.0	80	63.0	40	32.0	10	16.0	2.6	8.0	0.6	< 4	0.2	<p>Correzione</p> <p>Per gli aggregati di massa volumica reale minore di 2,00 Mg/m³ o maggiore di 3,00 Mg/m³ deve essere apportata una correzione appropriata alle masse della porzione di prova date in tabella, sulla base del rapporto delle masse volumiche, al fine di ottenere una porzione di prova di volume approssimativamente uguale a quella degli aggregati di normale massa volumica.</p>	<p>Dmax > 63 mm devono essere utilizzati 80 kg o una massa della porzione di prova sufficiente a garantire che almeno 40 kg di aggregato passino attraverso il setaccio di prova di 63 mm.</p>
	Dmax [mm]	Massa min [kg]														
	90.0	80														
	63.0	40														
	32.0	10														
	16.0	2.6														
	8.0	0.6														
< 4	0.2															

• **Essiccare la porzione di prova**

<p>Portarla ad una temperatura di (110 ± 5) °C fino a massa costante. Lasciare raffreddare, pesare e registrare la massa M1.</p>	<p>Per gli aggregati che non possono essere essiccati in stufa a 110 °C occorre prelevare in doppio le porzioni di prova e registrarne le rispettive masse. Determinare il tenore di umidità di una sola porzione di prova mediante essiccazione in stufa a (110 ± 5)°C.</p> <p>La seconda porzione di prova viene sottoposta a lavaggio seguito da setacciatura senza pre-essiccazione. Calcolare e registrare la massa iniziale a secco M1 di questa porzione di prova, assumendo che le due porzioni abbiano lo stesso tenore di umidità.</p>
---	--

• **Lavaggio della porzione di prova**

<p>Immersione</p> <p>Immersione in acqua del campione per almeno 12 h con eventuale aggiunta di agente disperdente; agitare vigorosamente a porzione di prova per ottenere completa separazione</p>	<p>Lavaggio</p> <p>Passaggi al setaccio da 0,063 mm proteggendo il campione con un setaccio da 1 mm o 2 mm al fine di eliminare o raccogliere a parte la sospensione. Proseguire fino a che le acque di lavaggio, passando attraverso il setaccio di 63 mm, escano limpide.</p>	<p>Essiccazione</p> <p>Asciugare il campione in forno a (110 ± 5)°C fino a massa costante e registrare M2;</p>
--	--	--

• Setacciatura		
<p>Versare il materiale lavato ed essiccato nella colonna dei setacci sovrapposti. La colonna comprende un certo numero di setacci sovrapposti e disposti dal maggiore verso il minore, in ordine di dimensione decrescente di maglia, oltre a coperchio e recipiente di fondo.</p>	<p>Agitare la colonna, manualmente o meccanicamente, quindi rimuovere i setacci uno per uno cominciando da quello che presenta l'apertura più grande e agitare ciascun setaccio manualmente assicurandosi che non ci siano perdite di materiale, utilizzando a tale scopo un recipiente ed un coperchio.</p>	<p>Travasare tutto il materiale che passa attraverso ciascun setaccio sul setaccio successivo della colonna, prima di proseguire l'operazione.</p>

L'operazione di setacciatura può essere considerata completata quando la quantità di materiale trattenuto non subisce variazioni maggiori dell'1,0% durante 1 min di setacciatura.

• **Pesatura**

Determinare la massa del trattenuto in ciascun setaccio che si trova nella colonna per ottenere le masse delle diverse parti di materiale trattenuto e registrare tali masse come R1, R2, ... Ri, ... Rn a partire da quello con maglia di dimensione più grande.

Determinare la massa del materiale vagliato, se del caso, rimasto nel recipiente e registrarla con **P**.

OPERAZIONI FINALI, RAPPORTI, MARCATURE

• **Calcolo ed espressione dei risultati**

Calcolare la massa del trattenuto su ciascun setaccio, espressa come percentuale della massa essiccata d'origine M1.

Calcolare la percentuale cumulativa rispetto alla massa essiccata d'origine del passante attraverso ogni setaccio, fino a quello di 63 µm non compreso.

Calcolare la percentuale delle particelle fini (f) che passano attraverso il setaccio di 63 µm conformemente alla seguente equazione:

$$f = \frac{(M1 - M2) + P}{M1} \times 100$$

dove:

M1: massa essiccata della porzione di prova, in kilogrammi;

M2: massa essiccata del trattenuto sul setaccio di 63 µm, in kilogrammi;

P: massa del passante che rimane nel recipiente di fondo, in kilogrammi.

Per setacciatura a secco: $f = \frac{P}{M1} \times 100$

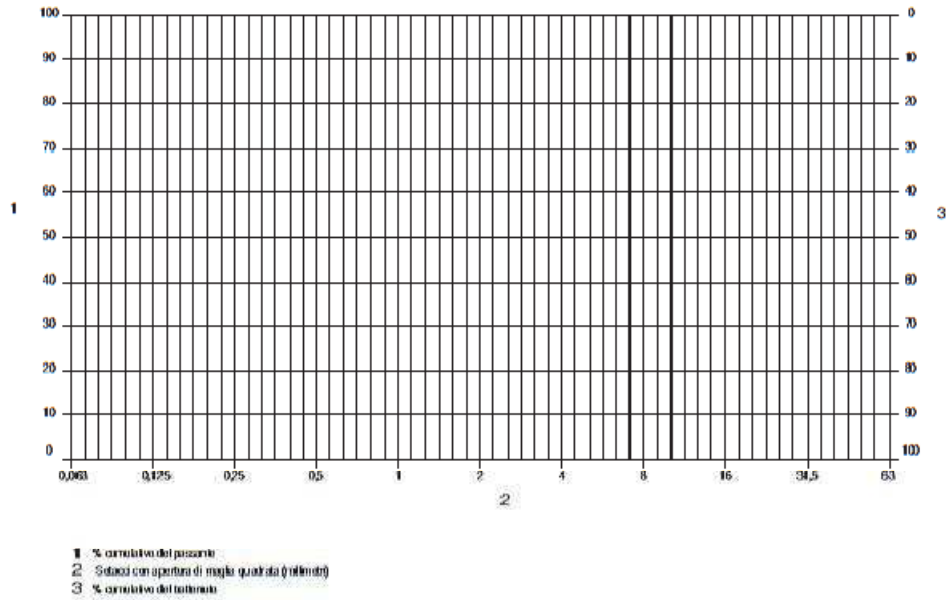
Se la sommatoria delle masse Ri + la massa di P differisce più dell'1% dalla massa M2, la prova va ripetuta.

• **Resoconto di prova – dati richiesti:**


- Riferimento della presente norma;
- Identificazione del campione;
- Identificazione del laboratorio;
- Data di ricevimento del campione;
- Procedimento utilizzato;
- Percentuale cumulativa della massa della porzione di prova passante attraverso isingoli setacci espressa con precisione al decimale più prossimo per il setaccio di 63 µm del

numero intero più prossimo per gli altri setacci.

- **Rappresentazione grafica dei risultati**



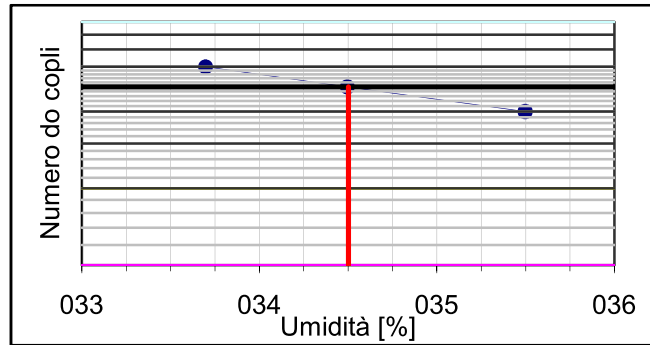
2.5.5 Determinazione dei limiti di Atterberg con il metodo di Casagrande

PROVA DESCRITTA	
<p><u>DETERMINAZIONE DEI LIMITI DI ATTERBERG</u> <u>CNR UNI 10014: 1964</u></p>	
OBIETTIVI E CONTENUTO	
<p>Determinazione del Limite Liquido e del Limite Plastico di un terreno attraverso il Metodo di Casagrande (alternativo).</p>	
RIFERIMENTI NORMATIVI	
<p>La norma descritta è stata ritirata e sostituita dalla UNI CEN ISO/TS 17892-12 (2005) Trattano lo stesso tema: UNI CEN ISO/TS 17892-12 (2005) e ASTM D4318-10</p>	
APPARECCHIATURA	
<p>Cucchiaino di Casagrande: base in ebanite e coppella di ottone che una manovella solleva e rilascia da un'altezza costante. Tale altezza è regolabile per la calibrazione. Contacolpi incorporato. Può essere anche elettrico.</p> 	<p>Recipienti per i campioni Capsule per la determinazione dell'umidità Forno Bilancia graduata Acqua distillata Spatole per mescolare e spalmare Lastra di ceramica Attrezzi per eseguire l'incisione Carte per asciugatura campione</p>
PROCEDURA	
<ul style="list-style-type: none"> • Limite Liquido <ul style="list-style-type: none"> ▪ Vagliare al setaccio 0,4 mm 300 g circa di materiale. ▪ Umidificare il campione con l'aggiunta di acqua, mescolare con una spatola e lasciare riposare per un notte. ▪ Posare uno strato liscio del campione all'interno del cucchiaino di Casagrande. ▪ Controllare l'altezza dello strato steso appoggiando la spatola nel punto più basso della coppella e sull'estremità: lo strato deve essere circa uguale all'altezza desiderata. ▪ Tracciare il solco con l'opportuno strumento. ▪ Controllare l'altezza del solco con strumento normalizzato ASTM. ▪ Sollecitare con dei colpi e conteggiare i colpi necessari per la chiusura del solco di circa 13 mm (anche non consecutivi); il numero dei colpi deve essere compreso tra 25 e 35. ▪ Prelevare il materiale dal cucchiaino nell'intorno del solco e porlo in una capsula per determinarne l'umidità. ▪ Prelevare un campione di circa 50 g per la determinazione del limite plastico e porlo in un contenitore. ▪ Umidificare la parte rimanente del campione e ripetere la procedura altre 2 volte in modo che il solco si chiuda di 13 mm rispettivamente tra 20 e 30 colpi e tra 15 e 25 colpi. • Limite Plastico <ul style="list-style-type: none"> ▪ Realizzare manualmente dei bastoncini del diametro di 3,2 mm sfruttando una lastra di vetro (o ceramica) come appoggio. 	

- Quando essi presentano per tale dimensione delle fessure sulla loro superficie si è raggiunto il limite di plasticità.
- Calcolare l'umidità dei bastoncini.

OPERAZIONI FINALI, RAPPORTI, MARCATURE

- **Limite Liquido (w_L):** valore dell'umidità per il quale il solco nel terreno si richiude di 13 mm con 25 colpi, ottenuto con procedimento grafico come mostrato nella figura seguente.



- **Limite Plastico (w_P):** valore dell'umidità per il quale bastoncini di 32 mm di diametro si fessurano.

- **Indici geotecnici**

- L'indice di plasticità **IP** si valuta come

$$IP = w_L - w_P$$


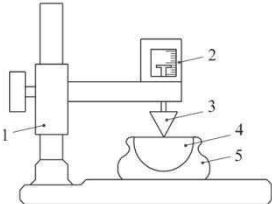
- L'indice di liquidità **LI** si valuta come

$$LI = \frac{w - w_P}{PI}$$

- L'indice di consistenza **IC** si valuta come

$$IC = \frac{w_L - w}{PI} = 1 - LI$$

2.5.6 Determinazione dei limiti di Atterberg attraverso il metodo con punta conica

PROVA DESCRITTA	
	<p>DETERMINAZIONE DEI LIMITI DI ATTERBERG <u>UNI CEN ISO/TS 17892-12 (2005)</u></p>
OBIETTIVI E CONTENUTO	
<p>Determinazione del Limite Liquido e del Limite Plastico di un terreno attraverso il Metodo con punta conica.</p>	
RIFERIMENTI NORMATIVI	
<p>UNI CEN ISO/TS 17892-1. Trattano lo stesso tema: CNR UNI 10014: 1964(ritirata) e ASTM D4318-10</p>	
APPARECCHIATURA	
<ul style="list-style-type: none"> • Spatole. • Spruzzatore con acqua distillata. • Capsula di evaporazione. • Contenitore resistente a corrosione, a tenuta d'aria. • Bilancia (accuratezza 0,03 g, leggibile a 0,01 g). • Cronometro. • Mortaio con pestello rivestito in gomma (per preparazione terreno a granulometria mista). • Setacci da 2 mm e da 0,4 mm. • Lastra di miscelazione piana o vassoio piano. 	
<p>Attrezzatura per Limite Liquido</p>  <ol style="list-style-type: none"> 1- Braccio di supporto regolabile; 2- Plexiglass con scala graduata; 3- Punta conica: acciaio inossidabile o duralluminio, massa di 60 g e angolo al vertice di 60° o massa di 80 g e angolo al vertice di 30°; 4- Provino; 5- Tazza di miscelazione: acciaio, porcellana o plastica, diametro maggiore di 55 mm e profondità di 30 mm se si utilizza la punta conica da 60 g/60° e con profondità di 40 mm se si utilizza la punta conica da 80 g/30°. <ul style="list-style-type: none"> • Rifilatore metallico lungo circa 100 mm con spatola a lama dritta. 	<p>Attrezzatura per Limite Plastico</p> <p>Lastra di miscelazione (circa 10 mm di spessore e 300 mm quadrati) piana, pulita, liscia e priva di graffi</p> <p style="text-align: center;">Due spatole</p> <p>Asta (diametro 3mm, lunghezza 100 mm)</p>

PROCEDURA

• **Preparazione del provino**

- Il provino non deve essere lasciato essiccare al di sotto del contenuto di acqua con cui deve essere sottoposto a prova.
- Per la determinazione del limite liquido sono necessari 200 g di terreno naturale passante allo staccio da 0,4 mm oppure 300 g di terreno preparato utilizzando il 'metodo a umido'.
- Rimuovere dai terreni a granulometria fine e i terreni organici il materiale più grossolano.
- Se possibile, la frazione grossolana deve essere rimossa a mano piuttosto che mediante staccatura a umido al fine di evitare possibili variazioni nel materiale del terreno mediante l'aggiunta di acqua diversa da quella del fluido interstiziale.
- Se non è possibile rimuovere la frazione grossolana a mano, i granuli devono essere rimossi utilizzando il seguente metodo a umido.
- Prelevare un provino rappresentativo di terreno non essiccato che fornisca almeno 300 g di passante allo staccio da 0,4 mm o più vicino, e pesarlo (m1).
- Prelevare un altro provino rappresentativo del campione e determinare il contenuto di acqua w.
- Posizionare il provino pesato in un contenitore e aggiungere acqua distillata (senza agente di dispersione) appena sufficiente a coprirlo. Esso deve essere agitato fino ad ottenere un impasto liquido.
- L'impasto deve essere versato nello staccio da 2 mm poggiato sullo staccio da 0,4 mm. Una quantità minima di acqua distillata deve essere utilizzata per lavare le particelle trattenute dagli stacci fino a quando l'acqua passante allo staccio da 0,4 mm non risulti sostanzialmente pulita. Tutti i lavaggi devono essere raccolti.
- Il materiale trattenuto dagli stacci da 2 mm e 0,4 mm deve essere essiccato a 105 °C e pesato al più vicino 0,01 g (m2).
- I residui di lavaggio devono essere lasciati sedimentare per un periodo sufficiente, e l'eventuale acqua pulita deve essere eliminata.
- Essiccare parzialmente la sospensione in un dispositivo ad aria calda corrente oppure in stufa a non più di 50 °C, o mediante filtrazione fino ad ottenere una pasta compatta. La pasta dovrebbe essere di consistenza corrispondente ad una penetrazione di circa 7 mm con la punta conica da 60 g/60°, o di 15 mm con la punta conica da 80 g/30°.
- Effettuare rimodellamento a mano, utilizzando una spatola; continuare fino a quando la consistenza del campione non cessa di modificarsi. Evitare l'inglobamento di bolle d'aria all'interno del provino.

• **Limite Liquido**

- Mescolare accuratamente l'impasto preparato.
- Requisiti per la penetrazione:

Requisiti per la penetrazione con la punta conica da	80 g/30°	60 g/60°
Penetrazione iniziale	Circa 15 mm	Circa 7 mm
Intervallo di penetrazione	Da 15 a 25 mm	Da 7 a 15 mm
Differenza massima tra due prove in successione	0,5 mm	0,4 mm
w _L determinato da una penetrazione di:	20 mm	10 mm

- Collocare con una spatola una porzione di terreno miscelato in una tazza pulita e asciutta, facendo attenzione a non intrappolare aria. Il terreno in eccesso deve essere tolto con il rifilatore in modo da lasciare una superficie livellata e liscia.
- Con la punta conica bloccata in posizione alzata, abbassare il gruppo di supporto in modo che la punta conica sfiori appena la superficie del terreno.
- La punta conica deve essere bloccata in posizione e, se richiesto da una particolare apparecchiatura, la posizione iniziale dell'albero della punta conica deve essere registrata al più vicino 0,1 mm.

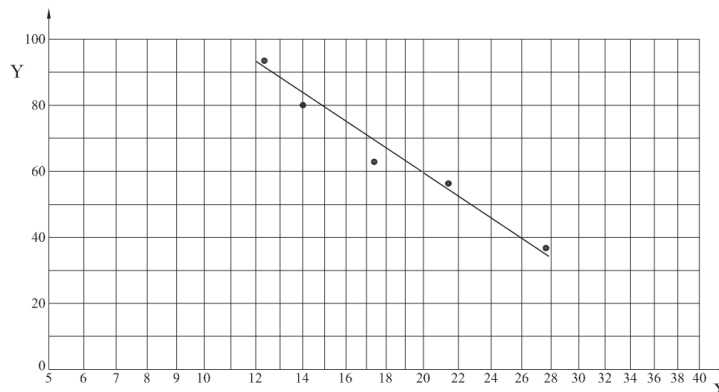
- Rilasciare la punta conica per un periodo di 5 ± 1 s. Se l'apparecchiatura non è dotata di rilascio automatico e di dispositivo di bloccaggio, evitare contraccolpi dell'apparecchiatura durante questa operazione.
 - Se si verifica un post-affondamento (dopo una determinata penetrazione la punta conica si arresta momentaneamente ma poi continua ad affondare fino a quando, gradualmente, si ferma definitivamente) questo dovrebbe essere osservato e registrato nel rapporto.
 - Bloccare la punta conica in posizione, se necessario per una particolare apparecchiatura.
 - Registrare la posizione finale dell'albero della punta conica, al più vicino 0,1 mm.
 - La penetrazione della punta conica deve essere calcolata come differenza tra la posizione iniziale e la posizione finale dell'albero della punta conica, al più vicino 0,1 mm.
 - La punta conica deve essere sollevata e pulita con accuratezza per evitare graffiature.
 - Un terreno un pò più umido deve essere aggiunto alla tazza, facendo attenzione a non intrappolare aria e la superficie deve essere lisciata.
 - Ripetere la fase di penetrazione fino a quando la differenza tra due penetrazioni in successione è minore di quella indicata nella tabella sopra. Calcolare la media delle ultime due penetrazioni.
 - Un provino (± 10 g) deve essere prelevato dall'area penetrata dalla punta conica e determinare il contenuto d'acqua.
 - Ripetere la procedura almeno altre tre volte utilizzando lo stesso provino di terreno ma con contenuti di acqua diversi. La quantità di acqua sottratta/aggiunta deve essere tale da coprire l'intervallo di valori di penetrazione riportati nella tabella sopra.
 - Quando si incrementa il contenuto di acqua del provino, si deve aggiungere acqua distillata e quindi mescolare delicatamente con la spatola.
 - Quando si riduce il contenuto di acqua, si deve spargere l'intero provino su una lastra o piatto da evaporazione.
- **Limite Plastico**
 - Prelevare un provino di circa 20 g dall'impasto di terreno preparato per la determinazione del limite liquido..
 - Essiccare il terreno sulla lastra fino al raggiungimento di uno stato di plasticità sufficiente a modellarlo a forma di palla.
 - La palla di terreno deve essere modellata tra le dita e arrotolata nel palmo delle mani fino alla comparsa di leggere fessurazioni sulla superficie. Questo provino deve essere diviso in due sottoprovini di circa 10 g ciascuno, e una determinazione separata deve essere effettuata su ciascuna porzione.
 - Ciascun sottoprovino deve essere suddiviso in quattro parti uguali.
 - Il terreno deve essere modellato tra le dita per distribuire uniformemente l'umidità e successivamente il terreno deve essere modellato a forma di bastoncino di circa 6 mm di diametro modellandolo con l'indice e il pollice di ciascuna mano.
 - Deve essere applicata una pressione sufficiente a ridurre il diametro del bastoncino fino a 3 mm circa, da 5 a 10 movimenti completi avanti e indietro della mano, alla velocità di circa 1 movimento completo al secondo.
 - L'essiccamento graduale del terreno si ottiene alternando i movimenti di rotolamento e modellazione, non mediante un rotolamento continuo, sia per la palla sia per i bastoncini, in quanto ciò produrrebbe una crosta secca.
 - Ripetere fino a quando il bastoncino non inizia a fessurarsi sia longitudinalmente sia trasversalmente dopo essere stato arrotolato fino ad un diametro di circa 3 mm, misurandolo con l'asta.
 - Valutare la condizione precisa di sbriciolamento.
 - Le porzioni di bastoncino di terreno sbriciolate che hanno raggiunto il limite plastico devono essere rimesse insieme e trasferite in un contenitore idoneo che deve essere immediatamente richiuso da apposito coperchio.
 - Ripetere sulle altre tre porzioni di terreno e collocarle tutte nello stesso contenitore. Il

contenuto di acqua del terreno deve essere determinato nel contenitore.

OPERAZIONI FINALI, RAPPORTI, MARCATURE

• **Limite Liquido (w_L)**

Diagrammare la relazione tra contenuto d'acqua (Y-%) e il logaritmo della penetrazione della punta conica (X-mm), riportando la migliore retta di regressione:



Il limite liquido w_L è pari al contenuto d'acqua corrispondente a una penetrazione della punta conica di 10 mm per punta conica da 60 g/60° oppure di 20 mm per punta conica da 80 g/30°.

• **Limite Plastico (w_P)**

Il contenuto di acqua (%) di entrambi i provini sottoposti a prova deve essere calcolato e i risultati devono essere espressi fino alla prima cifra decimale. Se i due risultati differiscono di oltre 0,5%, nel contenuto di acqua l'intera prova deve essere ripetuta. La media dei valori di contenuto di acqua deve essere calcolata e il valore deve essere espresso all'intera percentuale più vicina e deve essere riportato come limite plastico w_P .

• **Indici geotecnici**

- L'indice di plasticità I_P :

$$I_P = w_L - w_P$$

- L'indice di liquidità I_L :

$$I_L = \frac{w - w_P}{I_P}$$

- L'indice di consistenza I_C :

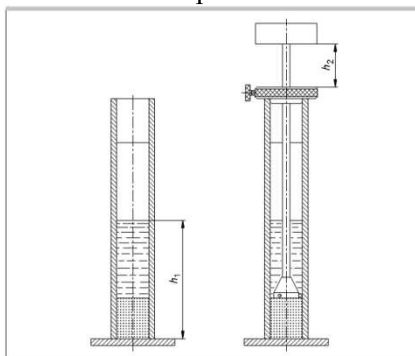
$$I_C = \frac{w_L - w}{I_P} = 1 - I_L$$

2.5.7 Prova dell'equivalente in sabbia

PROVA DESCRITTA		
<u>PROVA DELL'EQUIVALENTE IN SABBIA</u> <u>UNI EN 933-8 (2000)</u>		
OBIETTIVI E CONTENUTO		
Metodo per la determinazione del valore di equivalenza in sabbia della classe granulometrica 0/2 mm, negli aggregati fini e negli aggregati misti, applicabile agli aggregati naturali.		
RIFERIMENTI NORMATIVI		
<i>UNI EN 932-2; UNI EN 932-5; UNI EN 1097-5.</i> Sostituisce la <i>UNI 8520-15</i> Trattano lo stesso tema: <i>CNR BU 27/72</i> e <i>ASTM D2419 - 09</i>		
APPARECCHIATURA		
<p style="text-align: center;">Reagenti</p> <p>Soluzione Concentrata: acqua distillata, cloruro di calcio, glicerina, soluzione di formaldeide;</p> <p>Soluzione di lavaggio: soluzione concentrata diluita in acqua distillata.</p>	<p>Due cilindri graduati</p>	<p>Gruppo stantuffo di prova</p> <p>Cronometro</p> <p>Righello da 500 mm</p> <p>Staccio di prova (2 mm)</p> <p>Spazzola per staccio</p> <p>Spatola</p> <p>Tubo di lavaggio</p> <p>Recipiente di vetro o di plastica</p> <p>Imbuto</p> <p>Macchina agitatrice</p>
PROCEDURA		
<ul style="list-style-type: none"> • Preparazione dei campioni di prova <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ridurre la porzione di prova in conformità con la <i>EN 932-2</i>, in modo da ottenere due campioni di prova. ▪ Sifonare la soluzione di lavaggio dentro ciascun cilindro graduato, fino a raggiungere il cerchio di riferimento inferiore del cilindro. ▪ Versare attraverso l'imbuto un campione di prova in ciascun cilindro graduato. ▪ Battere sul fondo di ciascun cilindro diverse volte con il palmo della mano, per eliminare le bolle d'aria e per facilitare l'inumidimento del campione di prova. ▪ Lasciare riposare ciascun cilindro per almeno (10 ± 1) min. • Agitazione dei cilindri graduati <ul style="list-style-type: none"> ▪ Al termine del periodo di 10 min, sigillare il cilindro utilizzando uno dei tappi di gomma e fissare il cilindro sulla macchina agitatrice. ▪ Agitare il cilindro per (30 ± 1) s, quindi rimetterlo sul banco prova, in posizione verticale. 		

- **Lavaggio**
 - Rimuovere il tappo di gomma dal cilindro graduato e risciacquarlo stando sopra il cilindro, utilizzando la soluzione di lavaggio, assicurandosi che tutto il materiale ritorni nel cilindro.
 - Inserire il tubo di lavaggio nel cilindro, risciacquando prima le pareti del cilindro utilizzando la soluzione di lavaggio, quindi spingere il tubo in giù, attraverso il sedimento sul fondo del cilindro.
 - Tenere il cilindro in posizione verticale mentre si lascia che la soluzione di lavaggio agiti il contenuto ed induca i componenti fini e argillosi a salire verso l'alto. Quindi, mentre si sottopone il cilindro a un lento movimento circolare, alzare lentamente e uniformemente il tubo di lavaggio.
 - Quando il livello del liquido si avvicina al riferimento superiore, sollevare lentamente il tubo di lavaggio e regolare il flusso in modo da mantenere il livello del liquido allineato al riferimento superiore fino a che il tubo è stato completamente ritratto e il flusso arrestato. Iniziare a misurare il periodo di sedimentazione immediatamente dopo avere ritratto il tubo di lavaggio.

- **Misurazioni**
 - Lasciare riposare ciascun cilindro graduato, senza disturbare e senza farlo vibrare, per $(20,00 \pm 0,25)$ min.
 - Al termine di tale periodo misurare l'altezza **h1** del livello superiore del flocculato in relazione alla base del cilindro graduato.
 - Abbassare delicatamente il gruppo stantuffo nel cilindro, fino a che il pezzo di testa si appoggi sul sedimento.
 - Posizionare il collare sulla cima del cilindro, quindi bloccarlo sull'asta dello stantuffo;
 - Determinare l'altezza del sedimento **h2** misurando la distanza tra la faccia inferiore della testa dello stantuffo e la faccia superiore del collare.

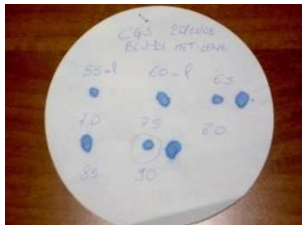


OPERAZIONI FINALI, RAPPORTI, MARCATURE

- **Risultati**
 - Calcolare il rapporto:

$$(h_2/h_1) \times 100$$
 per ciascun cilindro fino a un decimale.
 Se i due valori differiscono di oltre 4 unità, il procedimento di prova deve essere ripetuto.
 - Calcolare il valore dell'equivalente in sabbia (**SE**) come media dei rapporti ottenuti su ciascun cilindro arrotondato al numero intero più vicino.

2.5.8 Prova del blu di metilene

PROVA DESCRITTA	
<u>PROVA DEL BLU DI METILENE - UNI EN 933-9 (2009)</u>	
OBIETTIVI E CONTENUTO	
Valutare la capacità di assorbimento di un terreno attraverso la determinazione del valore del blu di metilene della frazione granulometrica 0/2 mm in aggregati fini o misti.	
RIFERIMENTI NORMATIVI	
UNI EN 932-2; UNI EN 932-5. Tratta lo stesso tema: ASTM D2166 - 06	
APPARECCHIATURA	
<p style="text-align: center;">Reagente</p> <p>Acqua distillata o demineralizzata</p> <p>Soluzione colorante di blu di metilene (5kg essiccati e di cui si conosce il contenuto d'acqua)</p> <p style="text-align: center;">Beuta</p>	<p>Buretta da 100 ml o 50 ml</p> <p>Carta da filtro</p>  <p>Bacchetta di vetro (300X8 mm)</p> <p>Agitatore rotante</p> <p>Bilancia e cronometro</p> <p>Setaccio da 2 mm</p> <p>Bicchiere</p> <p>Stufa per mantenere la temperatura di (110±5 °C)</p> <p>Essiccatore</p> <p>Termometro</p>
PROCEDURA	
<ul style="list-style-type: none"> • Preparazione porzione di prova <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ridurre i campioni di laboratorio in conformità alla UNI EN 932-2 per ottenere due sottocampioni con almeno 200 g di frazione granulometrica 0/2 mm. ▪ Vagliare i sottocampioni su un setaccio da 2 mm e scartare il trattenuto. ▪ Pesare uno dei sottocampioni come M. Essiccarlo fino a massa costante, dopodiché pesarlo di nuovo come M'. Determinare e registrare il contenuto di acqua di tale sottocampione come W (%) = 100 X (M - M')/M'. Scartare il sottocampione. ▪ Prendere l'altro sottocampione. La massa della porzione di prova deve essere maggiore di $[200X(1+W/100)]g$. Pesare la porzione di prova come M₀ e determinare la sua massa M₁: $M_1 = M_0 / (1 + W/100)''$ ▪ Preparare le porzioni di prova con lo stesso metodo con una massa M₁ pari a (30,0 ± 0,1) g di frazione granulometrica 0/0,125 mm per la determinazione di MB_F. • Preparazione della sospensione <ul style="list-style-type: none"> ▪ Versare (500±5) ml di acqua distillata o demineralizzata nel bicchiere ed aggiungere la porzione di prova essiccata, mescolando bene con la spatola. ▪ Agitare la soluzione colorante o, in alternativa, miscelare con cura. ▪ Riempire la buretta con la soluzione colorante e rimettere al buio il resto della 	

soluzione colorante.

- Impostare l'agitatore ad una velocità di 600min^{-1} e porre l'agitatore a circa 10 mm dalla base del bicchiere.
- Accendere l'agitatore e avviare il cronometro, agitando il contenuto del bicchiere per 5 min a $(600 \pm 60)\text{min}^{-1}$, quindi agitare senza interruzione a (400 ± 40) giri/min per il resto della prova.

- **Prova macchia**

- Dopo ogni iniezione di colorante, prelevare una goccia di sospensione per mezzo della bacchetta di vetro e depositarla sulla carta da filtro.
- La quantità di sospensione presa per ogni goccia deve essere tale che il diametro del deposito misuri tra gli 8 mm e i 12 mm.
- La prova è considerata positiva se, nella zona bagnata, si forma attorno al deposito centrale di colore blu intenso un alone, consistente in un anello persistente di colore blu chiaro di circa 1 mm.

- **Determinazione della quantità di colorante assorbito**

- Porre la carta da filtro sopra un bicchiere vuoto, in modo che la maggiore parte della sua superficie non sia in contatto con alcun solido o liquido.
- Agitare per 5 min a $(600\pm 60)\text{min}^{-1}$, iniettare una dose di 5 ml di soluzione colorante nel bicchiere; agitare a $(400\pm 40)\text{min}^{-1}$ per almeno 1 min ed eseguire la prova macchia sulla carta da filtro.
- Continuare ad agitare ed eseguire prove macchia fino a quando l'alone persiste per 5min.
- Registrare il volume totale della soluzione colorante **V1** aggiunta per ottenere un alone che persista per 5 min, arrotondando al millilitro più vicino.

OPERAZIONI FINALI, RAPPORTI, MARCATURE

- **Calcolo dei risultati**

- **MB della frazione 0/2 mm**

$$\text{MB} = \frac{V_1}{M_1} \cdot 10$$

[g di colorante per kg di materiale passante allo staccio da 2 mm]

dove:

V_1 = volume totale della soluzione iniettata [ml];

M_1 = massa del campione passante allo staccio da 2 mm [g].

- **MB_F della frazione 0/0,125 mm**

$$\text{MB}_F = \frac{V_1}{M_1} \cdot 10$$

[g di colorante per kg della frazione 0/0,125 mm]

V_1 = volume totale della soluzione iniettata [ml];

M_1 = massa della porzione di prova [g].

- **Superficie Specifica Totale**

$$S_a = 20,93 \frac{V_1}{M_1}$$



[mm/g]

20,93 = superficie corrispondente a 1 cm³ di blu di metilene;


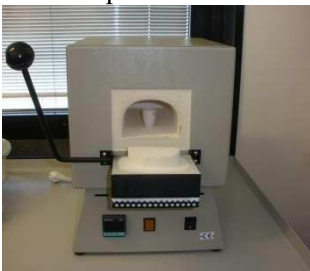

V_1 = volume totale della soluzione iniettata [ml];

M_1 = massa del campione [g].

2.5.9 Contenuto di sostanze organiche

PROVA DESCRITTA	
<u>CONTENUTO DI SOSTANZE ORGANICHE</u> <u>UNI EN 1744-1 (2010)</u>	
OBIETTIVI E CONTENUTO	
Valutare la presenza di sostanze che possono influenzare negativamente la stabilizzazione di un terreno.	
RIFERIMENTI NORMATIVI	
<i>UNI EN 932; UNI EN 933; UNI EN 1097; UNI EN 1367;</i>	
APPARECCHIATURA	
<p style="text-align: center;">Reagente</p> <p style="text-align: center;">Soluzione al 3% di Idrossido di Sodio (NaOH)</p> <p>Soluzione colore normalizzata, preparata sciogliendo 45,0 g di FeCl₃X6H₂O e 5,50 g di CoCl₂X6H₂O in 279,5 g di acqua con 1 ml di HCl concentrato.</p>	<p style="text-align: center;">Setaccio da 4 mm</p> <p style="text-align: center;">Bottiglia di vetro con apposito tappo a vite</p> <div style="text-align: center;">  </div>
PROCEDURA	
<ul style="list-style-type: none"> • Preparare la porzione di prova secondo la UNI EN 932 -1: 1998. • Essiccare il campione ridotto disteso sui vassoi in forno a (110 ± 5) °C. • Stacciare il campione sullo staccio da 4 mm. • Essiccare il passante su vassoi in forno a (55 ± 5) °C. • Versare una soluzione al 3% di NaOH nella bottiglia di vetro fino ad un'altezza di 80 mm. • Versare la porzione di prova finché l'altezza di aggregato e soluzione raggiunge i 120 mm. • Agitare la bottiglia per consentire l'espulsione delle bolle d'aria. • Tappare la bottiglia, agitare vigorosamente per 1 min e lasciare riposare per 24 h. 	
OPERAZIONI FINALI, RAPPORTI, MARCATURE	
<ul style="list-style-type: none"> • Espressione dei risultati <p>Confrontare il colore della soluzione con il colore della soluzione normalizzata:</p> <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 20px;">  </div> <ul style="list-style-type: none"> ▪ se il colore della soluzione è più chiaro di quello della soluzione normalizzata, non sono presenti sostanze organiche; ▪ se il colore è più scuro, è possibile che siano presenti sostanze organiche (valutarlo attraverso la norma <i>ASTM D 2974 – 07a</i>). </div>	

2.5.10 Percentuale di sostanze organiche

PROVA DESCRITTA	
	<p><u>PERCENTUALE DI SOSTANZE ORGANICHE</u> <u>ASTM D 2974 – 07a</u></p>
OBIETTIVI E CONTENUTO	
<p>Determinazione della percentuale di sostanze organiche contenuta in un campione di terreno.</p>	
RIFERIMENTI NORMATIVI	
<p><i>UNI EN 1744-1/15; ASTM D 653; ASTM D 3740; ASTM D 4753; ASTM D 6026; ASTM E 145.</i></p>	
APPARECCHIATURA	
<ul style="list-style-type: none"> • Forno ventilato, regolato da termostato in grado di mantenere una temperatura di $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$. • Forno a muffola capace di fornire temperature costanti a $(440 \pm 22)^\circ\text{C}$. 	
	
<ul style="list-style-type: none"> • Bilancia con portata di $(500 \pm 0.01)\text{g}$. • Foglio di gomma, tela cerata o altro materiale non assorbente. • Crogioli di evaporazione di porcellana con capacità non inferiore ai 100 ml. 	
	
<ul style="list-style-type: none"> • Lamina di alluminio resistente o coperchio in porcellana. • Contenitore di porcellana, cucchiaini. • Pinza per crogioli. 	
PROCEDURA	
<ul style="list-style-type: none"> • Determinare la massa di un crogiolo di porcellana coperto (M_c) con l'approssimazione di 0.01 g. • Mettere una parte del campione passante allo staccio da 4 mm preparato per la determinazione del contenuto di sostanze organiche secondo la <i>UNI EN 1744-1/15</i> nel crogiolo e determinare la massa lorda (M_i) con l'approssimazione di 0.01 g. • Rimuovere il coperchio dal crogiolo e metterlo nel forno a muffola. Portare gradualmente la temperatura nel forno a $(440 \pm 22)^\circ\text{C}$. • Mantenere la temperatura a $(440 \pm 22)^\circ\text{C}$ fino a che il campione non è completamente incenerito (non si verifica nessun cambiamento di massa dopo almeno un'ora di 	

riscaldamento).

- Coprire con una lamina di alluminio la quale è stata mantenuta asciutta in essiccatore, quindi determinare la massa finale (M_f) con l'approssimazione di 0.01 g.

OPERAZIONI FINALI, RAPPORTI, MARCATURE

- **Calcolo dei risultati**

- **Contenuto di ceneri percentuale:**

$$FA \% = \frac{(M_f - M_c)}{(M_i - M_c)} * 100$$

dove:

$FA \% =$ contenuto di ceneri % (approssimato a 0.01 %);

$M_f - M_c =$ massa ceneri [g];

$M_i - M_c =$ massa del campione essiccato in stufa [g].

- **Percentuale di sostanze organiche** (approssimata a 0.01 %):

$$S. O. \% = 100,0 - FA \%$$

dove:

$S. O. \% =$ contenuto di sostanze organiche % (approssimato a 0.01 %);

$FA \% =$ contenuto di ceneri %.

- **S.O.** deve risultare inferiore al 3 % per non inficiare la stabilizzazione del terreno.
- **Report** contenente informazioni sul campione, le apparecchiature e i risultati ottenuti.

2.5.11 Contenuto di solfati solubili in acido

PROVA DESCRITTA	
<u>CONTENUTO DI SOLFATI SOLUBILI IN ACIDO</u> <u>UNI EN 1744-1/12 (2010)</u>	
OBIETTIVI E CONTENUTO	
Valutare la presenza di sostanze che possono influenzare negativamente la stabilizzazione di un terreno.	
RIFERIMENTI NORMATIVI	
<i>UNI EN 932; UNI EN 933; UNI EN 1097; UNI EN 1367;</i>	
APPARECCHIATURA	
Reagenti Acido cloridrico concentrato Acqua demineralizzata Soluzione di idrossido di ammonio Soluzione di cloruro di bario	Setaccio da 0,125 mm Bilancia (precisione di 0,001 g) Beuta conica da 1000 ml Fornello Bacchetta di vetro Bicchieri di vetro da 1000 ml Carta da filtro di porosità media
PROCEDURA	
<ul style="list-style-type: none"> • Ottenere un campione di circa 20 g passante totalmente al setaccio da 0,125 mm dopo macinazione. • Prelevare circa 8 g di questo materiale come porzione di prova. • Pesare la porzione di prova al più prossimo 0,1 mg (m₆). Porre 360 ml di acqua e 40 ml di acido cloridrico concentrato in una beuta conica da 1 000 ml e riscaldare fino al punto di ebollizione. • Rimuovere dalla fonte di calore e, agitando, spruzzare la porzione di prova sulla soluzione di acido. • Disgregare con la parte appiattita di una bacchetta di vetro i grumi formati. • Lasciare riposare la soluzione per 15 min a una temperatura appena al disotto del punto di ebollizione. • Filtrare il residuo attraverso un filtro di carta medio in un bicchiere da 1000 ml. Lavare accuratamente con acqua calda. • Regolare il volume a circa 600 ml con acqua demineralizzata. Aggiungere una piccola quantità di poltiglia di carta da filtro e riscaldare il contenuto del bicchiere. • Rendere la soluzione alcalina aggiungendo idrossido di ammonio. • Sobbollire per 30 sec e filtrare con delicatezza utilizzando una carta da filtro di porosità media. • Lavare il contenuto del filtro e conservare i filtrati. • Trasferire la carta da filtro e i granuli trattenuti su di essa in un bicchiere e disciogliere in 5 ml di acido cloridrico concentrato al quale sono stati aggiunti 70 ml di acqua calda. • Portare a ebollizione e bollire per circa 5 min poi controllare che la soluzione sia limpida. Se non è limpida ripetere la prova dall'inizio. • Mantenendo la soluzione al punto di ebollizione e continuando a mescolare vigorosamente, aggiungere lentamente 40 ml della soluzione di cloruro di bario riscaldata appena sotto al punto di ebollizione. Lasciare maturare, filtrare e calcinare il precipitato di solfato di bario. • Pesare al più prossimo 0,1 mg e calcolare la massa del precipitato (m₇). 	

OPERAZIONI FINALI, RAPPORTI, MARCATURE

- **Calcolo dei risultati**

Percentuale di solfati contenuta nel terreno:

$$SO_3 = \frac{m_7}{m_6} \times 34,30$$


con:

m_6 : massa della porzione di prova [g];

m_7 : massa del precipitato [g].

- Se SO_3 è superiore al valore 0,8 % la soluzione con trattamento a calce del terreno va bocciata.

2.5.12 Contenuto iniziale di calce

PROVA DESCRITTA	
	CONTENUTO INIZIALE DI CALCE <u>ASTM D 6276 – 99a (2006)</u>
OBIETTIVI E CONTENUTO	
Metodo per la stima della proporzione terreno – calce ai fini della stabilizzazione a calce delle terre, valido per terreno passante al setaccio ASTM n. 40 (0,425 mm).	
RIFERIMENTI NORMATIVI	
<i>ASTM C 51; ASTM C 977; ASTM D 421; ASTM D 653; ASTM D 1193; ASTM D 1293; ASTM D 2216; ASTM D 3740; ASTM D 4753; ASTM E 11; ASTM E 145.</i>	
APPARECCHIATURA	
Reagenti Acqua Soluzione tampone (pH 12) Calce viva	Bilancia graduata, capienza minima 600 g e leggibilità 0,001g. Setaccio ASTM N 40 (UNI 0,425 mm). Otto bottiglie di plastica da 150-ml con coperchi a vite aderenti. pH - metro fornito dell'elettrodo di riferimento Forno
PROCEDURA	
<ul style="list-style-type: none"> • Selezionare un campione rappresentativo di terreno tramite la UNI EN 932-2; porzione di prova: setacciare almeno 200 g di materiale allo staccio ASTM n. 40 (UNI 0,425 mm). Preparare sette provini, ciascuno di 25 g, e essicarli in forno. • Tarare il pH-metro utilizzando soluzioni tampone a pH compresi fra 7 e 12 a 25°C. • Lasciare raffreddare i provini, quindi porli in bottiglie di plastica chiuse ermeticamente. Riempire la prima di queste bottiglie di terreno. • Ottenere sei campioni rappresentativi di calce. Cinque campioni rappresentano il 2, 3, 4, 5 e il 6% della massa secca dei campioni di terreno. Il sesto campione di 2.0 g di calce rappresenta una soluzione satura di calce. • Aggiungere uno dei primi cinque provini di calce ad uno dei campioni di terreno in bottiglie di plastica, chiudere ermeticamente, marcare la percentuale sul flacone, e mescolare accuratamente agitando. Ripetere questa procedura per i restanti quattro campioni di calce e di terreno. • Posizionare i 2.0 g di calce asciutta in una bottiglia di plastica e chiudere ermeticamente. • Aggiungere 100 ml di acqua per ogni campione terreno - calce e per il flacone contenente 2.0 g di calce. • Tappare le bottiglie e agitare da 30 s a 1 min. Continuare ad agitare i campioni per 30 s ogni 10 minuti per 1 h. • Entro 15 minuti dalla fine del periodo d'agitazione (1 h), determinare il pH di ciascuna miscela terreno - acqua - calce e di quella calce-acqua. Mantenere la temperatura delle miscele a 25°C al momento di determinare il pH. • Registrare il valore del pH per ogni miscela suolo - acqua - calce e per la calce - 	

acqua.

OPERAZIONI FINALI, RAPPORTI, MARCATURE

- **Contenuto iniziale di calce - CIC**
 - La più bassa percentuale di calce che fornisce un pH di 12.4.
 - Se il pH più basso è superiore a 12.4 si seleziona la percentuale più bassa di calce in cui il valore del pH per almeno due successivi test non aumenta per campioni con percentuali più alte di calce.
 - Se il più alto pH misurato è 12.3 e almeno due successivi campioni di calce danno valori di 12.3, allora la più bassa percentuale di calce per dare un pH di 12.3 è approssimativamente la percentuale ottimale di calce per la stabilizzazione.

2.5.13 Pre-qualifica della calce: contenuto di ossido di calcio

PROVA DESCRITTA	
<u>CONTENUTO DI OSSIDO DI CALCIO E MAGNESIO</u>	
<u>UNI EN 459-2 (2010)</u>	
OBIETTIVI E CONTENUTO	
Determinare le caratteristiche della calce impiegata.	
RIFERIMENTI NORMATIVI	
<i>UNI EN 459-1 (2010); UNI EN 196-2 (2007).</i>	
APPARECCHIATURA	
<i>Reagenti</i>	<i>Apparecchiatura</i>
Acqua	Forno
HCl concentrato, a densità 1,12	Capsula di ceramica
Acido nitrico concentrato	Crogiolo
Acido ossalico solido	Normali attrezzi da laboratorio
Ammoniaca a densità 0,96	
Ossalato e fosfato ammonico	
PROCEDURA	
<ul style="list-style-type: none"> • Campionare mediante rompitore e quartatura. • Aggiungere acqua e 25 cc di HCl a densità 1,12 a mezzo grammo di calce. • Evaporare e conservare in stufa a $(110 \div 120)^\circ\text{C}$. • Umettare il residuo con HCl concentrato (riposo a freddo per 15 minuti). • Riprendere con 100 cc d'acqua bollente, lasciar riposare e lavare a caldo prima con acqua acidulata con HCl (5:100) poi con acqua pura, fino alla scomparsa della reazione Cl. • Lasciar evaporare fino a circa 150 cc, aggiungere con qualche goccia di acido nitrico concentrato, far bollire per 1 min e dopo un periodo di riposo filtrare e lavare con acqua bollente. • Portare il nuovo filtrato, ridotto a circa 250-300cc, ad ebollizione e aggiungere prima con HCl sino a reazione acida (indicatore metilarancio), poi con acido ossalico solido. • Aggiungere ammoniaca (densità 0,96), e lasciar riposare per 5 ore. • Lavare con soluzione calda di ossalato ammonico, posare il precipitato in un crogiolo e, tenendo questo inclinato, essiccare ed incenerire mediante una piccola fiamma; pesare (A). • Portare il filtrato proveniente dalla determinazione precedente a circa 250cc, aggiungere con HCl diluito (1:1) fino a reazione acida. Trattare con un eccesso di fosfato sodico o ammonico, portare ad ebollizione e aggiungere con ammoniaca. • Lasciar raffreddare per 12 ore, lavare con ammoniaca ed eventualmente aggiungere acido citrico; pesare (B). 	
OPERAZIONI FINALI, RAPPORTI, MARCATURE	
<ul style="list-style-type: none"> • Percentuale di CaO 	$CaO \% = 200 \times (A)$
<ul style="list-style-type: none"> • Percentuale di MgO 	$MgO \% = 72,42 \times (B)$

2.5.14 Pre-qualifica della calce: contenuto di calce libera nelle calci aeree

PROVA DESCRITTA	
<u>CONTENUTO DI CALCE LIBERA</u>	
<u>UNI EN 459-2 (2010)</u>	
OBIETTIVI E CONTENUTO	
Determinare le caratteristiche della calce impiegata.	
RIFERIMENTI NORMATIVI	
UNI EN 459-1 (2010).	
APPARECCHIATURA	
<i>Reagenti</i>	<i>Apparecchiatura</i>
Acqua Saccarosio Metanolo Acido cloridrico Fenolftaleina	Tavola vibrante o agitatore magnetico Bilancia accurata Beuta Carte da filtro Normali attrezzi da laboratorio
PROCEDURA	
<ul style="list-style-type: none"> • Versare 50 ml di acqua in una beuta conica da 300 ml. • Pesare 1g di campione con la bilancia accurata (1 mg) e porlo nella beuta mescolandolo e portandolo in sospensione. • Aggiungere 10 g di saccarosio. • Agitare (mediante tavola vibrante o agitatore magnetico) la sospensione tappata per 15 min. • Filtrare il tutto con due carte da filtro. • Lavare la beuta con 6 parti di acqua da 25 ml di acqua fredda e titolare (valutare la concentrazione) il filtrato con acido cloridrico utilizzando la fenolftaleina come indicatore. 	
OPERAZIONI FINALI, RAPPORTI, MARCATURE	
<ul style="list-style-type: none"> • Contenuto di calce libera $K_a = \frac{2,904V_5 \times C_1}{m_2} \quad [\text{ml/kg}]$ <p> V_5 = Volume di acido cloridrico [ml]. C_1 = Fattore di acido cloridrico [mol/l]. m_2 = Massa del campione [kg]. </p>	

2.6 Attività di Ricerca inerenti alla Pre-qualifica dei materiali

L'attività di ricerca inerente alla fase di pre-qualifica dei materiali utilizzati per il trattamento a calce è inserita nella più ampia ricerca facente parte della Convenzione di Ricerca DICAM – CGS Group S.p.A. che ha come scopo lo studio di una metodologia di lavorazione e controllo per il miglioramento e/o la stabilizzazione di materiali terrosi in opera.

Gli studi effettuati su questo particolare argomento in primo luogo hanno avuto lo scopo di apprendere e unire il mondo normativo relativo alla caratterizzazione delle terre e più in generale dei materiali con la tecnica di trattamento dei terreni con leganti per migliorare le loro proprietà meccaniche e di durabilità.

Attraverso una serie di prove selezionate e ritenute idonee si è giunti a elaborare una procedura standard di classificazione dei materiali utilizzati nella stabilizzazione a calce.

Si sottolinea che l'attività di ricerca inerente ad una qualunque fase del processo di realizzazione e controllo del trattamento a calce di un terreno ha richiesto un preliminare studio sui materiali utilizzati. Questo ha fornito la possibilità di ottenere un importante numero di verifiche sul processo di pre-qualifica elaborato, anche in casi in cui esso non era l'obiettivo principale in esame.

Si ricorda di seguito quello che dovrà essere il contenuto del cosiddetto Report della pre-qualifica, un documento che raccoglie tutti i dati necessari per informare in maniera completa sulla procedura di pre-qualifica svolta [6]:

- **Informazioni generali sui materiali**
- **Campionamento in sito**
 - Riduzione del campione in porzioni di prova
- **Prove di laboratorio**
 - Classificazione del terreno
 - Analisi granulometrica
 - Limiti di Atterberg
 - Caratteristiche fisiche
 - Equivalente in sabbia
 - Blu di metilene
 - Caratteristiche chimiche
 - Contenuto di sostanze organiche
 - Percentuale di sostanze organiche
 - Contenuto di solfati solubili in acido
 - Contenuto iniziale di calce

2.6.1 Scheda di ricerca: *Pre-qualifica dei materiali*

SCHEDA DI RICERCA – Pre-qualifica dei materiali	
OBIETTIVO	Scelta delle verifiche da effettuare, mediante prove di laboratorio, per poter caratterizzare in modo completo i materiali utilizzati, allo scopo di ottenere una procedura standard di prequalifica.
ATTIVITÀ	<ul style="list-style-type: none"> • Tesi di Laurea: <i>Analisi comparativa sperimentale sulle metodologie di costipamento delle terre in Laboratorio (Ing. R. Cancellieri)</i> Studio bibliografico-normativo per determinare un procedimento di qualifica in laboratorio del materiale utilizzato nella stabilizzazione a calce. Realizzazione di tutte le prove necessarie per pre-qualificare il materiale ai fini di successive analisi sullo stesso (prove e studi sul costipamento di un terreno). • Tesi di Laurea: <i>Stabilizzazione delle terre con calce: studio di laboratorio del processo di maturazione immediata (Ing. C. Berti)</i> Redazione di una procedura di prequalifica dei terreni ai fini della stabilizzazione a calce con relativo aggiornamento normativo rispetto agli studi precedentemente effettuati. Studio sulle procedure di campionamento e riduzione dei campioni di prova. Realizzazione di tutte le prove inserite nel procedimento su un terreno tipo che sarà successivamente trattato a calce.
RISULTATI	<p>Grazie alle attività svolte è emersa chiaramente la necessità di valorizzare e intensificare la fase di prequalifica dei materiali, ai fini di una corretta progettazione dell'operazione di stabilizzazione a calce del terreno.</p> <p>Sono state quindi inserite in questa fase ulteriori prove di laboratorio, oltre alle classiche prove di classificazione di un terreno, che portano ad esaminare anche caratteristiche fisiche e chimiche che, si è visto, sono di importanza determinante per la realizzazione a regola d'arte del trattamento.</p> <p>Alcune di queste prove aggiuntive sono state inserite grazie a normative non nazionali, quindi appaiono come veri e propri aggiornamenti procedurali nello studio dei terreni.</p> <p>La realizzazione vera e propria in laboratorio di tutta la procedura di prequalifica nel contesto di studi più ampi sempre relativi alla stabilizzazione a calce ha confermato le conclusioni suddette: la conoscenza delle caratteristiche del terreno in sito fornisce indicazioni da cui non è possibile prescindere, tra cui quelle sul tenore di legante da utilizzare.</p> <p>Si è infine riscontrata una certa aleatorietà sui dati ottenuti al fine di determinare la quantità di legante da utilizzare; questo fa sì che diventa indispensabile realizzare analisi in laboratorio atte a riprodurre il più fedelmente possibile le sollecitazioni cui è soggetto il terreno in sito durante il trattamento. Su questa osservazione si sono basati studi di ricerca sui macchinari da utilizzare per meglio simulare le sollecitazioni in sito, con particolare attenzione al confronto tra le due prove di costipamento più utilizzate nell'ambito stradale, quello con apparecchiatura Proctor e quello con Pressa Giratoria.</p>

Capitolo 3 – STUDIO DELLA MISCELA

In seguito all'analisi effettuata sui singoli materiali impiegati nei trattamenti a calce, si procede con una seconda fase, sempre di laboratorio, finalizzata a valutare le caratteristiche meccaniche principali della miscela terra-calce.

L'obiettivo principale è individuare la miscela ottimale sulla base dei risultati ottenuti dalla fase di pre-qualifica.

Si dovranno riprodurre in laboratorio le condizioni che normalmente in sito vanno a determinare la qualità del trattamento in fase di miscelazione: l'addensamento del terreno, il contenuto d'acqua e la quantità di calce utilizzata.

E' quindi evidente la dipendenza e l'importanza ricoperta dai parametri ricavati dalla pre-qualifica, con particolare attenzione per il *CIC* – Contenuto Iniziale di Calce, da cui si partirà per la valutazione del quantitativo ottimale di calce.

La procedura prevede la realizzazione di più provini di miscela con diversi tenori di umidità e di calce; dopo aver verificato la qualità della miscelazione si effettuerà il costipamento in laboratorio e infine si passerà a valutare i parametri meccanici che contraddistinguono i vari provini. Le principali caratteristiche meccaniche sono riportate nella norma *UNI EN 14227-11 (2006): Miscele legate con leganti idraulici - Specifiche - Terra trattata con calce*, che permette anche di classificare le miscele sulla base dei risultati ottenuti.

La miscela ottimale tra quelle testate sarà quella che con il minor contenuto di calce permette di ottenere i valori limite di resistenza richiesti nel Capitolato Prestazionale di riferimento, documento redatto solitamente dal committente dell'opera che definisce tutti i parametri tecnici tra cui i valori da rispettare.

La procedura completa sullo studio della miscela prevede l'utilizzo di prove descritte nella serie di norme *UNI EN 13286: Miscele non legate e legate con leganti idraulici* e alcuni aggiornamenti inseriti grazie all'attività di ricerca eseguita su questo tema (Fig. 3.1).

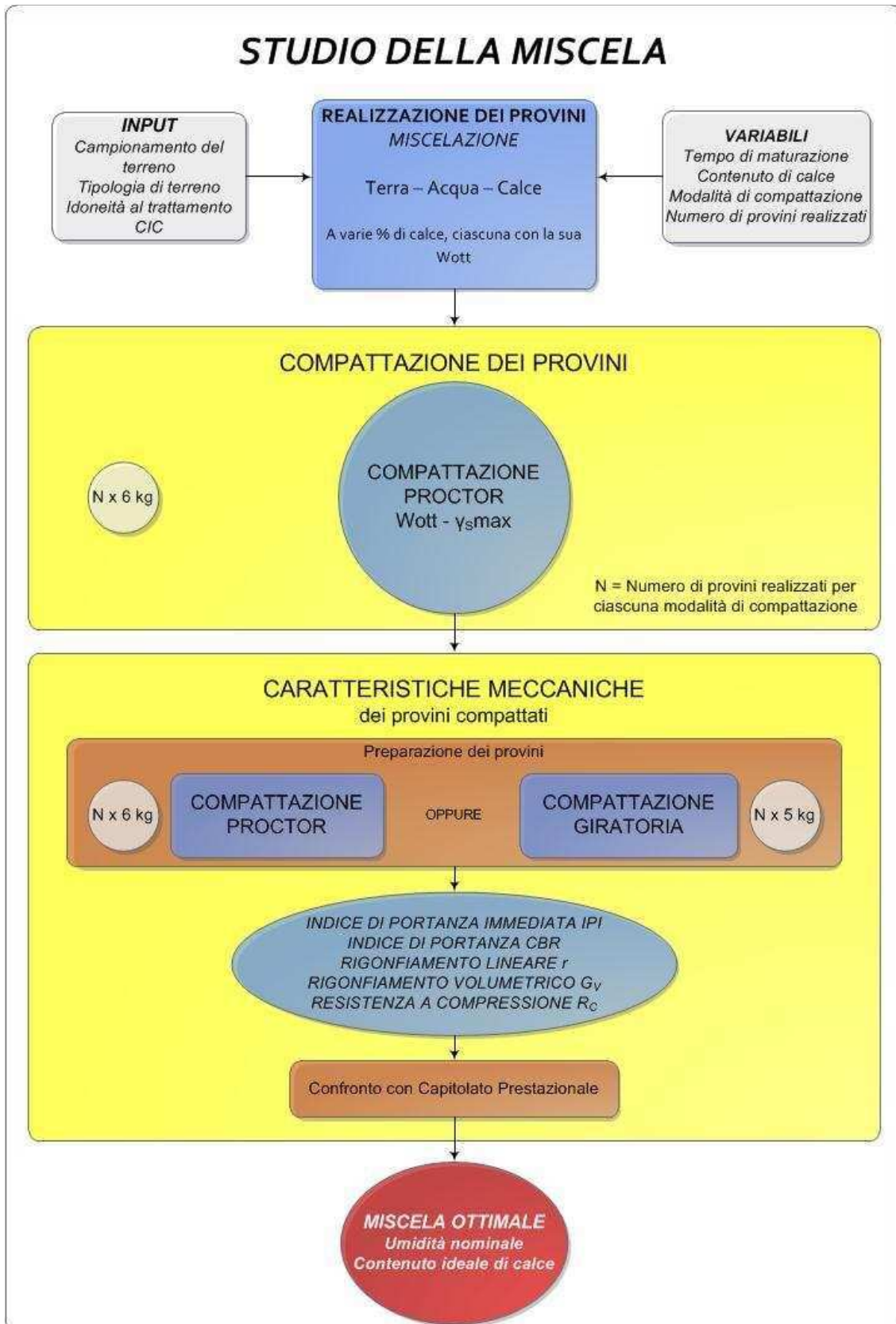


Fig. 3.1 – Flow Chart riassuntiva dello studio della miscela.

3.1 Miscelazione

Il primo passo da eseguire una volta conclusa la fase di pre-qualifica è quello di miscelare i materiali insieme, con un preciso quantitativo di acqua e di calce; tutto deve avvenire in appositi contenitori o stampi con forme e dimensioni differenti a seconda dell'utilizzo che si farà in seguito della miscela.

Le tecniche per effettuare la miscelazione possono essere manuali o meccaniche. Si sottolinea che l'utilizzo di un miscelatore elettrico (Fig. 3.2), dotato di regolatore della velocità, garantisce una qualità di risultato superiore e più simile a quella ottenuta con i mezzi motorizzati in sito.



Fig. 3.2 – Miscelatore elettrico.

La procedura di realizzazione dei provini di miscela proposta prevede l'uso del miscelatore elettrico ed è stata estrapolata dalle varie normative e dalle esperienze di laboratorio; il procedimento prevede prelievi in varie fasi per la successiva determinazione dell'umidità ed è stato inserito tra le schede tecniche dello studio della miscela.

Inoltre è stata elaborata una scheda specifica per la produzione di provini finalizzati allo studio dell'assorbimento dell'acqua di reazione e della temperatura. Tali provini, a causa delle dimensioni delle capsule metalliche che contengono il materiale, andranno miscelati manualmente.

3.2 Il costipamento delle terre in laboratorio [5]

L'addensamento di un terreno è un'operazione che consiste nel fornire energia attraverso rulli per ottenere un buon assestamento delle particelle. L'acqua presente permette ai grani di muoversi sotto l'azione costipante per cercare un migliore addensamento. Quando l'umidità del materiale è troppo elevata una parte dell'energia fornita dal macchinario viene assorbita dall'acqua che si posiziona tra le particelle impedendo loro di avvicinarsi; al contrario se l'umidità è bassa i grani hanno difficoltà a muoversi per effetto dell'operazione di costipamento. Esiste un tenore di umidità ottimale che permette di ottenere, a parità di energia, il massimo grado di addensamento, espresso come densità secca.

Il costipamento delle terre in laboratorio è finalizzato a ricreare sui provini di miscela le condizioni che i rulli producono sul terreno. Per fare questo l'attrezzatura storicamente più utilizzata e richiesta dai Capitolati è quella Proctor; tuttavia l'attività di ricerca svolta su questo specifico argomento ha evidenziato l'esistenza di un macchinario che meglio riproduce il costipamento in opera sui campioni di laboratorio: la Pressa Giratoria.

3.2.1 Costipamento con apparecchiatura Proctor

La prova Proctor, descritta nelle normative *UNI EN 13286-2 (2010): Miscele non legate e legate con leganti idraulici - Metodi di prova per la determinazione della massa volumica e del contenuto di acqua di riferimento di laboratorio - Costipamento Proctor* e precedentemente dalla *CNR BU 69/73*, consiste nel porre il materiale a strati in un recipiente metallico cilindrico e compattare ogni strato con un pestello a caduta libera da altezza costante (Fig. 3.3).



Fig. 3.3 – Macchinario di costipamento Proctor.

Costipando un terreno con un certo grado di umidità, si ottiene un buon assestamento delle particelle del suolo. Aumentando leggermente il contenuto di acqua, l'assestamento continua e ciò è dovuto alla accresciuta lubrificazione tra le particelle sotto l'azione del carico dinamico. Quando il contenuto di acqua supera un certo limite, la densità del terreno tende a diminuire in quanto l'acqua incomprimibile, dopo aver occupato i vuoti, tende ad assorbire l'energia di costipamento non consentendo l'avvicinamento tra i grani.

La densità secca massima γ_s si raggiunge quando il terreno contiene acqua nella giusta misura (umidità ottimale w_{ott}) in modo che il costipamento minimizzi il contenuto di vuoti. In generale l'ottimo contenuto di acqua diminuisce con l'aumentare dell'energia di costipamento. L'energia di compattazione può essere variata modificando il peso del pestello, l'altezza di caduta, il numero di colpi per strato e lo spessore degli strati. Il metodo di addensamento AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) descritto in seguito cerca di riprodurre la densità che si ottiene in sito con pesanti mezzi di compattazione.

Se si fa variare il contenuto di acqua w del campione di terra in esame, mantenendo costante l'energia di costipamento, riportando in un diagramma la variazione del peso di volume secco γ_s in funzione dell'umidità w , si ottiene una curva a campana che presenta un massimo.

Per una stessa terra si può effettuare questa procedura utilizzando lo stesso metodo ma con diverse energie di compattazione; si ottiene così una famiglia di curve con andamento simile a quello in figura (Fig. 3.4).

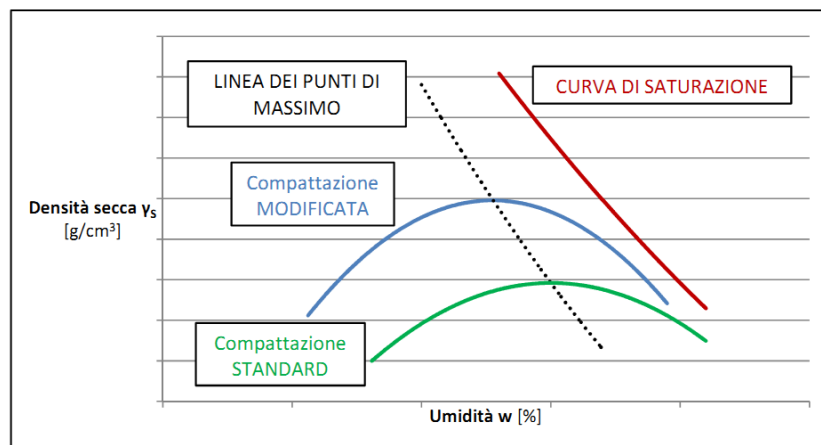


Fig. 3.4 – Curve di addensamento e curve di saturazione ottenute con diverse energie di compattazione e riportate in un diagramma umidità – densità secca.

La curva di saturazione si ottiene calcolando il contenuto d'acqua w necessario per saturare il provino per ciascun valore di peso di volume γ_s .

Al crescere dell'energia di costipamento aumenta il peso di volume secco massimo e diminuisce il contenuto d'acqua ottimo. La linea che congiunge i punti di massimo per curve di regressione a diversa energia di costipamento si dispone circa parallela alla curva di saturazione e per contenuti di acqua molto elevati le curve corrispondenti alle diverse energie tendono a confondersi in un'unica linea. Ciò significa che per una data apparecchiatura di costipamento e per un certo contenuto di acqua c'è un grado di saturazione massimo che può essere ottenuto indipendentemente dall'energia di costipamento. Pertanto un aumento dell'energia di costipamento è più efficace quando si lavora con contenuto di acqua inferiore a quello ottimale.

Le modalità di compattazione descritte nella prova sono due:

- AASHTO Standard
- AASHTO Modificata

Entrambe sono suddivise a loro volta in tre parti, a seconda delle dimensioni dello stampo su cui si inserisce il campione (Base, Large, Extra).

In base alla modalità di compattazione utilizzata vengono fornite la massa e l'altezza di caduta del pestello e il numero di colpi da eseguire.

Solitamente i risultati di una prova standard vengono utilizzati per lo studio di rilevati di vario tipo mentre quelli della prova modificata riguardano i terreni di sottofondo, i materiali per i rilevati ed i materiali per le pavimentazioni stradali ed aeroportuali.

L'uso di una modalità di compattazione piuttosto dell'altra dipende dalla granulometria del materiale e il metodo di scelta è specificato nella scheda tecnica relativa alla prova Proctor.

3.2.2 Costipamento con Pressa Giratoria [7]

Un importante aggiornamento sull'operazione di addensamento in laboratorio delle miscele di terra e calce è stato quello di inserire in questa procedura la possibilità di utilizzare la strumentazione Pressa Giratoria; questa potrà essere usata in sostituzione alla tradizionale attrezzatura Proctor oppure, nel contesto di opere importanti che richiedono analisi approfondite e risorse consistenti, in affiancamento al costipamento Proctor, con l'obiettivo di produrre provini di miscela con entrambe le metodologie e che successivamente saranno testati con prove meccaniche.

Si sottolinea che lo studio dei terreni con tale macchinario non è attualmente normalizzato; il solo procedimento inserito nella letteratura normativa che prevede l'utilizzo della Pressa Giratoria è quello finalizzato alla produzione di provini di conglomerato bituminoso utilizzati nella progettazione degli strati superficiali della pavimentazione stradale nel sistema Superpave.

L'apparecchiatura è in grado di applicare simultaneamente al materiale una pressione verticale ed un moto rotatorio attorno ad un asse inclinato rispetto alla verticale. La combinazione di questi movimenti svolge un'azione massaggiante sulla miscela, conferendole un grado di compattazione tale da simulare verosimilmente le proprietà delle pavimentazioni in opera. Infatti questo "mescolamento" continuo aumenta le possibilità di incastro tra i grani di aggregato e fornisce al materiale sollecitazioni più simili a quelle dei rulli durante le operazioni di compattazione in cantiere.

Gli elementi che caratterizzano tale macchinario sono la pressa a taglio giratoria, gli stampi e i coperchi.

La Pressa Giratoria (Fig. 3.5) è capace di realizzare provini compattati con una forza F costante e di farli ruotare attorno all'asse verticale del cilindro con un angolo Φ . La forza è trasmessa da un pistone e la sua intensità dipende dalla dimensione del provino:

- 11.500 N – 13.500 N per stampi con diametro di 160 mm.
- 10.000 N – 12.000 N per stampi con diametro di 150 mm.
- 4.500 N – 4.900 N per stampi con diametro di 100 mm.



Fig. 3.5 – Pressa Giratoria.

Gli stampi metallici possono avere un diametro di 100 mm, 150 mm o 160 mm, l'altezza deve essere adeguata alla porzione di prova e lo spessore minimo è pari a 7,5 mm, vengono realizzati con materiale praticamente indeformabile ed almeno inizialmente sono lisci. Presentano un anello a circa 2 cm dalla base per sfruttare il sistema di ruote interno alla pressa che conferisce l'inclinazione voluta al provino [8].



Fig. 3.6 – Stampo metallico.

I coperchi metallici, appoggiati direttamente sul materiale, servono per distribuire la forza di compattazione su tutta l'area del provino ed anch'essi devono essere realizzati lisci, con materiale poco sensibile alle elevate temperature.



Fig. 3.7 – Coperchio per stampo della Pressa Giratoria.

Altre parti fondamentali della strumentazione sono il telaio, dotato di strumenti di misura e controllo ed il basamento rotante a velocità regolabile.

Si riportano schematicamente le caratteristiche del macchinario idonee per applicazioni sulle terre (Fig. 3.8).

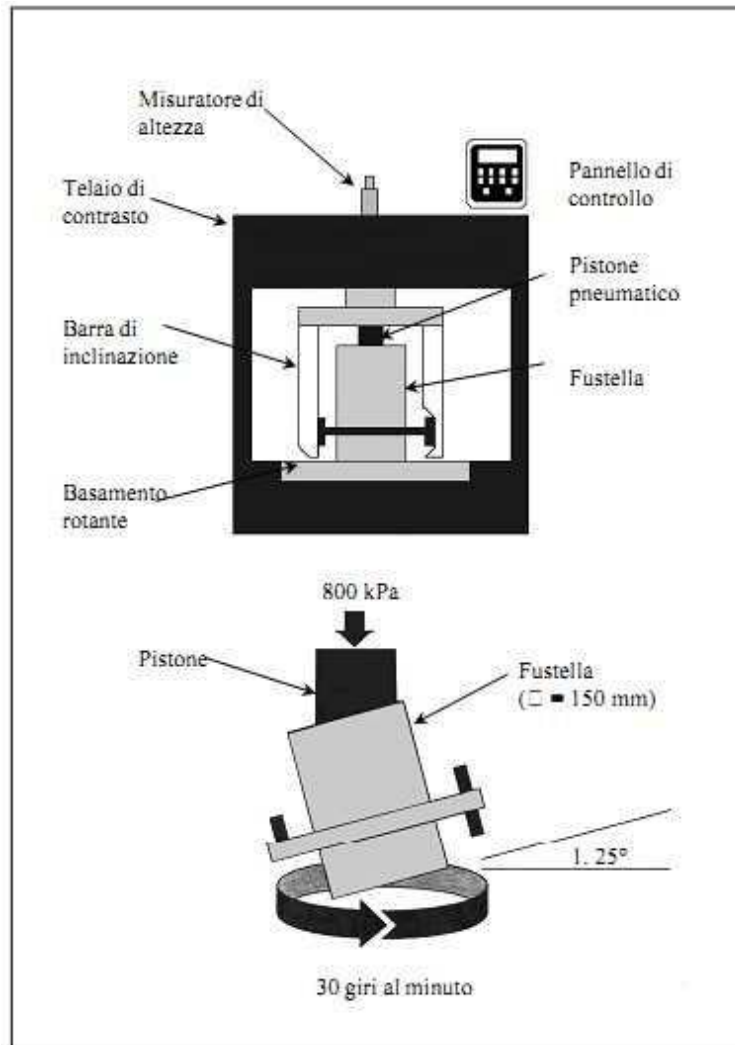


Fig. 3.8 – Schema di funzionamento della pressa giratoria utilizzata nell'analisi delle terre.

Per il calcolo dei risultati si fa riferimento ad un volume ideale, calcolato grazie all'altezza fornita dalla pressa giratoria ad ogni giro. Analizzando i provini a fine compattazione si nota che le superfici sono molto lisce, quindi tale approssimazione risulta accettabile. Nota l'umidità della porzione di prova si ricava infine la densità secca del provino.

Il metodo standardizzato per le terre sarà descritto in tutte le sue parti nella specifica scheda tecnica.

3.3 Parametri meccanici

Una volta verificata la bontà della miscela terra - calce e preparati i provini attraverso il costipamento si passa alla valutazione, tramite prove di laboratorio, dei parametri che caratterizzano il materiale progettato e consentono di classificarlo secondo sistemi presenti nella normativa ufficiale. Risulta quindi possibile verificare la sua idoneità ai valori richiesti dai Capitolati.

I parametri principali calcolati sono di natura meccanica:

- Indice di portanza immediata *IPI*.
- Indice di portanza *CBR*.
- Rigonfiamento lineare e volumetrico.
- Resistenza a compressione.

I primi tre sono descritti nella norma *UNI EN13286-47 (2006): Miscela non legate e legate con leganti idraulici - Metodo di prova per la determinazione dell'indice di portanza CBR, dell'indice di portanza immediata e del rigonfiamento*, il rigonfiamento volumetrico è delineato attraverso la *UNI EN 13286-49 (2004): Prova di rigonfiamento accelerata per suoli trattati con calce e/o legante idraulico* mentre la resistenza a compressione è standardizzata dalla *UNI EN 13286-41 (2006): Miscela non legate e legate con leganti idraulici - Metodo di prova per la determinazione della resistenza a compressione di miscele legate con leganti idraulici*.

3.3.1 Indice di portanza immediata *IPI*

L'indice di portanza immediata (*IPI*) è definito come l'indice di portanza *CBR* calcolato subito dopo la preparazione della porzione di prova, prima di applicare il sovraccarico.

La norma *UNI EN 14227-11 (2006)* riporta in tabella una classifica delle terre trattate a calce in base al valore dell'indice *IPI* ottenuto (Tab. 3.1) e alla modalità di trattamento realizzato (non essendoci differenza nella terminologia dei due trattamenti possibili si riporta un'unica tabella a titolo di esempio, solitamente l'intervallo relativo alle terre stabilizzate è più ristretto rispetto a quelle che subiscono un semplice miglioramento e corrisponde ai valori più alti di *IPI* presenti nella tabella):

<i>IPI</i>	<i>Categoria</i>
≥ 5	<i>IPI</i> ₅
≥ 7	<i>IPI</i> ₇
≥ 10	<i>IPI</i> ₁₀
≥ 15	<i>IPI</i> ₁₅
≥ 20	<i>IPI</i> ₂₀
≥ 25	<i>IPI</i> ₂₅

Tab. 3.1 – *IPI* per terre trattate a calce.

Il procedimento di preparazione dei provini e della prova è analogo a quello per il calcolo dell'indice *CBR* e verrà descritto nel paragrafo successivo; da tenere presente che per la determinazione dell'*IPI* non deve essere effettuata la fase di maturazione dei provini.

3.3.2 Indice di portanza *CBR*

L'indice di portanza *CBR* viene calcolato attraverso l'applicazione di un carico su un provino di miscela precedentemente preparato e compattato con una delle metodologie già viste (la norma fa riferimento al costipamento Proctor). Inoltre il campione di materiale deve subire una maturazione, prima di essere sottoposto a prova, effettuata tramite conservazione in ambiente altamente umido o tramite ammollo completo.

Il carico viene applicato tramite un pistone con una velocità di penetrazione costante di 1,27 mm/min; si registrano i valori del carico a incrementi di penetrazione di 0,5 mm fino a un totale di 10 mm massimi.

L'indice *CBR* (o indice *IPI* nel caso in cui il calcolo venga fatto prima della maturazione dei provini) è il valore massimo tra i due calcolati:

$$\frac{P_{2,5 \text{ mm}}}{1360} \qquad \frac{P_{5 \text{ mm}}}{2040}$$

in cui si mettono in rapporto i valori di carico necessari per ottenere una penetrazione di 2,5 mm e 5 mm con i rispettivi valori di riferimento.

Le terre stabilizzate a calce vengono classificate secondo il valore *CBR* ottenuto come riportato nella seguente tabella (Tab 3.2), presente nella **UNI EN 14227-11 (2006)**.

CBR dopo 4 giorni di ammollo	Classe
≥ 15	<i>CBR₁₅</i>
≥ 20 e non meno del valore dell' <i>IPI</i>	<i>CBR₂₀</i>
≥ 30 e non meno del valore dell' <i>IPI</i>	<i>CBR₃₀</i>
≥ 40 e non meno del valore dell' <i>IPI</i>	<i>CBR₄₀</i>
≥ 50 e non meno del valore dell' <i>IPI</i>	<i>CBR₅₀</i>

Tab 3.2 – Classifica delle terre stabilizzate a calce secondo il valore CBR.

3.3.3 Rigonfiamento lineare

Il rigonfiamento lineare dei provini viene misurato durante la fase di maturazione per immersione del procedimento di calcolo dell'indice *CBR*.

Si valuta la differenza di altezza che scaturisce dall'immersione sotto un sovraccarico costituito da un numero variabile di anelli di intercapedine dal peso di 100 g l'uno, per 96 ore; il rigonfiamento sarà calcolato come percentuale dell'altezza iniziale del provino.

La *UNI EN 14227-11 (2006)* fornisce una tabella (Tab. 3.3) in cui vengono classificate le miscele sulla base del valore del rigonfiamento lineare (*LS* – Linear Swelling) medio e di quello dei singoli provini.

Massimo rigonfiamento lineare medio [%]	Rigonfiamento lineare massimo per singolo provino [%]	Classe
5	10	<i>LS₅</i>
3	6	<i>LS₃</i>
1	2	<i>LS₁</i>

Tab 3.3 – Classifica delle terre trattate a calce in base al rigonfiamento lineare.

3.3.4 Rigonfiamento volumetrico

Il rigonfiamento volumetrico viene calcolato attraverso una specifica prova che prevede la preparazione di tre provini di miscela terra-calce, il loro stoccaggio in acqua e la misurazione dei volumi durante varie fasi della procedura tramite pesate in aria e in acqua. Il risultato della prova è l'espansione volumetrica subita dai provini a causa della loro prolungata immersione in acqua, misurata dopo parziale asciugatura del provino estratto dalla vasca di immersione ed espressa come percentuale del volume iniziale.

La *UNI EN 14227-11 (2006)* indica come idonee all'utilizzo miscele il cui rigonfiamento volumetrico finale non superi il valore del 5%.

3.3.5 Resistenza a compressione

Il principio è quello di sollecitare con una forza di compressione un provino di miscela cilindrico, di dimensioni normalizzate, fino alla sua rottura. In base al valore del carico massimo sopportato si determina la resistenza a compressione (R_c) del materiale testato calcolando il rapporto tra il carico e l'area trasversale del provino.

E' fondamentale effettuare la prova a regola d'arte, rispettando l'accuratezza espressamente richiesta per le caratteristiche principali dei provini e le modalità di applicazione del carico, in quanto una non corretta esecuzione della prova può portare a modalità di rottura non soddisfacenti con conseguente compromissione dei risultati finali.



Le classi in cui vengono suddivise le miscele di terra e calce in relazione al valore di resistenza a compressione ottenuto nella *UNI EN 14227-11* sono tre e sono riportate nella tabella seguente (Tab. 3.4).

<i>Resistenza a compressione R_c</i> [MPa]	<i>Classe</i>
$\geq 0,2$	$R_{c, 0,2}$
$\geq 0,5$	$R_{c, 0,5}$
$\geq 1,0$	$R_{c, 1,0}$

Tab 3.4 – Classi di miscele sulla base della resistenza a compressione.

3.4 Schede tecniche relative alla fase di studio della miscela

3.4.1 Procedimento operativo per la realizzazione dei provini

PROVA DESCRITTA	
	<h2><u>PREPARAZIONE DEI PROVINI DI MISCELA</u></h2>
OBIETTIVI E CONTENUTO	
<p>Procedura utilizzata per il confezionamento dei provini con l'utilizzo di un miscelatore elettrico al fine di riprodurre al meglio l'ordine e i tempi delle lavorazioni in sito ed ottenere risultati maggiormente attendibili ed aderenti alla realtà.</p>	
RIFERIMENTI NORMATIVI	
<p><i>CNR BU n. 69/73; UNI EN 13286-2, UNI EN 13286-50.</i></p>	
APPARECCHIATURA	
<ul style="list-style-type: none"> • Forno che possa raggiungere la temperatura costante di almeno (110 ± 5) °C. • Teglie metalliche. • Acqua pulita e a temperatura ambiente. • Bilancia. • Miscelatore elettrico a controllo di velocità. 	
	
<ul style="list-style-type: none"> • Cilindri graduati con spruzzino. • Secchio metallico con fondo forato. • Teli di nailon e pesi. • Cronometro. • Termometro. • Recipienti metallici. 	

PROCEDURA

- Essiccare il terreno in forno a (110 ± 5) °C stendendolo in teglie metalliche.
- Estrarre il terreno dal forno e lasciarlo raffreddare.
- Pesare porzioni di prova di 5000 g di materiale secco, superiori di almeno 1000 g rispetto alla quantità di materiale necessario per eseguire la prova di compattazione e porla sul recipiente del miscelatore.
- Pesare l'acqua necessaria a raggiungere una umidità nominale pari all'8%, valore che si considera vicino alle condizioni del terreno in sito. Versare l'acqua in un cilindro graduato dotato di spruzzino.
- Umidificare la porzione di prova utilizzando il cilindro graduato ed un secchio con la base forata, in modo da distribuire l'acqua il più uniformemente possibile. Umidificare precedentemente il secchio per evitare che assorba parte dell'acqua destinata all'umidificazione del campione.
- Azionare il miscelatore a una velocità media per circa 5 min.
- Coprire la porzione di prova con un nailon e fermare quest'ultimo con dei pesi, in modo da limitare al massimo la dispersione di umidità.
- Lasciar riposare la porzione di prova per 15 min per ottenere una migliore uniformità dell'umidità.
- Riempire di materiale i recipienti, registrarne il peso lordo umido e porli in forno per 12 ore. Dopo averli estratti dal forno pesare nuovamente i campioni per determinare il peso lordo secco.
- Pesare la quantità di calce necessaria per la miscelazione.
- Pesare la quantità di acqua necessaria per raggiungere l'umidità nominale; se l'umidità da inserire è molto elevata ($\geq 18\%$), aggiungere l'acqua alla porzione di prova in due momenti successivi: 200 g prima della stesa della calce e il resto durante la miscelazione.
- Stendere la calce sulla porzione di prova effettuando due strisce parallele e non sovrapposte, versare l'acqua precedentemente pesata avvalendosi del secchio con fondo forato e del cilindro graduato.
- Azionare il miscelatore e lasciarlo agire a una velocità media per almeno 5 min.

3.4.2 Costipamento con attrezzatura Proctor

PROVA DESCRITTA				
COSTIPAMENTO PROCTOR				
<u>UNI EN 13286 - 2 (2005)</u>				
OBIETTIVI E CONTENUTO				
Metodo per la determinazione della correlazione fra il contenuto d'acqua e la densità asciutta di miscele legate con leganti idraulici o non legate dopo il costipamento Proctor. Applicabile unicamente a miscele non legate e legate con leganti idraulici di aggregati impiegate nella costruzione di strade e in opere di ingegneria civile.				
RIFERIMENTI NORMATIVI				
<i>UNI EN 933-1; UNI EN 933-2; UNI EN 1097-5; UNI EN 1097-6; UNI EN 13286-1.</i> Tratta lo stesso tema: <i>CNR BU n. 69/73</i>				
APPARECCHIATURA				
<ul style="list-style-type: none"> Stampo cilindrico in acciaio con piastra di base estraibile 				
Stampo	d_1 (mm)	h_1 (mm)	w (mm)	t (mm)
Base	$100,0 \pm 1,0$	$120,0 \pm 1,0$	$7,5 \pm 0,5$	$11,0 \pm 0,5$
Large	$150,0 \pm 1,0$	$120,0 \pm 1,0$	$9,0 \pm 0,5$	$14,0 \pm 0,5$
Extra	$250,0 \pm 1,0$	$200 \pm 1,0$	$14,0 \pm 0,5$	$20,0 \pm 0,5$
<ul style="list-style-type: none"> Pestello 				
Pestello	Massa m_R (kg)	Diametro d_2 (mm)	Altezza di caduta h_2 (mm)	
Base	$2,50 \pm 0,2$	$50,0 \pm 0,5$	305 ± 3	
Large	$4,50 \pm 0,04$	$50,0 \pm 0,5$	457 ± 3	
Extra	$15,00 \pm 0,04$	$125,0 \pm 0,5$	600 ± 3	
<ul style="list-style-type: none"> Piastra in acciaio 				
Stampo	Diametro d_3 (mm)		Spessore S_2 (mm)	
Base	$d_1 - 0,5$		$10,0 \pm 0,1$	
Large			$20,0 \pm 0,1$	
Extra				
<ul style="list-style-type: none"> Setacci di prova da 16 mm, 31,5 mm e 63 mm. Bilancia. Vassoi metallici o di plastica anti-corrosione. Spatola. Apparecchiatura per determinare il contenuto d'acqua. 				

<ul style="list-style-type: none"> • Calibro per misure di profondità. • Miscelatore. • Base di cemento (min 50 kg) per supporto all'azione di compattazione. 																																																		
PROCEDURA																																																		
<ul style="list-style-type: none"> • Preparazione delle porzioni di prova <ul style="list-style-type: none"> ▪ Passare ai setacci di riferimento il materiale e in base alla tabella determinare lo stampo da usare e la massa totale del campione. 																																																		
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th colspan="3">Passante ai setacci (%)</th> <th rowspan="2">Massa del campione (kg)</th> <th rowspan="2">Stampo</th> </tr> <tr> <th>16 mm</th> <th>31,5 mm</th> <th>63 mm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2" style="text-align: center;"><i>A</i></td> <td style="text-align: center;">100</td> <td style="text-align: center;">-</td> <td style="text-align: center;">-</td> <td style="text-align: center;">15</td> <td style="text-align: center;">Base</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td style="text-align: center;">40</td> <td style="text-align: center;">Large</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><i>A</i></td> <td style="text-align: center;">$75 \div 100$</td> <td style="text-align: center;">100</td> <td style="text-align: center;">-</td> <td style="text-align: center;">40</td> <td style="text-align: center;">Large</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><i>B</i></td> <td style="text-align: center;">< 100</td> <td style="text-align: center;">$75 \div 100$</td> <td style="text-align: center;">100</td> <td style="text-align: center;">40</td> <td style="text-align: center;">Large</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><i>C</i></td> <td style="text-align: center;">-</td> <td style="text-align: center;">< 75</td> <td style="text-align: center;">$75 \div 100$</td> <td style="text-align: center;">200</td> <td style="text-align: center;">Extra</td> </tr> </tbody> </table>		Passante ai setacci (%)			Massa del campione (kg)	Stampo	16 mm	31,5 mm	63 mm	<i>A</i>	100	-	-	15	Base				40	Large	<i>A</i>	$75 \div 100$	100	-	40	Large	<i>B</i>	< 100	$75 \div 100$	100	40	Large	<i>C</i>	-	< 75	$75 \div 100$	200	Extra												
		Passante ai setacci (%)					Massa del campione (kg)	Stampo																																										
	16 mm	31,5 mm	63 mm																																															
<i>A</i>	100	-	-	15	Base																																													
				40	Large																																													
<i>A</i>	$75 \div 100$	100	-	40	Large																																													
<i>B</i>	< 100	$75 \div 100$	100	40	Large																																													
<i>C</i>	-	< 75	$75 \div 100$	200	Extra																																													
<p><i>A-</i> Miscele totalmente passanti al setaccio da 16 mm e miscela totalmente passante al setaccio da 31,5 mm ma non a quello da 16 mm: suddividere il campione iniziale in 5 porzioni da 2,5 kg se si utilizza lo stampo Base, da 6 kg se lo stampo usato è quello Large. Ciascuna porzione dovrà avere un diverso contenuto d'acqua. I vari contenuti d'acqua dovranno essere collocati nell'intorno del contenuto d'acqua ottimale.</p> <p><i>B-</i> Miscele passanti dal 75 % al 100 % al setaccio da 31,5 mm e totalmente a quello da 63 mm: rimuovere e pesare il trattenuto al setaccio da 31,5 mm e determinarne contenuto d'acqua e densità. Suddividere il materiale passante in 5 o più porzioni da 6 kg.</p> <p><i>C-</i> Miscele con un trattenuto al setaccio da 31,5 mm superiore al 25 % e passante a quello da 63 mm dal 75% al 100%: suddividere il campione in porzioni da 25 kg.</p>																																																		
<ul style="list-style-type: none"> • Tipologie di prova <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Prova</th> <th rowspan="2">Caratteristiche</th> <th colspan="3">Stampo</th> </tr> <tr> <th>Base</th> <th>Large</th> <th>Extra</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="5" style="text-align: center;">Proctor</td> <td>Massa pestello m_R (kg)</td> <td style="text-align: center;">2,5</td> <td style="text-align: center;">2,5</td> <td style="text-align: center;">15</td> </tr> <tr> <td>Diametro pestello d_2 (mm)</td> <td style="text-align: center;">50</td> <td style="text-align: center;">50</td> <td style="text-align: center;">125</td> </tr> <tr> <td>Altezza di caduta h_2 (mm)</td> <td style="text-align: center;">305</td> <td style="text-align: center;">305</td> <td style="text-align: center;">600</td> </tr> <tr> <td>Numero di strati</td> <td style="text-align: center;">3</td> <td style="text-align: center;">3</td> <td style="text-align: center;">3</td> </tr> <tr> <td>Numero di colpi per strato</td> <td style="text-align: center;">25</td> <td style="text-align: center;">56</td> <td style="text-align: center;">22</td> </tr> <tr> <td rowspan="5" style="text-align: center;">Proctor modificata</td> <td>Massa pestello m_R (kg)</td> <td style="text-align: center;">4,5</td> <td style="text-align: center;">4,5</td> <td style="text-align: center;">15</td> </tr> <tr> <td>Diametro pestello d_2 (mm)</td> <td style="text-align: center;">50</td> <td style="text-align: center;">50</td> <td style="text-align: center;">125</td> </tr> <tr> <td>Altezza di caduta h_2 (mm)</td> <td style="text-align: center;">457</td> <td style="text-align: center;">457</td> <td style="text-align: center;">600</td> </tr> <tr> <td>Numero di strati</td> <td style="text-align: center;">5</td> <td style="text-align: center;">5</td> <td style="text-align: center;">3</td> </tr> <tr> <td>Numero di colpi per strato</td> <td style="text-align: center;">25</td> <td style="text-align: center;">56</td> <td style="text-align: center;">98</td> </tr> </tbody> </table>	Prova	Caratteristiche	Stampo			Base	Large	Extra	Proctor	Massa pestello m_R (kg)	2,5	2,5	15	Diametro pestello d_2 (mm)	50	50	125	Altezza di caduta h_2 (mm)	305	305	600	Numero di strati	3	3	3	Numero di colpi per strato	25	56	22	Proctor modificata	Massa pestello m_R (kg)	4,5	4,5	15	Diametro pestello d_2 (mm)	50	50	125	Altezza di caduta h_2 (mm)	457	457	600	Numero di strati	5	5	3	Numero di colpi per strato	25	56	98
Prova			Caratteristiche	Stampo																																														
	Base	Large		Extra																																														
Proctor	Massa pestello m_R (kg)	2,5	2,5	15																																														
	Diametro pestello d_2 (mm)	50	50	125																																														
	Altezza di caduta h_2 (mm)	305	305	600																																														
	Numero di strati	3	3	3																																														
	Numero di colpi per strato	25	56	22																																														
Proctor modificata	Massa pestello m_R (kg)	4,5	4,5	15																																														
	Diametro pestello d_2 (mm)	50	50	125																																														
	Altezza di caduta h_2 (mm)	457	457	600																																														
	Numero di strati	5	5	3																																														
	Numero di colpi per strato	25	56	98																																														
<ul style="list-style-type: none"> • Operazioni generali <ul style="list-style-type: none"> ▪ Pesare la massa dello stampo e della piastra e registrarla come m_1. ▪ Inserire nello stampo uno strato di materiale alla volta e compattarlo con il numero di colpi richiesto. ▪ Distribuire i colpi in maniera uniforme su tutta la superficie, avendo cura che il pestello sia sempre in condizione di cadere liberamente. ▪ Ripetere l'operazione un numero di volte pari al numero di strati da inserire nello stampo e in modo tale che al termine del procedimento lo stampo sia riempito e la superficie del materiale non esca dal bordo per più di 10 mm. ▪ Rimuovere la parte di materiale eccedente e livellare la nuova superficie. ▪ Tappare con materiale di granulometria inferiore tutti i buchi che si siano sviluppati sulla superficie durante la rifinitura. 																																																		

- Pesare la massa del materiale con stampo e piastra e registrarla come m_2 .
- Rimuovere il materiale compattato e posizionarlo su un vassoio.
- Determinare il contenuto d'acqua del materiale compattato w .
- Ripetere il procedimento per ciascuna porzione di prova creata. Il contenuto d'acqua ottimale, in cui si verifica la densità secca di laboratorio, dovrà trovarsi vicino al centro della gamma dei contenuti d'acqua delle diverse porzioni.

OPERAZIONI FINALI, RAPPORTI, MARCATURE

• **Calcolo dei risultati**

- Densità di massa compattata

$$\gamma = \frac{(m_2 - m_1)}{V} \quad [\text{g/cm}^3]$$

m_1 = massa stampo e piastra [g];

m_2 = massa di stampo, piastra e materiale compattato [g];

V = volume dello stampo [ml].

- Densità secca

$$\gamma_s = \frac{(100 \times \rho)}{(100 + w)} \quad [\text{g/cm}^3]$$

γ = densità di massa [g/cm^3];

w = contenuto d'acqua della miscela [%].

• **Curve di addensamento e di saturazione**

Costruire una curva di regressione partendo dai valori di densità calcolati nei vari provini alle diverse percentuali di umidità. Sarà possibile costruire una curva per ciascuna metodologia di prova realizzata.

Sullo stesso grafico inserire la curva di saturazione, corrispondente a una percentuale dello 0 % di vuoti pieni d'aria. Tale curva si ricava dall'equazione:

$$\gamma_s = \frac{(1 - 0,01 \times V_a)}{(\gamma_p^{-1} + 0,01 \times w \times \gamma_w^{-1})} \quad [\text{g/cm}^3]$$

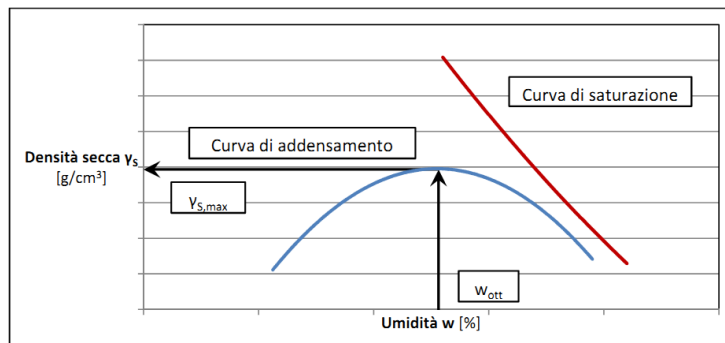
γ_s = densità secca [g/cm^3];

γ_p = densità delle particelle [g/cm^3];




γ_w = densità dell'acqua [g/cm^3];

V_a = volume dei vuoti riempiti d'aria (in % del volume totale della miscela);

w = contenuto d'acqua [%].



3.4.3 Costipamento con Pressa Giratoria

PROVA DESCRITTA	
	<h2><u>COSTIPAMENTO CON PRESSA GIRATORIA</u></h2>
OBIETTIVI E CONTENUTO	
<p>Determinazione della correlazione fra il contenuto d'acqua e la densità asciutta di miscele legate con leganti idraulici e non legate dopo il costipamento con pressa giratoria.</p>	
RIFERIMENTI NORMATIVI	
<p><i>CNR BU n. 69/73; UNI EN 12697-5; UNI EN 12697-10; UNI EN 12697-31;</i></p>	
APPARECCHIATURA	
<ul style="list-style-type: none"> Stampo cilindrico in acciaio, fornito di un anello e di un elemento di contrasto che permettono la rotazione; diametro interno pari a 150 mm. 	
	
<ul style="list-style-type: none"> Pressa Giratoria, con relativi sistemi di controllo e registrazione dei dati, in grado di applicare una pressione verticale fino a 800 kPa. 	
	
<ul style="list-style-type: none"> Setacci di prova UNI da 25 mm e 5 mm. Recipiente per la preparazione della porzione di prova. Recipienti per contenere l'acqua da aggiungere al materiale. Spatola per mescolare il materiale. Cucchiaino di dimensioni adeguate per l'inserimento del materiale. 	

- Bilancia con portata di circa 5 kg e precisione di 0,1 g.
- Grasso da meccanica per lubrificare lo stampo e relativo pennello per l'applicazione.
- Stufa ventilata, regolata da termostato in grado di mantenere una temperatura di $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$.
- Capsule.

PROCEDURA

- **Campione di prova**
 - Preparare almeno 5 kg di materiale per ogni determinazione che si intende effettuare (minimo 5).
 - Essiccare in forno 5 kg di materiale ad una temperatura di $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$.
 - Pesare una porzione di prova pari ad 1 kg in più rispetto alla quantità di materiale secco che si vuole inserire nello stampo.
 - Aggiungere la quantità d'acqua necessaria per ottenere l'umidità voluta.
 - Pesare il materiale umido da inserire nello stampo M_{u1} .
- **Procedimento**
 - Inserire la porzione di prova nello stampo con un cucchiaino senza perdere materiale.
 - Ingrassare con cura il coperchio e inserirlo nello stampo esercitando una leggera pressione.
 - Porre lo stampo all'interno della Pressa Giratoria ed iniziare la compattazione.
 - Prelevare in una capsula una parte della porzione di prova rimanente e determinarne l'umidità reale.
 - Al termine della compattazione estrarre il provino dallo stampo tramite l'apposito pistone idraulico.
 - Pesare il provino realizzato e registrare la massa M_{u2} .
 - Ripetere tale procedura per tutte le porzioni di prova inizialmente essiccate aumentando l'umidità di circa il 3% ad ogni determinazione.

OPERAZIONI FINALI, RAPPORTI, MARCATURE

- **Calcolo della massa umida da inserire nello stampo**

$$M_u = M_s \cdot (1 + w) \quad [\text{g}]$$

M_u = massa umida da inserire nello stampo [g];

M_s = massa secca da inserire nello stampo [g];

w = umidità nominale della porzione di prova [%].

- **Calcolo dell'umidità di ogni determinazione**

$$w_j = \frac{P_{LU} - P_{LS}}{P_{LU} - P_{Rec}} \times 100 \quad [\%]$$

w_j = umidità della determinazione j-esima;

P_{LU} = peso lordo umido del prelievo [g];

P_{LS} = peso lordo secco del prelievo [g];

P_{Rec} = tara [g].

- **Calcolo della densità secca di ogni determinazione ad ogni giro**

$$\gamma_{s,ji} = \frac{M_{u,j}}{V_i \cdot (1 + w_j)} \quad [\text{g/cm}^3]$$

$\gamma_{s,ji}$ = densità secca del provino j-esimo all'i-esimo giro [g/cm³];

$M_{u,j}$ = massa umida del provino j-esimo [g];

w_j = umidità reale del provino j-esimo [%];

V_i = volume del provino al giro i-esimo [mm³]:

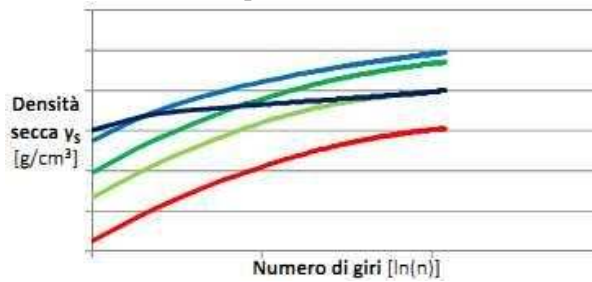
$$V_i = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot h_i \quad [\text{mm}^3]$$

D = diametro dello stampo [g];

h_i = altezza del provino al giro i-esimo [mm].

• **Curve di addensamento**

Riportare i punti trovati in un grafico log numero di giri – densità secca e costruire così le curve di addensamento del materiale compattato.



3.4.4 Calcolo dell'indice di portanza immediata

PROVA DESCRITTA
<u>INDICE DI PORTANZA IMMEDIATA</u> <u>UNI EN 13286 - 47 (2006)</u>
OBIETTIVI E CONTENUTO
Metodo per la determinazione dell'Indice portanza immediata per miscele con granulometria massima di 22,4 mm.
RIFERIMENTI NORMATIVI
<i>UNI EN 1097-5; UNI EN 13286-2.</i>
APPARECCHIATURA
<ul style="list-style-type: none"> • Stampo Proctor misura Large (diametro 150 mm, altezza 120 mm). • Pestello da 2,5 kg o 4,5 kg. • Bilancia in grado di pesare fino a 30 kg. • Apparecchiatura per determinare il contenuto d'acqua. • Carte da filtro, regolo in acciaio, raschietti. • Pistone cilindrico di penetrazione con diametro di $(50 \pm 0,5)$ mm e estremità in acciaio temprato. • Macchina di carico con una capacità di almeno 50 kN, con velocità di penetrazione di $(1,27 \pm 0,20)$ mm/min e precisione del dispositivo di lettura del carico di 5 kN.
PROCEDURA
<ul style="list-style-type: none"> • Campione di prova <ul style="list-style-type: none"> ▪ Utilizzare 7,5 kg di miscela passante al setaccio da 22,4 mm. ▪ Fissare lo stampo, cui è attaccato un collare di prolunga, alla piastra di base. ▪ Inserire il disco distanziatore sulla piastra di base e collocare un mezzo antiaderente, come carta da filtro grezza, sopra il disco distanziatore. ▪ Compattare la miscela nello stampo utilizzando la modalità di compattazione AASHTO Standard o quella AASHTO Modificata. ▪ In seguito alla compattazione, rimuovere il collare di prolunga e livellare attentamente la miscela sulla parte superiore dello stampo con il raschietto, verificando con il regolo di acciaio. ▪ Tappare con materiale di granulometria inferiore tutti i buchi che si siano sviluppati sulla superficie durante la rifinitura. ▪ Rimuovere la piastra di base, pesare e registrare la massa dello stampo e della miscela approssimando ai 5 g più vicini. ▪ Il materiale in eccesso rispetto a quello richiesto per la prova deve essere utilizzato per determinare il contenuto d'acqua della porzione di prova. • Procedimento <ul style="list-style-type: none"> ▪ Collegare la piastra di base allo stampo in modo tale che la piastra di base sia a contatto con la parte superiore originale del provino e che la faccia inferiore sia esposta e posizionare lo stampo sulla piastra inferiore della macchina di prova. ▪ In funzione dell'indice di portanza immediata previsto e se necessario applicare una forza di penetrazione al pistone come segue: <ul style="list-style-type: none"> - Indice fino a 5%: 10 N; - Indice maggiore del 5%: 40 N. ▪ Registrare la lettura del dispositivo di misurazione della forza come lettura iniziale zero.

- Applicare il carico sul pistone di penetrazione in modo che la velocità di penetrazione sia di circa 1,27 mm/min. Registrare i valori di carico a incrementi di penetrazione di 0,5 mm fino a una penetrazione totale non maggiore di 10 mm.
- Dopo che la prova è stata completata, rimuovere il provino dallo stampo.
- Determinare il contenuto medio di acqua del provino. Ogni campione di contenuto d'acqua deve pesare non meno di 100 g per miscele a granulometria fine e 500 g per miscele a granulometria grossa.

OPERAZIONI FINALI, RAPPORTI, MARCATURE

● **Indice di portanza immediata**

Prova immediata dell'indice di portanza CBR senza sovraccarico.

Calcolo:

Si sceglie come IPI il massimo tra i due seguenti valori:

$$\frac{P_{2,5 \text{ mm}}}{1360}$$

$$\frac{P_{5 \text{ mm}}}{2040}$$

$P_{2,5 \text{ mm}}$: forza in corrispondenza di una penetrazione di 2,5 mm;

$P_{5 \text{ mm}}$: forza in corrispondenza di una penetrazione di 5 mm;

1360 e 2040 sono i valori delle forze di riferimento per i due valori di penetrazione.

3.4.5 Calcolo dell'indice di portanza CBR

PROVA DESCRITTA			
<p><u>INDICE DI PORTANZA CBR</u> <u>UNI EN 13286 - 47 (2006)</u></p>			
OBIETTIVI E CONTENUTO			
Metodo per la determinazione dell'Indice di portanza CBR per miscele con granulometria massima di 22,4 mm.			
RIFERIMENTI NORMATIVI			
<p>UNI EN 1097-5; UNI EN 13286-2. Tratta lo stesso argomento: CNR UNI 10009</p>			
APPARECCHIATURA			
<ul style="list-style-type: none"> • Stampo Proctor misura Large (diametro 150 mm, altezza 120 mm). • Pestello da 2,5 kg o 4,5 kg. • Bilancia in grado di pesare fino a 30 kg. • Apparecchiatura per determinare il contenuto d'acqua. • Carte da filtro, regolo in acciaio, raschietti. • Pistone cilindrico di penetrazione con diametro di $(50 \pm 0,5)$ mm e estremità in acciaio temprato. • Macchina di carico con una capacità di almeno 50 kN, con velocità di penetrazione di $(1,27 \pm 0,20)$ mm/min e precisione del dispositivo di lettura del carico di 5 kN. 			
PROCEDURA			
<ul style="list-style-type: none"> • Campione di prova <ul style="list-style-type: none"> ▪ Utilizzare 7,5 kg di miscela passante al setaccio da 22,4 mm. ▪ Fissare lo stampo, cui è attaccato un collare di prolunga, alla piastra di base. ▪ Inserire il disco distanziatore sulla piastra di base e collocare un mezzo antiaderente, come carta da filtro grezza, sopra il disco distanziatore. ▪ Compattare la miscela nello stampo utilizzando la modalità di compattazione AASHTO Standard o quella AASHTO Modificata. ▪ In seguito alla compattazione, rimuovere il collare di prolunga e livellare attentamente la miscela sulla parte superiore dello stampo con il raschietto, verificando con il regolo di acciaio. ▪ Tappare con materiale di granulometria inferiore tutti i buchi che si siano sviluppati sulla superficie durante la rifinitura. ▪ Rimuovere la piastra di base, pesare e registrare la massa dello stampo e della miscela approssimando ai 5 g più vicini. ▪ Il materiale in eccesso rispetto a quello richiesto per la prova deve essere utilizzato per determinare il contenuto d'acqua della porzione di prova. • Maturazione del provino Conservare per un determinato periodo di tempo il provino in uno dei seguenti stati: <table border="1" style="width: 100%; margin-top: 5px;"> <tr> <td style="width: 50%; text-align: center; vertical-align: middle;"> <p><u>Prevenzione dell'evaporazione</u></p> </td> <td style="width: 50%; text-align: center; vertical-align: middle;"> <p>Conservazione in armadio, umidità relativa sopra il 98%</p> <p>Rivestimento delle estremità con cera o con cappucci sigillati</p> <p>Perdita in massa non superiore al 2%</p> </td> </tr> </table> 		<p><u>Prevenzione dell'evaporazione</u></p>	<p>Conservazione in armadio, umidità relativa sopra il 98%</p> <p>Rivestimento delle estremità con cera o con cappucci sigillati</p> <p>Perdita in massa non superiore al 2%</p>
<p><u>Prevenzione dell'evaporazione</u></p>	<p>Conservazione in armadio, umidità relativa sopra il 98%</p> <p>Rivestimento delle estremità con cera o con cappucci sigillati</p> <p>Perdita in massa non superiore al 2%</p>		

<u>Ammollo completo per almeno 96 ore</u>	Carte da filtro e anelli di intercapedine di sovraccarico Vasca di immersione con acqua a $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ Tenere sotto controllo il rigonfiamento
<u>Prevenzione dell'evaporazione seguita da immersione completa</u>	Rimuovere cera o cappucci prima di procedere con l'immersione

• **Procedimento**

- Collegare la piastra di base allo stampo in modo tale che la piastra di base sia a contatto con la parte superiore originale del provino e che la faccia inferiore sia esposta e posizionare lo stampo sulla piastra inferiore della macchina di prova.
- Posizionare il numero richiesto di pesi di sovraccarico sul provino. Se il provino è stato immerso precedentemente, il sovraccarico deve essere uguale a quello utilizzato durante il periodo di immersione. Per impedire il sollevamento della miscela nel foro dei pesi, posizionare un solo disco di sovraccarico sulla miscela prima di alloggiare il pistone di penetrazione, quindi posizionare il resto dei pesi di sovraccarico.
- In funzione dell'indice di portanza immediata previsto e se necessario applicare una forza di penetrazione al pistone come segue:
 - Indice fino a 5%: 10 N;
 - Indice maggiore del 5%: 40 N.
- Registrare la lettura del dispositivo di misurazione della forza come lettura iniziale zero.
- Applicare il carico sul pistone di penetrazione in modo che la velocità di penetrazione sia di circa 1,27 mm/min. Registrare i valori di carico a incrementi di penetrazione di 0,5 mm fino a una penetrazione totale non maggiore di 10 mm.
- Dopo che la prova è stata completata, rimuovere il provino dallo stampo.
- Determinare il contenuto medio di acqua del provino. Ogni campione di contenuto d'acqua deve pesare non meno di 100 g per miscele a granulometria fine e 500 g per miscele a granulometria grossa.

OPERAZIONI FINALI, RAPPORTI, MARCATURE

• **Indice di portanza CBR**

Calcolo:
Si sceglie come CBR il massimo tra i due seguenti valori:

$$\frac{P_{2,5 \text{ mm}}}{1360} \qquad \frac{P_{5 \text{ mm}}}{2040}$$

$P_{2,5 \text{ mm}}$: forza in corrispondenza di una penetrazione di 2,5 mm;
 $P_{5 \text{ mm}}$: forza in corrispondenza di una penetrazione di 5 mm;
 1360 e 2040 sono i valori delle forze di riferimento per i due valori di penetrazione.

3.4.6 Calcolo del rigonfiamento lineare

PROVA DESCRITTA
<u>RIGONFIAMENTO LINEARE</u> <u>UNI EN 13286 - 47 (2006)</u>
OBIETTIVI E CONTENUTO
Metodo per la determinazione del rigonfiamento durante la fase di maturazione per immersione in acqua del provino al fine del calcolo dell'indice di portanza CBR per miscele con granulometria massima di 22,4 mm.
RIFERIMENTI NORMATIVI
<i>UNI EN 1097-5; UNI EN 13286-2.</i>
APPARECCHIATURA
<ul style="list-style-type: none"> • Stampo Proctor misura Large (diametro 150 mm, altezza 120 mm). • Pestello da 2,5 kg o 4,5 kg. • Bilancia in grado di pesare fino a 30 kg. • Apparecchiatura per determinare il contenuto d'acqua. • Carte da filtro, regolo in acciaio, raschietti. • Piastra di base perforata uniformemente per un minimo dell'1% della sua superficie. • Piastra superiore perforata in lega di alluminio con stelo regolabile per fornire l'alloggiamento per lo stelo di un comparatore a quadrante. • Piastra superiore non perforata in lega di alluminio con uno spessore di (10 ± 1) mm con stelo regolabile per fornire l'alloggiamento per lo stelo di un comparatore a quadrante. • Dispositivo per misurare l'espansione verticale del provino per l'indice di portanza CBR, con un'accuratezza di 0,05 mm. • Vasca di immersione, abbastanza grande da consentire l'immersione dello stampo Proctor di misura Large, preferibilmente sostenuto su una piattaforma a maglie aperte. • Anelli di intercapedine di sovraccarico, ciascuno con massa nota ± 100 g, diametro interno di (53 ± 1) mm e diametro esterno uguale al diametro dello stampo meno 5 mm.
PROCEDURA
<ul style="list-style-type: none"> • Campione di prova <ul style="list-style-type: none"> ▪ Utilizzare 7,5 kg di miscela passante al setaccio da 22,4 mm. ▪ Fissare lo stampo, cui è attaccato un collare di prolunga, alla piastra di base. ▪ Inserire il disco distanziatore sulla piastra di base e collocare un mezzo antiaderente, come carta da filtro grezza, sopra il disco distanziatore. ▪ Compattare la miscela nello stampo utilizzando la modalità di compattazione AASHTO Standard o quella AASHTO Modificata. ▪ In seguito alla compattazione, rimuovere il collare di prolunga e livellare attentamente la miscela sulla parte superiore dello stampo con il raschietto, verificando con il regolo di acciaio. ▪ Tappare con materiale di granulometria inferiore tutti i buchi che si siano sviluppati sulla superficie durante la rifinitura. ▪ Rimuovere la piastra di base, pesare e registrare la massa dello stampo e della miscela approssimando ai 5 g più vicini. ▪ Il materiale in eccesso rispetto a quello richiesto per la prova deve essere utilizzato per determinare il contenuto d'acqua della porzione di prova. • Procedimento <ul style="list-style-type: none"> ▪ Posizionare un disco di carta da filtro grezza sulla piastra di base perforata, invertire lo stampo contenente il provino compattato e fissare la piastra di base allo stampo.

- La parte superiore del provino è a questo punto capovolta, a contatto con la carta da filtro.
- Posizionare una carta da filtro sulla parte superiore del provino, seguita dalla piastra superiore perforata e montare il numero richiesto di anelli di intercapedine di sovraccarico attorno allo stelo della piastra perforata. L'utilizzo di sovraccarico dipende dalle circostanze e deve essere specificato di conseguenza.
- Posizionare il gruppo per l'indice di portanza CBR e il provino in una vasca di immersione piena d'acqua, a una temperatura di (20 ± 2) °C, fino a un livello che consenta il libero accesso all'acqua alla parte superiore e inferiore del provino.
- Montare e fissare il dispositivo per misurare l'espansione verticale del provino sullo stampo.
- Effettuare i rilevamenti iniziali per il rigonfiamento (altezza iniziale del provino h_1) lasciare il provino immerso per almeno 96 h. Mantenere un livello d'acqua costante durante questo periodo.
- Misurare l'espansione con una precisione di 0,05 mm a intervalli di tempo idonei in funzione della velocità del rigonfiamento verticale.
- Tracciare un grafico dell'espansione in funzione del tempo trascorso o della radice quadrata del tempo.
- L'appiattimento della curva indica il momento in cui il rigonfiamento è sostanzialmente completo.
- Alla fine del periodo di immersione, rilevare le misure finali (altezza finale del provino h_2) calcolare il rigonfiamento finale come percentuale dell'altezza iniziale del provino.

OPERAZIONI FINALI, RAPPORTI, MARCATURE

• **Rigonfiamento**

$$r = \frac{h_2 - h_1}{h_1} \times 100 \quad [\%]$$

r = rigonfiamento [%];

h_1 = altezza iniziale del provino [mm];

h_2 = altezza finale del provino [%].

3.4.7 Calcolo del rigonfiamento volumetrico

PROVA DESCRITTA
<p><u>RIGONFIAMENTO VOLUMETRICO</u> <u>UNI EN 13286 - 49 (2004)</u></p>
OBIETTIVI E CONTENUTO
<p>Metodo accelerato per la determinazione del rigonfiamento per suoli trattati con calce e/o legante idraulico. Applicabile a miscele con una sufficiente quantità di fini o di coesione affinché sia possibile estrarre senza danni il provino dallo stampo subito dopo la fabbricazione.</p>
RIFERIMENTI NORMATIVI
<p><i>UNI EN 13286-2; UNI EN 13286-53.</i></p>
APPARECCHIATURA
<ul style="list-style-type: none"> • Miscelatore. • Stampi. • Collari per sovraccarico. • Macchina per applicare compattazione. • Setacci da 11,2 mm e da 6,3 mm. • Vasca per immersione totale del provino in acqua a temperatura costante di $(40 \pm 2) ^\circ\text{C}$. • Bilancia per pesature in acqua e in aria. • Cinture per confinamento del campione. • Pinze, bracciali, cronometro. • Pietra porosa, spugne e carta assorbente. • Cazzuole e forbici.
PROCEDURA
<ul style="list-style-type: none"> • Campione di prova <ul style="list-style-type: none"> ▪ Rimuovere il materiale con granulometria superiore a 6,3 mm prima di miscelare. ▪ Produrre la miscela e valutarne visivamente la qualità. Prepararne almeno 4,5 kg se si utilizzerà lo stampo Proctor e almeno 7 kg se si utilizzerà lo stampo CBR. ▪ Determinare il valore di densità bagnata. ▪ Produrre per mezzo del metodo con compressione assiale almeno 3 provini ($d=h=50$ mm) con il $(96 \pm 0,5)\%$ del valore di densità ottenuto.
<p>Preparazione di provini di miscela legate con leganti idraulici mediante compressione assiale – <i>UNI EN 13286-53 (2005)</i></p>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Passare la porzione di prova al setaccio da 11,2 mm.</i> ▪ <i>Usare una massa di miscela pari a:</i> $m = 1000 V \times \rho_d \frac{(100+w)}{100} \text{ [mm}^3\text{]}$ <p><i>V = volume del provino [mm³];</i> <i>ρ_d = densità secca [Mg/m³];</i> <i>w = contenuto d'acqua [%].</i></p> ▪ <i>Inserire il primo collare distanziatore (distanza = h/4) nello stampo.</i> ▪ <i>Introdurre nello stampo la porzione di prova.</i> ▪ <i>Sistemare il tappo superiore nello stampo e sostituire il primo collare col secondo (distanza = h/6).</i> ▪ <i>Sistemare lo stampo in una pressa o macchina di compressione. Applicare una pressione uniforme alla velocità più bassa e costante possibile.</i> ▪ <i>Quando il disco del tappo superiore arriva a contatto con il fusto dello stampo,</i>

interrompere la pressione e sostituire il secondo collare con il terzo (distanza = h/10).

- *Riprendere la compressione in modo che per la penetrazione completa del tappo inferiore servano almeno 10 secondi.*
- *Rimuovere il collare distanziatore.*
- *Se la pressione massima necessaria supera i 3 MPa, modificare il contenuto d'acqua e ripetere la prova.*
- *Immediatamente dopo la fine della compattazione, rimuovere i tappi e estrarre il provino dallo stampo utilizzando un pistone con una velocità che non superi i 2 mm/sec.*
- *Stoccaggio dei provini realizzati: in verticale, senza perdite di umidità, per un tempo e a una temperatura dipendenti dal loro utilizzo.*

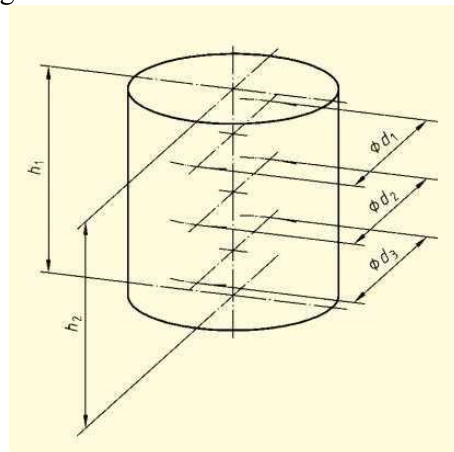
- Estrarre immediatamente i provini dagli stampi.

• **Stoccaggio dei provini**

- Conservare i provini per (72 ± 4) ore a $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ ad oltre il 90% di umidità quindi immergerli per (168 ± 4) ore in acqua a $(40 \pm 2)^\circ\text{C}$.

• **Procedimento**

- Subito dopo aver estratto i tre provini dagli stampi misurare le grandezze d_1, d_2, d_3, h_1, h_2 riportate in figura.



- Confinare i provini circondandoli con le cinture, aiutandosi con bracciali elastici per evitare di creare sforzi eccessivi sulla superficie esterna dei campioni.
- Porre i campioni su delle pietre porose e immergerli in acqua a $(40 \pm 2)^\circ\text{C}$.
- Determinare il volume dei provini dopo un periodo di immersione di (168 ± 4) ore, attraverso pesatura in acqua e in aria.
- Prelevare i campioni dall'immersione e immergerlo subito in acqua a $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$; misurare per ciascun provino la massa apparente in acqua m_1 .
- Estrarre il campione, rimuovere l'acqua superficiale con una spugna e misurare la massa in aria m_2 .
- Calcolare il volume V_2 della cintura e dei bracciali elastici.

OPERAZIONI FINALI, RAPPORTI, MARCATURE

• **Calcolo dei risultati**

▪ **Volume iniziale**

$$V_0 = \frac{\pi}{4} \times \left[\frac{(d_1 + d_2 + d_3)}{3} \right]^2 \times \frac{(h_1 + h_2)}{2} \quad [\text{mm}^3]$$

V_0 = volume iniziale del provino, subito dopo l'estrazione dallo stampo $[\text{mm}^3]$;

d_1, d_2, d_3 = diametri dei tre provini di miscela $[\text{mm}]$;

h_1, h_2 = altezze dei provini $[\text{mm}]$.

▪ **Volume del provino immerso**

$$V_1 = \frac{m_2 - m_1}{\rho_w} \quad [\text{mm}^3]$$

V_1 = somma del volume del provino immerso in acqua e del volume delle cinture e dei bracciali elastici [mm^3];

m_1 = peso idrostatico del provino, della cintura e dei bracciali elastici [g];

m_2 = peso in aria del provino, della cintura e dei bracciali elastici [g];

ρ_w = densità dell'acqua [g/mm^3].

▪ **Espansione volumetrica**

$$G_v = 100 \times \left[\frac{(V_1 - V_2) - V_0}{V_0} \right] \quad [\%]$$

V_0 = volume iniziale del provino, subito dopo l'estrazione dallo stampo [mm^3];

V_1 = somma del volume del provino immerso in acqua e del volume delle cinture e dei bracciali elastici [mm^3];

V_2 = volume della cintura e dei bracciali elastici [mm^3].

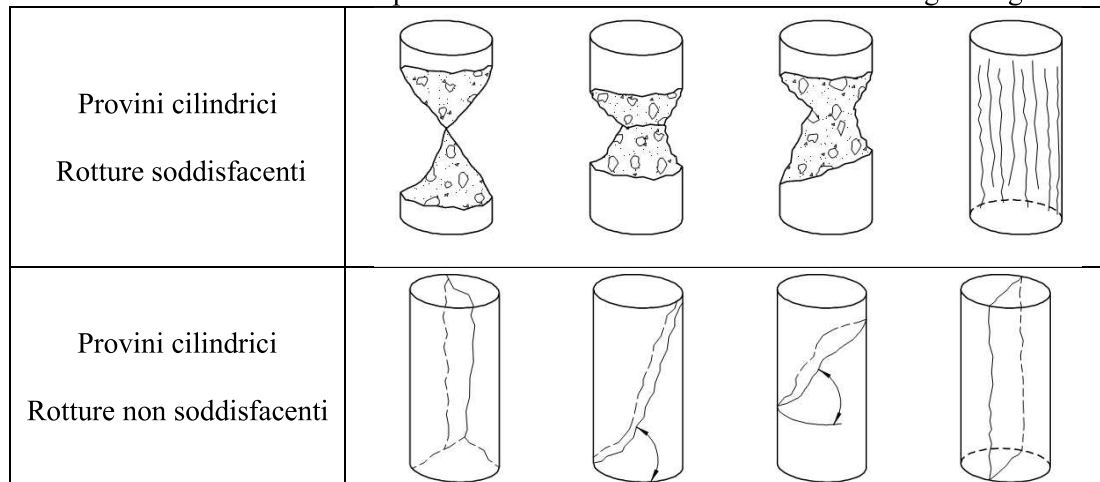
• **Osservazione**

E' opzionale effettuare la stessa procedura di prova anche con immersione di (4 ore \pm 15 min) a $(24 \pm 2)^\circ\text{C}$ per ottenere un maggior numero di dati e una più completa interpretazione dei risultati.

3.4.8 Calcolo della resistenza a compressione

PROVA DESCRITTA
<u>RESISTENZA A COMPRESSIONE</u> <u>UNI EN 13286 - 41 (2006)</u>
OBIETTIVI E CONTENUTO
Metodo di prova per la determinazione della resistenza a compressione di provini di miscele legate con leganti idraulici; si applica a provini cilindrici fabbricati in laboratorio o preparati a partire da carote.
RIFERIMENTI NORMATIVI
<i>EN 12390-3; UNI EN 13286-50; UNI EN 13286-51; UNI EN 13286-52; UNI EN 13286-53.</i>
APPARECCHIATURA
<ul style="list-style-type: none"> • Macchina per prova di compressione <ul style="list-style-type: none"> ▪ Precisione della misurazione pari a $\pm 1\%$. ▪ Precisione sull'applicazione del carico pari a $\pm 1\%$. ▪ Piastre di carico di acciaio aventi durezza Rockwell $\geq 55HRC$ per una profondità di circa 5 mm. ▪ Planarità delle piastre di almeno 0,03 mm. ▪ Possono essere utilizzate piastre ausiliarie con spessore minimo di 25 mm. ▪ L'alloggiamento, avente diametro non superiore a 150 mm, deve essere interno alla piastra.
PROCEDURA
<ul style="list-style-type: none"> • Fabbricazione e regolazione del provino <ul style="list-style-type: none"> ▪ In conformità alle norme <i>UNI EN 13286-50-51-52-53</i>. ▪ Il provino deve essere collocato perfettamente nel centro della piastra inferiore: l'allineamento visivo non può essere utilizzato. ▪ I provini possono essere cilindrici oppure cubici, con dimensioni nominali minime fino a 50 mm (diametro) e massime fino a 300 mm (altezza), e con resistenze ultime a compressione che variano da $0,5 \text{ N/mm}^2$ fino alle resistenze abituali del calcestruzzo. ▪ Le dimensioni del provino devono essere misurate con un'accuratezza dello 0,5%. ▪ Prima di iniziare la prova il provino deve essere pesato con un'accuratezza di $\pm 0,25\%$ e confrontato con la massa al momento della fabbricazione. La modifica della massa deve essere registrata. ▪ Le superfici superiore e inferiore del provino devono avere una tolleranza di parallelismo non maggiore di 2 mm in 100 mm. I provini che non soddisfano tale requisito devono essere scartati o rettificati mediante molatura o spianatura. ▪ L'umidità in eccesso deve essere asciugata dalla superficie del provino prima del posizionamento nella macchina di prova. • Procedimento <ul style="list-style-type: none"> ▪ Tutte le superfici portanti della macchina di prova devono essere pulite e l'eventuale graniglia sciolta o materiale estraneo devono essere rimossi dalle superfici del provino. ▪ Non deve essere utilizzato alcun materiale di riempimento tra il provino e le piastre o le piastre ausiliarie. ▪ Al momento del contatto tra il provino e la piastra superiore, l'alloggiamento sferico deve essere regolato in modo da ottenere il contatto uniforme tra il provino e la piastra superiore. ▪ Il carico deve essere applicato in modo continuo e uniforme senza sbalzi in modo che la rottura si verifichi da 30 s a 60 s dall'inizio del caricamento.

- La forza massima sostenuta, **F**, deve essere registrata.
- Il tempo tra la rimozione dei provini dalla condizione di indurimento e il caricamento va ridotto al minimo in modo da evitare la perdita di umidità.
- La modalità di rottura del provino deve essere annotata utilizzando le figure seguenti:



- Registrare il tipo di rottura avvenuta.
- Rotture non soddisfacenti sono generalmente causate da attenzione insufficiente verso i procedimenti descritti o da un guasto della macchina.

OPERAZIONI FINALI, RAPPORTI, MARCATURE

- **Resistenza a compressione**

$$R_c = \frac{F}{A_c} \quad [\text{N/mm}^2]$$


F = forza massima sostenuta dal provino di miscele legate con leganti idraulici [N];

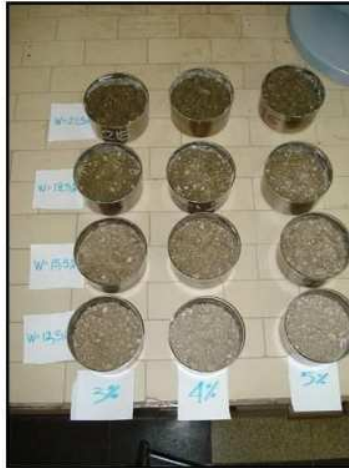
A_c = area della sezione trasversale del provino di miscela legata con leganti idraulici [mm²].

R_c deve essere espressa approssimata allo:

- 0,1 N/mm² più vicino per valori di **R_c** fino a 5 N/mm².
- 0,5 N/mm² più vicino per valori di **R_c** maggiori di 5 N/mm².

3.4.9 Procedura per la preparazione dei provini per lo studio dell'assorbimento

PROVA DESCRITTA	
	<p><u>PREPARAZIONE DEI PROVINI PER LO STUDIO DELL'ASSORBIMENTO</u></p>
OBIETTIVI E CONTENUTO	
<p>Procedura specifica per il confezionamento dei provini di miscela da utilizzare per studi sull'assorbimento di acqua di reazione e sull'andamento della temperatura durante la miscelazione con miscelazione manuale.</p>	
RIFERIMENTI NORMATIVI	
<p><i>CNR BU n. 69/73; UNI EN 13286-2, UNI EN 13286-50.</i></p>	
APPARECCHIATURA	
<ul style="list-style-type: none"> • Forno che possa raggiungere la temperatura costante di almeno (110 ± 5) °C. • Teglie metalliche. • Acqua pulita e a temperatura ambiente. • Setaccio da 1 mm. • Bilancia. • Cilindri graduati con spruzzino. • Spatola. • Cronometro. • Termometro. • Recipienti metallici. 	
PROCEDURA	
<ul style="list-style-type: none"> • Essiccare il terreno in forno a (110 ± 5) °C stendendolo in teglie metalliche. • Estrarre il terreno dal forno e lasciarlo raffreddare. • Numerare e tarare le capsule metalliche; servirà una capsula per ogni miscela creata. • Passare il materiale attraverso un setaccio con maglie di ampiezza pari ad 1 mm. • Pesare, all'interno delle capsule, 150g di materiale secco. • Pesare l'acqua necessaria a raggiungere l'8% in peso di umidità. • Umidificare la porzione di prova e amalgamare con una piccola spatola. • Lasciar riposare tutti i provini realizzati per 15 minuti. • Pesare la quantità di calce necessaria per la miscelazione. • Pesare la quantità d'acqua necessaria per raggiungere l'umidità nominale. • Stendere la calce sulla porzione di prova. • Versare la quantità d'acqua precedentemente pesata e miscelare finché il terreno non assume un aspetto omogeneo. • Pesare la miscela realizzata. • Lasciar riposare la porzione di prova per 30 minuti. 	



- Trascorsi 30 min pesare nuovamente le capsule.
- Porre il campione in forno per 12 ore.
- Pesare il materiale essiccato e registrare il peso lordo secco.

3.5 Attività di Ricerca inerenti allo studio della miscela

Le attività di ricerca inerenti alla fase di studio in laboratorio della miscela terra-calce costituiscono il nucleo di tutta l'indagine svolta sul trattamento a calce delle terre nell'ambito della Convenzione di Ricerca DICAM – CGS Group S.p.A.

Uno degli obiettivi di partenza di tutta l'attività di ricerca è stato proprio quello di testare la Pressa Giratoria con le terre per poterne verificare l'adeguatezza e la funzionalità all'interno di questo campo d'utilizzo. Partendo quindi dalla conoscenza della ben più collaudata applicazione di questo strumento sui conglomerati bituminosi si è arrivati alla stesura di una procedura standard da poter utilizzare per addensare le terre con Pressa Giratoria.

Altro passo fondamentale della ricerca è stato quello di confrontare la nuova modalità di addensamento delle terre con quella storicamente utilizzata: la strumentazione Proctor.

Più in generale grazie a questo ramo della ricerca si sono visti elaborare diversi piani di sperimentazione al fine di ottenere come output una procedura da seguire nella fase di studio della miscela in laboratorio.

Oltre al già citato studio di comparazione tra i metodi di costipamento delle terre si ricordano la sperimentazione della prova a taglio con colonna risonante e diversi studi per valutare e correlare le principali caratteristiche dei provini realizzati con materiale trattato con calce, come quantità d'acqua, temperatura e volume.

Nelle specifiche schede si potrà osservare che non tutti gli studi effettuati porteranno all'inserimento del proprio specifico argomento nella procedura definitiva; le motivazioni possono avere carattere tecnico o economico e saranno trattate successivamente caso per caso.

Si ricorda che lo studio della miscela terra-calce ha l'obiettivo di riprodurre in campioni di laboratorio l'effetto del trattamento a calce in sito per poterne successivamente valutare le caratteristiche meccaniche; la procedura deve perciò prevedere controlli sulla qualità della miscelazione e sulle modalità di addensamento della miscela creata.

In definitiva il Report dello studio della miscela, secondo l'attività di ricerca DICAM, dovrà riportare i seguenti dati:

➤ **Informazioni generali sui materiali**

➤ **Modalità di miscelazione**

➤ **Prove di laboratorio**

- Preparazione dei provini tramite miscelazione
- Costipamento della miscela
 - Addensamento mediante attrezzatura Proctor – Umidità ottimale e densità secca
 - Addensamento mediante Pressa Giratoria – Provini per prove meccaniche
- Valutazione dei parametri meccanici
 - Indice di Portanza Immediata
 - Indice di Portanza *CBR*
 - Rigonfiamento lineare e volumetrico
 - Resistenza a compressione

3.5.1 Studio di comparazione tra i metodi di costipamento delle terre [5]

Lo studio comparativo sui metodi di costipamento delle terre nasce con un duplice obiettivo: verificare la possibilità di compattare le terre utilizzando la pressa a taglio giratoria e, in caso affermativo, valutare le proprietà volumetriche e meccaniche del terreno attraverso tale macchinario.

In analogia con quanto avviene per i conglomerati bituminosi nel dualismo prova Marshall – Pressa Giratoria, una compattazione realizzata con quest’ultima porta ad un aumento del numero di provini con caratteristiche simili a quelle del materiale compattato con i rulli.

La comparazione tra diversi metodi di addensamento delle terre in laboratorio deve essere condotta sulla base del grado di addensamento e sulla loro rappresentatività delle condizioni del terreno in sito. L’obiettivo è infatti quello di sottoporre il materiale allo stesso stress cui è soggetto durante la lavorazione. Di conseguenza anche le caratteristiche meccaniche rivestono un ruolo fondamentale e andrà valutata la loro variazione a seconda del metodo utilizzato.

Si è quindi tenuto conto di tutti questi fattori per trovare una correlazione tra la prova Proctor, procedura leader nella compattazione delle terre, radicata sia in normativa che in letteratura, e la Pressa Giratoria, strumento utilizzato ad oggi per la progettazione degli strati di conglomerato bituminoso, ma non ancora legata a studi sulla compattazione delle terre.

La ricerca sperimentale è partita dal confronto su terreni naturali, per calibrare i parametri della Pressa Giratoria in modo da ottenere risultati simili a quelli raggiunti tramite i parametri statici della prova Proctor. Tali studi sono stati effettuati su diversi tipi di terreno per valutarne l'influenza sulla compattazione.

Il parametro di confronto tra le due modalità di addensamento è la densità secca; si è dunque inizialmente individuato tale dato e il corrispondente valore dell'umidità per mezzo della prova Proctor con metodologia AASHTO Modificata.

Si è effettuato il costipamento secondo la modalità AASHTO Modificata con stampo Large su più provini per ciascun tipo di terreno (precedentemente pre-qualificato) differenziati dal grado di umidità nominale inserito inizialmente. Come risultato si avrà per ogni terreno una curva a campana che fornisce i valori di densità secca e umidità ottimale (Fig. 3.9).

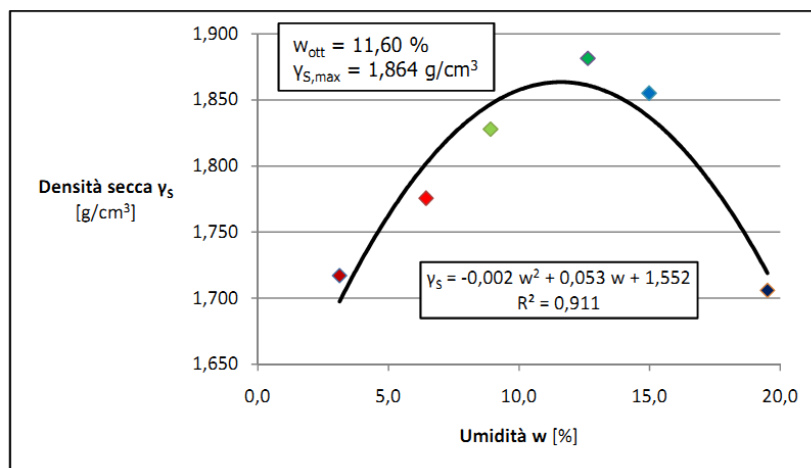


Fig. 3.9 – Esempio di risultati della prova Proctor su un terreno

Il passo successivo prevede di fornire la stessa energia attraverso la Pressa Giratoria, individuando la pressione verticale e il numero di giri a cui sottoporre i provini per ottenere la medesima densità secca tramite costipamento Proctor.

Analizzando le variabili che intervengono nella determinazione della densità secca si è riscontrata innanzitutto la necessità di effettuare un'analisi volumetrica e geometrica su provini e stampi. E' da ricordare che la preparazione di provini con compattazione Proctor vede la massa variare e il volume rimanere costante mentre l'utilizzo della Pressa Giratoria fornisce esattamente l'effetto contrario.

Si è scelto di considerare l'umidità pari a quella ottimale ottenuta nella prima fase e la massa costante pari a quella di un provino realizzato per la prova Proctor; in questo

modo l'unica variabile che rimane tale è il volume dei provini cilindrici utilizzati per le due prove.

Se si vuole ottenere la stessa densità secca con i due metodi è possibile calcolare il valore dell'altezza del provino per Pressa Giratoria (il diametro degli stampi di entrambi i macchinari è noto e fisso).

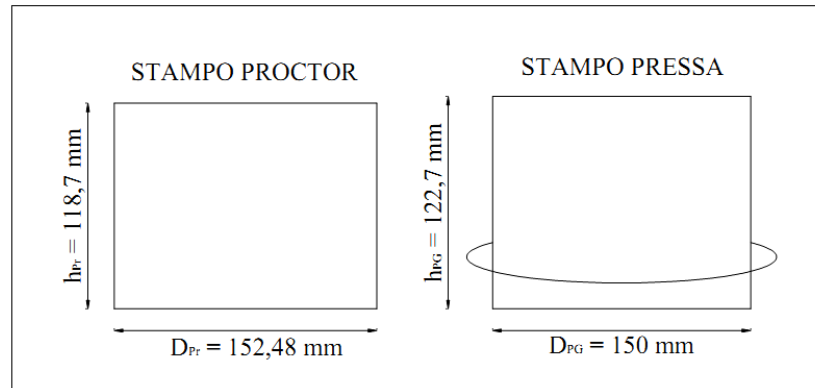


Fig 3.10 – Risultati dell'analisi volumetrica

A questo punto, dopo la realizzazione di provini con metodo Proctor all'umidità ottimale per i vari tipi di terreno, si è passati alla fase successiva, vale a dire la realizzazione di provini con la Pressa Giratoria sulla base delle considerazioni appena fatte.

Sono stati effettuati diversi tentativi a varie pressioni verticali per valutare il numero di giri necessario ad ottenere il valore di altezza del provino determinato in precedenza (Fig. 3.11).

TERRENO	Umidità w [%]	Pressione verticale [kPa]	Numero di giri [n]	Densità Secca a n giri [g/cm ³]
A	11,92	800	81	1,877
A	11,66	800	94	1,883
A	11,94	600	-	1,867
B	11,20	800	70	1,890

Fig. 3.11 - Impostazioni e dati dei provini realizzati per la comparazione dell'energia di compattazione [5].

La verifica dell'energia di compattazione trovata è stata effettuata controllando la sua influenza sulle caratteristiche meccaniche ed il contributo dell'altezza del provino e del contenuto d'acqua sulla compattazione.

In quanto alle caratteristiche meccaniche sono stati sottoposti a prova per il calcolo dell'indice *CBR* e della resistenza a compressione due provini aventi la stessa densità

secca e compattati uno con metodologia AASHTO Modificata e uno con Pressa Giratoria. I provini testati hanno fornito risultati pressoché identici per entrambe le prove. Pertanto si può ritenere che le modalità di compattazione non influenzano in maniera significativa le prestazioni meccaniche del terreno. Inoltre per quanto riguarda l'altezza dei provini, quindi la loro massa secca di partenza, si nota che il numero di giri necessario a ottenere la densità secca voluta non varia in modo importante.

Il parametro che influenza maggiormente la compattazione è senza dubbio la quantità d'acqua presente. Per umidità basse si raggiunge un grado di addensamento maggiore con la compattazione Proctor, in quanto l'elevato attrito terreno-acciaio prodotto sulla Pressa Giratoria impedisce la sua rotazione e l'incremento della pressione verticale. Per umidità elevate la pressione a cui viene sottoposto il terreno sulle due basi tramite Pressa Giratoria provoca la laminazione dell'argilla: non potendo compattare ulteriormente il terreno in quanto l'acqua assorbe l'energia fornita, una parte di terra viene espulsa attraverso gli inevitabili giochi tra i dischi di compattazione superiore e inferiore.

E' importante osservare che il diverso procedimento meccanico a cui viene sottoposto il terreno con le due tipologie di compattazione incide notevolmente sulle caratteristiche finali, ad esempio sullo stato delle superfici esterne, che nel caso di compattazione con Pressa Giratoria saranno levigate e soggette a crepatura, caratteristiche assenti per l'altro tipo di addensamento.

L'ultima fase del confronto tra le modalità di compattazione prevede la determinazione di densità secca e umidità ottimale con l'utilizzo della Pressa Giratoria al fine di creare una legge di correlazione tra i due dispositivi confrontati.

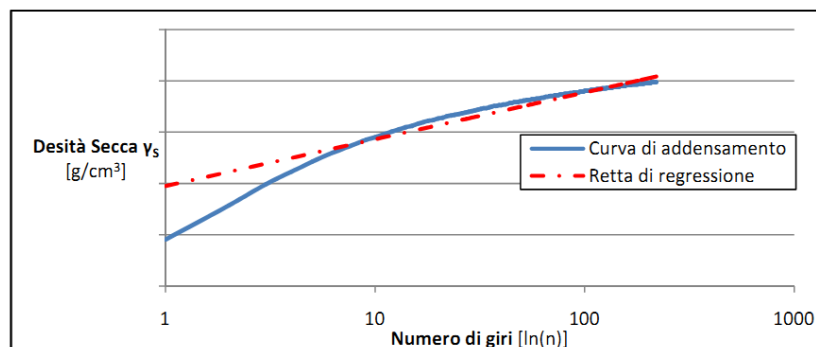


Fig. 3.12 – Curva di addensamento e retta di regressione di una terra compattata con pressa giratoria

Le curve di addensamento ottenute sui vari terreni sono quindi state analizzate al fine di ottenere l'umidità ottimale con tre diverse procedure:

- Energia di compattazione fissa, metodo teoricamente del tutto simile a quello utilizzato per la compattazione Proctor; si sono ottenuti valori di umidità ottimale superiori di circa il 2% rispetto a quelli calcolati tramite la metodologia classica, sintomo che il meccanismo di compattazione giratorio necessita di un tenore di umidità maggiore per compattare al meglio il terreno.
- Energia di compattazione variabile, in maniera tale da ottenere il numero esatto di giri per poter addensare nel modo giusto il terreno caso per caso sulla base del rapporto tra numero di giri e tenore d'umidità. I risultati sono delle curve che mettono in relazione il numero di giri all'umidità.

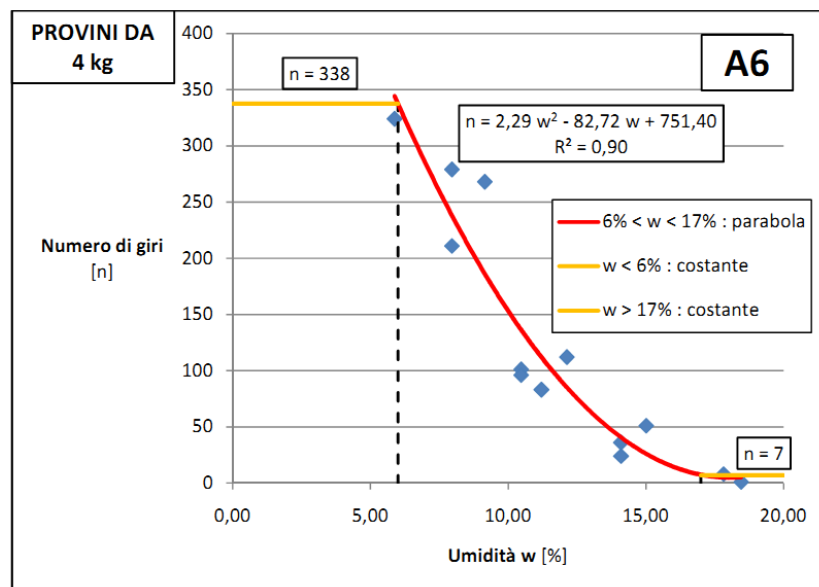


Fig. 3.13 – Grafico della variazione del numero di giri in funzione della massa secca con il campo delle umidità diviso in zone ad andamento diverso sulla base dei risultati sperimentali

Si è giunti alla stesura di una correlazione Proctor-Giratoria per terreni di tipo A6 che partendo dall'umidità permette di passare dall'energia Proctor al numero di giri di Pressa Giratoria:

$$n = \begin{cases} 339 & \text{per } w < 6\% \\ 2,29 \cdot w^2 - 82,72 \cdot w + 751,40 & \text{per } 6\% < w < 17\% \\ 7 & \text{per } w > 17\% \end{cases}$$

- Analisi delle rette di regressione delle curve di addensamento. Tale procedura è affiancabile unicamente alla teoria che prevede una compattazione con energia

costante in quanto, per un numero di giri molto basso le curve di addensamento stimate e le rette di regressione non sono molto rappresentative delle reali condizioni del terreno. Si ottengono pertanto valori dell'umidità ottimale più alti rispetto a quello preso come riferimento, calcolato tramite prova Proctor, mentre la densità secca massima risulta circa identica o leggermente inferiore.

Un altro tipo di valutazione è stata condotta tramite la definizione dei cosiddetti Terminal Points (*USACE – United States Army Corps of Engineers*). Questi sono punti del grafico densità secca – numero di giri che definiscono il numero di giri, o l'intervallo di numero di giri, per cui tramite compattazione giratoria si ottiene un addensamento soddisfacente, oppure un addensamento pari a quello ottenuto con compattazione Proctor, a seconda del tipo di analisi che si sta effettuando [9].

In base ai risultati ottenuti in precedenza sui terreni argillosi analizzati si è concluso che i Terminal Points che vanno considerati di particolare importanza sono:

- Δ_{50} : numero iniziale di giri per cui si ha un aumento della densità secca di $0,016 \text{ g/cm}^3$, con l'obiettivo che il valore si stabilizzi intorno alle 50 rotazioni effettuate dalla macchina.
- Δ_{100} : numero di rotazioni della macchina per cui si ha un incremento della densità secca massima di $\Delta\gamma_S = 0,016 \text{ g/cm}^3$ con stabilizzazione intorno a 100 giri.
- 90 giri: valore che negli studi effettuati, abbinato a una pressione di 800 kPa, fornisce una densità secca simile a quella ottenuta con compattazione Proctor.
- 120 giri: valore ottenuto per il Δ_{100} per alcuni terreni e allo stesso tempo valore fissato come limite superiore per l'analisi in laboratorio dei dati nel confronto Proctor-giratoria.
- 220 giri: valore massimo di giri ottenuto attraverso le rette di regressione dei dati sperimentali.

Si può notare sulla base degli studi e dei terreni analizzati che 90 giri è il numero con cui si ottiene un addensamento con metodo giratorio pari a quello con compattazione Proctor. Il valore di densità secca massima ottenuto risulta però pressoché invariato se si aumenta il numero di giri fino a 120 e inoltre la valutazione del Δ_{100} porta a risultati diversi per ciascun tipo di terreno.

In definitiva lo studio su varie tipologie di terreno, tutte comunque di matrice argillosa, ha riscontrato una significativa variabilità nei risultati sui provini compattati con Pressa Giratoria; i principali fattori di dispersione dei risultati sono il quantitativo d'acqua presente, la qualità e tipologia della matrice argillosa presente e l'inquinamento del materiale con parti sabbiose e macerie.

Si è quindi passati dal confronto di terreni naturali a quello di miscele di terra e calce. La compattazione delle miscele è espressamente richiesta da normative e capitolati e interviene nella determinazione della miscela ottimale da utilizzare.

Gli studi effettuati sul confronto delle modalità di compattazione prevedono la realizzazione di coppie di provini con diversi valori di umidità e di contenuto di calce, che verranno poi sottoposti uno a compattazione Proctor e uno a compattazione giratoria.

I vari provini in seguito alla compattazione sono stati conservati per 7 giorni senza perdite di umidità e quindi sono stati sottoposti alle prove per la determinazione dell'indice *CBR* e della resistenza a compressione, con diverse misurazioni dell'umidità durante le varie fasi del procedimento.

Le umidità ottimali di compattazione, sia per la prova Proctor che per la Pressa Giratoria, sono simili a quelle determinate per il terreno vergine. Ciò mostra che aggiungendo la terra con la calce l'umidità ottimale non aumenta in maniera sostanziale rispetto a quella vergine.

Numerosi studi effettuati su terreni stabilizzati hanno messo in evidenza una diminuzione della densità secca massima e un lieve aumento dell'umidità ottimale al crescere della percentuale di calce utilizzata. Inoltre è stato osservato che, all'aumentare della quantità di calce utilizzata, le curve tendono solitamente ad appiattirsi, ciò è dovuto alla capacità di ridurre la sensibilità del terreno all'azione dell'acqua.

In quanto al confronto delle caratteristiche meccaniche ottenute con le due metodologie di compattazione si riporta la figura riassuntiva relativa all'indice *CBR* (Fig. 3.14) a titolo di esempio:

%calce	CBR [%]					
	3		4		5	
w _{nom} [%]	Proctor	Pressa Giratoria	Proctor	Pressa Giratoria	Proctor	Pressa Giratoria
12,50	130	155	170	176	128	205
15,50	109	64	147	84	137	89
18,50	44	29	60	42	68	27
21,50	71	14	80	16	37	20

Fig. 3.14 – Confronto degli indici CBR [2].

I valori delle due caratteristiche meccaniche calcolate alle basse umidità sono massimi per i provini compattati mediante Pressa Giratoria, mentre per gradi di umidità più elevati le prestazioni maggiori si ottengono per i provini sottoposti alla prova Proctor.

Si è quindi osservato che, all'aumentare del tasso di umidità nominale, le caratteristiche meccaniche relative ai provini costipati tramite compattazione giratoria decadono più velocemente rispetto a quelli compattati utilizzando la tradizionale prova Proctor.

Infine l'analisi delle stesse caratteristiche meccaniche su miscele realizzate con valore ottimale dell'umidità ha evidenziato come per basse percentuali di calce le prestazioni sono superiori per miscele compattate con metodo Proctor mentre all'aumentare del quantitativo di calce si ottiene il risultato contrario quindi con migliori risultati ottenuti dalla compattazione giratoria.

3.5.1.1 Scheda di ricerca: *Confronto tra le modalità di compattazione*

SCHEDA DI RICERCA – Studio della miscela Confronto tra le modalità di compattazione	
OBIETTIVO	<p>Verificare la possibilità di studiare le terre utilizzando la pressa a taglio giratoria e valutare le proprietà volumetriche e meccaniche del terreno attraverso tale macchinario.</p> <p>Dopo aver determinato l'idoneità dell'uso di tale macchinario sulle terre sono stati confrontati il metodo di costipamento Proctor con quello giratorio tramite applicazioni su terreni naturali e su miscele di terra e calce.</p>
ATTIVITÀ	<ul style="list-style-type: none"> • Tesi di Laurea: <i>Analisi comparativa sperimentale sulle metodologie di costipamento delle terre in Laboratorio</i> (Ing. R. Cancellieri). • Tesi di Laurea: <i>Studio sperimentale delle terre stabilizzate con leganti idraulici: progettazione prestazionale delle miscele</i> (Ing. Giulia Manganeli). • Tesi di Laurea: <i>Studio sperimentale sulle tecniche di costipamento delle terre</i> (Ing. Andrea Stanghellini). • Tesi di Laurea: <i>Stabilizzazione con leganti idraulici: confronto delle caratteristiche di portanza per miscele a diverse fasi di maturazione</i> (Ing. Eugenio Florio). • Tesi di Laurea: <i>Stabilizzazione delle terre con calce: studio di laboratorio del processo di maturazione immediato</i> (Ing. Carlo Berti). • Pubblicazioni: <i>Experimental Comparative Analysis Of Laboratory soils compaction methodologies – 16TH World Road Meeting, International Road Federation</i> (Dott. Ing. C. Sangiorgi, Ing. C. Lantieri, Ing. R. Cancellieri).
RISULTATI	<p>Lo studio delle teorie già presenti nella letteratura stradale riguardanti l'utilizzo dello strumento pressa giratoria - si ricorda in particolare il metodo di progettazione Superpave (Superior Performing Asphalt Pavements) del programma di ricerca SHRP (Strategic Highway Research Program) sui conglomerati bituminosi – ha reso possibile effettuare ipotesi sufficientemente ragionevoli sul possibile uso di questa apparecchiatura sulle terre.</p> <p>L'utilizzo della pressa giratoria per compattare materiali ad uso stradale, grazie alla sua azione congiunta di carico verticale e rotazione, porta a risultati idonei a rappresentare le condizioni di addensamento in sito ad opera dei rulli.</p> <p>L'attività di ricerca ha ricavato in primo luogo, sulla base delle informazioni fornite dalle metodologie classiche di compattazione statiche delle terre, una procedura per realizzare l'addensamento di terreni argillosi attraverso pressa giratoria. Questa procedura e quella seguita per preparare i provini sono state inserite come upgrade all'interno del procedimento per lo studio della miscela in quanto non esistono a tutt'oggi norme nazionali o internazionali che regolano tali processi.</p> <p>Si è vista dunque la necessità di tarare il funzionamento e i parametri di questo macchinario; per fare questo sono stati effettuati importanti studi teorici e sperimentali di raffronto tra la compattazione giratoria e quella statica Proctor di terreni vergini.</p> <p>Lo studio di confronto ha visto realizzare le curve a campana densità secca – umidità ottenute da prove di compattazione Proctor e, successivamente a considerazioni volumetriche sulle diverse dimensioni dei provini per stampi</p>

Proctor e stampi per la pressa giratoria, in cui dopo alcune ipotesi l'unica variabile rimasta tale sarà il volume dei provini, si è passati alla produzione di un'energia di compattazione giratoria pari a quella statica determinata. Il risultato è stata la determinazione di valori di pressione verticale e numero di giri significativi per addensare terreni argillosi con la pressa giratoria. Dalle analisi su diversi tipi di terreni, tutti di natura argillosa, si è giunti alla conclusione che 800 kPa di pressione verticale e il compimento di almeno 90 giri sono i valori da applicare ai provini per poter ottenere un addensamento che porti alla densità secca massima e quindi all'individuazione dell'umidità ottimale.

Successivamente sono stati effettuati studi sempre volti al confronto tra le due modalità di compattazione su terreni trattati a calce.

Per concludere il confronto, sia nel caso di terreni vergini che in quello di terreni stabilizzati, sono state valutate le caratteristiche meccaniche dei provini compattati (indice di portanza *CBR* e resistenza a compressione). Si è notato che i risultati ottenuti forniscono importanti informazioni teoriche sulle differenti modalità di compattazione; il parametro che influenza maggiormente le prestazioni è il contenuto d'acqua: la tendenza vista sia nelle terre vergini che in quelle trattate a calce è quella che per umidità ottimale di partenza si ottiene un addensamento maggiore con compattazione Proctor per valori bassi di umidità mentre per valori più elevati il valore maggiore è ottenuto con pressa giratoria.

Queste differenze di addensamento sono però quasi sempre di rilevanza trascurabile e portano quindi a concludere che l'utilizzo della pressa giratoria per compattare terreni argillosi trattati con calce, pur essendo teoricamente più corretta rispetto a metodi di addensamento statici, porta a risultati molto simili a quelli ottenuti con i metodi classici.

L'attività di ricerca svolta sullo studio della miscela consiglia quindi di scegliere il metodo di compattazione dei provini caso per caso, sulla base dei valori di umidità e calce e delle caratteristiche del terreno da trattare, preferendo in particolare modalità statiche se si lavora con bassi contenuti d'acqua e, al contrario, il metodo giratorio se i contenuti d'acqua sono più elevati. Un altro approccio consigliato è quello di utilizzare la compattazione Proctor per la valutazione di umidità ottimale e densità secca e la Pressa Giratoria per la preparazione dei provini su cui si effettueranno le prove meccaniche.

Si sottolinea anche la possibilità di affiancare i due metodi all'interno di valutazioni più ampie, in cui i parametri che entrano in gioco non sono definiti in modo univoco oppure sono modificabili in opera sulla base dei risultati ottenuti in laboratorio.

3.5.2 Valutazione delle caratteristiche dinamiche [10] [11]

Un altro ramo della ricerca sul trattamento a calce dei terreni è quello che ha visto la valutazione delle caratteristiche dinamiche del suolo, in questo caso delle miscele. Esse sono parametri fondamentali soprattutto per l'analisi e la progettazione di sovrastrutture che devono resistere a carichi dinamici come quelle stradali e per cui la caratterizzazione dal punto di vista statico valutata nei paragrafi precedenti non fornisce risultati che rispecchiano nella loro interezza le tipologie di carico cui sono soggetti questi tipi di opere.

La ricerca è stata svolta effettuando sperimentazioni di laboratorio con l'obiettivo di valutare le principali caratteristiche dinamiche di miscele di terra e calce attraverso la prova di colonna risonante e verificare la significatività di questi test.

Sono state eseguite prove su miscele di terreno e varie percentuali di calce e umidità, costipate secondo il metodo di compattazione AASHTO Modificata e con pressa giratoria, in modo da estendere il confronto tra le due tipologie di addensamento anche alle caratteristiche dinamiche.

La prova di colonna risonante consiste nell'agitare un provino cilindrico, cavo o non, in condizioni naturali, applicando sulla sua parte superiore un carico torsionale ciclico, generato da un sistema elettromagnetico o da un motore.



Fig. 3.15 – Colonna risonante.

Si valutano quindi l'andamento del modulo di taglio e lo smorzamento cioè la legge di decadimento delle vibrazioni libere indotte al provino dal macchinario all'aumentare della deformazione massima di taglio.

La velocità di propagazione delle onde si determina dalla frequenza di risonanza.

La torsione ciclica, ad ampiezza di carico costante, è applicata su un determinato campo di frequenze. Viene poi misurata la curva di risposta.

Il taglio è proporzionale alla velocità delle onde, misurata relativamente alla prima frequenza di risonanza; il modulo, invece, è calcolato a partire dalla velocità di onda di taglio e dalla densità del suolo.

Lo smorzamento può essere inoltre ottenuto dalla curva di decadimento delle vibrazioni libere. L'ampiezza di carico della torsione ciclica viene aumentata ad ogni prova per ottenere i valori di smorzamento e modulo di taglio per i diversi campi di sollecitazione. Inoltre la parte superiore del provino è vincolata orizzontalmente in modo da prevenire eventuali deformazioni indesiderate in fase di prova, garantendo così una maggior probabilità di riuscita del test.

Il metodo di colonna risonante si basa su un'equazione d'onda monodimensionale, derivante dalla teoria delle vibrazioni elastiche lineari.

L'apparecchiatura utilizzata è del tipo *fixed-free*, in cui la base del provino è fissa e la testa è libera di ruotare sotto l'azione trasmessa da un motore torsionale fissato direttamente su di essa.

La frequenza di carico viene gradualmente variata fino al raggiungimento della frequenza di risonanza (massimo della risposta).

La frequenza di risonanza è dunque funzione della rigidità del suolo, della geometria del modello e delle caratteristiche del dispositivo e si verifica quando esiste una differenza di fase pari a $\pi/2$ tra l'azione eccitante e le forze inerziali.

Innanzitutto è stata creata una procedura di preparazione dei provini da assoggettare alla prova dinamica, sulla base di tutte le informazioni ottenute nelle altre fasi di ricerca e sintetizzate in questo capitolo e in quelli precedenti. I materiali vanno pre-qualificati e classificati, si dovrà realizzare la miscela a calce e addensare i provini con una o parallelamente con entrambe le metodologie di compattazione studiate.

Successivamente si valuta la pressione di confinamento necessaria durante la prova, che dovrà riprodurre la pressione di un elemento di miscela di terreno e calce presente nello

strato trattato all'interno della sovrastruttura, attraverso una cella in plexiglas. Tale pressione dipende direttamente dall'angolo di attrito interno del materiale, che deve essere valutato per mezzo di una prova di taglio diretta.

Il macchinario colonna risonante consente l'inserimento dei dati geometrici propri del provino da testare, l'applicazione del carico torsionale a diverse frequenze e la possibilità di conoscere ad ogni passo (variazione di carico) i risultati in forma grafica relativi alla frequenza di risonanza, la deformazione massima di taglio e il decadimento delle vibrazioni libere (Fig. 3.16).

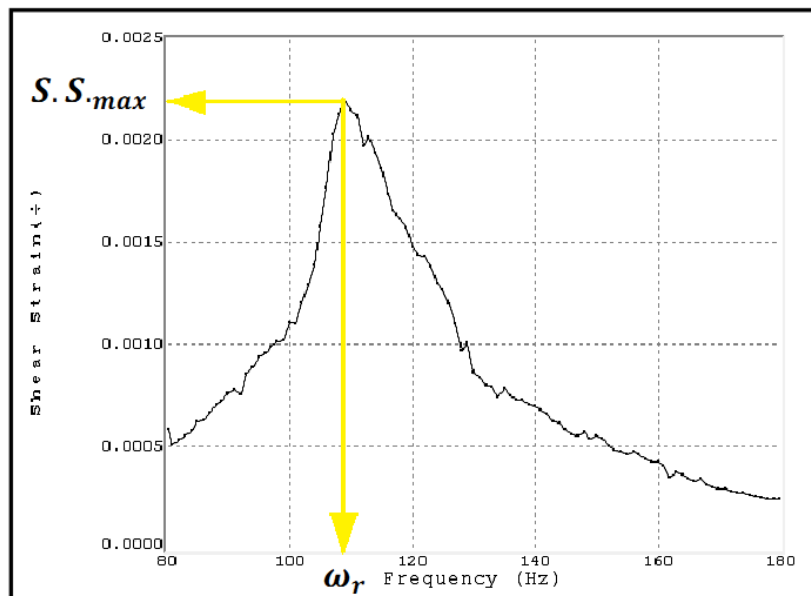


Fig. 3.16 – Grafico sforzo di taglio – frequenza fornito ad ogni passo della prova.

La prova può considerarsi conclusa quando, aumentando il momento torcente, il modulo di taglio risulta essere inferiore di un ordine di grandezza rispetto al valore massimo (ottenuto in genere per il momento torcente minimo).

Si riporta un esempio di elaborato grafico dei risultati finali (Fig. 3.17).

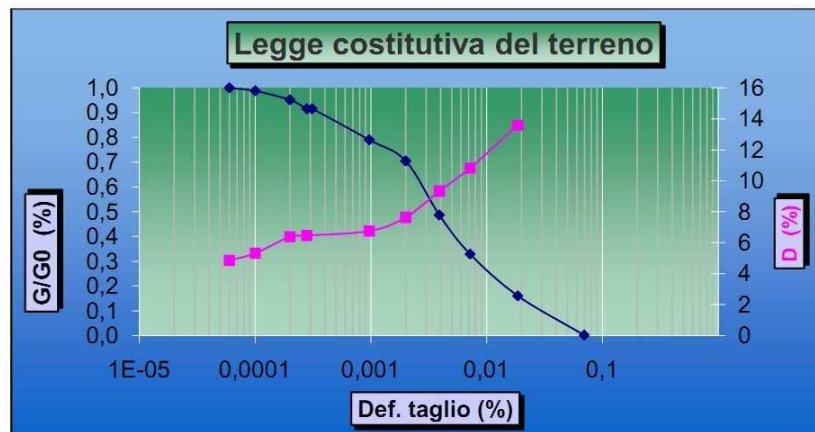


Fig. 3.17 – Esempio di risultati di una prova di colonna risonante.

Le prove dinamiche con colonna risonante sono state svolte su 12 provini di miscela cilindrici con 70 mm di diametro, creati attraverso i metodi di compattazione Proctor e con Pressa Giratoria.



Fig. 3.18 – Carotaggio e estrusione dei provini utilizzati per la prova di colonna risonante

La Tab. 3.5 mostra le caratteristiche dei 12 provini, che differiscono in base al metodo di compattazione e alle quantità di acqua e calce utilizzate.

Si osserva come il valore di umidità iniziale introdotto (W_{nomin}) diminuisce immediatamente a causa dell'assorbimento dell'acqua per la reazione chimica già prima della compattazione (W_{comp}) e come risulti ancora più basso nella misurazione dopo 7 giorni di stagionatura, subito prima della realizzazione della prova di colonna risonante (W_{ReCo}). [12]

Compaction methodology	Specimen	CaO %	W_{nomin} (%)	W_{comp} (%)	W_{ReCo} (%)	$W_{ReCo}\%/CaO\%$
PROCTOR (AASHTO Mod.)	MP 1	3	14.5	14.15	12.67	4.22
	MP 2	4	15.0	12.44	12.22	3.06
	MP 3	5	15.5	12.73	12.60	2.52
	MP 4	3	16.0	15.69	13.69	4.56
	MP 5	4	15.0	13.37	12.51	3.13
	MP 6	5	14.0	11.62	11.24	2.25
GYRATORY COMPACTOR	GC 1	3	14.5	13.89	13.05	4.35
	GC 2	4	15.0	12.79	12.15	3.04
	GC 3	5	15.5	12.85	12.49	2.50
	GC 4	3	16.0	15.51	13.12	4.37
	GC 5	4	15.0	14.18	11.82	2.96
	GC 6	5	14.0	12.16	11.84	2.37

Tab. 3.5 – Caratteristiche dei provini utilizzati per la prova di colonna risonante.

Le Figg. 3.19, 3.20 e 3.21 mostrano i risultati per ciascuna percentuale di calce e umidità residua delle prove di colonna risonante; le curve, riferite al rapporto $W_{ReCo}/CaO\%$ e non al valore proprio di umidità, mettono in relazione la deformazione a

taglio con il valore del modulo relativo (G/G_0 è il modulo di taglio iniziale, valutato per una deformazione dello 0,0001%) e con quello dello smorzamento percentuale (D).

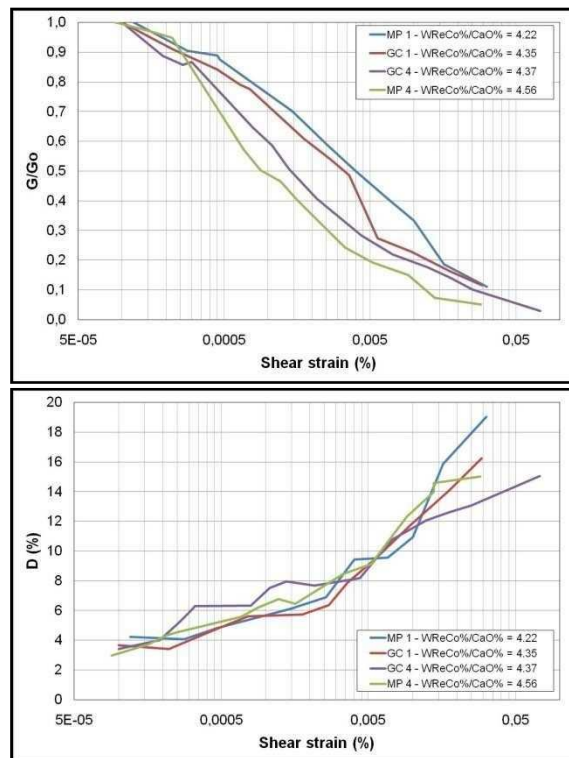


Fig. 3.19 - G/G_0 e D -sforzo di taglio per provini con 3% CaO.

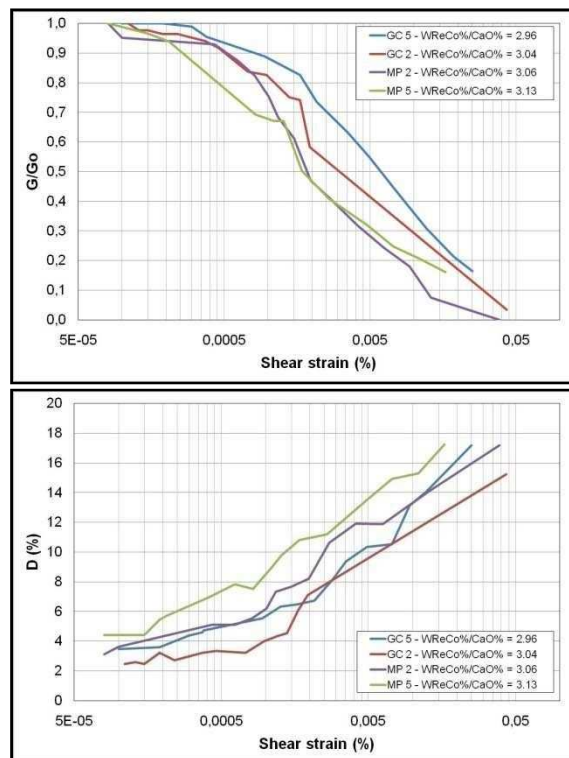


Fig. 3.20 - G/G_0 e D -sforzo di taglio per provini con 4% CaO.

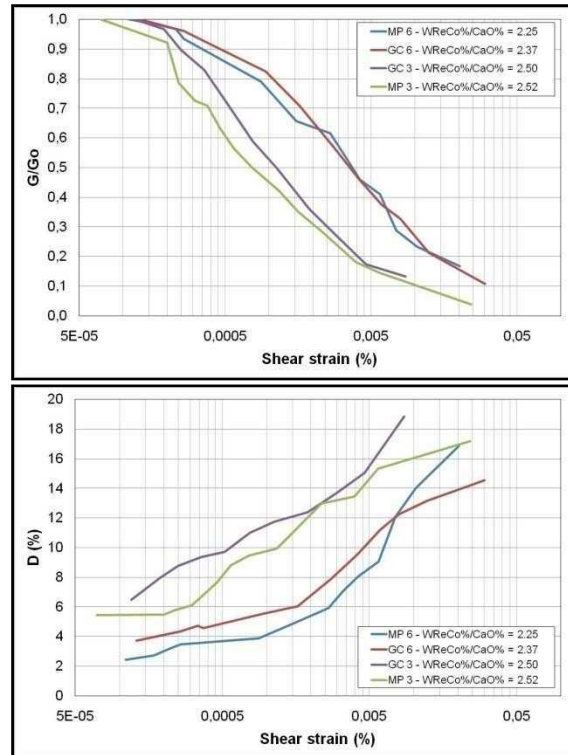



Fig. 3.21 - G/G_0 e D -sforzo di taglio per provini con 5% CaO.

I risultati ottenuti evidenziano come per tutti i provini è riscontrabile una diminuzione della rigidità con l'aumentare del rapporto $W_{ReCo}/CaO\%$, quindi all'aumentare del contenuto d'acqua. Tale andamento è confermato dalla riduzione dello smorzamento D , quindi dall'aumento della rigidità, al diminuire dell'umidità.

Il numero di curve non è sufficiente per determinare la tendenza ottimale per il rapporto acqua/calce, tuttavia è evidente come l'acqua svolga un ruolo importante, soprattutto per contenuti di calce più elevati; infatti le curve di smorzamento per i quantitativi più alti di calce sono più sensibili alle variazioni di umidità.

L'osservazione più rilevante è legata all'indipendenza dei risultati dal metodo di compattazione utilizzato. Le curve ottenute, a parità di contenuto d'acqua e di calce, risultano accoppiate. Questo conferma l'esito ottenuto dallo studio delle caratteristiche meccaniche con metodi statici.

Si riporta a titolo riassuntivo la scheda tecnica relativa alla prova di colonna risonante (Fig. 3.22).

PROVA DESCRITTA	
	<h2 style="margin: 0;"><u>CARATTERISTICHE DINAMICHE CON PROVA DI COLONNA RISONANTE</u></h2>
OBIETTIVI E CONTENUTO	
<p>Valutazione dell'andamento del modulo di taglio e della legge di decadimento delle vibrazioni libere indotte al provino tramite colonna risonante all'aumentare della deformazione massima di taglio.</p>	
APPARECCHIATURA	
<ul style="list-style-type: none"> • Cella a quattro colonne in acciaio inox e parete esterna in acrilico rinforzato ($P_{max, \text{confinamento}}=1000\text{kPa}$). • Motore torsionale. • Unità di controllo del motore. • Sensore di deformazione a fibra ottica con doppia scala di lettura ($\pm 0.1\text{mm} \pm 6.\text{mm}$). • Unità di controllo e acquisizione servo – digitale • Accelerometro con intervallo di misurazione $\pm 10\text{g}$ e risposta in frequenza da 0 a 500 Hz. • Pannello di controllo delle pressioni, comprendente trasduttori di pressione, schede di condizionamento del segnale, manometro di precisione (risoluzione 2,5 kPa), burette graduate e pompa a vuoto tipo “Venturi”. 	
PROCEDURA	
<ul style="list-style-type: none"> • Dati in input <ul style="list-style-type: none"> ▪ Peso del provino (kg). ▪ Diametro del provino: $\Phi = 70 \text{ mm}$. ▪ Altezza del provino (variabile): $h/\Phi \sim 2$. • Step 1 <ul style="list-style-type: none"> ▪ Fissare un valore della sollecitazione torsionale di carico (partire da carichi bassi, a cui corrispondono elevati moduli di taglio). ▪ Mantenendo costante la sollecitazione, far variare le frequenze fino ad ottenere il picco. $\omega_1 \rightarrow Vs_1 \rightarrow G_1 \rightarrow D_1$ $\omega_1 \rightarrow x_1 \rightarrow \mathcal{I}max_1 \rightarrow \gamma_1$ • Step 2 <ul style="list-style-type: none"> ▪ Fissare un secondo valore di sollecitazione torsionale di carico, maggiore del precedente. ▪ Mantenerlo costante e far variare le frequenze fino ad ottenere il picco. $\omega_2 \rightarrow Vs_2 \rightarrow G_2 \rightarrow D_2$ $\omega_2 \rightarrow x_2 \rightarrow \mathcal{I}max_2 \rightarrow \gamma_2$ • Step n <ul style="list-style-type: none"> ▪ Fissare un n-esimo valore di sollecitazione torsionale di carico e, tenendolo costante, far variare le frequenze fino ad ottenere il picco. $\omega_n \rightarrow Vs_n \rightarrow G_n \rightarrow D_n$ $\omega_n \rightarrow x_n \rightarrow \mathcal{I}max_n \rightarrow \gamma_n$ <p>ω = frequenza (Hz). Vs = sforzo di taglio. G = modulo di taglio. D = rapporto di smorzamento. γ = deformazione di taglio.</p>	

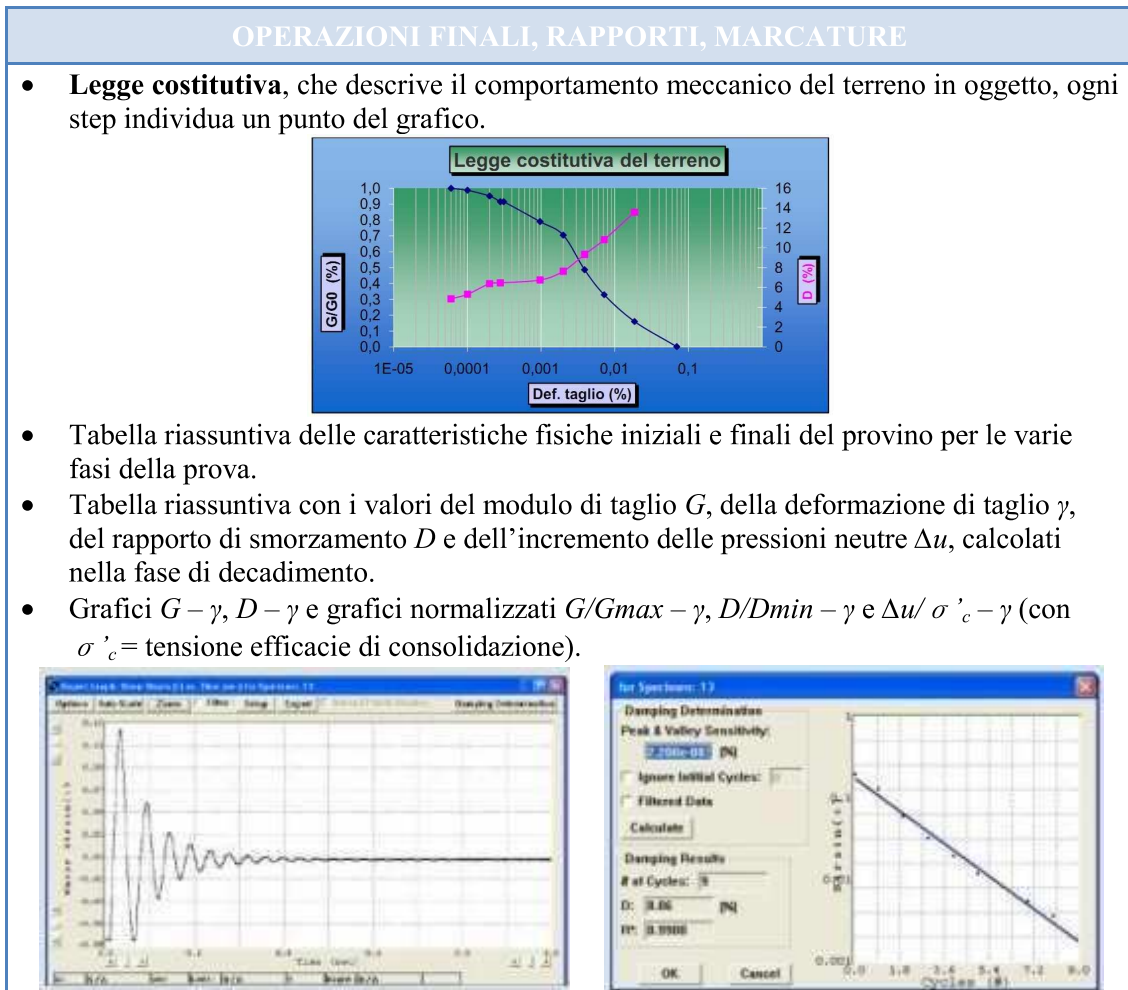


Fig. 3.22 – Scheda tecnica riassuntiva della prova di colonna risonante.

Lo studio delle caratteristiche dinamiche attraverso la prova di colonna risonante ha confermato la loro importanza nel contesto del trattamento a calce dei terreni.

Queste valutazioni portano infatti a conoscenza di parametri che meglio rispecchiano le reali condizioni del materiale in opera rispetto alle classiche considerazioni puramente statiche.

Tuttavia data l'estrema complessità della teoria delle vibrazioni elastiche, la ridotta quantità di studi e dati che inseriscano analisi di tipo dinamico nel contesto specifico di questa tesi di studio e visto che nella pratica non è comune possedere i macchinari specifici per queste determinazioni, si è deciso di non includere la prova di colonna risonante all'interno della procedura definitiva relativa allo studio della miscela.

3.5.2.1 Scheda di ricerca: *Valutazione delle caratteristiche dinamiche*

SCHEMA DI RICERCA – Studio della miscela Valutazione delle caratteristiche dinamiche	
OBIETTIVO	<p>Determinazione delle caratteristiche meccaniche in relazione ai carichi dinamici tipicamente presenti negli ambiti stradali. Verificare la significatività dell'uso della colonna risonante per valutare le caratteristiche dinamiche di terreni trattati a calce.</p>
ATTIVITÀ	<ul style="list-style-type: none"> • Tesi di Laurea: <i>Metodi per la caratterizzazione dinamica di terre stabilizzate con leganti idraulici</i> (Ing. Fausto Bernardoni). • Tesi di laurea: <i>Caratterizzazione dinamica mediante colonna risonante di terre stabilizzate con leganti idraulici</i> (Ing. Marco Abbondanza). • Pubblicazioni: <i>Experimental comparative analysis of laboratory compaction methodologies for stabilized soil</i> (Dott. Ing. G. Dondi, Dott. Ing. C. Sangiorgi, Ing. C. Lantieri, Ing. R. Cancellieri, Ing. P. Viola).
RISULTATI	<p>Per poter introdurre in maniera coerente i dati dinamici ottenuti da questa fase della ricerca si è deciso di seguire la procedura di realizzazione dei provini di miscela stabilita per la determinazione dei parametri meccanici classici (<i>IPI, CBR, resistenza a compressione</i>).</p> <p>I provini soggetti alla prova di colonna risonante sono quindi realizzati attraverso il procedimento di studio della miscela, che prevede una specifica procedura di miscelazione e in seguito compattazione attraverso metodo Proctor o giratorio.</p> <p>La prova di colonna risonante consiste nell'applicare un carico torsionale che produce vibrazioni al provino a frequenze regolabili, quindi a incrementi di carico. I risultati sono ottenuti in forma grafica automaticamente dall'apparecchio di prova e forniscono frequenza di risonanza, resistenza e deformazione massima a taglio e la legge di decadimento delle vibrazioni.</p> <p>I risultati ottenuti su varie miscele di terreno argilloso e calce a varie umidità ha mostrato come il trattamento a calce migliori le caratteristiche dinamiche dei terreni. La rigidità della miscela e di conseguenza la sua resistenza a taglio aumentano all'aumentare del quantitativo di calce presente.</p> <p>La mancanza di una consistente letteratura che tratti della prova di colonna risonante e soprattutto l'assenza di norme tecniche e di riferimenti specifici all'interno delle normative generali sulla stabilizzazione delle terre a calce pone l'attività di ricerca svolta su questo argomento come un significativo upgrade.</p> <p>La ricerca effettuata sulla colonna risonante apre la strada a futuri approfondimenti sullo studio delle caratteristiche dinamiche di materiali di natura terrosa ad uso stradale e si spera possa sensibilizzare gli specialisti del settore sulla necessità di accrescere le conoscenze e la documentazione normativa in questo campo.</p> <p>Al momento, vista la limitata cultura sull'argomento, si è scelto di non inserire lo studio dinamico all'interno del procedimento definitivo sullo studio della miscela.</p>

3.5.3 Assorbimento dell'acqua di reazione [2]

L'attività di ricerca inerente allo studio della miscela durante le varie fasi di preparazione dei provini, dalla miscelazione dei materiali alla compattazione dei campioni creati, ha reso possibile effettuare verifiche sulla quantità di acqua assorbita per reazione dei terreni con la calce.

Il procedimento operativo per la realizzazione dei provini comprende quattro determinazioni di umidità: la prima viene eseguita 30 minuti dopo l'umidificazione del materiale, la seconda immediatamente dopo la miscelazione, la terza appena prima della compattazione e la quarta successivamente alla rottura del provino.

Le prime tre determinazioni sono influenzate in maniera significativa dalla metodologia di campionamento, per questo motivo è stata elaborata una seconda procedura – inserita nelle schede tecniche del capitolo - in grado di ottenere risultati maggiormente accurati e verosimili e finalizzata esclusivamente allo studio dell'assorbimento d'acqua.

L'obiettivo è ottenere dei provini idonei per il calcolo delle variazioni di umidità tra le varie fasi del processo di creazione della miscela finale.

Per quanto riguarda l'assorbimento dell'acqua di reazione sono stati creati grafici che mettono in relazione il valore dell'umidità alle varie fasi di produzione, grazie ai quali è possibile relazionare la variazione di umidità con la durata di ciascun passo.

La ricerca ha previsto lo studio di miscele con valori di calce e di umidità nominale di partenza diversi, per poter così individuare la tendenza relativa all'assorbimento d'acqua in funzione del quantitativo di materiali presenti.

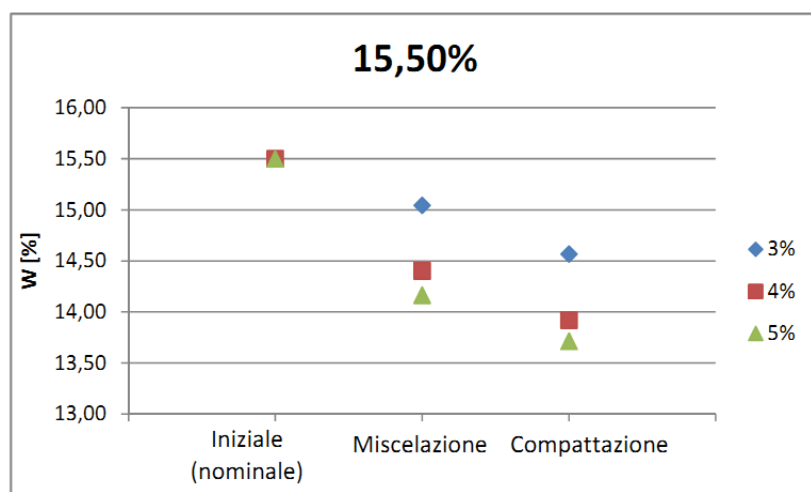


Fig. 3.23 – Esempio dell'andamento del tenore di umidità per umidità nominale del 15,50%.

I risultati hanno evidenziato come il tenore di umidità cala al passare del tempo. Coerentemente a ciò che accade in sito, durante la fase di miscelazione la calce cattura le molecole d'acqua presenti nel terreno per completare il processo di idratazione, provocando così una diminuzione dell'umidità del materiale.

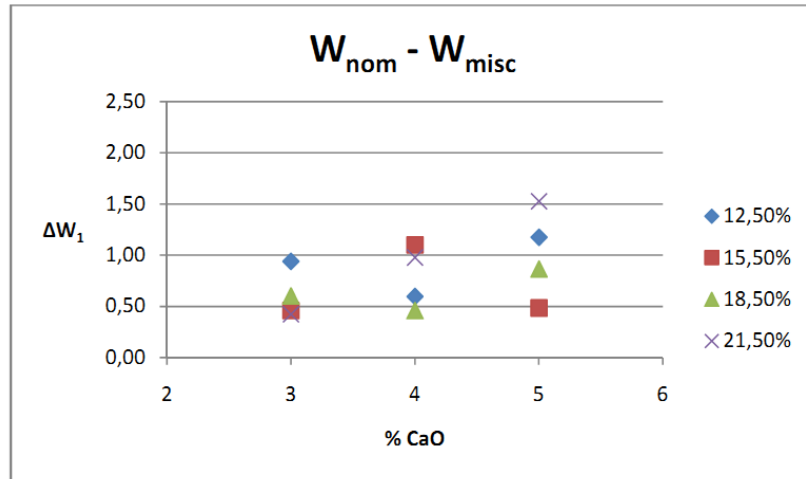


Fig. 3.24 – Differenza tra umidità nominale e quella di miscelazione

Osservando la Fig. 3.24 è possibile notare che, nella fase iniziale della reazione, la percentuale di calce presente influenza sensibilmente l'assorbimento d'acqua.

Una volta terminata la fase di miscelazione il tenore di umidità non rimane costante nel tempo, ma continua a calare fino al momento della compattazione, anche se con una differenza tra umidità di miscelazione e quella di compattazione molto limitata (mediamente intorno allo 0,5%).

L'assorbimento di acqua ad opera della calce, dal momento della miscelazione a quello della compattazione, appare quindi poco influenzata sia dall'umidità nominale considerata, sia dalla percentuale di calce presente.

In definitiva si può affermare che la quantità d'acqua sottratta dalla calce al terreno durante tutto il processo di stabilizzazione aumenta con l'aumentare della percentuale di calce utilizzata; una maggior quantità di calce avrà infatti bisogno di una maggior quantità di acqua per completare efficacemente la reazione.

3.5.3.1 Scheda di ricerca: *Valutazioni inerenti all'assorbimento dell'acqua di reazione*

SCHEDA DI RICERCA – Studio della miscela Valutazioni inerenti all'assorbimento dell'acqua di reazione	
OBIETTIVO	<p>Porre le caratteristiche tipiche della reazione chimica che scaturisce nelle miscele, vale a dire l'assorbimento d'acqua e l'innalzamento della temperatura, come grandezze impiegabili per la valutazione della qualità delle operazioni di trattamento a calce eseguite.</p>
ATTIVITÀ	<ul style="list-style-type: none"> • Tesi di Laurea: <i>Studio sperimentale delle terre stabilizzate con leganti idraulici: progettazione prestazionale delle miscele</i> (Ing. Giulia Manganelli). • Tesi di Laurea: <i>Stabilizzazione delle terre con calce: studio di laboratorio del processo di maturazione immediato</i> (Ing. Carlo Berti).
RISULTATI	<p>L'analisi dell'assorbimento dell'acqua durante le varie fasi di produzione della miscela ha visto in primo luogo l'esigenza di realizzare provini con una metodologia specifica atta a ridurre al minimo le problematiche relative a perdite di umidità indesiderate.</p> <p>La valutazione del contenuto d'acqua durante le varie fasi di lavorazione, con valore di partenza pari all'umidità ottimale, ha evidenziato che effettivamente durante la reazione parte dell'acqua viene a mancare a causa appunto della sua reazione chimica con la calce. La differenza di umidità è praticamente del tutto dovuta alla fase di miscelazione. Si nota infatti che il contenuto d'acqua, una volta terminata la miscelazione dei materiali, non ha più variazioni significative nei tempi successivi.</p> <p>Si è osservato inoltre un previsto aumento dell'acqua assorbita all'aumentare della quantità di calce presente nella miscela.</p> <p>E' confermata la fondamentale importanza della qualità dei materiali utilizzati: si può quindi concludere che miscele che producono valori più spiccati di assorbimento d'acqua sono tipici di buone reazioni e che quindi il materiale prodotto garantirà prestazioni adeguate all'uso; si è visto che tali miscele sono costituite da terreni con basso quantitativo di sostanze organiche e calce di recente fabbricazione e immagazzinata in ambienti idonei al mantenimento delle sue caratteristiche chimico-fisiche.</p>

Capitolo 4 – PROCEDURE IN SITO PER IL CONTROLLO *PRE, IN ITINERE* E *POST* LAVORAZIONI

Concluse le fasi preliminari svolte in laboratorio si è in possesso delle informazioni necessarie per poter avviare le procedure di trattamento a calce in sito.

Le lavorazioni in sito prevedono l'esecuzione del trattamento a calce del terreno ed una serie di verifiche e controlli preventivi, in corso d'opera ed a lavori ultimati.

Le verifiche servono ad attestare che durante la procedura in sito siano rispettati i valori relativi ai parametri di progetto preventivamente calcolati in laboratorio, su tutti il contenuto di calce, la densità e la portanza. I controlli invece devono confermare l'avvenuta reazione terra-calce e l'effettivo miglioramento delle caratteristiche meccaniche del terreno oltre al rispetto di eventuali raccomandazioni presenti nei Capitolati.

I controlli della qualità delle singole operazioni devono invece essere eseguiti in corso d'opera durante o subito dopo l'operazione che si sta valutando.

I controlli immediati realizzati dopo la conclusione dell'operazione di compattazione dello strato riguardano la determinazione della densità in sito, dello spessore finale e degli indici di portanza immediata. Vanno eseguiti controlli anche a 7 giorni dalla realizzazione dello strato, per valutare indici di portanza dopo maturazione i cui limiti sono spesso riportati nei Capitolati.

Si riporta in Fig. 4.1 lo schema di sintesi e successione temporale di tutte le operazioni che vanno eseguite in sito e nella Tab. 4.1 le diverse metodologie di controllo per i principali parametri, che sono descritte nei paragrafi successivi e nelle schede tecniche.

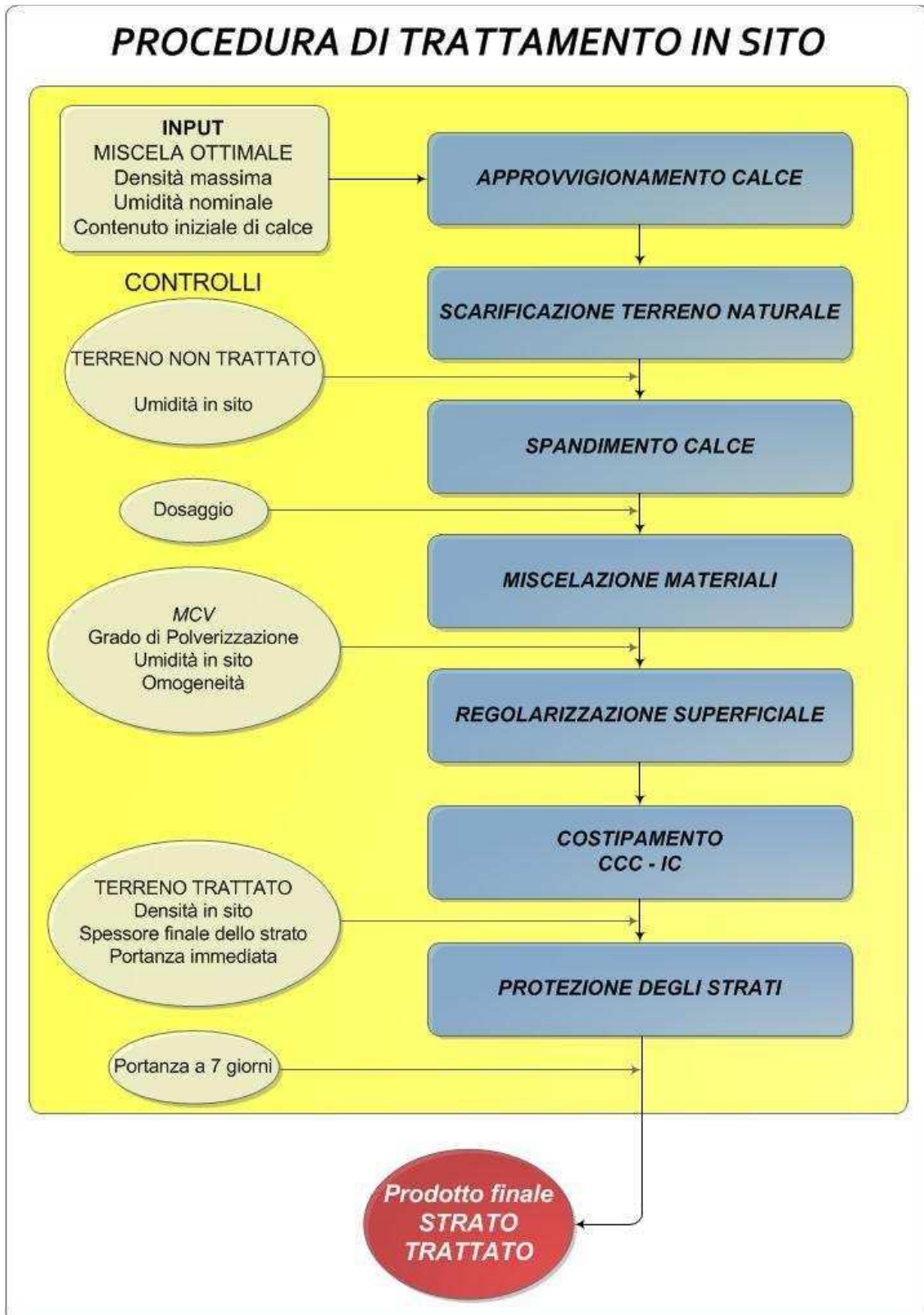


Fig. 4.1 – Schema riassuntivo della procedura in sito per il trattamento a calce di un terreno e relativi controlli.

<i>Parametro</i>	<i>Controlli tradizionali</i>	<i>Controlli innovativi</i>
Dosaggio di calce	Metodo pratico	Dosaggio automatico nello spandicalce
Umidità	Umidità in sito	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Adek Percometer ▪ <i>EDG</i> ▪ <i>GPR</i>
Qualità della miscelazione	-	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Grado di polverizzazione ▪ Moisture Condition Value ▪ Tecniche ad infrarossi
Spessore	Reazione all'agente chimico	<i>GPR</i>
Densità in sito	Volumometro a sabbia	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>EDG</i> ▪ <i>GPR</i>
Capacità portante	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>PLT</i> ▪ <i>FWD</i> 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>LFWD</i> ▪ Clegg Impact Soil Tester ▪ <i>DCP</i> ▪ <i>CBR</i> dinamico

Tab. 4.1 – Tecniche di controllo tradizionali e innovative sui principali parametri.

4.1 Operazioni e relativi controlli [13]

Sulla base dello schema precedente si riportano in questo paragrafo le informazioni relative a ciascun passaggio delle operazioni e ai corrispondenti controlli, dove presenti. Per la descrizione dettagliata relativa ai controlli da effettuare si rimanda al paragrafo contenente tutte le schede tecniche delle prove inserite nella procedura.

4.1.1 Approvvigionamento e stoccaggio della calce

La calce sfusa sarà consegnata con automezzi che ne consentano lo scarico pneumatico (Fig. 4.2).

Nel caso di approvvigionamento allo stato sfuso, in cantiere la calce sarà stoccata in appositi sili o direttamente all'interno dello spandi legante.

Il mezzo spandi calce sarà caricato direttamente dall'autobotte, durante l'operazione di spandimento.



Fig. 4.2 – Automezzo per il trasporto e lo stoccaggio in sito della calce.

4.1.2 Scarificazione del suolo naturale

L'esecuzione dei piani di posa richiede lo scotico del suolo naturale per asportare i residui di vegetazione (Fig. 4.3).



Fig. 4.3 – Scotico di terreno naturale.

Lo spessore dello strato da asportare dipende dal tipo di vegetazione esistente; normalmente si asportano 15÷30 cm di suolo che è poi utilizzato per la ricopertura finale delle scarpate. Può essere prevista l'eventuale erpicatura del suolo troppo duro e asportazione dei massi con dimensioni tali da rendere problematico l'uso della macchina miscelatrice.

Dopo aver rimosso dal terreno materiali estranei presenti, il sottofondo può essere scarificato (Fig. 4.4) alle specifiche profondità e larghezza, e successivamente, parzialmente polverizzato.

L'operazione di scarificazione è eseguita in quanto lo strato di terreno dopo il trattamento offre una superficie di contatto ottimale per la calce al momento della sua applicazione. Fino a qualche anno fa, il processo di scarificazione era eseguito regolarmente prima dello spandimento della calce, tuttavia grazie alla maggiore disponibilità attuale di miscelatori, la calce è spesso applicata senza scarificazione. Di maggiore importanza al fine di rendere più semplice l'inserimento della calce è l'opera di compattazione del terreno, in modo particolare sui terreni umidi.



Fig. 4.4 – Scarificazione del terreno.

4.1.3 Controllo dell'umidità in sito del terreno non trattato

Prima di procedere con le operazioni di trattamento a calce a questo punto della procedura è possibile effettuare delle valutazioni preliminari sul terreno non ancora trattato.

In particolare il controllo da effettuare è quello relativo alla determinazione del contenuto d'acqua nel terreno naturale presente attraverso prove di umidità in sito.

La valutazione in sito dell'umidità è possibile con metodologie classiche e innovative. Tra le prime si ricorda l'applicazione in sito della procedura specificata dalla **UNI EN 17892-1 (2005): Prove di laboratorio sui terreni – Determinazione del contenuto**

d'acqua, già descritta nelle fasi di laboratorio e ripetuta nelle schede tecniche di questo capitolo con l'adattamento pratico della procedura per l'esecuzione in cantiere.

I metodi innovativi prevedono strumenti elettronici in grado di eseguire letture dell'umidità veloci ed automatiche, attraverso l'inserimento nello strato d'interesse di sonde, come l'*Adek Percometer*, l'*Acqua Pro-Moisture Probe* e il *Vertek SMR Probe*.

Una volta nota la quantità d'acqua presente nel terreno è possibile determinare il quantitativo di umidità da aggiungere durante la fase di miscelazione per raggiungere il valore di umidità nominale.

4.1.4 Spandimento della calce

La calce viene sistemata sul terreno attraverso la distribuzione diretta da parte di autocarri con cassone autocaricanti della calce attraverso una barra pneumatica o uno spargitore meccanico (Fig. 4.5).

La calce deve essere di pezzatura molto ridotta in modo tale da fare sì che la barra possa scorrere agilmente; se si usa uno spargitore meccanico, invece, o uno spargitore separato la pezzatura può anche essere il doppio rispetto alla precedente.



Fig. 4.5 – Spandicalce a traino.

Questi mezzi sono i macchinari più adatti al trasporto e allo spargimento di calce idrata, in quanto non comportano un trasferimento di essa da un mezzo ad un altro: successivamente lo spandimento può avvenire per mezzo di uno spargitore meccanico attaccato al cassone posteriore, tramite un tubo di scolo metallico o un portello estendibile gommato posto nel retro del cassone e attaccato ad esso. I moderni spandi

calce sono anche dotati di un sistema per il controllo del dosaggio che può essere volumetrico o gravimetrico.

Se la calce scelta per la stabilizzazione è di tipo idrato, il modo migliore per effettuare lo spandimento è in condizioni metereologiche non ventose, al fine di evitare un sollevamento eccessivo di polveri.

4.1.4.1 Controllo del dosaggio

E' molto importante spargere e dosare la calce in modo regolare evitando sia sovrapposizione delle strisciate sia carenze di copertura.

La verifica della quantità inserita si attua posizionando teli o contenitori di area nota sulla superficie da trattare prima dello spandimento e pesando successivamente la quantità di calce su di essi raccolta. La quantità in kg/m^2 è calcolata in funzione dello spessore e della densità finali dello strato da lavorare, al fine di ottenere la concentrazione prestabilita come percentuale sul peso totale.

4.1.5 Miscelazione terreno-calce

La miscelazione è, assieme alla compattazione, la più importante operazione di cantiere per il buon esito della stabilizzazione.

L'azione miscelante distribuisce la calce su tutto il terreno e grazie all'aggiunta di acqua dà il via alla reazione chimica di stabilizzazione.

La macchina utilizzata per la miscelazione è denominata *Pulvimixer* (Fig. 4.6).



4.6 – Stabilizzatore *Wirtgen WR 2000*.

Il momento migliore per l'inserimento dell'acqua per raggiungere l'umidità ottima di progetto è durante la prima miscelazione tra calce e terreno. Solitamente si esegue attraverso l'accoppiamento tra il pulvimixer e un'autobotte dotata di ugelli regolabili per il rilascio dell'acqua, necessari per raggiungere il range ottimale di umidità (Fig. 4.7).



Fig. 4.7 – Pulvimixer preceduto da autobotte per aggiunta d'acqua in opera.

4.1.5.1 Verifiche e controlli all'atto della miscelazione

- *Grado di Polverizzazione*

Il calcolo del Grado di Polverizzazione si esegue attraverso un procedimento di prova semplice e veloce, descritto nella norma ***UNI EN 13286-48 (2005): Metodo di prova per la determinazione del grado di polverizzazione.***

Lo scopo della determinazione è valutare l'efficacia della miscelazione attraverso un procedimento che controlla la quantità di materiale che tende a disgregarsi durante e subito dopo la mescolatura dei materiali; l'operazione si effettua con semplici successioni di pesature e passaggi al setaccio da 5,6 mm ed è facilmente realizzabile in zona di cantiere.

- *Moisture Condition Value*

Il tasso di umidità (Moisture Condition Value) viene calcolato per la parte di miscela con granulometria inferiore a 20 mm, al fine di verificarne l'idoneità ad essere inserita in sito, ad essere costipata e sottoposta ai carichi dovuti al traffico dei mezzi da costruzione.

La prova è descritta nella norma **UNI EN 13286-46 (2003): Metodi di prova per la determinazione della costipabilità mediante MCV**; il principio è mettere in relazione la densità di un provino di miscela con il suo contenuto d'acqua. L'umidità viene calcolata attraverso un'espressione che tiene conto delle modalità di prova, vale a dire del numero di colpi da sottoporre al provino per poter ottenere una penetrazione prestabilita.

Questa prova è stata inserita tra i controlli in sito in quanto è appropriata la sua realizzazione su provini di miscela prelevati direttamente in cantiere e non realizzati preventivamente in laboratorio.

- *Controllo e correzione dell'umidità*

La miscela deve essere costipata all'umidità ottima di progetto, per questo si deve verificare l'effettiva umidità dopo la completa idratazione della calce viva. Se l'umidità è in difetto è necessario aggiungere acqua con l'autobotte fino a raggiungere l'umidità ottima.

La determinazione dell'umidità della miscela è eseguita attraverso le stesse tecniche descritte in precedenza per il contenuto d'acqua del terreno non trattato.

- *Controllo della reazione chimica*

La qualità, l'omogeneità della reazione e il controllo della profondità su cui si è intervenuti possono essere determinati attraverso alcuni test che sfruttano gli effetti causati dalla reazione chimica che nasce durante la miscelazione del terreno con acqua e calce.

Il controllo dell'omogeneità della miscela a livello superficiale si esegue attraverso sistemi che utilizzano la tecnologia ad infrarossi. La reazione chimica che nasce istantaneamente a causa della miscelazione è infatti esotermica e sviluppa calore, producendo quindi un aumento temporaneo della temperatura della miscela.

Strumenti come termocamere ad infrarossi o *Pave-Ir System* producono un'analisi termica di tutta la superficie trattata e consentono la determinazione di eventuali zone di discontinuità termica che sono sintomo di probabili problemi legati alla miscelazione, come ad esempio erronei quantitativi di acqua o di calce inseriti. Il loro utilizzo in ambito stradale si è sviluppato nel campo degli strati bituminosi e solo successivamente è stato inserito tra le procedure di controllo della stabilizzazione di terreni con leganti.

Il sistema *Pave-Ir* usa due barre, nelle quali sono allocati sensori ad infrarosso, di rilevazione direttamente attaccate ai mezzi operatori (Fig. 4.8).

Lo strumento utilizza un *master cable* che collega direttamente la temperatura rilevata dalla barra con con la *master control cable*.



Fig.4.8 – Sistema di attacco Pave-Ir.

Il software del *Pave-Ir* raccoglie dati di una scannerizzazione trasversale della pavimentazione, solitamente ogni 0,05 m. Nel processo di post produzione il sistema raggruppa tutti i dati in un grafico (Fig. 4.9).

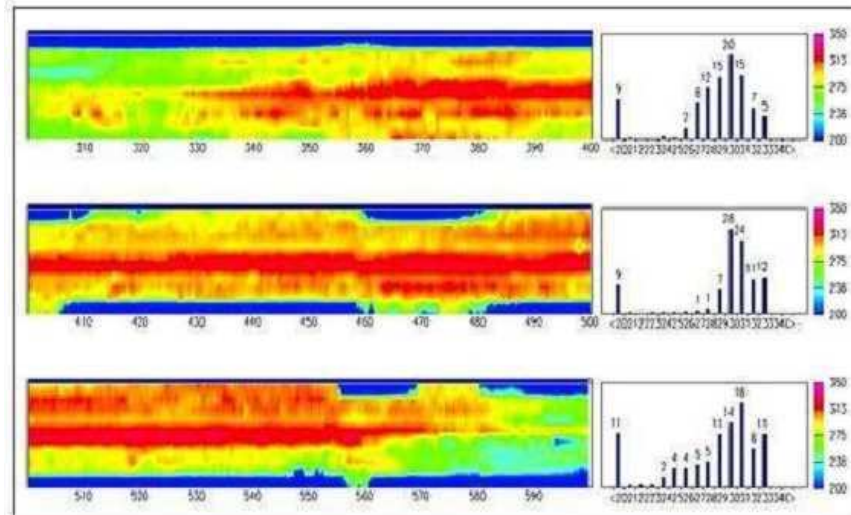


Fig. 4.9 – Output del sensore all'infrarosso.

L'analisi all'infrarosso mediante termocamera porta alla valutazione dei medesimi risultati visti per il sistema Pave-Ir. Questo argomento non viene trattato in questo capitolo in quanto è il tema relativo alla sperimentazione di ricerca svolta e sarà affrontato nel prossimo capitolo.

4.1.6 Costipamento e regolarizzazione dello strato trattato

Subito dopo il termine delle operazioni di miscelazione e controllo della miscela ottenuta lo strato trattato deve essere costipato e livellato.

In genere è buona norma effettuare un costipamento iniziale con rulli vibranti per addensare la parte più profonda dello strato, quindi livellare la superficie per facilitare le operazioni successive e infine concludere il costipamento per distribuire l'addensamento in tutto lo spessore.

Per l'operazione di regolarizzazione superficiale si utilizza un *motorgrader* (Fig. 4.10).



Fig. 4.10 – Motorgrader per la livellazione superficiale dello strato trattato.

Lo strato di terra e calce prodotto deve essere compattato il prima possibile dopo la miscelazione, al fine di raggiungere il grado di addensamento richiesto e stabilito in laboratorio attraverso la prova Proctor con compattazione AASHTO Modificata nella fase di studio della miscela. Si dovrà quindi confrontare il valore della densità in sito con il valore γ_{max} ottenuto in laboratorio.

4.1.6.1 La compattazione tradizionale [14]

Per il costipamento dei terreni in sito possono essere impiegate attrezzature diverse in relazione alle caratteristiche del tipo di terreno e all'energia richiesta per il costipamento.

Le tecniche impiegate possono trasmettere al terreno azioni meccaniche di tipo statico, di compressione e di taglio, o di tipo dinamico, di urto o vibrazione. In base al prevalere di uno dei due tipi di azioni le attrezzature per il costipamento si suddividono in due classi costituite rispettivamente dai mezzi prevalentemente statici e prevalentemente dinamici.

In particolare, per il costipamento dei terreni a grana fine risultano efficaci solo le attrezzature della prima classe, mentre per il costipamento dei terreni granulari sono efficaci soprattutto quelle della seconda.

Per i materiali a grana fine e per i materiali a grana grossa con percentuale elevata di fine la scelta della tecnica da utilizzare è legata al valore del contenuto d'acqua; per i

materiali a grana grossa la compattazione è invece poco condizionata dal contenuto d'acqua.

I mezzi utilizzati nella compattazione tradizionale si suddividono in:

- *Rulli statici*

I rulli con tamburi statici (Fig. 4.11) utilizzano il peso effettivo del macchinario per fare pressione sulla superficie. Così, le particelle del suolo vengono pressate insieme e il vuoto tra di esse viene ridotto. La loro azione è limitata alla parte più superficiale del terreno, hanno un peso generalmente compreso tra (2÷20)t e trasmettono pressioni dell'ordine di (30÷100) kg/cm su una striscia di un centimetro di generatrice. Tuttavia, solo strati sottili possono essere compattati in un tempo ragionevole. Non a caso, tutti i compattatori a rullo liscio, al giorno d'oggi sono utilizzati solo ed esclusivamente per il costipamento di quelli che sono gli strati di usura o binder del manto bituminoso stradale e per lavorare giunti e raccordi.

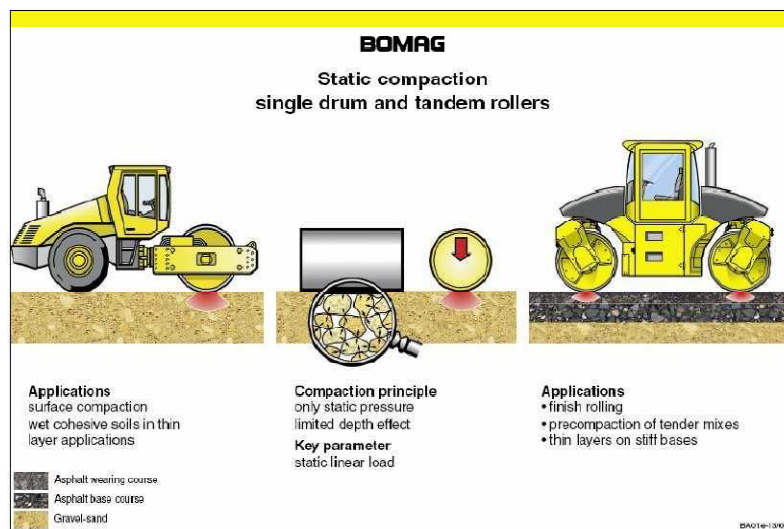


Fig. 4.11 – Rulli statici a tamburo singolo o tandem.

I terreni a grana fine possono essere compattati con rulli statici a punte (Fig. 4.12) i quali sono dotati di protrusioni di varia forma (es. rulli *a piè di pecora*) o di segmenti mobili che esercitano nel terreno un'azione di punzonamento e di taglio. La bassa permeabilità dei terreni a grana fine riduce significativamente l'efficacia della compattazione. Tuttavia, il passaggio di un rullo statico a piede di pecora "impasta" il

terreno in prossimità della superficie con conseguente riduzione rispettivamente dell'indice dei vuoti e delle pressioni dovute all'acqua.



Fig. 4.12 – Rulli statici a piede di pecora.

I rulli statici possono essere anche gommati (Fig. 4.13), costituiti da un cassone trasportato da un certo numero di ruote gommate; compattano sia con azione di compressione che di taglio per mezzo degli pneumatici.



Fig. 4.13 – Rullo gommato.

- *Rulli dinamici*

I rulli dinamici (Fig. 4.14) fanno uso di un meccanismo oscillante o vibrante, che consiste in una o più masse eccentriche rotanti. Durante la compattazione dinamica, viene utilizzata una combinazione di carico dinamico e statico. Il tamburo eccitato dinamicamente offre una rapida successione di impatti con la superficie sottostante in

cui le particelle sono sottoposte ad onde di compressione e di taglio. Queste vibrazioni eliminano periodicamente l'attrito interno tra particelle e facilitano, in combinazione con il carico statico, la sistemazione delle particelle in posizioni che comportano un indice dei vuoti inferiore e una maggiore densità. Inoltre, l'aumento del numero di punti di contatto tra i grani comporta una maggiore stabilità e rigidità, oltre a una maggiore profondità compattata.

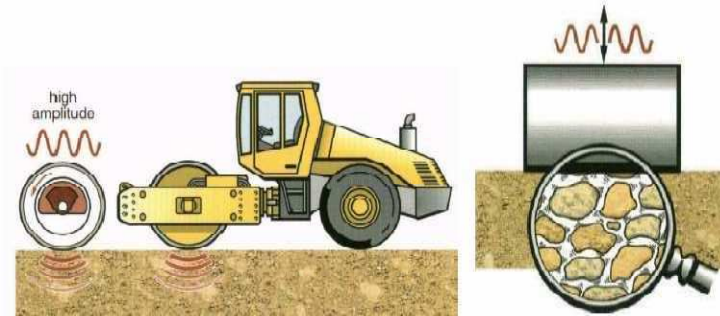


Fig. 4.14 – Rullo dinamico.

I rulli dinamici si distinguono in:

- *Rulli vibranti*: il tamburo di un rullo vibrante è eccitato da una massa rotante che è collegata all'albero dell'asse del tamburo. La massa di rotazione mette in movimento il tamburo e la direzione della forza risultante è legata alla posizione della massa eccentrica. La compattazione è conseguita soprattutto dalla serie di onde di compressione che penetrano nel terreno in combinazione con il peso effettivo statico del tamburo. La forza risultante di compattazione è quasi verticale. Il comportamento di un rullo dotato di tamburo vibrante cambia a seconda della risposta del suolo. Numerose indagini hanno rivelato che il tamburo di un rullo vibrante opera in condizioni diverse a seconda dei parametri del rullo e del suolo. Possono verificarsi cinque condizioni di funzionamento (Tab. 4.2).

<i>Moto</i>	<i>Interazione tamburo-suolo</i>	<i>Cicli</i>	<i>Condizioni di funzionamento</i>	<i>Applicazione CCC</i>	<i>Rigidità del terreno</i>
Periodico	Contatto	1	Contatto continuo	Si	Bassa  Alta
Caotico	Perdita parziale di contatto	1	Sollevamento parziale	Si	
		2 (4)	Double jump	Si	
		2 (4)	Rocking motion	No	
		-	Chaotic motion	No	

Tab 4.2 – Condizioni di funzionamento di un rullo vibrante.

- *Rulli oscillanti*: Il tamburo di un rullo oscillante genera un movimento di torsione causato da due masse opposte, rotanti eccentriche, i cui alberi sono disposti eccentricamente rispetto all'asse del tamburo. Quindi, il suolo è scosso orizzontalmente in aggiunta al carico verticale del tamburo stesso e del telaio del rullo. Queste forze orizzontali cicliche generano nel suolo deformazioni a taglio. In questo caso, la compattazione è realizzata principalmente tramite la propagazione di onde trasversali attraverso il materiale. I rulli oscillanti sono utilizzati principalmente per la compattazione di terreni coesivi e in prossimità di strutture sensibili, perché le vibrazioni sono generalmente inferiori a quelle dei rulli vibranti.

4.1.6.2 La Compattazione intelligente

Il metodo della compattazione intelligente si basa su un sistema di regolazione che utilizza le informazioni misurate per adeguare in modo continuo le prestazioni dell'apparecchiatura alle condizioni richieste nel caso in cui le condizioni in sito possano portare a una compattazione non omogenea se eseguita con parametri costanti. Questo sistema controlla i parametri di compattazione del rullo: ampiezza, frequenza e velocità di lavoro. Le misurazioni del modulo vengono effettuate dal rullo stesso. Il sistema regola automaticamente le impostazioni del rullo per ottenere il modulo di destinazione, qualora le letture non fossero contenute nell'intervallo di tolleranza. Per i rulli vibranti, elevate ampiezze e basse frequenze sono utilizzate per compattare terreni cedevoli e per raggiungere le zone più profonde, mentre basse ampiezze e alte frequenze vengono utilizzate per la costipazione di terreni rigidi (Fig. 4.15 e Fig. 4.16).

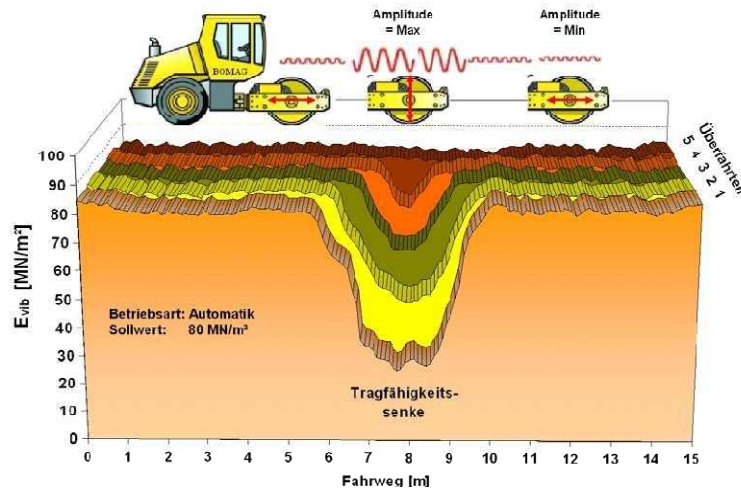


Fig. 4.15 - Variazione dell'ampiezza e della vibrazione per ottimizzare la compattazione.

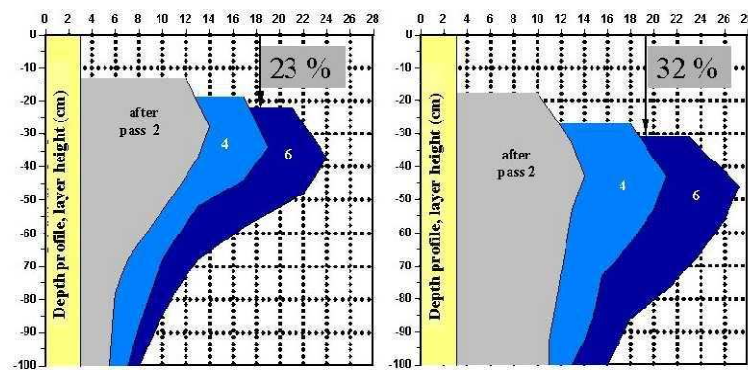


Fig. 4.16 - Profondità di influenza del processo di compattazione (rullo convenzionale Bomag; rullo Variocontrol Bomag).

Sulla base dei risultati relativi al funzionamento dei diversi rulli dinamici, Bomag ha sviluppato il primo rullo a controllo automatico: il rullo *Variocontrol* (Fig. 4.17). In questo rullo, la direzione della vibrazione può essere variata automaticamente da verticale a orizzontale utilizzando criteri di controllo definiti che consentono un processo di compattazione ottimizzato (compattazione intelligente) e quindi altamente uniforme.

I criteri sono:

- *Criterio operativo*: se il tamburo passa alla condizione di funzionamento denominata *double jump* il senso di eccitazione viene immediatamente modificato, in modo che il tamburo risale alla condizione di funzionamento di sollevamento parziale.
- *Criterio della forza*: se la massima forza di compattazione specificata viene raggiunta, il sistema di controllo automatico cambia la direzione di eccitazione

in modo che la forza applicata non superi il valore massimo. Due accelerometri, che sono montati sui cuscinetti del tamburo, misurano e registrano continuamente l'accelerazione del tamburo.

La forza di contatto del suolo, l'energia fornita al terreno, e gli spostamenti sono calcolati da un'unità di processo, che tiene in considerazione tutti i parametri del rullo (masse, forza eccitante e frequenza). I dati vengono trasmessi a un sistema integrato, che gestisce i parametri in automatico .

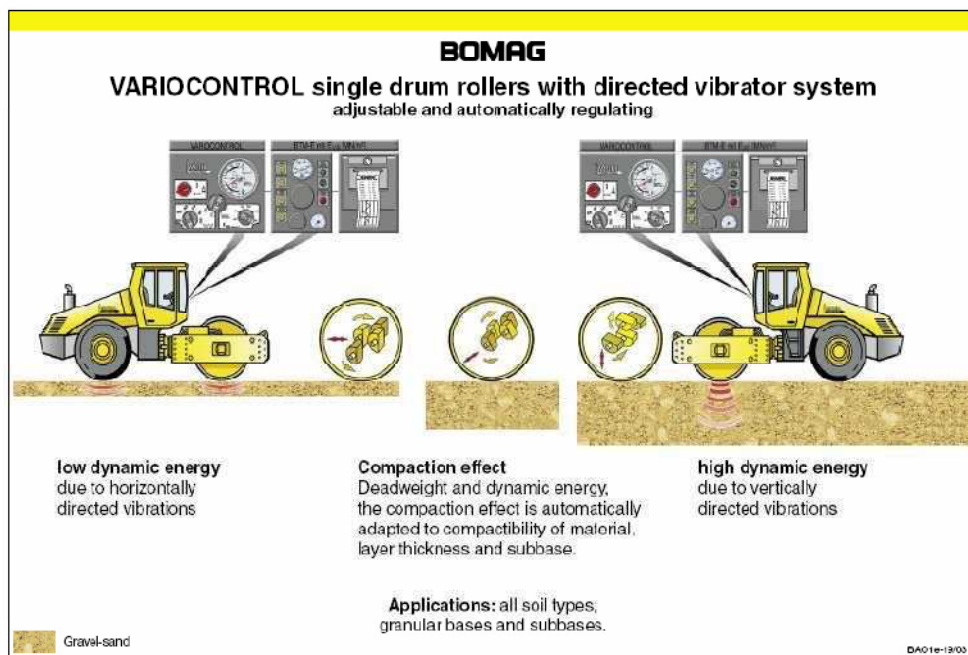


Fig. 4.17 – Rullo Variocontrol, Bomag.

E' importante considerare che all'aumentare dell'energia, la profondità di indagine cioè la profondità nel terreno fino a dove agiscono le vibrazioni, tende a variare ed aumenta all'accrescere dell'energia stessa. Per cui in direzione orizzontale si ha una bassa profondità di indagine, mentre più ampia in quella verticale.

Il controllo continuo della compattazione (*CCC System*) è strettamente basato sulla misura dell'interazione dinamica tra il rullo e il terreno, per cui è logico che il movimento che caratterizza il tamburo del rullo cambi a seconda della risposta del terreno e ciò è utilizzato per determinare la rigidità del terreno.

Generalmente la posizione del rullo viene determinata con l'ausilio di un sistema GPS. I dati di tutta l'area interessata vengono resi immediatamente disponibili durante il processo di compattazione.

Rispetto alle tradizionali tecniche di compattazione, la compattazione intelligente presenta i seguenti vantaggi:

- Maggiore efficienza e produttività massimizzata grazie al controllo automatico di ampiezza, frequenza e velocità.
- Riduzione al minimo delle passate.
- Elevata adattabilità (strati più o meno spessi, piano di posa più o meno rigido).
- Ampia gamma di applicazione.
- Risultati ottimali di compattazione, per un prodotto di migliore qualità.
- Compattazione più uniforme.
- Presenza minore di aggregati frantumati.
- Migliore planarità.
- Completa copertura della compattazione della superficie.
- Misurazione dinamica della rigidità del suolo.
- Assenza del pericolo di sovra-compattazione.
- Controllo della compattazione durante i lavori.
- Facilità operativa.
- Possibilità di salvaguardia dei macchinari minimizzando le condizioni di double jump.

La compattazione intelligente, tuttavia, porta con sé alcuni svantaggi, di seguito elencati:

- Richiede apparecchiature molto sofisticate da utilizzarsi in un ambiente di per sé grezzo e rudimentale.
- Richiede operatori con una certa esperienza.
- È nel breve termine più costosa della compattazione tradizionale.

Questo nuovo sistema di compattazione assicura valutazioni istantanee e complete della zona che si sta compattando e permette correzioni altrettanto rapide.

Il sistema con rullo Variocontrol può essere applicato nel caso specifico di trattamento a calce di terreni argillosi (Fig. 4.18) mantenendo tutte le sue prerogative e i vantaggi che ne derivano. Esso è descritto nel dettaglio nella scheda tecnica relativa alla compattazione intelligente.



Fig. 4.18 – Compattazione con rullo Variocontrol di un terreno trattato a calce.

4.1.7 Controlli sullo strato trattato

I paragrafi successivi trattano le metodologie per effettuare i controlli sullo strato realizzato. Tali controlli sono eseguiti in due momenti distinti: immediatamente dopo il costipamento dello strato e dopo 7 giorni di maturazione.

I controlli immediati servono per valutare la densità in sito e lo spessore finale ottenuti grazie alla compattazione; se si è in possesso, per mezzo di prove di laboratorio, di parametri di portanza immediata (indice di portanza *IPD*), si possono eseguire anche valutazioni sulla portanza con metodologie che forniscono parametri correlabili all'indice *CBR*.

Le valutazioni sulla portanza con metodi che forniscono i moduli statici e dinamici o altri che determinano l'indice di portanza *CBR*, vanno eseguite dopo una maturazione dello strato di 7 giorni, in quanto i Capitolati Prestazionali contengono solitamente i limiti relativi a questi parametri a 7 giorni dalla realizzazione dello strato.

4.1.8 Controlli della densità in sito e dello spessore

Al termine della procedura di compattazione oltre ai controlli sulla portanza vanno eseguite verifiche sullo spessore dello strato realizzato e sulla densità ottenuta in sito.

Lo spessore ottenuto al termine delle operazioni deve rispettare il valore previsto da progetto per lo strato trattato a calce, la densità invece deve essere pari al 100% del

valore massimo ricavato in laboratorio tramite prove di compattazione su campioni cilindrici di miscela con attrezzatura Proctor.

Capitolati Prestazionali o normative nazionali specifiche possono prevedere l'ottenimento in sito di percentuali minori della densità massima di laboratorio.

Esistono diverse procedure e strumentazioni utili a queste valutazioni, tra cui alcune classiche e altre innovative.

- *Spessore attraverso reazione ad agente chimico*

La verifica dell'avvenuta reazione e il controllo dello spessore dello strato trattato si effettua con l'utilizzo di un agente chimico. La prova consiste nello scavare una piccola trincea larga almeno 30 cm per tutto lo strato interessato, le pareti dello scavo saranno immediatamente impregnate con una soluzione chimica indicatrice di fenoftaleina ed alcool che reagisce con la basicità del terreno. Se si è eseguita una corretta stabilizzazione si noterà che il reagente avrà un viraggio tendente al viola per tutto lo spessore della miscela.

- *Densità in sito con volumometro a sabbia*

La densità in sito viene valutata tradizionalmente attraverso la prova descritta nel **CNR B.U. 22/72** che prevede l'utilizzo di un volumometro a sabbia (Fig. 4.19).



Fig. 4.19 – Volumometro a sabbia.

Il procedimento prevede la realizzazione di uno scavo circolare nello strato trattato con spessore di dimensioni simili al diametro e il suo successivo riempimento con la sabbia, di caratteristiche volumetriche note, inserita nello strumento.

Grazie a questa semplice prova è possibile ottenere i valori di densità umida, densità secca e contenuto d'acqua presenti nello strato esaminato per semplici pesate del materiale asportato e lettura sul volumometro del volume di sabbia inserita per riempire lo scavo.

- *Electrical Density Gauge*

Un sistema non distruttivo che porta alla valutazione della densità in sito di un terreno o una miscela di terra e calce è quello denominato *Electrical Density Gauge*.

Si tratta di uno strumento che grazie a 4 sonde inserite nello strato esaminato registra il valore dell'impedenza elettrica e per mezzo del software contenuto nell'unità di controllo fornisce le relazioni tra questa e densità, umidità e grado di compattazione della miscela (Fig 4.20).

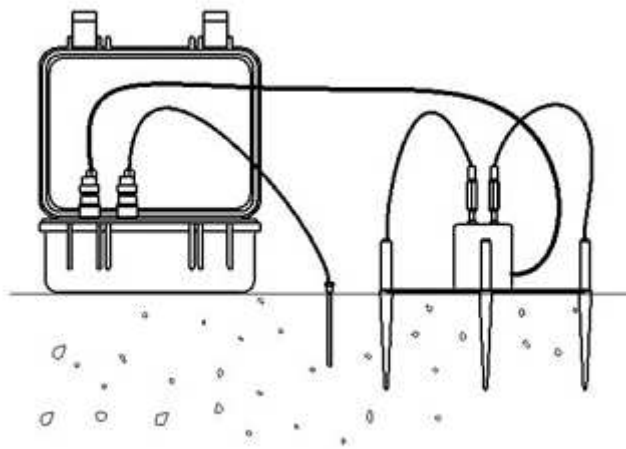


Fig. 4.20 – Schema di funzionamento del *EDG*.

Questo strumento è stato recentemente inserito nella normativa *ASTM* come apparecchiatura di riferimento per il *Complex Impedance Method* per la determinazione della densità in sito dei terreni; la specifica tecnica è la *ASTM D7698-11: In-Place Estimation of Density and Water Content of Soil and Aggregate by Correlation with Complex Impedance Method*.

- *Ground Penetrating Radar*

Un altro sistema innovativo è il *Ground Penetrating Radar (GPR)*, che consente la valutazione sia della densità in sito che dello spessore dello strato esaminato.

L'uso di questo strumento è normato dalla *ASTM D4748-10: Standard Test Method for Determining the Thickness of Bound Pavement Layers Using Short-Pulse Radar*.

Il *GPR* lavora servendosi di corti impulsi elettromagnetici generati da un'antenna, che li trasmette alla pavimentazione da analizzare, e riceve gli impulsi riflessi come mostrato in Fig. 4.21.

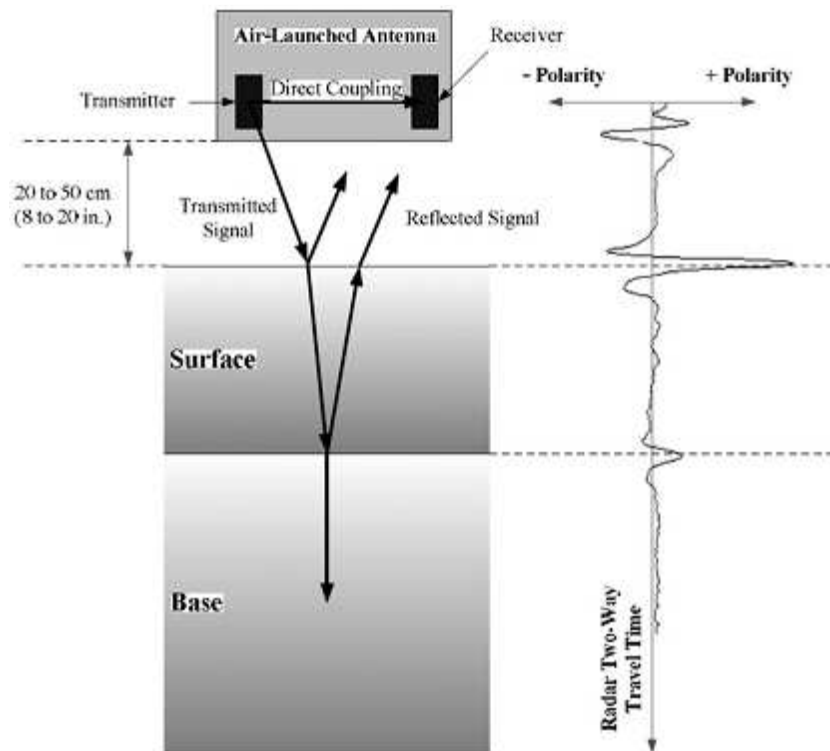


Fig. 4.21 – Schema di funzionamento del *GPR*.

Le antenne possono essere disposte in aria (*Air-Launched Antenna*) o a terra (*Ground Coupled Antenna*).

La densità insieme al valore della percentuale di vuoti presenti nello strato possono essere ricavate in automatico dallo strumento, mentre lo spessore viene dedotto dalla formula:

$$T = \frac{\Delta t \times c}{2\sqrt{\epsilon_r}} \quad [\text{mm}]$$

- T = Spessore dello strato di miscela terra-calce [mm].

- Δt = tempo di andata/ritorno del segnale radio lungo lo strato scansionato [sec].
- c = velocità della luce in aria = 300 mm/sec.
- ϵ_r = costante dielettrica relativa dello strato scansionato.

4.1.9 Controllo della portanza

Il controllo della portanza in sito in corrispondenza di sottofondi, piani di posa e fondazioni è di fondamentale importanza per poter garantire in opera le sufficienti caratteristiche di resistenza meccanica e stabilità del terreno nei confronti dei carichi che lo interesseranno, siano essi stradali, ferroviari od aeroportuali. Nello schema di Fig. 4.22 sono riportati i punti di controllo più comunemente adottati nei casi stradale e ferroviario.

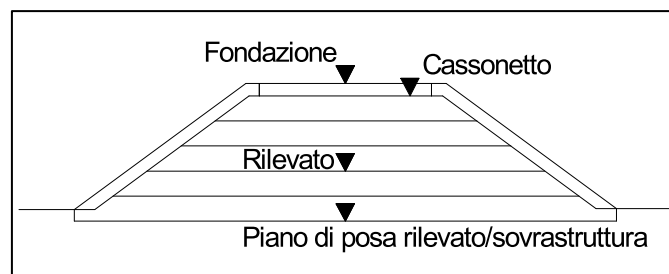


Fig. 4.22 – Punti di controllo della portanza più comuni.

Si definisce *portanza* o *capacità portante* di un terreno il carico specifico, ricavabile con una precisa metodologia di prova, che provoca un prestabilito cedimento nel terreno indagato; da questa definizione è facile dedurre che le modalità per la determinazione della portanza non sono univocamente fissate, per cui è possibile far ricorso a diversi tipi di test.

Le normative o i Capitolati Prestazionali forniscono indicazioni sui valori di portanza minimi da rispettare che si riferiscono ai principali parametri meccanici valutabili in sito: moduli di deformazione (statico e dinamico) e indici di portanza (solitamente *CBR*). Le varie prove descritte di seguito portano dunque alla valutazione di questi parametri o a parametri la cui correlazione con essi è semplice o fornita da norme.

4.1.9.1 Controlli tradizionali per la valutazione della portanza [15]

In Italia, la portanza in sito è tradizionalmente valutata per mezzo della *Prova di carico statica su piastra (PLT)*; la metodologia relativa è specificata nella norma *CNR B.U.*

n°146/92: Determinazione dei moduli di deformazione M_d e M_d' mediante prova di carico a doppio ciclo con piastra circolare.

Da alcuni anni, in affiancamento alla tradizionale *PLT*, ha preso piede l'utilizzo del *Falling Weight Deflectometer (FWD)* applicato sia ai punti di cui in figura 1, sia sul piano viabile finito.

Tutte le metodologie che prevedono il caricamento di una piastra per ottenere cedimenti si basano sulla teoria della elasticità dell'ammasso terroso proposta da Boussinesq nel 1885. Tale teoria studia il modo in cui le tensioni indotte dai carichi applicati si distribuiscono nel terreno e consente, sulla base delle caratteristiche del terreno stesso, di calcolare i cedimenti del piano di carico conseguenti. Sono ipotizzate continuità, elasticità, omogeneità ed isotropia del mezzo caricato.

L'espressione generale del cedimento lungo la verticale passante per il centro di un area circolare soggetta ad un carico uniformemente ripartito q per mezzo di una piastra è la seguente:

$$s = q2r \frac{1 - \nu^2}{E} I \quad [\text{mm}]$$

dove:

- s = cedimento [mm].
- r = raggio della piastra di carico [mm].
- ν = coefficiente di Poisson.
- E = modulo di Young [MPa].
- I = coefficiente di forma adimensionale, dipendente dalle dimensioni e dalla rigidità della piastra, nonché dal rapporto tra profondità e larghezza dell'area caricata.

L'andamento dei cedimenti è variabile lungo le direzioni radiali, ed in particolare sul contorno della piastra vale $2/\pi$ rispetto a quello del centro.

Per una piastra rigida, invece, adottando il valore di I proposto da A.W. Skempton pari a $\pi/4$, si verifica un cedimento uniforme del piano di posa sotto la piastra pari a:

$$s = 1,57qr \frac{1 - \nu^2}{E} \quad [\text{mm}]$$

Le espressioni viste sono impiegate, in modo più o meno esplicito, in tutti i metodi di misura in sito della portanza in base alle specifiche modalità di carico previste. Se

invertite esse forniscono, a partire dai cedimenti misurati, il valore del modulo elastico del piano investigato per la specifica pressione q applicata.

Alcuni metodi di prova restituiscono, anziché un modulo elastico di Young, il corrispondente modulo di deformazione, calcolabile dal primo sulla base del coefficiente di Poisson ν secondo la relazione:

$$M_d = \frac{E}{1 - \nu^2} \quad [\text{Mpa}]$$

dove:

- M_d = modulo di deformazione [Mpa].
- ν = coefficiente di Poisson.
- E = modulo di Young [Mpa].

Sulla base di quanto descritto sopra, è opportuno riportare la formulazione impiegata nel calcolo del modulo di deformazione M_d per mezzo della *PLT*. In tale caso pressioni e cedimenti sono espressi in termini di variazioni Δq e Δs , in quanto, a differenza di altre metodologie, l' M_d calcolato è quello tangenziale e non quello secante.

$$M_d = \frac{\Delta q}{\Delta s} D \quad [\text{Mpa}]$$

dove:

- D = diametro della piastra [mm].
- Δq = incremento della pressione trasmessa alla piastra [Mpa].
- Δs = corrispondente incremento di cedimento della superficie caricata [mm].

- *Prova di carico statica su piastra*

La *PLT* viene in genere eseguita con doppio ciclo di carico al fine di determinare, con il primo ciclo, il modulo M_d convenzionalmente indicativo della portanza e con il secondo ciclo, il modulo M_d' che consente anche di valutare indirettamente (mediante il rapporto M_d/M_d') il grado di costipamento dello strato in esame. In Fig. 4.23 è riportato lo schema comunemente adottato per la *PLT*.

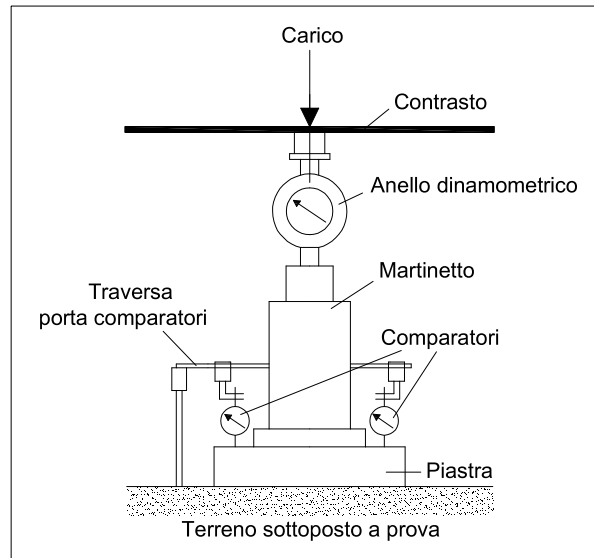


Fig. 4.23 – PLT: set di prova.

Nonostante la notevole diffusione di tale procedura di prova, legata anche alla sua affidabilità esecutiva, essa soffre inevitabilmente di alcuni svantaggi che, talvolta, ne compromettono la bontà e funzionalità sperimentale.

In primo luogo, trattasi di una applicazione statica di carichi al piano indagato, il che non riproduce compiutamente le reali modalità con le quali i carichi di traffico interessano le sovrastrutture prima ed i sottofondi poi. In secondo luogo, si tratta di una prova assai lenta a causa della grande precisione richiesta nel posizionamento della piastra e nelle modalità d'esecuzione previste dalla normativa secondo le quali, prima di applicare un nuovo intervallo di carico, è necessario attendere sempre che i comparatori si siano assestati su un valore costante del cedimento. Nell'arco di una campagna di indagine giornaliera, pertanto, è possibile eseguire un numero limitato di prove e ciò comporta anche l'impossibilità, spesso anche economica, di predisporre una elevata densità di punti di prova. Infine, la prova richiede l'impiego di un contrasto per l'applicazione del carico quale, in genere, un mezzo di cantiere che in tale modo non risulta più disponibile per altre lavorazioni. La necessità di un contrasto fa anche sì che la prova non sia sempre praticabile in siti di difficile accessibilità.

Queste limitazioni della metodologia tradizionale hanno incoraggiato lo sviluppo di nuovi strumenti in grado di valutare, con maggior rapidità e funzionalità, la portanza ed il grado d'addensamento dei materiali posati e tali da poter essere utilizzati con successo come dispositivi di verifica e controllo immediato delle lavorazioni in sito.

Tra queste è ormai entrato a far parte dell'uso comune il *Falling Weight Deflectometer (FWD)*.

- *Prova di portanza con FWD*

Il principio di funzionamento del *FWD* è il seguente: una massa nota impatta più volte una piastra di carico posizionata sul piano in esame; pressioni e cedimenti sono registrati ad ogni colpo.

La prova realizzata impiegando questo strumento prende il nome di *prova di carico dinamica su piastra*: a differenza della prova statica, infatti, il carico assume la forma di un colpo smorzato, determinando l'insorgere di forze d'inerzia nel suolo e nello strumento. La descrizione dettagliata del procedimento di prova è rimandata alla specifica scheda tecnica.

L'apparecchiatura del *FWD* non è trasportabile a mano e va montata su un carrello ad asse unico (Fig. 4.24).



Fig. 4.24 – Falling Weight Deflectometer.

I risultati della prova vengono forniti direttamente dall'unità di acquisizione dei dati tramite display e stampante.

Dopo l'ultimo impatto (sono previsti 3 colpi di prearico e altri tre per il completamento della prova) il display fornisce direttamente i valori del modulo di deformazione dinamico E_{vd} , dei cedimenti s e delle velocità v misurate per ciascun colpo ed i rispettivi valori medi. La stampante è in grado di restituire, oltre ai valori dei parametri

citati, anche l'andamento delle tre curve *cedimenti – tempo* registrate nell'intervallo di alcuni millisecondi a partire dall'istante dell'impatto di ciascun colpo (Fig. 4.25).

Nel grafico è individuato il cedimento massimo s_{max} , che si rileva in corrispondenza del punto di minimo relativo della curva; in base ad esso, assunto in valore assoluto, il dispositivo calcola il modulo di deformazione dinamica E_{vd} quale parametro indicativo della deformabilità del terreno sotto l'impulso di un carico verticale definito, secondo le formulazioni viste in precedenza:

$$E_{vd} = 1,5r \left(\frac{\sigma_{max}}{s_{max}} \right) \quad [\text{Mpa}]$$

dove r è il raggio della piastra di carico (espresso in mm).

Tale formula fa riferimento alla Teoria dell'elasticità di Boussinesq discussa in precedenza, tenendo conto del fatto che modulo elastico e modulo di deformazione sono legati da una espressione quadratica del coefficiente di Poisson.

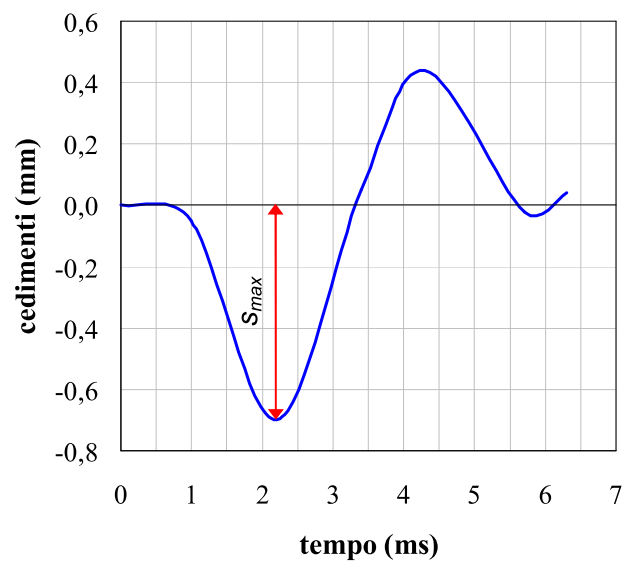


Fig. 4.25 – Esempio di curva di deflessione per deflettometri.

4.1.9.2 Controlli innovativi per la valutazione della portanza

Negli ultimi anni si sono sviluppate apparecchiature utili a valutazioni rapide della portanza di un terreno, che valutano parametri meccanici riferibili all'indice di portanza *CBR* e non ai moduli di deformazione come visto nei metodi tradizionali.

I parametri valutati sono quindi confrontabili con i valori degli indici di portanza *IPI* e *CBR* valutati in laboratorio o con quelli richiesti dai Capitolati Prestazionali.

Le prove, descritte nelle specifiche schede tecniche, riguardano tre particolari metodologie di valutazione di parametri meccanici:

- *Clegg Impact Soil Tester*.
- *Dynamic Cone Penetrometer (DCP)*.
- *CBR dinamico*.

- *Clegg Impact Soil Tester*

Il *Clegg Impact Soil Tester* è uno strumento sviluppato per monitorare e controllare in sito la qualità del terreno non confinato.

Esistono tre tipologie di questo strumento: un martello da 4.5 kg, un martello da 2.25 kg ed infine la versione più leggera che usa un martello da 0.5 kg. Lo strumento è composto semplicemente da un martello compattatore che opera attaccato ad un tubo guida, come mostrato in Fig. 4.26.



Fig. 4.26 – Clegg Impact Soil Tester.

Il martello viene lasciato cadere dalla sua posizione di blocco in cima alla guida metallica e al momento dell’impatto con il terreno lo strumento raccoglie i dati relativi alla rigidità del suolo in base alla decelerazione subita a contatto dal martello.

Questi valori sono recepiti da un accelerometro di precisione montato sul martello e mandati in output come Indice di Impatto (*IV* o *CIV*).

Una raccomandazione per ottenere un affidabile indice di impatto è quella di eseguire la prova sulla singola locazione cinque volte: la prima e la seconda volata prendono le irregolarità del terreno, mentre le tre successive sono quelle che danno consistenza al risultato finale.

La Fig. 4.27 mostra la tabella riassuntiva dei dati ottenuti così come viene fornita dallo strumento.

Clegg Impact Soil Tester stored data				Retrieved: 8/15/2005						
Site #	Layer #	Trial #	Time	Day	GPS	Recorded CIV	Target CIV	Recorded volumetric Moisture	Nominal volumetric Moisture	Soil Type
1	1	1	11:20	8/15/2005	N/A	14.1	12	11%	8%	GTI SOIL A
1	1	2	11:21	8/15/2005	N/A	7.5	12	11%	8%	GTI SOIL A
1	2	1	11:21	8/15/2005	N/A	13.7	12	11%	8%	GTI SOIL A

Fig. 4.27 – Esempio di output grafico fornito dallo strumento.

L’indice di impatto ha una correlazione con l’indice *CBR* secondo la relazione:

$$CBR = (0,24 \times IV + 1)^2$$

- *CBR dinamico*

Il *CBR* dinamico è usato per una valutazione alternativa della portanza in sito per mezzo di una prova di punzonamento.

L’indice *CBR* dinamico (*CBR_d*) è un coefficiente di portanza che dipende dalla forma e dalle dimensioni delle particelle presenti nel terreno, dalla percentuale di materiale fine e dall’umidità. La presenza di clasti sotto la superficie di punzonamento può falsare significativamente la prova.

L’attrezzatura di prova è riportata nella Fig. 4.28.

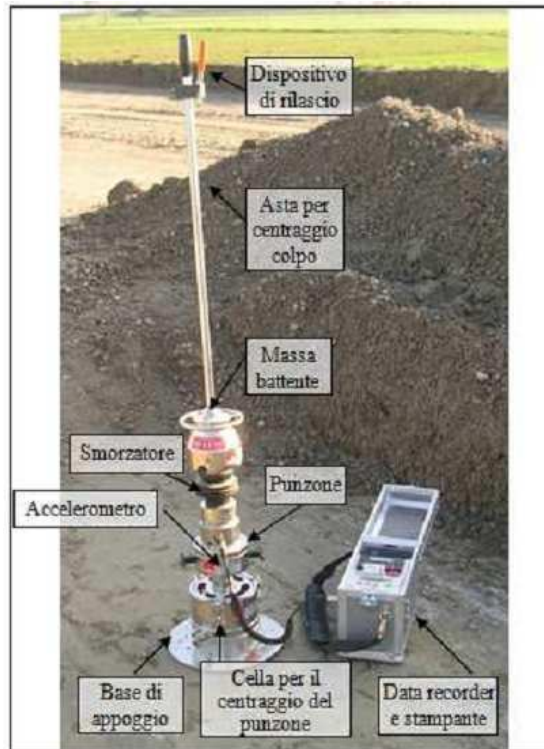


Fig. 4.28 – *CBR* dinamico: attrezzatura di prova.

L'operatore esegue la prova rilasciando la massa battente una sola volta e prestando attenzione a recuperarla dopo l'impatto-rimbalzo, onde evitare che essa ricada sullo smorzatore e invalidi la prova.

Dopo l'impatto sul display viene visualizzato il cedimento s , il valore dell'indice *CBR* dinamico espresso in percentuale ed il rapporto s/v corrispondente; questi dati, assieme alle informazioni complete sulla prova (diametro della piastra di carico, peso della massa battente, data e orario), possono essere immediatamente stampati su carta (Fig. 4.29) oppure possono essere memorizzati su chip card, trasferiti su PC ed essere successivamente sottoposti ad analisi statistiche.

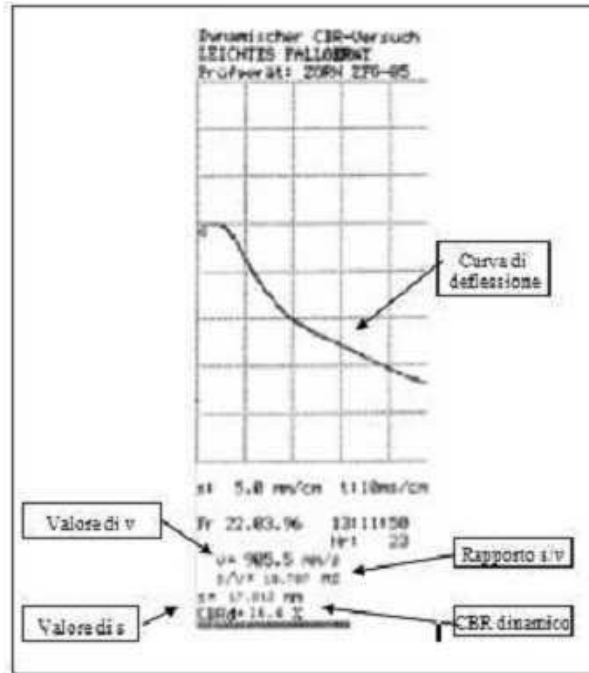


Fig. 4.29 – Output grafico della prova di CBR dinamico.

- *Dynamic Cone Penetrometer*

Il *Dynamic Cone Penetrometer (DCP)* è uno strumento molto semplice nonostante fornisca valori molto importanti per la valutazione delle caratteristiche meccaniche dell'opera. La prova che prevede l'uso di questo strumento in ambito stradale è stata ultimamente specificata attraverso la norma *ASTM D6951/D6951M-09 - Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement*.

Il *DCP* (Fig. 4.30) è costituito da due aste d'acciaio, un peso (martello da 8 kg o 4,6 kg), una piastra su cui batte il martello definita come incudine, una punta conica in acciaio inossidabile, una scala metrica ed un estrattore.



Fig. 4.30 – Dynamic Cone Penetrometer

Montato lo strumento e scelto il punto del manufatto su cui eseguire la prova si posiziona il *DCP* in posizione verticale e si affonda la punta finché il punto di zero in essa riportato non risulta a filo con il terreno.

Disposto così lo strumento l'operatore può sollevare il martello sino a farlo appoggiare, ma non sbattere, all'impugnatura consentendogli successivamente la volata fino all'impatto con l'incudine. Si legge quindi la penetrazione della punta attraverso una semplice lettura al metro. Questa semplice operazione di volata e lettura si ripete fino al raggiungimento della profondità voluta.

Il risultato della prova è l'*Indice DCP*, valutato sulla base della profondità totale ottenuta (mm) e del numero di colpi necessari e indicato come abbassamento per singolo colpo (mm/colpo).

La normativa di riferimento fornisce, sotto forma di tabelle, le informazioni necessarie per correlare l'*Indice DCP* con il numero di volate e con l'indice *CBR* (Fig 4.31).

DCP Index mm/blow ^A	CBR %	DCP Index mm/blow ^A	CBR %	DCP Index mm/blow ^A	CBR %
<3	100	39	4.8	69-71	2.5
3	80	40	4.7	72-74	2.4
4	60	41	4.6	75-77	2.3
5	50	42	4.4	78-80	2.2
6	40	43	4.3	81-83	2.1
7	35	44	4.2	84-87	2.0
8	30	45	4.1	88-91	1.9
9	25	46	4.0	92-96	1.8
10-11	20	47	3.9	97-101	1.7
12	18	48	3.8	102-107	1.6
13	16	49-50	3.7	108-114	1.5
14	15	51	3.6	115-121	1.4
15	14	52	3.5	122-130	1.3
16	13	53-54	3.4	131-140	1.2
17	12	55	3.3	141-152	1.1
18-19	11	56-57	3.2	153-166	1.0
20-21	10	58	3.1	166-183	0.9
22-23	9	59-60	3.0	184-205	0.8
24-26	8	61-62	2.9	206-233	0.7
27-29	7	63-64	2.8	234-271	0.6
30-34	6	65-66	2.7	272-324	0.5
35-38	5	67-68	2.6	>324	<0.5

Fig. 4.31 – Prova *DCP*: tabella per la correlazione dei risultati.

- *Light Falling Weight Deflectometer*

Non rientra nel campo appena descritto il *Light Falling Weight Deflectometer (LFWD)*, strumento che, allo stesso modo dei metodi tradizionali, porta alla valutazione dei moduli dinamici e che dal punto di vista teorico e di analisi di risultati rispecchia le nozioni descritte per il *FWD*.

In virtù delle dimensioni degli elementi di carico e dei dispositivi di acquisizione dati, il *LFWD* (Fig. 4.32) risulta agevolmente trasportabile da un singolo operatore e pertanto è spesso anche chiamato *Portable Falling Weight Deflectometer*.



Fig. 4.32 – *Light Falling Weight Deflectometer*.

Per questi motivi il *LFWD* risulta essere uno strumento innovativo per il calcolo della portanza in sito e negli ultimi anni il suo uso sta riscontrando un importante successo, rafforzato dalla ormai certezza di affidabilità dei dati rilevati, che lo ha portato ormai ad essere preso in considerazione al pari dei metodi classici.

Lo studio del *LFWD* è stato oggetto di attività di ricerca da parte del DICAM; si rimanda al paragrafo specifico la descrizione dello strumento e le conclusioni relative al suo uso a cui si è giunti.

4.1.10 Protezione e maturazione degli strati lavorati

Nel caso di strati di sovrastruttura che debbano rimanere esposti agli agenti atmosferici (insolazione e pioggia), o di passaggio di altre macchine operatrici per la costruzione degli strati superiori, è fondamentale la protezione superficiale dello strato trattato a calce per mantenere il corretto grado di umidità.

L'azione protettiva è costituita da una leggera spruzzata di acqua per mantenerne l'idratazione, a cui segue una passata con un rullo statico se necessario, oppure dalla stesura di un'emulsione bituminosa idrorepellente o, in alternativa, dalla combinazione dei due metodi.

La realizzazione degli strati superiori può essere considerata un altro tipo di protezione dello strato trattato.

Gli strati di sovrastruttura stabilizzati devono essere completati e manifestare le resistenze meccaniche di progetto prima dell'avvento del gelo; ciò significa lasciare un tempo sufficiente per il manifestarsi delle reazioni di indurimento.

In ogni caso, il trattamento a calce del terreno non dovrà essere effettuato in caso di pioggia, di temperature inferiori a 5°C, in presenza di vento forte e nel caso nel quale ci sia presenza di acqua o venute di acqua sul piano dove viene steso il terreno da trattare.

4.2 Schede tecniche relative a controlli e verifiche

4.2.1 Controllo dell'umidità in sito

PROVA DESCRITTA																	
UMIDITÀ IN SITO <u>UNI CEN ISO/TS 17892-1 (2005)</u>																	
OBIETTIVI E CONTENUTO																	
Metodo classico per determinare l'umidità in sito di un terreno o di una miscela di terra-calce.																	
RIFERIMENTI NORMATIVI																	
<i>prEN1997-1; prEN1997-2.</i>																	
APPARECCHIATURA																	
<ul style="list-style-type: none"> • Paletta. • Forno elettrico o a microonde portatile. • Bilancia con accuratezza di: <ul style="list-style-type: none"> ▪ ±0,03 g per provini di massa minore o pari a 200 g; ▪ ±0,3 g per provini di massa compresa tra 200 g e 1000 g; ▪ ±3 g per provini di massa maggiore a 1000 g. • Contenitore metallico con coperchio. 																	
PROCEDURA																	
<ul style="list-style-type: none"> • Preparazione e massa minima dei provini umidi <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td rowspan="7" style="width: 50%; vertical-align: middle; text-align: center;"> E' bene eseguire la prova il prima possibile dopo aver prelevato i campioni. </td> <td style="width: 50%; text-align: center;"> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">D₉₀ [mm]</th> <th style="text-align: center;">Massa min [g]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td style="text-align: center;">1,0</td><td style="text-align: center;">25</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">2,0</td><td style="text-align: center;">100</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">4,0</td><td style="text-align: center;">300</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">16,0</td><td style="text-align: center;">500</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">31,5</td><td style="text-align: center;">1500</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">63,0</td><td style="text-align: center;">5000</td></tr> </tbody> </table> </td> </tr> </table>		E' bene eseguire la prova il prima possibile dopo aver prelevato i campioni.	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">D₉₀ [mm]</th> <th style="text-align: center;">Massa min [g]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td style="text-align: center;">1,0</td><td style="text-align: center;">25</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">2,0</td><td style="text-align: center;">100</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">4,0</td><td style="text-align: center;">300</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">16,0</td><td style="text-align: center;">500</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">31,5</td><td style="text-align: center;">1500</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">63,0</td><td style="text-align: center;">5000</td></tr> </tbody> </table>	D ₉₀ [mm]	Massa min [g]	1,0	25	2,0	100	4,0	300	16,0	500	31,5	1500	63,0	5000
E' bene eseguire la prova il prima possibile dopo aver prelevato i campioni.	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">D₉₀ [mm]</th> <th style="text-align: center;">Massa min [g]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td style="text-align: center;">1,0</td><td style="text-align: center;">25</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">2,0</td><td style="text-align: center;">100</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">4,0</td><td style="text-align: center;">300</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">16,0</td><td style="text-align: center;">500</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">31,5</td><td style="text-align: center;">1500</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">63,0</td><td style="text-align: center;">5000</td></tr> </tbody> </table>		D ₉₀ [mm]	Massa min [g]	1,0	25	2,0	100	4,0	300	16,0	500	31,5	1500	63,0	5000	
	D ₉₀ [mm]		Massa min [g]														
	1,0		25														
	2,0		100														
	4,0		300														
	16,0		500														
	31,5	1500															
63,0	5000																
<ul style="list-style-type: none"> • Esecuzione della prova <ul style="list-style-type: none"> ▪ Prelevare il materiale con una paletta. ▪ Riporre il materiale prelevato nel contenitore e chiudere con il coperchio. ▪ Determinare la massa del materiale appena prelevato m₁ comprendente la massa del contenitore. ▪ Campioni di grandi dimensioni vanno adagiati in contenitori a superficie ampia (come una padella) e il terreno frantumato in aggregati più piccoli. ▪ Collocare il materiale nel forno a microonde per essere essiccato fino a massa costante. ▪ Continuare l'essiccamento fino a quando la variazione di massa risulta trascurabile dopo due periodi di essiccamento in successione (meno dello 0,1% circa della massa provino). ▪ Rimuovere il contenitore dal forno. 																	

- Lasciare raffreddare fino a temperatura ambiente (valutazione a mano). Se il contenitore è privo di coperchio effettuare l'operazione all'interno di un essiccatore.
- Valutare e registrare la massa del provino essiccato m_2 comprendente la massa del contenitore.

OPERAZIONI FINALI, RAPPORTI, MARCATURE

- **Contenuto d'acqua**

$$w(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_c} \times 100 = \frac{m_w}{m_d} \times 100$$

Dove



m_c : massa del contenitore [g].

m_d : massa dell'acqua [g].


- **Osservazione**

Per terreni contenenti gesso o altri minerali caratterizzati da una significativa quantità di acqua chimicamente legata, o terreni caratterizzati da un contenuto significativo di sostanza organica il contenuto di acqua non può essere sempre ottenuto mediante essiccamento in stufa a $105 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$. Per questi tipi di terreno potrebbe essere più appropriato mantenere una temperatura più bassa (per esempio $40 \text{ }^\circ\text{C}$) nel forno di essiccamento.


4.2.2 Controllo dell'umidità in sito con Adek Percometer

PROVA DESCRITTA	
	<h2><u>CONTROLLO DELL'UMIDITÀ IN SITO</u></h2>
OBIETTIVI E CONTENUTO	
Metodo speditivo per la determinazione dell'umidità in sito tramite Adek Percometer.	
RIFERIMENTI NORMATIVI	
-	
APPARECCHIATURA	
<p>Analizzatore dati</p> <p>Asta con misuratore elettrico</p> <p>Punta per la misurazione su superfici di strutture (lunghezza 150 mm, $D = 28$ mm)</p> <p>Pannello solare</p>	
PROCEDURA	
<ul style="list-style-type: none"> • Selezionare la calibrazione per la punta che si sta utilizzando. • Infiggere l'asta nel terreno. • Registrare i valori visualizzati nel display. 	
OPERAZIONI FINALI, RAPPORTI, MARCATURE	
<ul style="list-style-type: none"> • OUTPUT automatico e istantaneo <ul style="list-style-type: none"> ▪ Conducibilità elettrica ▪ Valore dialettico ▪ Temperatura ▪ Umidità 	


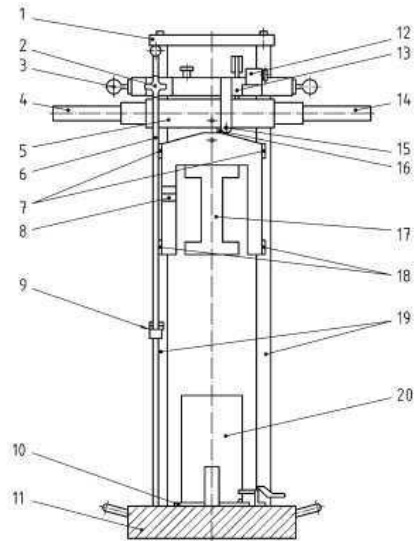
4.2.3 Controllo del dosaggio di calce

PROVA DESCRITTA	
<u>CONTROLLO DEL DOSAGGIO DI CALCE</u>	
OBIETTIVI E CONTENUTO	
Controllo dell'effettivo quantitativo di calce stesa sulla superficie del terreno da trattare immediatamente prima delle operazioni di miscelazione.	
RIFERIMENTI NORMATIVI	
-	
APPARECCHIATURA	
<p>Recipiente rettangolare in metallo con superficie di 0,25 m²</p> <p>Bilancia a gancio</p>	
PROCEDURA	
<ul style="list-style-type: none"> • Pesare il recipiente e registrare la tara <i>T</i>. • Sistemare il recipiente sulla superficie di terreno da trattare prima del passaggio dei mezzi spandi calce. • Attendere la conclusione delle operazioni di spandimento della calce. • Rimuovere il recipiente manualmente prestando attenzione a non perdere parte della calce depositata su esso. • Pesare il recipiente contenente la calce depositata e registrare la massa <i>m₁</i>. 	
OPERAZIONI FINALI, RAPPORTI, MARCATURE	
<ul style="list-style-type: none"> • Quantità di calce inserita <i>m_c</i> $m_c = (m_1 - T) \times 4 \quad [\text{kg/m}^2]$ <ul style="list-style-type: none"> • Percentuale di calce $CaO\% = \frac{m_c}{d \times S} \quad [\%]$ <p><i>d</i> = densità del terreno [kg/m³]. <i>S</i> = spessore dello strato trattato [m].</p>	

4.2.4 Grado di polverizzazione

PROVA DESCRITTA	
	<p>GRADO DI POLVERIZZAZIONE <u>UNI EN 13286 – 48 (2005)</u></p>
OBIETTIVI E CONTENUTO	
<p>Metodo di prova per il calcolo del grado di polverizzazione di materiale coesivo dopo miscelazione di terreno con calce, al fine di verificare l'efficacia della miscelazione.</p>	
APPARECCHIATURA	
<ul style="list-style-type: none"> • Bilancia con capacità minima 5 kg e accuratezza di ± 1g. • Setaccio da 5,6 mm, con diametro minimo 300 mm. • Paletta, con diametro di 125 mm e lunghezza 200 mm. 	
PROCEDURA	
<ul style="list-style-type: none"> • Prelevare con la paletta 1 kg di materiale non compattato (m_1). • Stendere il campione sul setaccio da 5,6 mm e agitarlo con delicatezza, garantendo che i grumi presenti si rompano il meno possibile. • Pesare la massa del materiale trattenuto dal setaccio (m_2). • Rompere i grumi trattenuti in particelle più piccole e ripetere l'agitazione sul setaccio fino a quando tutte le particelle inferiori a 5,6 mm sono passate. • Pesare la massa del materiale ancora trattenuto (m_3). 	
OPERAZIONI FINALI, RAPPORTI, MARCATURE	
<ul style="list-style-type: none"> • Calcolo del grado di polverizzazione $p = 100 \times \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_3}$ <p style="text-align: center;">[%]</p> <p>p = grado di polverizzazione [%]; m_1 = massa della miscela iniziale [g]; m_2 = massa della miscela trattenuta dopo il primo passaggio al setaccio [g]; m_3 = massa della miscela trattenuta dopo il secondo passaggio al setaccio [g].</p>	

4.2.5 Costipabilità mediante MCV

PROVA DESCRITTA	
	<h2 style="margin: 0;"><u>COSTIPABILITÀ MEDIANTE MCV</u></h2> <h3 style="margin: 0;"><u>UNI EN 13286 - 46 (2003)</u></h3>
OBIETTIVI E CONTENUTO	
<p>Metodo per la determinazione del tasso di umidità (MCV = Moisture Condition Value) di miscele di terreno e calce. Valido per la parte di miscela con granulometria inferiore a 20 mm. Si esegue per verificare l' idoneità della miscela a essere inserita in sito, costipata e soggetta a traffico dei mezzi da costruzione.</p>	
RIFERIMENTI NORMATIVI	
<p>UNI EN 1097-5.</p>	
APPARECCHIATURA	
<ul style="list-style-type: none"> • Sistema di sollevamento con contatore di colpi, altezza di caduta regolabile tra 100 e 260 mm, solitamente fissata a 250 mm. 	
	
<p>Figure 1 — Moisture condition apparatus</p>	
<ul style="list-style-type: none"> • Telaio, con aste di base, guida e mezzo per inserire lo stampo. Base di massa minima di 31 kg. • Stampo cilindrico, diametro 100 mm, lunghezza 200 mm, permeabile alla base e con rivestimento protettivo nella superficie interna. • Pestello con massa di circa 7 kg e faccia inferiore con diametro di circa 97 mm che sia in grado, grazie alle guide, di penetrare nello stampo fino a un massimo di 35 mm dal fondo. • Misuratore di profondità con precisione di 0,1 mm. • Disco rigido di separazione provino – pestello. 	

- Bilancia con accuratezza di 1 g.
- Setaccio da 20 mm.
- Vassoio in metallo o plastica, con profondità di circa 80 mm.
- Strumenti per estrarre il campione dallo stampo.
- Attrezzatura per determinare il contenuto d'acqua.

PROCEDURA

- **Campione di prova**

Utilizzare una porzione di prova composta da circa 2 kg di passante al setaccio da 20 mm.

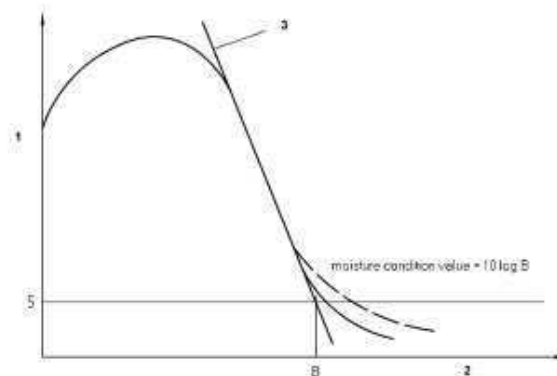
- **Procedimento**

- Inserire 1,5 kg di miscela all'interno dello stampo, asciutto e pulito e inserire un disco di separazione sulla sommità della miscela.
- Regolare il sistema di sollevamento e il pestello a un'altezza di (250 ± 5) mm dalla superficie del disco di separazione. Appoggiare preventivamente il pestello al disco e lasciare che il sistema campione – disco si abbassi sotto il peso proprio del pestello.
- Applicare un colpo con il pestello e misurare la penetrazione di questo nello stampo.
- Ripetere l'operazione fino a un numero totale di 256 colpi o fino a quando la penetrazione non subisce più aumenti significativi.
- Misurare la penetrazione ogni 1, 2, 3, 4, 6, 8, 12, 16, 24, 32, 48, 64, 96, 128, 192 e 256 colpi.
- Togliere lo stampo dal dispositivo e estrarre il campione dallo stampo.

OPERAZIONI FINALI, RAPPORTI, MARCATURE

- **Risultati**

- Calcolare la differenza di penetrazione tra un certo numero di colpi, n e $4n$.
- Costruire il digramma penetrazione (mm)– logaritmo del numero di colpi.
- Riportare nel grafico la linea più ripida possibile tra i punti che giacciono immediatamente prima e dopo i 5 mm di penetrazione.



Key
 1 Change in penetration
 2 Number of blows, log scale
 3 Steepest straight line


- **MCV**

$$MCV = 10 \log B$$

B = numero di colpi in cui la penetrazione letta nel diagramma è 5 mm.

- Se è necessario un numero di colpi superiore a 256 per stabilizzare la penetrazione registrare il valore di MCV direttamente come “*superiore a 18*”.



4.2.6 Compattazione intelligente e controllo continuo della compactazione

PROVA DESCRITTA	
	<h2><u>COMPATTAZIONE INTELLIGENTE</u></h2>
OBIETTIVI E CONTENUTO	
<p>Tecniche innovative - IC e CCC - per ottimizzare le operazioni di compactazione dello strato realizzato, grazie alla modifica automatica di frequenza, ampiezza e velocità del rullo utilizzato.</p>	
RIFERIMENTI NORMATIVI	
-	
APPARECCHIATURA	
<ul style="list-style-type: none"> • Rullo vibrante (tipo Bomag Variocontrol). • Accelerometri con assi di misura disposti a $\pm 45^\circ$ rispetto alla verticale. • Sistema di mappatura GPS. • Sistema di masse eccentriche controrotanti con assemblaggio modificabile. • Unità di controllo e elaborazione dei dati. • Servizio di correzione con accuratezza dei dati riportati dell'ordine di (10÷50) mm. 	
PROCEDURA	
<ul style="list-style-type: none"> • Scelta di una delle sei diverse modalità operative del rullo, basate su diversi valori di ampiezza di vibrazione (e corrispondenti angoli di direzione): 0, 0.6, 1.2, 1.7, 2.1, 2.5 mm. • Scelta della modalità operativa (automatica o manuale). • Passaggio del rullo sullo strato con controllo continuo dell'interazione tra tamburo e suolo. • Frequenza di compactazione Ω costante. • Ad ogni ciclo di compressione vengono forniti in automatico la forza di contatto tamburo – suolo F_s e l'abbassamento z_d subito. • Sulla base dei dati registrati l'unità centrale fornisce la rigidità k_s, ottenuta e da essa il modulo vibrante <i>E_{vib}</i>. • Scelta del numero di passaggi del rullo sulla base dei risultati finali richiesti. 	
OPERAZIONI FINALI, RAPPORTI, MARCATURE	
<ul style="list-style-type: none"> • Rigidità ottenuta $k_s = \frac{F_s}{z_d}$ <p>F_s = forza di contatto tamburo – suolo. z_d = abbassamento subito dal terreno.</p>	


4.2.7 Analisi termica mediante sistema Pave-IR

PROVA DESCRITTA	
	<h2><u>TERMOGRAFIA A INFRAROSSI MEDIANTE PAVE – IR SYSTEM</u></h2>
OBIETTIVI E CONTENUTO	
Verifica della qualità della miscelazione mediante scannerizzazione trasversale della superficie trattata con il sistema Pave-Ir.	
RIFERIMENTI NORMATIVI	
-	
APPARECCHIATURA	
<p>5 sensori infrarossi inseriti in una barra</p> <p style="margin-left: 100px;">Master Cable</p> <p style="margin-left: 100px;">Master Box</p>	
PROCEDURA	
<ul style="list-style-type: none"> • Montare la barra sui supporti. • Collegare i cavi per la trasmissione dei dati alla master box. • Calibrare la strumentazione. • Procedere con le operazioni di miscelazione, regolarizzazione o costipamento. • Analizzare i report. 	
OPERAZIONI FINALI, RAPPORTI, MARCATURE	
<ul style="list-style-type: none"> • Elaborazione grafica dei dati registrati in tempo reale. 	
	

4.2.8 Controllo dello spessore per reazione all'agente chimico

PROVA DESCRITTA	
	<p><u>REAZIONE ALL'AGENTE CHIMICO</u></p>
OBIETTIVI E CONTENUTO	
<p>Controllo della qualità e dell'omogeneità e verifica dello spessore trattato per mezzo di una reazione chimica che scaturisce per immissione di fenoftaleina e alcool.</p>	
RIFERIMENTI NORMATIVI	
-	
APPARECCHIATURA	
<ul style="list-style-type: none"> • Pala o badile. • Soluzione di almeno 1 l contenente fenolftaleina e alcool. • Righello da 100 cm. 	
PROCEDURA	
<ul style="list-style-type: none"> • Scavare una trincea larga circa 30 cm e con una profondità superiore di almeno 5 cm rispetto alla profondità di progetto dello strato trattato. • Impregnare le pareti dello scavo con la soluzione reagente. • Verificare l'avvenuta reazione all'agente chimico (soluzione di colore tendente al viola). 	
	
<ul style="list-style-type: none"> • Misurare lo spessore dello scavo in cui avviene la reazione all'agente chimico. 	
OPERAZIONI FINALI, RAPPORTI, MARCATURE	
<ul style="list-style-type: none"> • Verificare che lo spessore realmente stabilizzato sia pari a quello richiesto da progetto. 	

4.2.9 Controllo della densità in sito

PROVA DESCRITTA	
DENSITÀ IN SITO CON VOLUMOMETRO A SABBIA	
<u>CNR BU n. 22/72</u>	
OBIETTIVI E CONTENUTO	
Determinazione del peso di volume di un terreno o della miscela terra-calce in sito o del grado di compattazione raggiunto dallo strato trattato.	
RIFERIMENTI NORMATIVI	
-	
APPARECCHIATURA	
<ul style="list-style-type: none"> Volumometro a sabbia con accessori. 	
<ul style="list-style-type: none"> Bilancia digitale. Contentori. Forno o stufa per essiccazione del materiale. Sabbia di caratteristiche note. Pala o badile. 	
PROCEDURA	
<ul style="list-style-type: none"> Scavare una trincea nello strato trattato e determinare peso e contenuto d'acqua del materiale asportato. Registrare i due valori <i>P_t</i> e <i>W_t</i>. Disporre il volumometro sullo scavo, rilasciare la sabbia finché lo scavo non è riempito completamente. Tramite lettura sul volumometro determinare il volume del materiale asportato <i>V_t</i>. 	
OPERAZIONI FINALI, RAPPORTI, MARCATURE	
<ul style="list-style-type: none"> Contenuto d'acqua 	$W_t = \frac{P_u - P_s}{P_s} \quad [\%]$
<p><i>P_u</i> = Peso umido della porzione di prova [kg]. <i>P_s</i> = Peso secco della porzione di prova [kg].</p>	
<ul style="list-style-type: none"> Peso di volume totale 	$\gamma = \frac{P_t}{V_t} \quad [\text{kg/m}^3]$
<ul style="list-style-type: none"> Peso di volume secco 	$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + W_t} \quad [\text{kg/m}^3]$

4.2.10 Densità e umidità in sito attraverso metodo dell'impedenza elettrica

PROVA DESCRITTA	
	<p style="text-align: center;"><u>ELECTRICAL DENSITY GAUGE</u> <u>ASTM D7698 - 11</u></p>
OBIETTIVI E CONTENUTO	
Determinazione in sito di densità e umidità di un terreno attraverso l'utilizzo del metodo dell'impedenza elettrica.	
RIFERIMENTI NORMATIVI	
<i>ASTM D698 – 07; ASTM D1557 – 09.</i>	
APPARECCHIATURA	
<ul style="list-style-type: none">• Strumento di misura dell'impedenza.• Sensore del suolo.• Sorgente di frequenze radio (da 3 MHz).• Amperometro.• Voltmetro.• Misuratore di differenza di fase.• Cavi di connessione.• Unità di controllo munita di display.• 4 Sonde elettriche da suolo con punta conica.• Maglio in acciaio o ottone per inserire le sonde nel terreno.	
PROCEDURA	
<ul style="list-style-type: none">• Associare il tipo di suolo da analizzare al sito in cui si trova per regolare il display.• Preparare i punti di prova livellando la superficie del terreno e rimuovendo eventuali elementi di disturbo.• Inserire un chiodo di metallo o un piccolo cacciavite nel terreno vicino al punto di prova, quindi infiggere la sonda che misura la temperatura di almeno la metà della sua lunghezza.• Inserire le 4 sonde elettriche nei punti di prova in posizione verticale e per tutta la lunghezza della parte conica.• Posizionare il sensore del suolo nel punto centrale rispetto alle 4 sonde.• Collegare a due a due le sonde diametralmente opposte con i cavi.• Accendere l'unità di controllo.• Eseguire il test per la raccolta dei dati elettrici.	

OPERAZIONI FINALI, RAPPORTI, MARCATURE

• **Impedenza elettrica**

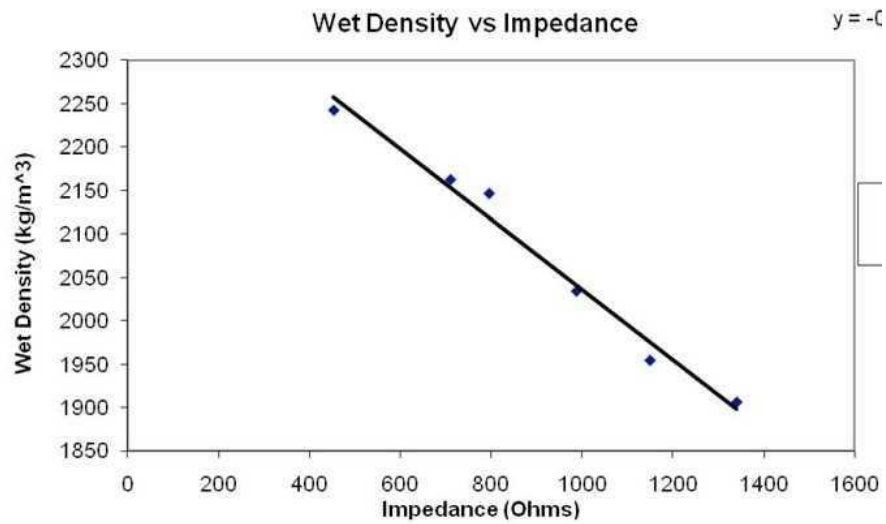
$$Z = \frac{V}{I} \quad [\text{Ohms}]$$

V = Tensione elettrica [V].

I = Corrente elettrica [A].

• **OUTPUT automatico:**

- **Densità secca** [kg/m³].
- **Densità umida** [kg/m³].
- **Contenuto d'acqua**[%].
- **Grado di compattazione**[%].
- **Analisi dei dati tramite apposito software**



4.2.11 Verifiche in sito con Graunding Penetrating Radar

PROVA DESCRITTA	
	<p><u>GRAUNDING PENETRATING RADAR</u> <u>ASTM D4748 - 10</u></p>
OBIETTIVI E CONTENUTO	
<p>Verifica degli spessori di progetto, della densità e del contenuto di vuoti della miscela per mezzo della tecnica non-distruttiva che prevede l'utilizzo del Graunding Penetrating Radar.</p>	
RIFERIMENTI NORMATIVI	
<p><i>ASTM D653; ASTM D6087; ASTM D6429; ASTM D6432; ASTM E1778.</i></p>	
APPARECCHIATURA	
<ul style="list-style-type: none"> • Veicolo o mezzo di trasporto dotato della struttura di supporto metallica. 	
	
<ul style="list-style-type: none"> • Una o più antenne <i>GPR</i>. Le antenne possono essere posizionate in aria a una distanza di (20÷50) cm dalla superficie del terreno oppure a diretto contatto con essa. • Unità di controllo: trasmettitore, ricevitore, timer elettronico. • Strumento per la misurazione della distanza (DMI) con accuratezza ± 190 mm/km. • Global Position System (GPS) – opzionale. • Personal Computer dotato di display per acquisizione e visualizzazione dei risultati. 	
PROCEDURA	
<ul style="list-style-type: none"> • Posizionare il veicolo tenendo conto che le linee di scansione sono tipicamente situate lungo i percorsi delle ruote o nella sezione longitudinale centrale. • Azionare il sistema <i>GPR</i> almeno 30 minuti prima dell'inizio della scansione. • Testare l'antenna lungo una linea di scansione con veicolo in moto a velocità minima. • Verificare che i dati raccolti siano associati ad almeno un punto di riferimento per la loro corretta distribuzione spaziale lungo la sezione trasversale scannerizzata. • Effettuare la scansione procedendo lungo l'area d'esame con il veicolo; per antenne in aria la velocità è fissata sulla base della distanza scelta tra due sezioni trasversali scannerizzate successive, per le antenne a terra la distanza non deve superare gli 8 km/h per mantenere il contatto costante con il terreno. 	

- Elaborare i dati con software apposito.

OPERAZIONI FINALI, RAPPORTI, MARCATURE

- **Spessore dello strato trattato**

$$T = \frac{\Delta t \times c}{2\sqrt{\epsilon_r}} \quad [\text{mm}]$$

T = Spessore dello strato di miscela terra-calce [mm].

Δt = tempo di andata/ritorno del segnale radio lungo lo strato scansionato [sec].

c = velocità della luce in aria = 300 mm/sec.

ϵ_r = costante dielettrica relativa dello strato scansionato.

TABLE 1 Relative Dielectric Constants and radar wave velocity through the materials

Material	Relative dielectric constants	Radar velocity, m/ns	Radar velocity, inch/ns
Air	1	0.30	11.8
Water	81	0.03	1.3
Asphalt	2 to 4	0.15 to 0.21	5.9 to 8.4
Clay	2 to 10	0.05 to 0.21	1.9 to 8.4
Concrete	4 to 10	0.010 to 0.15	3.7 to 5.9
Granite	5 to 8	0.11 to 0.15	4.4 to 5.9
Limestone	4 to 8	0.10 to 0.15	4.2 to 5.9
Sand	4 to 6	0.12 to 0.15	4.8 to 5.9
Sandstone	2 to 3	0.17 to 0.21	6.8 to 8.4
Sandy Soil	4 to 6	0.12 to 0.15	4.8 to 5.9
Clayey Soil	4 to 6	0.12 to 0.15	4.8 to 5.9
Gravel	4 to 8	0.10 to 0.15	4.2 to 5.9

4.2.12 Prova di carico con piastra

PROVA DESCRITTA		
PROVA DI CARICO CON PIASTRA (PLT)		
<u>CNR BU n. 146 - 92</u>		
OBIETTIVI E CONTENUTO		
Determinazione dei moduli di deformazione, indicativi della capacità portante e del grado di costipamento dei terreni, mediante prova di carico a doppio ciclo con piastra circolare.		
RIFERIMENTI NORMATIVI		
-		
APPARECCHIATURA		
<ul style="list-style-type: none"> • Piastra circolare in acciaio, di spessore non minore di 20 mm e diametro di (300 ± 1) mm, irrigidita attraverso apposite nervature o con un altro anello di 20 mm di spessore e 160 mm di diametro. • Scatola cilindrica metallica con superficie piana su cui si appoggia la punta del comparatore. • Cerniera sferica per centramento del carico. • Martinetto meccanico o idraulico con portata di 50 kN. • Dinamometro meccanico o idraulico con portata di 50 kN. • Aste di prolunga cilindriche avvitabili di diverse lunghezze. • Comparatore centesimale con sensibilità di 10 mm. • Braccio metallico snodabile porta-comparatori e trave rigida di sostegno di lunghezza pari a 2,50 m. • Filo a piombo. • Cronometro. • Termometro. • Contrasto fisso di massa adeguata (tipo telaio di un autocarro o altro mezzo di cantiere). 		
PROCEDURA		
<ul style="list-style-type: none"> • Sistemare e bloccare la cerniera sferica sulla piastra. • Porre la scatola cilindrica sulla piastra, introducendo al suo interno il comparatore in modo che la sua punta poggi sulla sede apposita. • Fissare il braccio porta-comparatore alla trave. • Disporre martinetto e dinamometro sopra la scatola facendo in modo che le aste di prolunga contrastino con il telaio fisso. • Disporre il punto d'appoggio del martinetto e la cerniera sferica sulla stessa verticale servendosi del filo a piombo. • Liberare la cerniera sferica e applicare, attraverso il martinetto, un carico di assetto pari a $0,02 \text{ N/mm}^2$. • Attendere l'esaurimento dei cedimenti e azzerare il comparatore. • Portare il carico a $0,05 \text{ N/mm}^2$, effettuare una prima lettura • Applicare il primo ciclo di carico 		
STRATO	INCREMENTO [N/mm ²]	FINO A [N/mm ²]
<i>Sottofondo - Rilevato</i>	0,05	0,2
<i>Fondazione</i>	0,1	0,35
<i>Base</i>	0,1	0,45
<ul style="list-style-type: none"> • Effettuare lettura dei cedimenti ogni minuto e a cedimenti stabilizzati per ogni incremento di carico applicato. 		

- Scaricare completamente se si intende valutare il modulo M_d , oppure, se si vuole valutare anche M_d' , scaricare fino a 0,05 N/mm² valutando il cedimento residuo dopo la stabilizzazione.

- Applicare il **secondo ciclo di carico**

STRATO	INCREMENTO [N/mm ²]	FINO A [N/mm ²]
<i>Sottofondo - Rilevato</i>	0,05	0,15
<i>Fondazione</i>	0,1	0,25
<i>Base</i>	0,1	0,35

- Effettuare più misurazioni della temperatura durante la procedura per verificare che non subisca variazioni significative.

OPERAZIONI FINALI, RAPPORTI, MARCATURE

- **Valutazione dell'umidità:** effettuata al termine della prova in prossimità del punto di misurazione con prelievo che interessi almeno 15 cm di profondità.

- **Moduli di deformazione M_d e M_d'**

$$M_d = \frac{\Delta p}{\Delta s} \times D$$

$$M_d' = \frac{\Delta p'}{\Delta s'} \times D \quad [\text{N/mm}^2]$$

$\Delta p, \Delta p'$ = incremento di pressione [N/mm²].



$\Delta s, \Delta s'$ = incremento di cedimento corrispondente all'incremento di pressione [mm].

M_d è riferito ai valori relativi al primo ciclo di carico, M_d' a quelli relativi al secondo.

4.2.13 Portanza con Falling Weight Deflectometer

PROVA DESCRITTA	
<u>PORTANZA CON FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER (FWD)</u>	
OBIETTIVI E CONTENUTO	
Valutazione della portanza e dell'addensamento di un terreno in sito.	
RIFERIMENTI NORMATIVI	
<i>CNR – B.U. n.141 Marzo 1992; ASTM D4695-03; ASTM D4602-93(2002); ASTM D4694-96(2003); ASTM D5858-96(2003); ZTV E-StB-94/4; ZTV T-StB-95; ZTV A-StB-97.</i>	
APPARECCHIATURA	
<ul style="list-style-type: none"> • Masse battenti (50÷350 kg). • Cella di carico. • Piastra applicazione carico. • Barra porta-geofoni. • Sensori di deflessione(geofoni). • Misura delle progressive. • Sensore temperatura dell'aria. • Analizzatore dati. 	
PROCEDURA	
<ul style="list-style-type: none"> • Posizionare la piastra di carico nel punto da testare dopo aver verificato l'idoneità del peso impiegato e della piastra stessa, in relazione al tipo di materiale presente in sito ed alla posizione dello strato. • Regularizzare il piano di appoggio della piastra con un piccolo quantitativo di sabbia nel caso in cui siano presenti irregolarità superficiali. • Appoggiare il dispositivo di carico sulla piastra, avendo cura di controllare l'integrità e la pulizia della semisfera di centraggio posta sulla piastra stessa. • Applicando tre colpi di precarico sul punto, senza necessariamente registrarli nel data recorder. • Iniziare l'acquisizione dei dati non appena completato il precarico. • Applicare i tre colpi necessari al completamento della prova. 	
OPERAZIONI FINALI, RAPPORTI, MARCATURE	
<ul style="list-style-type: none"> • Modulo di deformazione dinamico $E_{vd} = 1,5 \times r \times \left(\frac{\sigma_{max}}{S_{max}} \right) \quad [\text{MPa}]$ <p>r = raggio della piastra di carico [mm]. σ_{max} = tensione di contatto terreno-piastra [MPa]. S_{max} = cedimento massimo [mm].</p>	

4.2.14 Portanza con Light Falling Weight Deflectometer

PROVA DESCRITTA	
	<p><u>PORTANZA CON LIGHT FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER (LFWD)</u></p>
OBIETTIVI E CONTENUTO	
Valutazione della portanza e dell'addensamento di un terreno in sito.	
RIFERIMENTI NORMATIVI	
<p><i>CNR – B.U. n.141 Marzo 1992; ASTM D4695-03; ASTM D4602-93(2002); ASTM D4694-96(2003); ASTM D5858-96(2003); ZTV E-StB-94/4; ZTV T-StB-95; ZTV A-StB-97.</i></p>	
APPARECCHIATURA	
<ul style="list-style-type: none"> • Piastra di carico ($s=20$ mm, $D=300$ mm). • Masse battenti (10÷15)kg. • Asta di guida. • Leva di rilascio. • Smorzatore a molle. • Cella di carico. • Accelerometro/geofono. • Data recorder/stampante. • Compensatore di inclinazione. • Maniglia di trasporto. • Centralina. 	
PROCEDURA	
<ul style="list-style-type: none"> • Posizionare la piastra di carico nel punto da testare dopo aver pulito la superficie da elementi di disturbo. • Regularizzare il piano di appoggio della piastra con un piccolo quantitativo di sabbia nel caso in cui siano presenti irregolarità superficiali. • Appoggiare il dispositivo di carico sulla piastra. • Sollevare la massa e ancorarla alla leva di rilascio. • Applicando tre colpi di precarico sul punto azionando la leva, senza necessariamente registrarli nel data recorder. • Recuperare a ogni colpo la massa battente dopo il rimbalzo prima che colpisca nuovamente la piastra. • Iniziare l'acquisizione dei dati non appena completato il precarico. • Applicare i tre colpi necessari al completamento della prova. 	

OPERAZIONI FINALI, RAPPORTI, MARCATURE

• **Modulo di deformazione dinamico**

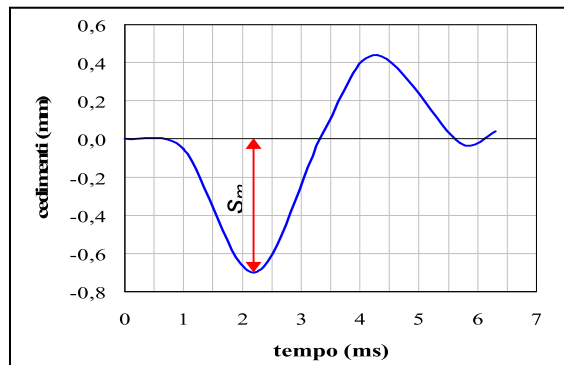
$$E_{vd} = 1,5 \times r \times \left(\frac{\sigma_{max}}{S_{max}} \right) \quad [\text{MPa}]$$

r = raggio della piastra di carico [mm].



σ_{max} = tensione di contatto terreno-piastra [MPa].

S_{max} = cedimento massimo [mm].


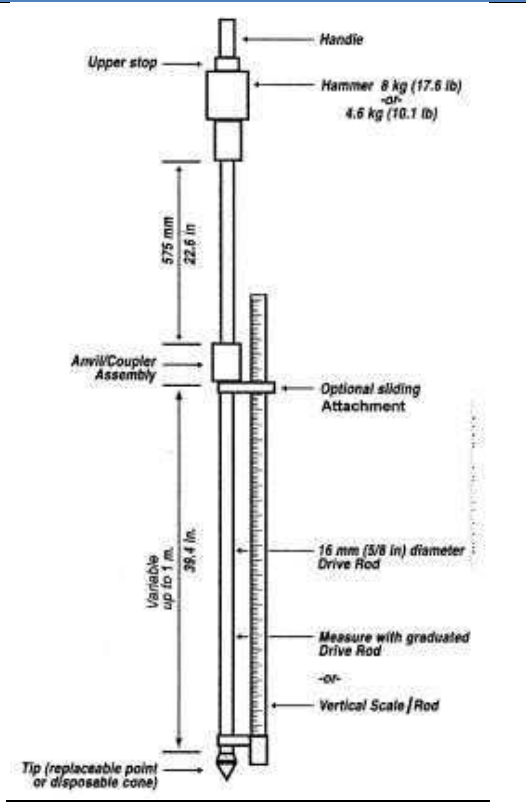
• **Andamento cedimenti – tempo per ogni colpo**



4.2.15 Valutazione della rigidità del terreno con *Clegg Impact Soil Tester*

PROVA DESCRITTA	
	<h2><u>CLEGG IMPACT SOIL TESTER</u></h2>
OBIETTIVI E CONTENUTO	
<p>Valutazione in sito della rigidità di un terreno attraverso il calcolo dell'indice di impatto <i>IV</i> per mezzo del <i>Clegg Impact Soil Tester</i> e la sua correlazione con l'indice <i>CBR</i>.</p>	
RIFERIMENTI NORMATIVI	
<p><i>ASTM D2922 – 05; ASTM D2950 – 10; ASTM D3017 – 04; ASTM D5874 – 07.</i></p>	
APPARECCHIATURA	
<ul style="list-style-type: none"> • Battente da 0,5 – 2,5 – 4,5 kg. • Tubo guida. • Accelerometro. • Unità di controllo. 	
PROCEDURA	
<ul style="list-style-type: none"> • Posizionare lo strumento sulla superficie da analizzare. • Sollevare il battente fino alla posizione di blocco. • Rilasciarlo e farlo cadere. • Ripetere le prime due operazioni per 5 volte per un risultato finale più corretto. • Leggere e registrare il valore dell'indice d'impatto <i>IV</i> ottenuto. 	
OPERAZIONI FINALI, RAPPORTI, MARCATURE	
<ul style="list-style-type: none"> • Legge di correlazione <i>IV</i> – <i>CBR</i> $CBR = [0,24(IV) + 1]^2$	

4.2.16 Caratteristiche meccaniche con Dynamic Cone Penetrometer

PROVA DESCRITTA	
	<p><u>DYNAMIC CONE PENETROMETER (DCP)</u> <u>ASTM D6951/D6951 M – 09</u></p>
OBIETTIVI E CONTENUTO	
<p>Determinazione in sito delle caratteristiche geomeccaniche del terreno sotto forma di indice <i>DCP</i> riferito all'indice <i>CBR</i>.</p>	
RIFERIMENTI NORMATIVI	
-	
APPARECCHIATURA	
<ul style="list-style-type: none"> • Maglio in acciaio di 8 kg. • Incudine. • Asta di guida e nottolino di fine corsa. • Aste in acciaio. • Tre punte filettate. • Piastra di supporto. • Estrattore a leva per le aste. 	
PROCEDURA	
<ul style="list-style-type: none"> • Prendere l'asta inferiore e farla passare prima all'interno del supporto per l'attacco metrico superiore poi al piede. • Montare la punta. • Avvitare la punta all'asta di infissione, ricordandosi di verificare l'installazione mediante l'utilizzo di pinze idonee. • Selezionare la massa da utilizzare, nel caso in cui si opti per il martello da 8kg impilare il peso aggiuntivo a quello da 4.6kg. • Prendere l'asta superiore e lubrificarla per permettere un corretto scivolamento della massa diminuendo gli attriti. 	

- Inserire il martello selezionato.
- Mediante l'utilizzo del *Quick-Connect Pin* unire le due aste, prestando attenzione alla massa mobile.
- Installare la scala metrica.
- Posizionare lo strumento sullo zero di lettura.
- Lasciare cadere il maglio dall'altezza di 575mm.
- Leggere il valore di penetrazione.
- Continuare ad applicare colpi fino al raggiungimento della profondità di ispezione desiderata.
- Estrarre l'asta penetrata per mezzo dell'estrattore.
- Verificare che non vi siano eventuali danneggiamenti delle componenti.
- Pulire e riporre lo strumento nell'apposita valigetta.

OPERAZIONI FINALI, RAPPORTI, MARCATURE


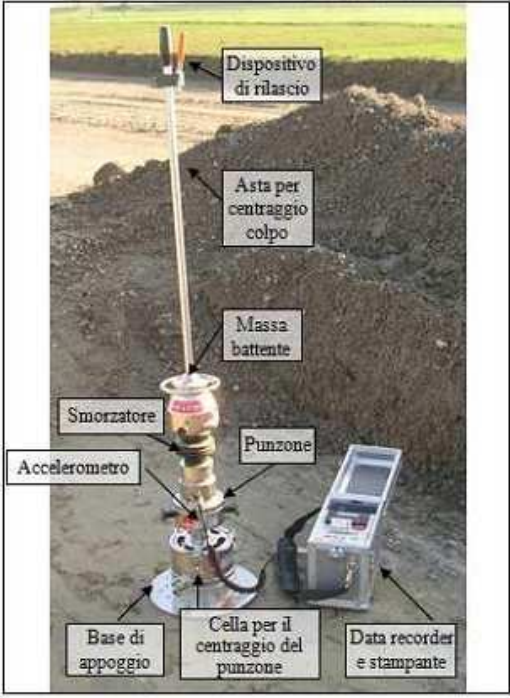
- **Calcolo dell'indice *CBR* in sito (*USACE*)**

<i>Argille a bassa plasticità</i>	$CBR = \frac{1}{(0,017019 \times DCP)^2}$	[%]
<i>Argille ad alta plasticità</i>	$CBR = \frac{1}{(0,002871 \times DCP)}$	[%]

- **Tabella redatta per la valutazione della penetrazione ottenuta**
(esempio da norma relativo a terreno ghiaioso con limi)

<i>Numero di colpi</i>	<i>Penetrazione dopo ogni serie di colpi</i> [mm]	<i>Penetrazione tra due letture successive</i> [mm]	<i>Indice DCP</i> [mm/colpo]	<i>CBR</i> [%]
0	0	-	-	-
5	25	25	5	50
5	55	30	6	40
15	125	70	5	50
10	175	50	5	50
5	205	30	6	40
5	230	25	5	50
10	280	50	5	50
5	310	30	6	40
5	340	30	6	40
5	375	35	7	35
5	435	60	12	18

4.2.17 Portanza in sito con *CBR* dinamico

PROVA DESCRITTA	
	<h2><u>INDICE <i>CBR</i> DINAMICO</u></h2>
OBIETTIVI E CONTENUTO	
<p>Valutazione alternativa della portanza attraverso una prova di punzonamento in sito che porta alla stima dell'indice <i>CBR</i> dinamico CBR_d.</p>	
RIFERIMENTI NORMATIVI	
-	
APPARECCHIATURA	
<ul style="list-style-type: none"> • Base d'appoggio ($D=300$ mm). • Cella di centraggio. • Sistema di carico con punzone ($D=25,20\div 50$) mm e massa battente di 10 kg. • Smorzatore a molle. • Accelerometro. • Unità di acquisizione dei dati con stampante. • Cavi elettrici. 	
PROCEDURA	
<ul style="list-style-type: none"> • Collocare lo strumento in un punto in cui la superficie non presenti irregolarità. • Assicurarsi che la superficie non presenti un'inclinazione superiore al 6%. • Appoggiare il dispositivo di carico sul punzone. • Collegare lo strumento all'unità di acquisizione e impostare le modalità di prova. • Sollevare la massa e agganciarla alla leva di rilascio. • Rilasciare la massa battente e recuperarla durante il rimbalzo prima che ricada sullo smorzatore. • Registrare e stampare il valore CBR_d ottenuto. 	

OPERAZIONI FINALI, RAPPORTI, MARCATURE

- **Calcolo dell'indice *CBR* dinamico CBR_d**

CBR_d viene fornito in automatico dallo strumento sulla base della formula:

$$CBR_d = 87,3 \times \frac{1}{s^{0,59}}$$

s = cedimento calcolato dallo strumento dopo l'impatto [mm].

4.3 Attività di ricerca relativa a operazioni e controlli in sito

Le attività di ricerca sviluppate dal DICAM relative alle valutazioni in sito sul trattamento a calce di terreni argillosi hanno in primo luogo portato alla redazione di una procedura completa da eseguire per il corretto svolgimento delle operazioni.

Tale procedura, descritta nei paragrafi precedenti, ha introdotto all'interno delle operazioni svolte in sito numerose innovazioni, inerenti all'utilizzo di strumentazioni moderne che velocizzano la valutazione dei parametri che devono essere calcolati, come la densità, l'umidità, lo spessore e le caratteristiche meccaniche dello strato trattato.

Si riporta il Report della procedura da seguire in sito per effettuare un trattamento a calce di un terreno argilloso elaborata grazie alla ricerca DICAM.


- **Approvvigionamento e stoccaggio della calce**
- **Scarificazione del terreno naturale**
 - ✓ *Controllo dell'umidità del terreno non trattato*
- **Spandimento della calce**
 - ✓ *Controllo del dosaggio*
- **Miscelazione terreno-calce**
 - ✓ *Grado di polverizzazione*
 - ✓ *Moisture Condition Value*
 - ✓ *Umidità in sito*
 - ✓ *Omogeneità con tecnologia a infrarossi*
- **Regolarizzazione della superficie trattata**
- **Costipamento dello strato trattato**
 - ✓ *Controlli per mezzo della Compattazione Intelligente*
 - ✓ *Controllo di densità in sito e spessore sullo strato trattato*
 - ✓ *Controllo della portanza immediata sullo strato trattato*
- **Protezione e maturazione dello strato trattato**
- **Controlli della portanza dopo maturazione di 7 giorni**

I controlli eseguiti in sito per valutare la qualità del trattamento a calce nelle varie fasi sfruttano ricerche svolte nel campo delle valutazioni in sito dei terreni naturali, le cui conclusioni vengono brevemente riportate nel paragrafo seguente.

Più in generale si suddivide la ricerca svolta dal DICAM in studi sulle valutazioni della portanza, sulle metodologie di compattazione intelligente e sulle possibili correlazioni tra questi due campi.

Dal 2008 ad oggi sono stati realizzati 3 siti sperimentali su cui investigare gli aspetti descritti. Ogni sito presenta diverse peculiarità. Le Tab 4.3, Tab. 4.4 e Tab. 4.5 sintetizzano le caratteristiche di ciascun sito indicando per ognuno: i materiali utilizzati, le strumentazioni di compattazione e controllo adottate ed il numero di strati su cui sono eseguiti i vari test. In alcuni casi sono state predisposte misurazioni interne agli strati tramite sensori a cella in grado di registrare l'azione profonda del rullo e quelle degli strumenti deflettometrici. Le compattazioni sono avvenute controllando il numero di passate ed i set-up di vibrazione.

CAMPO PROVE IMOLA (BO)	
Data:	Luglio-Dicembre 2010
Responsabile:	Ing. C. Sangiorgi
Soggetti coinvolti:	<ul style="list-style-type: none"> • Univ. Bologna • Univ. Pisa • C.A.R Imola • BomagGmbH
Strumentazioni utilizzate:	<ul style="list-style-type: none"> • Rullo Bomag BW 213 DH-BVC • FWD Dynatest • LWD Zorn • LWD Dynatest • LWD Terratest • Celle di pressione • DCP • Densità/Umidità • Georadar
Materiali analizzati:	<ul style="list-style-type: none"> • Macinatomo di pietra • Stabilizzato di traversine • Stabilizzato di cemento • Stabilizzato di cemento + Macinato asfalto
Tipologia:	Rilevatosperimentale
Dimensioni:	4 campiconsecutivi di 15x5m
Fasi di rilievo:	test eseguiti su 3 strati (sottofondo, 1° strato, 2° strato) a diverse maturazioni e compattazione controllata; rilievo delle celle immerse.




Tab. 4.3 – Campo prove Imola.

<i>CAMPO PROVE ALTOPASCIO (LU)</i>	
Data:	Ottobre 2009
Responsabile:	Ing. A. Marradi
Soggetti coinvolti:	<ul style="list-style-type: none"> • Univ. Bologna • Univ. Pisa • BomagGmbH • Del DebbioS.p.A.
Strumentazioni utilizzate:	<ul style="list-style-type: none"> • Rullo Bomag BW 213 DH-BVC • FWD Dynatest • LWD Zorn • LWD Dynatest • DCP • PLT • Densità/Umidità
Materiali analizzati:	<ul style="list-style-type: none"> • A2-5 • C&D
Tipologia:	Strada Provinciale in costruzione
Dimensioni:	2 campi consecutivi di dim. 50x10m, 40x10m
Fasi di rilievo:	test eseguiti con compattazione controllata sui due campi e su due strati.



Tab. 4.4 – Campo prove Altopascio.

CAMPO PROVE NEPI (VT)	
Data:	Aprile-Giugno 2008
Responsabile:	Prof. A. D'Andrea; V.Misano (RFI)
Soggetti coinvolti:	<ul style="list-style-type: none"> • Univ. Bologna • Univ. Pisa • Univ. Roma La Sapienza • RFI S.p.A.
Strumentazioni utilizzate:	<ul style="list-style-type: none"> • FWD Dynatest • LWD Zorn • LWD Dynatest • Celle di carico • PLT • Densità/Umidità • DCP • Punzonamento dinamico <p style="text-align: right;">CBR</p>
Materiali analizzati:	<ul style="list-style-type: none"> • argilla e calce • pozzolana, fango e calce • materiale C&D • stabilizzatori granulometrico
Tipologia:	Rilevato ferroviario sperimentale RFI
Dimensioni:	4 campioni consecutivi di 20x5m
Fasi di rilievo:	test eseguiti nel tempo su rilevato completo; rilievo celle immerse.



Tab. 4.5 – Campo prove Nepi.

4.3.1 Attività di ricerca preliminari

Il controllo delle caratteristiche di portanza ed addensamento dei terreni in sito è necessario per garantire la corretta esecuzione delle lavorazioni di cantiere e, conseguentemente, il raggiungimento della resistenza strutturale necessaria affinché i piani di posa di rilevati e sovrastrutture risultino stabili sotto i carichi agenti in esercizio. La ricerca DICAM in questo campo ha visto numerosi studi sul *Light Falling Weight Deflectometer*, strumento che negli ultimi anni vede il suo utilizzo in continuo aumento. Le metodologie di prova più utilizzate in Italia per la misura della capacità portante dei piani di posa stradali e non, sono il *PLT* e il *FWD*, già descritti nei paragrafi precedenti.

Le limitazioni di queste metodologie, in particolar modo le tempistiche di prova e gli ingombri del *PLT* ed i costi del *FWD*, hanno incoraggiato lo sviluppo di nuove apparecchiature di prova in grado di valutare, in modo rapido, preciso e affidabile, le condizioni di portanza ed addensamento dei materiali in opera e di poter essere pertanto adottate come strumento di verifica e controllo delle lavorazioni di cantiere.

Tra queste si è presa in considerazione la strumentazione denominata *Light Falling Weight Deflectometer (LFWD)* o più semplicemente *Piastra Dinamica* per la realizzazione dello studio sperimentale in seguito descritto.

Per indagare le potenzialità del *Light Falling Weight Deflectometer* nella valutazione della portanza e dell'addensamento dei terreni in sito sono stati effettuati diversi studi, nei quali si è cercata una correlazione tra i parametri ottenuti attraverso questo strumento con quelli delle attrezzature tradizionali e sono state eseguite applicazioni in campi sperimentali, come la geostatistica, per ottenere la standardizzazione dei controlli sulla compattazione.

Al fine di valutare le potenzialità del *LFWD* sul campo e fornire un primo metro di paragone con il tradizionale *PLT*, sono state svolte numerose sperimentazioni che hanno previsto il confronto tra i moduli di deformazione ottenuti con la *Piastra Dinamica* (E_{vd} dinamico) e quelli determinati staticamente (M_d statico).

Uno degli obiettivi proposti è subordinato alla realizzazione di un numero significativo di prove con il *LFWD* in uno stesso punto di verifica. Si vuole anzitutto individuare l'affidabilità dello strumento nella determinazione del Modulo di deformazione del piano indagato, considerando la praticità e la maneggevolezza che riducono notevolmente le tempistiche necessarie per l'esecuzione di una singola prova, fornendo così la possibilità di aumentare il numero di prove eseguite e, di conseguenza, la superficie indagata.

Un altro obiettivo richiede la conoscenza dei parametri geotecnici di addensamento del materiale in opera ed il loro confronto con quelli determinati in laboratorio. Per valutare l'influenza che densità secca ed umidità in sito hanno nei confronti dei valori di portanza misurati con *PLT* e *LFWD* ci si riconduce al grado di addensamento ed al grado di umidità raggiunti con riferimento ai valori Proctor di laboratorio. L'esistenza di una correlazione tra i valori di portanza e di addensamento è di per sé intuibile, ma la sua definizione non è ovvia essendo essa legata al tipo di materiale investigato.

Scopo principale della sperimentazione è stato quello di correlare tra loro i valori dei Moduli di deformazione ottenuti dalle due prove condotte. La similitudine tra le prove e le loro finalità ultime suggeriscono che, tra i valori ottenuti in un medesimo punto, debba necessariamente sussistere un certo legame. Sulla base di quanto accennato in precedenza, tuttavia, tale legame non può prescindere dal tipo di materiale sottoposto a prova, dallo spessore dello strato in opera, dalle condizioni di addensamento e umidità ed, infine, dalle caratteristiche dei materiali profondi eventualmente interessati dai bulbi di carico generati dalle singole prove.

Una delle sperimentazioni svolte riguarda 80 test nell'ambito dei lavori di allungamento del circuito romano di Vallelunga, in cui sono stati esaminati 3 tipologie di materiale tufaceo e uno di lapillo.

In corrispondenza di ciascuno dei 20 punti di prova individuati in cantiere sono state condotte le prove di portanza statiche e dinamiche, nonché le determinazioni di addensamento ed umidità. La Tab. 4.6 riporta i dati ottenuti dalle varie prove: nelle ultime colonne sono indicati i valori dei rapporti tra densità secca in sito e densità secca massima Proctor e dei rapporti tra umidità in sito ed umidità ottima Proctor. [16]

n. punto	M_d [MPa]	M'_d [MPa]	M_d/M'_d	E_{vd} [MPa]	γ_s [g/cm ³]	w [%]	γ_s/γ_{smax}	w/w _{opt}
11	78.1	249.7	0.31	21.7	1.681	6.98	0.931	0.618
12	68.0	243.0	0.28	23.0	1.695	6.08	0.939	0.538
13	58.8	266.3	0.22	33.9	1.595	6.38	0.884	0.565
14	41.7	189.2	0.22	29.6	-	-	-	-
5	78.6	192.1	0.41	35.0	1.342	8.99	0.845	0.520
6	107.8	255.0	0.42	37.7	1.413	8.98	0.889	0.519
8	107.3	233.4	0.46	33.5	1.378	8.76	0.867	0.506
9	69.3	193.3	0.36	32.6	1.366	7.48	0.860	0.432
1	67.8	212.7	0.32	30.6	1.362	8.24	0.836	0.528
2	55.7	241.4	0.23	29.0	1.367	10.64	0.839	0.682
3	101.6	220.6	0.46	40.0	1.476	10.36	0.906	0.664
4	99.6	272.4	0.37	40.3	1.371	9.03	0.841	0.579
10	81.3	162.7	0.50	32.7	1.387	9.34	0.851	0.599
7	89.5	223.3	0.40	36.9	1.449	6.76	0.967	0.354
15	105.8	231.9	0.46	45.6	1.495	15.82	0.998	0.828
16	75.3	226.1	0.33	43.6	1.420	11.60	0.948	0.607
17	68.5	154.3	0.44	34.5	1.338	10.52	0.893	0.551
18	52.8	121.9	0.43	35.9	1.345	10.90	0.898	0.571
19	72.9	220.6	0.33	32.2	1.428	12.39	0.953	0.649
20	100.6	309.9	0.32	28.6	1.470	9.56	0.981	0.501

Tab. 4.6 – Risultati delle prove in sito nel circuito di Vallelunga.

Dall'analisi dei valori ottenuti per le quattro determinazioni attorno a ciascun punto di prova, si può affermare che il *LWD* offre una buona ripetibilità del dato, tenuto anche conto delle seppur minime variazioni puntuali del materiale presente in sito.

Per osservare come densità e umidità del materiale in opera influiscono sui valori di portanza del piano investigato è opportuno descrivere la variazione dei Moduli di deformazione statico e dinamico in funzione del grado di addensamento e del grado di umidità raggiunti in ciascun punto di prova (Fig. 4.33).

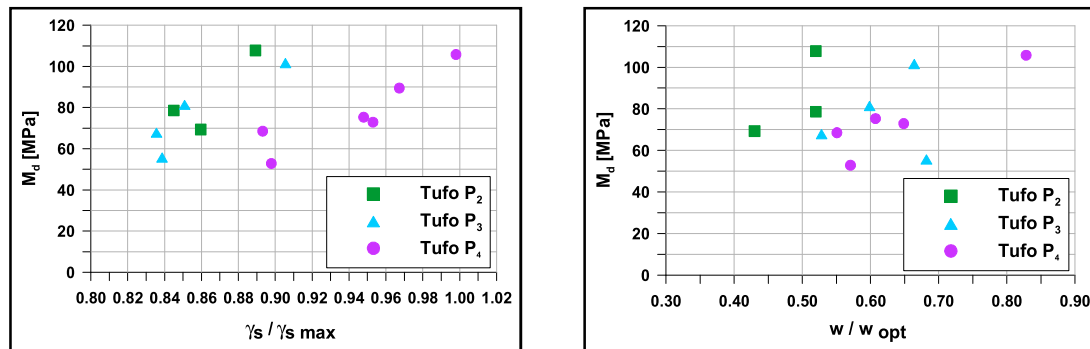


Fig. 4.33 – Andamento dei moduli di deformazione valutati nel sito di Valledunga.

L'esistenza di una correlazione tra i valori di portanza e di addensamento è di per sé intuibile, ma la sua definizione non è ovvia essendo essa legata al tipo di materiale investigato. A parità di spessori, in sostanza, ad un incremento della densità secca del materiale può corrispondere un aumento dei moduli misurati, secondo un andamento dipendente dal valore massimo teorico raggiungibile dall'addensamento stesso per quella configurazione granulometrica.

Il confronto tra i moduli di deformazione è stato condotto interpolando su un grafico le coppie di valori $M_d - E_{vd}$ relativi a punti di prova con caratteristiche di addensamento ed umidità differenti; la curva presenta un andamento crescente che testimonia l'esistenza di una correlazione tra i risultati delle due prove di carico. Adottando una regressione lineare per l'insieme di punti considerato, si può ritenere valido il legame tra M_d al primo ciclo di carico ed E_{vd} , ed esprimerlo tramite una equazione lineare il cui termine noto può variare, indicativamente, in un intervallo di ampiezza pari a circa 5 MPa:

$$E_{vd} = 0,2M_d + (18,2 \pm 2,4) \quad [\text{MPa}]$$

Esprimibile anche in funzione di E_{vd} :

$$M_d = 5,0E_{vd} - (90,9 \pm 12,0) \quad [\text{MPa}]$$

Le espressioni individuate rappresentano un risultato significativo per la sperimentazione condotta. Esse, infatti, permettono di correlare i risultati della prova di carico dinamica con quelli della prova statica (Fig. 4.34), se ricavati dal medesimo materiale ed in condizioni di spessore, addensamento ed umidità omogenee. L'estensione delle relazioni a materiali diversi può tuttavia condurre a risultati non attendibili. A parità di configurazione geometrica degli strati, infatti, occorre anche considerare le variabili addensamento ed umidità del materiale investigato che, per quanto visto, sono in grado di influenzare in misura differente i risultati delle due prove e, conseguentemente, anche lo sviluppo del loro legame.

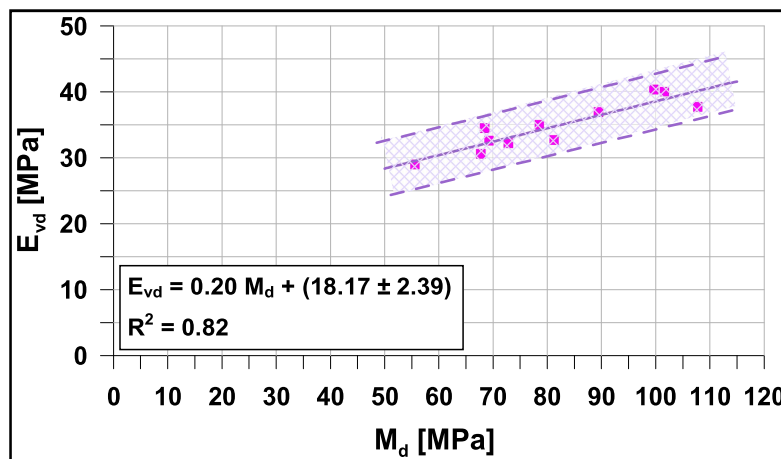


Fig. 4.34 – Relazione M_d - E_{vd} per le sezioni di Vallelunga.

4.3.2 Sperimentazioni sull'utilizzo di dispositivi LFWD

La comunità scientifica sta recentemente concentrando le proprie attenzioni sui dispositivi *LFWD*; l'attività di ricerca DICAM svolta sullo studio delle proprietà meccaniche di materiali compattati rientra in quest'ottica e ha messo in evidenza le potenzialità di queste apparecchiature in termini di rapidità dei test e di affidabilità dei risultati.

I risultati ottenuti attraverso queste sperimentazioni hanno dimostrato l'utilità di queste procedure per la stima dei livelli di compattazione e hanno messo le basi per ulteriori

indagini svolte per effettuare correlazioni anche con i sistemi di compattazione intelligente.

Il DICAM in collaborazione con il DIC (Università di Pisa) ha condotto numerosi studi sulla comparazione di diversi dispositivi deflettometrici *LFWD* per standardizzare la procedura di utilizzo di questo tipo di strumento all'interno delle procedure per il controllo sulla compattazione. [17]

Sono stati valutati e confrontati i moduli di deformazione dinamici ottenuti per mezzo di diversi strumenti *LFWD*, le cui caratteristiche si riportano nella Fig. 4.35.

Description	Zorn ZFG 2000	Dynatest LWD 3031
Drop Weight	10/15 kg	10/15 kg
Drop Height	720 mm	Variable
Diameter of Plate	300 mm	150/200/300 mm
Plate Thickness	20 mm	17 mm
Load Cell	No	Yes
Peak Force	Nominal 7.07/10.6 kN	Variable
Settlement Sensor	Accelerometer	Geophone

Fig. 4.35 – Deflettometri utilizzati nella sperimentazione.

Anche se concettualmente simili i vari deflettometri possiedono differenze tecniche che possono influenzare la determinazione dei moduli.

I test sono stati svolti su numerosi materiali per strati di sottofondo, fondazione e base di sovrastrutture stradali.

La Fig. 4.36 mostra le correlazioni tra i due strumenti valutate nella sperimentazione nella fase svolta su materiali stabilizzati.

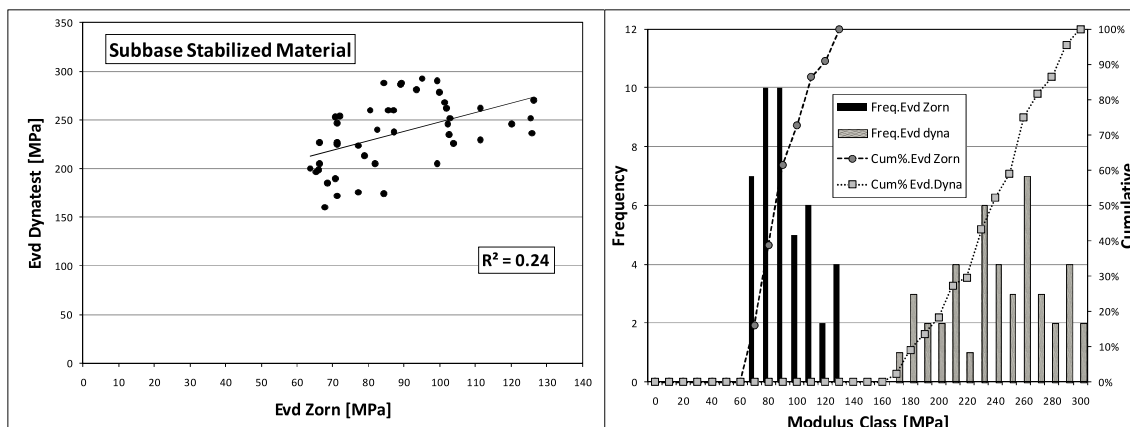


Fig. 4.36 – Correlazione tra *Edyn* e *Ezorn* per materiali stabilizzati.

I risultati mostrano una chiara perdita di correlazione e un aumento della dispersione dei dati con l'aumento della rigidità dei materiali. La *DYNATEST LWD* fornisce valori dei moduli più elevati rispetto alla *Zorn ZFG*, specialmente alle alte rigidità.

In particolare si nota come, negli stessi punti, E_{zorn} fornisca valori variabili tra (60÷140) MPa, mentre E_{dyn} sia compreso in un gamma più ampia, tra (90÷270) MPa.

La correlazione tra i moduli è continuata con il confronto tra *LFWD* e *FWD*, secondo le procedure redatte dall'ANAS (Fig. 4.37). [18]

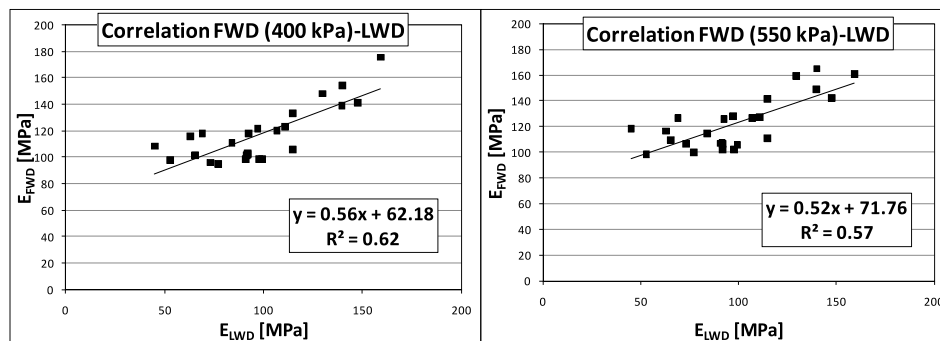


Fig. 4.37 – Correlazione *LFWD-FWD*.

Un altro studio di confronto tra i diversi dispositivi *LFWD* ha previsto l'ottenimento di un miglioramento nelle tecniche di elaborazione dei dati e di interpretazione dei risultati attraverso l'applicazione di nozioni di Geostatistica. [19]

Si ritiene, come ipotesi di partenza, che i sistemi basati sulla Geostatistica forniscano risultati utili all'esecuzione del controllo di qualità e dell'assicurazione di qualità (QC/QA) per sottofondi, strati di base e strati di terreno compattato.

La sperimentazione è stata svolta sui vari campi prova, con l'utilizzo dei due strumenti *LFWD* precedentemente descritti (Fig. 4.35). I risultati ottenuti, in termini di moduli di deformazione, sono stati analizzati in seguito attraverso simulazioni FEM.

Le indagini sono state istituite nei campi prova nominati in precedenza al fine di acquisire conoscenze su alcuni aspetti del funzionamento dei due dispositivi. I punti di campionamento sono stati disposti in modo tale da fornire una caratterizzazione uniforme nello spazio (Fig. 4.38).

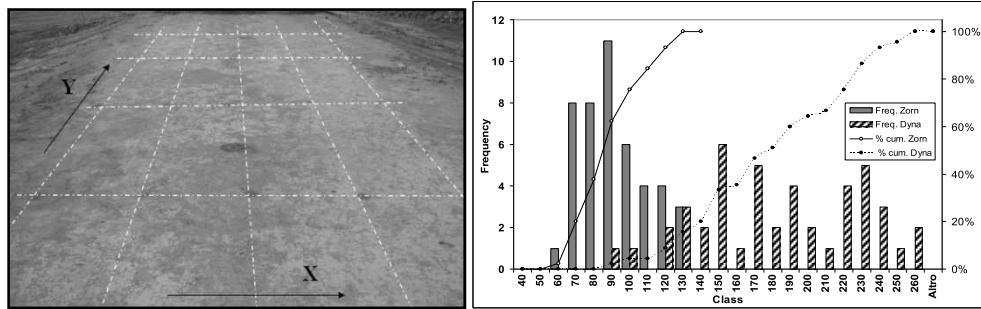


Fig. 4.38 – Griglia dei punti d'esame (campo prova di Nepi) e istogramma dei moduli E_{dyn} e E_{zorn} .

I materiali utilizzati sono stati selezionati tra quelli comunemente adottati nella costruzione di strade, tra cui aggregati non legati, terreni stabilizzati a calce o a cemento e materiali riciclati.

La valutazione e interpretazione dei valori di portanza richiede l'analisi preliminare dei dati ottenuti sulla base di un approccio statistico.

Dall'istogramma delle frequenze dei moduli ottenuti con i due strumenti si è giunti alla conferma che i due deflettometri forniscono valori diversi, nelle modalità già viste.

Si riportano in Fig. 4.39 i dati relativi ai punti della griglia del sito nelle direzioni X e Y.

Si osserva che la distribuzione dei moduli ottenuta con i due dispositivi, in questo caso, è simile.

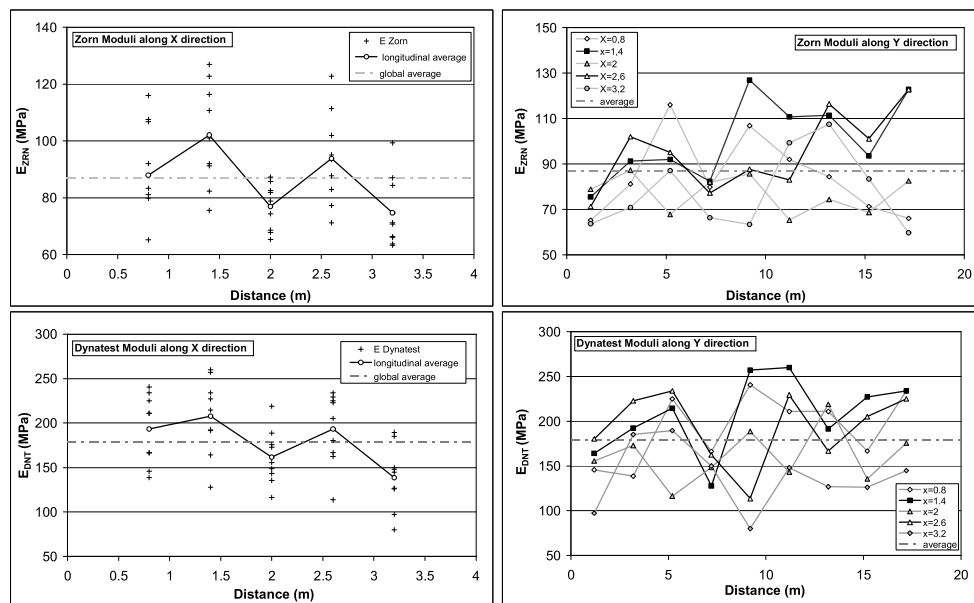


Fig. 4.39 – Proiezione marginale di E_{dyn} e E_{zorn} lungo X e Y.

Questi valori riflettono la geometria del rullo utilizzato per la compattazione e il numero di passaggi effettuati con esso.

In entrambe le direzioni si osservano valori di picco al centro delle fasce compattate, mentre ai bordi e lungo l'interasse tra le due fasce, che corrisponde all'asse principale, si hanno i valori più bassi.

A questa analisi preliminare è seguita un'applicazione della Geostatistica per ottenere informazioni più dettagliate.

La Geostatistica studia grandezze georeferenziate utilizzando informazioni ottenute dal campionamento. In particolare si analizza la variabilità spaziale dei parametri che descrivono tali grandezze, con un approccio probabilistico, vale a dire tramite una funzione variogramma che misura la semi-varianza dell'incremento variabile in funzione della distanza tra due punti di misurazione (Fig. 4.40).

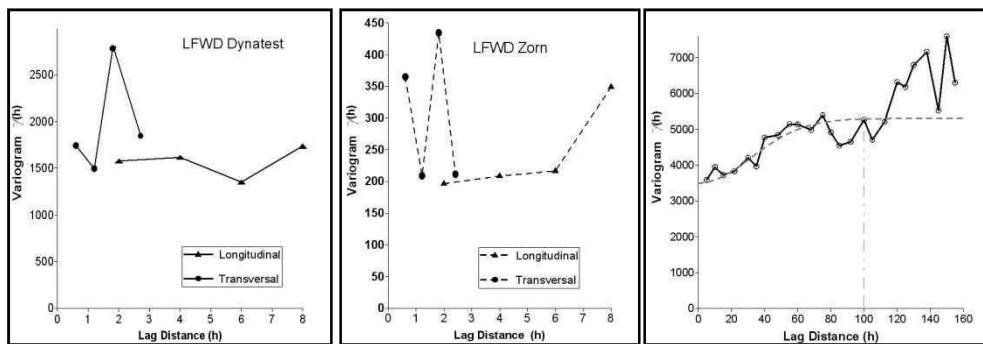


Fig. 4.40 – Variogrammi per Edyn e Ezorn lungo X e Y.

Il variogramma nelle due direzioni è diverso, in accordo con l'analisi preliminare dei dati grezzi (Fig.4.39). Tuttavia la tendenza rimane comparabile per i due dispositivi. Il modulo sembra mostrare una certa periodicità dei punti di massimo, suggerendo l'esistenza di anisotropia spaziale generata dai rulli. Questo fenomeno è stato rilevato in molti siti analizzati, indipendentemente dal materiale utilizzato.

Attraverso i dati ottenuti è stato possibile creare, per entrambi i dispositivi, una mappatura dell'andamento del modulo di deformazione (Fig. 4.41).

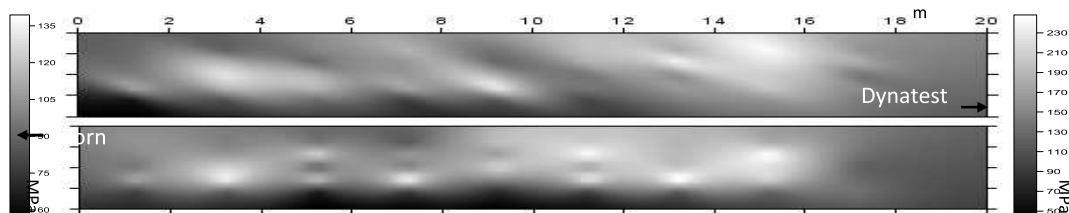


Fig. 4.41 – Mappatura dei moduli per i due dispositivi.

La mappatura produce risultati analoghi a quelli visti nei variogrammi.

In definitiva dalla Geostatistica è possibile ottenere informazioni sui dati, in questo caso sui moduli, relative alla loro distribuzione spaziale e alla precisione ottenuta in funzione del numero di punti analizzati e la loro localizzazione. Questo tipo di analisi risulta ideale per l'interpretazione dei risultati ottenuti tramite LFWD, che riguardano un elevato numero di punti d'esame.

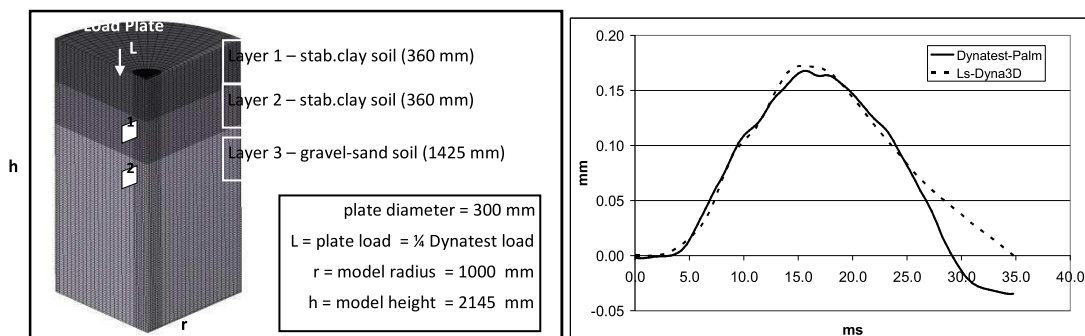
Un'ulteriore analisi possibile per valutare i motivi delle differenze rilevate nei moduli calcolati con i due strumenti è quella con il metodo degli elementi finiti (FEM).

Questa analisi è iniziata con una serie di test di laboratorio per valutare la forma dell'impulso trasmesso al suolo dalla piastra. Quindi si è passati alla misurazione della cella di carico dinamica dei carichi generati dal LFWD all'interno di un terrapieno naturale. Infine è stato ricreato un modello multistrato agli elementi finiti, per osservare la distribuzione e la storia delle tensioni generate dai due diversi dispositivi in funzione della profondità.

Il modello di materiale adottato per gli strati di terreno è stato appositamente sviluppato da *FHWA (Federal Highway Administration)*. Questo modello è isotropo ed è applicabile a tutti i tipi di terreno, attraverso l'inserimento dei giusti coefficienti per ciascun materiale. Esso è stato calibrato utilizzando il *DYNATEST LWD*. La Fig. 4.42 riporta i parametri più significativi che costituiscono il modello ai fini dell'esecuzione di test con LFWD, e la fig. 4.43 il multistrato assiale del modello, per il quale è stata affinata la maglia nel nucleo sotto la piastra.

Layer	K	G	ν	E	E_{FWD}	$E_{FWD}-E$	Difference
name	MPa	MPa		MPa	MPa	MPa	%
Layer 1	180	152	0.17	356	364	7.6	2.1
Layer 2	271	229	0.17	535	521	-14.6	-2.8
Layer 3	118	39	0.35	106	109	2.8	2.6

Fig. 4.42 – Parametri principali del modello adottato.



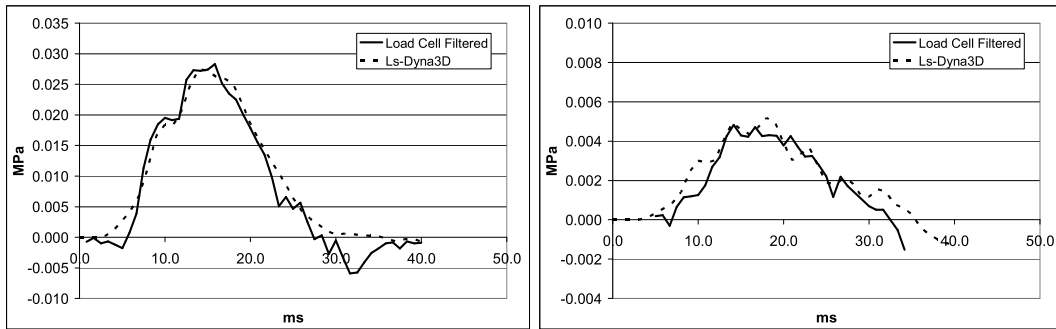


Fig. 4.43 – Multistrato, abbassamento superficiale e sollecitazioni a 360 mm e a 720 mm di profondità.

Attraverso questo modello è stata eseguita una simulazione, applicando la stessa forza superficiale di picco, al fine di comparare le tensioni e gli sforzi prodotti sul terreno dai due dispositivi.

I risultati di questa sperimentazione mostrano come la differenza principale tra i due dispositivi stia nei tempi di carico (Fig. 4.44); le curve di deflessione sono più marcate per il dispositivo *Zorn* e l'evento ad esso associato ha una durata più breve. Le deformazioni superficiali sono simili e lo stesso vale per l'ampiezza delle sollecitazioni subite in profondità.

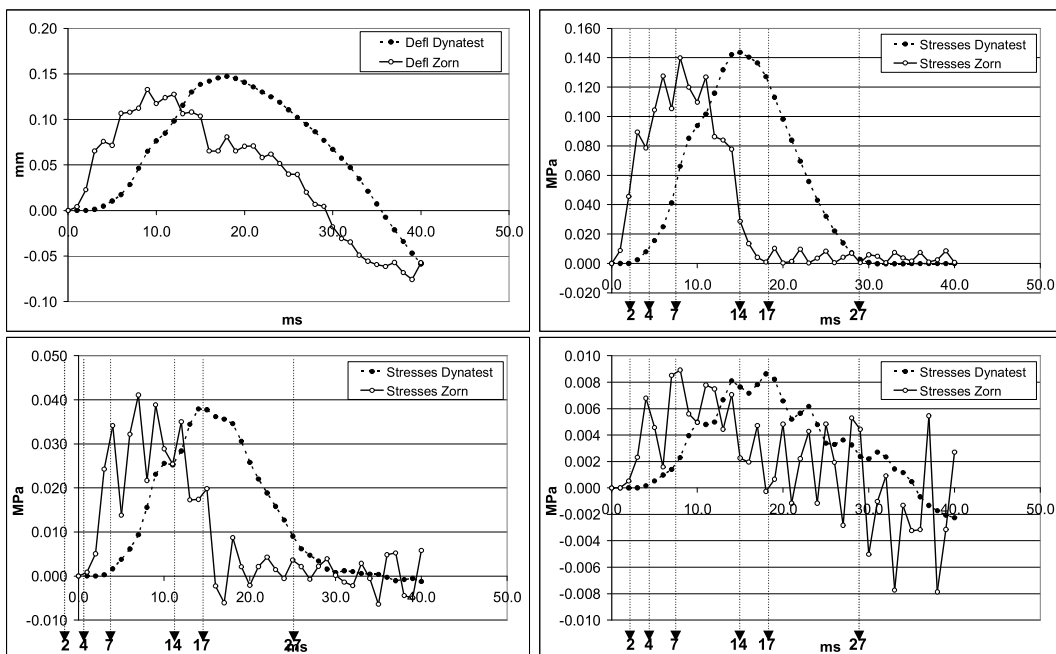


Fig. 4.44 – Risultati della simulazione con metodo agli elementi finiti.

4.3.3 Confronto tra i metodi di compattazione intelligente e test con *LFWD* [21]

La valutazione della capacità portante per gli strati di sottofondo e fondazione delle pavimentazioni stradali si sta evolvendo verso l'utilizzo di tecniche sempre più recenti con il conseguente passaggio dalle prove tradizionali (*PLT*) a test attraverso *LFWD* e a procedure ancora più moderne come il *Continuous Compaction Control (CCC)* e la Compattazione Intelligente (*IC*).

La maggior parte dei compattatori vibranti oggi è in possesso di dispositivi in grado di valutare il livello di rigidità dello strato compattato con precisione decimetrica direttamente durante la compattazione.

D'altra parte attraverso i test con *LFWD* si è visto come sia possibile definire rapidamente un modello del grado di addensamento raggiunto al fine di valutare se la rigidità della superficie è conforme ai requisiti richiesti.

La sperimentazione condotta congiuntamente da DICAM e da DIC ha cercato di integrare i metodi *CCC – IC* con quelli *LFWD* al fine di ottenere un sistema di valutazione incrociato.

Il sito di prova è stato costruito su un terrapieno naturale su cui è stata costruita una nuova strada, ad Altopascio (LU). I 40 cm di strato analizzato è stato realizzato con due materiali diversi: materiale classificato A 2-5 e materiale C&D.

Ogni campo di prova è stato suddiviso in 3 strisce al fine di compattare gli strati con un numero variabile di passaggi dei rulli (Fig. 4.45). Per eseguire la sperimentazione su materiale confinato le banchine (shoulders) sono state pre-compattate con 8 passaggi di rulli.

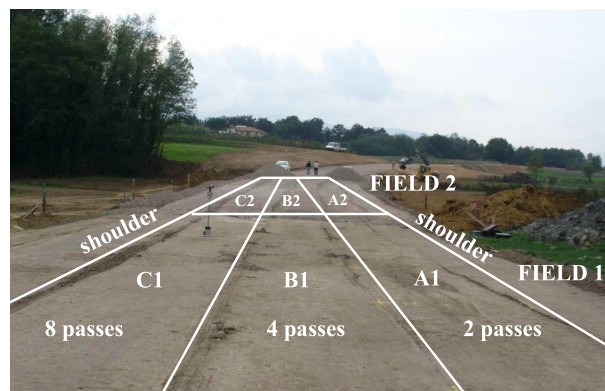


Fig. 4.45 – Sito di prova, Altopascio (LU)

La compattazione automatica (*IC*) di ogni striscia è stata effettuata attraverso il rullo vibrante Bomag BW 213 DH con sistema di analisi Variocontrol Base. Questo sistema è in grado di fornire in continuo il valore del modulo *Evib* (MPa) in funzione della distanza percorsa.

Sono stati effettuati 2 passaggi con rullo nella prima striscia, 4 nella seconda e 8 nella terza, a velocità costante e con varie ampiezze di vibrazione.

Dopo la compattazione sono stati eseguiti test con diversi strumenti *LFWD* su un elevato numero di punti prova (3 punti per sezioni a distanza di 5 metri per ciascuna striscia).

Si è stabilito che un minimo di 3 prove per fila è necessario per verificare l'omogeneità trasversale della compattazione.

Si riporta nella Fig. 4.46 i risultati forniti dal sistema Variocontrol relativi al valore di *Evib* al primo passaggio del rullo (prima riga) e ai successivi per tutte le fasce compattate.

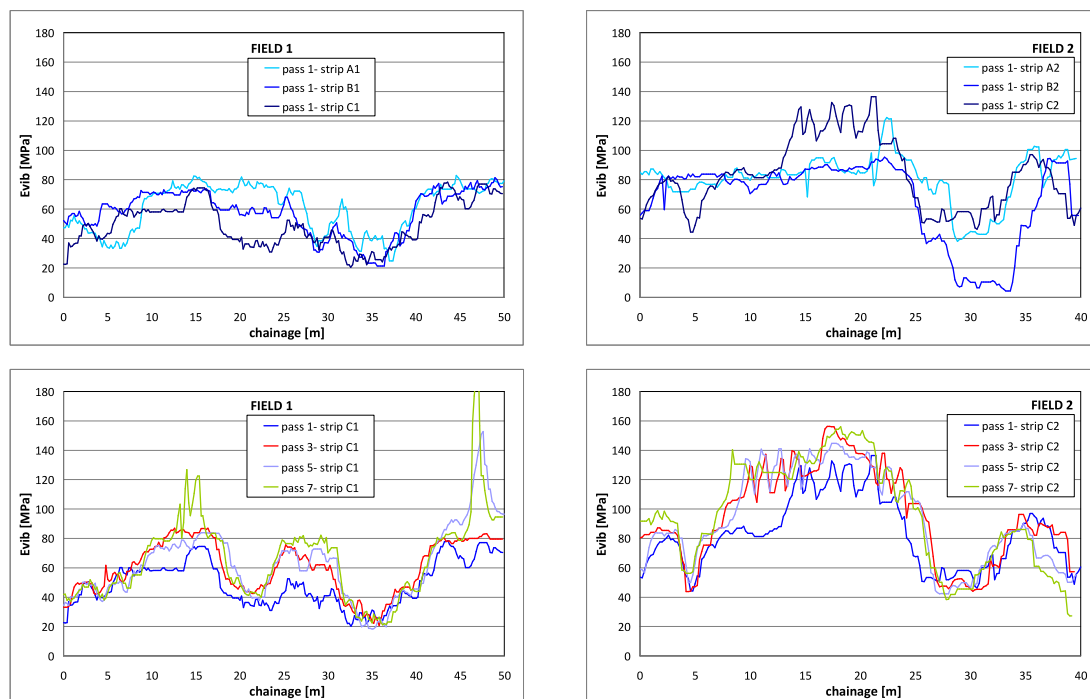


Fig. 4.46 – Output del sistema Variocontrol.

Dopo la compattazione automatica i campi prova sono stati compattati anche in modalità manuale controllata (*CCC*) per verificare ulteriormente i valori di rigidità

ottenuti. In questo caso l'ampiezza di vibrazione viene lasciata costante senza preoccuparsi del valore di rigidità finale ottenuto.

La differenza fondamentale nel valore del modulo ottenuto rispetto alla modalità di compattazione automatica è imputabile alla profondità di indagine ottenuta, come si nota nella Fig. 4.47 che riporta il confronto tra i due sistemi di compattazione (tratteggiate le curve riferite al CCC). Dai risultati ottenuti non è possibile stabilire quale dei due metodi fornisca il valore più corretto di *Evib*.

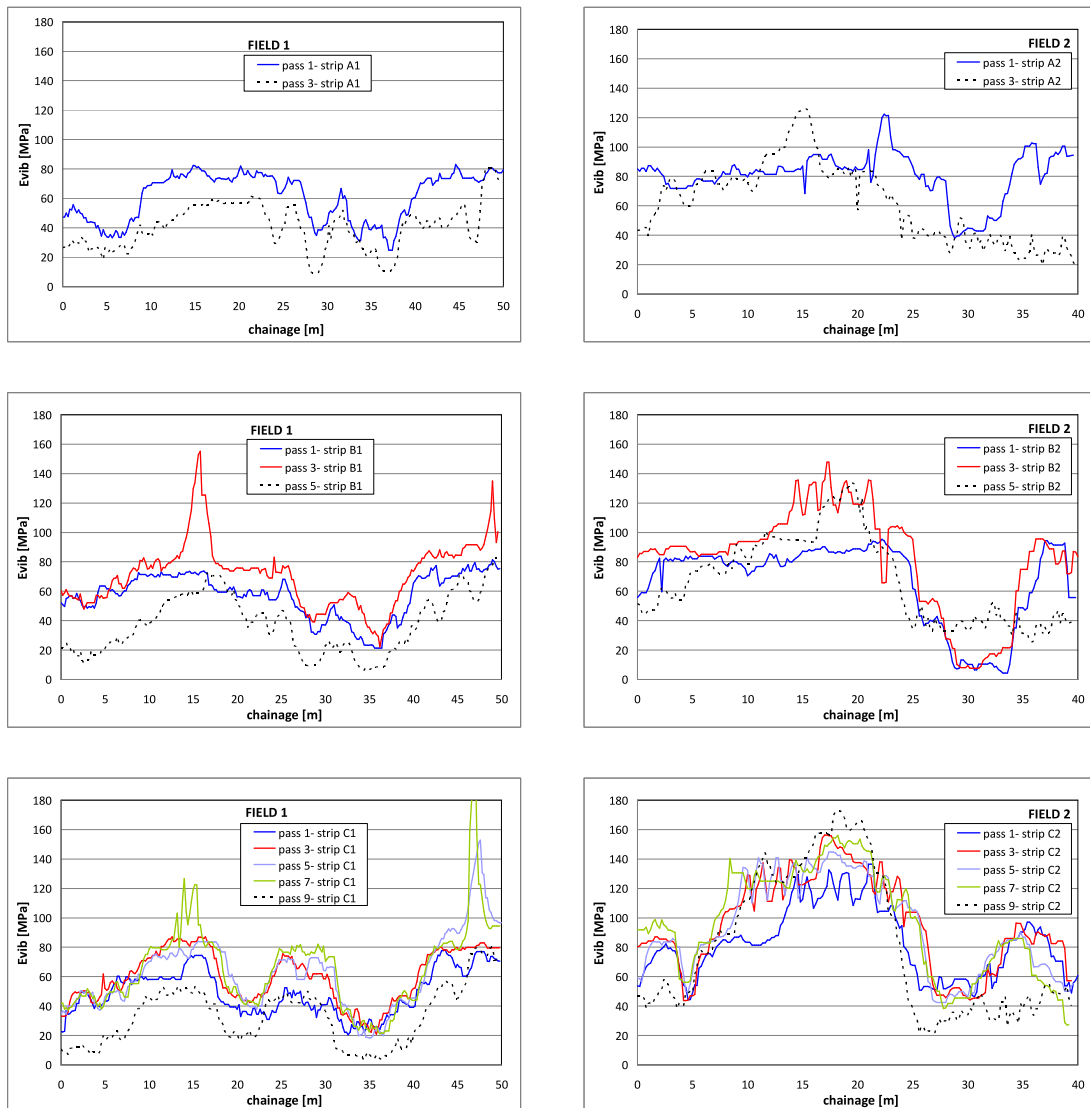


Fig. 4.47 – Confronto IC-CCC.

Più significativo è il confronto tra il modulo *Evib* ottenuto con le tecniche di compattazione e il modulo *Evd* valutato attraverso i test *LFWD* (Fig. 4.48).

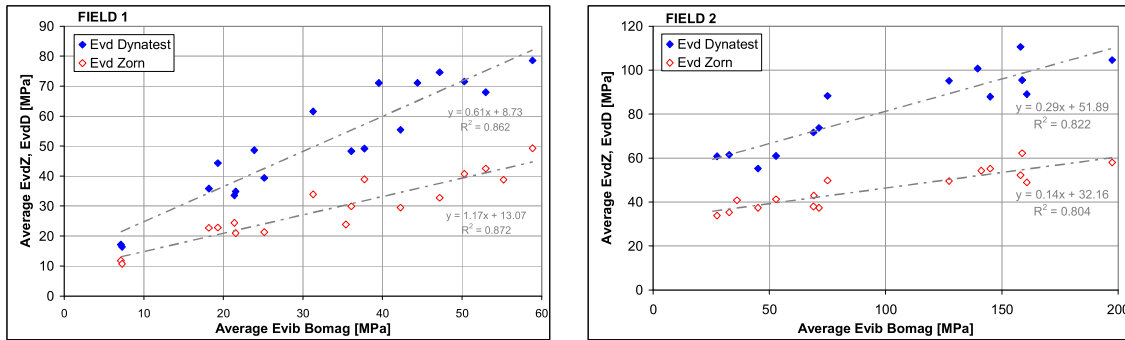


Fig. 4.48 – Correlazione tra *Evd* calcolato con *LFWD* e *Evib* ottenuto con Bomag *CCC*.

Si osserva che i moduli sono sulla stessa scala, per cui si può affermare che lo spessore coinvolto dal passaggio dei rulli è paragonabile a quello analizzato dal test eseguito con *LFWD*.

I moduli sono calcolati sulla base dello stesso principio teorico di cui si è fatto cenno nei paragrafi precedenti; le differenze nei valori sono quindi imputabili alle diverse attrezzature utilizzate per calcolare ciascun modulo dinamico, con la convinzione, però, che una correlazione tra essi sia possibile e verificabile.

La sperimentazione effettuata ha evidenziato come l'integrazione tra *CCC* e *LFWD* sia attuabile, a patto che caso per caso sia possibile ricostruire la relazione tra i moduli attraverso sistemi di controllo sui rulli vibranti e test *LFWD*.

Sulla base di quanto visto le moderne strumentazioni *LFWD*, oltre a sostituire le tecniche di valutazione della portanza tradizionali, possono dunque essere utilizzate anche per calibrare i recenti sistemi di controllo continuo della compattazione.

L'oggetto principale del dibattito scientifico è l'influenza che su queste osservazioni ha il tipo di materiale utilizzato. Su questo tema rientra una possibile via futura della sperimentazione sugli strati di terreno argilloso trattato a calce.

4.3.4 Utilizzo dei sistemi IC – CCC integrati a prove deflettometriche [21]

Per concludere la panoramica sulla ricerca svolta si riportano le informazioni relative a un altro studio sulla valutazione dell'utilizzo dei sistemi di compattazione IC - CCC e di prova FWD - LWD come metodi di validazione integrata. La sperimentazione è stata condotta nel campo prove di Imola su materiale di riciclo, vale a dire rifiuti da costruzione e demolizione (C&D).

Questi scarti, un tempo stoccati e smaltiti in discarica, rappresentano una considerevole risorsa sia ambientale che economica.

Il sito sperimentale è stato costruito attraverso la posa di 4 differenti tipologie di miscele, a costituire un rilevato a doppio strato dello spessore complessivo di 80 cm. Tra le miscele disponibili in impianto si sono impiegate quelle riportate in Fig. 4.49.

TAB. 1 MATERIALI DI RECUPERO PER IL RIEMPIMENTO

Rilevato	Materiale 0/30 mm	Composizione delle miscele
Campo 1	Macinato misto di pietra	65% demolizione mista, 20 % loppa di fonderia, 15% gres
Campo 2	Stabilizzato di traversine	50% traversine, 50% roccia arenaria
Campo 3	Stabilizzato di cls frantumato	100% cls
Campo 4	Stabilizzato di cls e fresato bituminoso	50% fresato, 50% stabilizzato di cls

Fig. 4.49 – Materiali di recupero per il riempimento.

L'area di prova è stata preparata operando uno scotico superficiale per una profondità media di 40 cm, e scavando una serie di fossi laterali di scolo.

Si è poi proceduto al riempimento dello scavo con i materiali di recupero scelti per la formazione di un primo strato dello spessore di 40 cm. Un secondo strato di 40 cm è stato posato a completare il rilevato sperimentale. Il piano di sottofondo ed i piani finiti di ciascuno strato sono stati compattati con un rullo Bomag BW213 dotato di Variocontrol. La compattazione è stata eseguita in due fasce parallele adottando un numero di rullate prefissate ed impostando manualmente l'ampiezza di vibrazione.

Oltre ai controlli CCC condotti con rullo, si sono eseguite in sito una serie di prove deflettometriche realizzate con apparecchiature sia di tipo portatile (LWD) che standard (FWD). I test sono stati effettuati sul sottofondo naturale, sul primo strato di riempimento e sul secondo strato in rilevato seguendo rispettivamente uno schema a maglia regolare per l'LWD e gli assi di ogni fascia di compattazione ad intervalli di 3 m per l'FWD (Fig. 4.50).

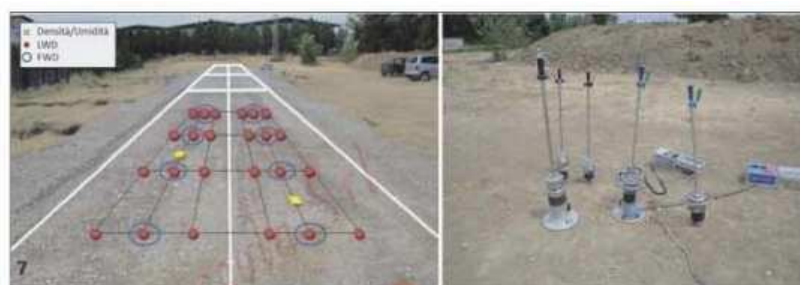


Fig. 4.50 - Schema delle prove per ogni campo e apparecchiature LWD.

Le caratteristiche delle apparecchiature utilizzate sono riportate in Fig. 4.51.

<i>Descrizione</i>	<i>LWD ZFG 2000 Zorn</i>	<i>DYNATEST LWD 3031</i>	<i>LWD TERRATEST 3000</i>
Massa	10/15 kg	10/15 kg	10/15 kg
Altezza di caduta	720 mm	variabile	720 mm
Diametro della piastra	300 mm	150-200-300 mm	300 mm
Spessore della piastra	20 mm	17 mm	20 mm
Forza di picco	7.07/10.6 kN	variabile	7.07/10.6 kN
Sensore di spostamento	Accelerometro	Geofono	Accelerometro

Fig. 4.51 – Caratteristiche delle apparecchiature LWD impiegate.

A seguito di una preliminare analisi dei principali risultati, è possibile evidenziare le seguenti considerazioni:

- I valori medi dei moduli resilienti ottenuti sulla sommità del rilevato con prove FWD e LWD eseguite a poche ore dalla posa in opera dei 4 materiali, soddisfano i requisiti dei principali Capitolati italiani (ad es. Anas, 2009). Si riportano in Fig. 4.52, a titolo di esempio, le time history delle 8 deflessioni dei geofoni ottenute per un singolo colpo FWD.

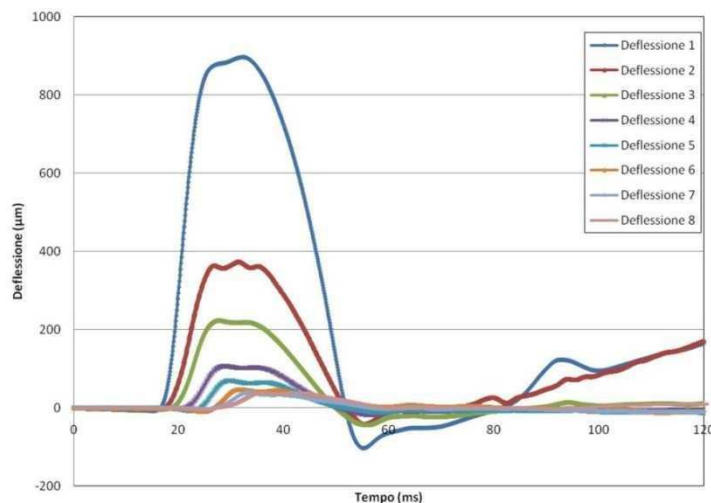


Fig. 4.52 – Deflessioni per singolo colpo con FWD.

- L'efficacia dei materiali posati, in termini di portanza, si evidenzia anche attraverso l'aumento del modulo di compattazione ottenuto con sistema Variocontrol. In particolare, a parità di numero di passate per ciascuno strato, gli 80 cm di pacchetto

producono rigidzze 9-10 volte superiori a quelle del terreno naturale di sottofondo (Fig. 4.53). Inoltre, si nota come la compattazione comporti un incremento dei moduli Evib all'aumentare del numero di passate per tutti e 4 i materiali del sito, esibendo incrementi più marcati tra la terza e la quinta passata.

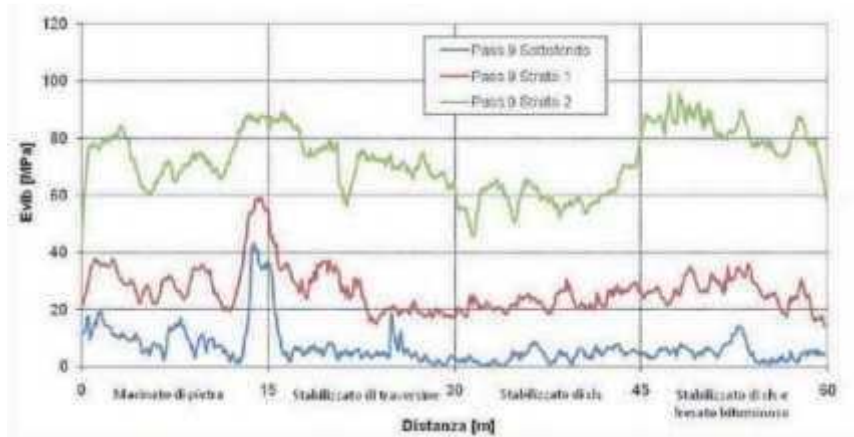


Fig. 4.53 – Evib a parità di passate er strato.

- Le tre tipologie di LWD utilizzate, di diversa struttura ma di uguale concezione, sono in prima analisi correlabili tra loro. In particolare, vi è una significativa correlazione sia tra i 2 sistemi privi di cella di carico Zorn e Terratest, sia tra questi ed il dispositivo Dynatest dotato di cella di carico. La Fig. 4.54 evidenzia come la possibilità di correlare i dati dei 3 strumenti sia comunque legata alle caratteristiche dei diversi materiali posti in opera.

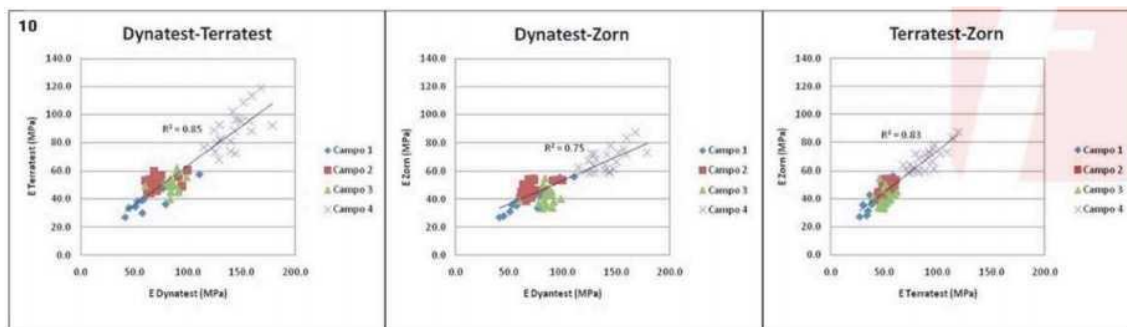


Fig. 4.54 – Correlazioni fra i tre dispositivi per uno stesso strato.

- Nella Fig. 4.55 si riportano a titolo esemplificativo le mappature ottenute applicando le elaborazioni geostatistiche ai dati CCC e LWD-Dynatest per lo strato 2. Indipendentemente dai valori assoluti assunti dai moduli, si osservano trend confrontabili nella distribuzione spaziale di Evib ed Elwd, ad indicare una medesima sensibilità dei due diversi sistemi alle variazioni di portanza e, quindi, una effettiva possibilità di integrazione tra gli stessi nei procedimenti di verifica e controllo dei

lavori.

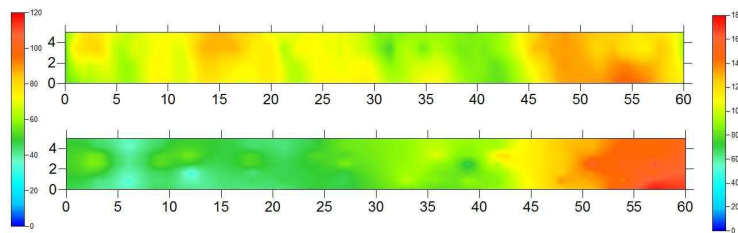


Fig. 4.55 – Mappature geostatiche dei dati CCC e LWD Dynatest.

Alla luce delle elaborazioni preliminari dei dati acquisiti dall'esperienza svolta presso il campo sperimentale di Imola si può affermare che i materiali derivanti da un processo mirato di riciclaggio sono in grado di fornire risultati paragonabili, se non superiori, a quelli ottenibili da aggregati vergini nella formazione di un rilevato. In particolare, quei C&D che contengono macinati di calcestruzzo e conglomerati bituminosi restituiscono moduli di portanza eccellenti già a poche ore dalla posa; la maturazione dei leganti in essi contenuti prefigura incrementi delle risorse meccaniche nel tempo attualmente oggetto di specifici approfondimenti di indagine.

Con riferimento alla compattazione ed al controllo delle lavorazioni, si può affermare che l'affiancamento delle tecniche deflettometriche alle misurazioni con rullo intelligente può fornire un contributo significativo ai processi di verifica sia in termini di tempo, sia in termini di rappresentatività del dato, applicando vantaggiosamente le tecniche di elaborazione geostatistica.

4.3.5 Scheda di Ricerca: Procedure in sito per il controllo *PRE, IN ITINERE* e *POST* lavorazioni.

SCHEDA DI RICERCA – Procedure in sito per il controllo <i>PRE, IN ITINERE</i> e <i>POST</i> lavorazioni	
OBIETTIVO	Stabilire una procedura completa delle operazioni e dei controlli da effettuare in sito nei lavori di stabilizzazione a calce, con l'utilizzo previsto di metodologie e strumentazioni tradizionali e/o innovative.
ATTIVITÀ	<ul style="list-style-type: none"> • Tesi di Laurea: <i>Valutazione prestazionale in sito delle stabilizzazioni dei terreni per mezzo dei leganti idraulici</i> (Ing. R. Mazza). • Tesi di Laurea: <i>Studio delle procedure di progettazione e controllo tradizionali e innovative per le stabilizzazioni a calce di terreni argillosi</i> (Ing. A. Magi). • Pubblicazioni: <i>Misura della portanza con il Light Falling Weight Deflectometer (LFWD) - Strade e Autostrade</i> (Dott. Ing. C. Sangiorgi). • Pubblicazioni: <i>PLT e LFWD: confronto tra prove di carico su piastra statiche e dinamiche – Strade e Autostrade</i> (Dott. Ing. C. Sangiorgi, Dott. Ing. V. Vignali). • Pubblicazioni: <i>Comparing Light Weight Deflectometers to standardize their use in the compaction control - 5th INTERNATIONAL CONFERENCE BITUMINOUS MIXTURES AND PAVEMENTS</i> (C. Sangiorgi, C. Lantieri, A. Marradi, G. Betti). • Pubblicazioni: <i>A preliminary comparison of Continuous Compaction Control and Portable FWD systems for Qc/Qa”</i> – Articolo ICTI (C. Sangiorgi, C. Lantieri, A. Marradi, U. Pinori). • Pubblicazioni: <i>Dynamic field assessment of bearing capacity for pavement subgrades and foundations</i> – Articolo ICTI (C. Sangiorgi, C. Lantieri, A. Marradi, U. Pinori). • Pubblicazioni: <i>Indagine sugli aggregati da C&D - Articolo da Le Strade</i> (C. Sangiorgi, C. Lantieri, A. Marradi, A. Bonoli, F. Petretto).
RISULTATI	<p>L'attività svolta ha permesso di stabilire una procedura completa e elaborata nella corretta successione temporale di tutte le operazioni e dei controlli ad esse collegati da effettuare in sito.</p> <p>Per ottenere questo risultato sono state necessarie nozioni inerenti alle fasi precedenti della procedura di trattamento a calce e più generali sulla realizzazione di strati di pavimentazioni stradali in sito.</p> <p>I controlli inseriti nella procedura hanno lo scopo di valutare i parametri meccanici in sito più importanti: densità, umidità e portanza. Altri controlli sono effettuati sulle singole operazioni e riguardano il corretto dosaggio della calce, la qualità e l'uniformità della miscelazione</p> <p>Attraverso tali determinazioni si effettuano le correlazioni con gli stessi parametri valutati in laboratorio o con i requisiti richiesti da norme o Capitolati Prestazionali necessarie per qualificare il trattamento effettuato.</p> <p>La ricerca ha evidenziato come sia possibile effettuare questi controlli nelle miscele di terra e calce attraverso attrezzature e tecniche tradizionali utilizzate in ambito stradale sui terreni naturali o legati.</p> <p>Si è inoltre confermato l'utilizzo di tecnologie più recentemente sviluppate che portano alle stesse valutazioni ma con risparmi in termini temporali ed</p>

economici. Tra queste si ricordano le metodologie di Compattazione Intelligente e la valutazione della portanza attraverso lo strumento denominato *LFWD*.

Gli studi sulla maggior parte delle tecnologie innovative inserite in questo ramo della ricerca sono tutt'ora all'attenzione della comunità scientifica, che sta effettuando importanti sperimentazioni sull'ambito di utilizzo dei singoli strumenti e sulle possibili integrazioni operative tra esse.

Nello studio degli strati stradali più profondi l'integrazione operativa che ad oggi sembra maggiormente significativa prevede l'utilizzo della tecnica *LFWD* per sostituire i metodi tradizionali di valutazione della portanza e del grado di addensamento e per calibrare i moderni sistemi di controllo automatico o continuo della compattazione.

L'attività di ricerca svolta attraverso la realizzazione di diversi campi prova, ha visto importanti applicazioni relative all'utilizzo del *LFWD*. In particolare si ricordano:

- Correlazioni della tecnica *LFWD* con le metodologie tradizionali (*PLT* e *FWD*) che nell'ambito trattato forniscono fondamentali informazioni preliminari.
- Utilizzo e confronto in numerosi campi prova di diverse tipologie di *LFWD*, per valutare l'affidabilità e la variabilità dei risultati ottenuti con questa metodologia.
- Introduzione di tecniche specifiche come la Geostatistica e metodi agli elementi finiti (FEM) per elaborare e raffinare i risultati ottenuti da test con *LFWD*.
- Sperimentazione finalizzata alla correlazione e all'integrazione delle tecniche di compattazione intelligente con quelle che utilizzano lo strumento *LFWD*.

E' necessario approfondire tali sperimentazioni nell'ambito specifico dei trattamenti a calce dei terreni argillosi.

Capitolo 5 – STUDIO SPERIMENTALE DELLA REAZIONE ESOTERMICA

Una reazione esotermica è un particolare processo esoergonico durante il quale viene liberata energia in forma di calore. Se lo scambio avviene sotto forma di calore sensibile, al processo esotermico corrisponderà un aumento di temperatura dell'ambiente, se sotto forma di calore latente si avrà un passaggio di stato.

La reazione della calce con l'acqua, che fa instaurare i processi di presa e indurimento della miscela terra-calce, è esotermica; si ha dunque, oltre all'assorbimento di parte dell'acqua presente nella miscela, produzione di calore.

L'aumento di temperatura prodotto dal trattamento a calce è pressoché istantaneo subito dopo la miscelazione. La sua entità dipende da diversi fattori interni, tra cui le caratteristiche chimiche del terreno, la reattività della calce, la qualità dell'acqua e da fattori legati all'area in cui si sta operando, come la temperatura ambientale, le condizioni meteo e le condizioni di umidità presenti in sito.

L'attività di ricerca svolta grazie alla convenzione DICAM – CGS Group ha permesso di effettuare valutazioni analitiche sulla variazione di temperatura tramite verifiche in laboratorio e, con questo studio, in sito. L'obiettivo è poter introdurre la temperatura tra i parametri indice della qualità del trattamento e stabilire quale siano le analisi per valutarla correttamente.

5.1 Analisi in laboratorio della temperatura interna con strumentazione classica

Il primo approccio relativo allo studio della variazione termica dovuta alla reazione che si instaura nel trattamento a calce delle terre si è avuto parallelamente alle valutazioni in laboratorio sull'assorbimento dell'acqua di reazione visto nel Capitolo 3.

All'interno della procedura per la determinazione dell'assorbimento d'acqua è stata misurata la temperatura iniziale del terreno e quella raggiunta dalla porzione di prova dopo essere stata miscelata con la calce per poter valutare l'entità della reazione esotermica scaturita nel momento della miscelazione.

Si ricorda che lo studio sull'assorbimento ha previsto la realizzazione di provini con valori di calce e di umidità nominale diversi, così da individuare la tendenza della reazione chimica in funzione dei quantitativi di materiali utilizzati.

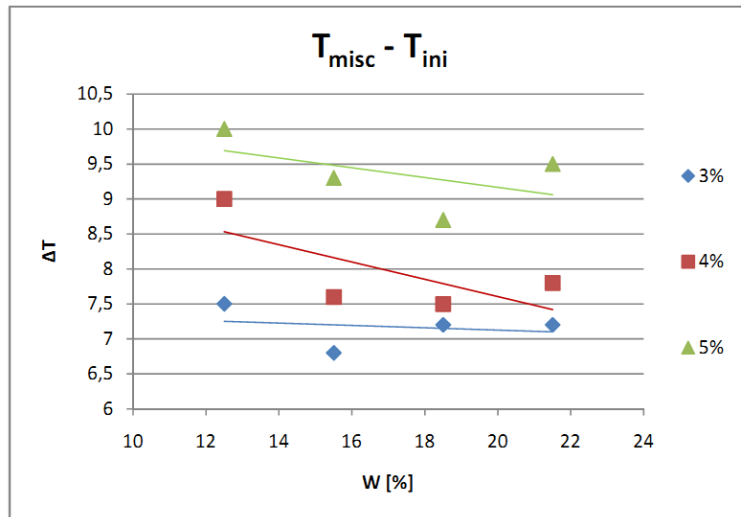


Fig. 5.1 – Differenza di temperatura post-miscelazione e iniziale in relazione al tenore d’umidità.[2]

Per tutti i tenori di umidità nominale, la differenza di temperatura aumenta con la percentuale di calce utilizzata: maggiore è la quantità di calce, maggiore è l’entità della reazione esotermica (Fig. 5.1).

Si sottolinea come l’influenza del tipo di terreno, di calce e di acqua e della corretta esecuzione della procedura di preparazione dei provini influenzi in maniera significativa i valori di temperatura raggiunti.

Le due figure seguenti (Fig. 5.2 e Fig 5.3) riportano due studi analoghi effettuati all’interno della convenzione DICAM – CGS Group secondo il criterio appena descritto.

La Fig.5.2 mostra le temperature massime raggiunte dai provini a vari contenuti d’acqua e umidità. In questo diagramma si osserva che i valori più elevati di temperatura si ottengono in corrispondenza delle umidità maggiori.

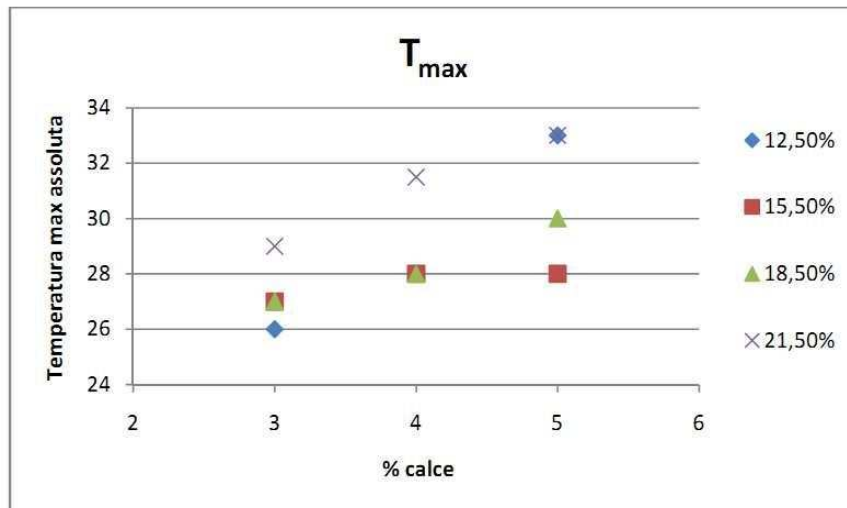


Fig. 5.2 – Esempio di temperature raggiunte dopo la miscelazione. [2]

La Fig. 5.3 mostra l'andamento della temperatura nel tempo per vari contenuti d'acqua con l'inserimento in miscela del 4 % di calce.

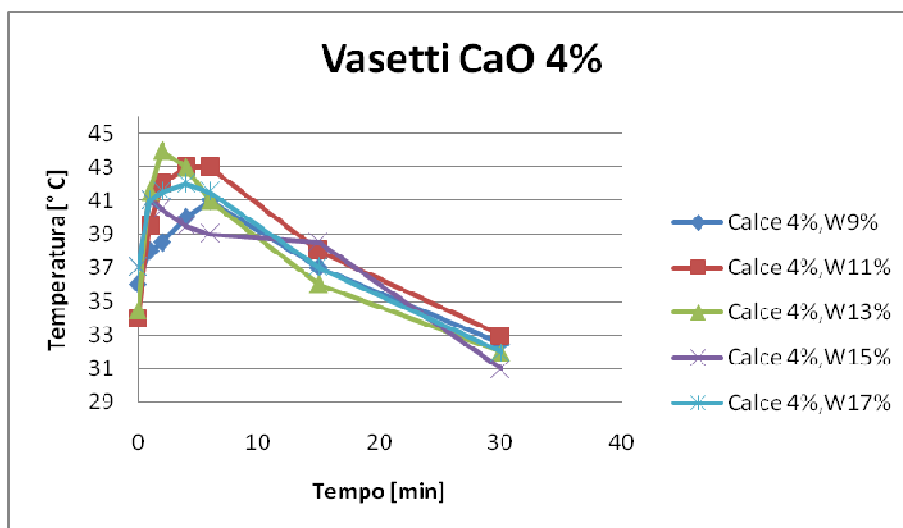


Fig. 5.3 – Esempio di temperature raggiunte dopo la miscelazione. [6]

Confrontando le curve equivalenti nei due studi, vale a dire quelle relative al 4% di calce, si osserva una differenza considerevole della temperatura massima raggiunta, che risulta di circa 32 °C in un caso e 43 °C nell'altro.

Questa discrepanza nei risultati ottenuti evidenzia l'importanza di una corretta procedura di miscelazione e confezionamento dei provini ed ancor più la possibilità di ottenere reazioni esotermiche di intensità diverse a seconda delle caratteristiche dei materiali utilizzati.

Rimane invece più costante il parametro che lega la reazione al tempo; in tutti i casi analizzati in laboratorio si osserva l'innalzamento termico ed il raggiungimento della temperatura massima nei primi minuti subito dopo la miscelazione. L'effetto termina dopo circa 30 minuti con la temperatura che ritorna al valore iniziale pre-miscelazione, a prescindere dai valori massimi ottenuti.

I dati rilevati in laboratorio sulle miscele realizzate hanno comprovato l'aumento di temperatura successivamente alla miscelazione dei materiali.

Le conclusioni ottenute dallo studio in laboratorio sull'andamento della temperatura confermano la possibilità di valutare la qualità del trattamento e della calce attraverso tale parametro, soprattutto per evidenziare l'inadeguatezza della miscela nel caso in cui l'andamento termico non riproduca i risultati attesi.

D'altro canto la valutazione della temperatura in laboratorio si rivela poco pratica nell'ottica generale del procedimento di trattamento a calce di un terreno, poiché non fornisce risultati diretti o confrontabili direttamente con altri parametri relativi alla qualità della miscela. Per questa ragione si ritiene più opportuno procedere nella ricerca di parametri termici di tipo "attivo", che possano fornire informazioni dirette sull'idoneità delle lavorazioni; si è dunque spostato l'obiettivo verso la valutazione dell'andamento della temperatura in sito.

5.2 Sperimentazione innovativa sull'analisi superficiale della temperatura

L'esperienza acquisita in laboratorio ha reso possibile definire i principi rilevanti per l'utilizzo dei parametri relativi alla reazione esotermica nel controllo dei trattamenti a calce di terreni argillosi.

Lo studio della temperatura risulta più significativo se effettuato direttamente in sito durante la lavorazione del terreno.

Tramite la valutazione della temperatura in opera è possibile verificare l'avvenuta reazione di stabilizzazione o miglioramento, la regolarità e l'uniformità del trattamento e mettere in evidenza problematiche relative all'umidità presente spesso in modo non omogeneo nell'area soggetta al trattamento. Dai controlli citati si possono ottenere informazioni su possibili soluzioni in caso di condizioni in sito non ottimali al fine del trattamento.

Tra tutte le caratteristiche in sito nominate l'omogeneità delle proprietà fisiche e meccaniche risulta quella meno definibile tramite lo studio dei materiali e della miscela in laboratorio, in quanto tutte le proprietà calcolate da prove di laboratorio forniscono risultati medi e non sono in grado di riprodurre la possibile aleatorietà delle caratteristiche in sito.

Per valutazioni proprie del luogo in cui vi è il cantiere, sono in fase di sperimentazione alcune tecniche innovative che sfruttano le moderne tecnologie digitali.

Lo strumento ideale per effettuare questo tipo di controlli sulla temperatura deve essere in grado di misurare e monitorare la condizione termica su tutta l'area di stesa in maniera istantanea e continua non appena il materiale viene miscelato insieme tramite il pulvimixer.

In questa attività di ricerca si è cercato di verificare la significatività di test effettuati attraverso una termocamera a infrarossi, strumento che consente lo studio della temperatura superficiale su tutta l'area trattata a calce.

5.2.1 La termocamera a infrarossi [22]

L'obiettivo della sperimentazione, come già detto, è quello di verificare la significatività dei test effettuati attraverso l'uso di una termocamera a infrarossi.

La termocamera consente di misurare e rappresentare la radiazione infrarossa emessa da un oggetto. La radiazione è una funzione della temperatura della superficie dell'oggetto stesso e la termocamera è in grado di calcolare e visualizzare tale valore.

Tuttavia la radiazione rilevata dalla termocamera non dipende soltanto dalla temperatura dell'oggetto ma è anche funzione dell'emissività. La radiazione ha origine anche nelle zone circostanti l'oggetto e viene riflessa sull'oggetto stesso. Inoltre la radiazione emessa e quella riflessa variano in base all'assorbimento atmosferico.

Per rilevare la temperatura con precisione è opportuno ovviare agli effetti provocati dalla presenza di diverse sorgenti di radiazione. Questa procedura viene eseguita automaticamente in tempo reale dalla termocamera. Tuttavia è necessario che la termocamera disponga dei seguenti parametri che si riferiscono agli oggetti:

- emissività dell'oggetto;
- temperatura apparente riflessa;
- distanza tra l'oggetto e la termocamera;

- umidità relativa;
- temperatura dell'atmosfera.

Poiché l'emissività è il parametro più importante dell'oggetto, è necessario che venga impostato correttamente. L'emissività è una misura che si riferisce alla quantità di radiazione termica emessa, comparata a quella rilasciata da un corpo nero perfetto alla stessa temperatura.

Generalmente i materiali di cui sono composti gli oggetti ed i trattamenti effettuati sulle superfici presentano emissività comprese tra 0,1 e 0,95. Una superficie particolarmente lucida, ad esempio uno specchio, presenta un valore inferiore a 0,1, mentre una superficie ossidata o verniciata ha un livello di emissività superiore. Una vernice a base di olio ha un'emissività superiore a 0,9 nello spettro infrarosso, indipendentemente dal suo colore nello spettro visivo. La pelle umana è caratterizzata da un livello di emissività compreso tra 0,97 e 0,98.

I metalli non ossidati rappresentano un caso estremo di opacità perfetta e di elevata riflessività, la quale non subisce variazioni rilevanti al variare della lunghezza d'onda. Di conseguenza, l'emissività dei metalli è bassa: aumenta infatti solo con la temperatura, mentre per i non metalli tende ad essere elevata e a diminuire con la temperatura.

Un terreno può presentare valori di emissività che vanno da 0,92 se asciutto a 0,95 se saturo d'acqua.

La temperatura apparente riflessa è invece un parametro che serve per bilanciare la radiazione riflessa nell'oggetto. Se l'emissività è bassa e la temperatura dell'oggetto sensibilmente diversa da quella riflessa, risulta particolarmente importante impostare e bilanciare correttamente la temperatura apparente riflessa.

Un altro valore fondamentale è la distanza esistente tra l'oggetto e l'obiettivo della termocamera; questo parametro viene utilizzato per ovviare alle due condizioni seguenti:

- la radiazione del soggetto viene assorbita dall'atmosfera compresa fra l'oggetto e la termocamera;
- la termocamera rileva la radiazione dell'atmosfera stessa.

Inoltre la termocamera consente di ovviare al fatto che la trasmittanza dipenda in una certa misura dall'umidità relativa dell'atmosfera. Pertanto è necessario impostare l'umidità relativa sul valore corretto. Per brevi distanze e per un'umidità normale, è in genere possibile utilizzare il valore predefinito dell'umidità relativa pari al 50 %.

Alcune termocamere e programmi di analisi consentono anche di effettuare compensazioni per i seguenti parametri:

- temperatura atmosferica, cioè la temperatura dell'atmosfera tra la termocamera e l'oggetto;
- temperatura ottiche esterne, cioè la temperatura di obiettivi esterni o finestre utilizzati nella parte anteriore della termocamera;
- trasmissione ottiche esterne, cioè la trasmissione di obiettivi esterni o finestre utilizzati nella parte anteriore della termocamera.

Lo termocamera utilizzata in questa sperimentazione è denominata **FLIR P620**.



Fig. 5.4 – FLIR P620.

FLIR P620 è una videocamera ad infrarossi ad alte prestazioni del marchio *FLIR Systems*. Essa include una telecamera a raggi infrarossi ad alta definizione (640 X 480 pixels) che permette rilievi di oggetti di dimensioni ridotte a distanze di sicurezza, con un'accuratezza di ± 2 °C.

La termocamera è dotata di un mirino e di uno schermo LCD ad alta risoluzione e inclinabile che consentono elevata flessibilità nelle operazioni sul campo. In particolare il mirino è da preferirsi per l'uso all'aperto alla luce del sole mentre lo schermo è ideale

per rilievi interni. La messa a fuoco può essere effettuata manualmente o automaticamente.

Grazie alla funzione interna FLIR TripleFusion questo strumento è in grado di registrare contemporaneamente un'immagine all'infrarosso (IR) ed una reale (DC), consentendo così l'analisi rapida dei dati ottenuti.

Le immagini ottenute sono facilmente scaricabili e visualizzabili attraverso i più comuni software di visualizzazione per PC e possono essere modificate attraverso l'uso del software *FLIR QuickReport*, grazie al quale è possibile anche inserire commenti di testo per ciascuna singola immagine all'infrarosso.

Si riporta di seguito una tabella (Tab. 5.1) con i principali dati tecnici della termocamera *FLIR P620*.

Campo visivo	In funzione dell'obiettivo della termocamera da 7° x 5,3° fino a 45° x 34°
Distanza minima di messa a fuoco	In funzione dell'obiettivo della termocamera da 3 m fino a 0,2 m
Sensibilità termica/NETD	65mK a + 35 °C
Frequenza immagini	30 Hz
Messa a fuoco	Manuale o automatica
Zoom digitale	1-2x zoom continuo
Tipo rilevatore	FPA microbolometro senza raffreddamento
Intervallo spettrale	7,5-13 μm
Risoluzione IR	640 x 480 pixels
Display	Widescreen incorporato, LCD a colori da 5,6 pollici, 1024 x 600 pixels
Mirino	LCD a colori ribaltabile incorporato, 800 x 600 pixels
Regolazione automatica dell'immagine	Continua/manuale
Regolazione manuale dell'immagine	Livello/campo/massimo/minimo
Immagine termica	Totalmente a infrarossi con scala di colori selezionabile
Immagine visibile	Totalmente a colori
Immagine di riferimento	Immagine termica dal vivo e immagine di riferimento a schermo
Intervallo di temperatura	<ul style="list-style-type: none"> ▪ da -40 °C a 120 °C; ▪ da 0 °C a 500 °C;
Precisione	± 2 °C o ± 2 % della lettura
Puntatore	3 puntatori
Area	3 aree con massimo/minimo/media
Rilevamento automatico caldo/freddo	Valore di temperatura massimo/minimo e posizione visualizzati entro un riquadro, un cerchio o su una linea
Isoterma	2 isoterme con sopra/sotto/intervallo
Differenza di temperatura	Differenza di temperatura tra funzioni di misurazione diverse o temperatura di riferimento
Temperatura di riferimento	Impostata manualmente o acquisita da una delle funzioni di

	misurazione
Correzione della trasmissione atmosferica	Automatica, in base ai valori in ingresso di distanza, temperatura atmosferica e umidità relativa
Correzione dell'emissività	Variabile da 0,01 a 1,0
Correzione della temperatura apparente riflessa	Automatica, basata sulla temperatura riflessa in ingresso
Comandi di impostazione	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Selezione modalità ▪ Menu degli strumenti di misurazione configurabili ▪ Colore di saturazione, evidenzia le aree fuori scala ▪ Selezione delle scale dei colori ▪ Scala dei colori attivata/disattivata ▪ Caricamento tavolozze personalizzate dalla scheda di memoria ▪ Configurazione delle informazioni da visualizzare nell'immagine ▪ Pulsanti programmabili ▪ Profili utente ▪ Galleria immagini
Compatibilità con software FLIR	FLIR QuickReport, FLIR Reporter, FLIR Researcher
Registrazione di filmati termici radiometrici e non radiometrici	Non applicabile

Tab. 5.1 – FLIR P620, Dati tecnici. [22]

Questo strumento è tipicamente utilizzato per ispezioni termografiche di edifici (rilevamento dell'umidità, infiltrazioni d'aria, carenze di isolamento) o di impianti elettrici.

Negli ultimi anni si sono viste le prime applicazioni in campo stradale, con studi sugli strati superficiali in conglomerato bituminoso. Grazie alle elevate temperature raggiunte dagli strati legati a bitume in fase di stesa è possibile esaminare attraverso immagini termiche, la qualità delle operazioni e raffrontarle con i parametri ottenuti attraverso le altre prove che si effettuano in sito su questi strati.



Fig. 5.5 – Esempio di applicazione della termocamera su strati superficiali.

In questa ricerca sperimentale, per la prima volta, si verifica la significatività dell'uso della termocamera per terreni legati a calce, altro caso di operazione che, seppur in maniera decisamente inferiore a quello dei conglomerati bituminosi, libera calore.

5.3 Studio degli andamenti interno e superficiale della temperatura in laboratorio

Il primo passo della ricerca è stato effettuato in laboratorio con l'obiettivo di tarare la termocamera su miscele prodotte in laboratorio confrontando i risultati ottenuti tramite immagini termiche con quelli ricavati da misurazione della temperatura con termometro.

Grazie a questa analisi si è potuta effettuare una comparazione tra la temperatura superficiale e quella interna della miscela.

5.3.1 Fasi della sperimentazione

Il terreno analizzato è stato pre-qualificato secondo la procedura descritta nel Capitolo 2 e quindi miscelato con calce.

La sperimentazione è stata effettuata in due momenti distinti; nel primo sono stati utilizzati i dati della miscela di progetto (2,5% di calce e 16% di umidità nominale W) per verificare l'effettiva reazione esotermica prodotta in sito, nel secondo invece, si è effettuato uno studio realizzando provini a varie umidità ed a diverse quantità di calce,

così da poter ricostruire un andamento della variazione di temperatura, modificando tali parametri.

Sono stati realizzati 14 provini, i cui parametri sono riportati nella tabella sottostante (Tab. 5.2), sulla base del quantitativo di materiale posseduto e scegliendo i valori di calce ed acqua abitualmente presenti in sito.

FASE	% Calce	W=12%	W=14%	W=16%	W=18%
1	2,5			X	
2	1	X	X	X	
	2	X	X	X	X
	3	X	X	X	
	4		X	X	X

Tab. 5.2 – Schema di realizzazione delle porzioni di prova (contrassegnate con segno X le combinazioni di calce e umidità realizzate).

La procedura seguita per realizzare le porzioni di prova ha cercato di riprodurre il più fedelmente possibile le condizioni in sito del terreno trattato, immediatamente dopo la sua miscelazione con calce e, prima del costipamento, per mezzo di rulli meccanici, in quanto si è visto che questo è il momento in cui la reazione esotermica raggiunge il massimo della sua intensità.

Si riporta di seguito la procedura seguita per la realizzazione dei provini e per eseguire la sperimentazione:

- 1) Essiccare il materiale prelevato in forno a 110 ± 5 °C.
- 2) Frantumare il materiale attraverso un frantoio.



Fig. 5.6 – Frantoio per frantumazione del terreno.

- 3) Pesare 2 kg di terreno in una bilancia e porlo in un recipiente di plastica o sullo stampo del miscelatore elettrico se presente.
- 4) Pesare l'acqua necessaria a raggiungere l'8% di umidità ed aggiungerla al terreno.



Fig. 5.7 – Pre-umidificazione del terreno.

- 5) Miscelare il terreno con l'acqua fino ad ottenere una miscela omogenea, usando una spatola se si è sprovvisti di miscelatore elettrico.



Fig. 5.8 - Attrezzatura di prova utilizzata con miscelazione manuale.

- 6) Lasciare riposare per 30 minuti.
- 7) Preparare il piano di lavoro per la sperimentazione e sistemare la termocamera, impostandola su una distanza di circa un metro dall'oggetto e regolando il tempo

della registrazione da effettuare a 30 minuti totali con salvataggio di immagini ad intervalli di 1 minuto.

- 8) Passati i 30 minuti misurare la temperatura del terreno umido e registrarla come temperatura iniziale.
- 9) Pesare la quantità di calce necessaria da aggiungere.
- 10) Pesare la quantità di acqua da aggiungere per raggiungere l'umidità nominale.
- 11) Stendere la calce sulla porzione di prova.
- 12) Versare l'acqua pesata e miscelare fino all'ottenimento di una miscela omogenea.
- 13) Misurare la temperatura nei successivi 30 minuti con termometro e termocamera e registrare entrambi i valori ad intervalli di 1 minuto.



5.9 – Misurazione della temperatura con termometro e con termocamera.

5.3.2 Terreno analizzato

Il terreno analizzato è stato prelevato in un cantiere della ditta CGS Consolidamenti, situato presso Longastrino, frazione del Comune di Alfonsine (RA), che prevedeva lavori di stabilizzazione a calce in un'area finalizzata all'inserimento di un impianto fotovoltaico per la produzione di energia elettrica.

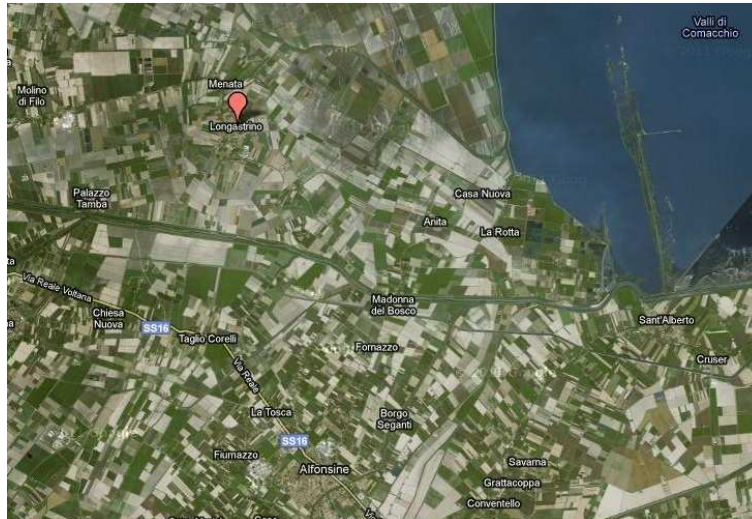


Fig. 5.10 – Localizzazione del cantiere.

Il prelievo è stato eseguito a circa 50 cm di profondità, dove l'humus superficiale non è più presente, nella zona in passato a destinazione agricola. Si ritiene quindi che tale materiale possa essere stato contaminato da prodotti agricoli senza la possibilità di determinare con precisione la possibile influenza di tali sostanze sulle caratteristiche del terreno.

5.3.2.1 Pre-qualifica del materiale

Si riportano nelle pagine seguenti i dati relativi alla pre-qualifica dei materiali utilizzati; le prove sono state eseguite nel Laboratorio Strade presso il DICAM (Università di Bologna) e nel CGS Lab.

Certificato N°	1/2011
-----------------------	--------

Data	30/05/2011
-------------	------------

Committente	CGS Lab Via L. Da Vinci, 24 – 47025 Mercato Saraceno (FC)
--------------------	---

Data di arrivo del campione	29/05/2011
------------------------------------	------------

Provenienza dichiarata	Longastrino (RA) Lavori di realizzazione di un impianto fotovoltaico
-------------------------------	--

Prelievo effettuato da	Personale del laboratorio CGS e Ing. A. Magi in data 29/05/2011
-------------------------------	---

Osservazioni	Umidità in sito: 16%
---------------------	----------------------

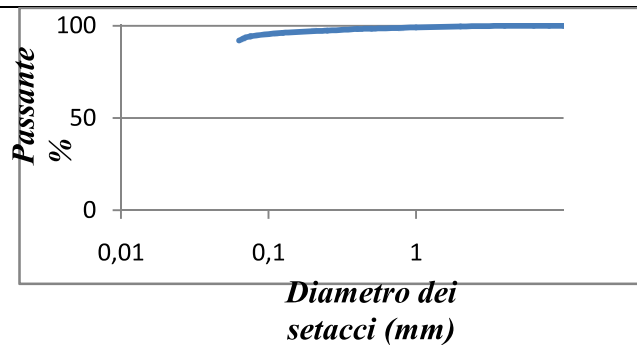
Modalità di prelievo	Procedure norma <i>UNI EN 932-1 (1998)</i>
-----------------------------	--

Prove di laboratorio		SI	NO
Classificazione dei terreni	Analisi granulometrica <i>UNI EN 933-1 (2009)</i>	X	
	Limiti di Atterberg <i>UNI 10014 (2007)</i>	X	
Caratteristiche fisiche	Equivalente in sabbia <i>UNI EN 933-8 (2000)</i>	X	
	Valore del Blu di Metilene <i>UNI EN 933-9 (2009)</i>	X	
Caratteristiche chimiche	Contenuto di solfati solubili in acido <i>UNI EN 1744-1/12 (2010)</i>		X
	Contenuto di sostanze organiche <i>UNI EN 1744-1/15 (2010)</i>	X	
	Percentuale di sostanze organiche <i>ASTM D2974-07a</i>	X	
	Contenuto iniziale di calce (CIC) <i>ASTM D6276-99a (2006)</i>	X	
Prove effettuate da	Ing. Roberto Cancellieri Ing. Alessandro Magi P.A. Ettore Cappellari		

Si riportano di seguito i risultati ottenuti nella fase di pre-qualifica dei materiali.

Classificazione del terreno	<u>ANALISI GRANULOMETRICA</u>
	<i>UNI EN 933-1 (2009)</i>

D _{STACCI} [mm]	Trattenuto [g]	Progressivo trattenuto [g]	Percentuale passante [%]
40	0,00	0,00	100,00
31,5	0,00	0,00	100,00
20	0,00	0,00	100,00
16	0,00	0,00	100,00
14	0,00	0,00	100,00
12,5	0,00	0,00	100,00
10	0,00	0,00	100,00
8	0,00	0,00	100,00
6,3	0,00	0,00	100,00
4	0,72	0,72	99,86
2	1,26	1,98	99,60
1	2,62	4,60	99,08
0,5	3,89	8,49	98,30
0,4	0,91	9,40	98,12
0,25	4,11	13,51	97,29
0,125	5,51	19,02	96,19
0,075	9,54	28,56	94,28
0,063	1,63	39,90	92,02
Fondello	460,10	500	
Prelievo secco [g]	500		



Classificazione del terreno	<u>LIMITI DI ATTERBERG</u> <i>UNI 10014 (1964)</i>
--	---

	LIMITE LIQUIDO			LIMITE PLASTICO
Numero colpi (n)	25	25	25	
Recipiente numero (n)	52	52	52	20
Peso lordo umido (g)	41,65	41,65	41,65	33,14
Peso lordo asciutto (g)	36,02	36,02	36,02	32,03
Peso acqua (g)	5,63	5,63	5,63	1,11
Tara (g)	23,02	23,02	23,02	26,46
Peso netto secco (g)	13,00	13,00	13,00	5,57
Umidità (%)	43,31	43,31	43,31	19,93



<i>LIMITE LIQUIDO</i>		<i>43,31</i>
<i>LIMITE PLASTICO</i>		<i>19,93</i>
<i>INDICE DI PLASTICITÀ</i>		<i>23,38</i>

Classificazione del terreno	<u>Tabella UNI CNR 10006 (2002)</u>
------------------------------------	--

Classificazione generale	Terre ghiaie - sabbiose						Terre limo - argillose					Torbe e terre organiche palustri	
	Frazione passante al setaccio 0,075 UNI 2332 \leq 35%						Frazione passante al setaccio 0,075 UNI 2332 $>$ 35%						
Gruppo	A1		A3	A2			A4	A5	A6	A7		A8	
Sottogruppo	A1 a	A1 b		A2-4	A2-5	A2-6	A2-7						
Analisi granulometrica - Frazione passante al setaccio													
2 UNI 2332 %	≤ 80												
0,4 UNI 2332 %	≤ 30	≤ 80	≥ 80										
0,075 UNI 2332 %	≤ 15	≤ 25	≤ 10	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≤ 35	
Caratteristiche della frazione passante al setaccio 0,4 UNI 2332													
Limite liquido	0			≤ 40	> 40	≤ 40	> 40	≤ 40	> 40	≤ 40	≤ 40	≤ 40	
Indice di plasticità	≤ 6		N.P.	≤ 10	≤ 10 max	> 10	> 10	≤ 10	≤ 10	> 10	> 10 (IP \leq LL30)	> 10 (IP \leq LL30)	
Indice di gruppo	0		0	0		≤ 4		≤ 8	≤ 12	≤ 18	≤ 20		
Tipi usuali dei materiali caratteristici costituenti il gruppo	ghiaia e sabbia, sabbia grossa, sabbia grossa, sabbia grossa, sabbia grossa, sabbia grossa, sabbia grossa		Sabbia fine	ghiaia e sabbia limose e argillosa				Limi poco compressibili	Limi fort. compressibili	Argille poco compressibili	Argille fort. compressibili med. plastiche	Argille fort. compressibili fort. plastiche	Torbe di recente o remota formazione e detriti organici di origine palustre
Qualità portanti quale terreno di sottofondo in assenza di gelo	da eccellenti a buone						Da mediocre a scadente					Da scartare come sottofondo	
Azione del gelo sulla qualità portanti del terreno di sottofondo	Nessuna o lieve			Media			media	elevata	Media	elevata	Media		
Ritiro o rigonfiamento	Nulla			Nulla o lieve			Lieve o media		elevato	elevato	molto elevato		
Permeabilità	Elevata			Media o scarsa					Scarsa o nulla				
Identificazione dei terreni in sito	Facilmente individuabili a vista		Aspri al tatto (incassanti allo stato asciutto)	La maggior parte dei granuli sono individuabili ad occhio nudo - Aspri al tatto - Una tenacità media e elevata allo strato asciutto indica la presenza di argille			Reagiscono alla prova di scuotimento - Polverulenti o poco tenaci allo stato asciutto - Non facilmente modellabili allo stato umido		Non reagiscono alla prova di scuotimento - Tenaci allo stato asciutto - Facilmente modellabili (in bastoncini sottili allo stato umido)			Fibrosi di colore bruno o nero - facilmente individuabili a vista	

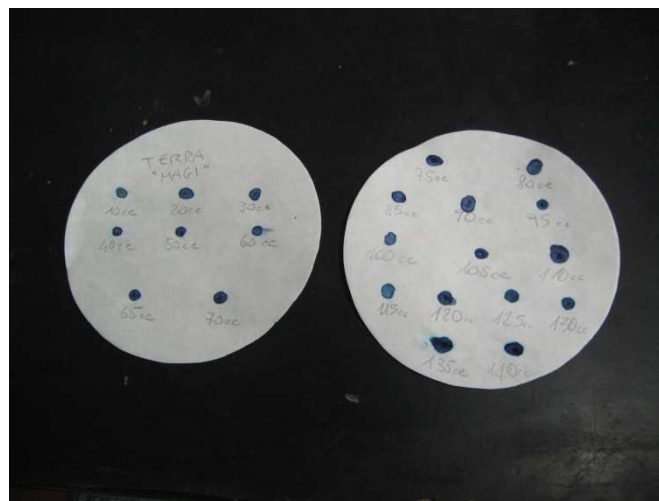
Tipo di terreno	<u>A7 - 6</u>
------------------------	----------------------

Caratteristiche fisiche	<u>EQUIVALENTE IN SABBIA</u> <i>UNI EN 933-8 (2000)</i>
--------------------------------	---

h_1 (cm)	23,00	22,00
h_2 (cm)	0,50	0,50
E.S.%	2,17	2,27
E.S.% media	2,22	

Equivalente in sabbia	$ES = 2,22 \%$
------------------------------	----------------------------------

Caratteristiche fisiche	<u>VALORE DEL BLU DI METILENE</u> <i>UNI EN 933-9 (2009)</i>
--------------------------------	--



Valore di blu	$MB = 45 \text{ g/Kg}$
Superficie specifica totale	$S_a = 94,18 \text{ m}^2/\text{g}$

Caratteristiche chimiche	<u>CONTENUTO DI SOSTANZE ORGANICHE</u> <i>UNI EN 1744-1/15 (2010)</i>
---------------------------------	---



Sostanze organiche	<u>SONO PRESENTI SOSTANZE ORGANICHE</u>
---------------------------	--

Caratteristiche chimiche	<u>PERCENTUALE DI SOSTANZE ORGANICHE</u> <i>ASTM D 2974 – 07a</i>
---------------------------------	---



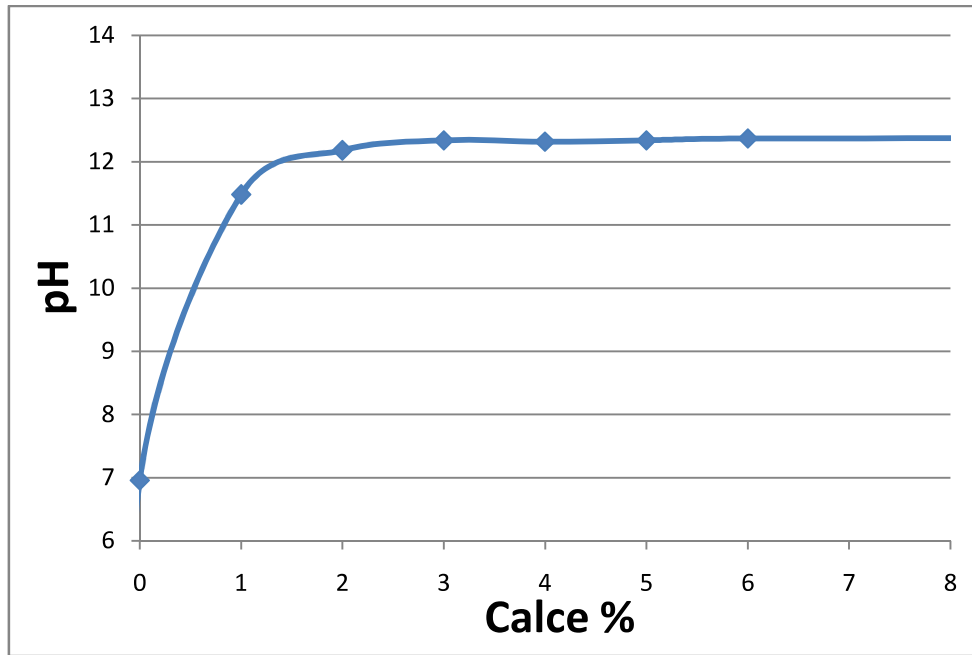
Contenuto di ceneri	<i>FA = 85,8 %</i>
Sostanze organiche	<i>OM = 14,2 %</i>

Caratteristiche chimiche	<u>CONTENUTO DI SOLFATI SOLUBILI IN ACIDO</u> <i>UNI EN 1744-1/12 (2010)</i>
	PROVA NON DISPONIBILE

Caratteristiche chimiche	<u>CONTENUTO INIZIALE DI CALCE</u> <i>ASTM D 6276 – 99a (2006)</i>
---------------------------------	--



% calce	PH	T (°C)
0	6,96	28,3
1	11,48	28,5
2	12,18	28,4
3	12,34	28,7
4	12,32	28,5
5	12,34	28,5
6	12,37	28,4
100	12,51	28,4



Contenuto iniziale di calce	<i>CIC = 3 %</i>
------------------------------------	-------------------------

Dalle prove effettuate il terreno può essere classificato come *A 7-6*, vale a dire argilla fortemente compressibile e fortemente plastica, con un elevato quantitativo di sostanze organiche, dovute alla precedente destinazione agricola del sito, che potrebbero influenzare negativamente il risultato del trattamento a calce.

Si ricorda che lo studio di pre-qualifica è stato effettuato per ottenere informazioni utili per questa sperimentazione.

Sono stati adottati valori di *CIC* pari al 2,5 % e umidità nominale del 16 %.

5.3.3 Risultati sperimentali ottenuti

5.3.3.1 *Prima fase: Controllo della temperatura sulla miscela di progetto.*

La porzione di prova utilizzata è stata realizzata seguendo la procedura precedentemente descritta, attraverso l'uso del miscelatore elettrico. L'analisi della temperatura è stata effettuata lasciando il materiale direttamente sullo stampo del miscelatore e posizionando il termometro all'interno della miscela, fissando la termocamera ad una distanza ravvicinata su di un apposito treppiedi (Fig. 5.11).



Fig. 5.11 – Posizionamento attrezzatura di sperimentazione.

Sono state effettuate misure per circa 35 minuti, con registrazioni ogni minuto nei primi 5 e ogni 2 minuti nel tempo successivo.

La temperatura interna è stata misurata attraverso termometro e registrata manualmente, mentre quella superficiale è stata registrata in automatico attraverso la termocamera che per ogni registrazione ha fornito un'immagine all'infrarosso e la corrispondente reale (Fig. 5.12).

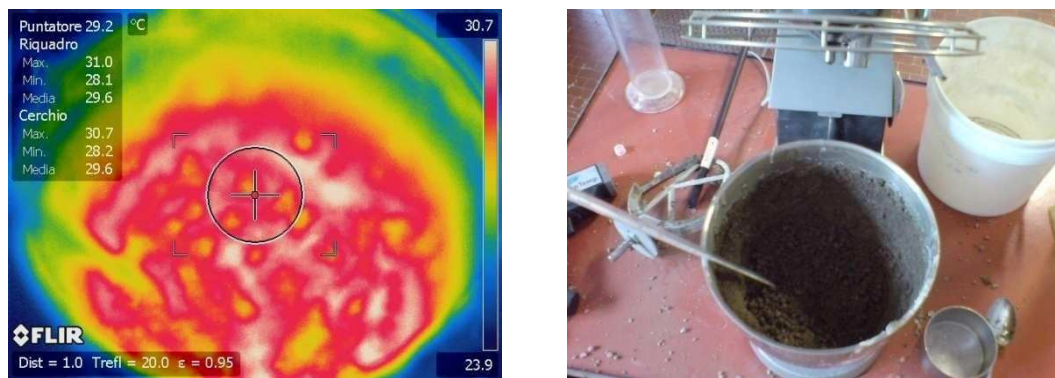
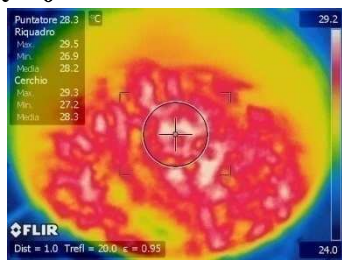
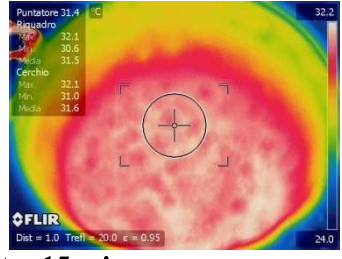
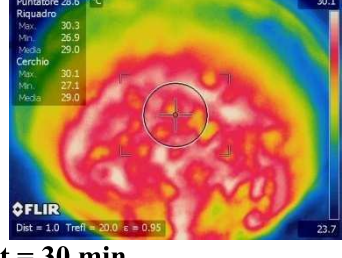



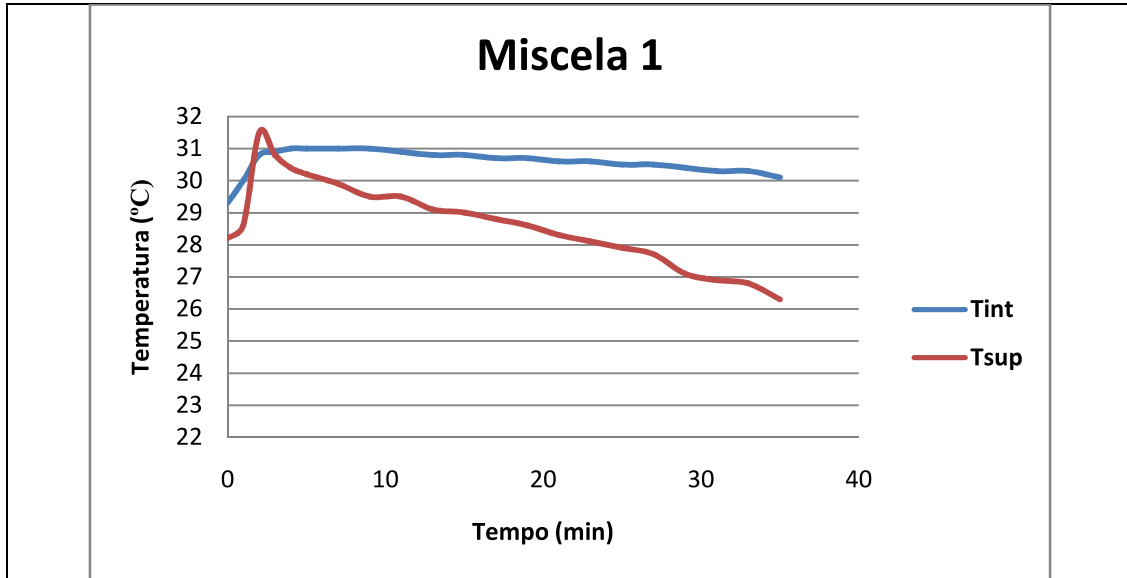
Fig. 5.12 – Esempio di immagine all'infrarosso registrata e relativa immagine reale – prima fase.

Ciascuna immagine termica ottenuta fornisce dati relativi alla temperatura per mezzo delle funzioni *Cerchio* e *Riquadro*, facilmente individuabili nella figura. Per entrambe le funzioni sono riportate le temperature massime, minime e medie dell'intera area interna ad esse.

Informazioni sulla temperatura sono fornite sulla barra verticale dei colori a destra, che funge da legenda per le colorazioni dell'immagine e ne facilita la "lettura termica".

Si riportano di seguito le temperature misurate nel tempo, il loro andamento nel grafico temperatura-tempo e tutte le informazioni utili per una corretta lettura dei risultati.

Miscela 1, valori di progetto: 2,5% CALCE, 16% ACQUA				
Temperatura pre-miscela [°C]	t [min]	Temperatura interna [°C]	Temperatura media superficiale [°C]	Effetto all'infrarosso nel tempo
28,3	0	29,3	28,2	t = 0 
	1	30,0	28,6	t = 5 min 
	2	30,8	31,5	t = 15 min 
	3	30,9	30,8	t = 30 min 
	4	31,0	30,4	
	5	31,0	30,2	
	7	31,0	29,9	
	9	31,0	29,5	
	11	30,9	29,5	
	13	30,8	29,1	
	15	30,8	29,0	
	17	30,7	28,8	
	19	30,7	28,6	
	21	30,6	28,3	
	23	30,6	28,1	
	25	30,5	27,9	
	27	30,5	27,7	
	29	30,4	27,1	
	31	30,3	26,9	
	33	30,3	26,8	
35	30,1	26,3		
Temperatura massima raggiunta [°C]			31,5	
Osservazioni			-	
Temperatura ambiente [°C]			26 ± 1	



Tab. 5.3 – Temperature registrate nella prima fase sulla miscela di progetto.

5.3.3.2 Seconda fase: *Controllo della temperatura su miscele a contenuto variabile di calce ed umidità.*

La seconda fase ha visto la realizzazione di varie miscele (numerate da 2 a 14) contenenti i valori caratteristici di calce ed umidità presenti solitamente in sito (Tab. 5.2)

La procedura di realizzazione della porzione di prova prima descritta è stata eseguita con l'utilizzo di miscelazione manuale causa la mancata attrezzatura elettrica. Sono quindi stati usati dei recipienti in plastica e la misurazione della temperatura è stata eseguita senza estrarre la miscela da tali contenitori (Fig. 5.13).

La tecnica di misurazione della temperatura è del tutto simile a quella specificata nella prima fase.



Fig. 5.13 – Attrezzatura utilizzata nella seconda fase e posizionamento.

Le temperature interna e superficiale sono state misurate per ciascuna miscela per un totale di 30 minuti con annotazione della prima ad intervalli di 5 minuti e della seconda, attraverso registrazione delle immagini all'infrarosso (Fig. 5.14), ad intervalli di 1 minuto.

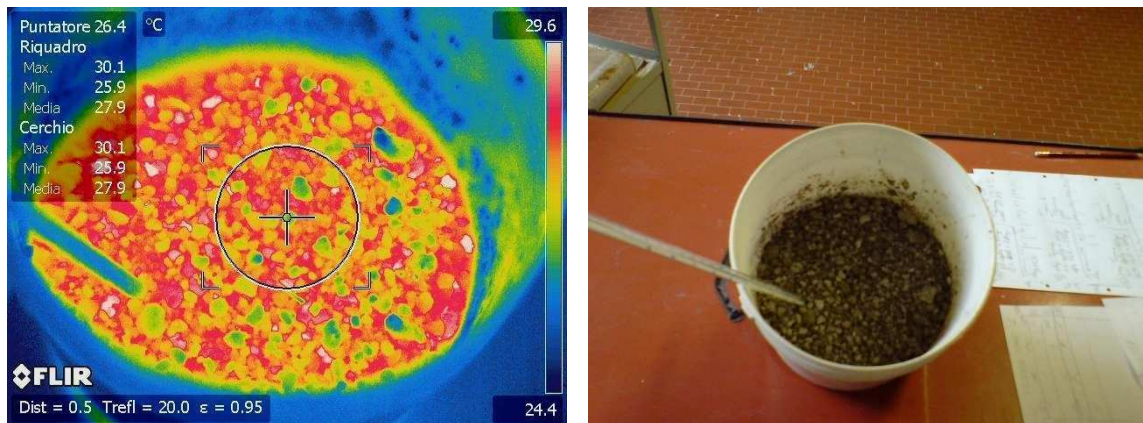
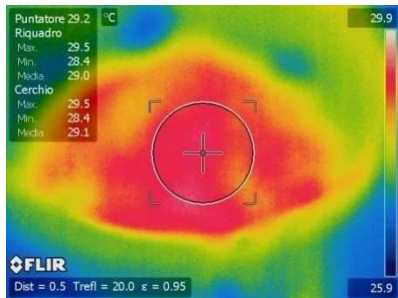
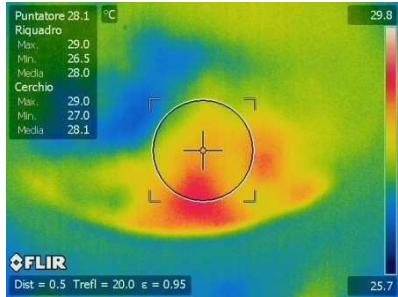
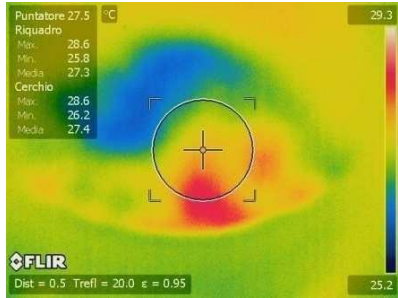

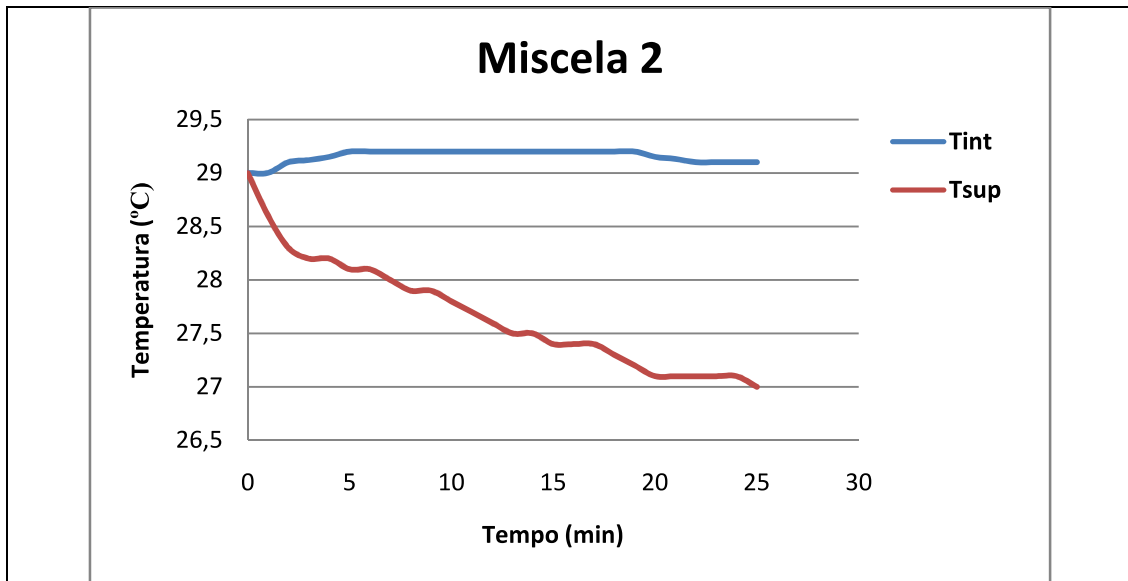


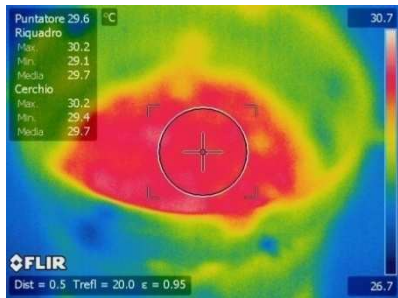
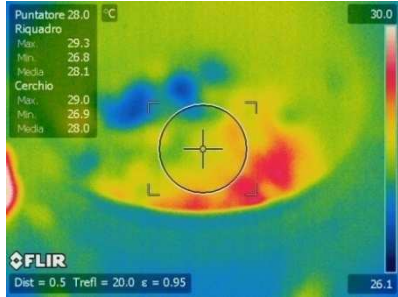
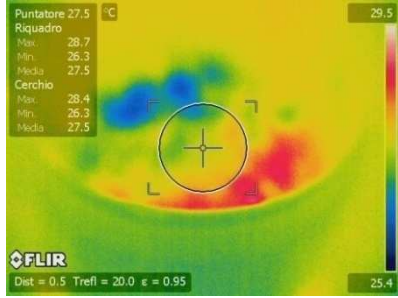
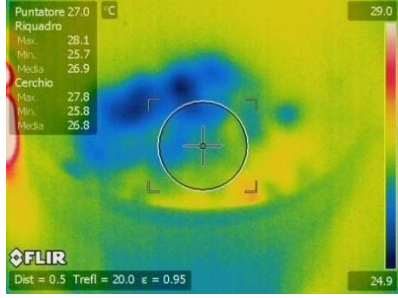
Fig 5.14 - Esempio di immagine all'infrarosso registrata e relativa immagine reale – seconda fase.

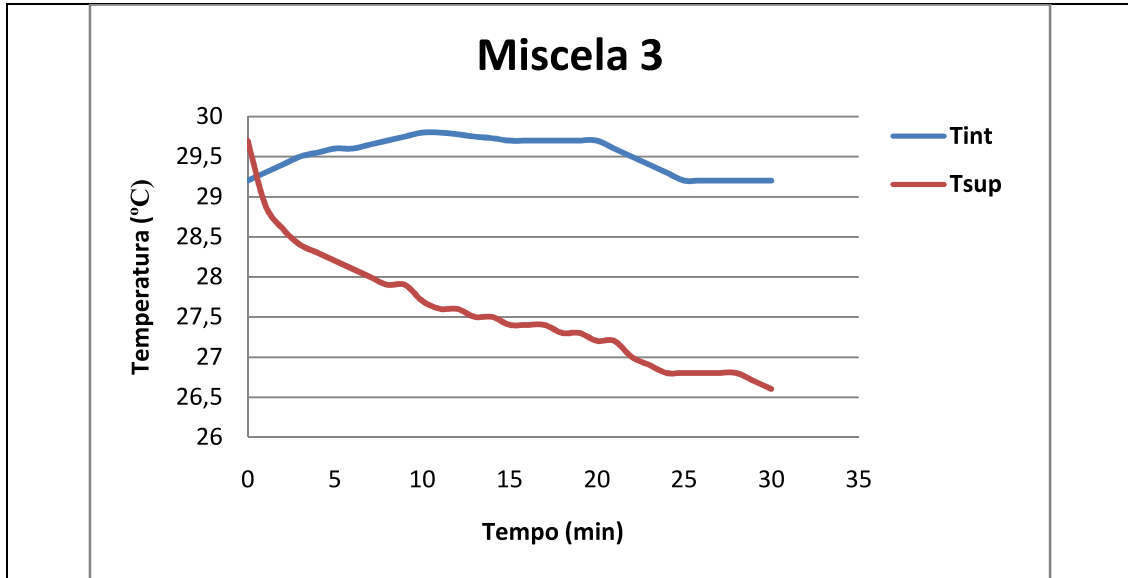
Si riportano di seguito i dati relativi a tutte le miscele realizzate.

Miscela 2: 1% CALCE, 12% ACQUA				
Temperatura pre-miscela [°C]	t [min]	Temperatura interna [°C]	Temperatura media superficiale [°C]	Effetto all'infrarosso nel tempo
27,0	0	29,0	29,0	t = 0 
	1		28,6	t = 5 min 
	2		28,3	t = 15 min 
	3		28,2	t = 30 min 
	4		28,2	
	5	29,2	28,1	
	6		28,1	
	7		28,0	
	8		27,9	
	9		27,9	
	10	29,2	27,8	
	11		27,7	
	12		27,6	
	13		27,5	
	14		27,5	
	15	29,2	27,4	
	16		27,4	
	17		27,4	
	18		27,3	
	19		27,2	
	20	29,1	27,1	
	21		27,1	
	22		27,1	
	23		27,1	
	24		27,1	
25	29,1	27,0		
Temperatura massima raggiunta [°C]			29,5	
Osservazioni			<i>Interruzione per spegnimento termocamera al minuto 25. Messa a fuoco carente.</i>	
Temperatura ambiente [°C]			27 ± 1	

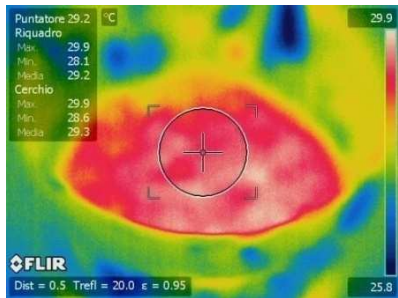

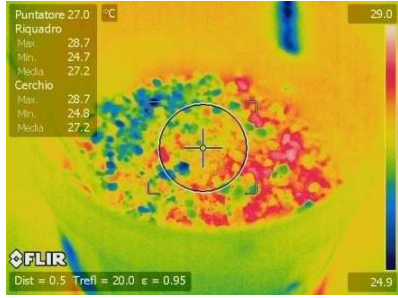
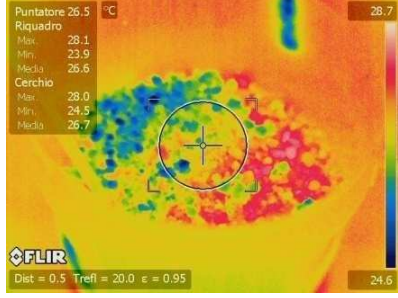


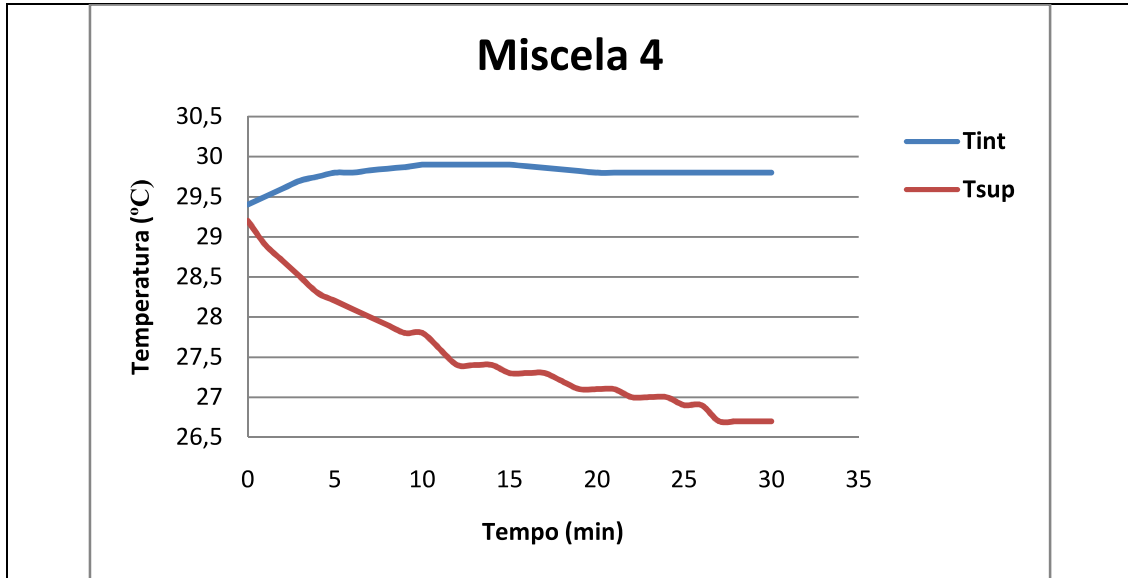
Tab 5.4 – CALCE 1%, UMIDITÀ 12% - Temperature registrate.

Miscela 3: 1% CALCE, 14% ACQUA				
Temperatura pre-miscela [°C]	t [min]	Temperatura interna [°C]	Temperatura media superficiale [°C]	Effetto all'infrarosso nel tempo
28,0	0	29,2	29,7	t = 0 
	1		28,9	t = 5 min 
	2		28,6	t = 15 min 
	3		28,4	t = 30 min 
	4		28,3	
	5	29,6	28,2	
	6		28,1	
	7		28,0	
	8		27,9	
	9		27,9	
	10	29,8	27,7	
	11		27,6	
	12		27,6	
	13		27,5	
	14		27,5	
	15	29,7	27,4	
	16		27,4	
	17		27,4	
	18		27,3	
	19		27,3	
	20	29,7	27,2	
	21		27,2	
	22		27,0	
	23		26,9	
	24		26,8	
	25	29,2	26,8	
	26		26,8	
	27		26,8	
	28		26,8	
	29		26,7	
30	29,2	26,6		
Temperatura massima raggiunta [°C]			30,2	
Osservazioni			<i>Messa a fuoco carente.</i>	
Temperatura ambiente [°C]			27 ± 1	



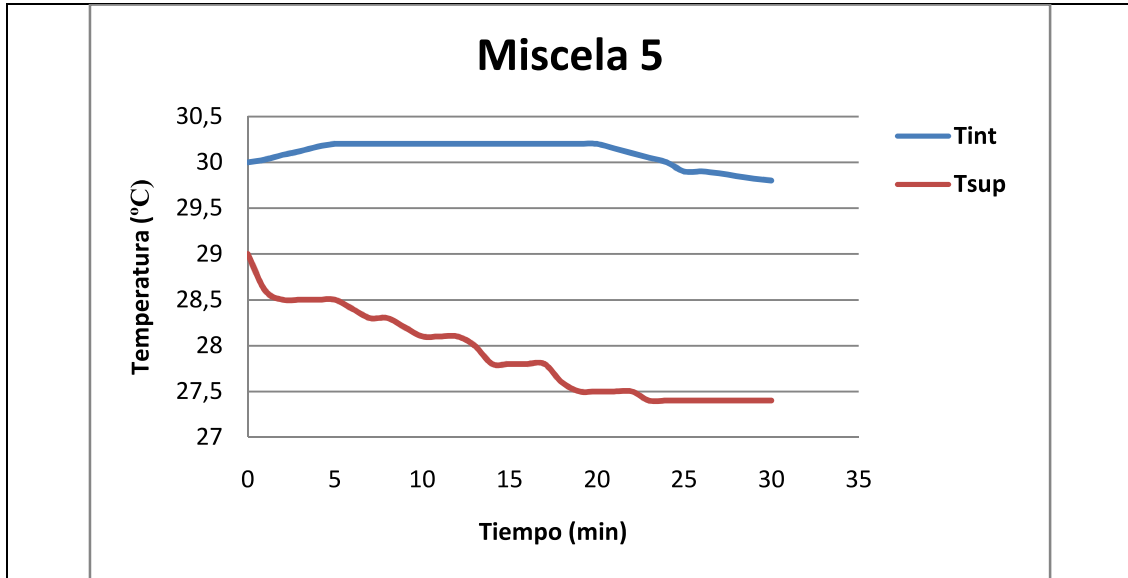
Tab 5.5 – CALCE 1%, UMIDITÀ 14% - Temperature registrate.

Miscela 4: 1% CALCE, 16% ACQUA					
Temperatura pre-miscela [°C]	t [min]	Temperatura interna [°C]	Temperatura media superficiale [°C]	Effetto all'infrarosso nel tempo	
27,3	0	29,4	29,2	t = 0 	
	1		28,9		
	2		28,7		
	3		28,5		
	4		28,3		
	5	29,8	28,2		
	6		28,1		
	7		28,0		
	8		27,9		
	9		27,8		
	10	29,9	27,8		t = 5 min 
	11		27,6		
	12		27,4		
	13		27,4		
	14		27,4		
	15	29,9	27,3		t = 15 min 
	16		27,3		
	17		27,3		
	18		27,2		
	19		27,1		
	20	29,8	27,1		
	21		27,1		
	22		27,0		
	23		27,0		t = 30 min 
	24		27,0		
	25	29,8	26,9		
	26		26,9		
	27		26,7		
	28		26,7		
	29		26,7		
30	29,8	26,7			
Temperatura massima raggiunta [°C]			29,9		
Osservazioni			<i>Messa a fuoco migliorata.</i>		
Temperatura ambiente [°C]			27,5 ± 1		



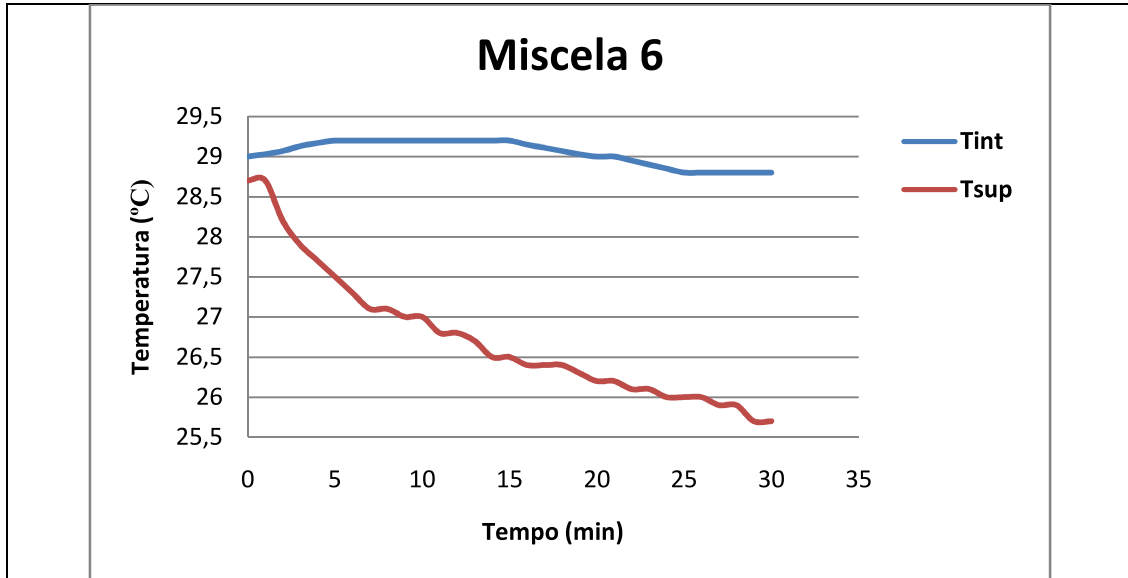
Tab 5.6 – CALCE 1%, UMIDITÀ 16% - Temperature registrate.

Miscela 5: 2% CALCE, 12% ACQUA				
Temperatura pre-miscela [°C]	t [min]	Temperatura interna [°C]	Temperatura media superficiale [°C]	Effetto all'infrarosso nel tempo
27,5	0	30,0	29,0	t = 0
	1		28,6	t = 5 min
	2		28,5	t = 15 min
	3		28,5	t = 30 min
	4		28,5	
	5	30,2	28,5	
	6		28,4	
	7		28,3	
	8		28,3	
	9		28,2	
	10	30,2	28,1	
	11		28,1	
	12		28,1	
	13		28,0	
	14		27,8	
	15	30,2	27,8	
	16		27,8	
	17		27,8	
	18		27,6	
	19		27,5	
	20	30,2	27,5	
	21		27,5	
	22		27,5	
	23		27,4	
	24		27,4	
	25	29,9	27,4	
	26		27,4	
	27		27,4	
	28		27,4	
	29		27,4	
30	29,8	27,4		
Temperatura massima raggiunta [°C]			31,5	
Osservazioni			-	
Temperatura ambiente [°C]			27,5 ± 1	

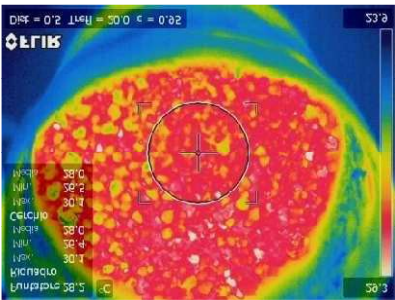
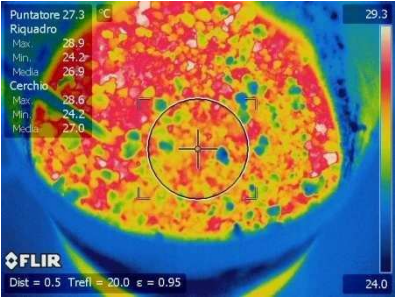
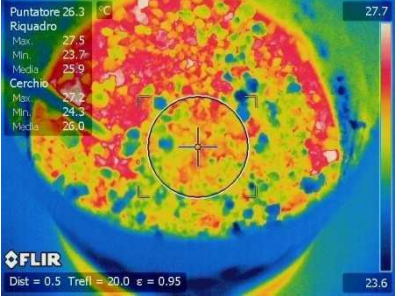


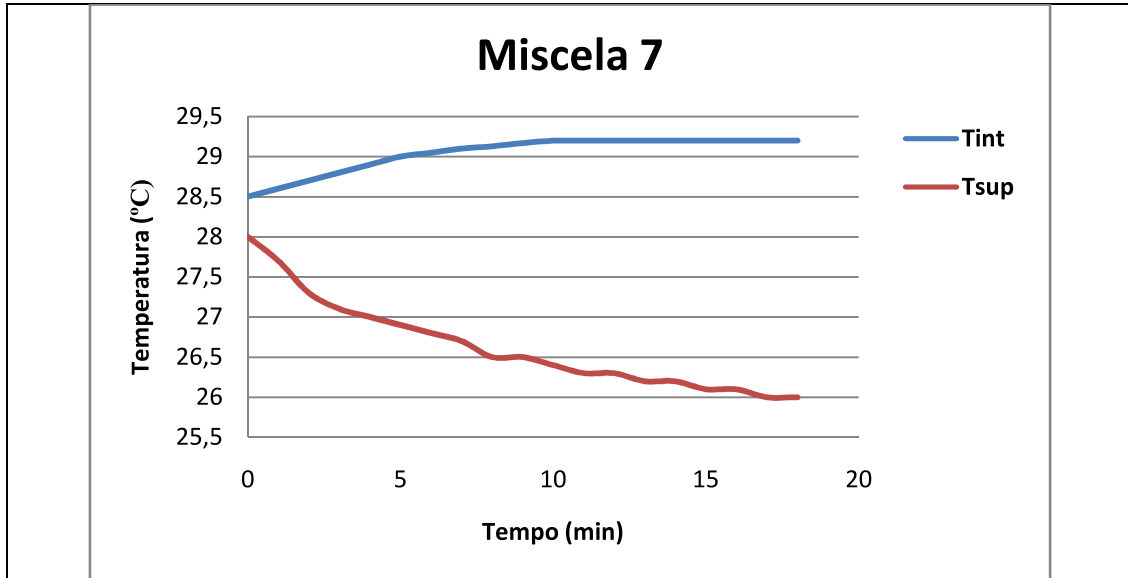
Tab 5.7 – CALCE 2%, UMIDITÀ 12% - Temperature registrate.

Miscela 6: 2% CALCE, 14% ACQUA				
Temperatura pre-miscela [°C]	t [min]	Temperatura interna [°C]	Temperatura media superficiale [°C]	Effetto all'infrarosso nel tempo
27,0	0	29	28,7	t = 0
	1		28,7	t = 5 min
	2		28,2	t = 15 min
	3		27,9	t = 30 min
	4		27,7	
	5	29,2	27,5	
	6		27,3	
	7		27,1	
	8		27,1	
	9		27,0	
	10	29,2	27,0	
	11		26,8	
	12		26,8	
	13		26,7	
	14		26,5	
	15	29,2	26,5	
	16		26,4	
	17		26,4	
	18		26,4	
	19		26,3	
	20	29	26,2	
	21		26,2	
	22		26,1	
	23		26,1	
	24		26,0	
	25	28,8	26,0	
	26		26,0	
	27		25,9	
	28		25,9	
	29		25,7	
30	28,8	25,7		
Temperatura massima raggiunta [°C]			30,6	
Osservazioni			-	
Temperatura ambiente [°C]			26 ± 1	



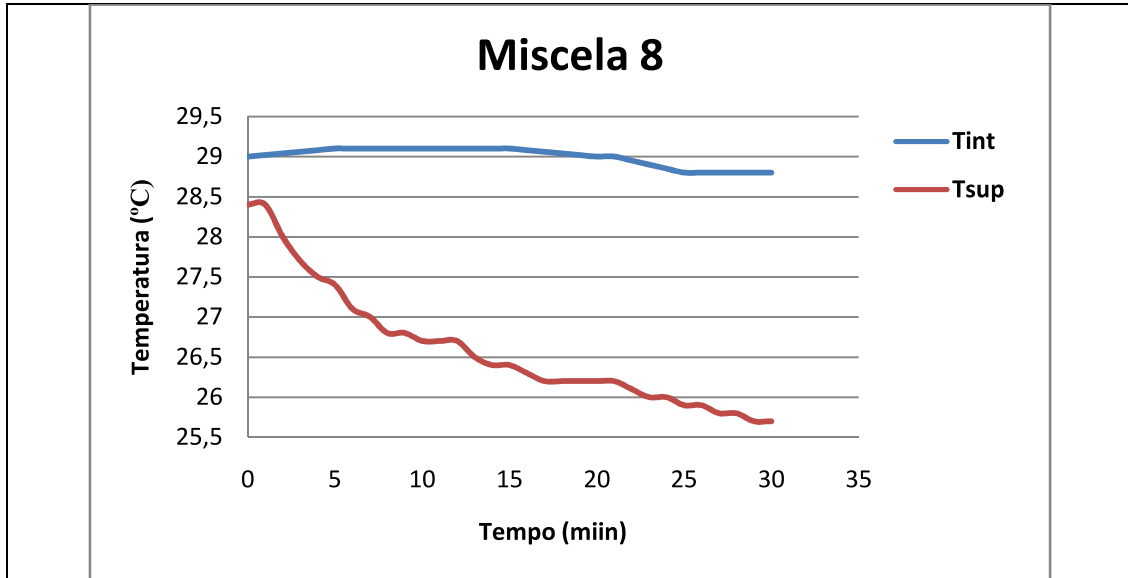
Tab 5.8 – CALCE 2%, UMIDITÀ 14% - Temperature registrate.

Miscela 7: 2% CALCE, 16% ACQUA				
Temperatura pre-miscela [°C]	t [min]	Temperatura interna [°C]	Temperatura media superficiale [°C]	Effetto all'infrarosso nel tempo
27,0	0	28,5	28,0	<p>t = 0</p>  <p>t = 5 min</p>  <p>t = 15 min</p> 
	1		27,7	
	2		27,3	
	3		27,1	
	4		27,0	
	5	29	26,9	
	6		26,8	
	7		26,7	
	8		26,5	
	9		26,5	
	10	29,2	26,4	
	11		26,3	
	12		26,3	
	13		26,2	
	14		26,2	
	15	29,2	26,1	
	16		26,1	
	17		26,0	
18		26,0		
Temperatura massima raggiunta [°C]			30,1	
Osservazioni			<i>Interruzione per spegnimento termocamera al minuto 18.</i>	
Temperatura ambiente [°C]			26 ± 1	

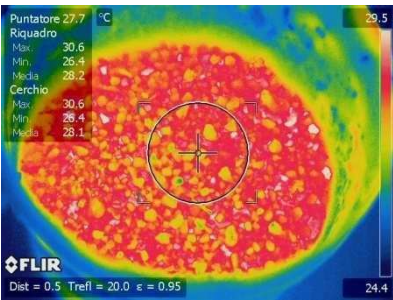
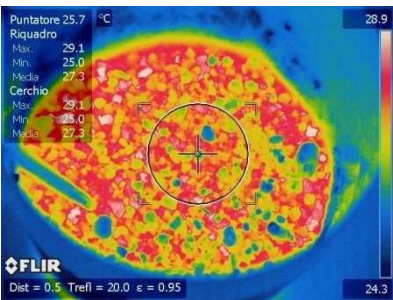
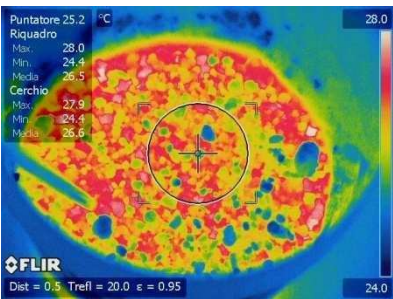
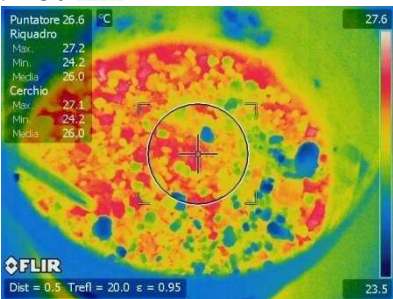


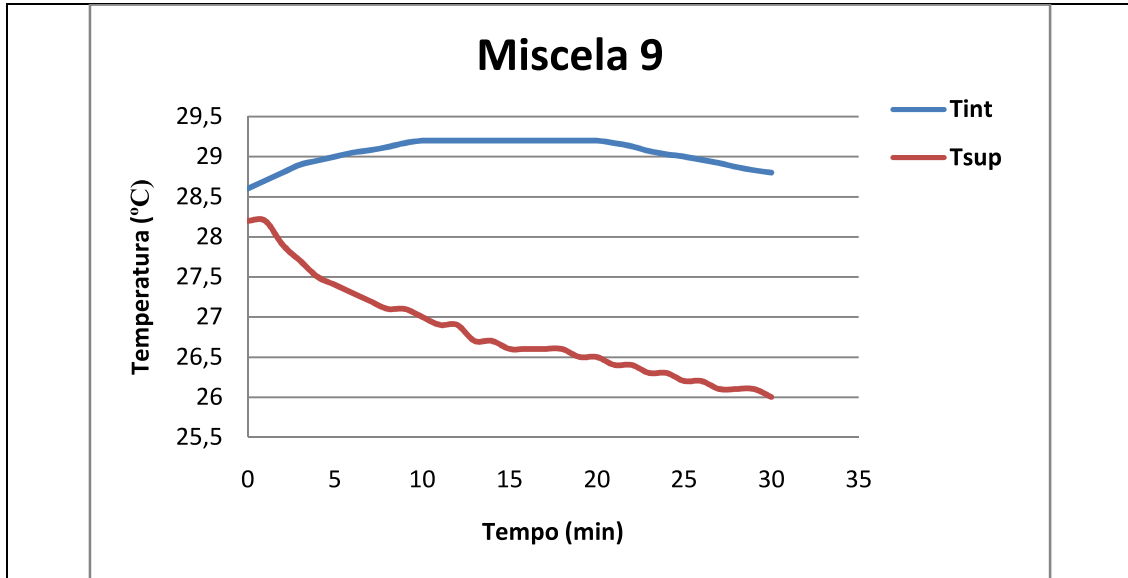
Tab 5.9 – CALCE 2%, UMIDITÀ 16% - Temperature registrate.

Miscela 8: 2% CALCE, 18% ACQUA				
Temperatura pre-miscela [°C]	t [min]	Temperatura interna [°C]	Temperatura media superficiale [°C]	Effetto all'infrarosso nel tempo
27,0	0	29	28,4	t = 0
	1		28,4	t = 5 min
	2		28,0	t = 15 min
	3		27,7	t = 30 min
	4		27,5	
	5	29,1	27,4	
	6		27,1	
	7		27,0	
	8		26,8	
	9		26,8	
	10	29,1	26,7	
	11		26,7	
	12		26,7	
	13		26,5	
	14		26,4	
	15	29,1	26,4	
	16		26,3	
	17		26,2	
	18		26,2	
	19		26,2	
	20	29	26,2	
	21		26,2	
	22		26,1	
	23		26,0	
	24		26,0	
	25	28,8	25,9	
	26		25,9	
	27		25,8	
	28		25,8	
	29		25,7	
30	28,8	25,7		
Temperatura massima raggiunta [°C]			29,7	
Osservazioni			-	
Temperatura ambiente [°C]			26 ± 1	



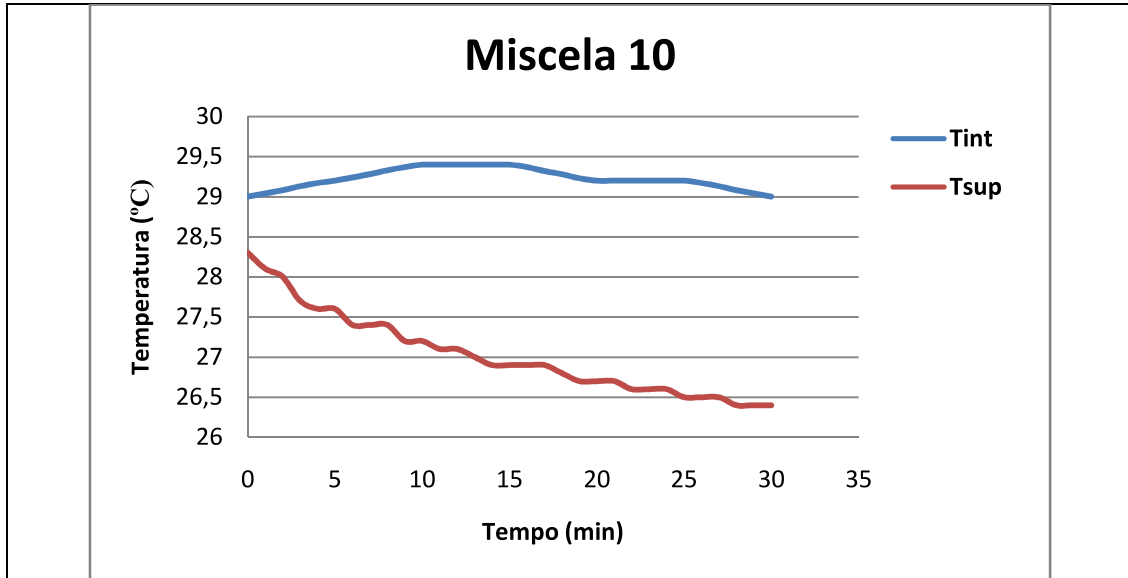
Tab 5.10 – CALCE 2%, UMIDITÀ 18% - Temperature registrate.

Miscela 9: 3% CALCE, 12% ACQUA				
Temperatura pre-miscela [°C]	t [min]	Temperatura interna [°C]	Temperatura media superficiale [°C]	Effetto all'infrarosso nel tempo
26,5	0	28,6	28,2	t = 0 
	1		28,2	t = 5 min 
	2		27,9	t = 15 min 
	3		27,7	t = 30 min 
	4		27,5	
	5	29	27,4	
	6		27,3	
	7		27,2	
	8		27,1	
	9		27,1	
	10	29,2	27,0	
	11		26,9	
	12		26,9	
	13		26,7	
	14		26,7	
	15	29,2	26,6	
	16		26,6	
	17		26,6	
	18		26,6	
	19		26,5	
	20	29,2	26,5	
	21		26,4	
	22		26,4	
	23		26,3	
	24		26,3	
	25	29	26,2	
	26		26,2	
	27		26,1	
	28		26,1	
	29		26,1	
30	28,8	26,0		
Temperatura massima raggiunta [°C]			30,6	
Osservazioni			-	
Temperatura ambiente [°C]			26 ± 1	



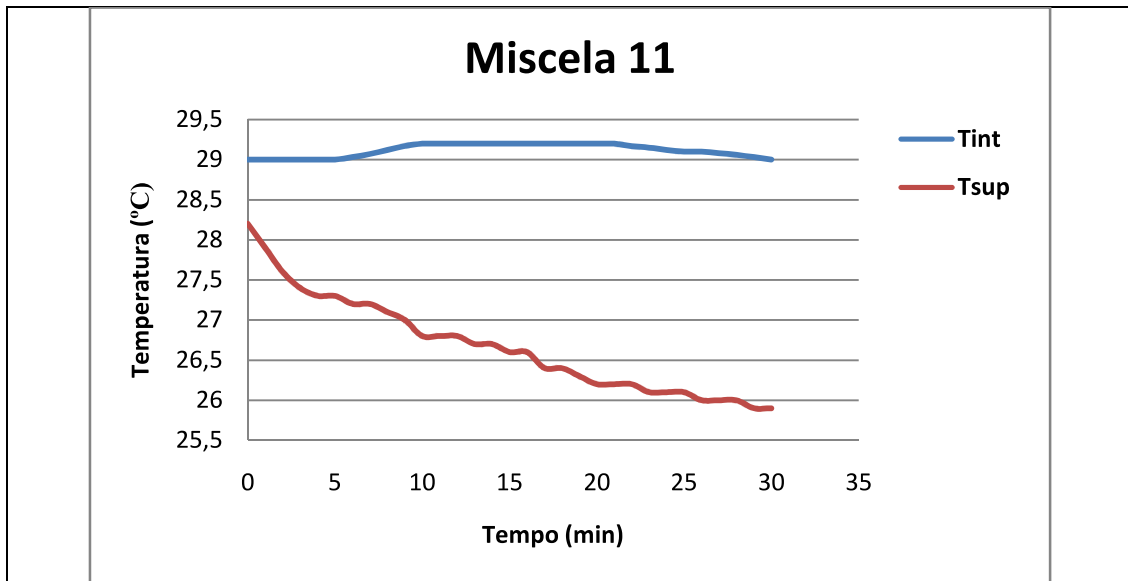
Tab 5.11 – CALCE 3%, UMIDITÀ 12% - Temperature registrate.

Miscela 10: 3% CALCE, 14% ACQUA				
Temperatura pre-miscela [°C]	t [min]	Temperatura interna [°C]	Temperatura media superficiale [°C]	Effetto all'infrarosso nel tempo
26,5	0	29,0	28,3	t = 0
	1		28,1	t = 5 min
	2		28,0	t = 15 min
	3		27,7	t = 30 min
	4		27,6	
	5	29,2	27,6	
	6		27,4	
	7		27,4	
	8		27,4	
	9		27,2	
	10	29,4	27,2	
	11		27,1	
	12		27,1	
	13		27,0	
	14		26,9	
	15	29,4	26,9	
	16		26,9	
	17		26,9	
	18		26,8	
	19		26,7	
	20	29,2	26,7	
	21		26,7	
	22		26,6	
	23		26,6	
	24		26,6	
	25	29,2	26,5	
	26		26,5	
	27		26,5	
	28		26,4	
	29		26,4	
30	29,0	26,4		
Temperatura massima raggiunta [°C]			29,8	
Osservazioni			-	
Temperatura ambiente [°C]			27 ± 1	



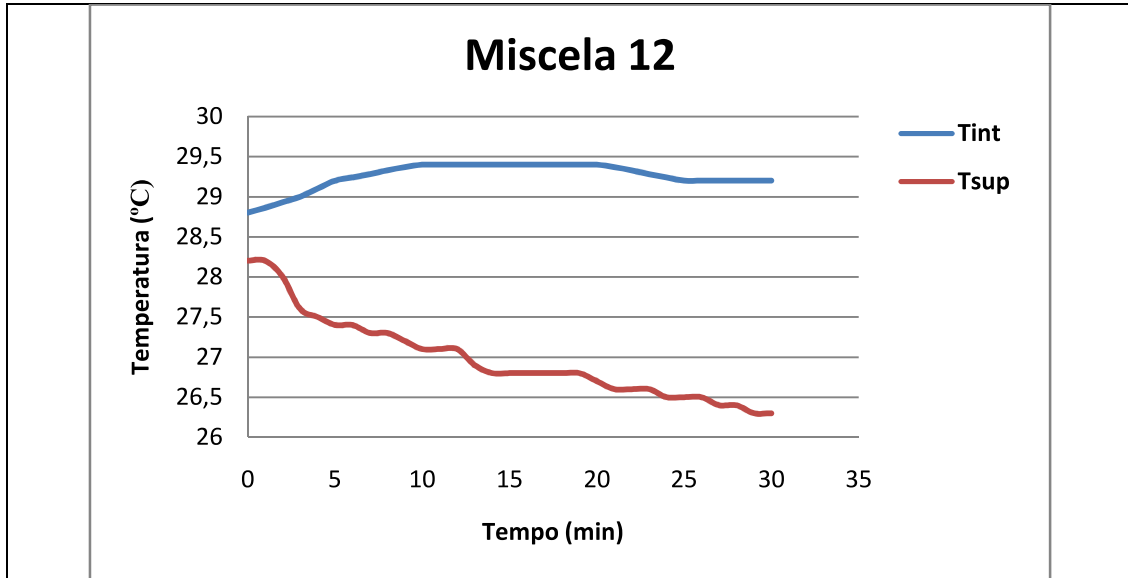
Tab 5.12 – CALCE 3%, UMIDITÀ 14% - Temperature registrate.

Miscela 11: 3% CALCE, 16% ACQUA				
Temperatura pre-miscela [°C]	t [min]	Temperatura interna [°C]	Temperatura media superficiale [°C]	Effetto all'infrarosso nel tempo
27,0	0	29,0	28,2	t = 0
	1		27,9	t = 5 min
	2		27,6	t = 15 min
	3		27,4	t = 30 min
	4		27,3	
	5	29,0	27,3	
	6		27,2	
	7		27,2	
	8		27,1	
	9		27,0	
	10	29,2	26,8	
	11		26,8	
	12		26,8	
	13		26,7	
	14		26,7	
	15	29,2	26,6	
	16		26,6	
	17		26,4	
	18		26,4	
	19		26,3	
	20	29,2	26,2	
	21		26,2	
	22		26,2	
	23		26,1	
	24		26,1	
	25	29,1	26,1	
	26		26,0	
	27		26,0	
	28		26,0	
	29		25,9	
30	29,0	25,9		
Temperatura massima raggiunta [°C]			29,5	
Osservazioni			-	
Temperatura ambiente [°C]			27 ± 1	



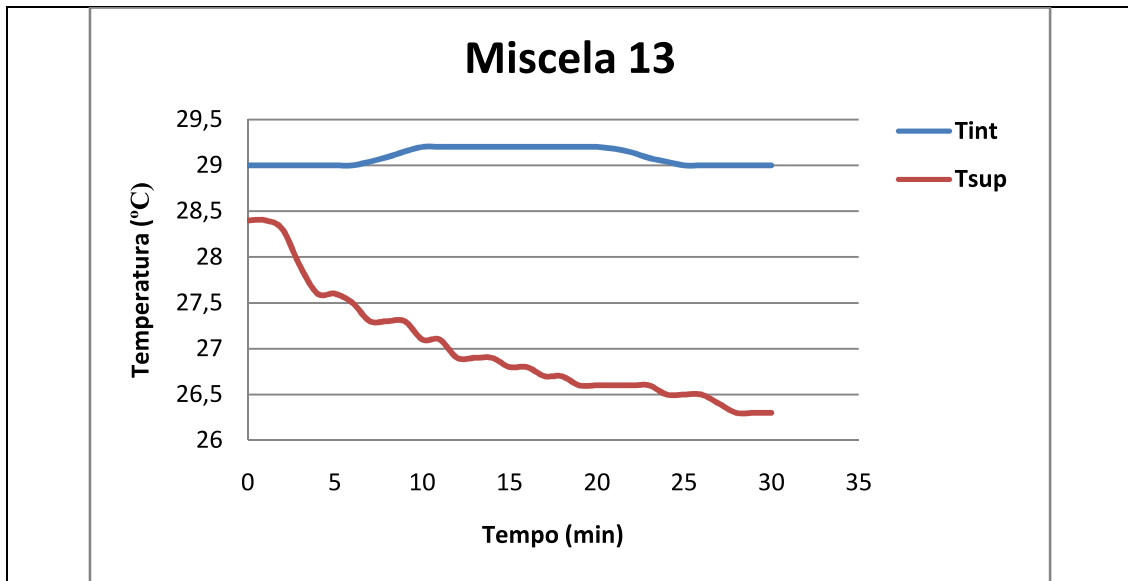
Tab 5.13 – CALCE 3%, UMIDITÀ 16% - Temperature registrate.

Miscela 12:4% CALCE, 14% ACQUA				
Temperatura pre-miscela [°C]	t [min]	Temperatura interna [°C]	Temperatura media superficiale [°C]	Effetto all'infrarosso nel tempo
26,4	0	28,8	28,2	t = 0
	1		28,2	t = 5 min
	2		28,0	t = 15 min
	3		27,6	t = 30 min
	4		27,5	
	5	29,2	27,4	
	6		27,4	
	7		27,3	
	8		27,3	
	9		27,2	
	10	29,4	27,1	
	11		27,1	
	12		27,1	
	13		26,9	
	14		26,8	
	15	29,4	26,8	
	16		26,8	
	17		26,8	
	18		26,8	
	19		26,8	
	20	29,4	26,7	
	21		26,6	
	22		26,6	
	23		26,6	
	24		26,5	
	25	29,2	26,5	
	26		26,5	
	27		26,4	
	28		26,4	
	29		26,3	
30	29,2	26,3		
Temperatura massima raggiunta [°C]			30,2	
Osservazioni			-	
Temperatura ambiente [°C]			27 ± 1	



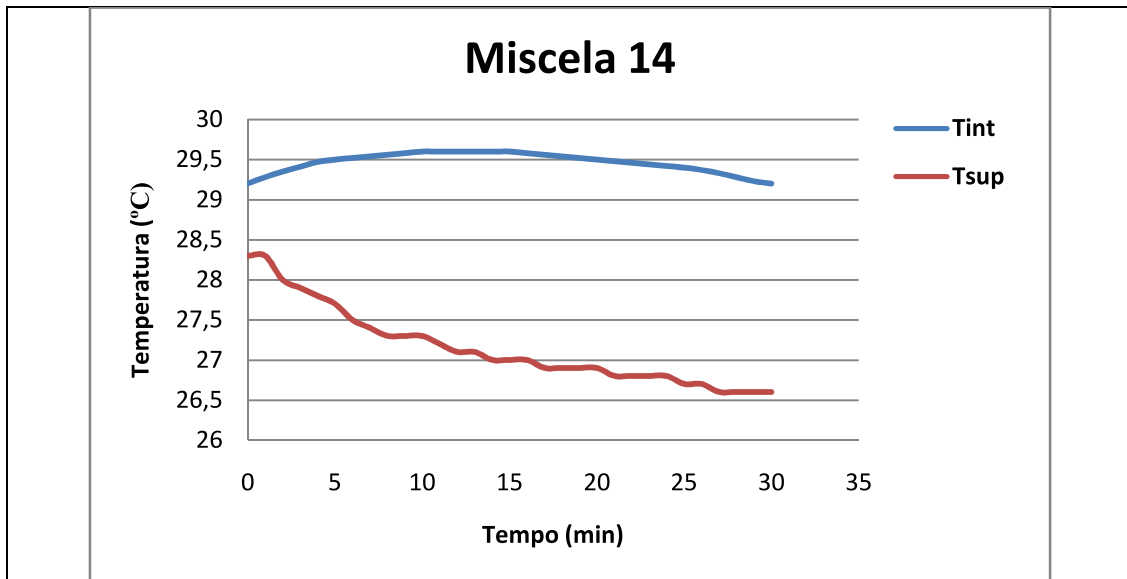
Tab 5.14 – CALCE 4%, UMIDITÀ 14% - Temperature registrate.

Miscela 13:4% CALCE, 16% ACQUA					
Temperatura pre-miscela [°C]	t [min]	Temperatura interna [°C]	Temperatura media superficiale [°C]	Effetto all'infrarosso nel tempo	
27,0	0	29,0	28,4	t = 0 	
	1		28,4	t = 5 min 	
	2		28,3	t = 15 min 	
	3		27,9	t = 30 min 	
	4		27,6		
	5	29,0	27,6		
	6		27,5		
	7		27,3		
	8		27,3		
	9		27,3		
	10	29,2	27,1		
	11		27,1		
	12		26,9		
	13		26,9		
	14		26,9		
	15	29,2	26,8		
	16		26,8		
	17		26,7		
	18		26,7		
	19		26,6		
	20	29,2	26,6		
	21		26,6		
	22		26,6		
	23		26,6		
	24		26,5		
	25	29,0	26,5		
	26		26,5		
	27		26,4		
	28		26,3		
	29		26,3		
30	29,0	26,3			
Temperatura massima raggiunta [°C]			29,6		
Osservazioni			-		
Temperatura ambiente [°C]			27 ± 1		



Tab 5.15 – CALCE 4%, UMIDITÀ 16% - Temperature registrate.

Miscela 14:4% CALCE, 18% ACQUA				
Temperatura pre-miscela [°C]	t [min]	Temperatura interna [°C]	Temperatura media superficiale [°C]	Effetto all'infrarosso nel tempo
26,5	0	29,2	28,3	t = 0
	1		28,3	t = 5 min
	2		28,0	t = 15 min
	3		27,9	t = 30 min
	4		27,8	
	5	29,5	27,7	
	6		27,5	
	7		27,4	
	8		27,3	
	9		27,3	
	10	29,6	27,3	
	11		27,2	
	12		27,1	
	13		27,1	
	14		27,0	
	15	29,6	27,0	
	16		27,0	
	17		26,9	
	18		26,9	
	19		26,9	
	20	29,5	26,9	
	21		26,8	
	22		26,8	
	23		26,8	
	24		26,8	
	25	29,4	26,7	
	26		26,7	
	27		26,6	
	28		26,6	
	29		26,6	
30	29,2	26,6		
Temperatura massima raggiunta [°C]			29,7	
Osservazioni			-	
Temperatura ambiente [°C]			27 ± 1	



Tab 5.16 – CALCE 4%, UMIDITÀ 18% - Temperature registrate.

5.3.4 Conclusioni sulla sperimentazione in laboratorio

Grazie ai dati raccolti è possibile fornire informazioni di carattere generale valide per tutte le miscele prodotte ed altre sulla correlazione tra le diverse porzioni create.

Per quanto riguarda la modalità di miscelazione della porzione di prova utilizzata nella sperimentazione si può notare che: l'uso del miscelatore elettrico fornisce una miscela più omogenea rispetto alla modalità manuale ed una reazione esotermica più evidente. La conferma è data dai risultati ottenuti sulla miscela 1 di progetto, l'unica realizzata con l'uso di miscelatore elettrico, che evidenziano una temperatura massima, un andamento medio della temperatura ed un mantenimento delle stesse nel tempo superiore a tutti gli altri casi.

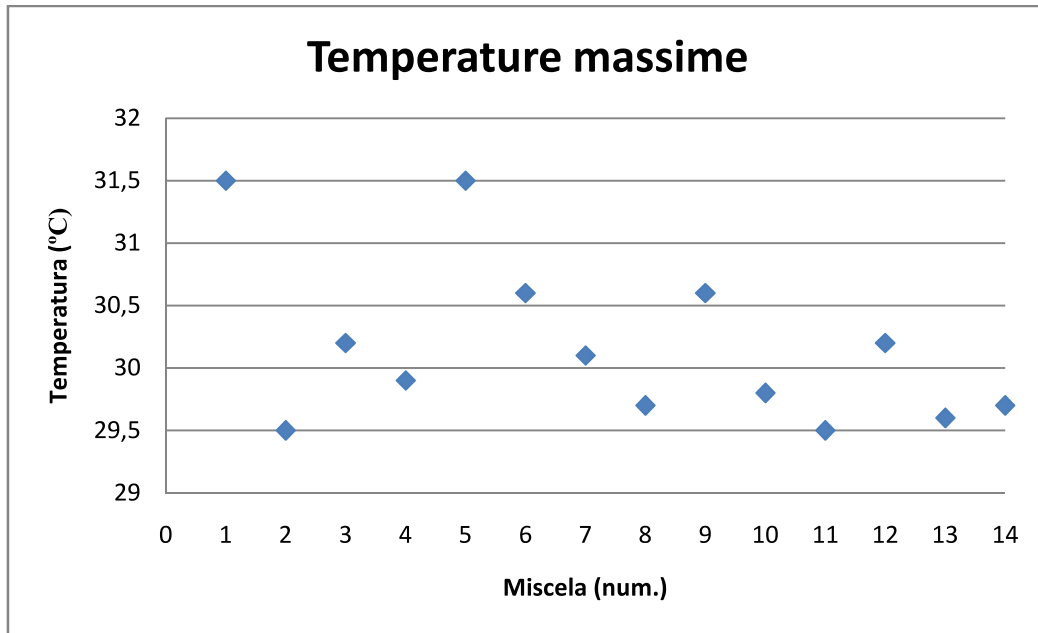


Fig. 5.15 – Temperature massime raggiunte per ciascuna miscela.

Di seguito si riporta per ciascuna miscela la differenza di temperatura massima prodotta dalla reazione esotermica, calcolata come differenza tra la temperatura massima registrata e quella iniziale del terreno prima del trattamento. Queste due temperature sono state calcolate superficialmente per mezzo della termocamera.

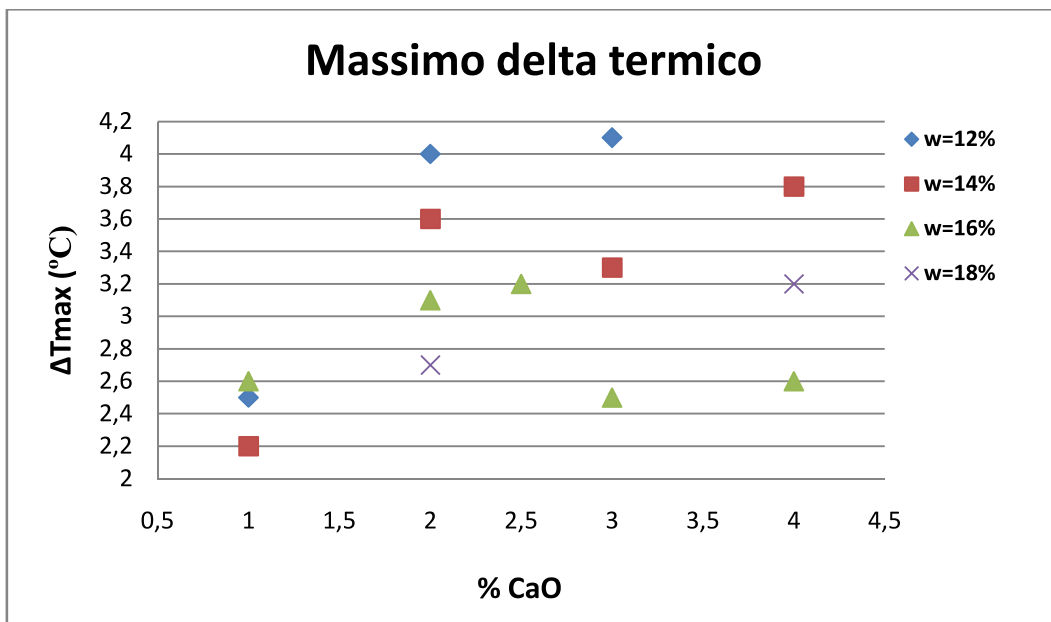


Fig 5.16 – Massima differenza di temperatura prodotta per ciascuna miscela.

Si può osservare come in tutti i casi di studio si ottiene un delta termico massimo, a prescindere dal contenuto di calce inserito nella miscela, per i valori più bassi di umidità.

Superficialmente dunque l'elevato contenuto d'acqua ed il contatto diretto con l'aria e la sua umidità fanno sì che la reazione esotermica sia meno spiccata e che l'abbassamento nel tempo del delta termico sia più marcato e veloce. Viceversa una superficie con basso contenuto d'acqua perderà parte della sua umidità a causa dell'assorbimento dell'acqua di reazione, per cui lo scambio termico con l'ambiente esterno sarà meno consistente così da permettere alla temperatura di salire maggiormente e poi di abbassarsi più lentamente nel tempo.

A conferma di questo si nota come, a fine prova, le superfici più umide raggiungono temperature inferiori a quella iniziale registrata e a volte anche a quella ambientale, fenomeno che non si è mai verificato per le miscele con i più bassi contenuti d'acqua.

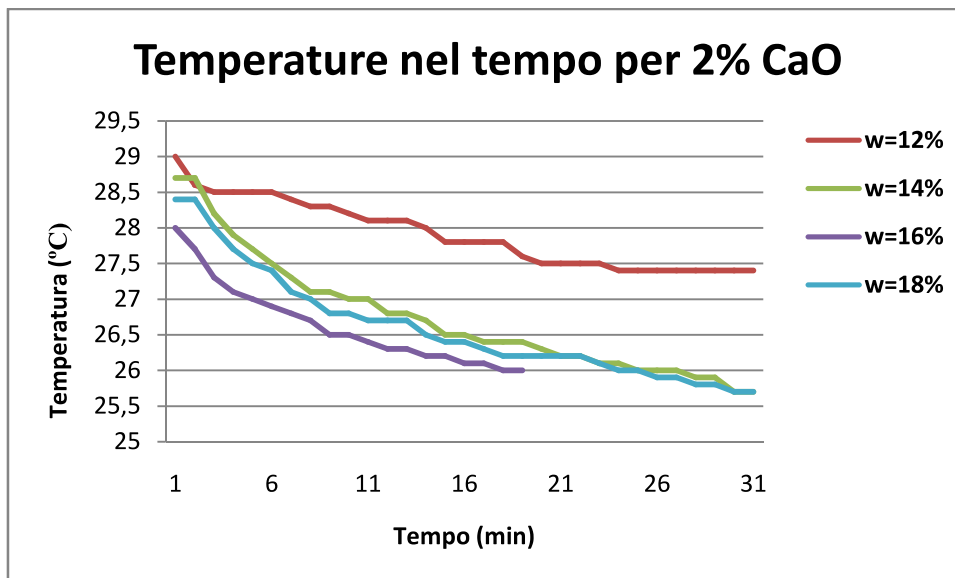


Fig 5.17 – Andamento nel tempo della temperatura superficiale per miscele con 2% di calce.

A parità di contenuto d'acqua si nota invece che il quantitativo di calce influenza in maniera poco significativa l'andamento termico superficiale.

Il diagramma seguente (Fig. 5.18) riporta l'andamento nel tempo della temperatura superficiale per un valore fissato di umidità (si è scelto il valore $w=14\%$, utilizzato per tutti i quantitativi di calce) al variare del contenuto di calce. Non viene riportata la curva relativa all'1% di calce in quanto questo valore risulta poco rappresentativo e nella pratica comune non viene utilizzato.

Si osserva come il fattore che influenza in maniera maggiore il raffreddamento superficiale, anche a parità di umidità, sia la temperatura ambientale. La prova con miscela al 2% di calce è infatti stata realizzata con una temperatura atmosferica di 26 °C mentre quelle con i quantitativi di calce superiori sono state effettuate a circa 27 °C; questo è il motivo per cui si hanno differenze sul valore di temperatura finale.

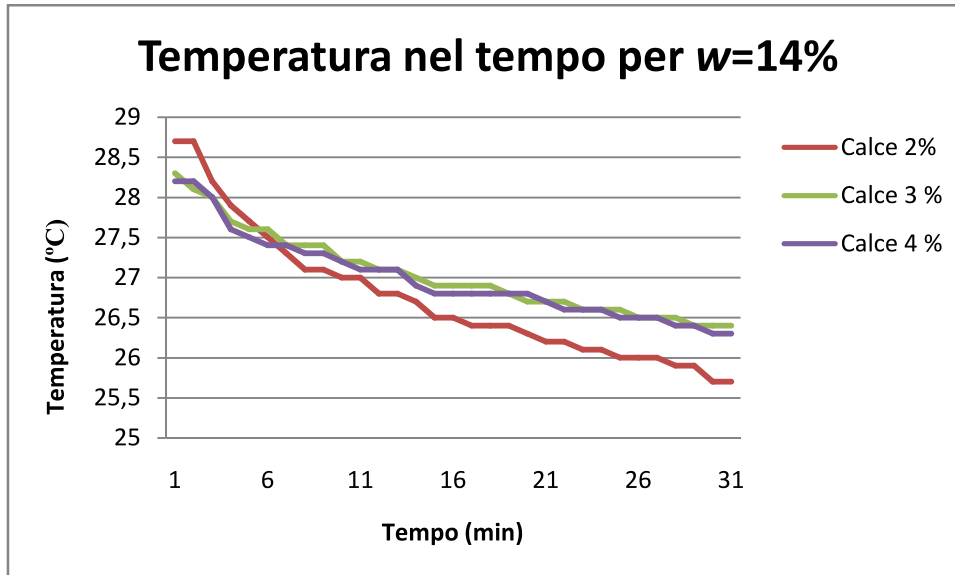


Fig. 5.18 – Andamento nel tempo della temperatura superficiale per umidità del 14%.

La reazione produce il massimo delta termico entro il primo minuto dalla miscelazione dei materiali; successivamente la temperatura superficiale inizia ad abbassarsi fino a tornare a valori simili a quello iniziale in circa 30 minuti.

Dalle immagini all'infrarosso si osserva che l'innalzamento termico iniziale è uniforme in tutta la superficie, infatti i valori di temperatura massima, minima e media nei primi minuti sono molto ravvicinati. Il raffreddamento invece è meno omogeneo e inizialmente interessa i grani e i grumi più grandi, che a causa delle loro maggiori dimensioni assorbono un quantitativo d'acqua superiore, producendo uno scambio termico con l'ambiente esterno più evidente.

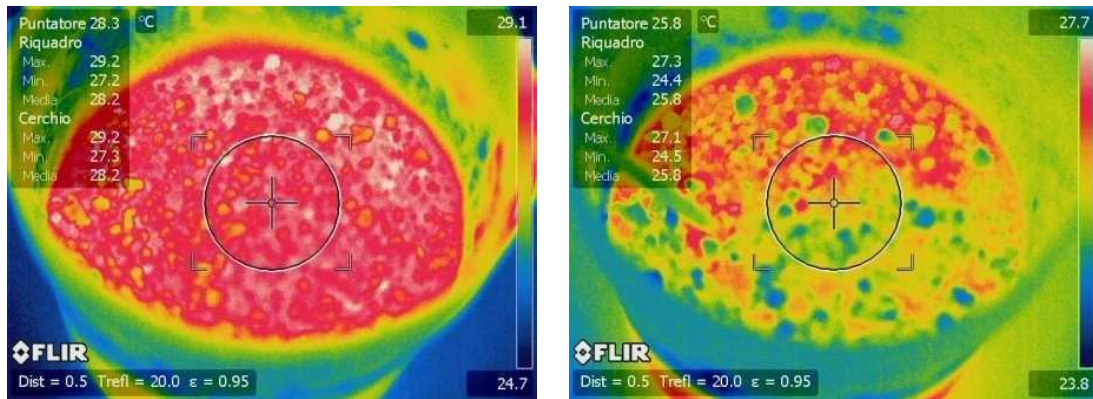


Fig. 5.19 – Esempio di differenza tra distribuzione termica superficiale iniziale e finale.

L'andamento della temperatura interna è completamente differente da quello superficiale; la temperatura raggiunge il suo valore massimo dopo circa 5 minuti dalla miscelazione e lo mantiene per circa 15, quindi inizia a scendere lentamente, rimanendo quasi costante fino al termine dei 30 minuti di misurazione. Questa tendenza è dovuta all'isolamento termico che scaturisce all'interno della miscela nei confronti dell'ambiente esterno e ad un conseguente minore scambio termico.

Anche le temperature interne sono superiori per le porzioni di prova con più bassi quantitativi d'acqua, per cui valgono le considerazioni appena fatte per la temperatura superficiale; la massima temperatura interna si è ottenuta con la miscela 5, contenente il 2% di calce e il 12% di umidità.

Riguardo alla temperatura interna si possono effettuare due ulteriori considerazioni di carattere generale:

- Il delta termico prodotto nei 30 minuti di misurazione è sensibilmente più piccolo di quello misurato superficialmente (pochi punti decimali), tanto da poter considerare il valore di temperatura interna approssimativamente costante per tutta la durata della prova.
- I valori ottenuti nelle varie miscele sono molto simili e si attestano intorno a 30 °C, ad esclusione della miscela 1 di progetto, che come si è detto presenta differenze nella procedura di realizzazione del campione.

Si ritiene dunque che all'interno della porzione di prova, dove gli scambi termici e l'influenza dell'ambiente esterno sono ridotti, la reazione dovuta al trattamento avvenga in maniera completa e, dunque, migliore rispetto alla superficie esterna. Inoltre si presume che le temperature ottenute dipendano soprattutto dalla qualità e dalla tipologia

dei materiali utilizzati piuttosto che dai loro quantitativi; questo conferma il fatto che i 14 provini testati, realizzati tutti con l'uso degli stessi materiali, producono temperature interne simili.

L'andamento delle temperature nel tempo appena descritto è desumibile dalle informazioni riportate nelle tabelle riassuntive precedenti, è simile per tutte le miscele analizzate.

Si riporta il diagramma relativo alla miscela 1 di progetto (Fig. 5.20) che è rappresentativo per tutte le miscele. Risulta evidente come la temperatura superficiale, una volta terminato l'effetto esotermico, tenda al valore della temperatura atmosferica, a dimostrazione dell'avvenuto completo scambio termico tra superficie della porzione di prova ed ambiente circostante.

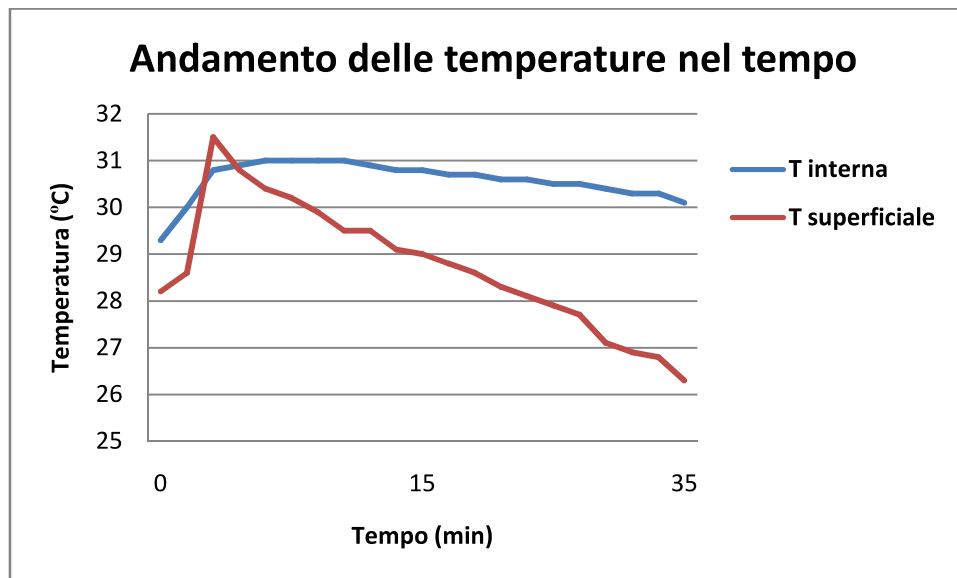


Fig. 5.20 – Andamento delle temperature nel tempo – miscela 1.

I risultati ottenuti in queste prove di laboratorio e le conclusioni riportate in questo paragrafo evidenziano come l'uso della termocamera possa servire per valutazioni sul trattamento a calce e come queste abbiano un significato maggiore se effettuate direttamente in sito.

Infatti le informazioni di laboratorio più utili sulla qualità della miscela creata sono deducibili dai dati relativi alla temperatura interna, quindi attraverso strumenti di misurazione termica classici.

Attraverso l'uso della termocamera si ottengono informazioni sull'omogeneità superficiale, sulla frantumazione uniforme dei grani di terreno e sull'eventuale presenza di difformità dall'andamento termico previsto.

In definitiva, grazie allo studio in laboratorio, è stato possibile stabilire che l'analisi all'infrarosso di un trattamento a calce eseguito correttamente deve evidenziare:

- Innalzamento quasi istantaneo ed omogeneo della temperatura su tutta la superficie dello strato trattato, a conferma dell'avvenuta reazione esotermica.
- Decremento più omogeneo possibile della temperatura, a indicare la buona qualità delle operazioni di miscelazione e stesa.
- Annullamento del delta termico prodotto nel maggior tempo possibile, per confermare la buona riuscita della reazione chimica e dunque del trattamento stesso.

Risultati che non rispettano i tre punti riportati andranno attentamente controllati, per verificare se ci si trova di fronte a problematiche puntuali o distribuite. Tali casi possono essere la conseguenza di errori nella procedura di realizzazione del trattamento o, ancora peggio, di situazioni in cui il trattamento a calce, non avendo fornito gli esiti sperati, si è rilevato non essere il tipo di intervento idoneo per la stabilizzazione del terreno.

A completamento dei risultati ottenuti nella sperimentazione in laboratorio si è passati a una fase sperimentale in sito; nel paragrafo che segue si riportano gli esiti di questa seconda attività di ricerca.

5.4 Studio sperimentale della reazione esotermica superficiale in sito

L'inserimento della termocamera ad infrarossi tra le apparecchiature utilizzate per effettuare verifiche su un trattamento a calce trova la sua giusta collocazione nel contesto dei controlli delle operazioni in sito.

Le conclusioni appena viste cui si è giunti grazie alla sperimentazione in laboratorio sono servite a mettere in luce i parametri valutabili attraverso lo studio all'infrarosso di un trattamento a calce e il probabile andamento termico superficiale che interessa questi tipi di interventi.

La fase principale di tutta la sperimentazione è stata quella relativa all'applicazione dello strumento in sito, per valutarne l'efficacia e per determinarne la corretta taratura delle impostazioni in questo specifico campo.

Le aree analizzate sono relative a due cantieri in cui sono state eseguite operazioni di trattamento a calce di terreni argillosi ad opera della ditta CGS Group S.p.A.

5.4.1 Primo Sito visitato: Borgo Panigale (Bo), 11/04/2011

Il primo sito è servito alla sola taratura della termocamera. Esso riguarda il miglioramento a calce di terreno argilloso in un piazzale destinato alla costruzione di stabilimenti industriali presso il Quartiere Borgo Panigale di Bologna.

Le elevate piogge delle settimane precedenti e la collocazione in pendenza del piazzale hanno creato problemi relativi all'eccessiva quantità d'acqua presente nel terreno. Una soluzione parziale è stata quella di ridurre l'acqua inserita per mezzo dell'autobotte nella zona più alta, mentre per la zona più bassa, in cui l'umidità del terreno non consentiva il proseguimento dei lavori, si è scelto di rimandare il trattamento. Viste queste condizioni la zona lavorata è stata istantaneamente compattata attraverso rulli vibro-gommati disposti a ridosso della fresa miscelatrice, non consentendo quindi di studiare l'andamento nel tempo della temperatura della miscela appena realizzata.



Fig. 5.21 – Situazione in essere del cantiere di Borgo Panigale.

Con queste condizioni non è stato possibile eseguire un'analisi ottimale e completa delle caratteristiche termiche del trattamento; va ricordato anche che questa è stata la

prima esperienza relativa all'uso in sito della termocamera per attività di questo tipo. Per tali motivi ci si è focalizzati sul tentativo di valutare la giusta distanza da cui effettuare la registrazione e verificare in seguito la validità delle immagini all'infrarosso.

Sono state eseguite fotografie all'infrarosso di tipo puntuale da diversi punti del sito, a diverse distanze ed angolazioni dal terreno appena trattato.



Fig 5.22 – Posizionamenti di tentativo della termocamera per la registrazione delle immagini.

5.4.1.1 Esiti della visita al sito di Borgo Panigale

Le immagini all'infrarosso hanno evidenziato i problemi relativi allo specifico cantiere appena descritti; si osserva in particolare come la termocamera sia utile a individuare la zona con eccessiva umidità: quest'area all'infrarosso è visualizzabile facilmente e rappresenta la zona "fredda", caratterizzata da un colore più scuro rispetto a quella circostante trattata (Fig. 5.23).



Fig. 5.23 – Individuazione della zona "fredda" tramite immagini all'infrarosso.

Per poter identificare con chiarezza le zone da analizzare e per poter correlare in maniera adeguata la foto all'infrarosso con quella reale corrispondente la distanza adeguata di misurazione è di qualche decina di metri dalla macchina miscelatrice, con posizionamento della termocamera in asse con la direzione di moto del mezzo, dunque anche con la fascia di terreno appena trattata a calce.

Un errato posizionamento può portare ad un difficile orientamento all'interno delle immagini e ad una lettura dei dati più complessa, in quanto la mancanza di riferimenti certi causa problematiche relative alla sistemazione temporale delle varie fasce di terreno trattate (Fig. 5.24).



Fig. 5.24 – Esempio di errato posizionamento della termocamera.

Inoltre si è osservato come le condizioni ambientali ottimali per il trattamento stesso, vale a dire mancanza di precipitazioni in atto e temperatura ambientale abbastanza elevata, creino problemi per la messa a fuoco e per la taratura della termocamera. Tra i motivi ricordiamo la scadente visualizzazione dello schermo LCD in condizioni assolate e le temperature raggiunte tramite la reazione esotermica che nella stagione estiva non si discostano eccessivamente dalle temperature dell'ambiente e degli oggetti circostanti.

Le conclusioni a cui si è giunti grazie a questa visita al sito di Borgo Panigale consentono di effettuare osservazioni che sono servite per preparare adeguatamente le ispezioni successive in altri siti e che valgono a livello generale; tra queste si ricordano le operazioni di particolare importanza:

- Registrazione all'infrarosso del sito prima di eseguire il trattamento, per evidenziare eventuali problematiche già in essere che potrebbero invalidare le operazioni di stabilizzazione a calce.
- Giusto posizionamento della termocamera, in modo da registrare le temperature nel tempo della fascia trattata più recente, senza ostacoli visivi e con punti di riferimento chiari per poter successivamente correlare facilmente l'immagine all'infrarosso con quella reale corrispondente.
- Giusta messa a fuoco e taratura dei parametri fondamentali della termocamera prima di avviare la registrazione.

5.4.2 Secondo sito: Granarolo dell'Emilia, 25/07/2011

Il secondo sito visitato è situato nel Comune di Granarolo dell'Emilia; si tratta di un cantiere della ditta CGS Group inerente al miglioramento a calce di un terreno argilloso ed è incluso nei lavori di costruzione della Variante n. 5 dalla S.P. n. 3 a Via Bargello, lato Trasversale di Pianura, ad opera della Provincia di Bologna.

Il sito è dunque relativo alla realizzazione degli strati profondi di una sovrastruttura stradale e presenta una significativa particolarità: il materiale soggetto a trattamento è costituito già in partenza da una miscela di terreno e calce al 2%. Infatti il terreno posto in sito aveva subito una stabilizzazione a calce circa due anni prima della nuova operazione. I cedimenti distribuiti e concentrati che si sono sviluppati nei due anni passati e le problematiche di stabilità riscontrate nei tratti limitrofi hanno evidenziato come il quantitativo di calce presente non era sufficiente a stabilizzare definitivamente l'argilla.

La soluzione adottata è stata dunque quella di eseguire un nuovo trattamento, inserendo nella miscela un nuovo quantitativo di calce, pari a 10 kg/m^2 per 35 cm di profondità.

Si è fatta l'ipotesi iniziale che, essendo la reazione chimica prodotta dalla precedente stabilizzazione ormai da tempo completata e, quindi, il materiale creato in sito stabile dal punto di vista chimico – fisico, sia possibile analizzare l'operazione seguita come un normale trattamento a calce di terreno vergine, in quanto gli effetti termici attesi sono del tutto simili a quelli di un trattamento tradizionale.



Fig. 5.25 – Operazioni di miscelazione nel cantiere di Granarolo dell’Emilia.

Si riportano i parametri ambientali caratteristici del sito al momento della registrazione (Tab. 5.17).

SECONDO SITO: GRANAROLO DELL’EMILIA	
Data e ora della registrazione	25/07/2011 ore 11,50
Condizioni meteo	Sereno
Temperatura atmosferica	26°C
Umidità media	60%
Vento	Debole
Temperatura iniziale terreno prima fascia	26,5°C
Temperatura iniziale terreno seconda fascia	26°C
Registrazione effettuata da	Prof. Ing. Andrea Simone Ing. Alessandro Magi

Tab. 5.17 – Informazioni sul sito di Granarolo dell’Emilia.

La sperimentazione sui parametri termici eseguita ha visto la registrazione con termocamera durante la miscelazione di due fasce di terreno per una durata totale di 20 minuti.

Sono state scattate per mezzo della termocamera circa 60 immagini all’infrarosso ed altrettante immagini reali corrispondenti, a distanza temporale di 20 secondi una dall’altra.

Lo strumento è stato posizionato a circa 20 metri dall’area di registrazione, in asse con la traiettoria della stabilizzatrice *WR 2000* quindi con la fascia miscelata.

Le operazioni nei 20 minuti hanno portato alla creazione di due fasce adiacenti di terreno trattato; la termocamera è stata dunque spostata dopo circa 10 minuti in corrispondenza della seconda fascia trattata al fine di disporla nella posizione ideale di registrazione.



Fig. 5.26 – Vista delle due fasce di terreno analizzate e posizionamento della termocamera.

La registrazione delle immagini è stata problematica a causa della scarsa visibilità dovuta alla eccessiva luce solare per le condizioni meteorologiche e l'orario. Si sono ottenute immagini non a fuoco e poco decifrabili, che però contengono tutte le informazioni sulla temperatura necessarie per l'analisi. E' stato quindi necessario modificare le immagini attraverso l'apposito Software *Flir QuickReport*, il quale non può correggere la messa a fuoco di un'immagine salvata dalla termocamera ma possiede degli strumenti per rendere più leggibili i dati registrati attraverso il cambiamento dell'intervallo cromatico utilizzato. Si riporta l'esempio di un'immagine prima e dopo la modifica con Software (Fig. 5.27).

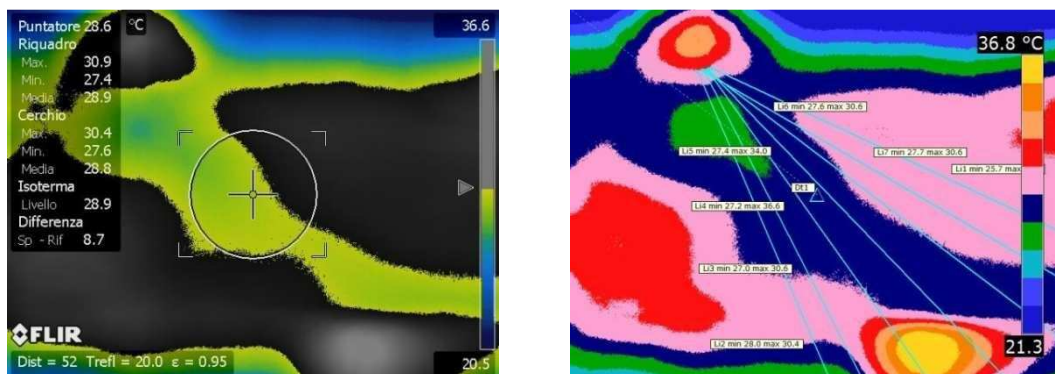


Fig. 5.27 – Immagine all'infrarosso registrata (sinistra) e modificata (destra).

La modifica dell'intervallo cromatico evidenzia le differenze tra le diverse aree dell'immagine ma non è sufficiente per rendere adeguatamente leggibili i dati rilevati. Sono quindi state eseguite altre tre importanti operazioni: lo studio della giusta proporzione tra le dimensioni dell'immagine all'infrarosso e quella reale corrispondente; la sovrapposizione delle due immagini per collocare i dati termici nella loro giusta collocazione e l'inserimento, attraverso *Flir QuickReport*, di linee di sezione in corrispondenza della fascia di terreno trattata, in cui sono indicate le temperature minima e massima lungo ciascuna linea inserita.

Lo studio sulle dimensioni delle coppie di immagini scattate contemporaneamente dalla termocamera indica un rapporto immagine all'infrarosso – immagine reale pari a $1:3,2$. Grazie a questa sistemazione si ottengono immagini finali comprensibili e dai dati facilmente leggibili, a conferma del fatto che l'uso associato termocamera – software consente di ovviare ad eventuali errori di taratura o di registrazione.

Si riporta un esempio dell'operazione completa di sistemazione delle immagini eseguita (Fig. 5.28) che ha portato alla realizzazione delle immagini definitive da cui sono state effettuate le valutazioni sull'andamento termico superficiale.



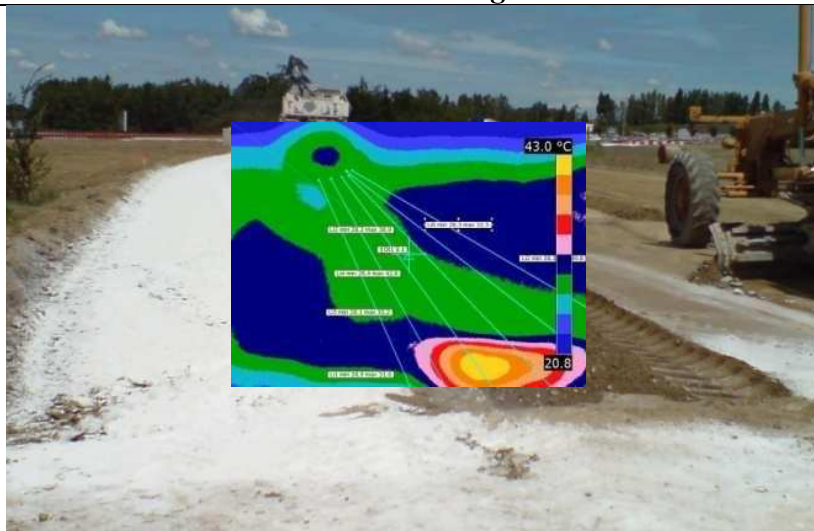
Fig. 5.28 – Esempio di immagine definitiva.

Di seguito vengono inserite alcune immagini definitive relative alle due fasce di terreno analizzate, realizzate a distanza di un minuto una dall'altra, per fornire visivamente l'andamento della temperatura nel tempo durante la registrazione intuibile attraverso l'analisi cromatica (Tab. 5.18). L'analisi approfondita di tutte le immagini viene rimandata al paragrafo successivo.

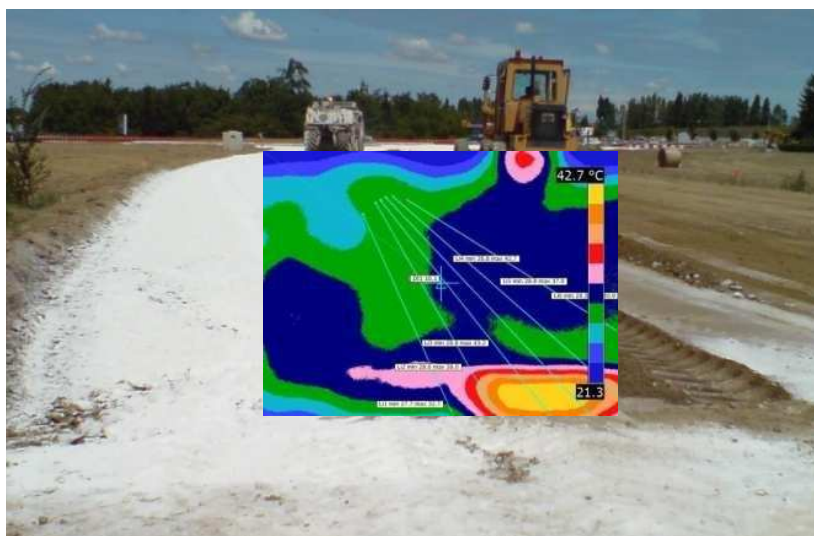
Ore 11.51 – Immagine 1



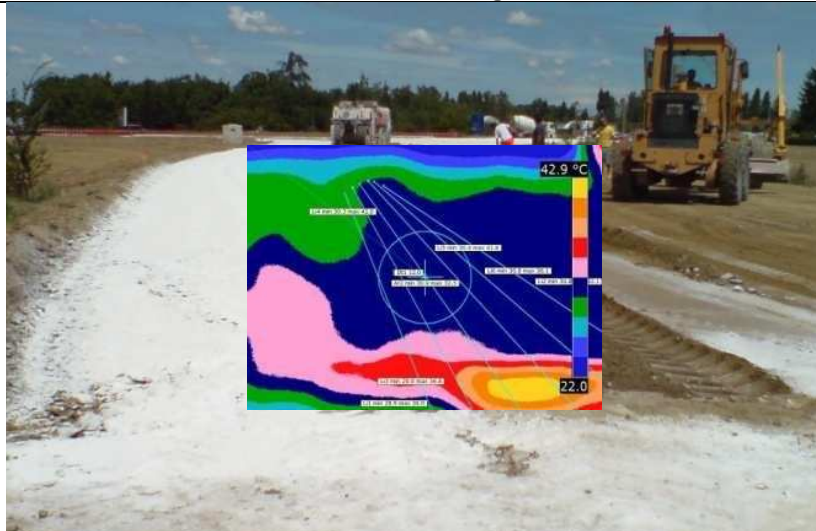
Ore 11.52 – Immagine 2



Ore 11.53 – Immagine 3



Ore 11.54 – Immagine 4



Ore 11.55 – Immagine 5



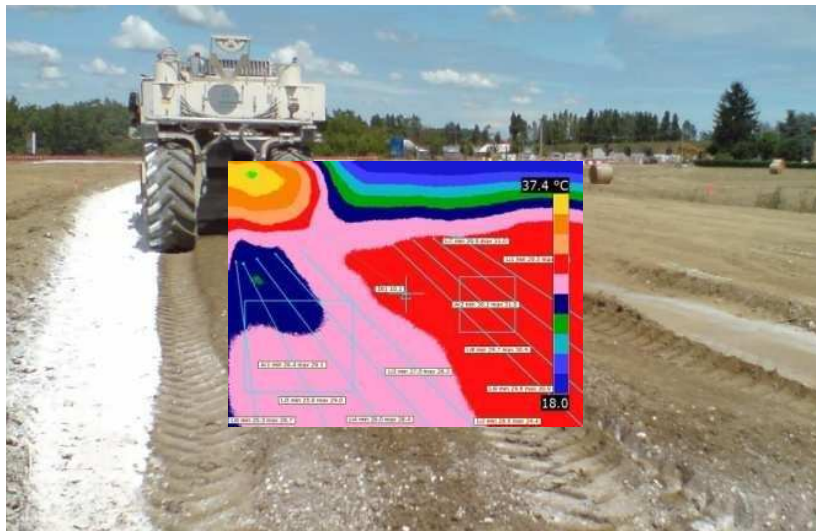
Ore 11.56 – Immagine 6



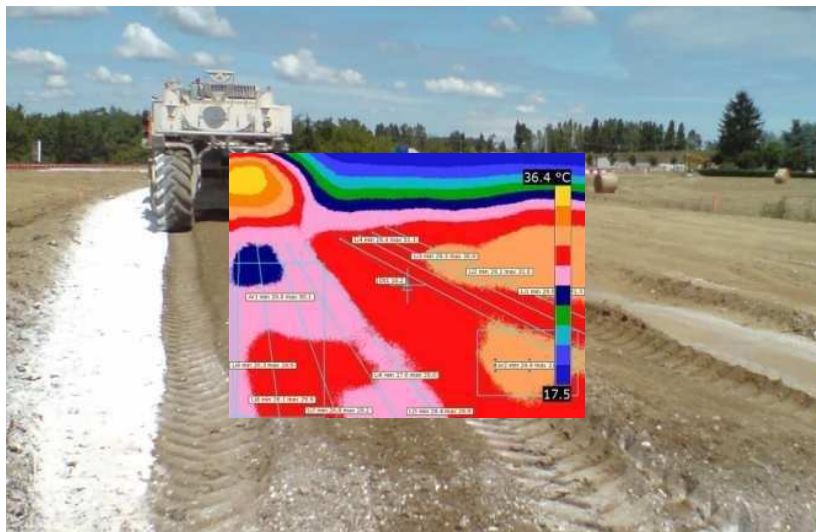
Ore 11.57 – Immagine 7



Ore 11.58 – Immagine 8



Ore 11.59 – Immagine 9



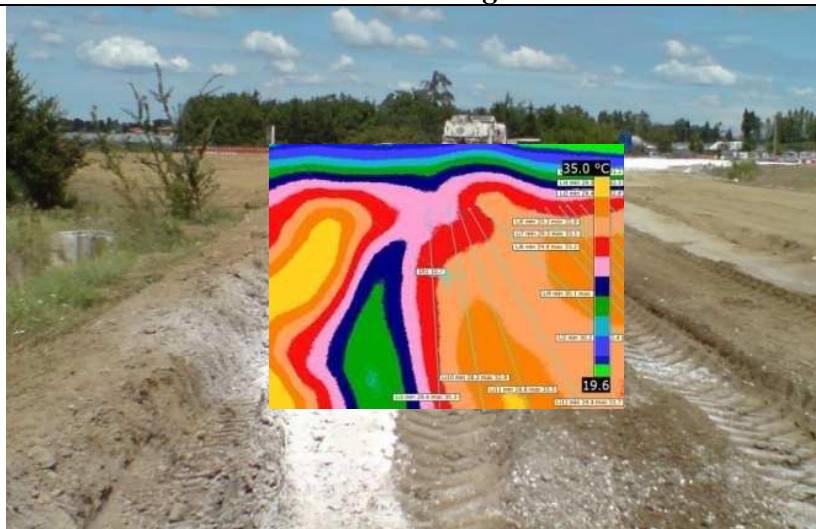
Ore 12.00 – Immagine 10



Ore 12.01 – Immagine 11



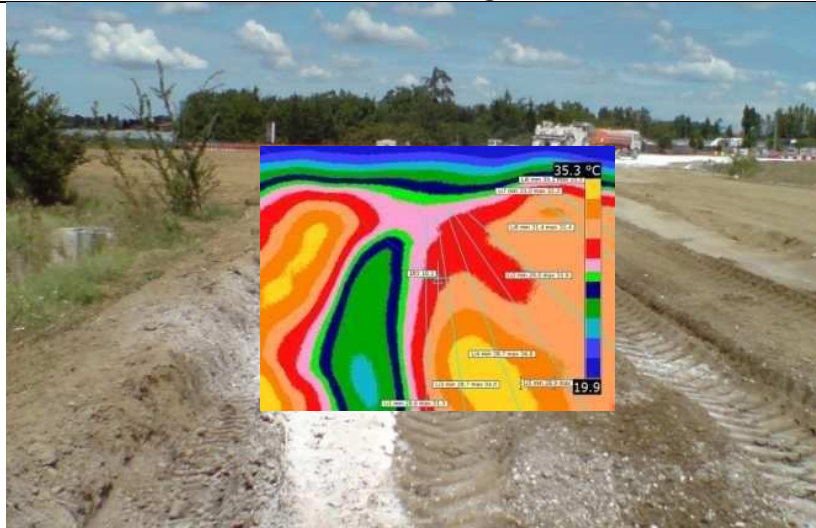
Ore 12.02 – Immagine 12



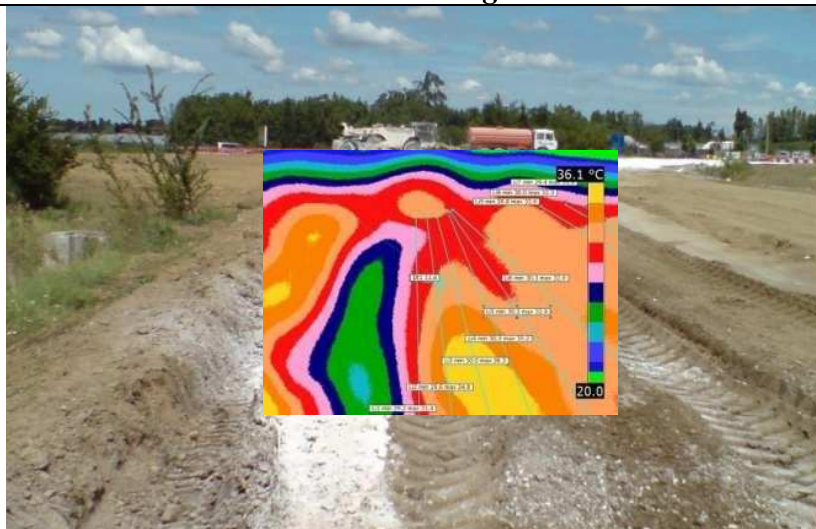
Ore 12.03 – Immagine 13



Ore 12.04 – Immagine 14



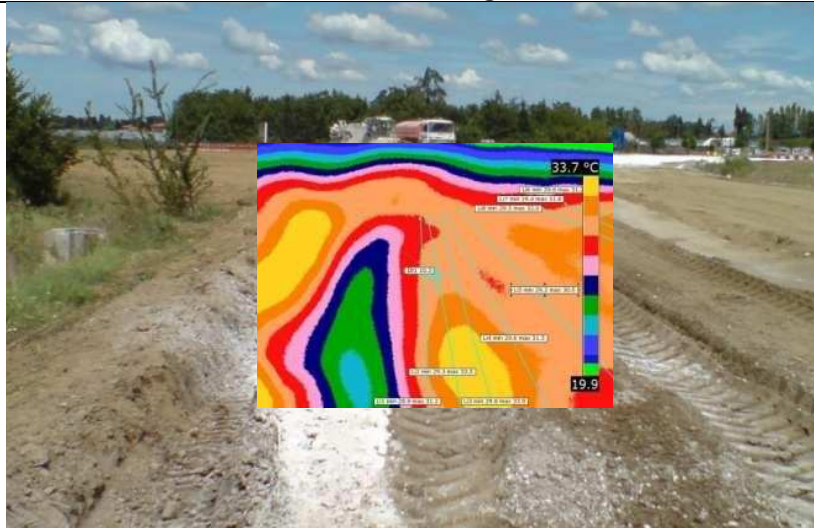
Ore 12.05 – Immagine 15



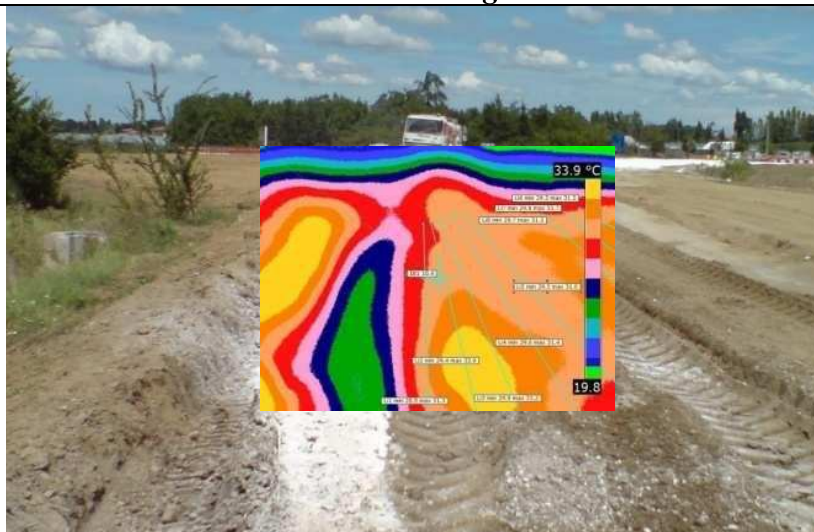
Ore 12.06 – Immagine 16



Ore 12.07 – Immagine 17



Ore 12.08 – Immagine 18



Ore 12.09 – Immagine 19



Tab. 5.18 – Immagini definitive ottenute a intervalli di 1 minuto una dall'altra.

5.4.2.1 Risultati ottenuti dalla sperimentazione in sito presso Granarolo dell'Emilia

Dalle immagini ottenute è stato possibile effettuare valutazioni sull'andamento della temperatura di due fasce di terreno trattate in successione. In particolare, la prima delle due realizzate ha fornito informazioni termiche per tutti i 20 minuti di registrazione.

Come è possibile notare dalle immagini riportate nella Tab. 5.18, l'area analizzata dal punto di vista termico riguarda una fascia centrale dell'immagine reale registrata; il rapporto tra area totale ed immagine all'infrarosso come detto è pari a 1:3,2.

Le temperature puntuali significative registrate nelle due fasce di materiale analizzate (Fig. 5.29) sono del tutto simili e confermano l'ipotesi iniziale che l'intera area studiata possieda caratteristiche chimiche e fisiche omogenee pur essendo stata precedentemente già trattata a calce.

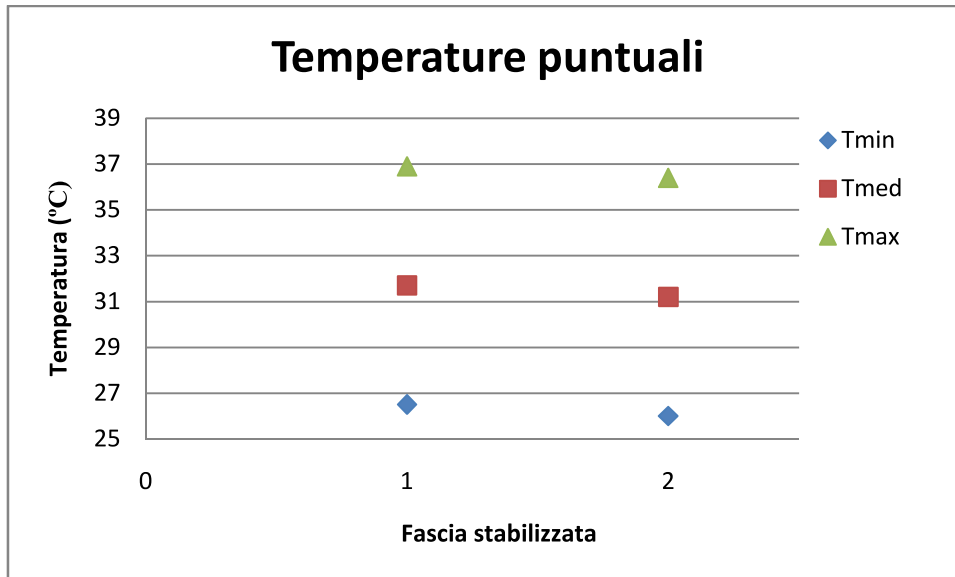


Fig. 5.29 – Temperature minime, medie e massime puntuali registrate nelle due fasce.

Risulta di particolare interesse osservare come il delta termico massimo valutato tramite i valori puntuali di temperatura appena visti sia esattamente lo stesso per entrambe le fasce e pari a $10,4^{\circ}\text{C}$, ad ulteriore conferma della omogeneità del materiale iniziale e della bontà delle operazioni di miscelazione eseguite.

Le temperature puntuali relative alla prima fascia non comprendono la sua zona d'attacco, in quanto in essa è presente una discontinuità dove si crea una forte reazione che fa aumentare la temperatura fino a valori decisamente elevati (temperatura massima registrata: $43,6^{\circ}\text{C}$) ed anomali rispetto a quelli di tutta l'area. Questo fatto è dovuto ad un accumulo di calce depositato ai bordi della zona da trattare e che in parte è stato trasportato sopra la miscela dalla fresa, andando così a modificare sensibilmente il contenuto di calce e soprattutto la sua condizione termica.



Fig. 5.30 – Identificazione dell'area della prima fascia con comportamento anomalo.

La situazione appena descritta è facilmente osservabile anche attraverso le immagini all'infrarosso relative ai primi minuti di miscelazione della prima fascia (Fig. 5.31). Questo caso dimostra l'utilità dell'uso della termocamera per identificare situazioni di mancata omogeneità termica che altrimenti non sarebbero visibili tramite controlli classici.



Fig. 5.31 – Area d'attacco della prima fascia con temperature anomale.

Passando a considerare le temperature distribuite, le immagini termiche forniscono interessanti informazioni che confermano come l'andamento valutato tramite le precedenti fasi sperimentali sia corretto.

L'intervallo cromatico utilizzato per suddividere il campo delle temperature registrate nelle immagini è stato volutamente composto da una successione di colori molto diversa, in modo da poter notare con chiarezza l'andamento termico nel tempo delle fasce trattate a calce.

Si riportano i colori più significativi visibili nelle aree corrispondenti alle fasce e le rispettive temperature rappresentate (Tab. 5.19), distinguendole per bande a causa dell'area anomala presente nella prima fascia, che ha prodotto un intervallo cromatico più ampio e diverso da quello presente nelle immagini relative alla seconda. Grazie a questa tabella è possibile una lettura più agevole delle immagini termiche.

<i>I FASCIA</i>	
<i>Colore</i>	ΔT [°C]
<i>VERDE</i>	26,5 – 28,5
<i>BLU</i>	28,6 – 31,0
<i>ROSA</i>	31,1 – 33,5
<i>ROSSO</i>	33,6 – 35,5
<i>ARANCIONE CHIARO</i>	35,6 – 38,5
<i>ARANCIONE SCURO</i>	38,6 – 41,0
<i>GIALLO</i>	41,1 – 43,8
<i>II FASCIA</i>	
<i>VERDE</i>	26,0 – 27,5
<i>BLU</i>	27,6 – 29,0
<i>ROSA</i>	29,1 – 31,5
<i>ROSSO</i>	31,6 – 33,0
<i>ARANCIONE CHIARO</i>	33,1 – 34,5
<i>ARANCIONE SCURO</i>	34,6 – 36,0
<i>GIALLO</i>	36,1 - 37,5

Tab. 5.19 – Associazione colore – temperatura per migliore lettura delle immagini.

Indirizzando l'attenzione sulla prima fascia, come già detto si può osservare il suo andamento termico per tutti i 20 minuti di registrazione, in quanto anche nelle immagini termiche relative alla seconda strisciata è visibile un tratto della prima (da leggere con l'associazione colore-temperatura della seconda fascia).

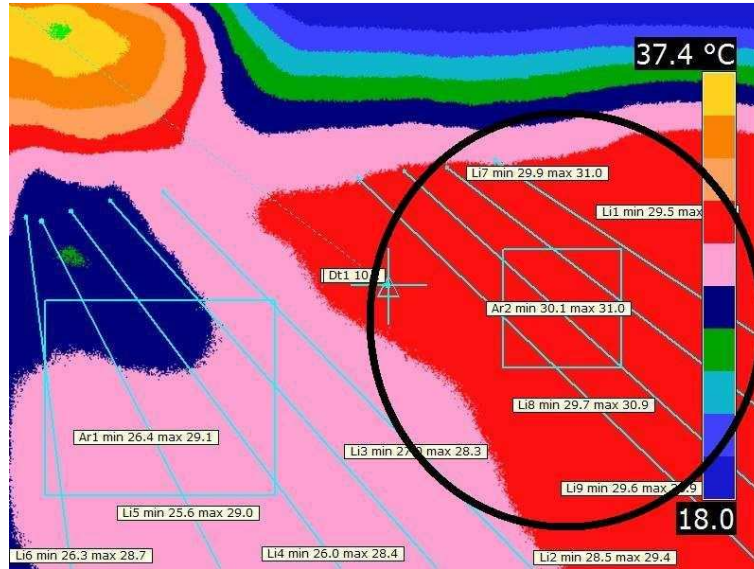


Fig. 5.32 – Indicazione dell'area relativa alla prima fascia nelle immagini relative alla seconda.

Si osserva come la fascia di terreno trattata si attesti inizialmente su temperature racchiuse tra i 26°C e i 30°C, con cromatismi che comprendono il verde e il blu. La parte più bassa delle immagini, cioè l'area trattata per prima, inizia a scaldarsi in anticipo rispetto a quella più alta e più recente, a conferma che la reazione esotermica si instaura istantaneamente all'atto della miscelazione.

Nei primi minuti si assisterà dunque ad un innalzamento termico differenziato nel tempo tra aree della stessa fascia create a pochi istanti l'una dall'altra. L'effetto cromatico vede il colore verde, relativo alle temperature più basse, salire verso le zone più recenti e lasciare spazio prima al blu poi al rosa ed infine, come si osserva nell'area marginale sulla destra delle immagini della seconda fascia, a rosso, arancione e giallo.

L'effetto più evidente si osserva proprio dalle ultime immagini registrate, dopo circa 15 – 20 minuti dalle operazioni di miscelazione e in cui sono presenti entrambe le fasce realizzate: la seconda, creata da pochi minuti, ripete l'andamento appena descritto dalla prima, in cui la temperatura sale distribuendosi sempre più omogeneamente sui valori più elevati. La prima, invece, si è ormai termicamente stabilizzata ed il suo delta termico tra punti diversi si sta riducendo attestandosi sempre più intorno ad un valore di temperatura pari a circa 33°C. Il valore di temperatura a cui tendono i punti superficiali dell'area trattata è superiore a quello iniziale ed anche a quello atmosferico, quindi si ritiene che il delta termico si annulli a livello spaziale ma non temporale, a differenza

delle miscele di laboratorio, in cui il delta termico si annullava in valore assoluto con tutta la superficie che tendeva al valore di temperatura iniziale o atmosferica.

Durante i 20 minuti di analisi nessuna delle due fasce ha iniziato a raffreddarsi.

Si può dedurre che in sito la miscelazione prodotta dalla apposita fresa è decisamente migliore rispetto a quella riproducibile in laboratorio e questo porta ad un'interazione con le condizioni termiche dell'ambiente circostante ridotta e quindi ad un mantenimento delle temperature superficiali più duraturo.

Oltre all'andamento generale, attraverso le immagini osservate si è notata l'importanza di verificare l'assenza nell'area registrata termicamente di elementi che possono disturbare la misurazione rendendola inutilizzabile, come persone o mezzi situati nelle estreme vicinanze della zona di interesse. L'effetto della diversa temperatura dell'elemento di disturbo associato a quello del vento, seppur debole, porta a risultati all'infrarosso inesatti. Si sottolinea come non sia comunque possibile garantire la completa assenza di tali elementi di disturbo in sito, vista la tipologia di lavorazione che si sta eseguendo e che l'operazione di registrazione è prolungata nel tempo. Si riporta, a titolo esemplificativo, un'immagine in cui l'effetto prodotto dalla presenza vicino alla prima fascia di un operatore e dal vento è evidente (Fig. 5.33).



Fig. 5.33 – Effetto di disturbo prodotto da un operatore nelle vicinanze della prima fascia.

5.5 Conclusioni dell'attività sperimentale

L'attività sperimentale finalizzata allo studio della reazione esotermica prodotta dal trattamento a calce di terreno argilloso attraverso l'uso di immagini all'infrarosso è stata eseguita, come visto, da una sperimentazione in laboratorio e da due verifiche in sito.

I risultati ottenuti nelle varie fasi sperimentali convergono verso una serie di osservazioni che acquistano un carattere generale nei confronti della reazione esotermica studiata.

L'analisi termica di un trattamento a calce va eseguita in sito durante la fase di miscelazione, attraverso l'uso di una termocamera ad infrarossi che possa registrare immagini in successione nel tempo. E' importante, prima di iniziare la registrazione, determinare il corretto posizionamento della termocamera rispetto all'area di lavoro e la taratura dei parametri in base alle condizioni ambientali presenti al momento dell'esecuzione dei lavori.

Attraverso questo tipo di valutazione si possono effettuare controlli e verifiche che confermano l'esecuzione a regola d'arte delle operazioni di miscelazione dei materiali. I controlli vanno eseguiti prima dell'inizio della registrazione e in una fase successiva sulle immagini registrate, le verifiche vanno effettuate, per quanto possibile, parallelamente alla procedura di miscelazione.

Si riporta una tabella riassuntiva e conclusiva di tutte le operazioni di controllo e verifica determinate attraverso questa attività di ricerca, inserite secondo la loro esecuzione temporale (Tab. 5.20).

<i>Collocazione temporale</i>	<i>CONTROLLI</i>	<i>VERIFICHE</i>
<i>Pre-trattamento</i>	Giusto posizionamento della termocamera rispetto all'area di lavoro	
	Condizioni meteo del sito	
	Valutazione della temperatura atmosferica	
	Valutazione della temperatura iniziale del terreno	
	Valutazione dell'umidità media atmosferica	
	Vento	
	Presenza di discontinuità termiche	
	Presenza di elementi di disturbo	
<i>Durante la miscelazione</i>		Innalzamento istantaneo della temperatura
	Valutazione della temperatura massima puntuale raggiunta	
	Valutazione del delta termico massimo ottenuto	
		Omogeneità termica sempre più distribuita nell'area trattata
		Stabilizzazione della temperatura su un valore superiore a quelli iniziali in tutti i punti superficiali
	Valutazione della temperatura su cui la superficie si stabilizza	
		Mantenimento nel tempo del valore di temperatura su cui la superficie si è stabilizzata
		Inizio del raffreddamento superficiale
	Calcolo del tempo trascorso prima dell'inizio del raffreddamento	
		Omogeneità superficiale del raffreddamento
	Annullamento totale del delta termico	
	Calcolo del tempo trascorso prima dell'annullamento totale del delta termico	
<i>Ispezione delle immagini registrate</i>	Esclusione delle immagini con dati inutilizzabili	
	Presenza di errori di procedura	
	Presenza di zone anomale	

Tab. 5.20 – Controlli e verifiche di un trattamento a calce tramite l'analisi in sito con termocamera a infrarossi.

Lo studio della temperatura superficiale suggerisce utili soluzioni nel caso in cui le verifiche effettuate vengano disattese. Si riportano nella Tab. 5.21 le soluzioni principali per i casi più comuni di irregolarità rilevate nell'andamento termico della miscela attraverso lo studio superficiale all'infrarosso.

DIFETTO RILEVATO	CAUSA	SOLUZIONE
Innalzamento della temperatura non istantaneo o assente	Poca reattività dei materiali utilizzati	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Utilizzo di calce più reattiva ▪ Aumento del quantitativo di calce ▪ Riduzione del quantitativo d'acqua
Omogeneità termica superficiale non soddisfacente o completamente assente	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Presenza di anomalie (“zone fredde” , “zone calde”) ▪ Miscelazione non sufficiente 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ulteriori passaggi con pulvimixer ▪ Individuazione e eliminazione anomalie
Presenza di “zone fredde” localizzate	Eccessivo quantitativo d'acqua locale	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aumento del numero di passaggi con pulvimixer ▪ Rimozione dell'acqua in eccesso ▪ Se sufficiente, riduzione dell'acqua aggiunta durante la miscelazione ▪ Aumento localizzato del quantitativo di calce
Presenza di “zone calde” localizzate	Eccessivo quantitativo di calce locale accidentale	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aumento localizzato del quantitativo d'acqua
Mantenimento nel tempo del valore di temperatura su cui la superficie si è stabilizzata troppo breve o assente	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Poca reattività dei materiali utilizzati ▪ Condizioni ambientali 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Utilizzo di calce più reattiva ▪ Aumento del quantitativo di calce ▪ Riduzione del quantitativo d'acqua ▪ Miscelazione rinviata in condizioni ambientali idonee (temperature maggiori)
Raffreddamento superficiale non omogeneo	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Presenza di anomalie ▪ Miscelazione non sufficiente ▪ Condizioni ambientali 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Individuazione e eliminazione anomalie ▪ Ulteriori passaggi con mezzo miscelatore ▪ Ulteriore verifica successiva al passaggio dei mezzi per il costipamento
Annullamento totale del delta termico non avvenuto	Reazione di stabilizzazione non terminata	Attesa dell'avvenuto annullamento prima di procedere con le operazioni

Tab. 5.21 – Soluzioni adottabili nel caso di verifiche termiche disattese.

5.6 Scheda di ricerca: *Studio della reazione esotermica*

SCHEDA DI RICERCA – Studio della reazione esotermica	
OBIETTIVO	Controlli e verifiche in laboratorio e in sito, con strumentazione classica e innovativa, sull'andamento della temperatura del materiale trattato a calce, al fine di ottenere informazioni utili sulla qualità dei materiali utilizzati e delle operazioni di miscelazione e stesa in sito della miscela creata.
ATTIVITÀ	<ul style="list-style-type: none"> • Tesi di Laurea: <i>Studio sperimentale delle terre stabilizzate con leganti idraulici: progettazione prestazionale delle miscele</i> (Ing. G. Manganelli) • Tesi di Laurea: <i>Stabilizzazione delle terre con calce: studio di laboratorio del processo di maturazione immediata</i> (Ing. C. Berti) • Tesi di Laurea: <i>Studio delle procedure di progettazione e controllo tradizionali e innovative per le stabilizzazioni a calce di terreni argillosi</i> (Ing. A. Magi)
RISULTATI	<p>I dati rilevati in laboratorio con strumentazione classica sulle miscele realizzate hanno comprovato l'aumento di temperatura successivamente alla miscelazione dei materiali. Il parametro che principalmente influenza la reazione esotermica è il contenuto di calce nella miscela. All'aumentare del quantitativo di calce aumenta il delta termico prodotto dalla miscelazione dei materiali. Queste valutazioni sono state eseguite all'interno di sperimentazioni più ampie che comprendevano la realizzazione di provini di miscela di terra e calce.</p> <p>Le prove eseguite in laboratorio hanno evidenziato come la reazione esotermica all'interno del procedimento di stabilizzazione a calce di un terreno sia contenuta completamente nella fase di miscelazione dei materiali e nei minuti successivi a questa operazione.</p> <p>L'utilità pratica di un controllo sulla reazione esotermica prodotta dal trattamento a calce è appurata se effettuata in sito; per questo l'attività di ricerca è stata indirizzata alla determinazione di una strumentazione idonea a questo tipo di analisi e alla verifica della sua funzionalità. Si è dunque arrivati alla definizione di una procedura di controllo e verifica della qualità delle operazioni di miscelazione in sito attraverso l'uso di una termocamera a infrarossi, in grado di studiare dettagliatamente l'andamento termico superficiale di tutto lo strato trattato nello spazio e nel tempo.</p> <p>Questa sperimentazione ha consentito di definire l'andamento termico superficiale tipico di una lavorazione eseguita a regola d'arte e le possibili soluzioni nel caso di presenza di irregolarità termiche.</p> <p>I principali requisiti controllabili attraverso la termocamera sono: innalzamento istantaneo della temperatura, distribuzione termica spaziale omogenea e raffreddamento lento e distribuito. La verifica positiva di queste condizioni indica una fase di miscelazione dei materiali di buona qualità.</p>

CONCLUSIONI

Con questo studio si è prodotta una procedura completa per eseguire l'operazione di trattamento a calce di terreni argillosi a regola d'arte.

Il miglioramento e la stabilizzazione a calce sono interventi che consentono notevole risparmio economico e di tempo, in quanto eseguiti senza la sostituzione del terreno naturale presente in sito. Operazioni realizzate nel rispetto della procedura garantiscono, oltre a una migliore qualità del trattamento, un aumento di tale risparmio.

L'effetto calce si esplica in termini di aumento della lavorabilità del terreno, riduzione dei rigonfiamenti, incremento delle resistenze meccaniche e al ciclo gelo – disgelo, riduzione dei cedimenti del piano viabile sovrastante in fase di esercizio, aumento del modulo elastico, incremento della capacità portante sia a breve che a lungo termine.

La procedura di progettazione di un trattamento a calce è finalizzata a fornire: materiali di qualità adeguata al rispetto dei requisiti richiesti dai Capitolati Prestazionali, contenuti d'acqua e calce atti ad ottenere la miscela ottimale e mezzi per poter eseguire le operazioni in sito nel minor tempo possibile e con un risultato finale soddisfacente.

A titolo conclusivo si inserisce un report di sintesi della procedura proposta; in esso sono elencate in ordine temporale tutte le operazioni e i controlli richiesti dalla procedura per eseguire un trattamento a calce, nel rispetto delle normative vigenti nazionali e straniere e delle pratiche esecutive tradizionalmente adottate.

I risultati finali ottenuti nella sperimentazione svolta sull'analisi con termocamera a infrarossi, riportati nel Capitolo 5, hanno evidenziato la possibilità di inserire tale metodo di controllo dell'omogeneità e regolarità della miscelazione all'interno della procedura nella fase di controlli *IN ITINERE* svolti in sito.

❖ **TRATTAMENTO A CALCE DI UN TERRENO ARGILLOSO**

– *Procedura esecutiva*

➤ **1- Pre-qualifica dei materiali**

Qualificazione del materiale presente in sito e del legante tramite lo studio in laboratorio delle caratteristiche fisico-chimiche e della compatibilità con il trattamento da eseguire, al fine di stabilire le proporzioni indicative con le quali avviare lo studio delle miscele di laboratorio.

- Analisi preliminari sulla calce

- *Caratteristiche chimiche della calce*

Le valutazioni preliminari sulla calce sono svolte per valutarne la capacità reattiva. Si eseguono prove per il contenuto di ossido di calcio e di magnesio (*UNI EN 459-2 (2010)*) e per il contenuto di calce libera (*UNI EN 459-2 (2010)*).

- Analisi preliminari sul terreno

- *Campionamento in sito e riduzione del campione in porzioni di prova*

Ottenere un campione globale che sia rappresentativo della media delle proprietà del lotto. I metodi sono descritti dalla *UNI EN 932-1 (1998)* e sono adatti anche per ottenere prelievi che possono essere sottoposti a prova separatamente. In seguito è necessaria la preparazione delle porzioni di prova di laboratorio dai campioni globali prelevati, quando la massa della porzione di prova è prescritta con un preciso limite inferiore o con tolleranza attorno a una massa desiderata oppure è determinata con precisione dalle prescrizioni di un metodo di prova. La riduzione dei campioni va eseguita nel rispetto della *UNI EN 932-2 (2000)*.

- *Determinazione del contenuto d'acqua dei provini*

Il calcolo dell'umidità è una valutazione fondamentale che viene spesso richiesta precedentemente o durante l'esecuzione di prove sui terreni. Tale determinazione è regolarizzata dalla *UNI EN 17892-1 (2005)*.

- *Classificazione del terreno*

Determinazione della curva granulometrica per setacciatura secondo la **UNI EN 933-1 (2009)** e dei limiti di Atterberg secondo il metodo tradizionale di Casagrande (**CNR UNI 10014: 1964**) oppure secondo il metodo ufficiale con punta conica (**UNI CEN ISO/TS 17892-12 (2005)**). Dal confronto dei risultati ottenuti con la tabella presente nella **UNI CNR 10006 (2002)** oppure secondo i riferimenti della **ASTM D2487-10**, si ottiene la classificazione del terreno analizzato.

- *Caratteristiche fisiche del terreno*

Si eseguono le prove di determinazione dell'equivalente in sabbia secondo la **UNI EN 933-8 (2000)** e del valore del blu di metilene secondo la **UNI EN 933-9 (2009)**. Tali prove mettono in evidenza l'influenza del tenore di frazione finissima presente e delle caratteristiche microscopiche del terreno sul comportamento del materiale.

- *Caratteristiche chimiche del terreno*

Si valutano il contenuto di sostanze organiche e il contenuto di solfati solubili in acido; le due prove sono descritte nelle parti 15 e 12 della **UNI EN 1744-1 (2010)**; nel caso in cui sia confermata la possibile presenza di sostanze organiche, attraverso la **ASTM D 2974 – 07a** se ne valuta la percentuale.

- Determinazione del contenuto iniziale di calce (CIC)

Da questa determinazione, descritta nella **ASTM D 6276 – 99a (2006)**, si ottiene la quantità di calce necessaria a soddisfare la reazione immediata terra-calce.

➤ **2- Studio della miscela**

L'obiettivo di questa fase è individuare la miscela ottimale sulla base dei risultati ottenuti dalla pre-qualifica dei materiali. Si eseguono valutazioni in laboratorio su provini di miscele realizzate con vari contenuti di umidità e calce e compattati affinché il loro comportamento risulti il più possibile simile a quello del materiale in sito. Si realizzano prove per determinare la resistenza meccanica delle miscele prodotte.

- Realizzazione dei provini per determinare densità massima e umidità ottimale

- *Miscelazione*

Eeguire il confezionamento della miscela con l'utilizzo di un miscelatore elettrico al fine di riprodurre al meglio l'ordine e i tempi delle lavorazioni in sito ed ottenere risultati maggiormente attendibili ed aderenti alla realtà.

- *Compattazione e definizione della curva Proctor*

La miscela ottenuta va utilizzata per realizzare provini compattati attraverso le modalità AASHTO Modificata con attrezzatura Proctor secondo la **UNI EN 13286-2 (2005)**. Attraverso la curva ottenuta si determina la correlazione fra il contenuto d'acqua e la densità asciutta delle miscele.

- Realizzazione dei provini per determinare le caratteristiche meccaniche

I provini di miscela per le valutazioni meccaniche possono essere realizzati come i precedenti mediante il costipamento Proctor oppure con l'utilizzo non standardizzato della Pressa Giratoria. Le modalità di addensamento di questa seconda strumentazione rappresentano in maniera più conforme i carichi di esercizio che subiscono le pavimentazioni stradali.

- Valutazione delle caratteristiche meccaniche

- *Indice di portanza immediata (IPI)*

Determinazione dell'indice di portanza calcolato subito dopo la preparazione della porzione di prova, prima della fase di maturazione e senza applicare il sovraccarico, come descritto nella **UNI EN13286-47 (2006)**. La procedura di prova è analoga a quella per la determinazione dell'indice *CBR*.

- *Indice di portanza CBR*

L'indice *CBR* viene determinato per mezzo di una prova di carico descritta nella **UNI EN13286-47 (2006)**. Il campione di miscela deve subire una maturazione, prima di essere sottoposto a prova, effettuata tramite conservazione in ambiente altamente umido o tramite ammollo completo.

- *Rigonfiamento lineare*

Determinazione del rigonfiamento lineare subito durante la fase di maturazione per immersione; si effettua sui provini che successivamente saranno soggetti alla prova di carico per valutare l'indice di portanza *CBR*.

- *Rigonfiamento volumetrico*

La *UNI EN 13286 - 49 (2004)* fornisce un metodo accelerato per la determinazione del rigonfiamento volumetrico delle miscele. E' importante che sia possibile estrarre senza danni il provino dallo stampo subito dopo la fabbricazione. I provini utilizzati per questa determinazione devono essere prodotti nel rispetto della *UNI EN 13286-53 (2005)*.

- *Resistenza a compressione*

Il principio, descritto nella *UNI EN 13286 - 41 (2006)*, è quello di sollecitare con una forza di compressione un provino di miscela cilindrico, di dimensioni normalizzate, fino alla sua rottura.

- Operazioni complementari

- *Studio dell'assorbimento dell'acqua di reazione e dell'andamento della temperatura*

Le caratteristiche tipiche della reazione chimica che scaturisce nelle miscele, vale a dire l'assorbimento d'acqua e l'innalzamento della temperatura, sono grandezze impiegabili per la valutazione della qualità delle operazioni di un trattamento a calce eseguite. Queste valutazioni vanno effettuate, durante e al termine delle procedure di realizzazione delle miscele, tramite determinazioni dell'umidità come da *UNI EN 17892-1 (2005)* e delle temperature interne e superficiali per mezzo di termometri e strumenti come telecamere ad infrarossi.

➤ 3- *Operazioni in sito*

Le lavorazioni in sito prevedono la realizzazione del trattamento a calce del terreno e una serie di verifiche e controlli preventivi, in corso d'opera e a lavori ultimati.

○ Operazioni preliminari

▪ *Approvvigionamento della calce*

La calce dovrà essere consegnata in autobotti dotate di scarico pneumatico.

▪ *Scotico e scarificazione del terreno naturale superficiale*

Asportare (15÷30) cm di suolo per rimuovere la parte superficiale ricca di vegetazione; tale materiale sarà successivamente utilizzato per la ricopertura finale delle scarpate stradali. Se necessario si procede con la scarificazione del terreno rimasto al fine di dissodarlo e predisporlo al trattamento.

○ Controlli preliminari sul terreno non trattato

Si eseguono valutazioni relative all'umidità, alla densità e alla portanza possedute dallo strato di terreno che subirà il trattamento.

▪ *Umidità in sito*

L'umidità viene determinata in sito attuando la **UNI CEN ISO/TS 17892-1 (2005)**, per mezzo di attrezzature portatili. Negli ultimi anni sono state introdotte strumentazioni elettroniche che forniscono tale valore in maniera automatica e immediata (es. Adek Percometer).

○ Operazioni *IN ITINERE*

Terminate le operazioni preliminari si passa alla realizzazione vera e propria del trattamento.

▪ *Spandimento della calce*

Il mezzo più idoneo per questa operazione è lo spandicalce dotato di regolazione elettronica del dosaggio che garantisce l'uniformità della stesa con un sistema a doppia coclea.

▪ *Miscelazione*

Tramite pulvimixer si miscelano terreno e calce con l'aggiunta di acqua con autobotte per raggiungere l'umidità nominale. Possono essere previsti più passaggi col mezzo

miscelatore; l'acqua comunque va aggiunta tutta in corrispondenza del primo passaggio effettuato.

- *Costipamento dello strato trattato*

Lo strato prodotto va compattato il prima possibile dopo la miscelazione, al fine di raggiungere il grado di addensamento richiesto e stabilito in laboratorio.

Dopo il termine delle operazioni di miscelazione e controllo della miscela ottenuta lo strato trattato deve essere compattato preventivamente con rulli vibranti, per addensare la parte più profonda.

- *Regolarizzazione della superficie*

Successivamente la superficie va livellata con motorgrader affinché il costipamento conclusivo produca una superficie piana e uniforme.

- *Costipamento superficiale dello strato compattato*

Quest'ultima operazione di costipamento fornisce un addensamento di tutto lo strato e una superficie liscia e uniforme. Si ritiene ottimale un costipamento eseguito con l'utilizzo del rullo vibrante Variocontrol a controllo continuo della compattazione (sistema CCC).

- Controlli *IN ITINERE*

I controlli eseguiti durante le varie fasi del trattamento prevedono valutazioni sulla qualità e omogeneità della miscelazione, sull'avvenuta reazione chimica, verifiche sui valori di umidità, densità e portanza ottenuti nonché sullo spessore dello strato finale.

- *Controllo del dosaggio di calce*

Si effettua attraverso una semplice prova pratica per verificare l'effettivo quantitativo di calce stesa sulla superficie del terreno da trattare immediatamente prima delle operazioni di miscelazione.

- *Grado di polverizzazione*

La valutazione del grado di polverizzazione della miscela ottenuta, al fine di verificare l'efficacia della miscelazione, va eseguita immediatamente dopo l'operazione di miscelazione secondo la **UNI EN 13286 – 48 (2005)**.

- *Moisture Condition Value (MCV)*

Ulteriore valutazione della qualità della miscelazione, da effettuare successivamente a questa operazione; il parametro *MCV* rappresenta l'idoneità della miscela a essere

inserita in sito, costipata e soggetta a traffico dei mezzi da costruzione. La prova per tale determinazione è contenuta nella *UNI EN 13286 - 46 (2003)*.

- *Omogeneità superficiale della miscelazione*

L'omogeneità e la qualità della miscelazione può essere dedotta tramite registrazioni dell'operazione stessa per mezzo di una termocamera ad infrarossi. L'analisi delle immagini ad infrarossi permette lo studio dell'andamento termico superficiale dovuto alla reazione esotermica che si instaura a causa della miscelazione dei materiali. Questo controllo è stato inserito nella procedura di trattamento a calce grazie alla sperimentazione specifica effettuata in questo studio.

Da confermare la possibilità di utilizzare altri sistemi all'infrarosso come il Pave-IR System il cui uso è comune negli strati in conglomerato bituminoso.

- *Umidità in sito*

Al termine dell'operazione di miscelazione va valutato il contenuto d'acqua proprio della miscela, al fine di verificare che esso sia compreso nell'intorno del valore nominale ottenuto in laboratorio. Si utilizzano gli stessi metodi descritti in precedenza.

- *Controlli automatici della Compattazione Intelligente*

L'utilizzo di rulli compattanti dotati della strumentazione di controllo automatico consentono valutazioni in continuo durante le operazioni di costipamento dello strato trattato, relative agli spessori e al grado di addensamento raggiunti.

- Controlli *POST* lavorazioni immediati

Subito dopo il termine del costipamento dello strato, utilizzando le metodologie descritte in precedenza per le stesse valutazioni, devono essere determinate la densità, lo spessore e la portanza immediata dello strato prodotto.

I valori ottenuti vanno confrontati con quelli di progetto e con i limiti contenuti nei Capitolati; solitamente per la densità in sito è richiesto il 100% del valore di densità massima ottenuto in laboratorio tramite compattazione Proctor.

- *Controlli sullo spessore*

Lo spessore dello strato trattato può essere valutato al termine dell'operazione di miscelazione tramite l'esecuzione della prova di reazione all'agente chimico, che oltre a questo parametro permette di verificare l'effettiva avvenuta reazione chimica tra i materiali. L'agente chimico introdotto è una soluzione di fenoltaleina e alcool. Il

controllo sullo spessore può essere effettuato tramite l'utilizzo di sistemi elettronici come il *GPR*.

- *Densità in sito*

La densità in sito può essere determinata tramite volumometro a sabbia (*CNR BU n. 22/72*), Electrical Density Gauge (*ASTM D7698-11*) o Grounding Penetrating Radar (*GPR, ASTM D4748-10*).

- *Capacità portante*

La portanza o capacità portante di un terreno viene valutata con prove eseguite in sito; esistono metodi tradizionali come la prova di carico su piastra *PLT*, descritta nella *CNR BU n. 146-92* e il Falling Weight Deflectometer (*FWD*), il cui utilizzo è previsto e descritto in diverse normative UNI e ASTM. Sistemi innovativi sono il Light Falling Weight Deflectometer (*LFWD*), il Clegg Impact Soil Tester, il Dynamic Cone Penetrometer (*DCP*, da norma *ASTM D6951/D6951M-09*) e la prova per l'indice *CBR* dinamico. Le metodologie innovative sono caratterizzate da strumentazioni leggere e facilmente trasportabili, che consentono un uso rapido e la possibilità di analizzare un elevato numero di punti.

- Operazioni conclusive

- *Protezione e maturazione dello strato trattato*

La protezione superficiale dello strato trattato è fondamentale per mantenere il corretto grado di umidità. L'azione protettiva è costituita da una leggera spruzzata di acqua per mantenerne l'idratazione, a cui segue una passata con un rullo statico se necessario, oppure dalla stesura di un'emulsione bituminosa idrorepellente o, in alternativa, dalla combinazione dei due metodi. Gli strati di sovrastruttura stabilizzati devono essere completati e manifestare le resistenze meccaniche di progetto prima dell'avvento del gelo; ciò significa lasciare un tempo sufficiente per il manifestarsi delle reazioni di indurimento.

- Controlli *POST* lavorazioni successivi

- *Controlli a 7 giorni*

A 7 giorni dalla realizzazione del trattamento si ripetono i controlli sulla portanza, per verificare la corretta maturazione dello strato, il mantenimento nel tempo dei requisiti

ottenuti e confrontare i valori relativi all'indice di portanza *CBR* in sito con i limiti richiesti per esso dai Capitolati.

PROSPETTO FINALE

<i>FASE</i>	<i>OPERAZIONE</i>	<i>METODO TRADIZIONALE</i>	<i>METODO INNOVATIVO</i>
1	<i>Contenuto di ossido di calcio e magnesio</i>	UNI EN 459-2 (2010)	-
	<i>Contenuto di calce libera</i>	UNI EN 459-2 (2010)	-
	<i>Campionamento e riduzione del campione di terreno</i>	UNI EN 932-1 (1998) UNI EN 932-2 (2000)	-
	<i>Contenuto d'acqua</i>	UNI EN 17892-1 (2005)	-
	<i>Curva granulometrica per setacciatura</i>	UNI EN 933-1 (2009) UNI CNR 10006 (2002)	ASTM D2487-10
	<i>Limiti di Atterberg</i>	CNR UNI 10014: 1964	UNI CEN ISO/TS 17892-12 (2005).
	<i>Equivalente in sabbia</i>	UNI EN 933-8 (2000)	-
	<i>Blu di metilene</i>	UNI EN 933-9 (2090)	-
	<i>Contenuto e percentuale di sostanze organiche</i>	UNI EN 1744-1 (2010)	ASTM D 2974 – 07a
	<i>Contenuto di sostanze solubili in acido</i>	UNI EN 1744-1 (2010)	-
	<i>CIC</i>	ASTM D 6276 – 99a (2006)	-
2	<i>Provini per densità massima e umidità ottimale</i>	Miscelazione e compattazione AASHTO Mod con attrezzatura Proctor UNI EN 13286-2 (2005)	-
	<i>Provini per caratteristiche meccaniche</i>	Miscelazione e compattazione AASHTO Mod con attrezzatura Proctor UNI EN 13286-2 (2005)	Miscelazione e compattazione con attrezzatura giratoria
	<i>IPI</i>	UNI EN13286-47 (2006)	-
	<i>CBR</i>	UNI EN13286-47 (2006)	-
	<i>Rigonfiamento lineare</i>	UNI EN13286-47 (2006)	-
	<i>Rigonfiamento volumetrico</i>	UNI EN13286-49 (2004)	-
	<i>Resistenza a compressione</i>	UNI EN 13286 - 41 (2006)	-

	<i>Studio dell'assorbimento e della temperatura</i>	Utilizzo di termometri e calcolo dell'umidità UNI EN 17892-1 (2005)	Tecnologia ad infrarossi
3	<i>Approvvigionamento della calce</i>	Silos o autobotti	-
	<i>Scotico e scarificazione</i>	Mezzi meccanici motorizzati	-
	<i>Umidità in sito del terreno non trattato</i>	UNI CEN ISO/TS 17892-1 (2005) applicata in sito	Adek Percometer
	<i>Spandimento della calce</i>	Autocarri con cassone	Spandicalce a traino
	<i>Controllo del dosaggio</i>	Metodo pratico	Dosaggio automatico nello spandicalce
	<i>Miscelazione</i>	Pulvimixer	-
	<i>Umidità in sito della miscela</i>	UNI CEN ISO/TS 17892-1 (2005) applicata in sito	Adek Percometer
	<i>Grado di polverizzazione</i>	UNI EN 13286 – 48 (2005)	-
	<i>MCV</i>	UNI EN 13286 - 46 (2003)	-
	<i>Omogeneità della miscelazione</i>	-	Analisi con termocamera ad infrarossi
	<i>Regolarizzazione della superficie</i>	Motorgrader	-
	<i>Costipamento</i>	Rulli statici e dinamici	<i>IC</i> <i>CCC</i>
	<i>Densità in sito dello strato trattato</i>	Volumometro a sabbia	<i>EDG</i> <i>GPR</i>
	<i>Spessore dello strato trattato</i>	Reazione all'agente chimico	<i>GPR</i>
	<i>Portanza immediata dello strato trattato</i>	-	<i>CIST</i> <i>DCP</i> <i>CBR dinamico</i>
	<i>Protezione e maturazione dello strato trattato</i>	Idratazione o emulsione bituminosa Copertura con strati superiori	-
<i>Portanza a 7 giorni</i>	<i>PLT</i> <i>FWD</i>	<i>LFWD</i> <i>CIST</i> <i>DCP</i> <i>CBR dinamico</i>	

Tab. – Sintesi della procedura elaborata da questo studio.

BIBLIOGRAFIA**Riferimenti bibliografici**

- [1] P. COLOMBO, F. COLLESELLI, “*Elementi di geotecnica*”, Zanichelli, 2002.
- [2] G. MANGANELLI, “*Studio sperimentale delle terre stabilizzate con leganti idraulici: progettazione prestazionale delle miscele*”, Tesi di laurea, 2009.
- [3] CARMEUSE NATURAL CHEMICALS, “*Lime Treated Soil*”, Internet.
- [4] UNICALCE, “*Stabilizzazione delle terre con calce*”, Internet.
- [5] R. CANCELLIERI, “*Analisi comparativa sulle metodologie di costipamento delle terre in laboratorio*”, Tesi di laurea, 2009.
- [6] C. BERTI, “*Stabilizzazione delle terre con calce: studio di laboratorio del processo di maturazione immediato*”, Tesi di laurea, 2009.
- [7] G. DONDI, A. SIMONE, A. BONINI, “*Metodologie di impiego della pressa giratoria (2° parte)*”, Rassegna del Bitume, Anno XXVI, n. 34/00.
- [8] G. DONDI, A. SIMONE, A. BONINI, “*Metodologie di impiego della pressa giratoria (2° parte)*”, Rassegna del Bitume, Anno XXVI, n. 35/00.
- [9] A. STANGHELLINI, “*Studio sperimentale sulle tecniche di costipamento delle terre*”, Tesi di laurea, 2009.
- [10] F. BERNARDONI, “*Metodi per la caratterizzazione dinamica di terre stabilizzate con leganti idraulici*”, Tesi di laurea, 2009.
- [11] M. ABBONDANZA: “*Caratterizzazione dinamica mediante colonna risonante di terre stabilizzate con leganti idraulici*”, Tesi di laurea, 2009.
- [12] C. SANGIORGI, C. LANTIERI, R. CANCELLIERI: “*Experimental Comparative Analysis Of Laboratory soils compaction methodologies*” – 16TH World Road Meeting, International Road Federation, 2010.
- [13] R. MAZZA: “*Valutazione prestazionale in sito delle stabilizzazioni dei terreni per mezzo dei leganti idraulici*”- Tesi di Laurea, 2009.
- [14] L. CALZAVARINI: “*Controllo integrato della portanza in sito con strumenti deflettometrici e sistemi di compattazione intelligente*” – Tesi di Laurea, 2010.
- [15] C. SANGIORGI: “*Misura della portanza con il Light Falling Weight Deflectometer (LFWD)*” – Strade e Autostrade, 2006.

-
- [16] C. SANGIORGI, V. VIGNALI: “*PLT e LFWD: confronto tra prove di carico su piastra statiche e dinamiche*” – Strade e Autostrade, 2006.
- [17] C. SANGIORGI, C. LANTIERI, A. MARRADI, G. BETTI: “*Comparing Light Weight Deflectometers to standardize their use in the compaction control*” - 5th INTERNATIONAL CONFERENCE BITUMINOUS MIXTURES AND PAVEMENTS – 2011.
- [18] ANAS (*Azienda Nazionale Autonoma delle Strade*) specifiche Tecniche, 2009.
- [19] C. SANGIORGI, C. LANTIERI, A. MARRADI, U. PINORI: “*Dynamic field assessment of bearing capacity for pavement subgrades and foundations*” – Articolo ICTI, 2010.
- [20] C. SANGIORGI, C. LANTIERI, A. MARRADI, U. PINORI: “*A preliminary comparison of Continuous Compaction Control and Portable FWD systems for Qc/Qa*” – Articolo ICTI, 2010.
- [21] C. SANGIORGI, C. LANTIERI, A. MARRADI, A. BONOLI, F. PETRETTO: “*Indagine sugli aggregati da C&D*”, Le Strade, 2010.
- [22] FLIR System: “*FLIR P620 User Manual*”, 2010.

TESTI CONSULTATI

- G. DONDI, C. SANGIORGI, C. LANTIERI, R. CANCELLIERI, P. VIOLA: “*Experimental comparative analysis of laboratory compaction methodologies for stabilized soil*”, 2010.
- C. SANGIORGI, C. LANTIERI, A. MARREDI, U. PINORI: “*Dynamic field assessment of bearing capacity for pavement subgrades and foundations*” , 2010.

NORMEUNI e CNR

CNR, B. U. n. 36/1973: *Stabilizzazione delle terre con calce*, Norma, 1973.

UNI 10006 (2002): *“Costruzione e manutenzione delle strade - Tecniche di impiego delle terre”*.

CNR UNI 10014: 1964: *“Prove sulle terre. Determinazione dei limiti di consistenza (o di Atterberg) di una terra”*.

UNI CEN ISO/TS 17892-12: *“Prove di laboratorio sui terreni – Determinazione dei limiti di Atterberg”*.

CNR B. U. n°146/92: *“Determinazione dei moduli di deformazione M_d e M_d' mediante prova di carico a doppio ciclo con piastra circolare”*.

CNR B. U. n. 22/72: *“Densità in sito con volumometro a sabbia”*.

UNI EN

UNI EN 14227-11 (2006): *“Miscela legate con leganti idraulici – Specifiche – Terra trattata con calce”*.

UNI EN 459-1 (2010): *“Calci da costruzione – Definizioni, specifiche e criteri di conformità”*.

UNI EN 459-2 (2010): *“Calci da costruzione – Metodi di prova”*.

UNI EN 13242 (2008): *“Aggregati per materiali non legati e legati con leganti idraulici per l'impiego in opere di ingegneria civile e nella costruzione di strade”*.

UNI EN 13285 (2010): *“Miscela non legate – Specifiche”*.

UNI EN ISO 14688-1 (2003) e UNI EN ISO 14688-2 (2004): *“Identificazione e Classificazione dei terreni”*.

UNI EN 17892-1 (2005): *“Prove di laboratorio sui terreni – Determinazione del contenuto d'acqua”*.

UNI EN 932-1 (1998): *“Metodi di campionamento”*.

UNI EN 932-2 (2000): *“Metodi per la riduzione dei campioni di laboratorio”*.

UNI EN 933-1 (2009): “*Determinazione della distribuzione granulometrica – Analisi granulometrica per setacciatura*”.

UNI EN 933-8 (2000):” *Valutazione dei fini – Prova dell’equivalente in sabbia*”.

UNI EN 933-9 (2009): “*Valutazione dei fini – Prova del blu di metilene*”.

UNI EN 1744-1/12-15 (2010):” *Prove per determinare le proprietà chimiche degli aggregati – Analisi chimica*”.

UNI EN 13286-2 (2010): “*Miscele non legate e legate con leganti idraulici - Metodi di prova per la determinazione della massa volumica e del contenuto di acqua di riferimento di laboratorio - Costipamento Proctor*”.

UNI EN 13286-41 (2006): “*Miscele non legate e legate con leganti idraulici - Metodo di prova per la determinazione della resistenza a compressione di miscele legate con leganti idraulici*”.

UNI EN 13286-46 (2003): “*Metodi di prova per la determinazione della costipabilità mediante MCV*”.

UNI EN13286-47 (2006): “*Miscele non legate e legate con leganti idraulici - Metodo di prova per la determinazione dell’indice di portanza CBR, dell’indice di portanza immediata e del rigonfiamento*”.

UNI EN 13286-48 (2005): “*Metodo di prova per la determinazione del grado di polverizzazione*”.

UNI EN 13286-49 (2004): “*Prova di rigonfiamento accelerata per suoli trattati con calce e/o legante idraulico*”.

UNI EN 13286-53 (2005): “*Miscele non legate e legate con leganti idraulici - Metodo per la preparazione di provini di miscele legate con leganti idraulici mediante compressione assiale*”.

UNI EN 196-2 (2007): “*Metodi di prova dei cementi – Analisi chimica dei cementi*”.

ASTM

ASTM D2487-10: “*Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes*”.

ASTM D2974 – 07a: “*Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils*”.

ASTM D 6276 – 99a (2006): “*Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization*”.

ASTM D6951/D6951M-09: “*Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement*”.

ASTM D7698-11: “*In-Place Estimation of Density and Water Content of Soil and Aggregate by Correlation with Complex Impedance Method*”.

ASTM D4748-10: “*Standard Test Method for Determining the Thickness of Bound Pavement Layers Using Short-Pulse Radar*”.

ASTM D5858-96 (2008): “*Calculating in Situ Equivalent Elastic Moduli of Pavement Materials Using Layered Elastic Theory*”.