

ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITÁ DI BOLOGNA

---

FACOLTÁ DI INGEGNERIA

**Corso di laurea specialistica in Ingegneria Civile**

Insegnamento: Inserimento e Compatibilit  delle Infrastrutture Viarie nel Territorio

**STUDIO SPERIMENTALE DELLE TERRE  
STABILIZZATE CON LEGANTI IDRAULICI:  
PROGETTAZIONE PRESTAZIONALE DELLE MISCELE**

TESI DI LAUREA DI:  
Giulia Manganelli

RELATORE:  
Dott. Ing. Cesare Sangiorgi

CORRELATORI:  
Dott. Ing. Claudio Lantieri  
Dott. Ing. Roberto Cancellieri

II Sessione

---

Anno Accademico 2008/2009

## **PAROLE CHIAVE**

Costipamento

Pressa Giratoria

Proctor

Stabilizzazione a Calce

Miscela Ottimale

# INDICE

<b>INTRODUZIONE .....</b>	<b>1</b>
<b>Capitolo 1    PANORAMICA SULLA STABILIZZAZIONE A</b>	
<b>                  CALCE.....</b>	<b>3</b>
1.1.PREMESSA.....	3
1.2.ARGILLA .....	4
1.2.1. Classificazione delle argille .....	7
1.2.1.1. Granulometria .....	9
1.2.1.2. Limiti di Atterberg .....	12
1.2.1.3. Classificazione secondo l'indice di gruppo.....	14
1.3.CALCE.....	17
1.3.1. Calce aerea .....	21
1.3.2. Calce idraulica .....	23
1.3.3. Il processo di produzione della calce.....	24
1.3.4. Effetti a breve termine .....	26
1.3.5. Effetti a lungo termine .....	30
1.3.6. Effetti del trattamento a calce .....	30
1.3.6.1. Variazioni dell'umidità e del volume.....	30
1.3.6.2. Caratteristiche del costipamento .....	31
1.3.6.3. Caratteristiche meccaniche.....	32

1.3.6.4. Durabilità sotto l'azione dell'acqua e del gelo.....	32
1.3.7. Fasi di realizzazione di un trattamento a calce .....	33
<b>Capitolo 2 PREQUALIFICA DEI MATERIALI .....</b>	<b>39</b>
2.1.PREMESSA.....	39
2.2.PROVE DI PREQUALIFICA SUL TERRENO .....	41
2.2.1. Classificazione dei terreni.....	41
2.2.1.1. Analisi granulometrica per setacciatura .....	41
2.2.1.2. Limiti di Atterberg .....	49
2.2.2. Valutazione delle caratteristiche fisiche dei terreni.....	55
2.2.2.1. Prova dell'equivalente in sabbia .....	55
2.2.2.2. Prova al blu di metilene.....	59
2.2.3. Valutazione delle caratteristiche chimiche dei terreni.....	64
2.2.3.1. Determinazione del contenuto di sostanze organiche .....	64
2.2.3.2. Determinazione del contenuto di solfati solubili in acido.....	68
2.2.3.3. Determinazione del contenuto iniziale di calce .....	73
2.3.PROVE DI PREQUALIFICA SULLA CALCE.....	78
2.3.1. Determinazione del contenuto di ossido di calcio e di ossido di magnesio .....	78
2.3.2. Determinazione della concentrazione di anidride carbonica..	82
2.3.2.1. Metodo normato .....	82
2.3.2.2. Metodo alternativo .....	84

2.3.3. Determinazione del contenuto di calce libera nelle calci aeree .....	89
2.4.PROVE DI PREQUALIFICA SUL TERRENO C .....	92
2.4.1. Prove di laboratorio sul terreno .....	94
2.4.1.1. Classificazione del terreno .....	95
2.4.1.2. Caratteristiche fisiche del terreno.....	99
2.4.1.3. Caratteristiche chimiche del terreno.....	99

**Capitolo 3 MACCHINARI UTILIZZATI NELL'AMBITO DELLA  
SPERIMENTAZIONE ..... 101**

3.1.ANALISI COMPARATIVA SULLE MODALITA` DI COMPATTAZIONE .....	101
3.1.1. Compattazione Proctor.....	102
3.1.2. Compattazione Giratoria.....	109
3.1.3. Studi analizzati.....	114
3.1.3.1. “Comparative study of asphalt concrete laboratory compaction methods to simulate field compaction” di Ziauddin A. Khan, Hamad I. Al-Abdul Wahab, Ibrahim Asi e Rezquallah Ramadhan .....	115
3.1.3.2. “Subgrade design parameters from samples prepared with different compaction methods” di Lee, Prezzi e Kim .....	123
3.2.CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR) .....	126
3.3.PROVA DI RESISTENZA A COMPRESSIONE .....	131

<b>Capitolo 4</b>	<b>DEFINIZIONE DELLE PROCEDURE</b>	
	<b>SPERIMENTALI.....</b>	<b>137</b>
4.1.	INTRODUZIONE.....	137
4.2.	PROCEDIMENTO OPERATIVO PER LA REALIZZAZIONE DEI PROVINI.....	140
4.2.1.	Umidificazione e miscelazione .....	140
4.2.2.	Compattazione Proctor.....	145
4.2.3.	Compattazione Giratoria.....	150
4.3.	DESCRIZIONE DELLA PROCEDURA PER LA DETERMINAZIONE DELL'ASSORBIMENTO DELL'ACQUA DI REAZIONE .....	156
<b>Capitolo 5</b>	<b>ANALISI DEI DATI SPERIMENTALI.....</b>	<b>161</b>
5.1.	DETERMINAZIONE DELL'ASSORBIMENTO .....	161
5.1.1.	Andamento del tenore di umidità durante le fasi della stabilizzazione.....	161
5.1.2.	Andamento della temperatura in funzione dell'umidità nominale e della percentuale di calce .....	167
5.2.	ANALISI VOLUMETRICA .....	168
5.2.1.	Compattazione Proctor.....	169
5.2.2.	Compattazione Giratoria.....	173
5.2.3.	Osservazioni.....	181
5.3.	CARATTERISTICHE MECCANICHE .....	183
5.3.1.	Compattazione Proctor.....	183

5.3.2. Compattazione Giratoria.....	187
5.3.3. Osservazioni.....	193
5.4.PROVINI ALL'UMIDITÀ OTTIMALE .....	195
5.4.1. Compattazione Proctor .....	196
5.4.2. Compattazione Giratoria.....	201
5.4.3. Osservazioni.....	206
<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>209</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>211</b>

## **INTRODUZIONE**

Nel corso degli anni l'incremento demografico ed il conseguente aumento del traffico veicolare, hanno reso necessario lo sviluppo di nuove infrastrutture e una corretta gestione del patrimonio stradale esistente. Tale sviluppo è risultato indispensabile a garantire la crescita socio-economica del territorio, ma ha portato con se problematiche legate all' inquinamento ambientale, alla sicurezza e alle sempre crescenti richieste prestazionali delle infrastrutture, che risultano maggiormente sollecitate rispetto al passato ma che devono garantire ugualmente una vita utile adeguata.

La vita utile di una pavimentazione stradale è fortemente condizionata dalla capacità portante del sottofondo e degli strati più profondi. Durante la realizzazione di infrastrutture non è raro imbattersi in terreni non idonei a garantire le caratteristiche di portanza necessarie ad assicurare una soddisfacente durabilità della pavimentazione.

In passato la soluzione a questo problema era rappresentata dalla sostituzione di un determinato spessore di terreno naturale presente in sito con opportuno materiale di cava.

Attualmente, le limitazioni imposte dai piani estrattivi e l'attenzione crescente verso problematiche di natura ambientale, hanno spostato l'interesse del settore su metodologie alternative quali la stabilizzazione dei terreni originari con leganti idraulici. Il recupero di materiali locali di scarsa qualità finalizzato all'impiego in ambito stradale presenta infatti una duplice valenza: economica ed ambientale. L'utilizzo di terreni presenti in cantiere consente di ridurre l'entità del trasporto di materiale dalle cave di prestito e verso i luoghi di smaltimento, con evidenti vantaggi legati al costo del materiale di cava e agli aspetti di inquinamento acustico ed ambientale.

Esistono diverse metodologie di trattamento del terreno naturale con leganti, tutte hanno lo scopo di modificare il comportamento delle terre originarie sia nel breve periodo – riduzione del contenuto d'acqua, variazione dei limiti di Atterberg e della granulometria – che nel lungo periodo – incremento delle resistenze meccaniche, aumento della durabilità, riduzione delle variazioni volumetriche e della sensibilità all'azione dell'acqua.



La velocità e l'intensità con cui si verificano tali reazioni chimiche, dipendono sia dalla natura mineralogica del terreno naturale, che dal tipo e dalla percentuale di legante utilizzato.

Risulta fondamentale quindi indagare le caratteristiche tipologiche, fisiche e chimiche della terra originaria mediante prove di **prequalifica**; anche il legante deve essere sottoposto a test di laboratorio per garantirne la conformità ai requisiti richiesti dalla normativa.

La sperimentazione descritta in questo studio si colloca all'interno di una convenzione di ricerca tra il DISTART Strade e la ditta CGS Consolidamenti S.p.A. e ha come obiettivo il miglioramento dei processi di stabilizzazione del terreno presente in sito.

Dopo la fase di qualificazione del terreno naturale e del legante si vuole valutare la possibilità di pervenire alla progettazione della miscela ottimale terra – acqua – calce utilizzando, al posto del tradizionale compattatore impulsivo Proctor, un macchinario statico in grado di imprimere al terreno sollecitazioni più simili a quelle riscontrate in sito: la Pressa Giratoria.

Per arrivare al mix design della miscela ottimale vengono realizzate due serie di provini caratterizzati da tre diverse percentuali di calce e da quattro differenti tenori di umidità, crescenti rispetto a quella del terreno vergine. Una serie viene compattata utilizzando la tradizionale prova Proctor e l'altra utilizzando la Pressa Giratoria, i provini confezionati vengono confrontati tramite prove di portanza CBR e di resistenza a compressione in condizioni di espansione laterale libera.

Successivamente, per ogni percentuale di calce utilizzata, si determina il grado di umidità ottimale relativo alla metodologia di compattazione impiegata e si confezionano due nuove serie composte da tre provini ciascuna. Anche in questo caso i provini vengono sottoposti a prove CBR e di resistenza a compressione; la minor percentuale di calce in grado di garantire caratteristiche meccaniche superiori ai limiti imposti dai capitolati prestazionali sarà quella da utilizzare da utilizzare nella stabilizzazione.

## **Capitolo 1 – PANORAMICA SULLA STABILIZZAZIONE A CALCE**

### ***1.1. PREMESSA***

Nella costruzione del corpo stradale le limitazioni imposte dai piani delle attività estrattive si traducono in una insufficiente disponibilità di inerti e rendono sempre più necessario l'utilizzo del terreno disponibile in sito, anche se questo presenta caratteristiche in origine non conformi alle prescrizioni tradizionali.

Inoltre, il traffico veicolare dovuto agli approvvigionamenti e allo smaltimento delle terre di risulta ritenute inadatte, mostra pesanti ripercussioni ambientali e induce a cercare soluzioni alternative. Le problematiche ambientali ed economiche connesse al reperimento di terre idonee hanno portato, in questi ultimi anni, l'interesse del settore verso la tecnica di stabilizzazione del terreno in sito.

La stabilizzazione può essere definita come un mezzo di permanente consolidamento delle terre con materiali adatti ad incrementare la capacità portante e la resistenza meccanica di esse, diminuendone la sensibilità all'azione dell'acqua ed al cambiamento di volume durante i cicli di imbibizione e di essiccazione.

Lo scopo della stabilizzazione è, dunque, quello di rendere un terreno utilizzabile, migliorandone le caratteristiche reologiche, chimiche, meccaniche ed incrementando la conservazione nel tempo delle relative proprietà.

Per ottenere tale stabilizzazione, alle terre viene generalmente aggiunto un legante idraulico. Uno dei sistemi, che va più rapidamente diffondendosi in tutti i Paesi, è la stabilizzazione a mezzo della calce. Tale additivo è particolarmente efficace in terreni contenenti argille, in quanto queste reagiscono sia chimicamente sia fisicamente con esso, ottenendo una miscela di ottime qualità e tale da poter essere impegnate nella tecnica stradale.

Nel presente capitolo, dopo aver analizzato le caratteristiche chimico-fisiche delle argille e della calce, verranno illustrati gli effetti che la stabilizzazione induce a breve e a lungo termine nei terreni trattati. Si fornirà inoltre una panoramica del ciclo produttivo della calce e delle fasi di lavorazione in sito.

## 1.2. ARGILLA <sup>[1]</sup>

Si definisce argilla un sedimento non litificato estremamente fine, i cui granuli hanno dimensioni inferiori a 2  $\mu\text{m}$ , costituito prevalentemente 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; le lamelle di sfaldatura possono essere flessibili o elastiche.

La maggior parte dei fillosilicati contengono ossidrili  $(OH)^-$  posizionati 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 hanno come elemento costituente un catione di Silicio  $(Si)^{++}$  e Alluminio  $(Al)^{++}$  in coordinazione tetraedrica con quattro atomi di Ossigeno. L'Alluminio per le sue dimensioni ioniche può svolgere il ruolo di sostituito (non riconoscibile chimicamente) del Silicio, da cui il termine di allumino-silicati.

Questi gruppi anionici, possono essere isolati oppure collegati fra loro a formare coppie, anelli, nastri o sviluppi bidimensionali e tridimensionali di tetraedri. A ogni conformazione 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 pseudoesagonale. In tre dimensioni (figura 1.1), la struttura cristallografica di un fillosilicato è costituita da piani bidimensionali di tetraedri a maglia ciclica (strati T) sovrapposti a strati ottaedrici (strati O) costituiti da cationi, prevalentemente di Magnesio,  $(Mg)^{++}$ , Calcio  $(Ca)^{++}$ , Sodio  $(Na)^+$ , Potassio  $(K)^+$ , Ferro  $(Fe)^{+++}$  e Alluminio  $(Al)^{++}$ .

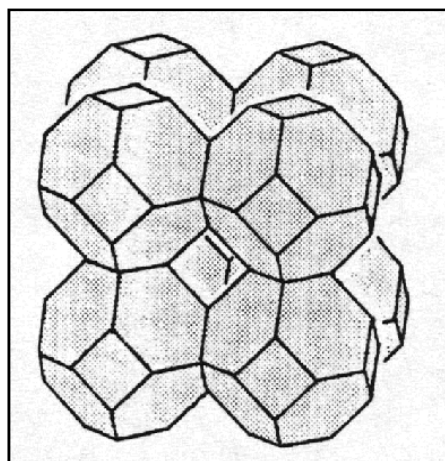


Figura 1.1 – Struttura dei fillosilicati. Due strati adiacenti condividono un atomo di ossigeno.

Questa classe di silicati è generalmente idrata per la presenza di gruppi ossidrili  $(OH)^-$  al centro degli anelli tetraedrici.

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 ed al tipo di strato ottaedrico, derivano le combinazioni che definiscono i quattro gruppi di minerali argillosi esaminati precedentemente.

La genesi dei minerali argillosi nelle rocce deriva da:

- alterazione chimica di rocce magmatiche silicee in ambiente acido o alcalino;
- deposizione da soluzioni idrotermali;
- metamorfismo di basso grado (nel caso delle cloriti).

La formazione delle argille come sedimenti clastici sciolti (cioè come suoli), avviene per dilavamento di rocce contenenti minerali argillosi, con la concentrazione del

sedimento fine, a seguito di un lungo trasporto prevalentemente in acqua, in ambienti lacustri, marini, lagunari.

Le rocce ed i sedimenti argillosi caratteristici sono le argilliti e le varve.

Gli ioni con carica positiva (cationi di silicio, alluminio, potassio, magnesio ecc..) occupano una posizione interna nel reticolo, mentre i gruppi ossidrili 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 dalle forze 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 m<sup>2</sup>/g, l'illite dell'ordine di 80 m<sup>2</sup>/g e la montmorillonite dell'ordine di 800 m<sup>2</sup>/g; si tenga presente che la sabbia grossa ha una superficie di  $2 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/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.

La carica negativa sulla superficie della particella argillosa non viene completamente neutralizzata dall'acqua, ma in parte anche dai cationi diffusi nell'acqua libera (calcio, magnesio, sodio e potassio).

Nel loro insieme le forze di superficie sono costituite dalle forze di repulsione dovute in prevalenza alle cariche elettriche; 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 ad una struttura flocculata, quando prevalgono le azioni attrattive.

La risultante di queste azioni dipende dalla distanza tra le particelle e dall'ambiente chimico.

Con deposizione in acqua salmastra la presenza dei sali nell'acqua tende a ridurre le azioni repulsive, Le particelle quindi si aggregano con una struttura flocculata piuttosto stabile e si raggruppano in fiocchi con vuoti all'interno.

La struttura dispersa, al contrario, è caratteristica delle argille depositate in acqua dolce, con decisa prevalenza delle forze di repulsione.

Se le particelle sono formate da minerali molto attivi, come la montmorillonite, le azioni repulsive sono così elevate che le particelle si dispongono quasi parallele, dando luogo ad una struttura orientata.

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 ed all'elevata capacità di assorbimento, sono terreni coesivi, ovvero terreni 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 pertanto trattarlo con dei leganti idraulici per migliorarne le caratteristiche meccaniche ed il comportamento nei confronti dell'acqua.

### **1.2.1. Classificazione delle argille**

Un sistema di classificazione rappresenta un linguaggio di comunicazione tra tecnici e costituisce un metodo sistematico per suddividere il terreno in gruppi e sottogruppi in accordo con il suo probabile comportamento.

Le proprietà da usare per la classificazione devono essere indipendenti dalle condizioni di sollecitazione e da quelle ambientali; ricadono fra queste proprietà la **granulometria**, principalmente per le terre a grana grossa, e i **limiti di Atterberg**, in particolare per le terre a grana fine.

Attualmente vi sono due sistemi di classificazione usati su scala mondiale nell'ingegneria civile: si tratta del sistema di classificazione USCS riportato in Italia nelle raccomandazioni AGI e del sistema AASHTO.

Il sistema USCS è stato sviluppato da Casagrande, e in esso le terre a grana grossa sono classificate sulla base della granulometria, mentre quelle a grana fine sulla base delle caratteristiche di plasticità.

Le quattro maggiori suddivisioni riguardano:

1. le terre a grana grossa (ghiaie G e sabbie S);
2. le terre a grana fine (limi M e argille C);
3. le terre organiche (O);
4. la torba e altre terre altamente organiche (Pt).

Quando la percentuale di trattenuto al setaccio n. 200 ASTM (0,075 mm) è maggiore del 50% si hanno le terre a grana grossa.

Nella classificazione la ghiaia come dimensioni è compresa tra 75 mm e 4,75 mm (setaccio n. 4); la sabbia tra il setaccio n. 4 (4,75 mm) e il setaccio n. 200 (0,075 mm); le sigle W e P indicano rispettivamente una granulometria ben graduata e una poco graduata.

Si hanno terre a grana fine quando la percentuale di passante al vaglio n. 200 (0,075 mm) è maggiore del 50%.

Il diagramma di Casagrande (figura 1.2) viene utilizzato per la classificazione delle terre a grana fine, l'area del diagramma è suddivisa in diversi settori tramite due rette le cui equazioni sono:

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

Si hanno limi (M) quando il punto rappresentativo ricade sotto la retta A e argille (C) quando ricade sopra.

La linea A divide i limi dalle argille ed i materiali organici (torbe) dagli inorganici; fanno eccezione le argille e i limi organici che cadono sotto la linea A.

Si hanno terre organiche (O) quando il rapporto tra il limite di liquidità eseguito sul terreno essiccato in forno e il limite di liquidità sul terreno naturale è minore di 0,75.

Con il limite di liquidità inferiore a 50 si ha la lettera L, superiore la lettera H. La linea 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.

L'altro sistema di classificazione è quello AASHTO ideato nel 1942.

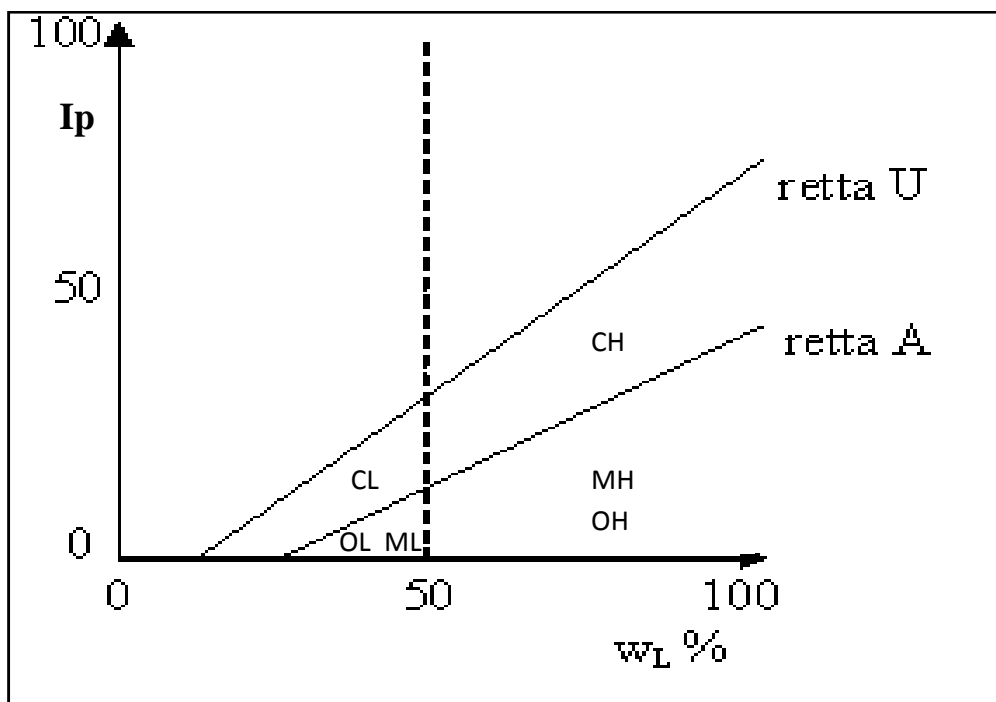


Figura 1.2 – Suddivisioni nel sistema USCS.

### 1.2.1.1. Granulometria

Nel precedente paragrafo è stata esaminata la natura chimico-mineralogica delle particelle, ora prenderemo in considerazione esclusivamente la loro dimensione.

La distribuzione percentuale dei grani di un campione di terreno secondo le dimensioni, rappresentata da una curva, costituisce la granulometria.

Le particelle sono distinte in classi granulometriche e, in generale, a prescindere dai parametri dimensionali adottati dai diversi sistemi di classificazione, queste classi sono quattro.

In ordine di dimensione crescente abbiamo:



- argilla
- limo
- sabbia
- ghiaia

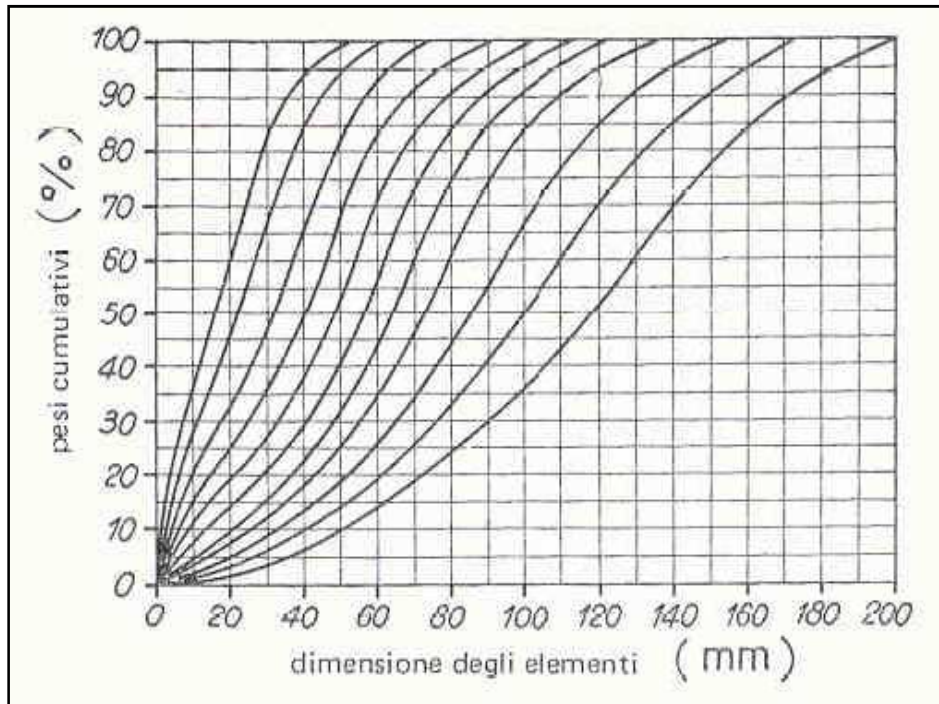


Figura 1.3 – Esempio di curva granulometrica.

Osservando tali curve si può notare che il loro andamento nella parte centrale, quella compresa tra il 20 e l'80%, ricalca più o meno quello di una retta. Oltrepassata la zona della curva corrispondente all'80% in peso del prodotto, le curve presentano un secondo flesso generalmente assai marcato, e tendono quindi asintoticamente al 100%.

Lo scopo dell'analisi granulometrica è quello di raggruppare, in diverse classi di grandezza, le particelle costituenti i terreni, e di determinare successivamente le percentuali in peso secco del campione iniziale.

Esistono due metodi per l'analisi granulometrica:

- **Granulometria per vagliatura:** permette di classificare i terreni in cui le particelle costituenti hanno un diametro  $>0.075$  mm.

- **Granulometria per sedimentazione:** permette di classificare i terreni in cui le particelle costituenti hanno un diametro  $<0.075$  mm.

I risultati ottenuti sono riportati in un diagramma semilogaritmico, dove la percentuale cumulata di passante ai crivelli e setacci viene espressa in funzione del logaritmo dei diametri equivalenti.

La **UNI-CNR n. 10006: 2002**, inerente alle tecniche di impiego delle terre nelle costruzioni stradali, attualmente ritirata ma da ritenersi comunque norma di buona tecnica anche se non cogente, propone una classificazione delle singole particelle di terreno in base alle loro dimensioni senza chiamare in causa le proprietà mineralogiche e chimiche del materiale (tabella 1.1).

Tabella 1.1 – Classi granulometriche stabilite dal CNR (mm).

ARGILLA	LIMO	SABBIA	GHIAIA			CIOTTOLI
			BRECCIOLINO	BRECCETTA	BRECCIA	
0.005	0.05	2	10	25	71	

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.

In campo stradale l'ottimo è rappresentato, in genere, da terreni con curve dotate di elevata continuità, poiché una maggiore continuità nella variazione delle dimensioni dei granuli, comporta una minore riduzione volumetrica del terreno in presenza di carichi esterni.

1.2.1.2. Limiti Di Atterberg

I terreni a grana fine, come quelli di tipo argilloso, 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 granelli 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.

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.

Questi valori possono cambiare da un tipo di argilla ad un'altra, ciò significa che possono essere impiegati per la classificazione e l'identificazione delle argille.

Se si fa variare in aumento con continuità il contenuto d'acqua  $w$ , si vede che lo stato del terreno argilloso passa da quello di solido fragile a quello di semisolido, quindi a quello plastico e infine a quello fluido (figura 1.4).

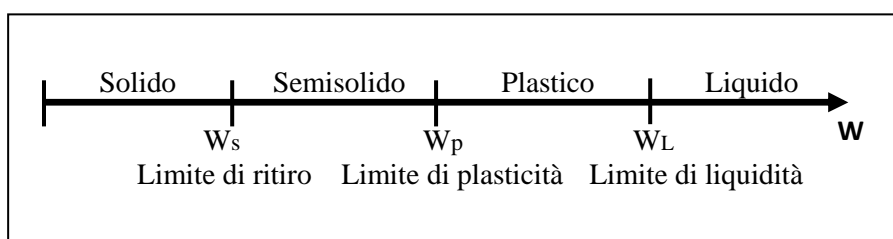


Figura 1.4 – Limiti di Atterberg.

A queste variazioni continue di stato possiamo associare una variazione della risposta deformazionale del terreno.

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 di plasticità**  $W_p$  e quello dallo stato plastico allo stato fluido **limite di liquidità**  $W_L$ . È detto inoltre **indice di plasticità** l'ampiezza dell'intervallo plastico di un terreno, definito come differenza fra

limite di liquidità e limite di plasticità, che indica il campo di contenuto d'acqua nel quale il terreno è allo stato plastico:

$$I_P = W_L - W_P$$

I limiti di Atterberg vengono determinati sulla frazione passante al setaccio 40 ASTM (0,42mm), e costituiscono una prova importante poiché presentano una notevole ripetibilità nei risultati sperimentali.

I valori dei limiti di Atterberg e in particolare di  $I_P$  dipendono innanzitutto dal tipo di argilla; si ha infatti una corrispondenza tra la composizione mineralogica e i limiti di Atterberg come si nota nella tabella 1.2.

Tabella 1.2 – Minerali argillosi.

	$W_L$ (%)	$W_P$ (%)	$I_P$ (%)
Montmorillonite	300 – 700	50 – 100	200 – 650
Illite	95 – 120	45 – 60	50 – 65
Caolinite	40 – 60	25 – 40	10 – 25

I limiti di Atterberg dipendono dalla percentuale di argilla che granulometricamente corrisponde alla percentuale di materiale inferiore ai 2  $\mu\text{m}$ . Da questo punto di vista si fa riferimento al **coefficiente di attività**:

$$A = I_P / \% < 2 \mu\text{m}$$

in base al quale le terre possono essere così divise:

- terre inattive  $A < 0,75$
- terre mediamente attive  $0,75 < A < 1,25$
- terre attive  $A > 1,25$

Facendo riferimento al valore dell'indice di plasticità, possono essere definiti altri coefficienti che descrivono la consistenza del materiale:

- **indice di consistenza:**

$$I_c = (W_L - W) / I_P$$

- **indice di liquidità:**

$$I_L = (W - W_P / I_P) = 1 - I_c$$

1.2.1.3. Classificazione dei terreni secondo l'indice di gruppo

Una classificazione dei terreni che tiene conto sia della granulometria che della suscettibilità all'acqua è quella denominata dell'**indice di gruppo** (tabella 1.3). In base a tale classificazione le terre vengono suddivise in 21 gruppi, ciascuno caratterizzato da un indice di gruppo variabile da 0 a 20.

Il gruppo con indice 0 comprende le terre prive di frazione fine e insensibili all'acqua; all'aumentare dell'indice aumenta sia la frazione fine che la sensibilità all'acqua e i gruppi con indice prossimo a 20 comprendono le terre con ampio dominio plastico.

Tabella 1.3 – Relazione dell'indice di gruppo con relativi parametri.

<b>INDICE DI GRUPPO</b>		
<b><math>I_g = 0.2 a + 0.005 a \cdot c + 0.01 b \cdot d</math></b>		
<i>Parametri</i>	<i>Calcolo</i>	<i>Range valori</i>
<b>A</b>	Pass. allo 0.75 – 35	(0÷40)
<b>B</b>	Pass. allo 0.75 – 15	(0÷40)
<b>C</b>	L.L. – 40	(0÷20)
<b>D</b>	L.L. – 10	(0÷20)

In base all'indice di gruppo è possibile individuare la corrispondente classe di appartenenza nella classifica delle terre elaborata dall'*Highway Research Board* e adottata senza sostanziali modifiche dal CNR.

Essa suddivide le terre in otto gruppi, individuati con gli indici da A<sub>1</sub> ad A<sub>8</sub>, in base alla granulometria e alla sensibilità all'acqua.

Per ciascun gruppo, oltre alle caratteristiche granulometriche ed ai valori del limite di liquidità e dell'indice di plasticità, nella classifica sono stati inoltre indicati i principali tipi di terreno costituenti il gruppo e le proprietà più importanti al fine di un loro utilizzo come materiali per rilevato o sottofondo.

Nella classificazione CNR-UNI 10006/02 dal titolo "*Costruzione e manutenzione delle strade – Tecnica di impiego delle terre*" alcuni gruppi (A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, A<sub>7</sub>) sono suddivisi in sottogruppi, per una migliore identificazione dei materiali che vi appartengono.
























Tabella 1.4 – Classificazione delle terre secondo la UNI 10006: 2002.

Classificazione generale	Terre ghiaia - sabbiosa							Terre limo - argillose					Torbe e terre organiche palustri				
	Frazione passante al setaccio 0,075 UNI 2332 ≤ 35%							Frazione passante al setaccio 0,075 UNI 2332 > 35%									
	A1	A1 a	A1 b	A3	A2-4	A2-5	A2-6	A2-7	A4	A5	A6	A7		A8			
Sottogruppo																	
Analisi granulometrica - Frazione passante al setaccio																	
2 UNI 2332 %	≤ 80																
0,4 UNI 2332 %	≤ 30	≤ 80	≥ 60														
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					
Indice di plasticità	≤ 6		N.P.	≤ 10	≤ 10 <sub>max</sub>	> 10	> 10	≤ 10	≤ 10	> 10	> 10 (IP>LL30)	> 10 (IP>LL30)					
Indice di gruppo	0		C	0	≤ 4			≤ 8	≤ 12	≤ 18	≤ 20	≤ 20					
Tipi usuali dei materiali caratteristici costituenti il gruppo	ghiaia o breccia, sabbione, sabbia grossa, pomice, scorie vulcaniche, pozzolane	Sabbia fine		ghiaia e sabbia litosa e argillosa				Limati poco compressibili	Limati forti, compressibili	Argille poco compressibili	Argille forti, compressibili	Argille forti, compressibili	Torbe di recente o remota formazione e, derivi 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	Medie							Media					Media				
Ritiro o rigonfiamento	Nessuna o lieve							Lieve e media					molto elevato				
Permeabilità	Elevata							Scarsa o nulla									
Identificazione dei territori in sito	Facilmente individuabili a vista			Aspri al tatto (procedere allo stato asciutto)				La maggior parte dei granuli sono individuabili ad occhio nudo - Aspri al tatto - Una tenacità media e elevata allo stato asciutto indica la presenza di argilla			Reagisce alla prova di scuotimento - Poveri 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 a lo stato umido			Fibrosi di colore bruno a nero - facilmente individuabili a vista



La tabella 1.5 definisce invece la classificazione delle terre secondo la normativa americana *ASTM – American Society for Testing and Materials*.

Tabella 1.5 – Classificazione delle terre secondo la norma ASTM D2488.

MAJOR DIVISION		GROUP SYMBOL	LETTER SYMBOL	GROUP NAME	
COARSE GRAINED SOILS CONTAINS MORE THAN 50% FINES	GRAVEL AND GRAVELLY SOILS MORE THAN 50% OF COARSE FRACTION RETAINED ON NO. 4 SIEVE	GRAVEL WITH * 5% FINES		GW	Well-graded GRAVEL
				GP	Poorly graded GRAVEL
		GRAVEL WITH BETWEEN 5% AND 15% FINES		GW-GM	Well-graded GRAVEL with silt
				GW-GC	Well-graded GRAVEL with clay
				GP-GM	Poorly graded GRAVEL with silt
			GP-GC	Poorly graded GRAVEL with clay	
	GRAVEL WITH ≥ 15% FINES		GM	Silty GRAVEL	
			GC	Clayey GRAVEL	
	SAND AND SANDY SOILS MORE THAN 50% OF COARSE FRACTION PASSING ON NO. 4 SIEVE	SAND WITH * 5% FINES		SW	Well-graded SAND
				SP	Poorly graded SAND
		SAND WITH BETWEEN 5% AND 15% FINES		SW-SM	Well-graded SAND with silt
				SW-SC	Well-graded SAND with clay
				SP-SM	Poorly graded SAND with silt
			SP-SC	Poorly graded SAND with clay	
SAND WITH ≥ 15% FINES			SM	Silty SAND	
			SC	Clayey SAND	
FINE GRAINED SOILS CONTAINS MORE THAN 50% FINES	SILT AND CLAY	LIQUID LIMIT LESS THAN 50		ML	Inorganic SILT with low plasticity
				CL	Lean inorganic CLAY with low plasticity
				OL	Organic SILT with low plasticity
	LIQUID LIMIT GREATER THAN 50		MH	Elastic inorganic SILT with moderate to high plasticity	
			CH	Fat inorganic CLAY with moderate to high plasticity	
			OH	Organic SILT or CLAY with moderate to high plasticity	
HIGHLY ORGANIC SOILS			PT	PEAT soils with high organic contents	

### 1.3. CALCE <sup>[2]</sup>

L'utilizzo di terreni disponibili in cantiere consente di ridurre l'entità del trasporto di materiale dalle cave di prestito e verso i luoghi di rifiuto, con evidenti vantaggi economico-ambientali. Tra i terreni scarsamente utilizzabili nell'ambito delle costruzioni stradali sono certamente inclusi quelli di matrice argillosa, il legante che presenta migliori risultati nel trattamento di questa tipologia di terreni è la calce.

**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.

I termini di calce viva e calce spenta si usano, pertanto, indipendentemente dal contenuto o meno 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'.

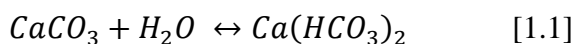
L'impiego di termini quali aerea, viva, caustica, spenta, estinta, calcica, magnesiaca, dolomitica, consente dunque di distinguere diversi prodotti, tutti riferiti alle calci aeree da costruzione, così come vengono definiti dalla norma europea UNI EN 459-1: 2002.

Esistono diversi tipi di leganti ognuno adatto ad un determinato tipo di utilizzo, per questo e altri motivi le calci 'aeree', alle quali si farà riferimento nel prosieguo, non



vanno mai 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 sovrassature contenenti bicarbonato di calcio secondo la relazione [1.1]:



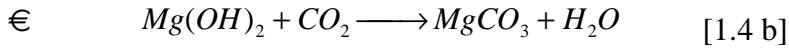
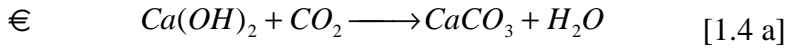
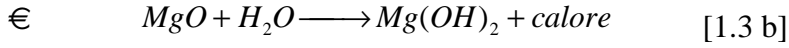
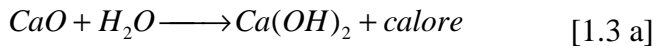
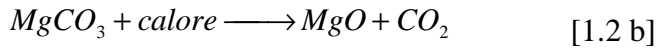
Il carbonato di calcio può presentarsi in quattro modificazioni la cui stabilità aumenta secondo l’ordine: calcio amorfo, vaterite, aragonite, calcite, tuttavia solo le ultime due rivestono interesse nella formazione delle rocce.

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 ( $MgCO_3$ ). Il grafico seguente indica i contenuti medi di calcite e dolomite presenti nelle varie rocce:

Tabella 1.6 – Percentuali medie di dolomite e calcite presenti nelle varie rocce.

TIPO DI ROCCIA	CALCITE [%]	DOLOMITE [%]	RISPETTIVO EQUIVALENTE MgO
Calcare	>95	<5	<b>0-1.1</b>
Calcare contenente ossido di magnesio	>90 <95	>5 <10	<b>1.1-2.1</b>
Calcare dolomitico	>50 <90	>10 <50	<b>2.1-10.8</b>
Dolomite Calcitica	>10 <50	>50 <90	<b>10.8-19.5</b>
Dolomite	<10	>90	<b>19.5-21.6</b>

La temperatura di cottura del calcare che porta alla formazione di ossido di calcio (calce viva) deve essere di circa 900°C e il processo avviene secondo le relazioni seguenti:



€  
 €  
 €  
 €  
 €  
 €

Dalle [1.2 a] e [1.2 b] si nota come l'effetto dell'alta temperatura porti il carbonato di calcio (o di magnesio) a dissociarsi formando ossido di calcio (o di magnesio) chiamato anche calce viva. Di seguito si riporta il reticolo cristallino dell'ossido di calcio, seguito da una tabella che ne visualizza le proprietà generali:

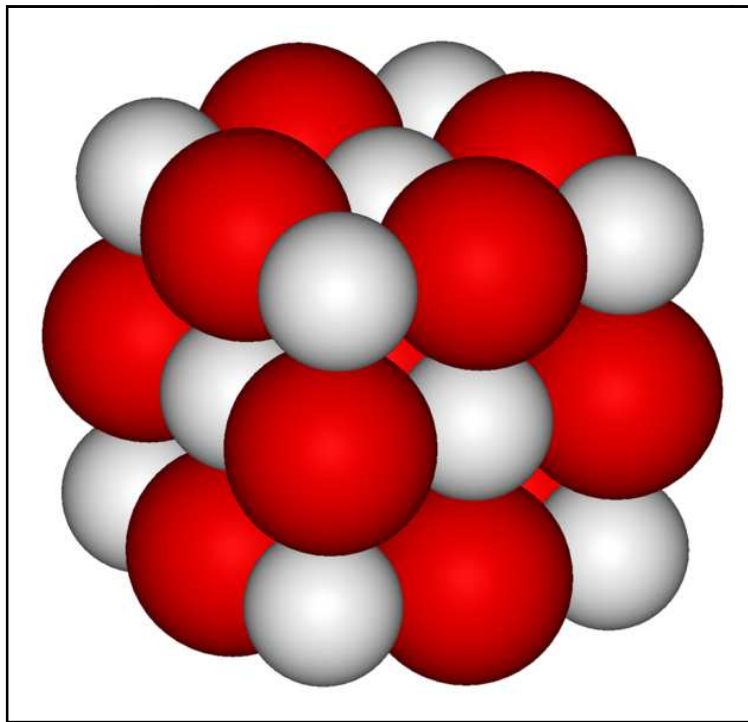



Figura 1.5 – Reticolo cristallino dell'ossido di calcio.


Tabella 1.7 – Caratteristiche generali dell'ossido di calcio

<b><u>CARATTERISTICHE GENERALI</u></b>	
Formula molecolare	CaO
Massa molecolare	<b>56.08 g/mol</b>
Aspetto	Solido Incolore
Numero CAS	1305-78-8
Densità	<b>3.37 (20°C)</b>
Solubilità	<b>1.65 g/l (20°C)</b>
Temperatura di fusione	<b>2853 K</b>
Temperatura di ebollizione	<b>3123 K</b>
Simbolo di rischio chimico	

Per poter utilizzare la calce come legante, tuttavia, è necessaria l'aggiunta di acqua secondo le relazioni [1.3 a] e [1.3 b]; tale processo è denominato spegnimento della calce ed il risultato finale è la formazione di idrossido di calcio (o di magnesio). Gli idrossidi di calcio e magnesio, prodotti dal processo di spegnimento, prendono anche il nome di calce idrata se l'acqua impiegata è quella stechiometrica, mentre se la quantità di acqua è in eccesso ( $1.5 \text{ m}^3$  per 500 kg di calce) si ottiene una pasta plastica ed untuosa, detta grassello; se l'acqua invece 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  $2,5 \text{ m}^3/\text{t}$ , una magra invece  $1,5 \text{ m}^3/\text{t}$ .

Tabella 1.8– Caratteristiche generali dell'idrossido di calcio.

<b><u>CARATTERISTICHE GENERALI</u></b>	
Formula molecolare	<b>Ca(OH)<sub>2</sub></b>
Massa molecolare	<b>74.10 g/mol</b>
Aspetto	Cristallo incolore o polvere bianca
Numero CAS	1305-62-0
Densità	<b>2.24 (20°C)</b>
Solubilità	<b>1.7 g/l (20°C)</b>
Temperatura di fusione	823 K
Temperatura di ebollizione	3023 K
Simbolo di rischio chimico	

Da sottolineare il fatto che in caso di calce dolomitica, il processo di spegnimento risulta particolarmente lento e può essere accelerato realizzandolo a temperature più alte e generalmente in autoclave, per poter arrivare in presenza di acqua a temperature di 130-200°C.

Le ultime due reazioni [1.4 a] e [1.4 b] mostrano come gli idrossidi di calcio e magnesio miscelati con acqua creino una massa plastica capace di indurire all'aria combinandosi con il biossido di carbonio.

### **1.3.1. Calce aerea**

Le calce aeree, che induriscono per assorbimento dell'anidride carbonica dall'aria, rappresentano il legante più tradizionale tra quelli impiegati. Sul mercato esse sono disponibili in forma di calce viva o idrata, sia in polvere che in pasta (grassello di calce). La calce in polvere e quella in pasta sono materiali chimicamente analoghi (fatto salvo il contenuto d'acqua), ma differiscono molto per quanto concerne le proprietà fisiche, la reologia e la velocità di carbonatazione. Come precedentemente accennato la calce viva è il prodotto ottenuto mediante cottura di calcari ad alto titolo (CaCO<sub>3</sub>); essa è costituita essenzialmente da ossidi di calcio o da ossidi di calcio e magnesio, accompagnati da piccole quantità di impurezze varie; si presenta in zolle o in polvere (figura 1.6 e 1.7).

La cottura del calcare ad alta temperatura (>900°C) porta alla formazione della calce viva e produce anidride carbonica secondo la seguente reazione:

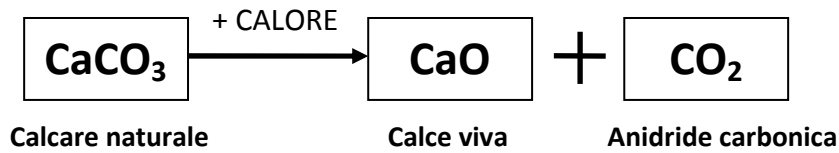
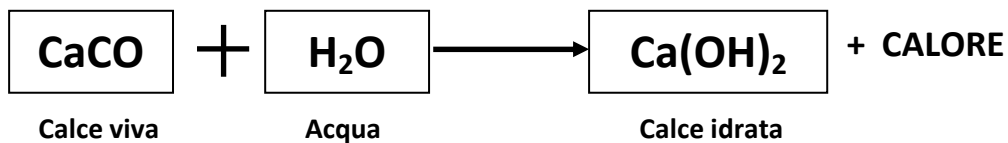


Figure 1.6 e 1.7 – Carbonato di calcio e ossido di calcio

La calce idrata è il prodotto ottenuto dallo spegnimento di una calce viva (CaO); è costituita essenzialmente da idrati di calcio o da idrati di calcio e magnesio, accompagnati da piccole quantità di carbonati non decomposti, di silicati e di impurezze varie e si presenta in polvere.

La reazione della calce viva con l'acqua, che porta alla formazione della calce idrata, è una reazione fortemente esotermica:



La calce idrata in pasta o grassello di calce, è una dispersione densa di idrossido di calce in acqua e si ottiene aggiungendo, in fase di idratazione, un eccesso d'acqua rispetto a quella necessaria allo spegnimento della calce viva.

Si può ottenere anche stemperando la calce idrata in polvere in acqua fino ad ottenere un prodotto omogeneo.

La figura 1.8 mostra la distinzione convenzionale dei vari tipi di calci aeree in funzione della quantità percentuale di ossido di calcio <sup>[3]</sup>.

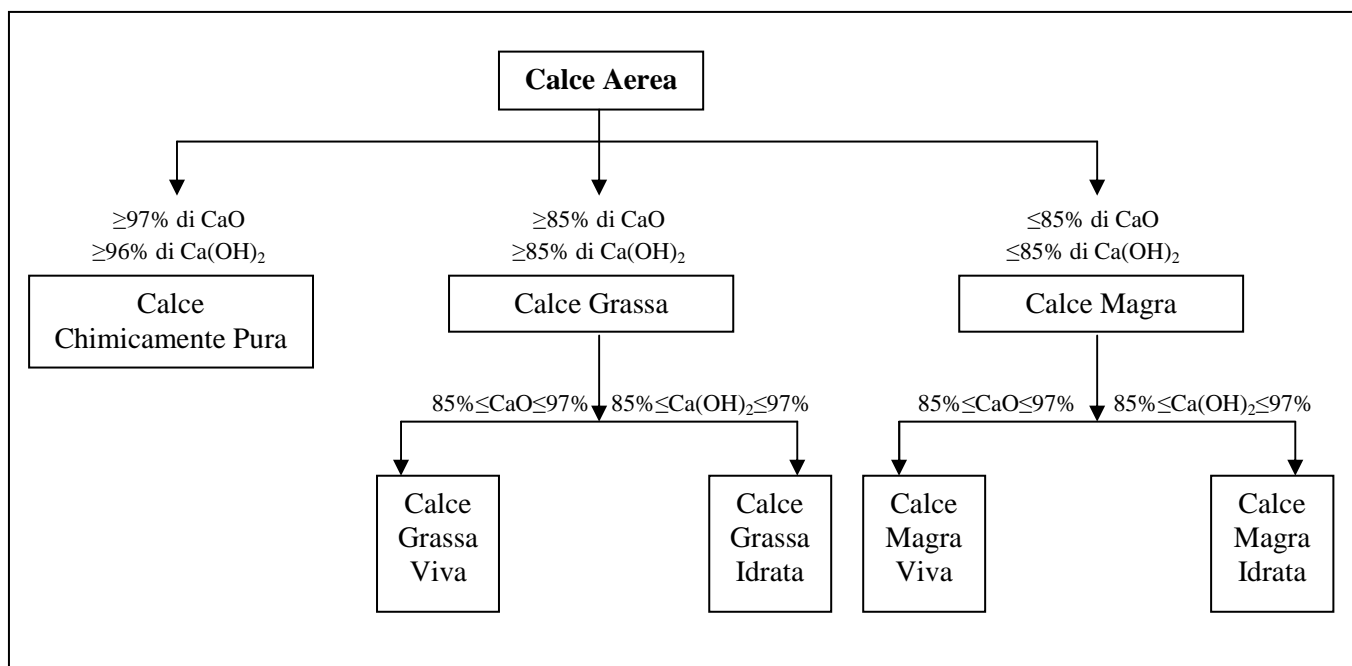


Figura 1.8 – Tipologie di calci aeree.

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

### **1.3.3. Il processo di produzione della calce**<sup>[3]</sup>

Il processo di produzione della calce può essere visto come un ciclo. Esso porta un materiale ampiamente disponibile in natura, la pietra calcarea, a diventare il legante principale di gran parte delle opere costruttive realizzate dall'uomo negli ultimi cinquemila anni.

Il ciclo della calce è composto da quattro momenti fondamentali:

- 1) la selezione del calcare;
- 2) la cottura;
- 3) lo spegnimento o idratazione;
- 4) la carbonatazione.

Si tratta di uno schema semplificato, in quanto le trasformazioni chimico-fisiche che avvengono durante i diversi processi sono assai più complesse e articolate.

#### 1) La selezione del calcare

Le caratteristiche mineralogiche e chimiche dei calcari usati come materia prima per la fabbricazione della calce sono di fondamentale importanza. I calcari più idonei alla fabbricazione della calce devono avere una struttura microcristallina, alto contenuto di carbonati e contenere percentuali di impurità, in particolare di natura argillosa, non superiori al 5%.

#### 2) La cottura

In fase di cottura, il calcare viene immesso nei forni e portato a una temperatura prossima a 900°C. In tali condizioni il carbonato di calcio si decompone in ossido di calcio (calce viva) e anidride carbonica.

I forni per la produzione della calce attualmente in uso sono raggruppabili in tre famiglie:

- gli impianti con contenitore fisso “verticale” (forni verticali);

- gli impianti con contenitore “rotante” con asse suborizzontale (forni rotanti);
- gli impianti misti, in cui possono essere compresi quelli non catalogabili nei due gruppi suddetti.

### 3) Lo spegnimento

La calce viva, messa a contatto con acqua reagisce con un forte sviluppo di calore e si trasforma in una polvere bianca (o in una pasta) chiamata calce spenta, chimicamente idrossido di calcio.

Tale processo avviene per mezzo di idratatori nei quali avviene il contatto ossido-acqua. Nella figura 1.9 è schematicamente rappresentato il processo di spegnimento dell’ossido che avviene in un impianto di idratazione.

La calce viva sotto forma di zolle viene prima introdotta in un frantoio a martelli (1) a una granulometria passante ai 15 mm; quindi perviene, con un elevatore a tazze (2), a un silo di deposito (3) e, attraverso un dosatore (4), giunge ad una coclea (5) che fornisce una prima mescolazione con l’acqua. Il materiale finisce quindi nella vasca di spegnimento (6) nella quale avviene la reazione vera e propria, che è accompagnata da un rimescolamento continuo.

A causa del forte sviluppo di vapore si crea un letto fluidificato; le particelle già spente hanno un peso specifico minore e vengono estratte attraverso un dispositivo di sfioro (15) mentre le parti non spente rimangono più a lungo nella vasca di spegnimento e vengono successivamente allontanate.

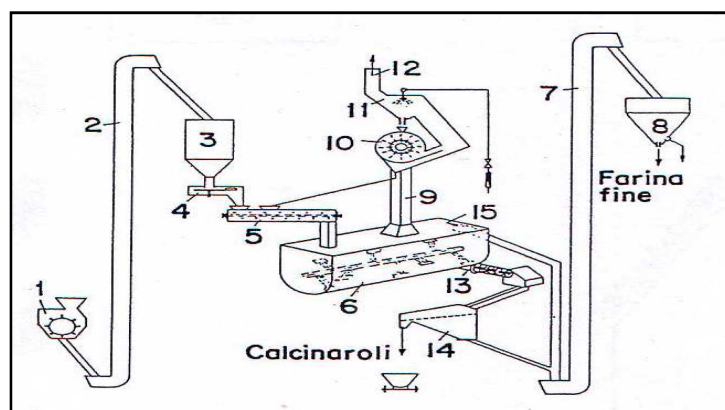


Figura 1.9 – Schema di un impianto di idratazione della calce.



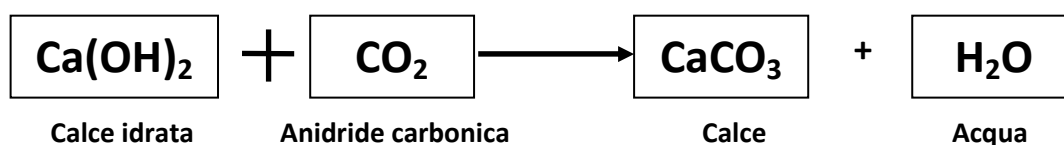
4) La carbonatazione

A differenza del cemento che inizia la presa al primo contatto con l'acqua, la calce può essere conservata in acqua per anni.

La presa inizia invece con l'asportazione dell'acqua e la successiva essiccazione. Ciò la rende inutilizzabile per le applicazioni a contatto con l'acqua (ponti, moli), ma preferibile al cemento dove l'essiccazione debba avvenire rapidamente, come ad esempio nell'applicazione di intonaci. Il cemento infatti non dovrebbe asciugare prima che sia terminata la fase di presa.

Una volta che la calce si è essiccata, a contatto con l'anidride carbonica presente nell'atmosfera, inizia un lento processo che la trasforma in calcare (carbonatazione), il composto originario dal quale è stata prodotta, chiudendo così il ciclo della calce.

La reazione è la seguente:



1.3.4. Effetti a breve termine

- 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.

In figura 1.10 si osserva come gli ioni calcio ( $\text{Ca}^{++}$ ) in soluzione acquosa sostituiscano gli ioni ( $\text{H}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) presenti sulla superficie del cristallo di argilla. Gli ioni sostituiti compensano le cariche elettriche negative degli ioni ( $\text{OH}^-$ ) della calce presenti nella soluzione acquosa.

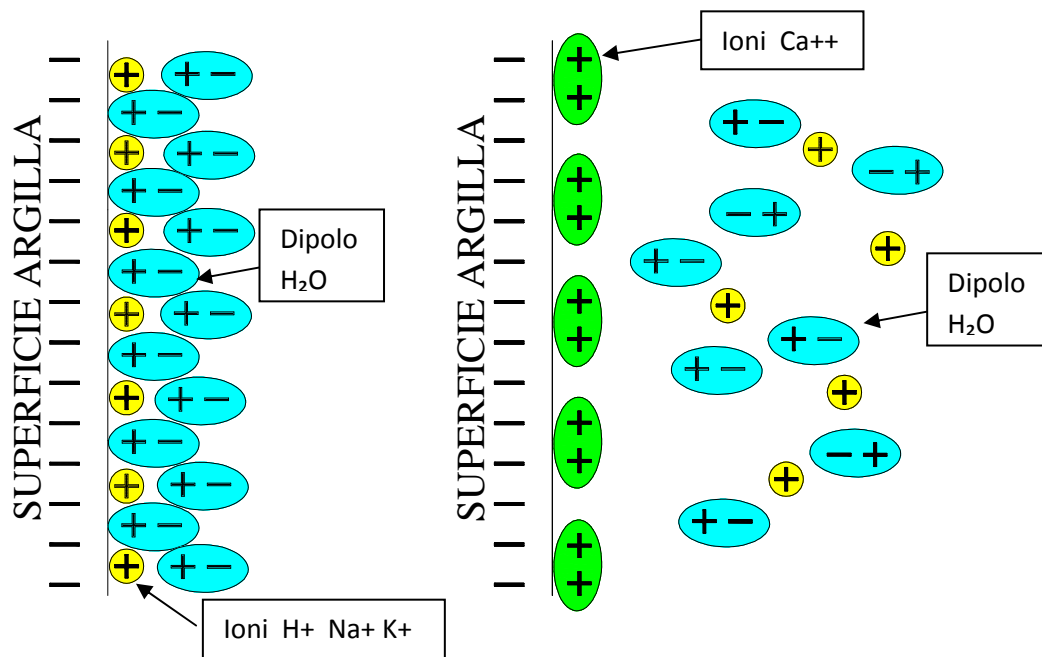


Figura 1.10 - Reazione di scambio cationico sulla superficie dei minerali di argilla.

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 <sup>[4]</sup>

Le particelle inferiori a  $2\ \mu m$  (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 (come mostra la figura 1.11) e il volume d'acqua trattenuto da ciascuna particella è ridotto.

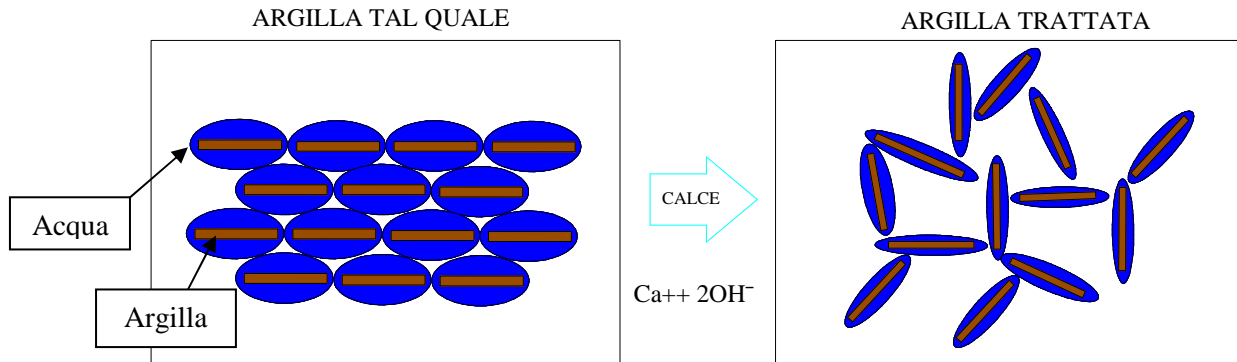


Figura 1.11– Fenomeni di agglomerazione delle particelle di argilla.

- Indice di plasticità e limiti di Atterberg <sup>[5]</sup>

L'indice di plasticità IP, di una terra argillosa diminuisce significativamente dopo il trattamento con calce. Come mostra la figura 1.12 il trattamento con calce del terreno fa crescere il limite liquido LL, per cui a parità di contenuto d'acqua  $W_n$ , il materiale passa dallo stato plastico a quello solido.

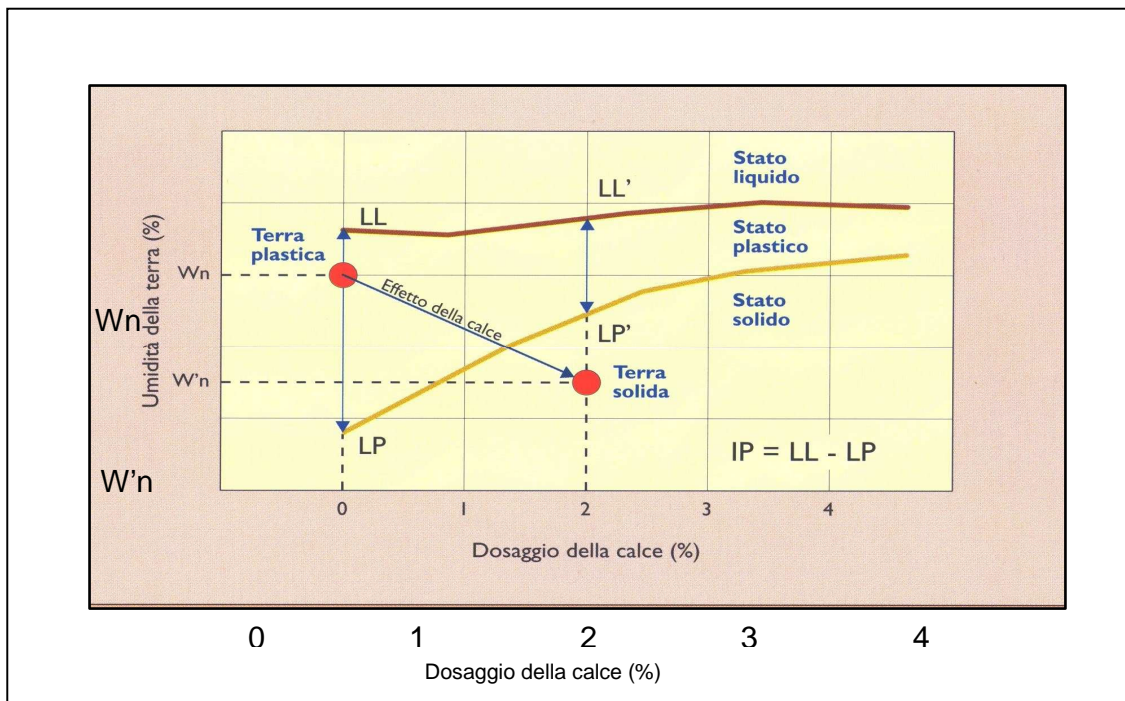


Figura 1.12 - Effetto del trattamento a calce sull'indice di plasticità.

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 un aumento 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 del limite plastico ( $IP = LL - LP$ ), la sua diminuzione può sottendere andamenti diversificati dai due limiti.

La sensibilità del limite liquido e del limite 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.

### **1.3.5. Effetti a lungo termine**

Gli effetti a lungo termine sono da attribuirsi a reazioni tra la calce adsorbita e gli strati superficiali dell'argilla a contatto che producono una specie di gel. A questa reazione "in stato di adsorbimento", si affianca anche una reazione chimica "in soluzione" tra il silicio liberato dall'argilla e la calce disciolta; ambedue queste cause concorrono alla formazione del prodotto finale.

I silico-alluminati di calcio, dopo essersi formati in soluzione acquosa, polimerizzano e riprecipitano. Essi formano strutture aghiformi che cementano tra loro i minerali della terra trattata con la calce, indurendola. Affinché la reazione proceda regolarmente è necessaria la presenza di una sufficiente quantità di acqua. La velocità di reazione (velocità di indurimento) aumenta o diminuisce all'aumentare o al diminuire della temperatura.

### **1.3.6. Effetti del trattamento a calce**

Per le argille ed i limi si rileva che i suddetti fenomeni fisico-chimici producono 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.

Per il solido stradale risultano di particolare importanza i parametri descritti in seguito.

#### **1.3.6.1. Variazioni dell'umidità e del 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.

### 1.3.6.2. *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  $\gamma_s$  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 figura 1.13 sono riportate, a parità di energia di costipamento, alcune curve di addensamento di miscele terra – calce al variare del contenuto di calce.

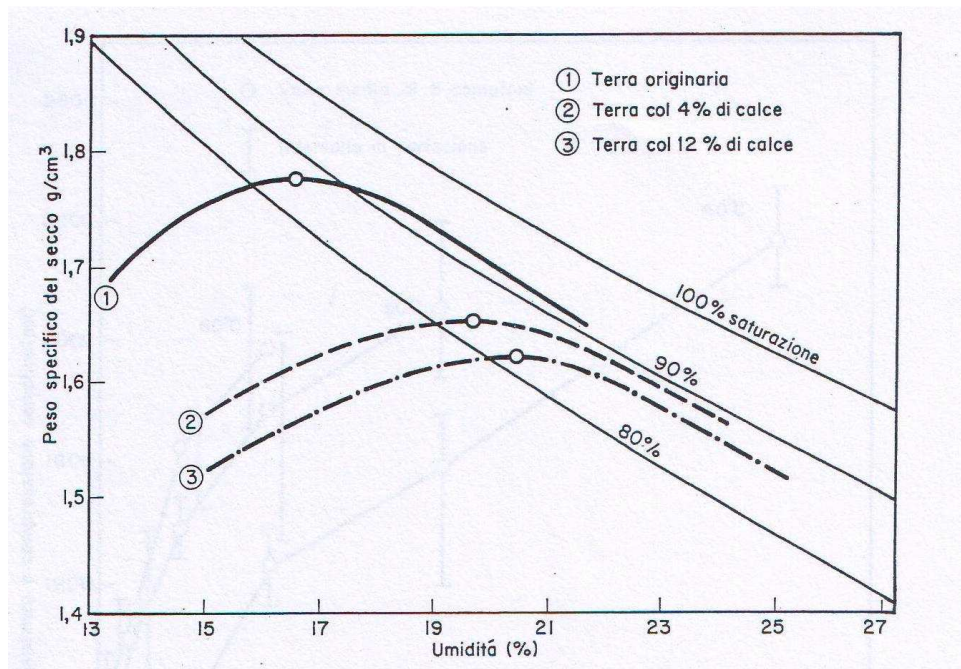


Figura 1.13 – Influenza del tenore di calce sulla compattazione di una terra.

#### *1.3.6.3. Caratteristiche meccaniche*

L'aggiunta di calce modifica la natura del terreno e quindi le sue 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 limite, a discapito però di una struttura "metastabile" soggetta ad importanti e repentine variazioni di volume, una volta che viene superata la tensione di snervamento.

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

#### *1.3.6.4. 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 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.

### **1.3.7. Fasi di realizzazione di un trattamento a calce**<sup>[6]</sup>

Il processo di stabilizzazione a calce può essere riassunto in sei passi fondamentali.

#### **1) Preparazione del suolo**

La preparazione del suolo consiste inizialmente nell'asportazione dello strato più superficiale (scotico), per eliminare la vegetazione e la terra più ricca di humus (figura 1.14); può inoltre essere necessario scarificare la terra per dissodarla e togliere gli elementi lapidei di dimensioni eccessive.



Figura 1.14 – Preparazione del terreno al trattamento attraverso lo scotico.

Si procede poi alla determinazione dell'umidità naturale della terra da trattare e quando risulta troppo elevata rispetto al valore ottimale della miscela di progetto la si arieggia per favorire l'evaporazione dell'acqua.



## 2) Approvvigionamento della calce

La calce può essere approvvigionata sia sfusa sia in sacchi di carta, normalmente in relazione rispettivamente a piccole o a grandi dimensioni dell'opera. La calce sfusa sarà consegnata con automezzi che ne consentano lo scarico pneumatico. La quantità di calce disponibile deve essere sufficiente ad assicurare almeno due giorni di piena operatività del cantiere. Nel caso di approvvigionamento allo stato sfuso, in cantiere la calce sarà stoccata in appositi sili; nel caso dei sacchi questi saranno stoccati al coperto, al riparo da umidità, pioggia e ristagni d'acqua.

## 3) Dosaggio e spandimento della calce

Il dosaggio è riferito al metro quadrato di suolo da trattare; il suo valore in  $\text{kg/m}^2$  si ottiene a partire dalla percentuale stabilita in laboratorio con riferimento al suolo secco, conoscendo la densità secca in sito del suolo e la profondità dello strato dopo trattamento e costipazione. La calce in polvere non può essere sparsa in giornate di forte vento, capace di sollevarne una parte, sia per la sicurezza del personale di cantiere sia per la precisione del dosaggio; inoltre verrà sparsa solo sulla superficie che potrà essere lavorata in giornata, per evitare l'asportazione della calce dagli agenti atmosferici e il fenomeno della parziale carbonatazione.

Nel caso della calce sfusa, il controllo della quantità distribuita è effettuato posizionando un telo quadrato con superficie di  $1,0 \text{ m}^2$  sul terreno prima del passaggio della macchina spargicalce (figura 1.15) e pesando poi la calce su di esso depositata a passaggio avvenuto. Controllando poi l'effettiva profondità della successiva miscelazione nel suolo naturale si può calcolare il dosaggio effettivamente praticato.



Figura 1.15 – Macchinario spandi calce per lo spargimento della calce sfusa.

Nel caso di utilizzo di calce in sacchi, questi devono essere posizionati lungo il tracciato secondo un reticolo regolare, con passo facilmente calcolabile. I sacchi posizionati sul suolo sono tagliati a metà con un coltello e svuotati formando tanti piccoli mucchi; i sacchi vuoti devono essere allontanati. La calce è poi livellata manualmente con rastrelli o per mezzo di attrezzi dotati di dischi a dente o a punte trainati da trattori o autocarri; generalmente due passaggi sono necessari per un'uniforme distribuzione.

#### **4) Polverizzazione e miscelazione**

La polverizzazione e la miscelazione devono essere attuate con diverse passate di idoneo macchinario (figura 1.16), fino a quando la componente limo-argillosa passi interamente attraverso crivelli a maglia quadra da 25 mm e almeno per il 60% al setaccio ASTM E 11 da 4 mesh (con luce netta di maglia da 4,75 mm). È importante che la potenza della macchina miscelatrice sia proporzionale allo spessore dello strato da trattare ed alla produzione giornaliera desiderata. Quando necessario la terra trattata viene irrorata con acqua fino al raggiungimento del tenore ottimale per la compattazione.

Al termine della miscelazione, scavando un pozzetto a tutto spessore ogni 300 m<sup>2</sup> di superficie lavorata si devono controllare:

- l'omogeneità della miscela (osservando il suo colore che dovrà apparire uniforme sia nello stato tal quale, sia dopo spruzzaggio di soluzione alcolica di fenolftaleina all'1% che impartirà colorazione rossastra);

- l'umidità di un campione della miscela estratta;
- l'effettiva profondità di lavoro della macchina miscelatrice (che ha operato sul suolo naturale) misurata rispetto a riferimenti esterni precedentemente predisposti.

Al termine dei controlli precedenti, qualora la superficie dello strato si mostri irregolare, per un'ottimizzazione della successiva compattazione, si procederà a un livellamento con grader o altra macchina adatta allo scopo.



Figura 1.16 – Macchinario spandi calce per lo spargimento della calce sfusa.

### **5) Compattazione finale**

Lo strato di terra trattata deve essere compattato mediante rulli (figura 1.17) senza ritardi dopo la miscelazione, successivamente comunque al completamento della reazione esotermica di spegnimento nel caso di utilizzo della calce viva, e dopo la verifica che il tenore di umidità sia prossimo all'ottimo. Il completo spegnimento della calce viva richiede un tempo variabile in funzione della temperatura e dell'umidità del suolo; normalmente, con temperatura del suolo non troppo bassa, 2 o 3 ore di maturazione della miscela sono sufficienti allo scopo.

Nella costruzione di rilevati multistrato è molto importante procedere a fronte chiuso, completando in giornata le operazioni di miscelazione e compattazione e sovrapponendo la terra da trattare il giorno successivo; con ciò si minimizza la possibile

reazione di carbonatazione e si attua una protezione adeguata degli strati in maturazione.

Quando le dimensioni del lavoro sono tali da giustificare l'esecuzione di un tratto sperimentale di prova, si devono predisporre diversi schemi di rullatura con rullo a piastre, seguito da rullo metallico liscio e/o rullo gommato, effettuando un campo prova per determinare la combinazione ottimale e più economica di mezzi, passate e velocità di avanzamento, per il conseguimento del grado di addensamento prescritto.



Figura 1.17– Rullo a piedi di montone, frequentemente utilizzato nelle stabilizzazioni.

## 6) Maturazione dopo rullatura

Dato che la resistenza e la stabilità dimensionale di una terra stabilizzata dipende anche da un accurato periodo di maturazione dopo la rullatura finale, durante il quale l'umidità ottima di compattazione deve restare il più possibile costante, immediatamente dopo il completamento dell'ultimo strato costipato e sagomato si stenderà o uno strato di 3-4 centimetri di sabbia bagnata (da asportare alla fine del periodo di maturazione) o un velo protettivo di bitume liquido BL 350-700 (B.U. CNR n. 7) in ragione di 1 kg/m<sup>2</sup> o di emulsione bituminosa a lenta rottura del tipo EL 55 (B.U. CNR n. 3) in ragione di 1,8 kg/m<sup>2</sup>. La durata del periodo di maturazione, solitamente fino a sette giorni, sarà indicata dalla Direzione Lavori, anche in relazione alle esigenze di cantiere e al tipo di traffico previsto transitare sullo strato finito.

## 7) Casi particolari

Per quanto riguarda la posa in opera delle miscele preparate in centrale, le operazioni variano per le modalità di stesa, che sarà eseguita con finitrice o livellatrice, o altro sistema accettato e approvato espressamente dalla Direzione Lavori per lo spessore richiesto dal progetto.

In relazione all'asportazione preliminare dello strato di terra vegetale, le caratteristiche granulometriche della miscela e le operazioni successive alla stesa di questa valgono le disposizioni indicate per le lavorazioni in sito.

Nei giunti di lavoro trasversali la miscela già costipata va ripresa in tutte quelle zone nella quali il contenuto di calce, lo spessore e la compattazione risultino insufficienti. I tagli dovranno essere effettuati opportunamente al mattino seguente, nello strato indurito, in modo da presentare una superficie verticale, per evitare corrispondentemente possibili fessurazioni successive.

## Capitolo 2 – PREQUALIFICA DEI MATERIALI

### 2.1. PREMESSA

Lo studio descritto nei capitoli successivi è inquadrato in una ricerca più ampia, svolta all'interno di una convenzione di ricerca tra il DISTART – Strade e la ditta CGS Consolidamenti SpA, che ha come obiettivo la progettazione di trattamenti dei terreni con leganti in grado di fornire risultati altamente prestazionali.

Le normative di riferimento sono la CNR BU 36/73 in ambito italiano e la UNI EN 14227:2006 dal titolo “*Miscela con leganti idraulici*” che nella parte 11 tratta le stabilizzazioni a calce.

Attualmente la procedura di progettazione della miscela terra – acqua – calce prevede, nella fase di compattazione, l'utilizzo della tradizionale prova Proctor. Le sollecitazioni fornite da tale metodologia sono di tipo impulsivo e risultano nettamente diverse da quelle fornite dal rullo in sito; per questo motivo può accadere che le caratteristiche finali della stabilizzazione risultino non conformi rispetto a quelle ottenute in laboratorio. Lo studio descritto si propone di pervenire alla progettazione della miscela ottimale utilizzando, al posto del compattatore impulsivo Proctor, un macchinario statico in grado di imprimere sollecitazioni maggiormente simili a quelle registrate in sito: la Pressa Giratoria.

Nella presente sperimentazione vengono realizzati provini con diverse percentuali di calce ed un tenore di umidità superiore rispetto all'umidità ottimale di costipamento del terreno vergine. La percentuale di calce scelta per il trattamento è la più bassa che soddisfa i requisiti meccanici richiesti dal capitolato di riferimento, valutati dopo tempi e condizioni di maturazione ben definiti.

L'intero studio può essere suddiviso nei quattro passi riportati in figura 2.1:



Figura 2.1 – Flow chart riassuntiva dello studio.

- Inizialmente è necessario eseguire una prequalifica del materiale indagandone, mediante prove di laboratorio, le caratteristiche tipologiche, fisiche e chimiche.
- In secondo luogo viene considerata la possibilità di sostituire il compattatore impulsivo Proctor con la Pressa Giratoria. Tale metodologia attualmente è utilizzata solo per costipare provini di conglomerato bituminoso, è necessario quindi valutarne l' idoneità nel campo della compattazione dei terreni e trovare una correlazione tra le due modalità di prova.
- Successivamente il parallelo tra le due metodologie di compattazione continua con l' inserimento di una nuova variabile: il tenore di legante. Realizzando provini con umidità crescente rispetto a quella vergine e differenti percentuali di calce, si cerca di valutare per ognuna di esse l' umidità migliore a cui effettuare la compattazione in cantiere con i rulli.
- Si arriva infine alla progettazione della miscela terra – acqua – calce attraverso la comparazione delle caratteristiche meccaniche ottenute sottoponendo a prove di portanza CBR e prove di resistenza a compressione i provini compattati secondo le due diverse metodologie.

Nei seguenti capitoli verranno affrontate le ultime due fasi della sperimentazione, ovvero quella riguardante l'analisi del terreno trattato e quella che affronta la progettazione definitiva della miscela terra – acqua – calce.

La percentuale di calce e la quantità d' acqua con cui effettuare l'impasto in una stabilizzazione a calce vengono determinate sperimentalmente in laboratorio sulla base di prove meccaniche, CBR e resistenza a compressione, e di prove di costipamento. I risultati di tali prove condotte su miscele sperimentali confezionate con diverse percentuali di calce e diversi tenori di umidità, permettono di determinare la miscela ottimale terra – acqua – calce. Per scegliere in maniera ottimale il tipo di legante e la sua qualità è importante conoscere il terreno da trattare nel modo più approfondito possibile. In quest'ottica si pone lo studio di prequalifica del terreno che, con una serie di test orientativi, è in grado di fornire informazioni sul tipo di materiale, sulle sue caratteristiche fisiche e chimiche. Anche il legante utilizzato deve essere conforme a certi requisiti, in particolare chimici, in quanto la buona riuscita del trattamento si basa su reazioni chimiche in grado di diminuire la sensibilità del terreno ai fattori ambientali e di aumentarne la resistenza meccanica.

Nel presente capitolo verrà fornita una descrizione dei test di prequalifica adottati e ne verrà brevemente descritta la procedura di prova.

## ***2.2. PROVE DI PREQUALIFICA SUL TERRENO*** <sup>[2]</sup>

### ***2.2.1. Classificazione dei terreni***

#### ***2.2.1.1. Analisi granulometrica per setacciatura***

L'analisi granulometrica per setacciatura è la prova più conosciuta per la classificazione dei terreni e si esegue quando il diametro delle particelle costituenti è minore di 0.063 mm (in quanto ai fini della tipologia di intervento da effettuare non è importante distinguere i componenti in campo limo-argilloso).



Le norme di riferimento nella pre-qualifica sono:

- UNI EN 13242: 2008
- UNI EN 13285: 2004
- UNI ES ISO 14688-1: 2003

mentre la norma che la disciplina è la UNI EN 933-1 del 1999 (versione aggiornata del bollettino CNR 23/71). Per ottenere una miscela più facilmente lavorabile è preferibile utilizzare materiale con una percentuale superiore al 30–35% passante al crivello UNI 5 mm, mentre è opportuno segnalare una presenza di passante al 50 mm inferiore al 95% in quanto la presenza di questi elementi litoidi di grandi dimensioni può creare difficoltà di omogeneizzazione della miscela. Per prima cosa il materiale da sottoporre ad analisi deve essere opportunamente campionato e ridotto, seguendo le procedure della norma UNI EN 932-1: 1998. Solitamente per la riduzione si utilizza un riduttore a scomparti, il materiale viene versato nella tramoggia ed opportunamente frantumato. Successivamente si effettua un'ulteriore riduzione del campione, con il metodo del frazionamento con sessola o più comunemente mediante quartatura (UNI EN 932-2: 2000).

A seconda del diametro massimo delle particelle da esaminare, si utilizzano le seguenti quantità di campione:

Tabella 2.1 – Analisi granulometrica.

<b><u>Diametro massimo delle particelle</u></b> (mm)	<b><u>Peso minimo del campione</u></b> (kg)
63	40
32	10
16	2,6
8	0,6
≤4	0,2

La prova consiste nel dividere, per mezzo di una serie di stacci, un campione di materiale in numerose classi granulometriche di dimensioni decrescenti. Le dimensioni delle maglie e il numero di stacci sono scelti in base alla natura del campione ed alla precisione richiesta. Solitamente la setacciatura a secco viene preceduta dal lavaggio del materiale; nel caso in cui il lavaggio possa alterare le proprietà fisiche di un aggregato

leggero, deve essere utilizzata la setacciatura per via secca (che rappresenta un metodo alternativo per gli aggregati esenti da particelle agglomerate). La porzione di prova viene messa in un recipiente e si aggiunge acqua fino a coprirlo; l'immersione per 24 h facilita lo scioglimento dei grumi. La porzione di prova viene poi agitata vigorosamente e versata sopra due stacci inumiditi: il primo serve da protezione e ha maglie di 1 o 2 mm, il secondo ha maglie di 0,063 mm. Si prosegue con il lavaggio finché le acque, passanti attraverso il secondo staccio, non risultano limpide. Il campione umido viene messo in forno ad una temperatura di 110° C per 24 h, in tal modo viene eliminata tutta l'acqua presente nel terreno. Successivamente il campione secco viene pesato e la massa registrata come  $M_1$ . La setacciatura viene eseguita tramite una pila di stacci con aperture decrescenti. Secondo la norma ASTM la serie completa è caratterizzata da 13 stacci con aperture che vanno da un massimo di 75 mm fino a 0.075 mm; secondo la norma UNI EN 933-1: 1999 invece, le serie possono essere di due tipologie diverse:

Tabella 2.2 – Serie di setacci normate dalla UNI EN 933-1: 1999.

<b>Serie 1</b> (Diametro stacci in mm)	<b>Serie 2</b> (Diametro stacci in mm)
63	63
45	
	40
31,5	31,5
22,4	
	20
16	16
	14
	12,5
11,2	
	10
8	8
	6,3
5,6	
4	4
2	2
1	1
0,5	0,5
0,25	0,25
0,125	0,125
0,063	0,063

Le maglie degli stacci sono costituite da fili di acciaio più o meno fittamente incrociati, in modo da realizzare aperture quadrate di determinate dimensioni. Il materiale secco viene versato nella colonna degli stacci sovrapposti, ed opportunamente agitato. La pila degli stacci può essere agitata manualmente o per mezzo di un agitatore meccanico come in figura:



Figura 2.2 – Stacci nell'agitatore meccanico.

Dopo aver preso nota dei pesi di ciascuna frazione di terreno trattenuta al corrispondente staccio si hanno tutte le informazioni per procedere all'elaborazione dell'analisi granulometria per vagliatura.

SERIE DI BASE + SERIE 2	ITALFER ballast			
	DSTACCI (mm)	Trattenuto	Prog. Tratt.	%
63		0,0	0,00	100,00
40		0,0	0,00	100,00
31,5		0,0	0,00	100,00
20		0,0	0,00	100,00
16		0,0	0,00	100,00
14		0,0	0,00	100,00
12,5		0,0	0,00	100,00
10		0,0	0,00	100,00
8		0,0	0,00	100,00
6,3		0,0	0,00	100,00
4		0,0	0,00	100,00
2		0,0	0,00	100,00
1		0,0	0,00	100,00
0,5		0,0	0,00	100,00
0,25		0,0	0,00	100,00
0,125		0,0	0,00	100,00
0,063		0,0	0,00	100,00
PASSANTE (gr)		0,0	0,00	100,00
PRELIEVO (gr) UMIDO				
PRELIEVO (gr) SECCO	1			

Figura 2.3 – Scheda compilativa su foglio Excel per l'analisi granulometrica.

La massa del trattenuto su ciascuno staccio viene espressa come percentuale della massa essiccata d'origine  $M_1$ , la percentuale di particelle fini ( $f$ ) che passano attraverso lo staccio di 0,063 mm viene calcolata secondo la seguente espressione:

$$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \times 100$$

dove:

- $M_1$  è la massa essiccata della porzione di prova (kg);
- $M_2$  è la massa essiccata del trattenuto al setaccio di 0,063 mm (kg);
- $P$  è la massa del passante che rimane nel recipiente di fondo (kg).

Le informazioni ottenute vengono presentate sotto forma di curve in un piano avente sull'asse delle ascisse (in scala logaritmica) i diametri delle particelle ed in ordinata la percentuale di passante.

I diagrammi generalmente adottati prevedono la percentuale di materiale passante ad un determinato diametro, crescente dal basso verso l'alto e i diametri decrescenti da sinistra verso destra.

La normativa ASTM suddivide le particelle caratterizzanti il terreno in determinate classi a secondo 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 secondo delle percentuali delle classi granulometriche che lo compongono (figura 2.4):

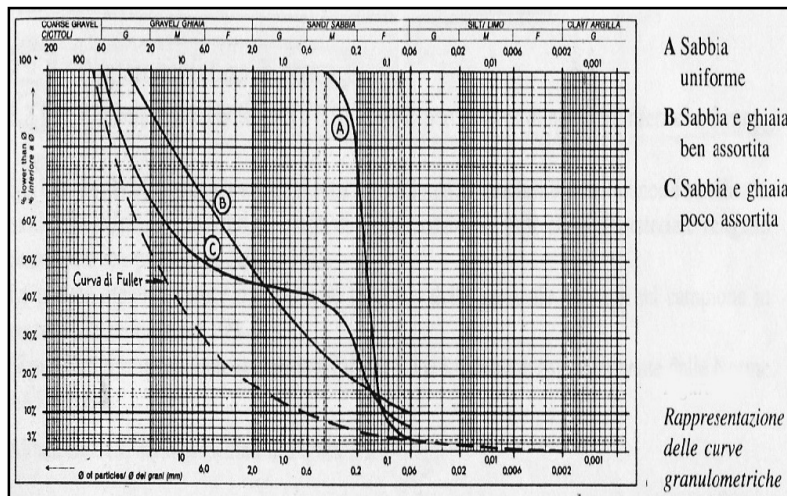





Figura 2.4 – Rappresentazione delle curve granulometriche.

La classe granulometrica con percentuale maggiore da il nome al terreno seguita dalle successive classi con l’aggiunta del suffisso “con” se  $> 25\%$ , “-oso” tra  $15\%$  e  $25\%$ , “debolmente -oso” tra  $5\%$  e  $15\%$ , nessuna dizione  $< 5\%$ .

Tabella 2.3 – Analisi granulometrica per setacciatura.

<u>Prova</u>	<b>ANALISI GRANULOMETRICA PER SETACCIATURA</b>																																					
<u>Norma descrittiva</u>	<b>UNI EN 933-1:1999</b> CNR 23/71 ASTM D 422-63																																					
<u>Norme di riferimento nella pre-qualifica</u>	<i>UNI 10006: 2002 (ritirata)</i> sostituita dalle: UNI EN 13242: 2008 UNI EN 13285: 2004 UNI ES ISO 14688-1: 2003																																					
<u>Obiettivo</u>	Determinazione della distribuzione granulometrica di un aggregato.																																					
<u>Apparecchiatura</u>	<table border="1"> <thead> <tr> <th style="background-color: yellow;"><u>PILA DEI SETACCI</u></th> <th style="background-color: yellow;"><u>D [mm]</u></th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td></td> <td><u>63</u></td> </tr> <tr><td></td> <td><u>40</u></td> </tr> <tr><td></td> <td><u>31,5</u></td> </tr> <tr><td></td> <td><u>20</u></td> </tr> <tr><td></td> <td><u>16</u></td> </tr> <tr><td></td> <td><u>14</u></td> </tr> <tr><td></td> <td><u>12,5</u></td> </tr> <tr><td></td> <td><u>10</u></td> </tr> <tr><td></td> <td><u>8</u></td> </tr> <tr><td></td> <td><u>6,3</u></td> </tr> <tr><td></td> <td><u>4</u></td> </tr> <tr><td></td> <td><u>2</u></td> </tr> <tr><td></td> <td><u>1</u></td> </tr> <tr><td></td> <td><u>0,5</u></td> </tr> <tr><td></td> <td><u>0,25</u></td> </tr> <tr><td></td> <td><u>0,125</u></td> </tr> <tr><td></td> <td><u>0,063</u></td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">(A)</p>	<u>PILA DEI SETACCI</u>	<u>D [mm]</u>		<u>63</u>		<u>40</u>		<u>31,5</u>		<u>20</u>		<u>16</u>		<u>14</u>		<u>12,5</u>		<u>10</u>		<u>8</u>		<u>6,3</u>		<u>4</u>		<u>2</u>		<u>1</u>		<u>0,5</u>		<u>0,25</u>		<u>0,125</u>		<u>0,063</u>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stacci di prova, con diametri specificati nella serie 2 UNI EN 933-2 (A).</li> <li>• Recipienti e coperchi adatti agli stacci.</li> <li>• Stufa ventilata, regolata da termostato in grado di mantenere una temperatura di <math>(110 \pm 5)^\circ\text{C}</math>, o qualsiasi altra apparecchiatura adeguata ad essiccare gli aggregati purché non provochi variazioni nella granulometria.</li> <li>• Apparecchiatura per il lavaggio.</li> <li>• Bilance o bascule, con accuratezza pari a <math>\pm 0,1\%</math> della massa del campione di prova.</li> <li>• Recipienti, spazzole.</li> <li>• Stacciatrice meccanica.</li> </ul>
<u>PILA DEI SETACCI</u>	<u>D [mm]</u>																																					
	<u>63</u>																																					
	<u>40</u>																																					
	<u>31,5</u>																																					
	<u>20</u>																																					
	<u>16</u>																																					
	<u>14</u>																																					
	<u>12,5</u>																																					
	<u>10</u>																																					
	<u>8</u>																																					
	<u>6,3</u>																																					
	<u>4</u>																																					
	<u>2</u>																																					
	<u>1</u>																																					
	<u>0,5</u>																																					
	<u>0,25</u>																																					
	<u>0,125</u>																																					
	<u>0,063</u>																																					
<u>Procedimento</u>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Campionare la porzione di prova in funzione della granulometria massima prevista (<math>M_1</math>).</li> <li>• Mettere a bagno il campione per almeno 24 h.</li> <li>• Lavare al setaccio da 0,063 mm proteggendolo con uno avente maglia da 2 mm ed avendo cura di non</li> </ul>																																					

	<p>disperdere materiale dai lati</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Asciugare il campione in forno a <math>(110 \pm 5)^\circ\text{C}</math> per 24 h.</li> <li>• Setacciare con stacciatrice meccanica per almeno 5 minuti.</li> <li>• Scuotere manualmente ogni setaccio finché non si ha più apprezzabile passaggio di materiale e pesare il trattenuto ad ognuno di essi.</li> </ul>
<p><b><u>Elaborazione dati</u></b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Calcolare la massa del trattenuto su ciascuno staccio, espressa come percentuale della massa essiccata d'origine <math>M_1</math>.</li> <li>• Calcolare la percentuale cumulativa rispetto alla massa essiccata d'origine del passante attraverso ogni staccio, fino a quello da 0,063 mm escluso.</li> <li>• Calcolare la percentuale delle particelle fini (f) che passano attraverso lo staccio di 0,063 mm con l'equazione:             <math display="block">f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \cdot 100</math> <p>dove:</p> <p><math>M_1</math> = massa essiccata della porzione di prova [kg];</p> <p><math>M_2</math> = massa essiccata del trattenuto sullo staccio da 0,063 mm [kg];</p> <p>P = massa del passante che rimane nel recipiente di fondo [kg].</p> </li> <li>• Costruire la curva granulometrica in un piano avente sull'asse delle ascisse i diametri dei setacci [mm] in scala logaritmica ed in ordinate la percentuale di passante [%].</li> </ul>

2.2.1.2. Limiti di consistenza di Atterberg

Dopo aver eseguito l'analisi granulometrica è importante determinare, al fine di una corretta caratterizzazione tipologica del materiale, i limiti di consistenza di Atterberg. Come anticipato nel primo capitolo per uno stesso materiale esistono diversi stati di comportamento e il passaggio dall'uno all'altro avviene in corrispondenza di un determinato valore del contenuto d'acqua. Si definiscono limiti di Atterberg i contenuti d'acqua che rappresentano i passaggi critici di comportamento del terreno:

- limite liquido:  $W_L$ ;
- limite plastico:  $W_p$ ;
- limite di ritiro:  $W_s$ ,

Il limite liquido si determina a mezzo dell'apparecchio di Casagrande ed è il contenuto d'acqua per il quale il solco tracciato con apposita spatola sulla terra posta in un cucchiaio si richiude dopo 25 cadute.

Nella norma UNI-CNR 10014:1963 (recentemente sostituita dalla 17892-12), esiste una procedura standardizzata per la determinazione del limite di liquidità  $W_L$ : un campione di terreno viene rimaneggiato con l'aggiunta di acqua distillata e successivamente mescolato, tale miscela viene poi disposta sul cucchiaio di Casagrande all'interno del quale viene praticato un solco.



Figura 2.5 – Campioni posto sul cucchiaio di Casagrande.



Il cucchiaio di Casagrande viene montato sull'apparecchio di prova (figura 2.6) costituito da una base in ebanite e da una manovella; ruotando quest'ultima il cucchiaio viene sollevato e lasciato poi cadere da un'altezza costante; si contano i colpi necessari a far richiudere il solco per 13 mm di lunghezza.



Figura 2.6– Cucchiaio di Casagrande.

La prova viene ripetuta più volte con la stessa miscela in modo tale da ottenere dei risultati poco variabili.

Successivamente viene ripetuto il tutto aggiungendo acqua all'impasto e si determina in questo modo un nuovo valore dei colpi necessari.

A tal proposito vi sono due scuole di pensiero differenti, in merito alle modalità di lavorazione dell'aggregato:

- le norme UNI prescrivono un procedimento standard nel quale il campione viene umidificato a poco a poco con l'aggiunta di gocce d'acqua distillata;
- in alcune norme francesi il procedimento è contrario: il campione viene portato ad un grado di umidità che si ritiene massimo, e successivamente, per passaggi, si aggiunge una percentuale di campione secco in modo da diminuire progressivamente l'umidità.

Da esperienze pratiche di laboratorio si ritiene comunque che il procedimento migliore sia il primo. Quando la prova è stata ripetuta più volte (generalmente 3 o 4) possono essere riportati in un diagramma i valori del contenuto d'acqua  $w$  in funzione dei colpi necessari. Il limite di liquidità convenzionalmente viene assunto pari a quello per il quale sono necessari 25 colpi.

Per determinare il *limite plastico*  $W_p$  vengono realizzati manualmente dei bastoncini dello spessore di 3,2 mm sfruttando una lastra di vetro (o ceramica) come appoggio; il limite di plasticità è il contenuto d'acqua corrispondente al formarsi delle prime fessurazioni nei bastoncini. Generalmente la definizione del  $W_p$  viene fatta assumendo la media di 3 misurazioni.



Figura 2.7– Lavorazione del provino per il limite di plasticità.

Al di sotto del limite di plasticità il materiale non risulta più lavorabile e si entra nella zona in cui le caratteristiche sono di tipo semi solido. Il *limite di ritiro* viene determinato per progressivo essiccamento di un provino, misurando via via il volume e l'umidità, ed il contenuto d'acqua per cui non si ha ulteriore riduzione di volume.

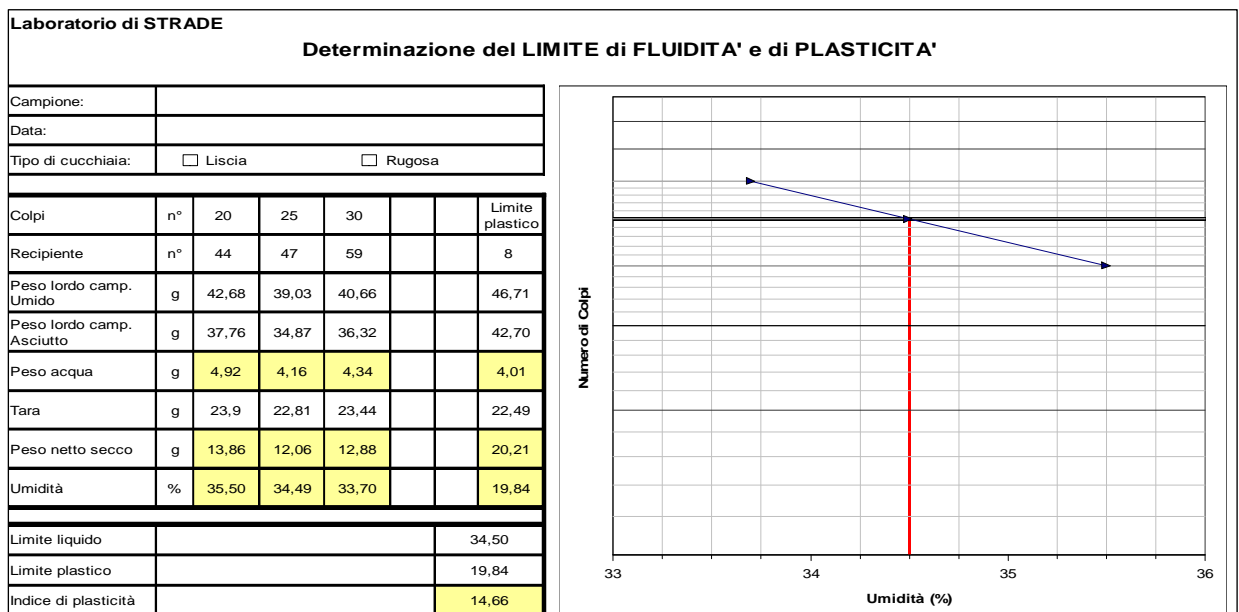


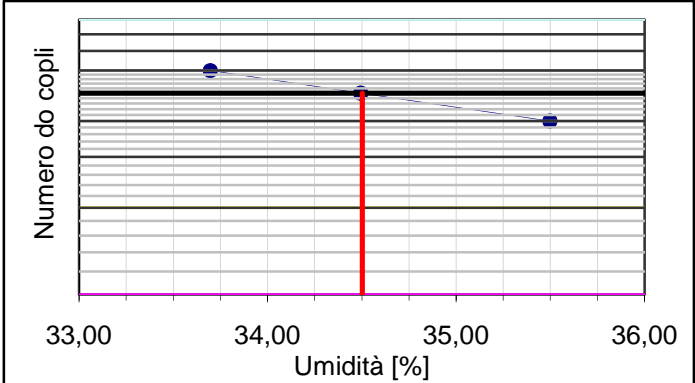


Figura 2.8 – Foglio di lavoro Excel relativo ai limiti, con grafico annesso.

Tabella 2.4 – Determinazione dei limiti di Atterberg e calcolo dell'indice di plasticità.

<u>Prova</u>	<b>DETERMINAZIONE LIMITI DI ATTERBERG E CALCOLO DELL'INDICE DI PLASTICITA'</b>
<u>Norma descrittiva</u>	<p><i>UNI 10014: 1963 (ritirata)</i>                      Sostituita dalla:                      UNI 17892-12:2005                      ASTM D 4318-05</p>
<u>Norme di riferimento nella pre-qualifica</u>	<p><i>UNI 10006: 2002 (ritirata)</i>                      sostituita dalle:                      UNI EN 13242: 2008                      UNI EN 13285: 2004                      UNI ES ISO 14688-1: 2003</p>
<u>Obiettivo</u>	<p>Determinazione della distribuzione granulometrica di un aggregato.</p>
<p><u>Apparecchiatura</u></p>  <p>(A)</p>  <p>(B)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recipienti per i campioni.</li> <li>• Capsule per la determinazione dell'umidità.</li> <li>• Forno.</li> <li>• Bilancia graduata.</li> <li>• Acqua distillata.</li> <li>• Spatole per mescolare, spalmare e prelevare il materiale testato.</li> <li>• Lastra di ceramica.</li> <li>• Attrezzo normalizzato per eseguire l'incisione (A).</li> <li>• Carte per asciugatura campione.</li> <li>• Cucchiaino di Casagrande (B): lo strumento ha una base in ebanite ed una 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, dotato di un motoriduttore che imprime alla coppella 120 battute al minuto. Un trimmer consente l'accurata regolazione di tale frequenza. Alimentazione: 220-240 V, 50 Hz.</li> </ul>

<p><b><u>Procedimento per la determinazione del limite di liquidità</u></b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vagliare al setaccio 0,075 mm di 300 g circa di materiale.</li> <li>• Umidificare il campione con l'aggiunta di acqua e lasciare riposare per un notte.</li> <li>• Umidificare fino ad un valore di umidità sicuramente superiore al limite liquido e mescolare con una spatola.</li> <li>• Posare uno strato liscio all'interno del cucchiaio di Casagrande.</li> <li>• Tracciare il solco con l'opportuno strumento.</li> <li>• Sollecitare con dei colpi attraverso il macchinario descritto.</li> <li>• Contare i colpi necessari per la chiusura del solco di circa 1,3 cm.</li> <li>• Prelevare il materiale dal cucchiaio e porlo in una capsula per determinarne l'umidità.</li> <li>• Ripetere il procedimento almeno altre 3 volte, con differenti gradi di umidità.</li> </ul>								
<p><b><u>Elaborazione dati</u></b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Il limite di liquidità (<math>w_L</math>) convenzionalmente viene assunto pari al valore dell'umidità per il quale il solco nel terreno si richiude di 1,3 cm con 25 colpi, ottenuto con procedimento grafico come mostrato nella figura seguente.</li> </ul>  <table border="1"> <caption>Dati estratti dal grafico</caption> <thead> <tr> <th>Umidità [%]</th> <th>Numero do colpi</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>33,5</td> <td>28</td> </tr> <tr> <td>34,5</td> <td>25</td> </tr> <tr> <td>35,5</td> <td>22</td> </tr> </tbody> </table>	Umidità [%]	Numero do colpi	33,5	28	34,5	25	35,5	22
Umidità [%]	Numero do colpi								
33,5	28								
34,5	25								
35,5	22								

<p><b><u>Procedimento per la determinazione del limite di plasticità</u></b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Realizzare manualmente dei bastoncini del diametro di 3,2 mm sfruttando una lastra di vetro (o ceramica) come appoggio.</li> <li>• Quando essi presentano per tale dimensione delle fessure sulla loro superficie si è raggiunto il limite di plasticità.</li> <li>• Calcolare dell'umidità dei bastoncini.</li> </ul>
<p><b><u>Elaborazione dati</u></b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Il limite di plasticità (<math>w_p</math>) convenzionalmente viene assunto pari al valore dell'umidità per il quale bastoncini di 32 mm di diametro si fessurano.</li> </ul>
<p><b><u>Procedimento per il calcolo dell'indice plastico</u></b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• L'indice di plasticità IP si valuta come:  <math display="block">IP = w_L - w_p</math> </li> </ul>

**2.2.2. Valutazione delle caratteristiche fisiche dei terreni**

**2.2.2.1. Prova dell'equivalente in sabbia**

La valutazione delle caratteristiche fisiche è necessaria per avere un'indicazione del tenore di frazione finissima presente nel terreno e delle sue caratteristiche microscopiche, parametri che influenzano enormemente il comportamento del materiale. La prima delle due prove utilizzate per la caratterizzazione fisica dei terreni è quella dell'equivalente in sabbia. La norma di riferimento relativa a tale prova è la UNI EN 933-8: 2000 che differisce dalla norma CNR esclusivamente per le dimensioni del setaccio. Nella UNI il setaccio è da 2 mm, nella CNR era il 4,75 mm, corrispondente al 4 della serie ASTM.

La prova si esegue sempre in doppio e si propone di valutare l'equivalenza in sabbia della classe granulometrica 0/2 mm degli aggregati fini e degli aggregati 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 effettuano due letture:

- $h_1$ : livello superiore del flocculato in relazione alla base del cilindro;
- $h_2$ : distanza tra la faccia inferiore delle testa dello stantuffo e la faccia superiore del collare una volta abbassato lo stantuffo.

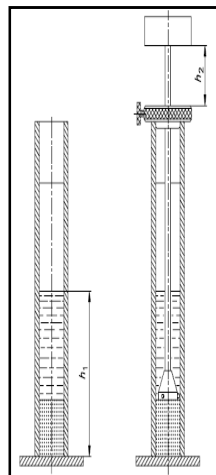


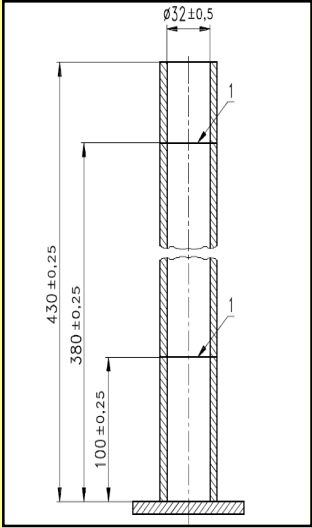
Figura 2.9 – Apparecchiatura di prova per l'equivalente in sabbia.

Il valore dell'equivalente in sabbia (SE) è dato dalla seguente espressione:

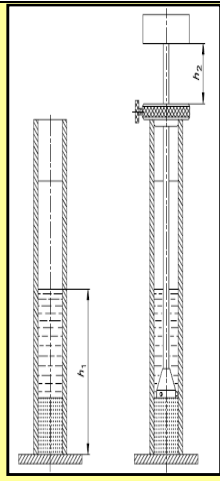
$$\frac{h_1}{h_2} \cdot 100$$

Se tale valore tende all'unità allora è prevalente la frazione sabbiosa; se tende al valore nullo prevale il materiale di natura argillosa.

Tabella 2.5 – Prova dell'equivalente in sabbia.

<u>Prova</u>	<b>PROVA DELL'EQUIVALENTE IN SABBIA</b>
<u>Norma di riferimento</u>	<b>UNI EN 933-8: 2000</b> CNR BU 27/72 ASTM D 2419-02
<u>Norme di riferimento nella pre-qualifica</u>	<i>UNI 10006: 2002 (ritirata)</i> sostituita dalle: <b>UNI EN 13242: 2008</b> UNI EN 13285: 2004 UNI ES ISO 14688-1: 2003
<u>Obiettivo</u>	Valutazione dei fini.
<u>Apparecchiatura</u>   <p style="text-align: center;">(A)</p>	<u>Reagenti:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Soluzione concentrata di acqua distillata, cloruro di calcio cristallino o di calcio anidrido, glicerina e soluzione di formaldeide.</li> <li>• Soluzione di lavaggio ottenuta dalla soluzione concentrata.</li> </ul> <u>Apparecchiatura</u> (conforme a EN 932-5): <ul style="list-style-type: none"> <li>• 2 cilindri graduati, spessore parete 3 mm, diametro 32 mm, altezza 430 mm (A).</li> <li>• Stantuffo di prova.</li> <li>• Cronometro.</li> <li>• Staccio.</li> <li>• Spazzola per staccio.</li> <li>• Tubo di lavaggio.</li> <li>• Sifone.</li> <li>• Imbuto.</li> <li>• Macchina agitatrice.</li> <li>• Cilindro per il campionamento.</li> </ul>
<u>Procedimento</u>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Essiccare il terreno in forno a <math>(110 \pm 5)^\circ\text{C}</math>.</li> <li>• Vagliatura al setaccio da 2 mm.</li> </ul>





(B)

- Mescolare il passante e prelevare il campione di prova tramite l'apposito cilindro.
- Riempire i cilindri con 10 cm di soluzione.
- Inserire il materiale nei cilindri e lasciare riposare per 10 minuti.
- Agitare i cilindri graduati chiusi con un tappo di gomma mediante agitatore per 90 cicli in 30 secondi.
- Procedere ad un lavaggio dal fondo, lasciando che la soluzione di lavaggio agiti il contenuto ed induca i componenti fini a salire in alto, fino a 38 cm.
- Lasciar riposare la porzione di prova per 20 minuti ed effettuare le misurazioni di h<sub>1</sub>, livello superiore del flocculato in relazione alla base del cilindro e, dopo aver abbassato lo stantuffo, di h<sub>2</sub>, distanza tra la faccia inferiore delle testa dello stantuffo e la faccia superiore del collare (B).

**Elaborazione dati**

- Calcolare il rapporto:

$$\frac{h_1}{h_2} \cdot 100$$

per ciascun cilindro fino ad un decimale.

- Calcolare il valore dell'equivalente in sabbia (SE) come media dei rapporti ottenuti su ciascun cilindro e registrarla arrotondando al numero intero più vicino.
- Se i due valori differiscono di oltre 4 unità, il procedimento di prova deve essere ripetuto).

### 2.2.2.2. Prova al blu di metilene

La prova al blu di metilene consiste nel quantificare 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” ricavato riflette la quantità e la tipologia dei minerali argillosi presenti e risulta essere 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).

Il procedimento di prova è il seguente.

La porzione di prova viene essiccata in forno a 110°C fino a massa costante, lasciata raffreddare, e passata su un setaccio da 2 mm, utilizzando una spazzola per garantire l'effettiva separazione della frazione interessata, in modo da ottenere almeno 200 g di campione.

Nel caso di sabbie si richiama l'appendice A della norma UNI, che prevede l'utilizzo di 30 g di campione della frazione 0/0,125 mm.

Si versano 500 ml di acqua distillata nel bicchiere e si aggiunge il campione essiccato che era stato opportunamente pesato; il tutto viene mescolato con una spatola.

Il recipiente contenente il miscuglio acqua – terreno viene posto a contatto con l'agitatore (la base del primo deve trovarsi a circa 10 mm dalla spatola ruotante) e si imposta quest'ultimo per 5 minuti ad una velocità di 600 giri al minuto, quindi per il resto della prova si continua con una velocità di 400 giri al minuto.



Figura 2.10 – Apparecchiatura di prova per il blu di metilene.

Eventualmente, se si nota che non vi è parte fine sufficiente per ottenere un alone, si aggiunge caolinite al miscuglio.

Si inietta poi una dose di 5 ml di soluzione colorante, si agita per almeno un minuto e si esegue la prova alla macchia.

La prova alla macchia consiste nel prendere con la bacchetta una goccia di sospensione e depositarla sulla carta da filtro per vedere se ci sono aloni.



Figura 2.11 – Prova alla macchia.

Si procede in modo continuo aggiungendo 5 ml di blu e lasciando agitare per un minuto, finché sulla carta da filtro non si formi un alone (l'alone deve persistere per almeno 5 min altrimenti si continua).

La prova al blu di metilene consente di caratterizzare in modo speditivo i terreni sulla base di un valore indice (“valore al blu” MB) che dà indicazioni semi-qualitative sulla quantità (cresce all’aumentare della percentuale di frazione argillosa) e sulla tipologia dei minerali argillosi presenti .

$$MB = (V_1/M_1)*10$$

dove:

- $V_1$  è il volume totale della soluzione iniettata (mm);
- $M_1$  è la massa del campione in (g).

Dalla prova si può inoltre ricavare la superficie specifica totale  $S_a$  ( $m^2/g$ ), ovvero la superficie interna ed esterna accessibile all’acqua (una superficie molto elevata indica sempre la presenza di materiali argillosi attivi,  $S_a = 800 m^2/g$  per la montmorillonite) e l’indice di attività della frazione argillosa del terreno (ACB), che corrisponde alla quantità di blu di metilene fissata da 100 g di frazione inferiore a  $2 \mu m$  (CF) (ACB può assumere valori che variano da 1 a 18 grammi su 100 grammi, ed aumenta con il tenore di montmorillonite).

$$S_a = 20.93 * V_1 / M_1$$

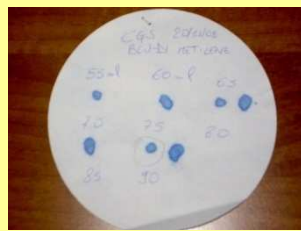
dove:

- 20.93 rappresenta la superficie corrispondente a  $1 cm^3$  di blu di metilene;
- $V_1$  è il volume totale della soluzione iniettata (mm);
- $M_1$  è la massa del campione (g);
- $ACB = 100 * MB / CF$ .

A differenza delle prove di classificazioni tradizionali (limiti di Atterberg) che riproducono il comportamento del terreno al contatto con l’acqua, determinato indistintamente dal contenuto argilloso, dalla natura mineralogica e dal pH, il valore al blu di metilene indica direttamente la capacità di adsorbimento.

Tabella 2.6 – Prova al blu di metilene.

<b><u>Prova</u></b>	<b>PROVA AL BLU DI METILENE</b>
<b><u>Norma descrittiva</u></b>	<b>UNI EN 933-9: 2000</b> ASTM D 2166-06
<b><u>Norme di riferimento nella pre-qualifica</u></b>	<i>UNI 10006: 2002 (ritirata)</i> sostituita dalle: <b>UNI EN 13242: 2008</b> UNI EN 13285: 2004 UNI ES ISO 14688-1: 2003
<b><u>Obiettivo</u></b>	Valutare la capacità di adsorbimento dei terreni.
<b><u>Apparecchiatura</u></b>	<p><b><u>Reagenti:</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Acqua demineralizzata.</li> <li>• Soluzione colorante al blu di metilene.</li> </ul> <p><b><u>Apparecchiatura:</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Buretta da 50 ml graduata.</li> <li>• Carta da filtro (A).</li> <li>• Bacchetta in vetro.</li> <li>• Agitatore rotante in grado di variare la sua velocità fino a <math>(600 \pm 60)</math> giri/min.</li> <li>• Bilancia, con precisione allo 0,1% della massa da pesare.</li> <li>• Cronometro.</li> <li>• Staccio di prova da 2 mm.</li> <li>• Bicchiere della capacità di 1 l.</li> </ul>
<b><u>Procedimento</u></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Essiccare la porzione di prova a 110°C fino a massa costante e lasciare raffreddare.</li> <li>• Stacciare la porzione di prova su uno staccio da 2 mm, utilizzando una spazzola per garantire l'effettiva separazione della frazione interessata.</li> <li>• Versare 500 ml di acqua distillata nel bicchiere ed aggiungere il campione essiccato che era stato</li> </ul>



(A)

	<p>opportunamente pesato.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mescolare il tutto con la spatola e porre il recipiente a contatto con l'agitatore (la base del primo deve trovarsi a circa 10 mm dalla spatola ruotante).</li> <li>• Impostare l'agitatore per 5 minuti ad una velocità di 600 giri/min.</li> <li>• Impostare l'agitatore ad una velocità di 400 giri/min per il resto della prova.</li> <li>• Iniettare una dose di 5 ml di soluzione colorante, agitare per almeno un minuto.</li> <li>• Eseguire la prova alla macchia: prendere con la bacchetta una goccia di sospensione e depositarla sulla carta da filtro per vedere se ci sono aloni.</li> <li>• Procedere aggiungendo 5 ml di blu e lasciando agitare per un minuto, finchè sulla carta da filtro si forma un alone che persista per almeno 5 min.</li> </ul>
<p><b><u>Elaborazione dati</u></b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Il valore del blu di metilene MB espresso in grammi di colorante per kg di materiale è dato da: <math display="block">MB = \frac{V_1}{M_1} \cdot 10</math> <p>dove:</p> <p><math>V_1</math> = volume totale della soluzione iniettata [mm]  <math>M_1</math> = massa del campione [g]</p> </li> <li>• La superficie specifica totale è data da: <math display="block">S_a = 20,93 \cdot \frac{V_1}{M_1}</math> <p>dove:</p> <p>20,93 = superficie di 1 cm<sup>3</sup> di blu di metilene;  <math>V_1</math> = volume totale della soluzione iniettata [mm]  <math>M_1</math> = massa del campione [g]</p> </li> </ul>

### **2.2.3. Valutazione delle caratteristiche chimiche dei terreni**

#### **2.2.3.1. Determinazione del contenuto di sostanze organiche**

Lo scopo di questa prova è quello di escludere la presenza nel terreno di sostanze capaci di impedire o rendere inefficaci le reazioni chimiche tra la calce e i materiali argillosi.

E' importante eseguire sia una prova del pH per identificare la presenza di materiale organico potenzialmente dannoso, sia stimarne la presenza percentuale, che deve essere inferiore al 3% per non interferire con l'intervento di stabilizzazione.

Le impurità possono consistere nella presenza di polvere o sostanze limo–argillose (colloidi), di sostanze organiche, o di particolari sali minerali.

A seconda dell'impiego cui sono destinati gli aggregati, avrà minore o maggiore importanza la presenza dell'una o dell'altra impurità. Ad esempio per i conglomerati bituminosi a caldo la presenza di una certa quantità di sostanze organiche può non essere dannosa quanto la presenza di impurità di tipo limo–argilloso aderente ai granuli dell'aggregato, poiché le prime vengono bruciate passando attraverso l'essiccatore a caldo, mentre le seconde possono impedire l'adesione della graniglia al bitume.

L'humus è una sostanza organica che si forma nel suolo dalla decomposizione di residui animali e vegetali.

Il contenuto di humus viene valutato dal colore che si osserva quando una porzione di prova viene agitata in una soluzione di idrossido di sodio.

Il metodo è basato sul fatto che l'humus sviluppa un colore scuro per reazione con NaOH. L'intensità del colore dipende dal contenuto di humus.

Se la soluzione è incolore o solo leggermente colorata, l'aggregato non contiene rilevanti quantità di humus.

Le norme di riferimento per la determinazione del contenuto di sostanze organiche nella pre-qualifica sono:

- UNI EN 13242: 2008
- UNI EN 13285: 2004
- UNI ES ISO 14688-1: 2003

la norma che la disciplina è stata la ASTM D 2974-87 fino al 1999, anno in cui è stata redatta la UNI EN 1744-1.

Si descrive ora il procedimento di prova utilizzato.

Il campione viene disteso su vassoi ed essiccato in forno a  $(55 \pm 5) ^\circ\text{C}$ , una volta secco viene passato sul setaccio da 4 mm e se ne conserva la porzione trattenuta. Quest'ultima viene frantumata fino a raggiungere una dimensione minore di 4 mm e poi riunita al materiale già passato a 4 mm.

Si versa una soluzione al 3% di NaOH nella bottiglia di vetro fino ad un'altezza di 80 mm e si aggiunge quindi la porzione di prova fino a che l'altezza di aggregato e soluzione raggiunge i 120 mm.

Si agita la bottiglia per consentire l'espulsione delle bolle d'aria e la si tappa.

Si agita nuovamente per 1 min e si lascia riposare. Dopo 24 h si confronta il colore della soluzione con il colore della soluzione normalizzata contenuta in una bottiglia simile.

Il risultato della prova deve attestare se il colore della soluzione è più chiaro o più scuro del colore normalizzato.



Figura 2.12 – Apparecchiatura di prova per la determinazione del contenuto di sostanze organiche.



Tabella 2.7 – Determinazione del contenuto di sostanze organiche.

<b><u>Prova</u></b>	<b>DETERMINAZIONE DEL CONTENUTO DI SOSTANZE ORGANICHE</b>
<b><u>Norma descrittiva</u></b>	<b>UNI EN 1744-1/15: 1999</b> ASTM D 2974-87 (ritirata nel 1999)
<b><u>Norme di riferimento nella pre-qualifica</u></b>	<i>UNI 10006: 2002 (ritirata)</i> sostituita dalle: <b>UNI EN 13242: 2008</b> UNI EN 13285: 2004 UNI ES ISO 14688-1: 2003
<b><u>Obiettivo</u></b>	Valutare la presenza di sostanze che possono influenzare negativamente la stabilizzazione.
<b><u>Apparecchiatura</u></b>	<u>Reagenti:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Soluzione al 3% di NaOH.</li> </ul> <u>Apparecchiatura:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Staccio da 4 mm.</li> <li>• Bottiglia di vetro con apposito tappo a vite.</li> </ul>
<b><u>Procedimento</u></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Essiccare il campione ridotto disteso sui vassoi in forno a <math>(110 \pm 5) ^\circ\text{C}</math>.</li> <li>• Stacciare il campione sullo staccio da 4 mm.</li> <li>• Essiccare il passante su vassoi in forno a <math>(55 \pm 5) ^\circ\text{C}</math>.</li> <li>• Versare una soluzione al 3% di NaOH nella bottiglia di vetro fino ad un'altezza di 80 mm (A).</li> <li>• Versare a porzione di prova finché l'altezza di aggregato e soluzione raggiunge i 120 mm.</li> <li>• Agitare la bottiglia per consentire l'espulsione delle bolle d'aria.</li> <li>• Tappare la bottiglia, agitare vigorosamente per 1 min e lasciare riposare per 24 h.</li> </ul>



(A)

<p><b><u>Elaborazione dati</u></b></p>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Confrontare il colore della soluzione con il colore della soluzione normalizzata:<ul style="list-style-type: none"><li>- se il colore della soluzione è più chiaro di quello della soluzione normalizzata, non sono presenti sostanze organiche;</li><li>- se il colore è più scuro, è possibile che siano presenti sostanze organiche ed è necessario procedere ad altri test.</li></ul></li></ul>
----------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

### 2.2.3.2. Determinazione del contenuto di solfati solubili in acido

La presenza di solfati nel terreno può dar luogo a reazione con la calce che generano rigonfiamenti localizzati del piano trattando, inficiandone la geometria e l'omogeneità delle caratteristiche meccaniche.

La percentuale ottimale di solfati deve essere inferiore a 0,3. Per percentuali superiori è invece necessario utilizzare qualche accorgimento. Con valori compresi tra 0,3 e 0,5, in alcune zone potrebbero verificarsi espansioni localizzate; è quindi importante eseguire una polverizzazione completa della terra e un'attenta miscelazione con calce. Per percentuali comprese tra 0,5 e 0,8, dovrà essere valutato anche il periodo di maturazione, e la calce dovrà essere aggiunta in due momenti successivi. La stabilizzazione con calce deve invece essere esclusa in caso di presenza di solfati superiore allo 0,8% .

Le norme di riferimento per la determinazione del contenuto di solfati solubili in acido nella pre-qualifica sono:

- UNI EN 13242: 2008
- UNI EN 13285: 2004
- UNI ES ISO 14688-1: 2003

mentre la norma che la disciplina è la UNI EN 1744-1 del 1999.

Il campione di laboratorio deve essere prelevato in conformità con i procedimenti specificati nella UNI EN 932-1: 1998 e deve essere rappresentativo del contenuto di umidità e della consistenza.

Il campione viene ridotto mediante i procedimenti specificati nel prEN 932-2, fino ad una quantità non minore della massa appropriata alle dimensioni nominali dell'aggregato. Si procede poi alla macinazione e all'ulteriore riduzione fino ad ottenere una massa di circa 20 g, passante dal vaglio di prova 0,125 mm; se ne prelevano 2 g da utilizzare come campione di prova.

Se durante il procedimento è necessario essiccare, la temperatura non deve essere maggiore di  $(110 \pm 5)$  °C, per evitare l'ossidazione dei solfuri.

Si determina la massa del campione arrotondandola al più prossimo 0,1 mg ( $m_6$ ); si pone il campione in un bicchiere da 250 ml e si aggiungono 90 ml di acqua fredda.

Mentre si mescola vigorosamente la miscela, si aggiungono 10 ml di acido cloridrico concentrato.

La soluzione viene delicatamente riscaldata e i grumi che si formano vengono spezzati con la parte appiattita di una bacchetta di vetro. Si lascia riposare la soluzione per 15 minuti ad una temperatura appena al di sotto del punto di ebollizione.

Aggregati contenenti significative quantità di carbonato produrranno schiuma all'aggiunta dell'acido.

In questi casi, l'acido deve essere aggiunto lentamente, continuando a mescolare.

Aggregati contenenti solfuro rilasceranno H<sub>2</sub>S all'acidificazione e ciò sarà rilevabile dall'odore. In questi casi vi è il pericolo che questo procedimento porti a sovrastimare il contenuto di solfato a causa dell'ossidazione del solfuro.

Trascorsi i 15 minuti si rimuove la soluzione dalla fonte di calore e, continuando a mescolare, si sparge la porzione di prova sulla soluzione acida. Il residuo viene poi filtrato attraverso un filtro di carta medio in un bicchiere da 400 ml. Si porta il volume a circa 250 ml; se necessario, si acidifica con acido cloridrico (1 + 11) fino ad ottenere una colorazione rossa dell'indicatore al rosso di metile. Si porta ad ebollizione e si lascia bollire per 5 min. Se la soluzione non risulta limpida bisogna ripetere la prova dall'inizio utilizzando un nuovo campione. Mentre si mescola vigorosamente la soluzione mantenuta in ebollizione, aggiungere goccia a goccia 10 ml della soluzione di cloruro di bario, riscaldata appena al di sotto del punto di ebollizione. Si lascia riposare, si filtra e si calcina il precipitato di solfato di bario. La massa del precipitato (m<sub>7</sub>) viene determinata arrotondandola al più prossimo 0,1 mg. Il contenuto di solfato solubile in acido nell'aggregato, espresso come SO<sub>3</sub>, viene calcolato per mezzo della seguente equazione:

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

dove:

- m<sub>7</sub> è la massa del precipitato (g);
- m<sub>6</sub> è la massa della porzione di prova (g).

Tabella 2.8 – Determinazione del contenuto di solfati solubili in acido.

<b><u>Prova</u></b>	<b>DETERMINAZIONE DEL CONTENUTO DI SOLFATI SOLUBILI IN ACIDO</b>
<b><u>Norma descrittiva</u></b>	<b>UNI EN 1744-1/12: 1999</b>
<b><u>Norme di riferimento nella pre-qualifica</u></b>	<p><i>UNI 10006: 2002 (ritirata)</i>                      sostituita dalle:                      UNI EN 13242: 2008  <b>UNI EN 13285: 2004</b>                      UNI ES ISO 14688-1: 2003</p>
<b><u>Obiettivo</u></b>	Valutare la presenza di sostanze che possono influenzare negativamente la stabilizzazione.
<b><u>Apparecchiatura</u></b>	<p><u>Reagenti:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Acido cloridrico concentrato.</li> <li>• Acqua demineralizzata fredda.</li> </ul> <p><u>Apparecchiatura:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Staccio da 0,125 mm.</li> <li>• Bicchiere di vetro.</li> <li>• Bacchetta di vetro.</li> <li>• Fornello.</li> <li>• Imbuto a collo lungo.</li> <li>• Crogiolo di ceramica con relativo tappo.</li> <li>• Pinze per crogiolo.</li> <li>• Essiccatore.</li> <li>• Bilancia con precisione di almeno 0,001 g.</li> <li>• Filtro realizzato con materiale organico.</li> <li>• Muffola o altro strumento in grado di raggiungere una temperatura di almeno 900°.</li> </ul>
<b><u>Procedimento</u></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ottenere un campione di circa 20 g passante dal setaccio da 0,125 mm.</li> <li>• Prelevare circa 2 g di questo materiale come campione di prova.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Determinare la massa del campione arrotondandola al più prossimo 0,1 mg (m6); porre il campione in un bicchiere da 250 ml e aggiungere 90 ml di acqua fredda.</li> <li>• Mentre si mescola vigorosamente la miscela, aggiungere 10 ml di acido cloridrico concentrato.</li> <li>• Riscaldare delicatamente la soluzione e spezzare con la parte appiattita di una bacchetta di vetro i grumi formati. Lasciare riposare la soluzione per 15 min ad una temperatura appena al di sotto del punto di ebollizione.</li> <li>• Rimuovere dalla fonte di calore e, continuando a mescolare, spargere la porzione di prova sulla soluzione acida.</li> <li>• Filtrare il residuo attraverso un filtro di carta medio in un bicchiere da 400 ml. Lavare accuratamente con acqua calda.</li> <li>• Portare ad ebollizione e lasciare bollire per 5 min. Controllare che la soluzione sia limpida; se non lo è, ripetere dall'inizio utilizzando un nuovo campione di prova.</li> <li>• Mentre si mescola vigorosamente la soluzione mantenuta in ebollizione, aggiungere goccia a goccia 10 ml della soluzione di cloruro di bario, riscaldata appena al di sotto del punto di ebollizione.</li> <li>• Lasciare riposare una notte.</li> <li>• Filtrare con estrema cura in un imbuto munito di carta da filtro a grana fine il precipitato di solfato di bario, lavando diverse volte con acqua calda.</li> <li>• Trasferire il filtro di carta e il precipitato in un crogiuolo precedentemente calcinato e tarato.</li> </ul>
--	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porre il crogiuolo in un forno a muffola o in un altro strumento in grado di riscaldare il crogiuolo fino a bruciare completamente il filtro.</li> <li>• Pesare il crogiuolo con il precipitato e determinare, per differenza, la massa (<math>m_7</math>) del precipitato.</li> </ul>
<p><b><u>Elaborazione dati</u></b></p>	<p>La percentuale di solfati contenuta nel terreno si calcola come:</p> $SO_3 = \frac{m_7}{m_6} \times 34,30$

### 2.2.3.3. Determinazione del contenuto iniziale di calce

Questa prova fornisce un'approssimazione del tenore di calce richiesto per garantire una reazione a lungo termine che massimizzi le probabilità di raggiungere le proprietà meccaniche e di durabilità cercate.

La prova viene effettuata utilizzando provini con diverse percentuali di calce, il minimo tenore identificato per la stabilizzazione del terreno è quello fornito dal provino che produce un pH di 12,4, anche se la normativa include qualche accorgimento qualora dalla prova si raggiungesse un pH pari a 12,3 o leggermente inferiore. E' importante conservare l'integrità dei provini di calce per produrre risultati affidabili.

La "National Lime Association" americana raccomanda l'utilizzo delle procedure indicate dalla normativa ASTM D 6276-99a: 2006, conosciuta anche come "*Eades & Grim pH test*", per la determinazione del minimo contenuto di calce richiesto per la stabilizzazione. Il procedimento di prova è il seguente.

Si prepara il campione in conformità con la prassi D 421-85: 2007 e si tara il pH-metro utilizzando una soluzione tampone a pH 12 a 25°C.

Si preparano cinque provini, ciascuno pari a 25,0 g di terreno essiccato in forno e se ne determina la massa:

$$M_a = 25 \times \left(1,0 + \frac{W}{100}\right)$$

dove:

- $M_a$  è la massa del campione;
- $W$  è il contenuto di acqua.

Ogni campione secco viene collocato in bottiglie di plastica che vengono poi chiuse mediante un cappuccio ermetico.

Si preparano sei campioni rappresentativi di calce (come da C 977-03): cinque campioni rappresentano il 2, 3, 4, 5 e il 6% della massa secca equivalente dei campioni di terreno, il sesto campione di 2,0 g di calce rappresenta una soluzione satura di calce.

Si aggiunge uno dei primi cinque provini di calce ad uno dei campioni di terreno in bottiglie di plastica, si chiude ermeticamente, si marca la percentuale sul flacone, e si mescola accuratamente agitando. La stessa procedura viene ripetuta per i restanti quattro campioni di calce e del suolo.



Ad ogni campione terra – calce e al flacone contenente 2,0 g di calce vengono aggiunti 100 ml di acqua. Una volta tappate le bottiglie si agita la miscela per un minimo di 30 secondi o fino a 1 minuto. Si continuano ad agitare i campioni per 30 secondi ogni 10 minuti per 1 ora.

Se necessario portare la temperatura del campione a 25°C.

Entro 15 minuti dalla fine del periodo d'agitazione (1 h), si determina il pH di ciascuna miscela suolo – acqua – calce e di quella calce-acqua. Al momento della determinazione del pH la temperatura deve essere mantenuta ad un valore di 25°C.

La percentuale più bassa di calce nel terreno che dà un pH di 12,4 è approssimativamente la percentuale di calce da utilizzare nella stabilizzazione. Ci possono essere alcuni terreni in cui il pH risulta superiore a 12,4. Se ciò si verifica, selezionare la percentuale più bassa di calce in cui il più alto valore del pH non dà luogo, per almeno due successivi test, a campioni con percentuali più alte di calce. Se il più alto pH misurato è inferiore o uguale a 12,3, prendere ulteriori campioni di prova utilizzando percentuali più elevate di calce.

Se il più alto pH misurato è 12,3 e almeno due successivi campioni di calce (all'aumentare delle percentuali di rendimento) danno valori di 12,3, allora la più bassa percentuale di calce per cui si ottiene un pH di 12,3 è approssimativamente la percentuale ottimale di calce per la stabilizzazione.

Se il più alto pH misurato è inferiore a 12,3 la prova è da considerarsi nulla, ciò può essere dovuto a difetti delle apparecchiature, ad errori materiali o ad una insufficiente percentuale di calce. Per prima cosa è necessario quindi controllare l'elettrodo del pHmetro con la soluzione tampone a pH 12 e ripetere la prova con percentuali più elevate di calce.

Tabella 2.9 – Determinazione del contenuto iniziale di calce (CIC).

<b><u>Prova</u></b>	<b>DETERMINAZIONE DEL CONTENUTO INIZIALE DI CALCE (CIC)</b>
<b><u>Norma descrittiva</u></b>	<b>ASTM D 6276-99a: 2001</b>
<b><u>Norme di riferimento nella pre-qualifica</u></b>	<i>UNI 10006: 2002 (ritirata)</i> sostituita dalle: UNI EN 13242: 2008 UNI EN 13285: 2004 <b>UNI ES ISO 14688-1: 2003</b>
<b><u>Obiettivo</u></b>	Valutazione percentuale di calce da aggiungere preliminarmente nella stabilizzazione.
<b><u>Apparecchiatura</u></b>	<p><u>Reagenti:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Acqua (specificata D 1193). Immagazzinare l'acqua in un contenitore strettamente ricoperto; bollire e raffreddare l'acqua subito prima dell'uso.</li> <li>• Soluzione tampone con un pH di 12, entrambi disponibili in commercio o preparati in conformità alla D 1293.</li> <li>• Calce idrata e calce fresca che soddisfa la C 977 6.</li> </ul> <p><u>Apparecchiatura:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bilancia graduata con capienza minima di 600 g e leggibilità di 0,001g.</li> <li>• Setaccio ASTM N 40.</li> <li>• Sei bottiglie di plastica da 150-mL (o più grandi) con i coperchi a vite aderenti.</li> <li>• pH-metro fornito dell'elettrodo di riferimento, degli elettrodi pH-sensibili di vetro di errori del basso-sodio (o dell'elettrodo di combinazione) e di un tester capace di visualizzazione le 0.01 unità pH a 0.2 esattezze di pH sopra una gamma da 0 a 14.</li> <li>• Forno di secchezza adeguato ai requisiti della specifica</li> </ul>

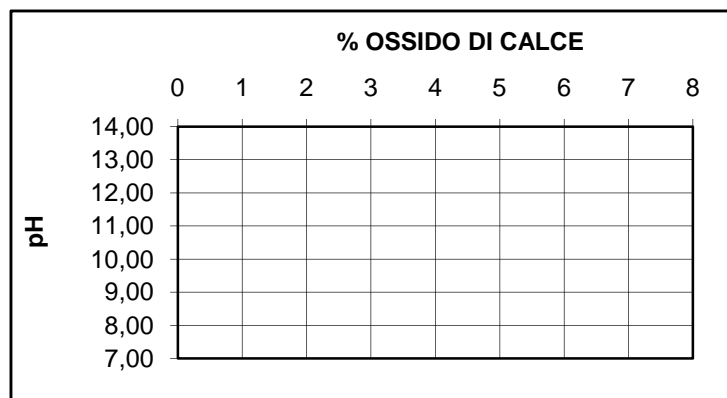
	<p>E 145.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Apparecchiatura chiusa ermeticamente, contenitore a prova d'umidità per la conservazione del tenore d'acqua del terreno, attrezzi e palette di miscelazione per uso nella preparazione dei campioni di prova.</li> </ul>
<p><b><u>Procedimento</u></b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Preparare il campione di prova.</li> <li>• Tarare il pH-metro utilizzando una soluzione tampone a pH 12 a 25°C.</li> <li>• Preparare cinque provini, ciascuno pari a 25,0 g di suolo essiccato in forno e determinarne la massa umida</li> <li>• Ottenere sei campioni rappresentativi di calce (come da C 977). Cinque campioni rappresentano il 2, 3, 4, 5 e il 6% della massa secca equivalente dei campioni di terreno. Il sesto campione di 2,0 g di calce rappresenta una soluzione satura di calce. Posizionare i 2,0 g di calce asciutta in una bottiglia di plastica e chiudere ermeticamente.</li> <li>• Aggiungere uno dei primi cinque provini di calce ad uno dei campioni di suolo 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 del suolo.</li> <li>• Aggiungere 100 ml di acqua per ogni campione suolo-calce e per il flacone contenente 2,0 g di calce. Tappare le bottiglie e agitare per un minimo di 30 s o fino a 1 min. Continuare ad agitare i campioni per 30 s ogni 10 min per 1 h.</li> <li>• Entro 15 minuti dalla fine del periodo d'agitazione (1 h), determinare il pH di ciascuna miscela suolo-acqua-calce e di quella calce-acqua. Mantenere la temperatura delle miscele a 25°C al momento di determinare il pH.</li> </ul>

**Elaborazione dati**

Il contenuto iniziale di calce (CIC) si determina come segue:

- La più bassa percentuale di calce che fornisce un pH di 12,4.
- Per miscele con pH 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 inferiore o uguale a 12,3 è necessario prendere ulteriori campioni di prova utilizzando percentuali più elevate 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.

È possibile riportare un diagramma tali valori per valutare graficamente per quale percentuale il pH si stabilizza:



## **2.3. PROVE DI PREQUALIFICA SULLA CALCE**

### **2.3.1. Determinazione del contenuto di ossido di calcio e di ossido di magnesio**

La norma che disciplina questa prova è la UNI EN 196-2: 2005 (*Metodi di prova dei cementi, parte 2 – Analisi chimica dei cementi*).

In fase di campionamento il materiale viene fatto passare all'interno di un rompitore che lo sminuzza finemente; successivamente il campione viene steso formando un sottile strato di forma quadrata, dai quattro settori limitati dalle diagonali vengono presi quattro porzioni di prova di 1 kg ciascuno.

I 4 kg così radunati vengono posti in mulinetti a palle fino a lasciare un residuo del 2% sul vaglio di 900 maglie/cm<sup>2</sup>; ciò viene fatto per ottenere un complesso della massima omogeneità; il campione di prova viene poi conservato in un barattolo di vetro con tappo smerigliato per i prelievi necessari.

La prova vera e propria consiste nel porre in una capsula di porcellana mezzo grammo di calce campionata, essa viene spenta con acqua e con l'aggiunta di 25 cc di HCl a densità 1,12 kg/m<sup>3</sup>.

Si fa evaporare il tutto a bagnomaria sino a completa secchezza e si tiene per due ore in stufa a 110-120°C.

Dopo il raffreddamento si umetta il residuo con HCl concentrato e si lascia riposare a freddo per 15 minuti; trascorsi i 15 minuti si riprende con 100 cc d'acqua bollente, si scalda ancora un poco a bagnomaria, si lascia riposare ed infine si filtra e si lava a caldo prima con acqua acidulata con HCl (5:100), poi con acqua sino alla scomparsa della reazione di Cl.

Il residuo viene trascurato.

Il filtrato viene fatto evaporare sino a circa 150 cc, si addiziona con qualche goccia di acido nitrico concentrato, si fa bollire e si precipitano i sesquiossidi con leggero eccesso di ammoniaca (densità 0,96 rispetto all'acqua).

Si lascia bollire per 1 minuto e successivamente si filtra e si lava con acqua bollente. Il precipitato viene trascurato.

Il nuovo filtrato, ridotto a circa 250-300 cc, viene portato ad ebollizione ed addizionato con HCl sino a reazione acida (indicatore metilarancio), si scalda nuovamente sino

all'ebollizione e si addiziona a poco a poco con acido ossalico solido (poco più del triplo del peso della calce più la magnesia supposte presenti).

Si aggiunge quindi ammoniaca (densità 0,96) in eccesso, a poco a poco ed agitando; quando il liquido incomincia ad intorbidirsi si rallenta l'immissione.

Si lascia poi depositare per 5 ore e quindi si filtra.

Dopo aver lavato il precipitato con soluzione calda di ossalato ammonico all'1%, lo si pone, assieme al filtro, in un crogiolo e, tenendo questo inclinato, si essicca e si incenerisce con piccola fiamma. Si calcina e si pesa. Si ripete la calcinazione sino a peso costante.

La percentuale di CaO si ottiene moltiplicando per 200 il risultato dell'ultima pesata.

Il filtrato proveniente dalla determinazione precedente si porta a circa 250 cc, si addiziona con HCl diluito (1:1) fino a reazione acida e si tratta con un eccesso di fosfato sodico o ammonico ed alcune gocce di fenolftaleina. Si scalda poi fino ad ebollizione ed ancora caldo si addiziona con ammoniaca (densità 0,96) finché non si ottiene una colorazione rossa persistente, a questo punto si aggiunge una quantità di ammoniaca corrispondente ad 1/3 del volume della soluzione. Si lascia raffreddare e dopo almeno 12 ore si filtra, si lava con ammoniaca diluita (densità 0,989) e si procede con le solite forme alla determinazione della magnesia.

Se il residuo del crogiolo non è bianco vi si aggiungono 2-3 gocce di acido nitrico concentrato, si fa evaporare, si torna a calcinare e si pesa.

Questo peso moltiplicato per 72,42 dà la percentuale di ossido di magnesio (MgO). Sommando le due percentuali di CaO e MgO si hanno gli ossidi di calcio e di magnesio.

Tabella 2.10 – Determinazione del contenuto di ossido di calcio e di magnesio.

<b><u>Prova</u></b>	<b>DETERMINAZIONE DEL CONTENUTO DI OSSIDO DI CALCIO E DI MAGNESIO</b>
<b><u>Norma descrittiva</u></b>	UNI EN 196-2: 2005
<b><u>Norme di riferimento nella pre-qualifica</u></b>	UNI EN 459-2
<b><u>Obiettivo</u></b>	Determinare le caratteristiche della calce impiegata.
<b><u>Apparecchiatura</u></b>	<p><u>Reagenti:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Acqua.</li> <li>• HCl, concentrato e a densità 1,12.</li> <li>• Acido nitrico concentrato.</li> <li>• Acido ossalico solido.</li> <li>• Ammoniaca (densità 0,96).</li> <li>• Ossalato e fosfato ammonico.</li> </ul> <p><u>Apparecchiatura:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Normale apparecchiatura da laboratorio;</li> <li>• Forno;</li> <li>• Capsula di ceramica;</li> <li>• Crogiolo.</li> </ul>
<b><u>Procedimento</u></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Campionare mediante rompitore e quartatura.</li> <li>• Aggiungere acqua e 25 cc di HCl a densità 1,12 a mezzo grammo di calce.</li> <li>• Evaporare e conservare in stufa a 110-120°C.</li> <li>• Umettere il residuo con HCl concentrato (riposo a freddo per 15'), riprendere con 100 cc d'acqua bollente, lasciar riposare e lavare a caldo prima con acqua acidulata con HCl (5:100) e poi con acqua pura, sino alla scomparsa della reazione di Cl.</li> <li>• Lasciar evaporare fino a circa 150 cc, aggiungere con qualche goccia di acido nitrico concentrato, far bollire per 1' e dopo un periodo di riposo filtrare e lavare con</li> </ul>

	<p>acqua bollente.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 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.</li> <li>• Aggiungere ammoniaca (densità 0,96), e lasciar riposare per 5 ore.</li> <li>• Lavare con soluzione calda di ossalato ammonico, posare il precipitato in un crogiolo e, tenendo questo inclinato, essiccare ed incenerire mediante una piccola fiamma (A).</li> <li>• 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.</li> <li>• Lasciar raffreddare per 12 ore, lavare con ammoniaca ed eventualmente aggiungere acido citrico; pesare (B).</li> </ul>
<p><b><u>Risultati</u></b></p>	<p>Al punto (A), moltiplicando il risultato dell'ultima pesata per 200 si ottiene la percentuale di CaO.</p> <p>Il peso ottenuto al punto (B), moltiplicato per 72,42 dà la percentuale di ossido di magnesio (MgO).</p> <p>Sommando le due percentuali di CaO e MgO si hanno gli ossidi di calcio e di magnesio.</p>



### 2.3.2. Determinazione della concentrazione di anidride carbonica

Per questa prova esistono due diversi procedimenti:

- normato (UNI EN 196-2: 2002, che ha sostituito la precedente norma UNI EN 196-21);
- alternativo (UNI EN 459-2: 2002).

#### 2.3.2.1. Metodo normato

Per l'esecuzione di questa prova viene utilizzato un apparecchio a spostamento di anidride carbonica (apparecchio di Schroedter o di Mohr-Geissler).

Dall'apertura laterale inferiore s'introducono da 2 a 5 grammi del materiale campionato come nella prova precedente.

Il quantitativo viene scelto a seconda del contenuto di carbonato di calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) che si presume presente nel campione, valutato per mezzo di una prova qualitativa con acido cloridrico diluito. Si pesa l'apparecchio col materiale.

Nel tubo munito inferiormente di rubinetto s'introduce HCl di densità pari a  $1,12 \text{ kg/m}^3$  e nell'altro a fianco acido solforico concentrato.

Si pesa nuovamente l'apparecchio. Si fa avvenire la decomposizione, si riscalda leggermente l'apparecchio su rete metallica con piccolissima fiamma e si fa passare una lenta corrente d'aria dopo il raffreddamento.

Si pesa ancora una volta, la diminuzione di peso che risulta dall'ultima misurazione fornisce la quantità di anidride carbonica ( $\text{CO}_2$ ) eliminata dai carbonati contenuti nel quantitativo di calce adoperata.

Chiamando  $p$  il quantitativo di calce e  $q$  la perdita di peso dell'apparecchio:

$$\text{CaCO}_3 \% = \frac{100q}{p} \times 2,2743$$

Tabella 2.11 – Determinazione della concentrazione di anidride carbonica (metodo normato).

<b><u>Prova</u></b>	<b>DETERMINAZIONE DELLA CONCENTRAZIONE DI ANIDRIDE CARBONICA (metodo normato)</b>
<b><u>Norma descrittiva</u></b>	UNI EN 196-2: 2002
<b><u>Norme di riferimento nella pre-qualifica</u></b>	UNI EN 459-2
<b><u>Obiettivo</u></b>	Determinare le caratteristiche della calce impiegata.
<b><u>Apparecchiatura</u></b>	<p><u>Reagenti:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• HCl, concentrato e a densità 1,12 kg/m<sup>3</sup>.</li> <li>• Acido solforico concentrato.</li> </ul> <p><u>Apparecchiatura:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Normale apparecchiatura da laboratorio.</li> <li>• Apparecchio di Schroedter o di Mohr-Geissler.</li> <li>• Bilancia.</li> </ul>
<b><u>Procedimento</u></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Introdurre nell'apertura laterale inferiore dell'apparecchio da 2 a 5 grammi di materiale campionato.</li> <li>• Pesare l'apparecchio col materiale.</li> <li>• Introdurre nel tubo munito inferiormente di rubinetto HCl di densità 1,12 kg/m<sup>3</sup> e inserire nel tubo a fianco acido solforico concentrato.</li> <li>• Pesare nuovamente l'apparecchio e riscaldarlo leggermente su rete metallica con piccolissima fiamma, facendo passare una lenta corrente d'aria dopo raffreddamento;</li> <li>• Pesare ancora una volta, la diminuzione che risulta dall'ultima pesata fatta fornisce la quantità di anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) eliminata dai carbonati contenuti nel quantitativo di calce adoperata.</li> </ul>
<b><u>Risultati</u></b>	<p>Indicando con p il quantitativo di calce e con q la perdita di peso dell'apparecchio:</p> $\text{CaCO}_3 \% = (100q/p) * 2,2743$

2.3.2.2. Metodo alternativo

In questo caso la CO<sub>2</sub> contenuta nella calce da costruzione sotto forma di carbonati viene liberata per reazione con l'acido cloridrico e viene determinata volumetricamente. A seconda del tenore di CO<sub>2</sub> previsto si sceglie approssimativamente la massa del campione di calce da utilizzare:

Tabella 2.12 – quantità di calce a seconda del tenore di anidride carbonica.

<b>Percentuale di CO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>Quantità di calce (g)</b>
0 ÷ 2 (compreso)	2
2 ÷ 5	1
5 ÷ 10	0,5
10 ÷ 15	0,3
15 ÷ 40	0,2
40 ÷ 50	0,1

Si pesa il campione con una bilancia accurata (0,1 mg), si aggiunge una punta di spatola di solfato di rame e si mette in sospensione con acqua in una beuta.

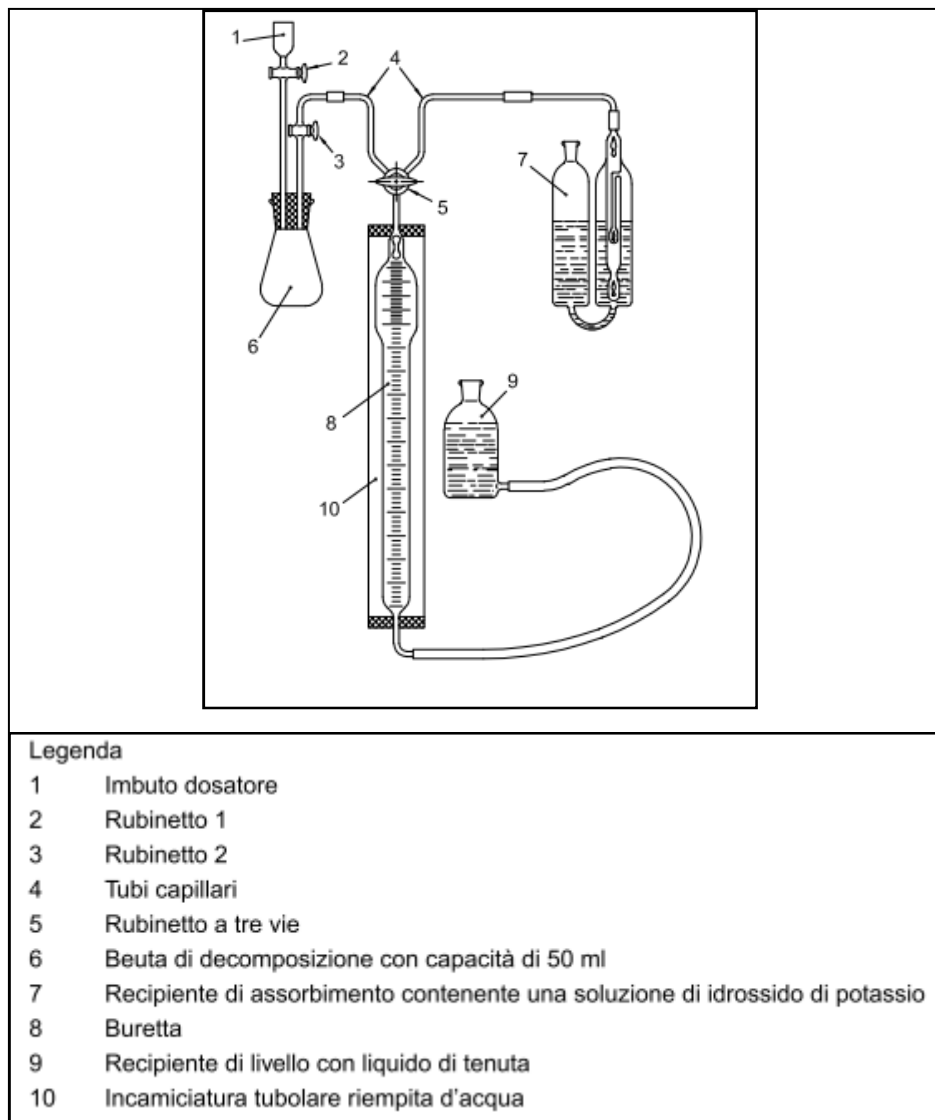


Figura 2.13 – Apparecchiatura di Kleine.

Si collega la beuta all'apparecchiatura di Kleine mediante il tappo a doppio foro e si fa passare attraverso questo l'imbuto e il tubo di alimentazione della buretta di misurazione.

Si aprono i rubinetti e si solleva il recipiente di livello in modo da riempire la buretta con il liquido di tenuta fino al rubinetto a tre vie. Si chiude il primo rubinetto e si riempie l'imbuto con acido cloridrico diluito (1+1).

L'acido si aggiunge anche alla beuta fino a riempire il recipiente a metà. Ultimata questa fase si chiude il primo rubinetto in modo che una piccola quantità d'acido rimanga nell'imbuto dosatore come liquido di tenuta.

Si fa reagire la miscela a freddo per qualche minuto, poi si porta ad ebollizione e si lascia bollire per 3 minuti.

Si riempie poi completamente la beuta con l'acido fino al secondo rubinetto, si chiude la buretta col rubinetto a tre vie e dopo 5 minuti circa si porta il liquido di tenuta nella buretta e nel recipiente allo stesso livello. Si può quindi leggere il volume di gas  $V_1$ .

Muovendo il rubinetto a tre vie si spelle la miscela aria/ $CO_2$  raccolta (per fare ciò si alza il recipiente di livello, in modo che tutto il gas sia costretto a passare attraverso la soluzione di idrossido di potassio).

In questo modo si assorbe quindi la  $CO_2$ , si ripete questa operazione 7 - 8 volte fino a ch  la buretta non contiene solo il gas residuo.

Come in precedenza si chiude il rubinetto, si porta il liquido della buretta a livello con quello del recipiente e si legge il volume  $V_2$ .

Dalla differenza fra i due volumi si ottiene il contenuto di anidride carbonica del campione.

Il contenuto percentuale in massa di  $CO_2$    dato dalla seguente equazione:

$$C = 0,053 F_1 \frac{(V_1 - V_2) \times P}{T \times ml}$$

dove:

- $F_1$    il fattore di correzione;
- $P$    la pressione barometrica corretta (Pascal x 100);
- $T$    la temperatura rilevata (K);
- $m_1$    la massa del campione (kg).

Tabella 2.13 – Determinazione della concentrazione di anidride carbonica (metodo alternativo).

<b><u>Prova</u></b>	<b>DETERMINAZIONE VOLUMETRICA DI ANIDRIDE CARBONICA (metodo alternativo)</b>
<b><u>Norma descrittiva</u></b>	UNI EN 459-2: 2002
<b><u>Norme di riferimento nella pre-qualifica</u></b>	UNI EN 459-2
<b><u>Obiettivo</u></b>	Determinare le caratteristiche della calce impiegata.
<b><u>Apparecchiatura</u></b>	<p><u>Reagenti:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• HCl, sia concentrato che diluito.</li> <li>• Solfato di Rame.</li> <li>• Soluzione di rosso di metile.</li> <li>• Idrossido di Potassio in soluzione.</li> <li>• Carbonato di Calcio.</li> </ul> <p><u>Apparecchiatura:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Normale apparecchiatura da laboratorio.</li> <li>• Apparecchio di Kleine.</li> </ul>
<b><u>Procedimento</u></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Collegare la beuta all'apparecchiatura di Kleine mediante il tappo a doppio foro e si fare passare attraverso questo l'imbuto e il tubo di alimentazione della buretta di misurazione.</li> <li>• Aprire i rubinetti e sollevare il recipiente in modo da riempire la buretta con il liquido di tenuta fino al rubinetto a tre vie. Chiudere il primo rubinetto e riempire l'imbuto con acido cloridrico diluito (1+1).</li> <li>• Aggiungere l'acido anche alla beuta fino a riempire il recipiente a metà.</li> <li>• Lasciare reagire la miscela a freddo per qualche minuto, poi portare ad ebollizione e far bollire per 3 minuti.</li> <li>• Riempire completamente la beuta con l'acido fino al secondo rubinetto, chiudere la buretta col rubinetto a tre vie e dopo 5 minuti circa portare il liquido di tenuta nella</li> </ul>

	<p>buretta e nel recipiente allo stesso livello. Leggere il volume di gas <math>V_1</math>.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Muovendo il rubinetto a tre vie spillare la miscela d'aria/<math>\text{CO}_2</math> raccolta (per fare ciò si alza il recipiente di livello, in modo che tutto il gas sia costretto a passare attraverso la soluzione di idrossido di potassio).</li> <li>• Ripetere questa operazione 7 - 8 volte finché la buretta non contiene solo il gas residuo.</li> <li>• Chiudere nuovamente il rubinetto, portare il liquido della buretta a livello con quello del recipiente e leggere il volume <math>V_2</math>.</li> </ul>
<p><b><u>Risultati</u></b></p>	<p>Il contenuto percentuale in massa di <math>\text{CO}_2</math> è dato da:</p> $C = 0,053 F_1 \frac{(V_1 - V_2) \times P}{T \times ml}$ <p>Dove:</p> <p><math>F_1</math> = fattore di correzione</p> <p><math>P</math> = pressione barometrica corretta [Pascal x 100]</p> <p><math>T</math> = temperatura rilevata [Kelvin]</p> <p><math>m_1</math> = massa del campione [kg]</p>

**2.3.3. Determinazione del contenuto di calce libera nelle calce aeree**

Tale prova è disciplinata dalla UNI EN 459-2: 2002.

Si versano 50 ml di acqua in una beuta conica da 300 ml. Si pesa 1 g di calce con la bilancia e la si versa nella beuta mescolandolo e portandola in sospensione.

Si aggiungono 10 g di saccarosio e si agita la sospensione per 15 minuti (di norma con una tavola vibrante o agitatore magnetico); si filtra il tutto con due carte da filtro.

Successivamente si lava la beuta con 6 parti di acqua da 25 ml di acqua fredda e si titola il filtrato (ovvero se ne misura la concentrazione) con acido cloridrico, utilizzando la fenolftaleina come indicatore.

Il contenuto di calce libera fornito dalla seguente equazione:

$$K_a = \frac{2,804V_5 \times C_1}{m_2}$$

dove:

- $V_5$  è il volume di acido cloridrico (ml);
- $C_1$  è il fattore di acido cloridrico 1 mol/l;
- $m_2$  è la massa del campione (kg).



Tabella 2.14 – Determinazione del contenuto di calce libera nelle calci aeree.

<b><u>Prova</u></b>	<b>DETERMINAZIONE DEL CONTENUTO DI CALCE LIBERA NELLE CALCI AEREE</b>
<b><u>Norma descrittiva</u></b>	UNI EN 459-2: 2002
<b><u>Norme di riferimento nella pre-qualifica</u></b>	UNI EN 459-2
<b><u>Obiettivo</u></b>	Determinare le caratteristiche della calce impiegata.
<b><u>Apparecchiatura</u></b>	<p><u>Reagenti:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Acqua.</li> <li>• Saccarosio.</li> <li>• Metanolo.</li> <li>• Acido cloridrico.</li> <li>• Fenolftaleina.</li> </ul> <p><u>Apparecchiatura:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Normale apparecchiatura da laboratorio.</li> <li>• Tavola vibrante o agitatore magnetico.</li> </ul>
<b><u>Procedimento</u></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Versare 50 ml di acqua in una beuta conica da 300 ml.</li> <li>• Pesare 1g di campione con la bilancia accurata (1 mg) e porlo nella beuta mescolandolo e portandolo in sospensione.</li> <li>• Aggiungere 10 g di saccarosio, agitare (mediante tavola vibrante o agitatore magnetico) la sospensione tappata per 15 min.</li> <li>• Filtrare il tutto con due carte da filtro.</li> <li>• Lavare la beuta con 6 parti di acqua da 25 ml di acqua fredda e titolare il filtrato con acido cloridrico utilizzando la fenolftaleina come indicatore.</li> </ul>

**Risultati**

Il contenuto di calce libera è:

$$K_a = \frac{2,804V_5 \times C_1}{m_2}$$

Dove:

$V_5$ = volume di acido cloridrico [ml];

$C_1$ = fattore di acido cloridrico 1 mol/l;

$m_2$ = massa del campione [kg]

## 2.4. PROVE DI PREQUALIFICA SUL TERRENO C <sup>[7]</sup>

Tabella 2.15 – Dati prelievo campione C.

Certificato N°	1/2009	
Data	16/02/2009	
Committente	<b>CGS Lab</b> via L.Da Vinci,24-47025 Mercato Saraceno (FC) Tel. 0547/323380 Fax 0547/323370	
Data di arrivo campione	11/02/2009	
Provenienza dichiarata	<b>Zola Predosa (BO)</b> Lavori di urbanizzazione di tipo C4 via dello Sport	
	Direttore dei lavori	Valentina Guardigli
Prelievo effettuato da	Personale del laboratorio <b>CGS</b> in data: 11/02/2009	
Osservazioni	Umidità in sito: 19,50%	
Modalità di prelievo	Procedure norma <b>UNI EN 931-2: 1998</b>	

Il terreno utilizzato in questa fase è stato campionato nel nuovo comparto edificatorio di Zola Predosa (BO).



Figura 2.14 –Particolare dall’alto della località di cantiere.

Dal punto di vista pedologico, nella zona si ha la presenza di diverse tipologie di terreni: sabbie, materiali di riporto, macerie e terreno di provenienza agricola. Questa eterogeneità comporta necessariamente un certo inquinamento dei terreni tra loro e trovare del materiale limo – argilloso non contaminato può non essere semplice.



Figura 2.15 –Indicazione dei rilievi.

Il prelievo è stato eseguito a circa 1 m di profondità, dove l’humus superficiale non dovrebbe essere presente, in una zona precedentemente a destinazione agricola. Si ritiene quindi che tale materiale possa essere stato contaminato da prodotti agricoli, ma non è possibile determinare con precisione la sua possibile influenza sulle caratteristiche del terreno.

2.4.1. Prove di laboratorio sul terreno

Tabella 2.16: Prove effettuate sul terreno C.

<b>PROVE DI LABORATORIO</b>		<b>SI</b>	<b>NO</b>
<b><u>Classificazione dei terreni</u></b>	Analisi granulometrica <b>UNI EN 933-1: 1999</b>	X	
	Limiti di Atterberg <b>UNI 10014: 2007</b>	X	
<b><u>Caratteristiche fisiche</u></b>	Equivalente in sabbia <b>UNI EN 933-8: 2000</b>	X	
	Valore al blu di Metilene <b>UNI EN 933-9: 2000</b>	X	
<b><u>Caratteristiche chimiche</u></b>	Contenuto di solfati solubili in acido <b>UNI EN 1744-1/11: 1999</b>	X	
	Contenuto di sostanze organiche <b>UNI EN 1744-1/15: 1999</b>	X	
	Ottimale teorico di calce (CIC) <b>ASTM D 6276-99: 2006</b>	X	
<b><u>Prove effettuate da</u></b>	Dott. Ing. Claudio Lantieri Dott. Ing. Alessandro Priolo Dott. Ing. Roberto Cancellieri P.I. Elio Pinardi Ettore Cappellari Gesuino Fenu		

2.4.1.1. Classificazione del terreno

- Analisi granulometrica (UNI EN 933-1:1999)

Tabella2.17: Analisi della granulometria sul campione C.

D <sub>stacci</sub> [mm]	Trattenuto [g]	Progressivo Trattenuto [g]	Percentuale Passante [%]	Progressivo Passante [%]
63		0	0	100
40		0	0	100
31,5		0	0	100
20		0	0	100
16		0	0	100
14		0	0	100
12,5		0	0	100
10		0	0	100
8		0	0	100
6,3		0	0,08	99,92
4	0,4	0,4	0,18	99,74
2	0,9	1,3	0,32	99,42
1	1,6	2,9	0,74	98,68
0,5	3,7	6,6	2,86	95,82
0,25	14,3	20,9	9	86,82
0,125	45	65,9	12,52	74,3
0,063	62,6	128,5	74,3	
FONDELLO	371,5	500		
PRELIEVO SECCO [g]	500			

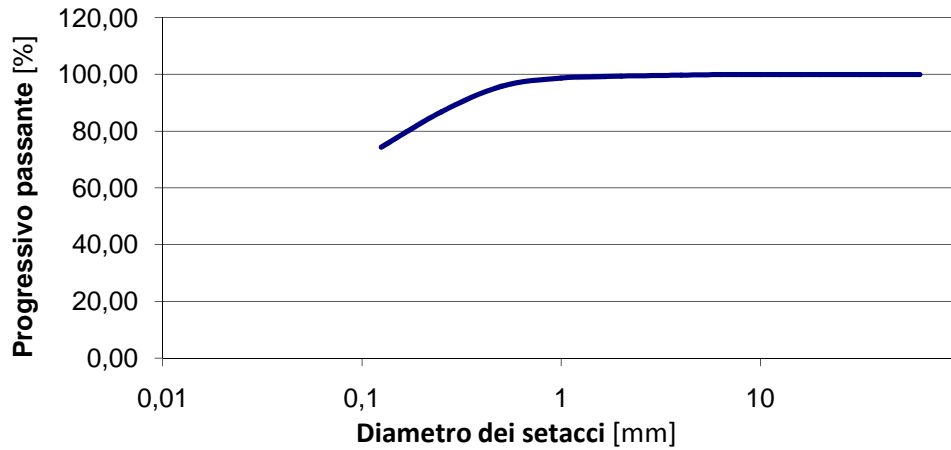


Figura 2.16: Curva granulometrica campione C.

- Limiti di Atterberg (UNI 10014:1963)

Tabella 2.18: Limiti di Atterberg.

	LIMITE LIQUIDO			LIMITE PLASTICO
Recipiente N°	16	33	45	15
Numero di colpi	14	21	45	
Tara [g]	22,79	22,87	21,87	21,78
Peso Lordo Umido [g]	40,57	40,69	40,28	38,04
Peso lordo Secco [g]	35,49	35,72	35,47	35,31
Peso acqua [g]	5,08	4,97	4,81	2,73
Peso netto secco [g]	12,7	12,85	13,6	13,53
Umidità [g]	40	38,68	35,37	20,18

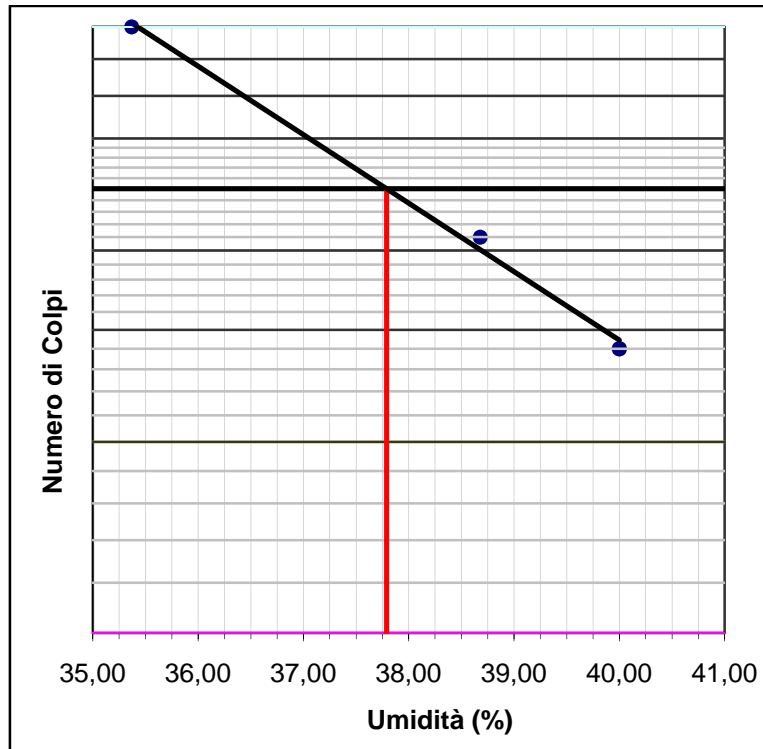


Figura 2.17: Determinazione limiti di Atterberg.

- ✓ Limite Liquido: 37,79
- ✓ Limite Plastico: 20,18
- ✓ Indice di Plasticità: 17,61



- Tabella UNI-CNR 10006:2002

Tabella 2.19: Classificazione delle terre secondo normativa CNR - UNI 10006: 2002.

GRUPPO	SOTTO-GRUPPO	Frazione passante al setaccio UNI 2332			LL	IP	IG	Materiali Caratteristici	Caratteristiche come sottofondo
		2	0,4	0,075					
A1	A1-a	<50	<30	<15	-	<6	0	Ghiaia o breccia, ghiaia o breccia sabbiosa, pomici, pozzolane	Da eccellente a buono
	A1-b		<50	<25					
A3	-	-	>50	<10	-	-	0	Sabbia fine	
A2	A2-4	-	-	<35	<40	<10	0	Ghiaia o sabbia limosa o argillosa	
	A2-5				>40	>10			
	A2-6				<40	<10			<4
A4	-	-	-	>35	<40	<10	<8	Limi poco compressibili	
A5	-	-	-	>35	>40	<10	<12	Limi fortemente compressibili	
A6	-	-	-	>35	<40	>10	<16	Argille poco compressibili	Da mediocre a scadente
A7	A7-5	-	-	>35	>40, IP<LL-30	>10	<20	Argille fortemente compressibili	
	A7-6				>40, IP>LL-30	>10		Argille fortemente compressibili e fortemente plastiche	
A8	-	-	-	-	-	-	-	Torbe, detriti organici di origine palustre	Inadatte

Il terreno utilizzato in questo studio rientra nel gruppo A6.

2.4.1.2. Caratteristiche fisiche del terreno

- Equivalente in sabbia (UNI EN 933-8:2000)

Tabella 2.20: Equivalente in sabbia.

h1	31,4	34
h2	0,75	0,65
E.S. %	2,39	1,91
<b>E.S. % media</b>	2,15	

- Valore del Blu di Metilene (UNI EN 933-9:2000)

Il Valore di Blu relativo al terreno C è pari a 38,3 g/kg e la sua Superficie specifica totale risulta essere 80,23 m<sup>2</sup>/g.

2.4.1.3. Caratteristiche chimiche del terreno

- Contenuto di sostanze organiche (UNI EN 1744-1/15:1999)

Nel terreno non è stata rinvenuta la presenza di sostanze organiche.

- Contenuto di solfati solubili in acido (UNI EN 1744-1/12: 1999)

La percentuale di solfati presente è dello 0,01%.

- Determinazione del contenuto iniziale di calce (ASTM D 6276-99: 2006)

Tabella 2.21: Determinazione del pH per ottenere il contenuto iniziale di calce.

% calce	pH
0	
1	12,38
2	12,48
3	12,57
4	12,62
5	12,66
6	12,70

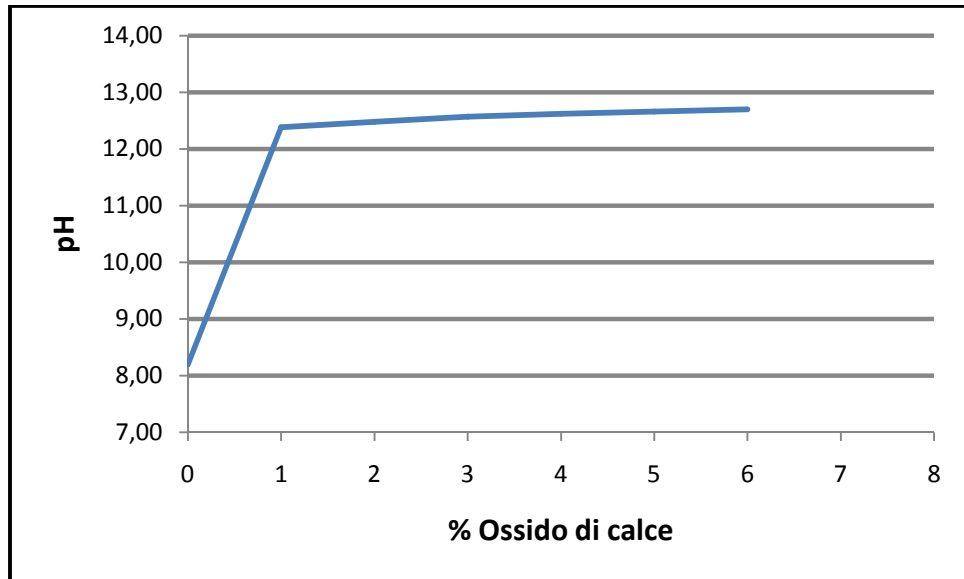


Figura 2.18: Determinazione del contenuto iniziale di calce.

Il contenuto iniziale di calce è pari a 3%.

## **Capitolo 3 – MACCHINARI UTILIZZATI NELL'AMBITO DELLA SPERIMENTAZIONE**

### ***3.1. ANALISI COMPARATIVA SULLE MODALITA' DI COMPATTAZIONE***

La compattazione di un terreno è un'operazione che consiste nel fornire energia meccanica per addensare le particelle. Il terreno viene compattato al fine di migliorarne le caratteristiche di portanza, aumentando la stabilità e riducendo il rischio di cedimenti. Ciò consente al terreno di sopportare adeguatamente il peso delle strutture sovrastanti e dei carichi che gravano su di esso. Per monitorare il grado di compattazione raggiunto in sito si sono sviluppate prove di compattazione di laboratorio. Le fondamenta di questo settore sono state poste da R. R. Proctor nei primi anni Trenta; Proctor è stato il primo ad elaborare una procedura ed un macchinario in grado di simulare la compattazione ottenuta in cantiere ad opera dei rulli.

Ad oggi esistono diverse apparecchiature in grado di compattare il terreno in sito; la tipologia di rullo adottata è direttamente legata alla natura del terreno che si vuole compattare. Per i materiali argillosi si utilizzano rulli a punte o rulli a piede di pecora, efficaci per rimaneggiare il terreno e rompere eventuali sacche di aria o acqua, per i materiali granulari vengono impiegati rulli vibranti mentre per i conglomerati bituminosi rulli lisci. I rulli gommati, che applicano una sollecitazione "impastante", possono essere efficacemente utilizzati su tutte le tipologie di terreno nonché sui conglomerati bituminosi. La compattazione impulsiva, ottenuta per mezzo di un peso che cade da un'altezza prestabilita, viene utilizzata solo per depositi situati in profondità. Attualmente per lo studio delle miscele terra – acqua – calce la metodologia di prova in laboratorio più diffusa nelle norme e nei capitolati è la prova impulsiva Proctor, la quale però nella maggior parte dei casi risulta poco rappresentativa delle sollecitazioni fornite dai rulli al terreno.

In questo paragrafo vengono descritte le apparecchiature e le procedure relative alla prova Proctor e alla Pressa Giratoria e vengono presentati alcuni studi, effettuati sia su terreni che su conglomerati, aventi l'obiettivo comune di determinare quale delle diverse metodologie di compattazione di laboratorio riproduce più fedelmente le caratteristiche di compattazione ottenute in sito. Tutti gli studi analizzati sono concordi nell'individuare nella Pressa Giratoria la metodologia di compattazione maggiormente conforme a quella ottenuta in sito mediante i rulli.

### **3.1.1. Compattazione Proctor**

La prova Proctor, descritta nelle normative UNI EN 13286-2:2005 e CNR BU 69/73, consiste nel porre della terra a strati in un recipiente metallico cilindrico e compattarla sotto l'azione di un pestello a caduta libera.

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 migliore 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**  $\gamma_{s,max}$  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 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  $\gamma_s$  in funzione dell'umidità  $w$ , si ottiene una curva a campana che presenta un massimo (figura 3.1).

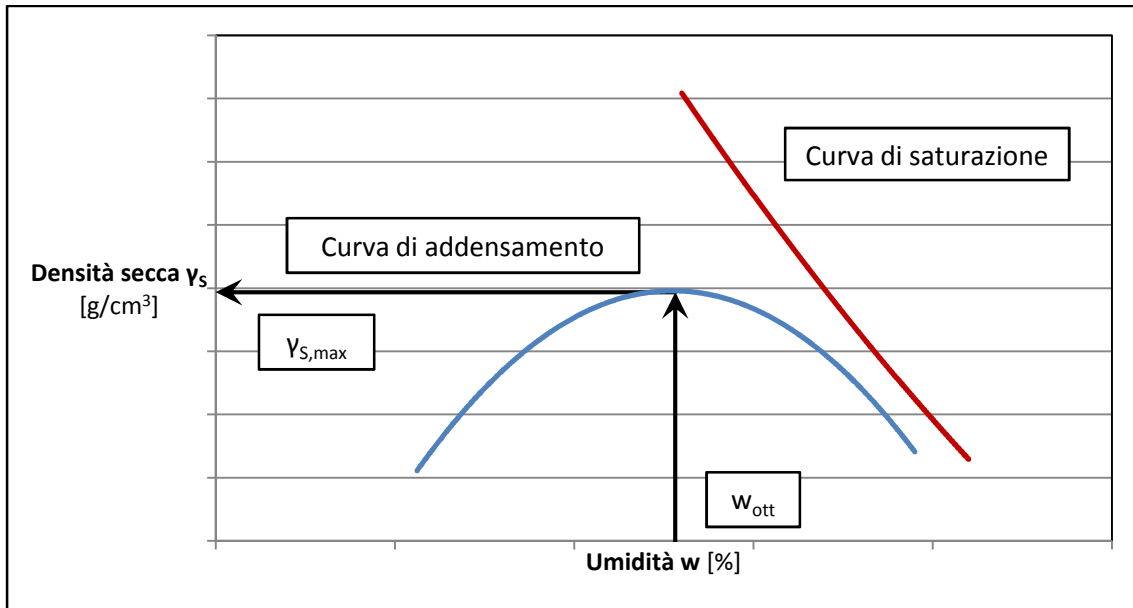


Figura 3.1 – Curva di addensamento e curva di saturazione riportate in un diagramma umidità – densità secca.

Andando verso contenuti di acqua elevati la curva di costipamento è all’incirca parallela alla curva di saturazione, individuata calcolando il contenuto di acqua w necessario per saturare il materiale per ciascun valore di peso di volume secco  $\gamma_s$ .

La sua equazione è:

$$\gamma_s = \frac{G_s}{1 + w \cdot G_s} \cdot \gamma_w$$

forma particolare della relazione valida per un generico grado di saturazione  $S_r$ :

$$\gamma_s = \frac{S_r \cdot G_s}{S_r + w \cdot G_s} \cdot \gamma_w$$

dove:

$$w = \frac{P_w}{P_s} \cdot 100 = \text{contenuto di acqua espresso in percentuale};$$

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \text{peso specifico dei grani};$$

$S_R$  = grado di saturazione espresso in percentuale.

Se per una stessa terra si varia l’energia di compattazione fornita con lo stesso metodo, si ottiene una famiglia di curve con andamento simile a quello in figura 3.2.

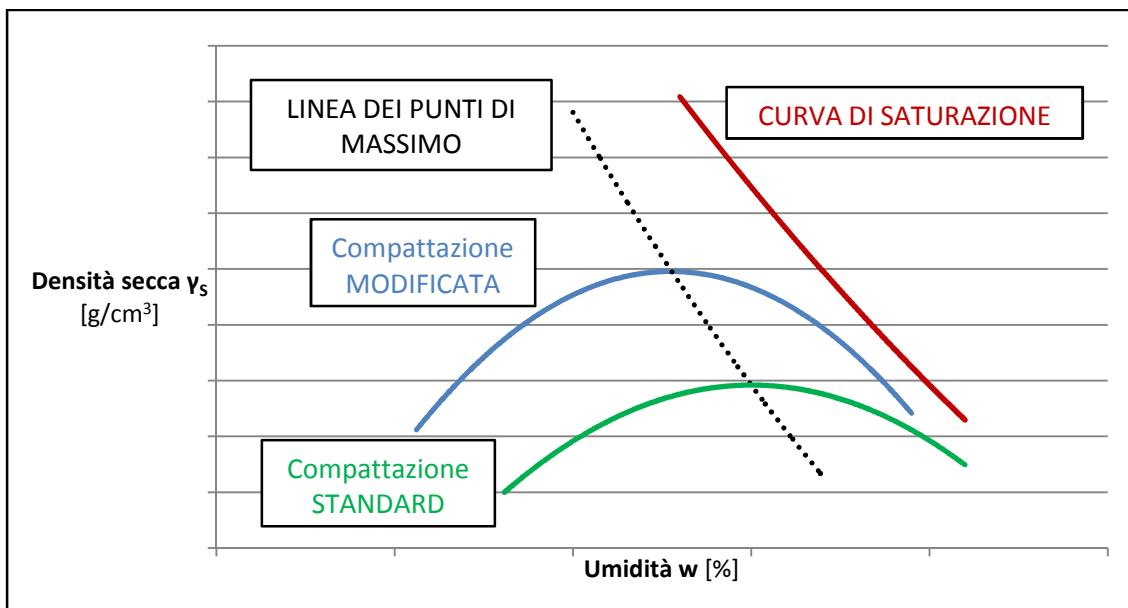


Figura 3.2 – Famiglia di curve di addensamento Proctor ottenute con diversi livelli di energia.

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 parti dell'apparecchiatura di costipamento normalizzata da cui dipende l'energia fornita al materiale sono il pestello e lo stampo.

L'AASHTO ha normalizzato due differenti modalità di compattazione a diversi livelli di energia:

- AASHTO Standard
- AASHTO Modificato

Si differenziano in virtù del peso e dell'altezza di caduta del pestello (tabella 3.1) e del numero di strati in cui il materiale viene inserito. La nuova normativa europea ha

introdotto un nuovo livello di energia, chiamato “Extra”, caratterizzata da energia di costipamento molto elevata ed impiegata per materiali di grandi dimensioni.

Tabella 3.1 – Caratteristiche dei pestelli usati per le diverse modalità di compattazione.

NORMATIVA	MODALITA` DI COMPATTAZIONE	CARATTERISTICHE DEL PESTELLO		
		Peso [kg]	Diametro [mm]	Altezza di caduta [mm]
UNI EN 13286-2:2005	STANDARD	2,50±0,02	50,0±0,5	305±3
	MODIFICATO	4,50±0,04	50,0±0,5	457±3
	EXTRA	15,00±0,04	125,0±0,5	600±3
CNR BU 69/73	STANDARD	2,495±0,005	51,0±0,5	305
	MODIFICATO	4,535±0,005	51,0±0,5	457

Il pestello è movimentato da un macchinario che lo solleva automaticamente fino all’altezza normata quindi lo lascia cadere sul materiale (figura 3.3); dopo ogni colpo la base del compattatore ruota e trasla in modo da imprimere il colpo successivo in una zona limitrofa ma non sovrapposta alla precedente.



Figura 3.3 – Macchinario di costipamento Proctor; si notano il pestello che può muoversi all’interno di una guida e la base su cui viene appoggiato lo stampo che può ruotare e traslare.



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

L'altro parametro che influenza l'energia di costipamento è il numero di colpi, funzione del tipo di stampo.

Gli stampi (figura 3.4) utilizzati storicamente sono due:

- Stampo piccolo
- Stampo grande.

La normativa europea ne ha aggiunto un terzo denominato “Extra Large” per materiale di pezzatura molto grande.

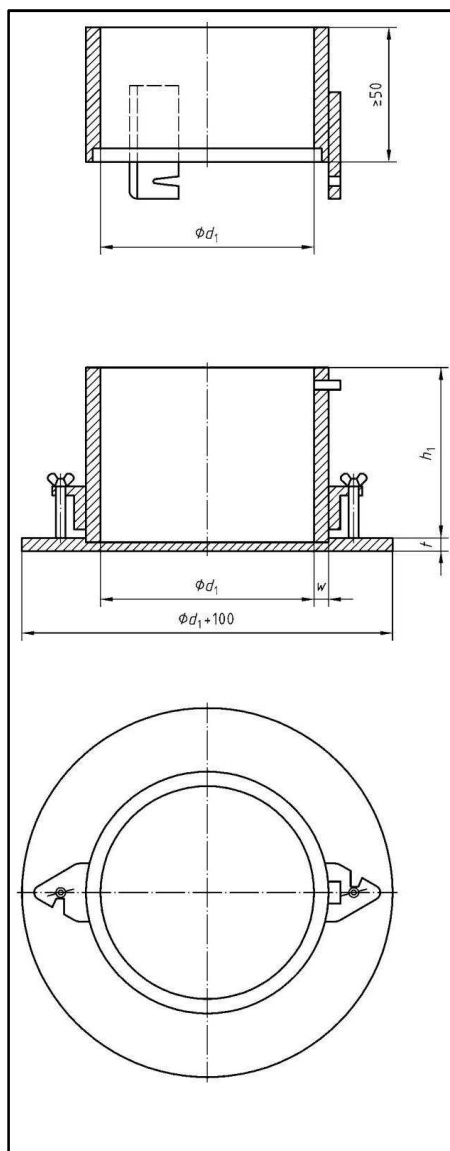


Figura 3.4 – Stampo Proctor. Da notare i fermi e le viti per il montaggio delle varie attrezzature.

Durante la compattazione è necessario montare sulla parte superiore dello stampo un collare per contenere il volume eccedente (altezza minore di 1 cm) di materiale compattato che andrà successivamente rimosso: questa operazione è necessaria per assicurare una maggiore uniformità nella compattazione del terreno eliminando la parte che più risente dell'effetto di bordo.

Nella tabella 3.2 sono riportate le caratteristiche degli stampi e dei relativi collari.

Tabella 3.2 – Caratteristiche degli stampi che è possibile utilizzare per confezionare il provino.

NORMATIVA	MODALITA` DI COMPATTAZIONE	CARATTERISTICHE DEL PESTELLO		
		Diametro interno (d <sub>1</sub> ) [mm]	Altezza interna (h <sub>1</sub> ) [mm]	Altezza del collare [mm]
UNI EN 13286-2:2005	PICCOLO	100,0±1,0	120,0±1,0	≥ 50
	GRANDE	150,0±1,0	120,0±1,0	
	“EXTRA LARGE”	250,0±1,0	200,0±1,0	
CNR BU 69/73	PICCOLO	101,6±0,2	116,4±0,2	≥ 51
	GRANDE	152,4±0,2	116,4±0,2	

Il criterio di scelta dello stampo definito dalle normative è il passante a determinati setacci (tabella 3.3).

Tabella 3.3 – Criterio per la scelta dello stampo da utilizzare.

NORMATIVA	PERCENTUALE DI PASSANTE [%]			STAMPO
	UNI 16 mm	UNI 31,5 mm	UNI 63 mm	
UNI EN 13286-2:2005	100	-	-	PICCOLO GRANDE
	da 75 a 100	100	-	GRANDE
	< 100	da 75 a 100	100	GRANDE
	-	< 75	da 75 a 100	EXTRA LARGE
CNR BU 69/73	UNI 5 mm		UNI 25 mm	
	100		> 75	PICCOLO GRANDE
	< 100		> 75	GRANDE

In tabella 3.4 sono riassunte le energie di compattazione fornite al materiale in funzione della modalità AASHTO scelta e dello stampo utilizzato, ricordando che lo stampo “extra large” è presente solo nella normativa europea.

Tabella 3.4 – Riepilogo delle energie di compattazione e del numero di strati in cui inserire il materiale.

MODALITA' DI COMPATTAZIONE	STAMPO		
	PICCOLO	GRANDE	EXTRA LARGE
STANDARD	3 strati	3 strati	3 strati
	25 colpi	56 colpi	22 colpi
MODIFICATO	5 strati	5 strati	3 strati
	25 colpi	56 colpi	98 colpi

Entrambe le specifiche consigliano di effettuare almeno cinque determinazioni con umidità crescente del 2 – 3 %. Da ogni provino si ricavano l’umidità e la densità secca, che inserite in un grafico  $w - \gamma_s$  ed analizzate tramite una curva di regressione di secondo grado forniscono i parametri  $w_{ott}$  e  $\gamma_{s,max}$  cercati.

### 3.1.2. Compattazione Giratoria

L’apparecchiatura Pressa Giratoria 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 ben simulare le proprietà delle pavimentazioni in opera. Infatti questo “mescolamento” in continuo aumenta le possibilità di incastro tra i grani di aggregato e fornisce al materiale sollecitazioni più simili a quelli 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** (figura 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  $\Phi$ . 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.



Figura 3.5 – Pressa giratoria utilizzata per la sperimentazione.

Lo stampo viene inclinato attraverso un sistema di ruote accoppiate a due a due tra le quali scorre il collare messo in rotazione attraverso un piatto in contatto con la base (figura 3.6).



Figura 3.6 – Ruote accoppiate poste all'interno della Pressa Giratoria.

Inoltre l'apparecchiatura deve garantire il mantenimento di una temperatura pari a quella iniziale  $\pm 10^{\circ}\text{C}$  almeno nelle vicinanze dell'asse centrale del provino.

Gli **stampi metallici** (figura 3.7) 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. Sono realizzati con materiale praticamente indeformabile ed almeno

inizialmente 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.



Figura 3.7 – Stampo metallico utilizzato per la compattazione con la Pressa Giratoria.

I **coperchi metallici** (figura 3.8) vanno appoggiati direttamente sul materiale e servono per distribuire la forza  $F$  di compattazione su tutta l'area del provino. Anch'essi devono essere realizzati con materiale poco sensibile alle elevate temperature ed essere lisci.



Figura 3.8 – Coperchio per lo stampo della Pressa Giratoria. Sopra di esso si può notare l'utensile magnetico utilizzato per il suo inserimento.

Le caratteristiche del macchinario utilizzato nello studio descritto nei successivi capitoli sono:

- inclinazione rispetto all'asse verticale pari a  $1,25^\circ \pm 0,02^\circ$ ;
- velocità di rotazione pari a 30 giri/min;
- pressione verticale costante per la durata della compattazione di 800 kPa;
- possibilità di realizzare provini cilindrici di 150 mm di diametro.

Infine si hanno il telaio della pressa giratoria, con i sistemi di misura e di controllo ed il basamento rotante con velocità.

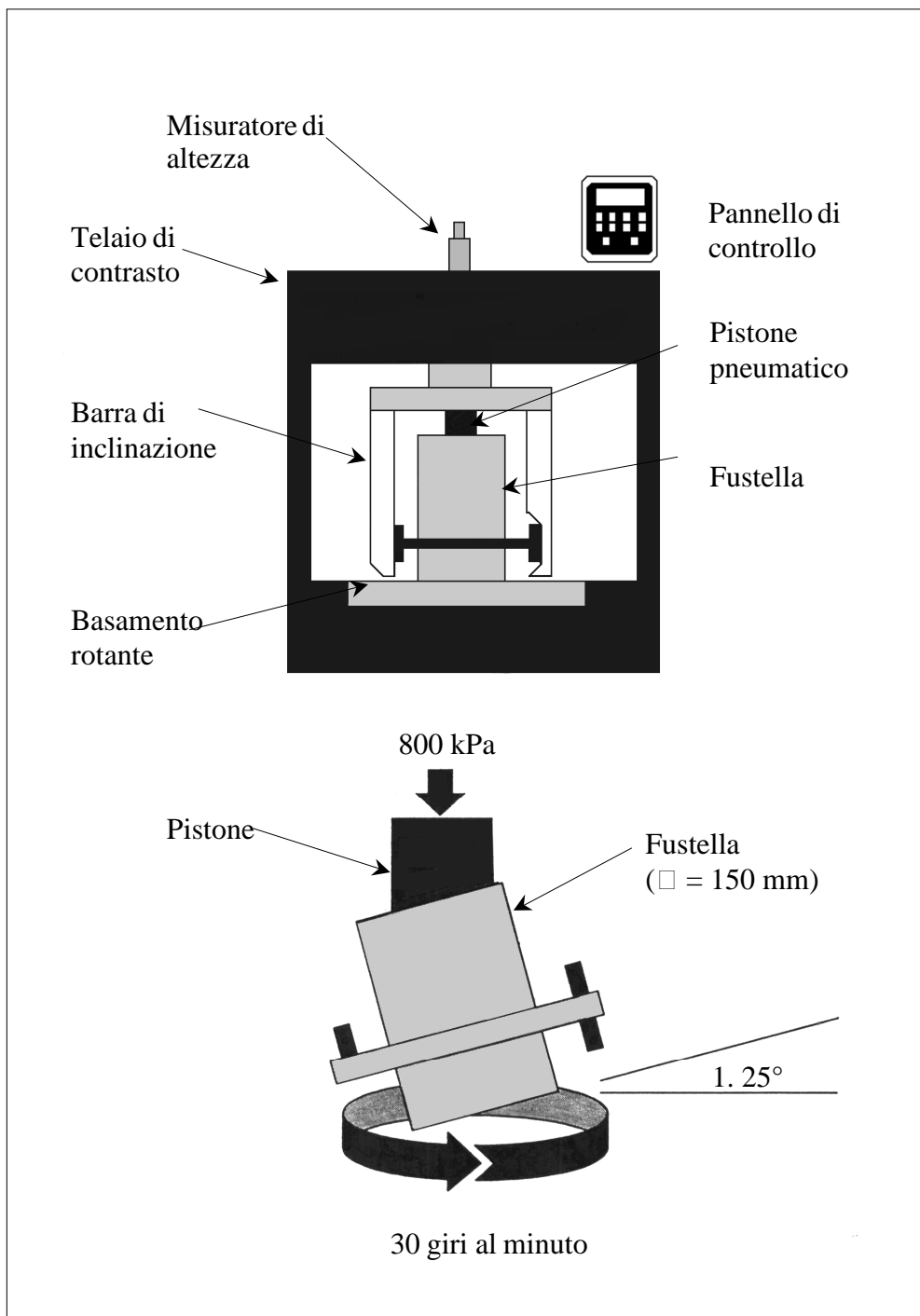


Figura 3.9 – Schematizzazione del funzionamento della Pressa Giratoria utilizzata per lo studio.

Attualmente è normalizzato il solo procedimento per la realizzazione di provini in conglomerato bituminoso, utilizzati per la progettazione degli stati superficiali della pavimentazione stradale nel sistema Superpave. Per quanto concerne lo studio dei terreni con tale macchinario si è quindi dovuta creare un'apposita procedura



standardizzata in grado di ridurre al minimo le variabili legate alla realizzazione dei provini.

### **3.1.3. Studi analizzati**

In questo paragrafo vengono riportati due studi che hanno come obiettivo il confronto tra diverse metodologie di compattazione di laboratorio al fine di individuare quella che rappresenta in maniera più fedele il costipamento raggiunto in sito ad opera dei rulli.

La prima sperimentazione è stata svolta su diversi conglomerati bituminosi e giunge alla conclusione che una compattazione di tipo impulsivo, come la compattazione Marshall, non è in grado di simulare in maniera attendibile le sollecitazioni causate dal traffico veicolare. Per questo motivo, per lo studio dei conglomerati, si è sviluppata una procedura basata sull'utilizzo della Pressa Giratoria, macchinario in grado di fornire simultaneamente un'azione di compressione verticale e un moto rotatorio attorno ad un asse inclinato. Questa azione combinata produce nel materiale sollecitazioni più simili a quelle prodotte in sito dai rulli di cantiere. Anche il secondo studio ha come scopo il confronto tra diverse metodologie di compattazione, ma il materiale testato in laboratorio in questo caso è un terreno sabbioso. Gli autori vogliono valutare la possibilità di sostituire, nell'ambito della compattazione dei terreni, la Pressa Giratoria alla tradizionale compattazione impulsiva Proctor. Come detto, tale sperimentazione è stata effettuata su materiale a matrice sabbiosa, mentre nello studio oggetto di questa tesi la compattazione sperimentale è compiuta su terreni di tipo argilloso trattati con legante idraulico.

Considerando che il rullo vibrante è utilizzato per la compattazione dei materiali argillosi non legati o legati e che la compattazione impulsiva denota già di per se una certa difficoltà nel loro addensamento, risulta comunque possibile estendere i risultati del secondo studio analizzato ai terreni stabilizzati a calce.

3.1.3.1. “Comparative study of asphalt concrete laboratory compaction methods to simulate field compaction” di Ziauddin A. Khan, Hamad I. Al-Abdul Wahab, Ibrahim Asi e Rezuqallah Ramadhan<sup>[8]</sup>

Le metodologie di compattazione di laboratorio che vengono prese in esame in questo studio comparativo sono le seguenti:

- Compattatore Marshall Automatico
- Compattatore Marshall Manuale
- California Kneading Compactor
- Pressa Giratoria con angolo di inclinazione di 1,25°
- Pressa Giratoria con angolo di inclinazione di 6°

Con il metodo Marshall i provini vengono compattati tramite sollecitazioni di tipo impulsivo. Tali sollecitazioni non riproducono in maniera attendibile quella esercitata dal traffico stradale, per questo motivo si è sviluppata una compattazione di tipo “impastante” (kneading compaction) che meglio approssima gli effetti del passaggio dei veicoli. Il passo successivo è rappresentato dalla compattazione giratoria, introdotta per simulare al meglio l’incremento dei carichi e della pressione degli pneumatici dei veicoli .

I campioni oggetto dello studio sono stati confezionati con materiale utilizzato per costruire quattro nuove strade in Arabia Saudita, per ogni strada si sono realizzati otto provini per ciascuna tecnica di compattazione. Oltre a questi campioni sono state sottoposte a test di laboratorio anche 32 carote estratte dai quattro siti di prova un giorno dopo la compattazione e prima dell’apertura delle strade al pubblico. I provini compattati in laboratorio sono stati confrontati con quelli di materiale indisturbato prelevato in sito utilizzando le seguenti prove di laboratorio:

- Determinazione della densità (ASTM D-2726) e contenuto dei vuoti;
- Marshall (ASTM D-1559);
- Determinazione del Modulo Resiliente;
- Creep statico.

La prova per determinare la densità e la percentuale dei vuoti è stata eseguita dopo aver lasciato raffreddare i provini fino a temperatura ambiente, mentre prima di eseguire la prova Marshall i campioni sono stati immersi in acqua a 60°C per 30 minuti.

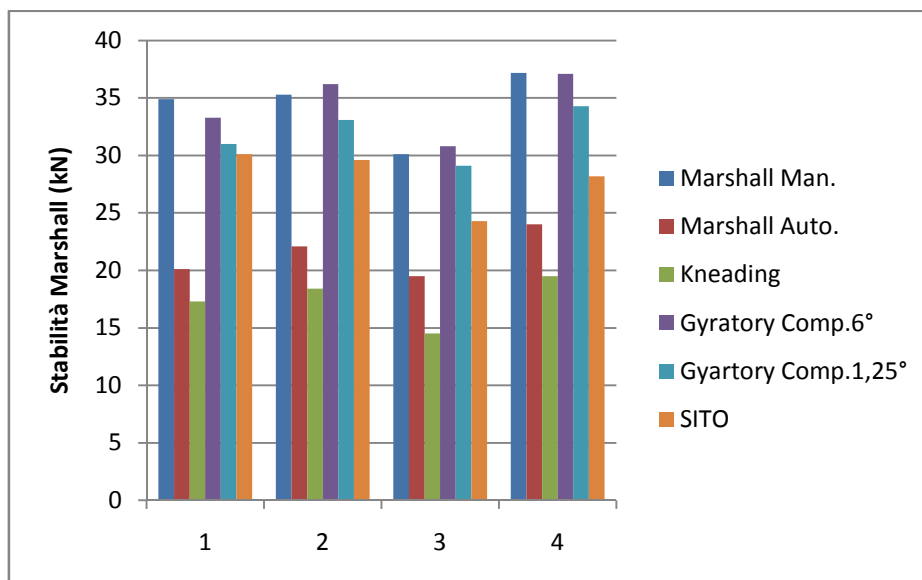


Figura 3.10 –Stabilità Marshall.

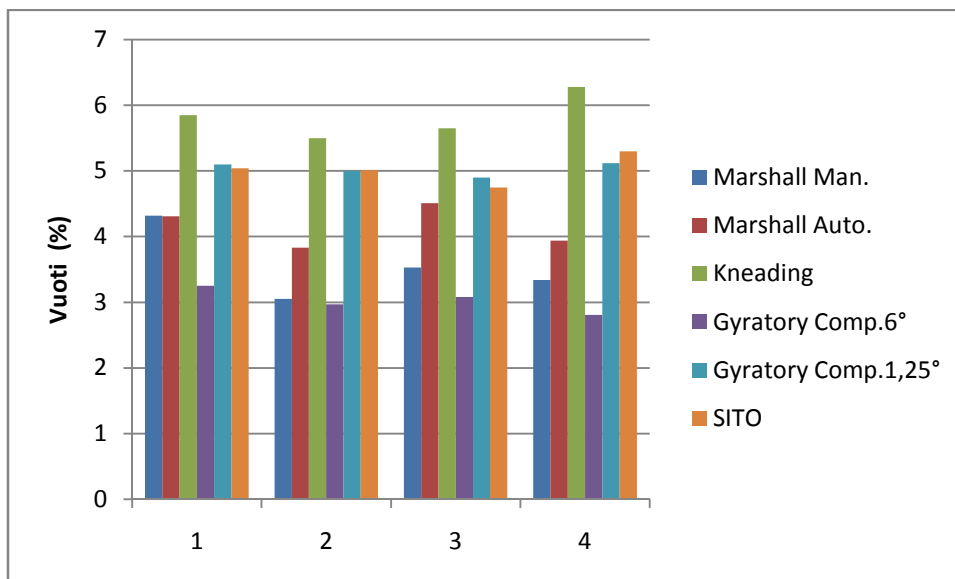


Figura 3.11 – Percentuale di vuoti.

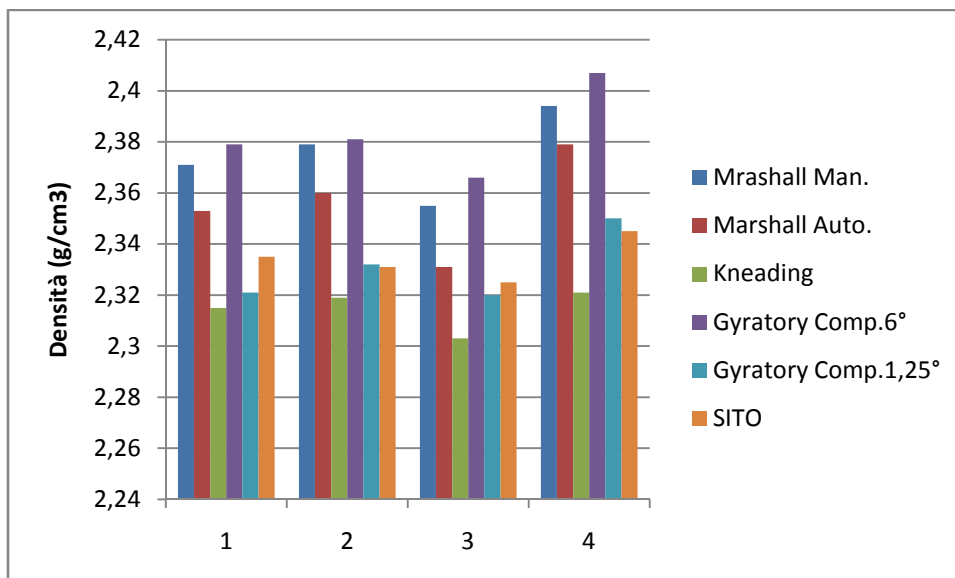


Figura 3.12 – Densità.

Analizzando i risultati ottenuti sottoponendo ai primi test i provini compattati con le diverse metodologie si desume che la tecnica che fornisce una compattazione più simile a quella in sito è la Pressa Giratoria con angolo di 1,25° (vedi Figure 3.10, 3.11 e 3.12).

Il conglomerato bituminoso è un materiale eterogeneo il cui comportamento è dipendente da temperatura e velocità di applicazione del carico. La risposta meccanica di un conglomerato bituminoso all’applicazione di un carico è in parte elastica ed in parte viscosa con comportamenti, sotto l’azione di carichi ripetuti, che danno luogo a deformazioni reversibili (deformazioni elastiche e di tipo visco-elastico) ed irreversibili (deformazioni di tipo visco-plastico e plastiche). Considerando solo la deformazione recuperabile, è quindi possibile ricondurre il comportamento dei conglomerati bituminosi a quello di un materiale elastico. Si possono definire due tipi di modulo, in funzione del carico applicato: il **modulo statico** e il **modulo dinamico**<sup>[9]</sup>. Il primo è il modulo ricavato da prove su conglomerati bituminosi con applicazioni del carico costanti nel tempo; il secondo è quello caratteristico del comportamento del materiale sotto condizioni di carico dinamiche. Il modulo dinamico meglio descrive la risposta del materiale alle sollecitazioni e ad esso si riconducono i moduli in uso quali il modulo complesso, il modulo di rigidezza e il modulo resiliente.

Il **modulo complesso** è il parametro più indicato per rappresentare il comportamento visco-elastico dei conglomerati bituminosi: si tratta di un numero complesso in cui la

parte reale esprime la rigidità elastica correlata al lavoro reversibile compiuto (modulo di restituzione) e la parte immaginaria rappresenta il comportamento viscoso e riassume il lavoro irreversibile (modulo di dissipazione). Dalla UNI EN 12697-26 risulta che:

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} = E_1 + E_2$$

Il **modulo di rigidità** caratterizza la capacità di deformazione di una miscela in conseguenza delle tensioni derivate dall’applicazione di un carico; definisce il comportamento meccanico dei conglomerati bituminosi. La sua espressione si trova sempre nella UNI EN 12697-26, ed è data dal valore assoluto del modulo complesso:

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} = \sqrt{E_r^2 + E_d^2}$$

Mentre il modulo complesso è determinato considerando la sollecitazione di compressione indotta dal pneumatico nel materiale immediatamente sottostante, il **modulo resiliente** si ottiene analizzando la sollecitazione di trazione indotta dalla coesione interna nel materiale immediatamente adiacente a quello sottoposto a compressione. Esso si definisce come il rapporto tra lo sforzo applicato e la deformazione recuperabile (o resiliente) a seguito della rimozione dello sforzo stesso:

$$M_r = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

In questo studio si è scelto di valutare quest’ultimo modulo; per determinare il modulo resiliente i campioni vengono prima immersi per 24 ore in acqua a 60°C poi per 2 ore in acqua a 25°C. Anche in questo caso la compattazione giratoria con angolo di 1,25° fornisce i risultati più attendibili: il valore del modulo resiliente ottenuto è più alto rispetto a quello delle altre prove e più simile al valore effettivo raggiunto in sito. La metodologia che presenta i risultati più lontani da quelli relativi al terreno indisturbato è la compattazione impulsiva Marshall (figura 3.13).

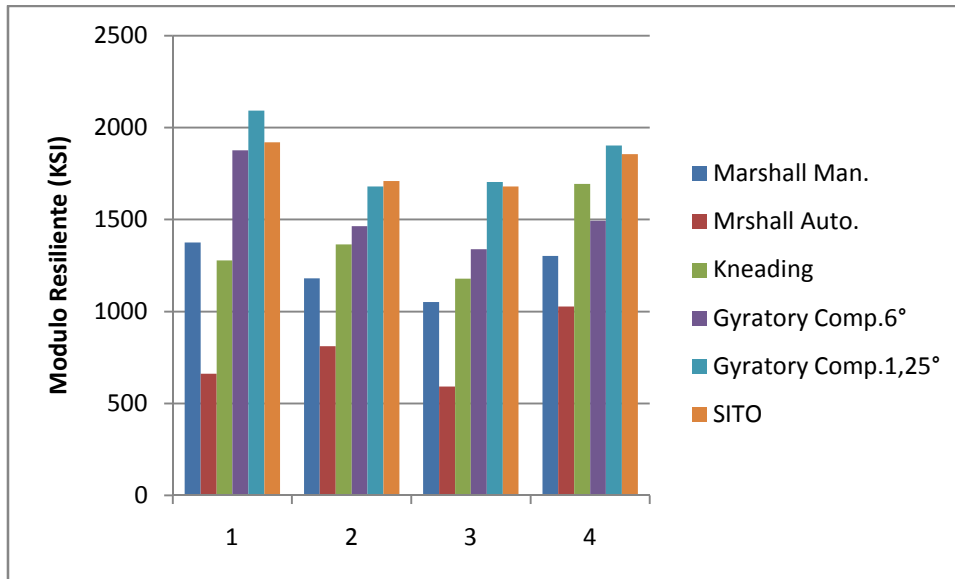


Figura 3.13 – Modulo Resiliente.

La Pressa Giratoria fornisce inoltre un indice di durabilità (modulo immerso/modulo secco) molto simile a quello relativo al terreno in sito (Figura 3.14).

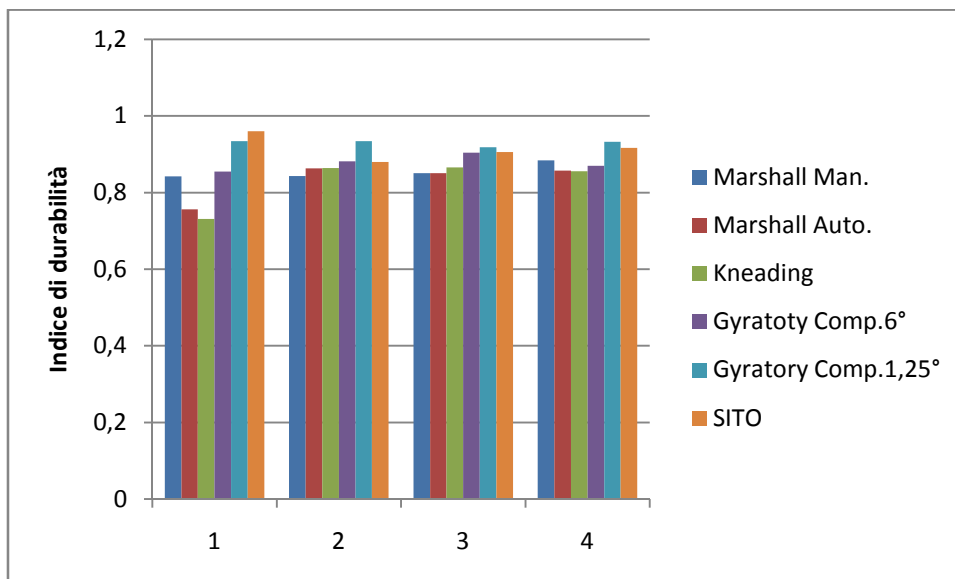


Figura 3.14 – Indice di Durabilità.

Infine la prova di creep viene utilizzata per valutare la suscettività alla deformazione e la resistenza sotto carichi prolungati. Il test si esegue ad una temperatura di 60°C e i risultati vengono forniti in termini di deformazione elastica e viscoelastica.

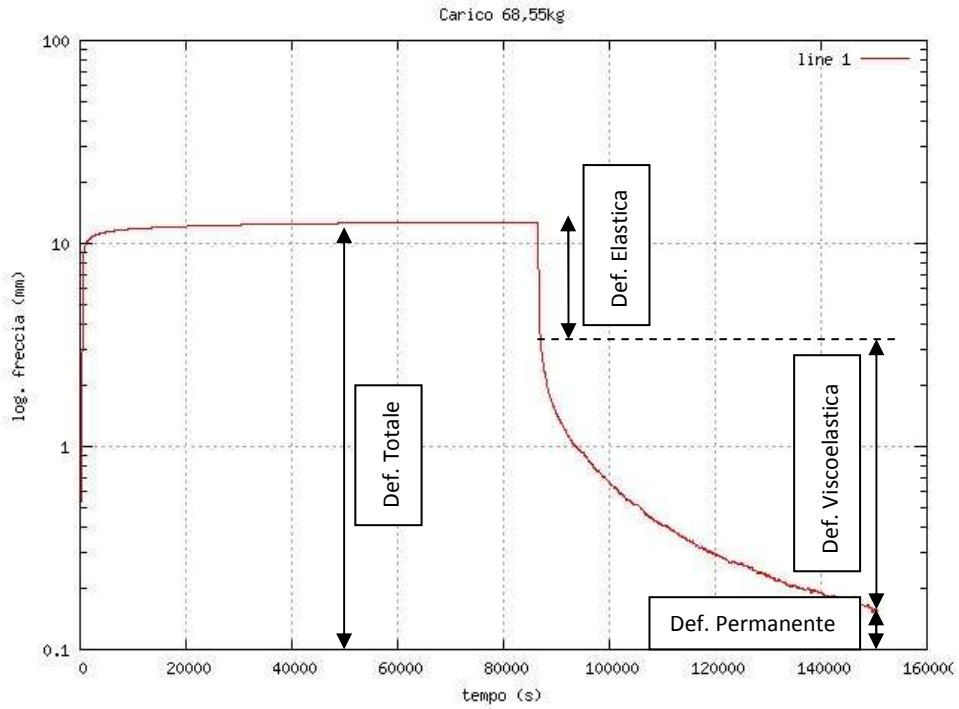


Figura 3.15 – Esempio output prova di creep statico.

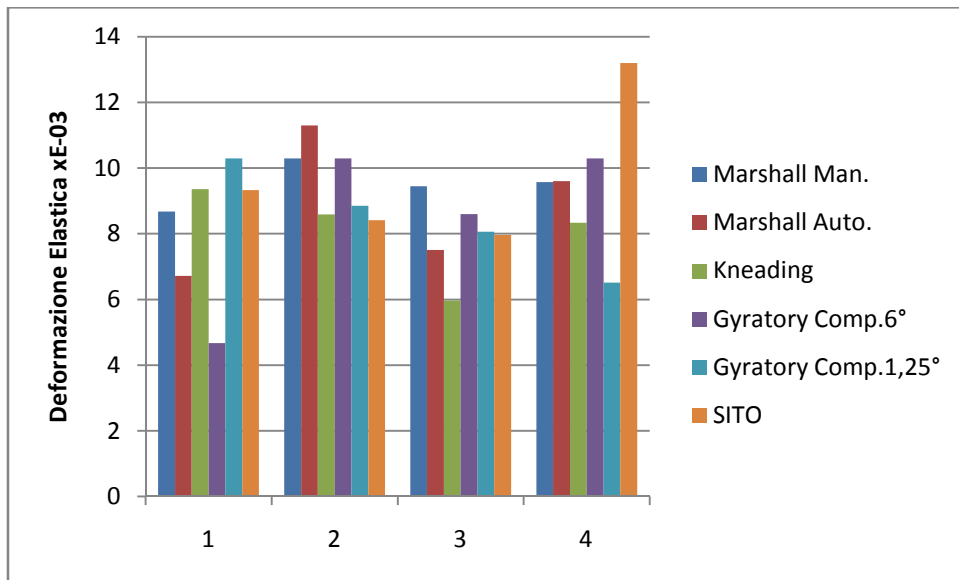


Figura 3.16- Deformazione Elastica.

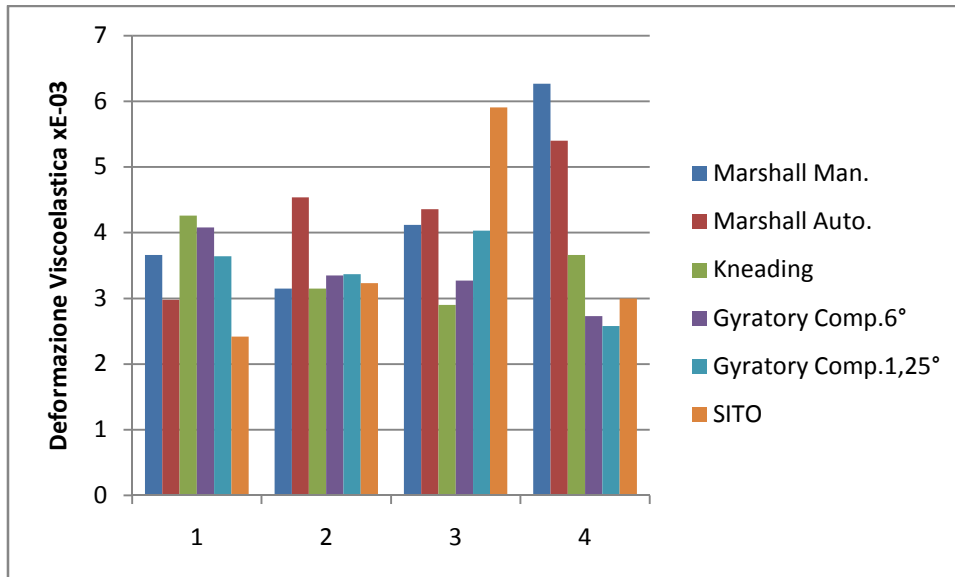


Figura 3.17- Deformazione Viscoelastica.

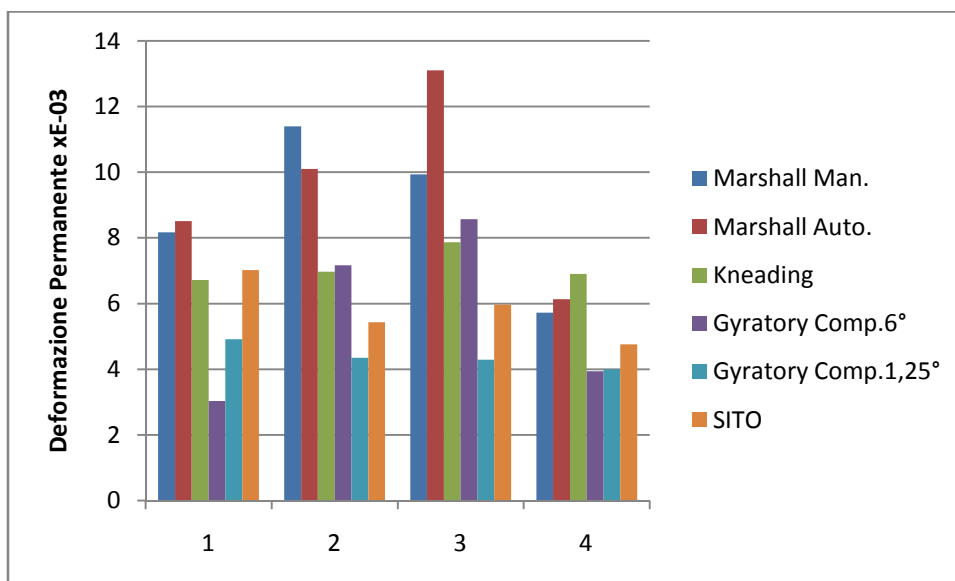


Figura 3.18 - Deformazione Permanente.



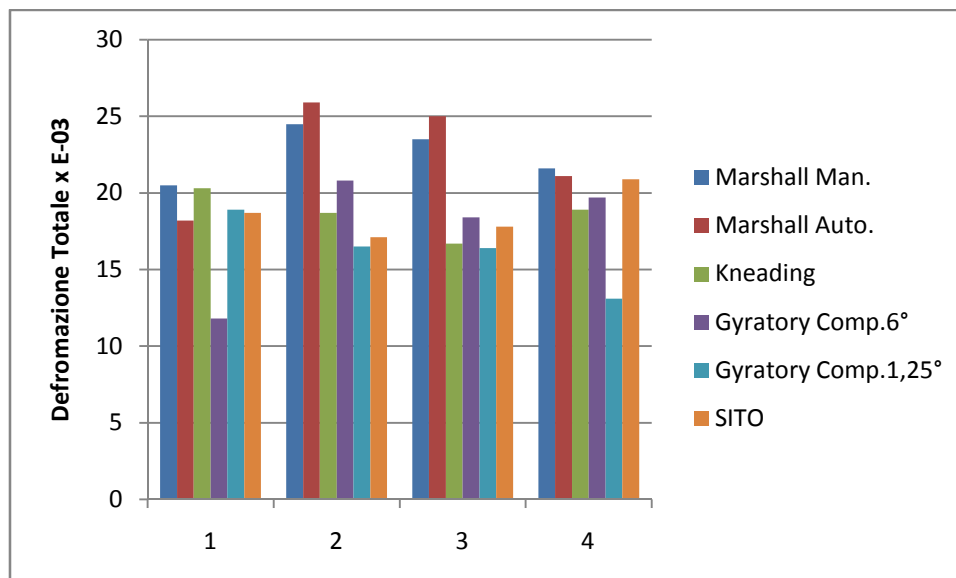


Figura 3.19 - Deformazione Totale.

Confrontando le varie metodologie di costipamento utilizzate in laboratorio con le caratteristiche rilevate in sito si evince ancora una volta che la compattazione giratoria con angolo di 1,25° risulta essere quella che meglio approssima l’azione dei rulli da cantiere (figure 3.16, 3.17, 3.18 e 3.19).

Dalla totalità delle prove effettuate emerge quindi la superiorità della Pressa Giratoria nell’ottenere caratteristiche volumetriche fedeli a quelle rilevate in sito. La compattazione Marshall risulta essere quella più scarsamente rappresentativa del costipamento effettuato mediante rulli; ciò è una diretta conseguenza dell’assenza di un’azione “impastante” dovuta all’applicazione di un carico impulsivo. A conclusioni simili erano giunti anche Consuergra et al. nello studio “*Comparative evaluation of laboratory compaction devices based on their ability to produce mixtures with engineering properties similar to those produced in the field*”.

Si è visto che durante il processo di addensamento con la Pressa Giratoria il materiale testato subisce una continua riorganizzazione interna dei suoi componenti <sup>[10]</sup> Lo scheletro litico formato dall’aggregato si addensa sempre di più all’aumentare del numero dei giri del compattatore. La rotazione disassata della fustella e la variabilità degli assi lungo cui agiscono le tensioni principali durante la compattazione fanno sì che sulla miscela venga esercitata un’azione “impastante”. Ciò consente di ottenere, rispetto

alle altre metodologie di compattazione di laboratorio, un maggior numero di campioni aventi proprietà volumetriche analoghe a quelle che il medesimo materiale possiede in sito. Le considerazioni sin qui riportate relative alle differenze tra la compattazione di tipo impulsivo e quella di tipo “impastante” valgono in generale e quindi non solo per i conglomerati bituminosi ma anche per i terreni. Nel campo dei terreni la prova attualmente utilizzata per compattare il materiale in laboratorio è la prova Proctor, essa fornisce un costipamento di tipo impulsivo che risulta, come nel caso della compattazione Marshall, scarsamente rappresentativo delle sollecitazioni fornite dai rulli. Partendo da queste problematiche, nello studio descritto in seguito, Lee Prezzi e Kim hanno cercato di estendere all’addensamento dei terreni l’utilizzo della Pressa Giratoria, attualmente non normalizzata per questo scopo.

3.1.3.2. “Subgrade design parameters from samples prepared with different compaction method” di Lee, Prezzi e Kim<sup>[11]</sup>

Come precedentemente accennato la prova di compattazione di laboratorio più utilizzata è attualmente la prova impulsiva Proctor. Tuttavia c’è una grande differenza tra la resistenza a taglio e la rigidità dei campioni preparati in laboratorio utilizzando tale prova e quelli prelevati in sito e compattati con rulli da cantiere.

Ciò implica che si possano commettere errori nella valutazione delle caratteristiche dei terreni di sottofondo. Per migliorare il processo di progettazione devono quindi essere sviluppate prove di laboratorio che permettano di ottenere un grado di compattazione assimilabile a quello presente in sito.

In questo studio la tradizionale prova Proctor viene confrontata con la Pressa Giratoria, che è stata originariamente introdotta per la compattazione dei conglomerati bituminosi; i risultati ottenuti da tali metodologie vengono poi confrontati con quelli ottenuti in sito. Vengono presi in esame due tipologie di terreno, entrambi a matrice sabbiosa:

- SM: -  $W_{ott} = 17,7\%$
  - $\gamma_{smax} = 17,4 \text{ kN/m}^3$
  - $W_{ott} = 15,2\%$
  - $\gamma_{smax} = 18,8 \text{ kN/m}^3$
- |   |                      |
|---|----------------------|
| } | Proctor Tradizionale |
| } | Proctor Modificata   |

<ul style="list-style-type: none"> <li>• SW: - <math>W_{ott} = 12,4\%</math></li> <li>- <math>\gamma_{smax} = 19,6 \text{ kN/m}^3</math></li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>W_{ott} = 9,8\%</math></li> <li>- <math>\gamma_{smax} = 20,6 \text{ kN/m}^3</math></li> </ul>	

Per quanto riguarda la Pressa Giratoria per ottenere la densità raggiunta in sito sono state utilizzate varie combinazioni di pressione verticale (20, 50, 100, 200, 400 e 600 kPa), numero di giri (da 0 a 500) e diametro dei provini (100 e 150 mm); l’angolo di inclinazione è stato mantenuto costante e pari a  $1,25^\circ$ . Tutti i provini sono stati confezionati all’umidità ottima fornita dalla prova Proctor.

Considerando le varie apparecchiature di compattazione utilizzate in cantiere si è stimato che lo sforzo esercitato da un rullo vibrante è pari a circa 600 kPa, mentre quello relativo ad un rullo gommato tandem è di 400 kPa; si è quindi deciso di adottare tali valori di pressione verticale per la Pressa Giratoria.

Una volta terminata la compattazione in sito, ad opera di un rullo vibrante, sono stati prelevati campioni di terreno da diversi punti e portati in laboratorio per sottoporli a vari test. Le caratteristiche dei provini compattati in laboratorio con le due differenti metodologie e quelli prelevati in sito sono state studiate mediante le seguenti prove:

- Scanner Microscopico Elettronico;
- Prova di compressione non confinata;
- Prova di taglio diretto;
- Creep statico.

Attraverso uno scanner microscopico elettronico si è studiato l’assestamento delle particelle e la densità raggiunta nei due campioni costipati in laboratorio e in quello indisturbato prelevato in sito. Il terreno compattato con la metodologia AASTHO Mod. risulta essere il più addensato. Si deduce che tale modalità di compattazione fornisce un’energia troppo elevata al terreno, la Pressa giratoria invece crea un addensamento molto simile a quello del campione costipato in sito dal rullo vibrante. Lo scanner rileva inoltre una sostanziale differenza nella disposizione delle particelle che risulta dalla compattazione statica e da quella meccanica.

La resistenza a compressione con espansione laterale libera (ASTM 2166) raggiunta dal provino compattato con modalità Proctor sovrastima tale parametro rispetto alle condizioni in sito. La compattazione statica giratoria fornisce invece valori molto simili a quelli ottenuti dal rullo vibrante.

La prova a taglio diretto (ASTM 3080) viene utilizzata per calcolare la coesione  $c$  e l'angolo di attrito interno del terreno  $\phi$ . I provini compattati mediante Pressa Giratoria presentano valori di tali parametri analoghi a quelli misurati in sito.

L'ultimo test descritto in questo studio è la prova di creep statico, anche in questo caso la metodologia di compattazione che ricalca in maniera più fedele ciò che accade in sito è la Pressa Giratoria, essa fornisce infatti valori di deformazione più attendibili rispetto a quelli dovuti alla compattazione impulsiva.

La totalità delle prove effettuate all'interno di questo studio ha affermato la superiorità della compattazione statica giratoria rispetto a quella dinamica Proctor. La prima risulta infatti più rappresentativa delle caratteristiche del terreno in sito, ottenute mediante compattazione con rullo vibrante. Inoltre la compattazione impulsiva spesso sovrastima le proprietà del terreno rispetto a quelle effettivamente raggiunte in sito.

### 3.2. CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)

Per le modalità di esecuzione di tale prova si fa riferimento alla norma UNI EN 13286-47 del 2004, anche la UNI 10009 descrive il procedimento in maniera molto simile: in entrambi i casi si tratta di una prova a gradiente di velocità di carico costante.

L'indice di portanza californiano (CBR) di una terra è il rapporto, espresso in percentuale, fra il carico necessario a far penetrare un pistone di dimensioni normate all'interno di un provino confinato in una fustella metallica ed un carico di riferimento.

La normativa stabilisce le dimensioni dello stampo in cui deve essere contenuto il provino e le modalità di compattazione dello stesso; si riportano in seguito tali indicazioni.

La fustella di prova deve essere fissata alla base corrispondente e su di essa deve essere montato il relativo collare. All'interno della fustella deve essere collocato il disco spaziatore, e su di esso deve essere posto uno spesso filtro di carta; il filtro fa sì che durante l'estrazione la parte superficiale del provino non rimanga attaccata allo stampo.



Figura 3.20 – Stampo Proctor, collare e disco spaziatore utilizzati per la compattazione dei provini da sottoporre a prova CBR.

Il materiale deve essere inserito nella fustella e compattato utilizzando la metodologia Proctor, secondo la modalità standard o modificata.

Una volta eseguita la compattazione il collare deve essere rimosso e la superficie del provino deve essere livellata mediante l'ausilio di un raschietto. Se durante questa operazione si formano cavità sulla superficie del provino, esse devono essere riempite con materiale fine.

Successivamente la base della fustella deve essere rimossa dal fondo e montata sull'altra estremità del provino; eseguita questa operazione viene tolto anche il disco spaziatore e lo stampo viene capovolto. La fustella deve essere poi posizionata al centro della piastra inferiore del macchinario di prova e, sulla superficie da testare, si colloca un pesante disco forato i cui compiti sono di agevolare le operazioni di centramento del pistone e di evitare il rifluimento laterale di materiale.

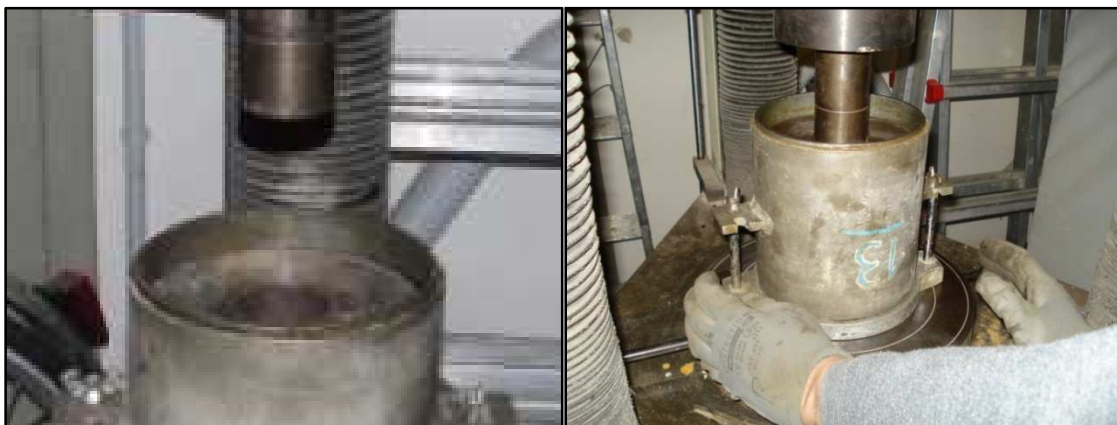


Figura 3.21 e 3.22 – Posizionamento stampo Proctor all'interno dell'apparato di prova CBR.

Nello studio descritto nei seguenti capitoli vengono sottoposti a prova CBR non solo provini compattati mediante prova Proctor, ma anche provini compattati utilizzando la Pressa Giratoria. Ciò risulta possibile in quanto la differenza di 2 mm fra i diametri interni degli stampi utilizzati dai due macchinari è considerata trascurabile.

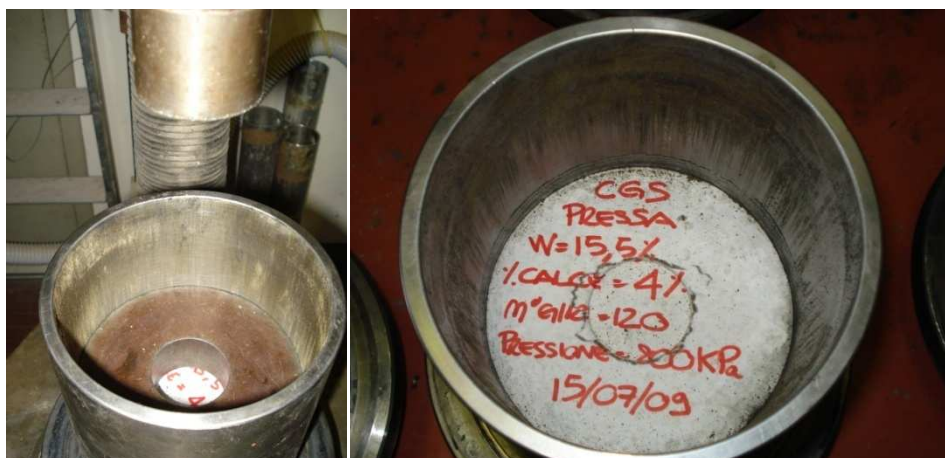


Figura 3.23 e 3.24 – Posizionamento stampo Pressa Giratoria all'interno dell'apparato di prova CBR e aspetto di un provino al termine della prova.

A seconda del tipo di materiale testato, e quindi a seconda dell'indice CBR che ci si aspetta di ottenere, si applica un diverso precarico iniziale:

- Indice CBR  $\leq 5\%$  : 10N
- Indice CBR  $> 5\%$  : 40N

Il carico viene applicato dal pistone il modo tale che il gradiente di velocità risulti costante e pari a 1,27 mm/min.



Figura 3.25 – Pannello di controllo dell'apparato di prova CBR e calcolatore collegato alla stampante per l'elaborazione della curva sforzo-deformazione.

Il macchinario di prova fornisce in output un diagramma in cui in ordinata è riportato il carico applicato e in ascissa la deformazione corrispondente. Oltre al diagramma sforzi – deformazioni nel modulo fornito dal macchinario sono registrati:

- Data e ora di esecuzione della prova;
- Codice del provino testato;
- $d$  = diametro del pistone;
- $S_o$  = area di base del pistone;
- $V$  = velocità di prova;
- $F_m$  = carico ultimo applicato al provino prima di arrestare la prova;
- $R_m$  = resistenza calcolata in riferimento ad  $F_m$ ;
- Abbassamento del provino in corrispondenza di  $F_m$ .

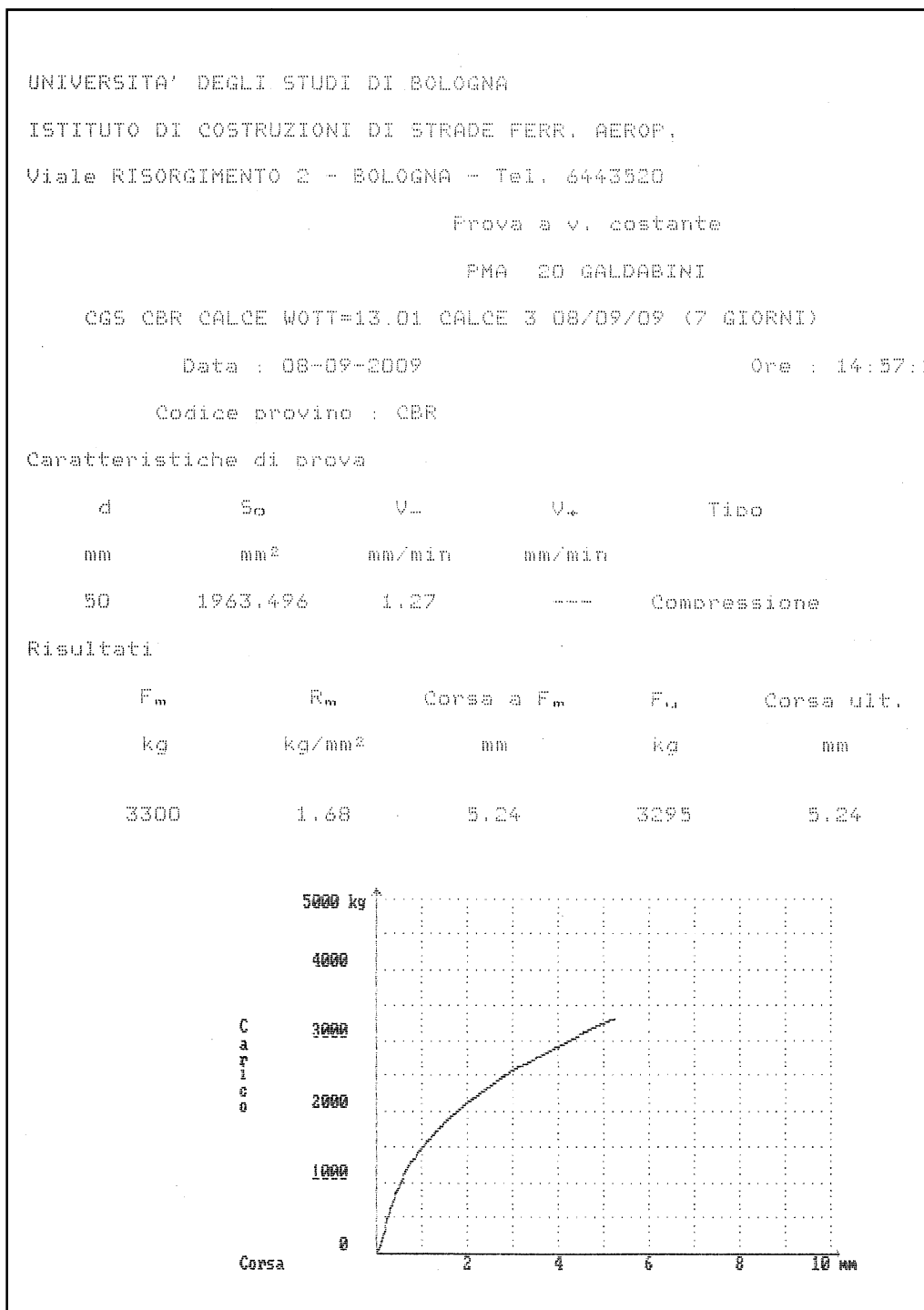


Figura 3.26 – Output del macchinario di prova: curva sforzi - deformazioni corretta.

La curva sforzi – deformazioni è da considerarsi corretta se il suo andamento risulta convesso sin dall’origine, se invece essa risulta concava nel tratto iniziale allora necessita di correzione. La correzione viene effettuata tracciando la tangente alla curva nel punto di massima pendenza; l’intersezione tra la tangente e l’asse delle ascisse



diventa così la nuova origine degli assi. Una curva inizialmente concava può essere dovuta ad irregolarità presenti sulla superficie del provino od a materiale grossolano incontrato durante la penetrazione.

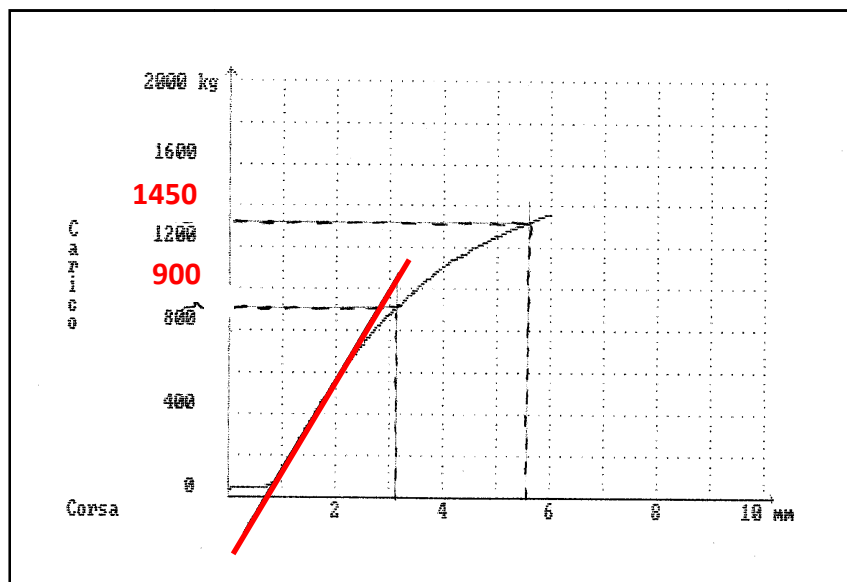


Figura 3.27 – Esempio di correzione di una curva sforzo-deformazione inizialmente concava.

Dalla curva si ricavano i due valori di carico che danno luogo ad abbassamenti di 2,5 mm e 5 mm. L’indice CBR è il maggiore dei rapporti percentuali tra questi valori di carico e due valori di riferimento, rispettivamente 13,2 kN e 20 kN. Quanto descritto finora riguarda la norma UNI EN 13286-47 del 2004, dove la forza viene espressa in Newton. Nella norma UNI 10009 il carico applicato al provino viene invece espresso in kg (vedi figure 3.26 e 3.27) e i due valori di riferimento in base ai quali vengono calcolati i rapporti percentuali sono rispettivamente 1360 kg e 2040 kg.



Figura 3.28 – Provino sottoposto a prova CBR

### 3.3. **PROVA DI RESISTENZA A COMPRESSIONE**

La prova di resistenza a compressione in condizioni di espansione laterale libera viene descritta nella normativa UNI – EN 13286-41 del 2003 e consiste nel sottoporre un provino ad una forza di compressione fino a rottura; il carico massimo sostenuto dal provino viene registrato e da esso si calcola il valore di resistenza a compressione. Per le modalità di esecuzione di tale prova si può far riferimento anche alla norma CNR B.U. 36/73 “*Stabilizzazione delle terre con calce*”, che rimanda alla CNR B.U. 29/72 “*Norme sui misti cementati*”. La differenza principale tra la norma UNI – EN e la CNR consiste nelle unità di misura utilizzate, nella prima infatti le forze vengono espresse in Newton, mentre nella seconda in chilogrammi.

L’apparato di prova utilizzato per la determinazione della resistenza a compressione deve essere dotato di due piastre di carico in acciaio; esse devono essere caratterizzate da una durezza Rockwell di almeno 55 HRC per una profondità di 5 mm.



Figura 3.29 – Apparato di prova.

Il diametro delle piastre di carico deve essere maggiore, o al limite uguale, a quello del provino da testare.



Figura 3.30 – Posizionamento provino.

La piastra superiore deve essere collegata al macchinario di prova mediante una sede sferica, di diametro non superiore a 150 mm. L'accoppiamento piastra – sede sferica è progettato in modo da facilitare l'allineamento tra piastra e provino, e da bloccarsi non appena il carico esercitato comincia ad aumentare. Prima di eseguire la prova è necessario accertarsi che tutte le superfici del macchinario siano asciutte e pulite e che le facce del provino risultino prive di irregolarità o eccessi di umidità. Il provino deve essere posizionato al centro della piastra inferiore, con una precisione pari all'1% del diametro di progetto del provino.

La prova di resistenza a compressione è una prova in controllo di carico; il gradiente di velocità di carico deve esser tale da provocare la rottura del provino in un intervallo di tempo che vada da 30 a 60 secondi dall'inizio della prova.



Figure 3.31 e 3.32 – Provino sottoposto alla prova di resistenza a compressione.

Si definisce resistenza a compressione ( $R_C$ ) il rapporto tra il carico necessario per rompere un provino e l'area di base corrispondente, da cui la formula:

$$R_C = \frac{P_F}{A_b}$$

dove:

$R_C$  = resistenza a compressione ( $N/mm^2$ )

$P_F$  = carico massimo sostenuto dal provino (N)

$A_B$  = area di base del provino testato ( $mm^2$ ).

Se le dimensioni reali del provino differiscono da quelle di progetto di una quantità che varia tra -0,5% e 0,5%, per il calcolo della resistenza a compressione si utilizza l'area di base di progetto. Se invece le dimensioni reali non rientrano all'interno di questo intervallo di tolleranza il calcolo viene effettuato considerando l'area reale del provino. Come nel caso della prova CBR anche per la resistenza a compressione il macchinario fornisce in output una curva sforzi – deformazioni (figura 3.33).

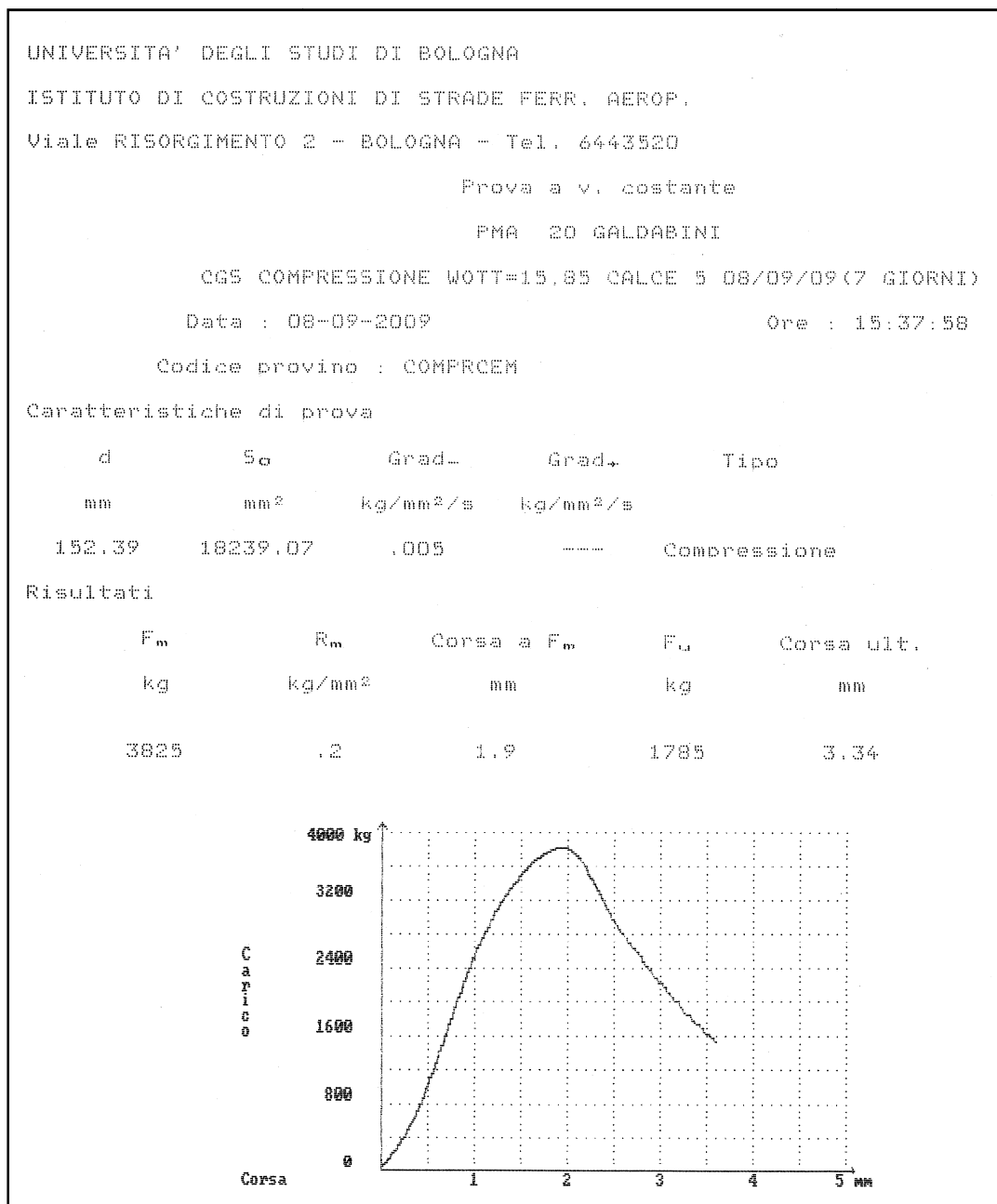


Figura 3.33 – Output del macchinario di prova: curva sforzi-deformazioni.

Oltre alla curva sforzi-deformazioni il modulo riporta:

- Data e ora di esecuzione della prova;
- Codice del provino testato;
- d = diametro del provino;
- S<sub>0</sub> = area di base del provino;

- Gradiente velocità di carico;
- $F_m$  = carico di rottura del provino;
- $R_m$  = resistenza a compressione del provino;
- Deformazione del provino in seguito all'applicazione del carico  $F_m$ ;
- $F_u$  = carico ultimo applicato al provino prima di arrestare la prova;
- Deformazione del provino in corrispondenza di  $F_u$ .

La normativa distingue tra tipologie di rottura soddisfacenti e insoddisfacenti. Per provini cilindrici la rottura è considerata soddisfacente se avviene secondo uno dei modi in figura 3.34:

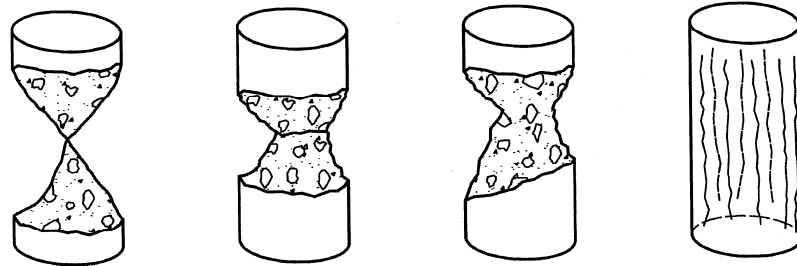


Figura 3.34 – Tipologie di rotture soddisfacenti.

Si ritengono invece insoddisfacenti le modalità di rottura riportate in figura 3.35:

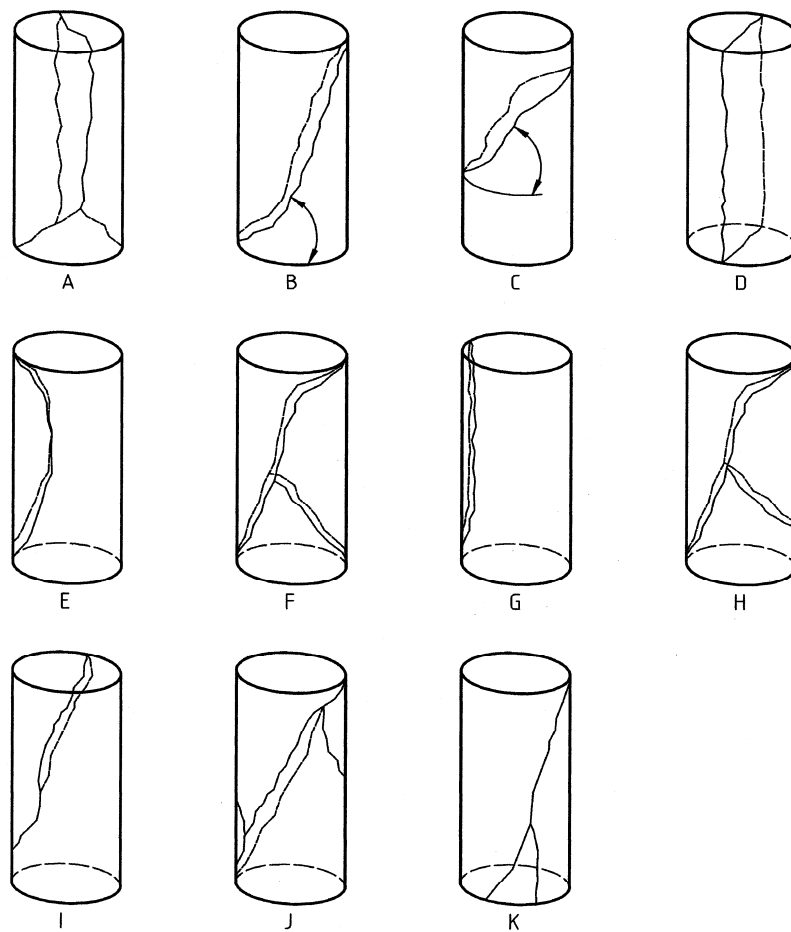


Figura 3.35 – Tipologie di rotture non soddisfacenti.

## **Capitolo 4 – DEFINIZIONE DELLE PROCEDURE SPERIMENTALI**

La percentuale di calce e la quantità di acqua con cui effettuare l'impasto in una stabilizzazione a calce vengono determinate sperimentalmente in laboratorio sulla base di prove meccaniche, CBR e resistenza a compressione, e di prove di costipamento.

I valori dell'indice CBR, della resistenza a compressione e le curve densità secca-umidità ottimale (AASHO Mod.) relative ai risultati di prove condotte su miscele sperimentali confezionate con diverse percentuali di calce e diversi tenori di umidità, permettono di determinare la miscela ottimale terra – calce – acqua.

### **4.1. INTRODUZIONE**

Con la presente sperimentazione si vuole valutare la possibilità di sostituire, nello studio della miscela ottimale acqua – terra – calce, il compattatore impulsivo Proctor con un macchinario statico che meglio approssima le sollecitazioni indotte dai rulli da cantiere: la Pressa Giratoria. Si vuole pervenire alla progettazione definitiva della miscela attraverso la realizzazione di provini confezionati con diversi tenori di umidità e diverse percentuali di calce; le caratteristiche meccaniche di tali provini verranno confrontate mediante prove meccaniche di resistenza a compressione e di portanza CBR. La minor percentuale di calce che permetterà di ottenere prestazioni superiori ai limiti contenuti nei capitolati prestazionali sarà quella da utilizzare nella stabilizzazione.

Le prove di prequalifica precedentemente effettuate hanno stabilito che il tenore di calce da aggiungere preliminarmente nella stabilizzazione è pari al 3% (CIC); per determinare l'umidità ottimale del terreno si è effettuata una prova Proctor (in conformità con la norma CNR BU 69/72) sul materiale vergine, la densità secca massima  $\gamma_{s,max} = 1,893 \text{ g/cm}^3$  è stata raggiunta in corrispondenza del 12,12% di umidità <sup>[7]</sup>.



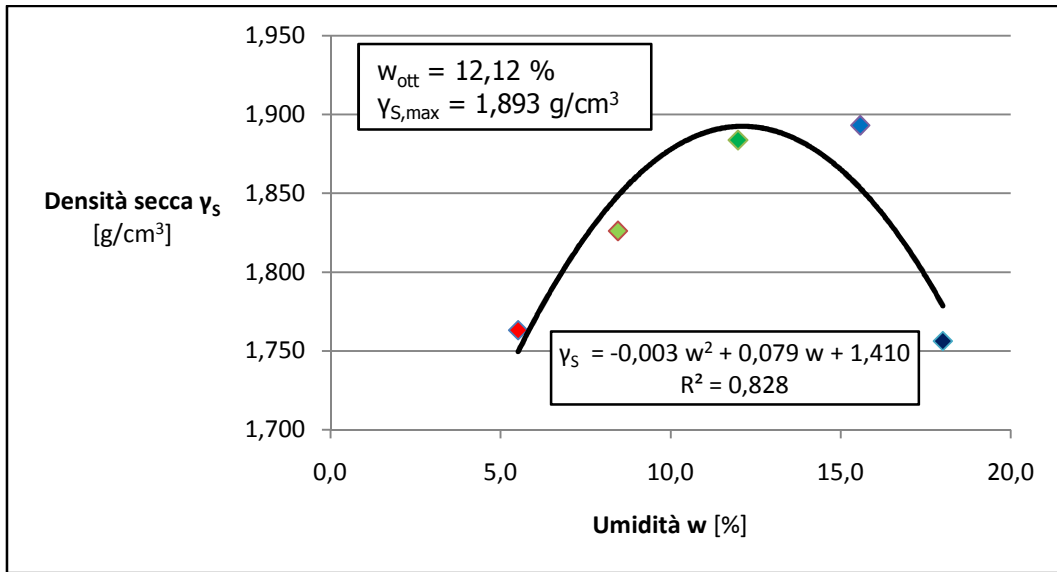


Figura 4.1 - Risultati prova Proctor sul terreno C.

Per lo studio della miscela ottimale si è scelto di confezionare 24 provini, 12 dei quali verranno compattati mediante prova Proctor e 12 utilizzando la Pressa Giratoria. Tali provini saranno caratterizzati da diversi tenori di umidità e diverse percentuali di calce, secondo il seguente schema:

Tabella 4.1 – Schema di realizzazione dei provini.

%calce	W=12,50%	W=12,50%	W=12,50%	W=12,50%
3	1° serie	2° serie	3° serie	4° serie
4				
5				

Nella realizzazione dei provini e nell'esecuzione delle prove meccaniche e di costipamento si è scelto di procedere per serie mantenendo costante il tasso di umidità e variando la percentuale di calce.

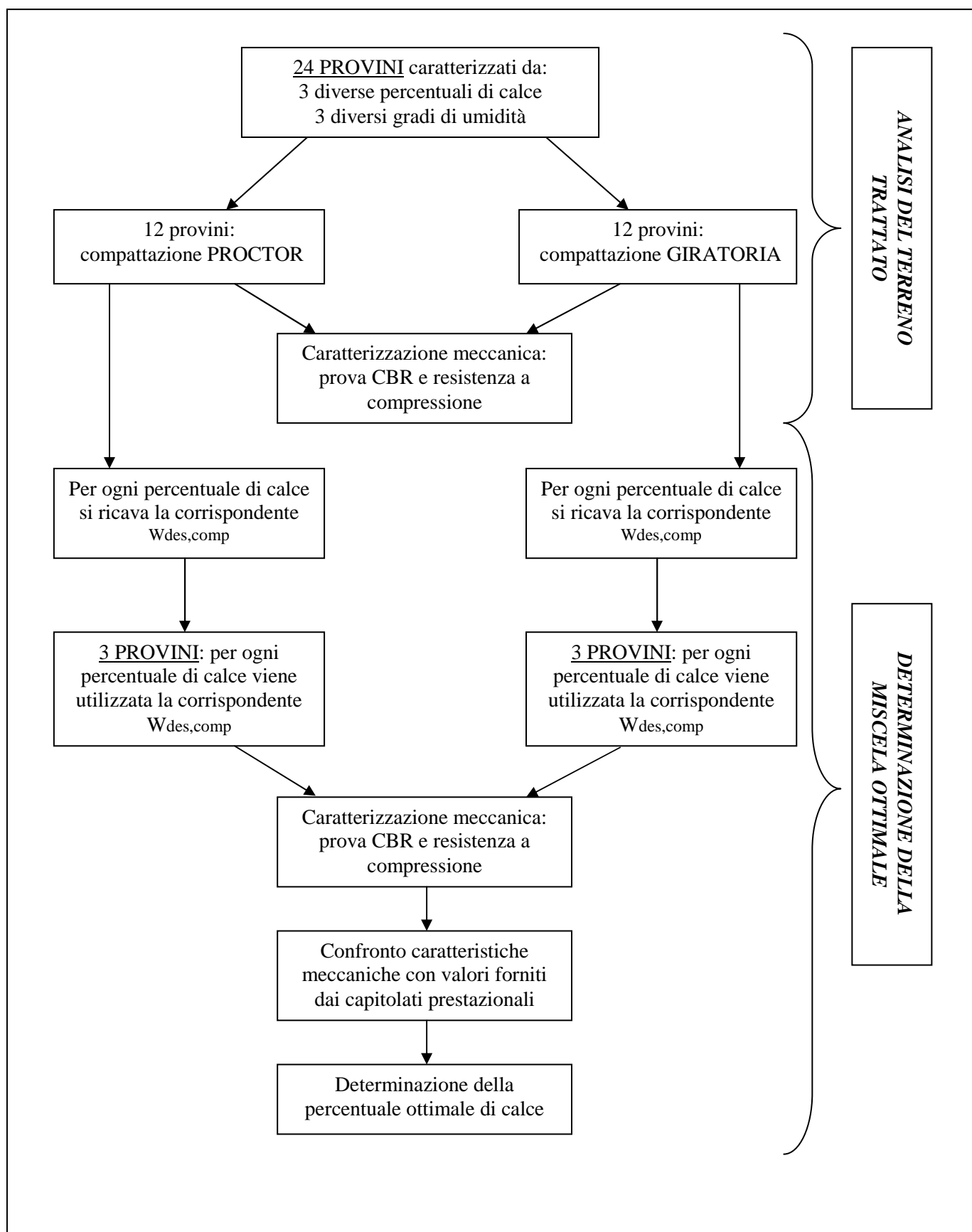


Figura 4.2 – Flow chart riassuntiva della sperimentazione.

## ***4.2. PROCEDIMENTO OPERATIVO PER LA REALIZZAZIONE DEI PROVINI***

### ***4.2.1. Umidificazione e miscelazione***

La procedura utilizzata per il confezionamento dei provini vuole riprodurre al meglio l'ordine e i tempi delle lavorazioni in sito, in modo da ottenere risultati maggiormente attendibili ed aderenti alla realtà. Tale procedura viene analiticamente descritta in seguito.

- 1) Essiccare il materiale in forno a  $110\pm 5^{\circ}\text{C}$  disteso su teglie (figura 4.3).



Figura 4.3 – Essiccazione in forno delle porzioni di prova.

- 2) Pesare porzioni di prova di 5000 g, superiori di almeno 1000 g rispetto alla quantità di materiale necessario per eseguire la prova di compattazione (figura 4.4).



Figura 4.4 – Pesatura delle porzioni di prova di materiale secco da umidificare.

- 3) Pesare l'acqua necessaria a raggiungere un umidità nominale pari all'8%, valore che si considera vicino alle condizioni del terreno in sito. Per ottenere il valore preciso versare l'acqua da un cilindro graduato e correggere con uno spruzzino. In realtà in questa fase si può eccedere leggermente nella quantità di acqua da aggiungere, perché nel caso in cui la vasca di miscelazione risulti asciutta, parte dell'acqua destinata all'umidificazione del terreno potrebbe essere assorbita dalle pareti.

- 4) Umidificare la porzione di prova utilizzando un cilindro graduato ed un secchio con la base forata, in modo da distribuire l'acqua il più uniformemente possibile. Anche il secchio potrebbe assorbire parte dell'acqua destinata all'umidificazione del campione e per tale ragione è consigliabile umidificarlo precedentemente (figure 4.5 e 4.6).



Figure 4.5 e 4.6 - Umidificazione della porzione di prova ed attrezzatura utilizzata.

- 5) Ammucchiare da un lato della vasca di miscelazione la porzione di prova, coprirla con un nailon e fermare quest'ultimo con dei pesi, in modo da limitare al massimo la dispersione di umidità (figura 4.7).



Figura 4.7 - Porzione di prova coperta con nailon per evitare dispersione di umidità.

- 6) Lasciar riposare la porzione di prova per 30 minuti per ottenere una migliore uniformità dell'umidità.
- 7) Trascorsi 30 minuti misurare la temperatura della porzione di prova e prelevare un campione per la determinazione dell'umidità.

Per quest'ultima operazione vengono utilizzati recipienti metallici che sono stati precedentemente numerati e tarati. Tali contenitori vengono riempiti di materiale, ne viene registrato il peso lordo umido e vengono posti in forno per 12 ore. Dopo averli estratti dal forno i campioni vengono nuovamente pesati per determinare il peso lordo secco (figure 4.8 e 4.9).



Figure 4.8 e 4.9 - Taratura recipiente e pesatura porzione di prova destinata alla determinazione dell'umidità.

- 8) Pesare la quantità di calce necessaria per la miscelazione (figura 4.10).

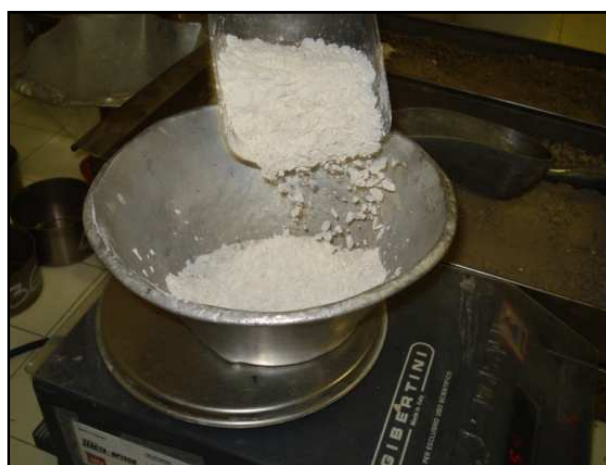


Figura 4.10 - Pesatura calce necessaria per la miscelazione.



- 9) Pesare la quantità di acqua necessaria per raggiungere l'umidità nominale; in questo caso la quantità di acqua da aggiungere deve essere esatta. Per la 4°serie, caratterizzata da un'umidità molto elevata (W: 21,5%), i 675 g di acqua necessari per raggiungere l'umidità nominale vengono aggiunti alla porzione di prova in due momenti successivi: 200 g prima della stesa della calce e 475 g durante la miscelazione.
- 10) 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 (figure 4.11, 4.12 e 4.13).



Figure 4.11, 4.12 e 4.13 - Stesa calce e aggiunta acqua di miscelazione.

- 11) Miscelare energicamente finché la miscela non risulta omogenea e il suo colore uniforme (figure 4.14 e 4.15).



Figure 4.14 e 4.15 - Miscelazione calce.

- 12) Al termine della miscelazione prelevare il secondo campione per la determinazione dell'umidità.

- 13) Lasciar riposare la porzione di prova per 30 minuti senza coprirla.
- 14) Misurare la temperatura per tutti i 30 minuti e registrare il valore massimo raggiunto.

La procedura descritta fino a questo momento viene seguita per tutti i 24 provini da confezionare, indipendentemente dalla modalità di compattazione. Da questo punto in avanti la procedura si differenzia a seconda della tipologia di compattazione utilizzata.

#### **4.2.2. Compattazione Proctor**

- 1) Numerare e tarare le fustelle necessarie per eseguire la prova Proctor.
- 2) Preparare le fustelle per la prova Proctor. Montare la fustella sulla corrispondente base e il collare sulla fustella. Ingrassare le pareti dello stampo e del collare affinché la porzione di prova, una volta compattata e maturata, possa essere agevolmente estratta riducendone il disturbo. Inserire il disco spaziatore all'interno della fustella, esso permette di ottenere provini di circa 11,7 cm di altezza, confrontabili con quelli ottenuti dalla compattazione mediante Pressa Giratoria (figure 4.16 e 4.17) .



Figure 4.16 e 4.17 - Ingrassamento fustella Proctor.



Porre sulla base del disco spaziatore un dischetto di carta per far sì che durante l'estrazione la parte superficiale del provino non rimanga attaccata allo stampo (figura 4.18).



Figura 4.18 - Dischetto di carta posto sulla base della fustella.

Questo problema si è verificato per i primi due provini della quarta serie (W: 21,5% calce: 3% e W: 21,5% calce: 4%) influenzando e compromettendo i risultati delle prove meccaniche. Si è deciso quindi di confezionare nuovamente tali provini ponendo sulla base del disco spaziatore un dischetto di carta aggiuntivo. Su ogni dischetto vengono annotate l'umidità nominale, la percentuale di calce ed il dispositivo utilizzato per compattare il provino.

- 3) Pesare il quantitativo di terreno contenuto nella cucchiaino che viene utilizzata per la prova Proctor; questa operazione è fondamentale per conoscere quante volte sarà necessario riempire la cucchiaino per ottenere uno strato.
- 4) Trascorsi 30 minuti prelevare, appena prima della compattazione, un campione di terreno per la terza determinazione di umidità.
- 5) Montare la fustella sul macchinario ed eseguire la prova Proctor (figura 4.19) assicurandosi che l'ultimo strato si venga a trovare ad una quota superiore rispetto a quella del collare (figura 4.20) ; ciò risulta necessario per garantire una

maggiore uniformità nella compattazione e l'indipendenza da eventuali effetti di bordo; il volume di terreno eccedente andrà successivamente rimosso tramite rasatura (figura 4.21).



Figure 4.19, 4.20 e 4.21 - Esecuzione prova Proctor e rasatura provino.

6) Pesare l'insieme di stampo, provino e fondo (figura 4.22).



Figura 4.22 - Pesatura provino compattato.

- 7) Coprire il provino con un sacchetto di plastica per evitare la carbonatazione della calce e lasciar riposare per 7 giorni (figura 4.23).



Figura 4.23- Conservazione provino.

- 8) Trascorsi 7 giorni scoprire il provino ed eseguire prova CBR (figure 4.24, 4.25 e 4.26) , tale prova consiste nel far penetrare all'interno del provino un pestello di 50 cm di diametro. Dal grafico pressione – abbassamento si registrano i valori della pressione relativi ad abbassamenti di 2,5 e 5 mm. L'indice CBR è il valore massimo tra

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



Figure 4.24, 4.25 e 4.26 - Macchinario CBR e provino sottoposto alla prova.

- 9) Al termine della procedura estrarre il provino dalla fustella ed eseguire la prova di resistenza a compressione ad espansione laterale libera (figure 4.27, 4.28 e 4.29) ; la normativa stabilisce che il provino debba rompersi all'interno di un intervallo di tempo che va da 30 a 60 secondi, per rispettare tale condizione si è assunto un gradiente pari a  $0,005 \text{ kg/mm}^2/\text{s}$ .



Figure 4.27, 4.28 e 4.29 - Provino sottoposto a prova di resistenza a compressione.

- 10) Una volta portato a rottura il provino prelevarne un campione dalla parte centrale per eseguire la quarta determinazione di umidità.

#### 4.2.3. Compattazione Giratoria

- 1) Preparare lo stampo della Pressa Giratoria. Ingrassare il fondo e le pareti interne dello stampo per diminuire l'attrito e permettere la rotazione senza sforzi eccessivi per la Pressa Giratoria (figura 4.30).



Figura 4.30 – Ingrassaggio dello stampo.

- 2) Inserire sul fondo dello stampo un dischetto di carta, esso ha il compito di garantire l'integrità della faccia inferiore del provino durante l'estrazione, evitando che rimanga attaccata allo stampo.
- 3) Pesare la porzione di prova umida con cui realizzare il campione, pari alla somma tra la massa secca, l'acqua necessaria per umidificarla fino all'umidità nominale e la quantità di calce necessaria per raggiungere la percentuale voluta (figura 4.31).



Figura 4.31 – Pesatura del materiale umido.

- 4) Inserire il materiale precedentemente pesato nello stampo con una cucchiaia o con un apposito imbuto facendo attenzione a non disperderlo (figura 4.32).



Figura 4.32 – Inserimento del materiale tramite una cucchiaia.

- 5) Posare sulla sommità del campione di prova un secondo dischetto di carta su cui vanno annotate le caratteristiche della miscela (umidità nominale e percentuale di calce) e i parametri fondamentali relativi alla prova (pressione e numero di giri). Tale dischetto deve inoltre assicurare che parte del materiale non rimanga incollato al coperchio quando quest'ultimo verrà rimosso (figura 4.33).

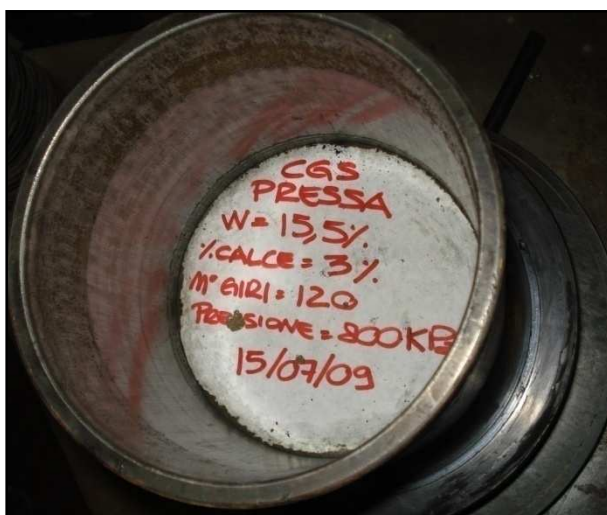


Figura 4.33 – Dischetto di carta.



- 6) Cospargere con polvere di grafite l'anello di rotazione dello stampo per diminuire l'attrito tra esso e le coppie di ruote che permettono la rotazione (figura 4.34).



Figura 4.34 – Applicazione della grafite.

- 7) Inserire lo stampo nella pressa, controllare le impostazioni ed iniziare la compattazione tramite gli appositi comandi (figura 4.35).



Figura 4.35 – Compattazione del provino.

- 8) Terminata la compattazione estrarre lo stampo dall'apparecchiatura di prova e rimuovere il coperchio (figura 4.36).



4.36 – Provino al termine della compattazione.

- 9) Coprire il provino con un sacchetto di plastica per evitare la carbonatazione della calce e lasciar riposare per sette giorni (figura 4.37).



Figura 4.37 - Conservazione provini.



- 10) Trascorsi sette giorni rimuovere il sacchetto di plastica ed eseguire la prova CBR, inserendo nel macchinario il provino all'interno dello stampo utilizzato per la compattazione giratoria (figure 4.38 e 4.39).

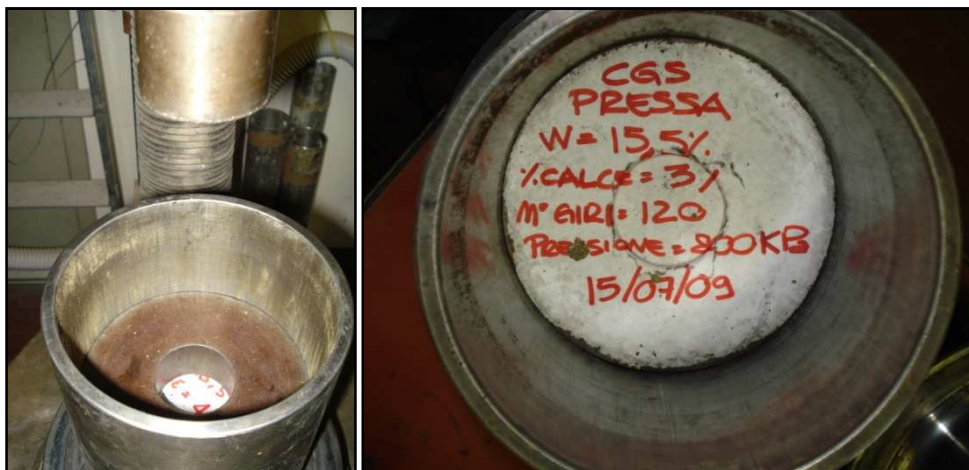


Figure 4.38 e 4.39 - Provino sottoposto a prova CBR.

- 11) Dopo aver eseguito la CBR estrarre il provino dallo stampo (figura 4.40).



Figure 4.40 - Estrazione del provino dallo stampo.

- 12) Eseguire la prova di resistenza a compressione ad espansione laterale libera assumendo, come nel caso della compattazione tramite Proctor, un gradiente pari a  $0,005 \text{ kg/mm}^2/\text{s}$  (figure 4.41 e 4.42).



Figure 4.41 e 4.42 - Provino sottoposto a prova di resistenza a compressione.

- 13) Una volta rotto il provino prelevarne un campione dalla parte centrale per eseguire l'ultima determinazione di umidità.

### **4.3. PROCEDURA PER LA DETERMINAZIONE DELL'ASSORBIMENTO DELL'ACQUA DI REAZIONE**

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 si è elaborata una seconda procedura in grado di ottenere risultati maggiormente accurati e verosimili. Sono state confezionate 12 porzioni di prova, ancora secondo la Tabella 4.1.

Le fasi della procedura sono le seguenti:

- 1) Essiccare il materiale in forno a  $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ .
- 2) Numerare e tarare le 12 capsule metalliche necessarie (figura 4.43).



Figure 4.43 - Taratura capsule.

- 3) Passare il materiale attraverso uno staccio con maglie di ampiezza pari ad 1 mm.
- 4) Pesare, all'interno delle capsule, 150g di materiale secco.

- 5) Pesare l'acqua necessaria a raggiungere l'8% in peso di umidità (figura 4.44).



Figure 4.44 - Pesatura acqua.

- 6) Umidificare la porzione di prova e amalgamare con una piccola spatola (figura 4.45).



Figure 4.45 – Strumentazione utilizzata.

- 7) Lasciar riposare per 30 minuti.
- 8) Pesare la quantità di calce necessaria (3%, 4%, 5%) per la miscelazione.
- 9) Pesare la quantità d'acqua necessaria per raggiungere l'umidità nominale.

10) Stendere la calce sulla porzione di prova (figura 4.46).



Figure 4.46 - Stesa calce.

11) Versare la quantità d'acqua precedentemente pesata e miscelare finché il terreno non assume un aspetto omogeneo (figure 4.47, 4.48 e 4.49).



Figure 4.47, 4.48 e 4.49 - Miscelazione calce.

12) Pesare la miscela realizzata (figura 4.50).



Figure 4.50- Pesatura campione.

13) Lasciar riposare la porzione di prova per 30 minuti (figura 4.51).

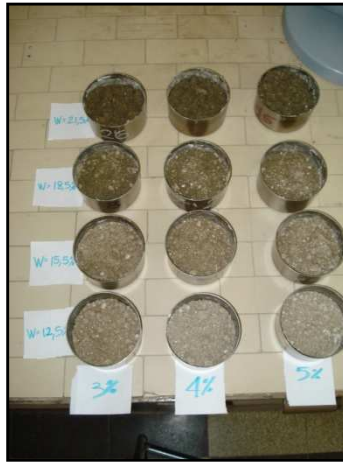


Figura 4.51 - Porzioni di prova.

14) Misurare la temperatura della miscela durante i 30 minuti di riposo e registrare il valore massimo raggiunto (figura 4.52).



Figure 4.52 - Misurazione temperatura.

15) Trascorsi 30 minuti pesare nuovamente le capsule.

16) Porre il campione in forno per 12 ore.

17) Pesare il materiale essiccato e registrare il peso lordo secco.

- 18) Elaborare un foglio Excel per calcolare l'umidità presente nel terreno al momento della miscelazione e subito prima della compattazione, e per analizzare l'andamento dell'umidità e della temperatura durante le fasi della stabilizzazione.

## **Capitolo 5 – ANALISI DEI DATI SPERIMENTALI**

Nel presente capitolo vengono analizzati i dati sperimentali ottenuti nei diversi passi della sperimentazione. Nel primo paragrafo sono riportati grafici che evidenziano l'andamento dell'assorbimento d'acqua e della temperatura all'interno delle varie fasi della stabilizzazione. Nel secondo paragrafo viene affrontata l'analisi volumetrica dei provini compattati mediante le due metodologie poste a confronto: prova Proctor e Pressa Giratoria. Infine, nell'ultima parte del capitolo vengono esaminati i dati relativi ai sei provini confezionati all'umidità ottimale di compattazione.

### **5.1. DETERMINAZIONE DELL'ASSORBIMENTO**

#### **5.1.1. Andamento del tenore di umidità durante le fasi della stabilizzazione**

Come già detto in precedenza il processo utilizzato per il confezionamento dei provini ricalca le operazioni che vengono eseguite in sito nel processo di stabilizzazione; si è quindi pensato di valutare la relazione tra la durata delle diverse lavorazioni e le variazioni di umidità. È stato creato un grafico per ogni umidità nominale fissata e si è evidenziato l'andamento tempo – umidità per le differenti percentuali di calce. Il modulo Excel elaborato al termine della procedura per la determinazione dell'assorbimento ha fornito i risultati riportati nelle figure 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4.



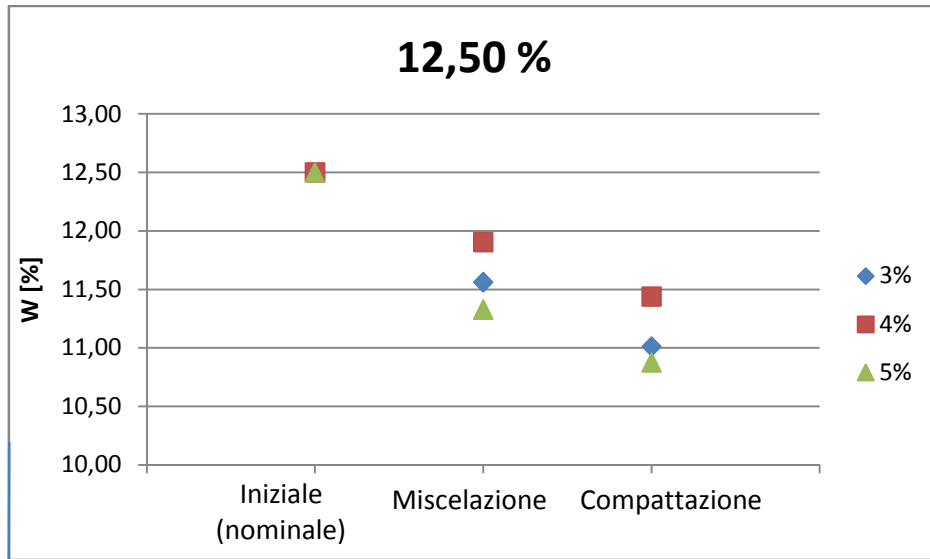


Figura 5.1 – Andamento del tenore di umidità durante le fasi di realizzazione della stabilizzazione per  $W_{nom} = 12,50\%$ .

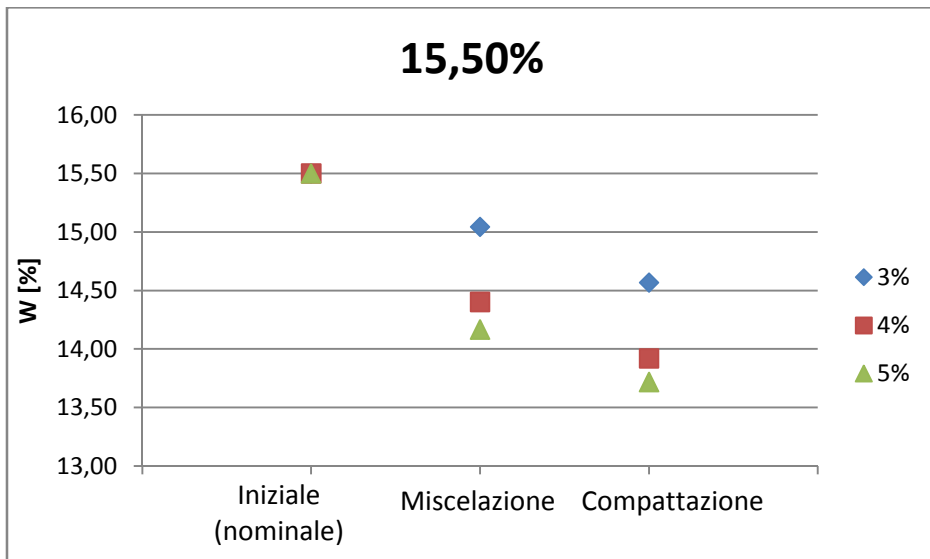


Figura 5.2 – Andamento del tenore di umidità durante le fasi di realizzazione della stabilizzazione per  $W_{nom} = 15,50\%$ .

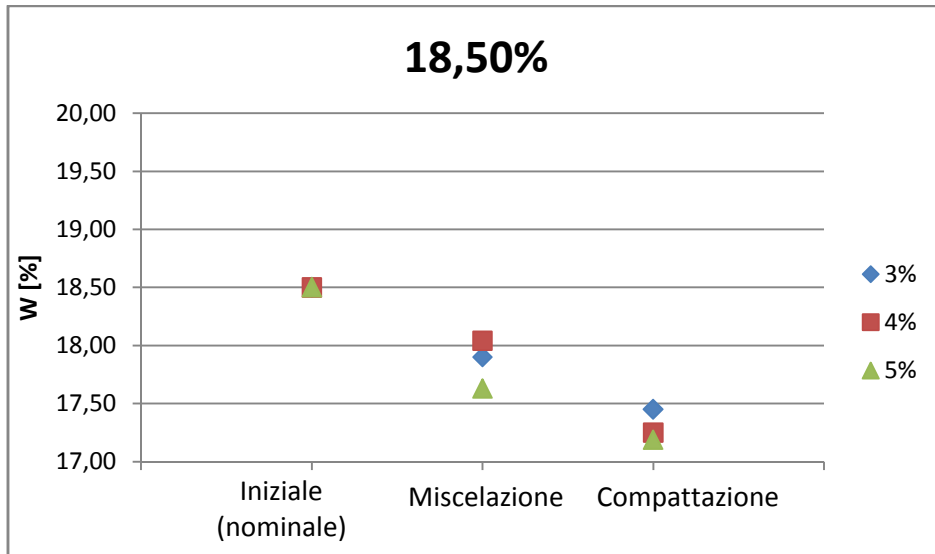


Figura 5.3 – Andamento del tenore di umidità durante le fasi di realizzazione della stabilizzazione per  $W_{nom} = 18,50\%$ .

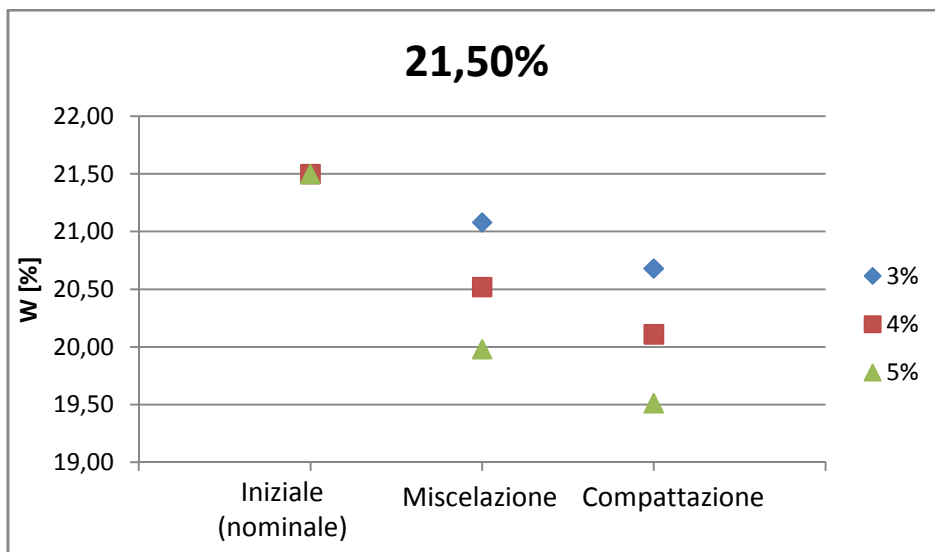


Figure 5.4 – Andamento del tenore di umidità durante le fasi di realizzazione della stabilizzazione per  $W_{nom} = 21,50\%$ .

Per tutte le umidità nominali considerate (12,50%, 15,50%, 18,50% e 21,50%) e per tutte le percentuali di calce prese in esame (3%, 4% e 5%), il tenore di umidità cala con il 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. A conferma di ciò è possibile graficare (figura 5.5) la differenza tra l'umidità presente nel

terreno al momento iniziale ( $W_{nom}$ ) e quella relativa all'istante immediatamente successivo alla miscelazione ( $W_{misc}$ ).

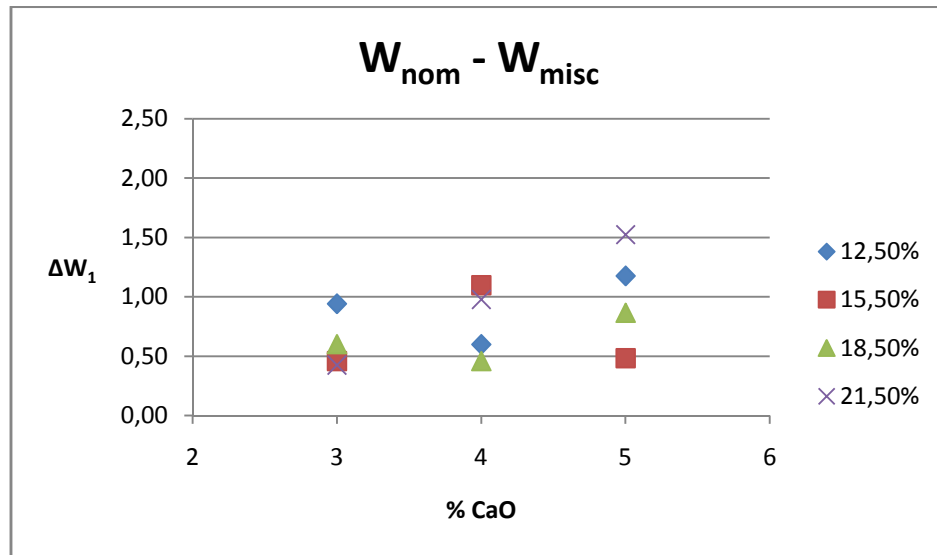


Figura 5.5 – Andamento della differenza tra l'umidità nominale e quella di miscelazione.

Osservando il grafico appena riportato 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. Elaborando quindi un grafico che mostri l'andamento della differenza tra l'umidità presente al momento della miscelazione e quella misurata appena prima della compattazione del terreno si ottiene l'andamento riportato in figura 5.6.

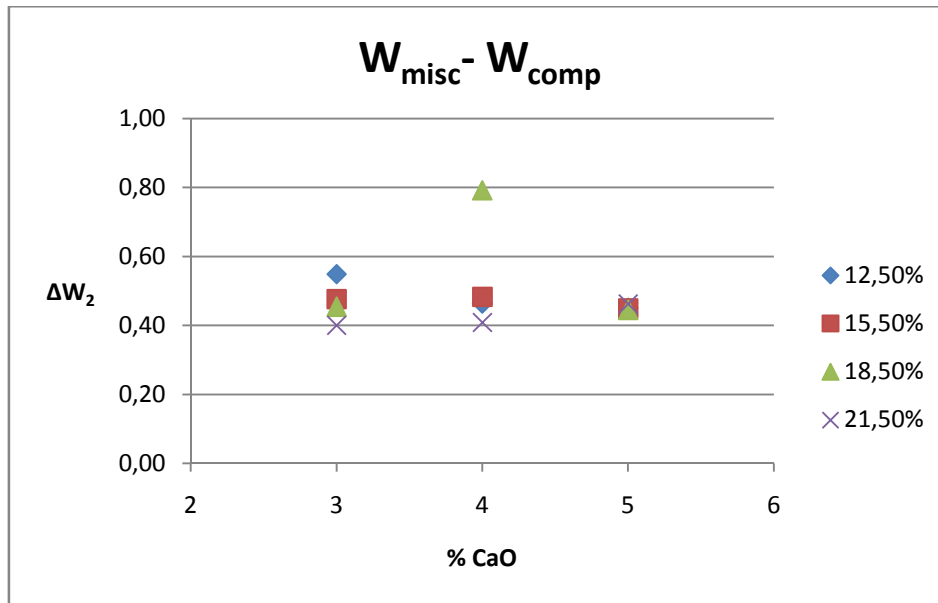


Figura 5.6 – Andamento della differenza tra l'umidità di miscelazione e quella di compattazione.

Il grafico mostra che i valori della differenza tra  $W_{misc}$  e  $W_{comp}$  hanno una variabilità molto limitata e rientrano tutti in un range compreso tra 0,40% e 0,55%; l'unico valore che risulta essere leggermente superiore è quello relativo al 18,5% di umidità nominale e al 4% di calce. 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.

Infine è stato elaborato un ultimo grafico (figura 5.7) per mostrare l'andamento della differenza tra l'umidità presente nel terreno al momento iniziale del processo di stabilizzazione e quella relativa al momento della compattazione ( $W_{nom} - W_{comp}$ ).

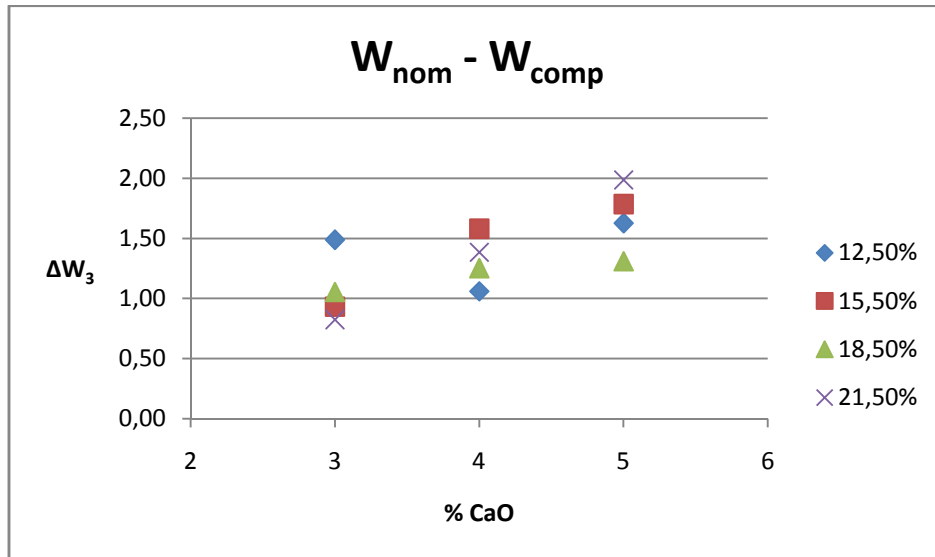


Figura 5.7 – Andamento della differenza tra l'umidità nominale e quella di compattazione.

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. Questo accade in corrispondenza di tutte le umidità nominali considerate, tranne per la serie caratterizzata da un'umidità iniziale pari a 12,50%, ciò risulta essere una conseguenza del basso consumo iniziale riscontrato.

**5.1.2. Andamento della temperatura in funzione dell'umidità nominale e della percentuale di calce**

All'interno della procedura per la determinazione dell'assorbimento è stata misurata la temperatura iniziale del terreno e quella raggiunta dalla porzione di prova in seguito alla miscelazione con la calce.

La reazione della calce viva con l'acqua presente nel terreno al momento della miscelazione è una reazione fortemente esotermica e provoca un aumento di temperatura del materiale. L'entità del delta termico può essere considerata come indice dell'efficacia della stabilizzazione. Per valutare questo aspetto si è elaborato un grafico in cui la differenza tra la temperatura post miscelazione e quella iniziale del terreno è stata messa in relazione alle umidità nominali considerate (figura 5.8).

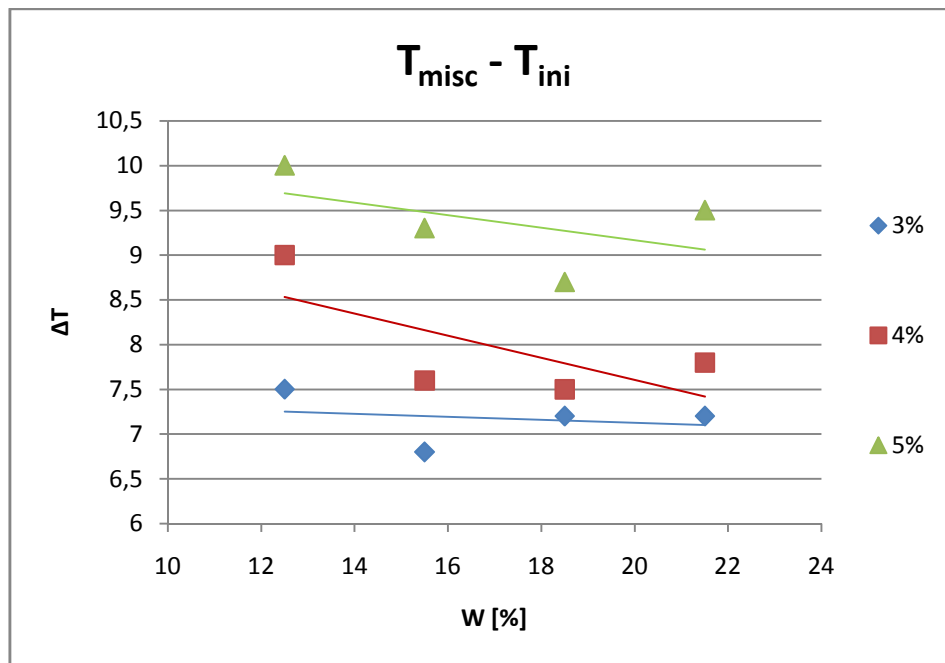


Figura 5.8 – Andamento della differenza tra la temperatura post miscelazione e quella iniziale.

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. Mettendo in relazione le temperature massime raggiunte dai 12 campioni con le tre percentuali di calce utilizzate (figura 5.9), risulta evidente che i valori più elevati si ottengono in corrispondenza delle umidità maggiori. L'aumento di

temperatura è infatti direttamente proporzionale alla quantità di calce che riesce a reagire, e quest'ultima dipende dalla percentuale di umidità nominale presente. L'unico dato fuori trend è quello relativo al 5% di calce e umidità nominale pari a 12,50%, che provoca un elevatissimo sviluppo di calore.

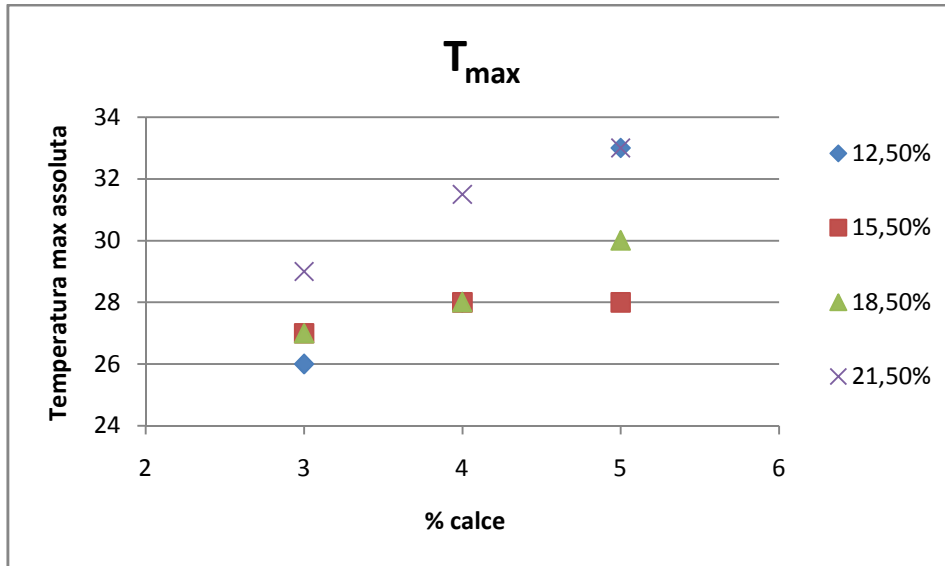


Figura 5.9 – Temperature massime raggiunte dopo la miscelazione.

## 5.2. ANALISI VOLUMETRICA

Sulle due serie di provini compattati mediante prova Proctor e Pressa Giratoria è stata svolta un'analisi volumetrica al fine di determinare i valori di densità secca massima e umidità ottimale di compattazione. Si riportano in seguito non solo i dati relativi all'analisi volumetrica effettuata sulla miscela terra – acqua – calce, ma anche quelli corrispondenti al terreno vergine utilizzato.

**5.2.1. Compattazione Proctor**

Per il terreno vergine la metodologia di costipamento Proctor, eseguita in conformità con la norma CNR BU 69/72, ha fornito la curva di costipamento in figura 5.10 , caratterizzata da <sup>[7]</sup>:

$$\gamma_{S,max} = 1,893 \text{ g/cm}^3 \quad w_{ott} = 12,12\%$$

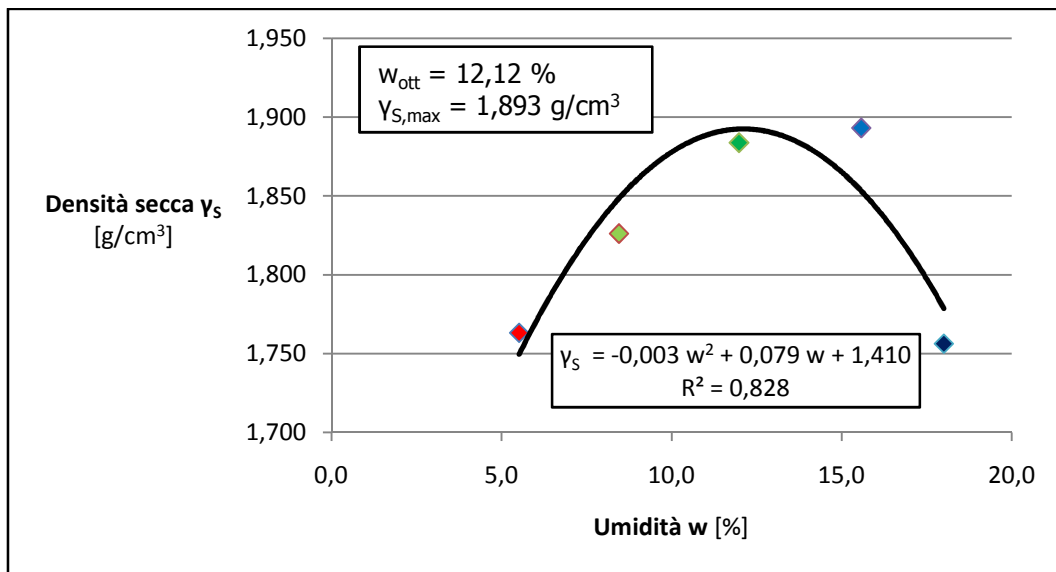


Figura 5.10 - Risultati prova Proctor sul terreno C.

I risultati ottenuti dalla compattazione Proctor dei 12 provini confezionati con la miscela terra – acqua – calce sono stati riassunti in tre moduli appositamente elaborati (figura 5.11) ; in ogni modulo sono riportati i dati relativi a quattro provini caratterizzati da quattro diversi tenori di umidità (12,50%, 15,50%, 18,50% e 21,50%) e dalla stessa percentuale di calce. Oltre ai valori della densità secca vengono riportate le caratteristiche volumetriche delle fustelle Proctor, il numero che contrassegna i recipienti utilizzati per le prime tre determinazioni di umidità, la relativa tara e i risultati di tali determinazioni. Nel modulo vengono inoltre annotate le temperature della porzione di prova prima e dopo la miscelazione con calce e le date in cui dovranno essere effettuate le prove meccaniche (CBR e resistenza a compressione).



<b>PROCTOR – Analisi Volumetrica</b>					
Ditta:		CGS Consolidamenti	Data:		Terreno:
<b>Dati porzione di prova</b>					
Umidità nominale	[%]	12,5	15,5	18,5	21,5
% calce	[%]				
<b>Dati provino Proctor</b>					
Stampo					
Tara	[g]				
Volume	[cm <sup>3</sup> ]				
Peso lordo umido	[g]				
Peso netto umido	[g]				
<b>Umidità terreno vergine (dopo 30' di riposo)</b>					
Recipiente					
Tara	[g]				
Peso lordo umido	[g]				
Peso lordo secco	[g]				
Peso acqua	[g]				
Peso netto secco	[g]				
Umidità	[%]				
<b>Umidità terreno al termine della miscelazione</b>					
Recipiente					
Tara	[g]				
Peso lordo umido	[g]				
Peso lordo secco	[g]				
Peso acqua	[g]				
Peso netto secco	[g]				
Umidità	[%]				
<b>Umidità terreno dopo 30' di riposo dalla miscelazione</b>					
Recipiente					
Tara	[g]				
Peso lordo umido	[g]				
Peso lordo secco	[g]				
Peso acqua	[g]				
Peso netto secco	[g]				
Umidità	[%]				
Temperatura					
<b>Calcolo della densità secca</b>					
Densità umida	[g/cm <sup>3</sup> ]				
Densità secca	[g/cm <sup>3</sup> ]				
<b>Prove meccaniche</b>					
CBR		da eseguire il			
Resistenza a compressione		da eseguire il			

Figura 5.11 – Modulo riassuntivo campioni Proctor.

Nello studio della miscela ottimale terra – acqua – calce svolge un ruolo fondamentale la relazione umidità – densità secca. Sulla base dei risultati forniti dalle prove Proctor vengono elaborate le caratteristiche curve a campana  $w-\gamma_s$ , esse permettono di determinare l’umidità ottimale in corrispondenza di ogni percentuale di calce considerata.

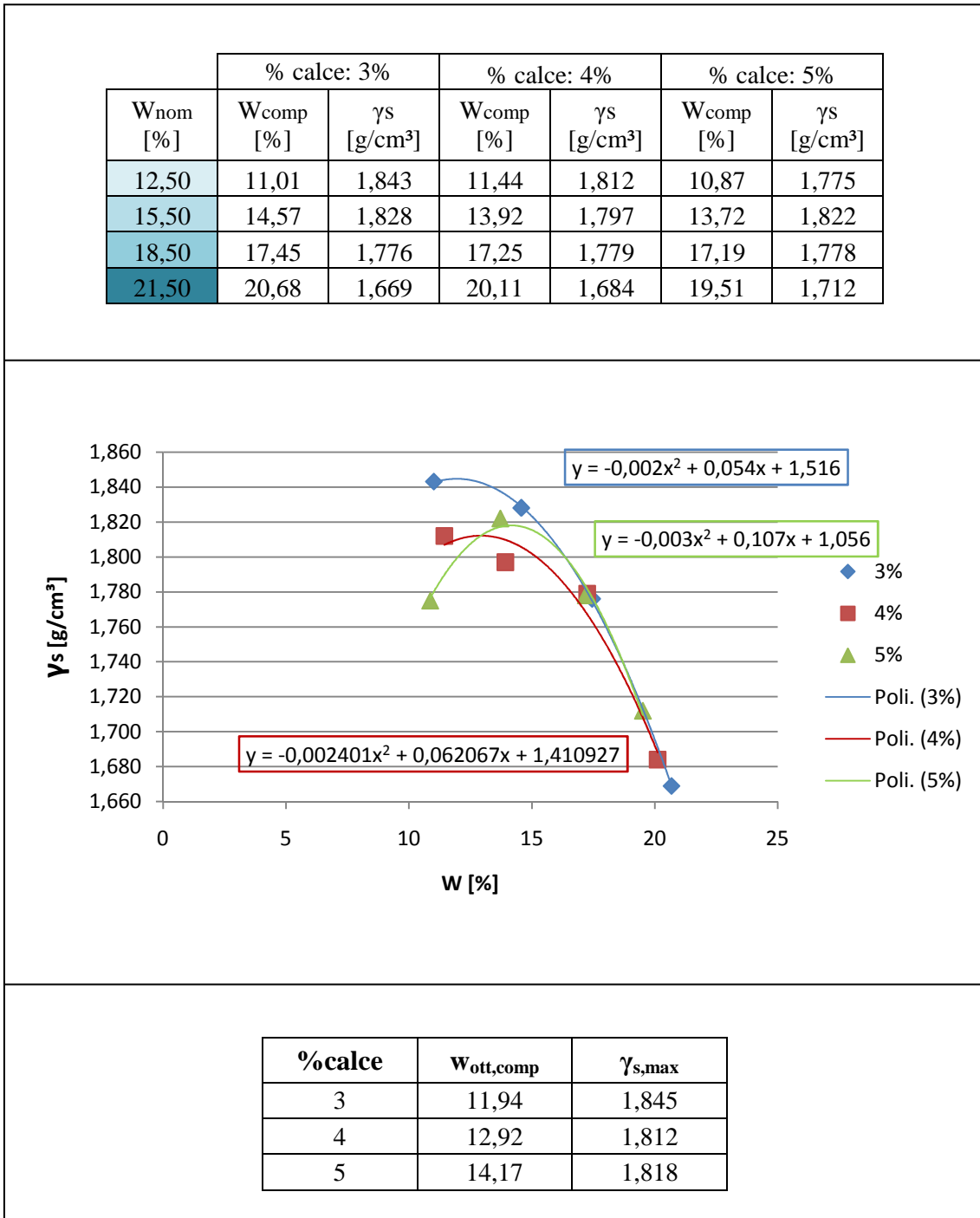


Figura 5.12 – Tabella risultati e curve umidità – densità secca relative alla compattazione Proctor.

Nella costruzione delle curve non viene utilizzata l'umidità nominale, ma quella presente nel terreno al momento della compattazione. Questo aspetto è da tener presente quando si definiscono le umidità ottimali delle miscele relative alle diverse percentuali di calce. Costruendo i grafici  $W-\gamma_s$  facendo riferimento all'umidità di compattazione si trascura infatti il consumo d'acqua ad opera della calce durante la fase di miscelazione. Tale consumo è stato valutato calcolando la media delle differenze tra l'umidità nominale e quella presente al momento della compattazione ( $W_{nom}-W_{misc}$ ) per ogni percentuale di calce (tabella 5.1).

Tabella 5.1 – Media delle differenze tra l'umidità nominale e quella di miscelazione.

% Calce	$W_{nom}$				Media
	12,50%	15,50%	18,50%	21,50%	
3%	1,49	0,93	1,05	0,82	1,07
4%	1,06	1,58	1,25	1,39	1,32
5%	1,63	1,78	1,31	1,99	1,68

Per ottenere le umidità ottimali di progetto delle miscele si è quindi sommato al valore di  $W_{ott}$  ottenuto dalle curve, la media delle differenze  $W_{nom}-W_{misc}$  relative alla stessa percentuale di calce (Tabella 5.2).

Tabella 5.2 – Umidità ottimale per ogni percentuale di calce.

% Calce	$W_{ott,comp}$	$\gamma_{s,max}$	$\Delta W$	$W_{des}$
3	11,94	1,845	1,07	13,01
4	12,92	1,812	1,32	14,24
5	14,17	1,818	1,68	15,85

I valori delle umidità ottimali riportate in tabella 5.2 risultano piuttosto bassi, ciò concorda con i risultati delle prove meccaniche; infatti, analizzando i valori dell'indice CBR e quelli della resistenza a compressione, si è osservato che le resistenze meccaniche più elevate sono quelle relative alle umidità nominali minori (vedi figure 5.22 e 5.23). Per umidità nominali troppo elevate, prossime all'estremo destro della curva, la compattazione Proctor non risulta efficiente; ciò è dovuto al fatto che il pestello si infinge nel materiale raccogliendone una parte: l'energia di compattazione

non viene quindi trasferita dal contatto acciaio – terreno, ma dal contatto terreno – terreno, con conseguente perdita di parte della stessa.

**5.2.2. Compattazione Giratoria**

Il prospetto in figura 5.14 mostra le caratteristiche volumetriche dei provini di terreno vergine e l’evoluzione della densità secca durante la compattazione.

Analizzando queste curve con una energia di compattazione fissa (90 giri) è possibile ricavare il diagramma in figura 5.13; i valori dei parametri caratteristici sono <sup>[7]</sup>:

$$\gamma_{S,max} = 1,881 \text{ g/cm}^3 \quad w_{ott} = 12,15\%$$

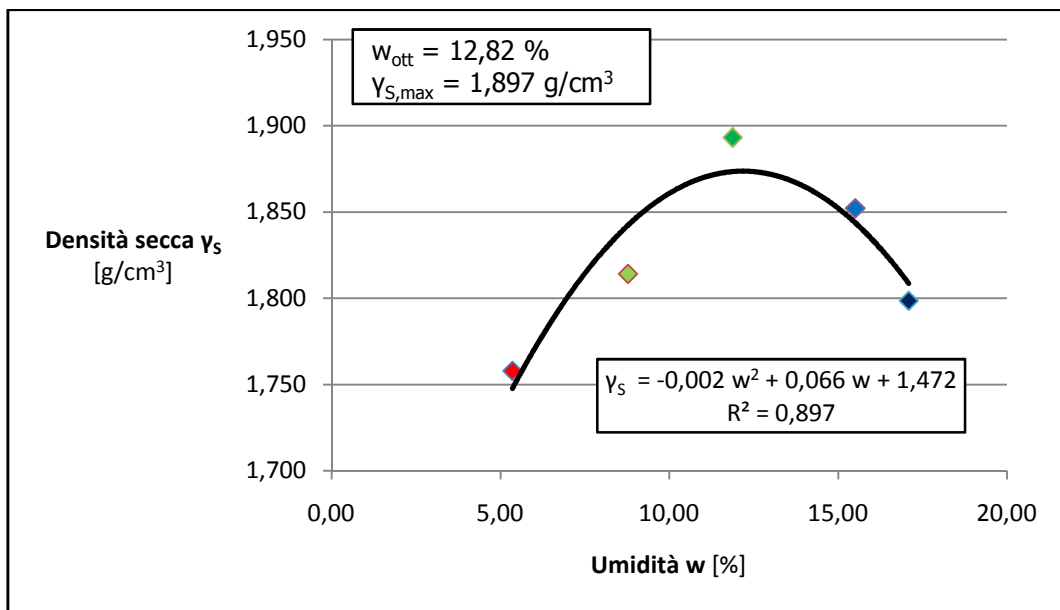


Figura 5.13 – Analisi volumetrica della prima serie di provini di terreno vergine.

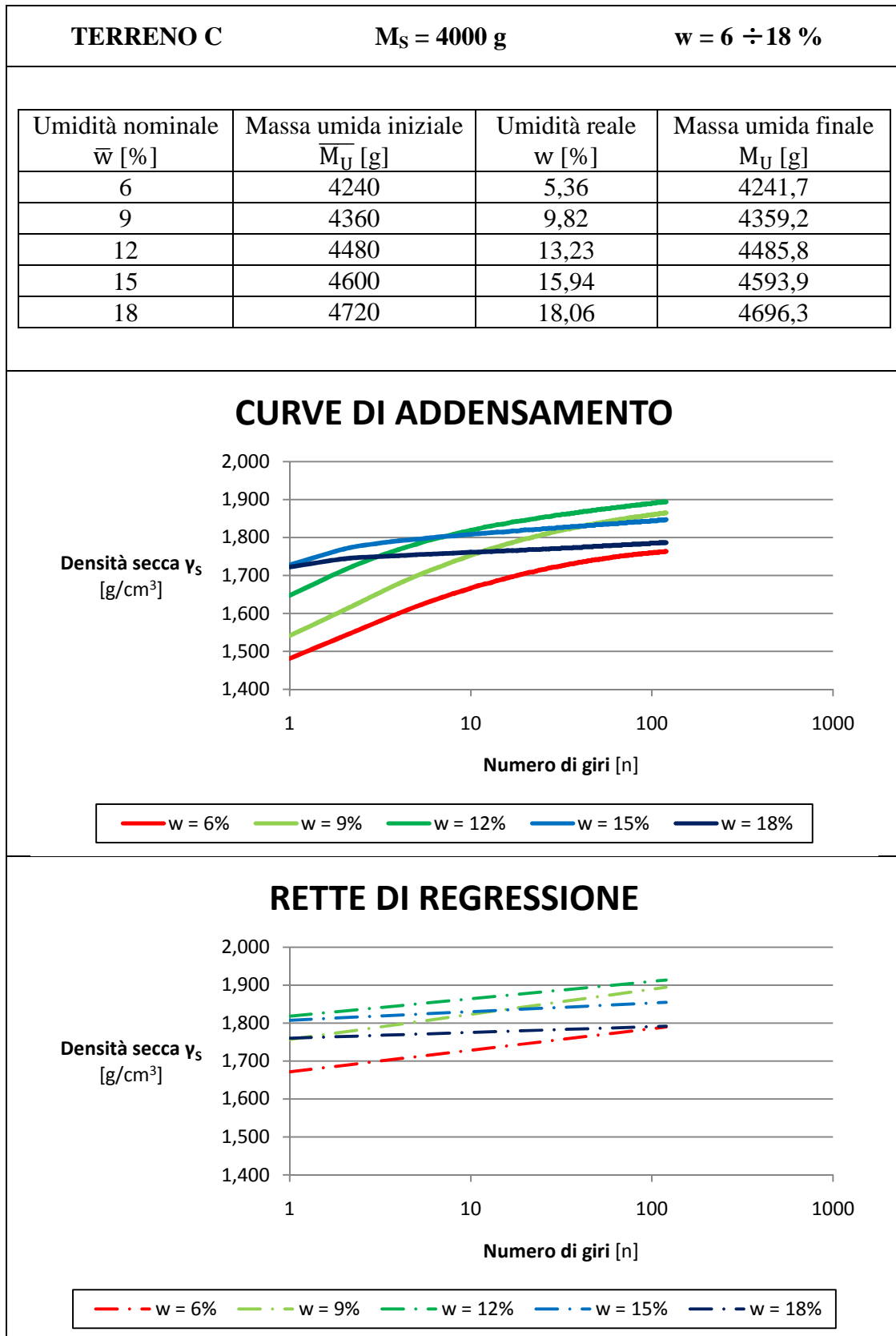


Figura 5.14 – Prospetto riassuntivo della serie di provini realizzata con terreno vergine.

Terminata l'analisi volumetrica del terreno vergine si analizzano ora i dati relativi alla miscela terra – acqua – calce.

Analogamente a quanto visto per la prova Proctor, anche i risultati ottenuti dalla compattazione giratoria sono stati riassunti in tre file Excel appositamente elaborati; in ognuno di essi sono riassunti i dati relativi a quattro provini caratterizzati da quattro diverse umidità nominali (12,50%, 15,50%, 18,50% e 21,50%) e dalla stessa percentuale di calce; ogni file Excel è costituito da sette fogli di lavoro. Nel primo (figura 5.15) sono riepilogati i dati relativi al campione di terreno: oltre ai valori della densità secca vengono riportate la massa iniziale inserita nello stampo, il volume finale del provino e i dati relativi alle prime tre determinazioni di umidità. Vengono inoltre annotate le temperature della porzione di prova prima e dopo la miscelazione con calce e le date in cui dovranno essere effettuate le prove meccaniche (CBR e resistenza a compressione).

<b>PRESSA GIRATORIA - Dati dei campioni</b>					
<u>Ditta:</u> CGS Consolidamenti		<u>Data:</u>		<u>Terreno:</u>	
<b>Dati porzione di prova</b>					
Umidità nominale	[%]	12,5	15,5	18,5	21,5
% calce	[%]				
<b>Dati provino Proctor</b>					
Stampo					
Massa inserita	[g]				
Volume finale	[cm <sup>3</sup> ]				
<b>Umidità terreno vergine (dopo 30' di riposo)</b>					
Recipiente					
Tara	[g]				
Peso lordo umido	[g]				
Peso lordo secco	[g]				
Peso acqua	[g]				
Peso netto secco	[g]				
Umidità	[%]				
<b>Umidità terreno al termine della miscelazione</b>					
Recipiente					
Tara	[g]				
Peso lordo umido	[g]				
Peso lordo secco	[g]				
Peso acqua	[g]				
Peso netto secco	[g]				
Umidità	[%]				
<b>Umidità terreno dopo 30' di riposo dalla miscelazione</b>					
Recipiente					
Tara	[g]				
Peso lordo umido	[g]				
Peso lordo secco	[g]				
Peso acqua	[g]				
Peso netto secco	[g]				
Umidità	[%]				
Temperatura MAX	[°C]				
<b>Calcolo della densità secca</b>					
Densità	[g/cm <sup>3</sup> ]				
<b>Prove meccaniche</b>					
CBR e Res. a compressione		da eseguire il			

Figura 5.15 – Modulo riassuntivo caratteristiche campioni Pressa Giratoria.

I quattro fogli seguenti contengono l'analisi volumetrica delle porzioni di prova per le quattro umidità nominali considerate (figura 5.16). Nel modulo vengono riportati i dati caratteristici del materiale, i parametri scelti per l'esecuzione della prova, i risultati ottenuti ed i valori di altezza del provino al variare del numero di giri. Conoscendo

l'altezza del provino ad ogni giro, la sua massa umida e le caratteristiche geometriche dello stampo vengono poi calcolati:

- Volume:  $V_i = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot h_i$
  - Densità umida:  $\gamma_i = \frac{M_U}{V_i}$
  - Densità secca:  $\gamma_{s,i} = \frac{\gamma_i}{1 + w[\%]}$
- } In corrispondenza del giro i-esimo.

**ANALISI VOLUMETRICA - PRESSA GIRATORIA**

Dati del materiale

Dati della pressa

Risultati ottenuti

M =	g	D =	mm	γ <sub>cercato</sub> =	g
w =	%	P <sub>v</sub> =	kPa	n° giri =	
% CaO =	%	n° giri =			

n° giri	h	V	γ	γ <sub>s</sub>
	[mm]	[cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
.....				
.....				
.....				
120				

Figura 5.16 – Analisi volumetrica campioni Pressa Giratoria.

Il sesto foglio di lavoro del file Excel contiene, per ogni umidità nominale considerata, i seguenti grafici (figura 5.17):

- N° giri – altezza provino;
- N° giri – densità umida;
- N° giri – densità secca.



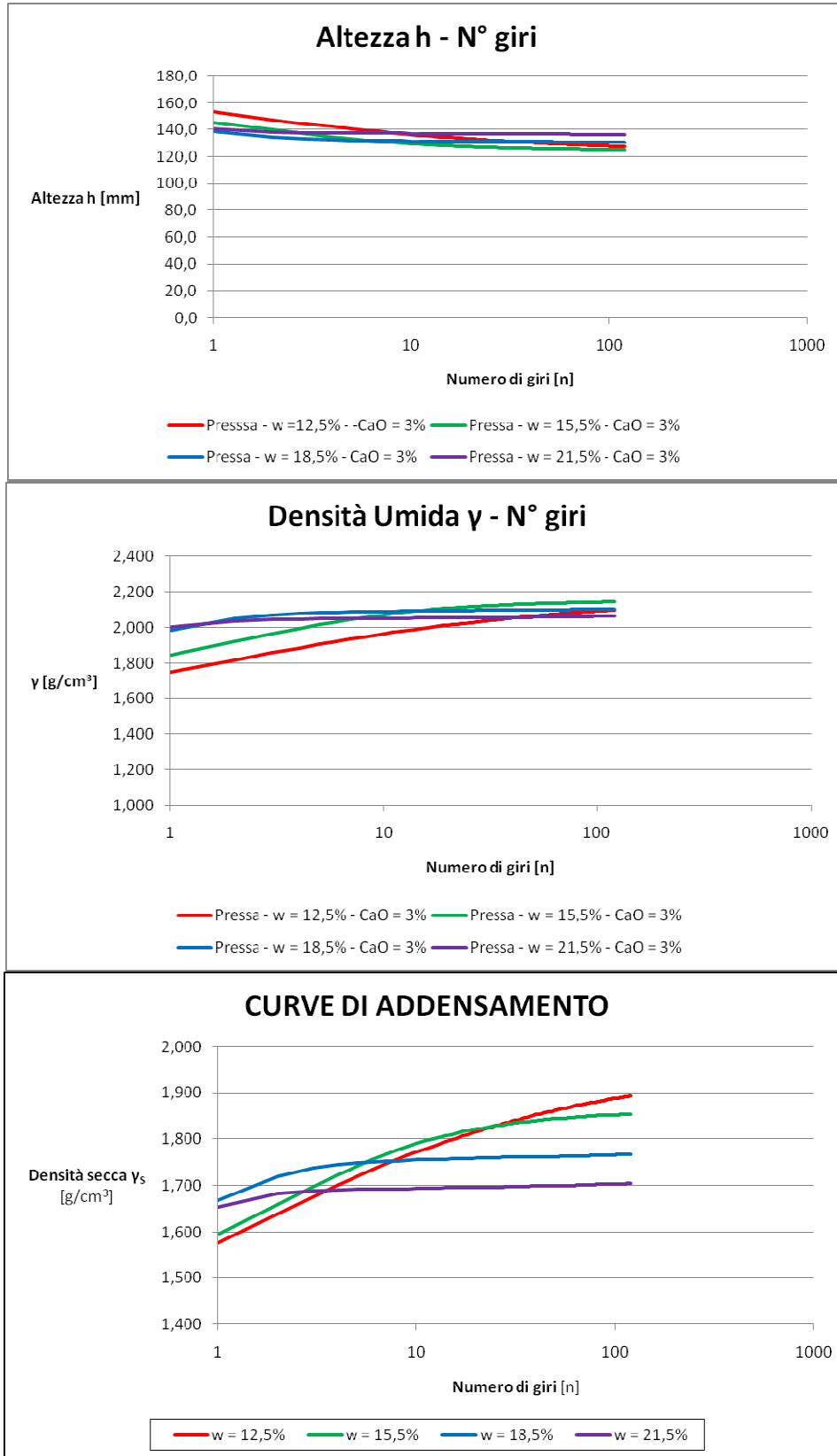


Figura 5.17 – Esempi di relazioni elaborate a partire dai risultati della compattazione giratoria .

Infine, nell'ultimo foglio di lavoro, viene riportata la curva umidità – densità secca elaborata facendo riferimento all'umidità di compattazione e alla massima densità raggiunta a 120 giri. I risultati ottenuti per ogni percentuale di calce considerata sono ripassanti in figura 5.18.

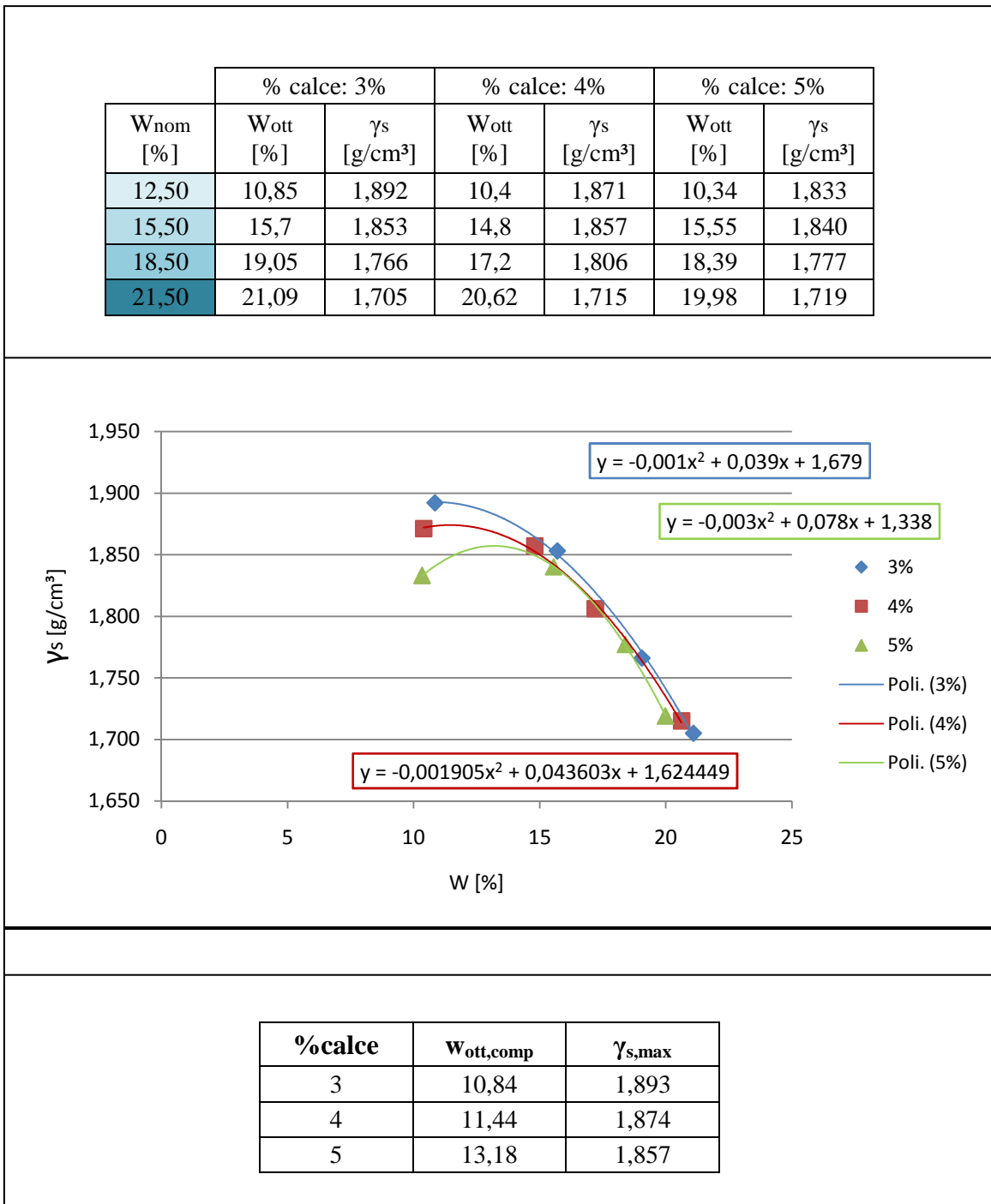


Figura 5.18 – Risultati e curve umidità-densità secca relative alla compattazione giratoria.

Come nel caso della compattazione mediante prova Proctor, anche in questo caso, le curve  $W-\gamma_s$  sono state costruite facendo riferimento all'umidità di compattazione, e non a quella nominale. E' necessario quindi sommare all'umidità nominale ottenuta, la media delle differenze  $W_{nom}-W_{misc}$  precedentemente calcolata (vedi tabella 5.2).

Tabella 5.3 – Umidità ottimale per ogni percentuale di calce.

% Calce	$W_{ott,comp}$	$\gamma_{s,max}$	$\Delta W$	$W_{des}$
3	10,84	1,893	1,07	11,91
4	11,44	1,874	1,32	12,76
5	13,18	1,857	1,68	14,86

Come per la compattazione impulsiva Proctor, anche per quella giratoria le umidità ottimali sono piuttosto basse (vedi tabella 5.3), ciò appare coerente con i risultati ottenuti dalle prove CBR e di resistenza a compressione. Infatti, osservando i grafici in figura 5.25 e 5.26 si nota che i massimi valori delle caratteristiche meccaniche vengono raggiunti in corrispondenza delle umidità nominali più basse. Anche la compattazione giratoria, analogamente alla Proctor, non risulta efficiente in corrispondenza di umidità nominali prossime all'estremo destro della curva. Per umidità troppo elevate infatti, la pressione a cui viene sottoposto il terreno sulle due basi, provoca la laminazione dell'argilla: non potendo compattare ulteriormente il terreno in quanto l'acqua assorbe l'energia fornita, parte di esso viene espulsa attraverso gli inevitabili giochi tra i dischi di compattazione superiore e inferiore.



Figura 5.19 – Comportamento del terreno compattato con la Pressa Giratoria caratterizzato da un elevato grado di umidità: laminazione dell'argilla.

### 5.2.3. Osservazioni

Osservando le tabelle 5.2 e 5.3 si nota che 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 addizionando il terreno con la calce l'umidità ottimale non aumenta in maniera sostanziale rispetto a quella del terreno 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 della calce di ridurre la sensibilità del terreno all'azione dell'acqua. Analizzando il grafico in figura 5.12 si nota che il comportamento appena descritto non rispecchia i risultati sperimentali relativi alla compattazione Proctor, infatti l'umidità ottimale cresce, ma la densità secca massima non diminuisce in maniera inversamente proporzionale al tenore di calce e le curve  $(W - \gamma_s)$  non tendono ad appiattirsi. Esaminando la tabella 5.2 si può inoltre osservare che la densità secca massima raggiunta per la prova Proctor è inferiore a quella relativa al terreno naturale e risulta essere poco influenzata dalla percentuale di calce utilizzata.

Studi svolti in precedenza<sup>[7],[12]</sup> hanno dimostrato che, per uno stesso terreno, le umidità ottimali ricavate dalla compattazione giratoria sono solitamente più elevate rispetto a quelle ottenute dalla tradizionale prova Proctor. Dal confronto delle tabelle 5.2 e 5.3 appare evidente che ciò non accade per il terreno utilizzato nella presente sperimentazione. Tale materiale ha un comportamento anomalo anche nel caso in cui venga compattato senza la presenza di calce.

L'andamento delle curve relative alla compattazione giratoria (figura 5.18), a differenza di quello riscontrato per le curve Proctor, rispetta il trend descritto in bibliografia: infatti, all'aumentare della percentuale di calce, i valori di umidità ottimale crescono e quelli relativi alla densità secca massima diminuiscono. Le curve tendono inoltre ad appiattirsi, denunciando una riduzione della sensibilità del terreno all'azione dell'acqua.

In tabella 5.4 vengono riassunti i valori di densità secca massima e di umidità ottimale relativi alle due diverse metodologie di compattazione.

Tabella 5.4 – Densità secca massima e umidità ottimale relative alle due metodologie di compattazione.

%calce	W <sub>ott,comp</sub>		γ <sub>s,max</sub>	
	Proctor	Pressa Giratoria	Proctor	Pressa Giratoria
3	11,94	10,84	1,845	1,893
4	12,92	11,44	1,812	1,874
5	14,17	13,18	1,818	1,857

Graficando i valori riportati in tabella 5.4 si osserva che, per ogni percentuale di calce, la compattazione tradizionale Proctor fornisce umidità ottimali maggiori e valori di densità secca massima minori rispetto alla compattazione giratoria.

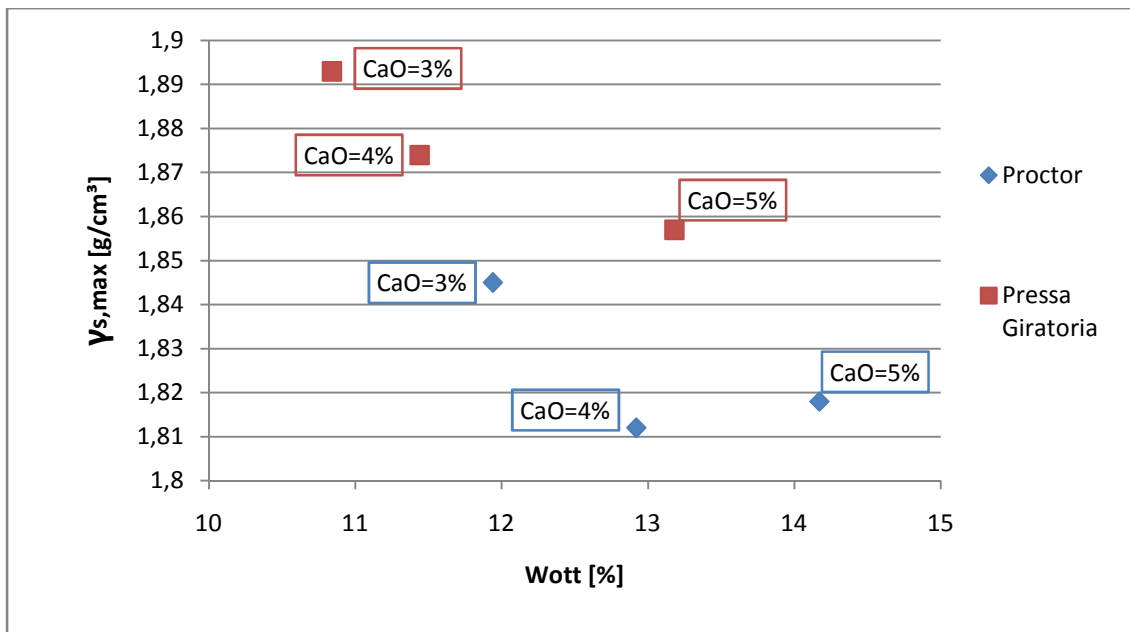


Figura 5.20 – Confronto valori di umidità ottimale e densità secca massima per le due metodologie di compattazione.

### 5.3. CARATTERISTICHE MECCANICHE

#### 5.3.1. Compattazione Proctor

Oltre a quello relativo all'analisi volumetrica è stato inoltre elaborato un secondo modulo in cui vengono riportati i risultati della prova CBR, della resistenza a compressione e della determinazione di umidità dopo la rottura. In questo caso ogni modulo contiene i dati relativi ai provini confezionati con la stessa umidità nominale e con tenori di calce diversi (3%, 4% e 5%).

<b><u>PROCTOR - CARATTERISTICHE MECCANICHE</u></b>				
<u>Ditta:</u> CGS Consolidamenti		<u>Terreno:</u> C		
<b>CBR (7 giorni)</b>				
<b>CNR 10009: 1964</b>	<b>Data:</b>	<b>Serie:</b>		
Percentuale di calce [%]	$W_{nom}$ [%]	$P_{2,5}$ [kg]	$P_{5,0}$ [kg]	Indice CBR [%]
3				
4				
5				
<b>RESISTENZA A COMPRESSIONE</b>				
<b>UNI EN 13286-41</b>	<b>Data:</b>	<b>Serie:</b>		
Diametro provino [mm] 152,39	Area del provino [mm <sup>2</sup> ] 18239,08	Incremento di carico [N/mm <sup>2</sup> /s] 0,05		
Percentuale di calce [%]	$W_{nom}$ [%]	Carico di rottura [N]	Abbassamento [mm]	Resistenza a compressione [N/mm <sup>2</sup> ]
3				
4				
5				
<b>Umidità (7 giorni)</b>				
<b>UNI CEN ISO/TS 17892-1</b>	<b>Data:</b>	<b>Serie:</b>		
Percentuale di calce [%]	[%]			
$W_{nom}$ [%]	[%]			
Recipiente				
Tara	[g]			
Peso lordo umido	[g]			
Peso lordo secco	[g]			
Peso acqua	[g]			
Peso netto secco	[g]			
Umidità	[%]			

Figura 5.21 – Modulo riassuntivo caratteristiche meccaniche.

Sono state valutate le caratteristiche meccaniche ottenute attraverso la prova CBR e la resistenza a compressione in funzione delle due variabili principali: il tenore di umidità e la percentuale di calce. Si ottengono due serie di grafici: nella prima l'indice CBR e la resistenza a compressione vengono espressi in funzione della percentuale di calce, mentre nella seconda le stesse grandezze sono graficate in funzione dell'umidità nominale utilizzata.

Tabella 5.2 – Schema riassuntivo delle caratteristiche meccaniche.

%calce	CBR a 7 giorni [%]			RC a 7 giorni [N/mm <sup>2</sup> ]		
	3	4	5	3	4	5
w%						
12,50	130	170	128	1,9	2,24	2,0
15,50	109	147	137	1,6	1,6	1,9
18,50	44	60	68	1,0	1,0	1,2
21,50	71	80	37	1,05	1,08	0,9

La figura 5.22 mostra che i valori di CBR e di resistenza a compressione più elevati vengono raggiunti per le due serie caratterizzate dai minori tassi di umidità nominale. In corrispondenza di basse umidità la quasi totalità dell'acqua di miscelazione reagisce con la calce garantendo il raggiungimento di buone caratteristiche meccaniche. Per umidità nominali più elevate solo una parte dell'acqua reagisce con il legante nel tempo intercorso tra la miscelazione e la compattazione, quindi l'acqua in eccesso rimane all'interno del terreno causando una riduzione delle caratteristiche meccaniche.

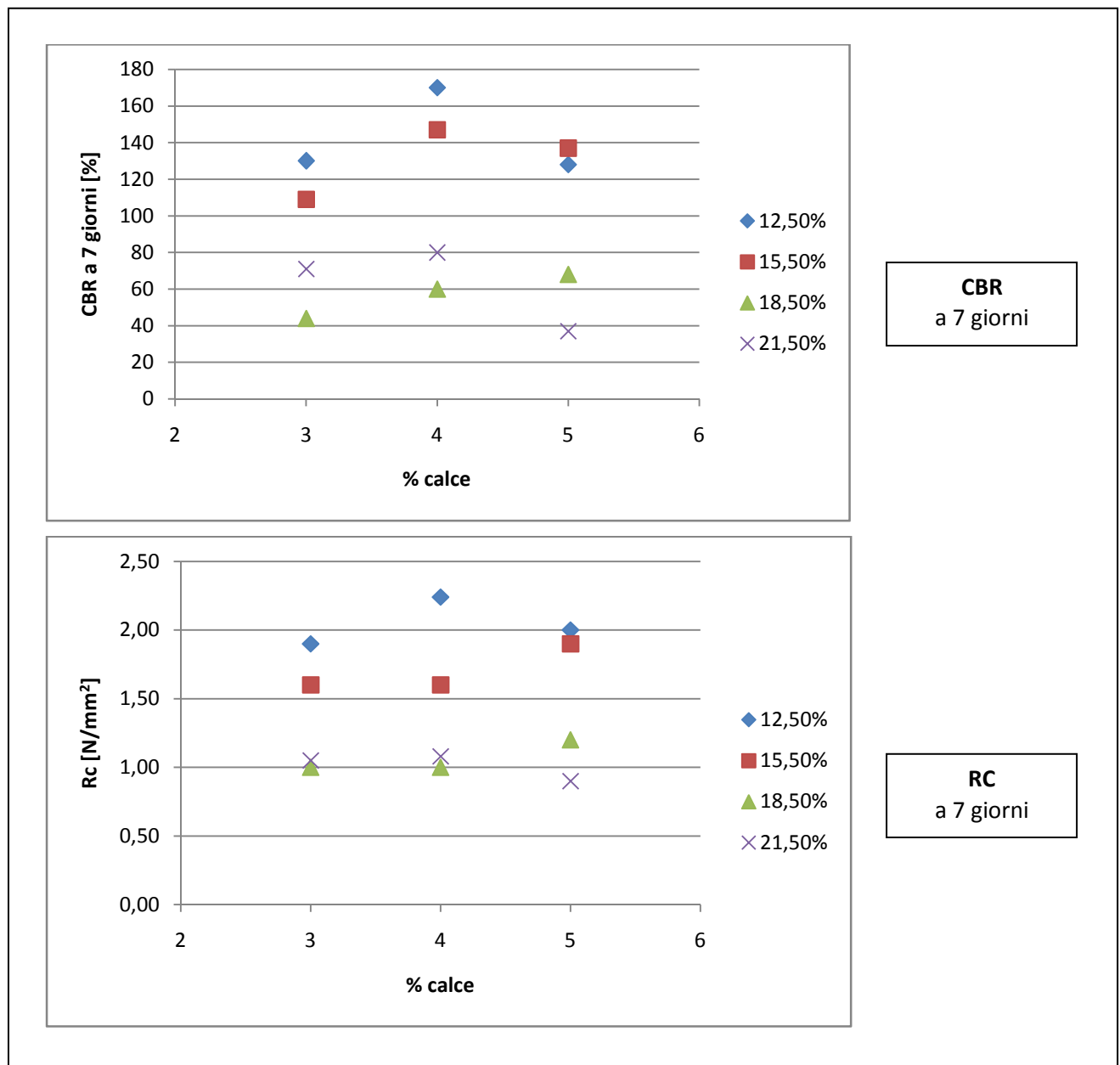


Figura 5.22 – Caratteristiche meccaniche in funzione della percentuale di calce.

Dalle relazioni trovate è possibile trarre le seguenti considerazioni:

- W = 12,50%: i valori più elevati dell'indice CBR e della resistenza a compressione, si ottengono in corrispondenza del 4% di calce.
- W = 15,50%: a differenza della serie precedente in questo caso la resistenza a compressione massima si ottiene per una percentuale di calce pari al 5%; ciò può



essere dovuto al fatto che, in presenza di un'umidità nominale maggiore, riesce a reagire una quantità di calce più elevata. Il valore più elevato dell'indice CBR viene invece raggiunto per una percentuale di calce pari al 4%. Una spiegazione plausibile può essere fornita analizzando le curve output della prova; si è osservato infatti che, a differenza delle altre due, quella relativa al 4% di calce è caratterizzata da una pendenza molto elevata nella parte iniziale, tale pendenza tende poi a ridursi nettamente nel secondo tratto.

- W = 18,50%: le resistenze meccaniche più elevate si ottengono in corrispondenza del 5% di calce. Ciò significa che è presente una quantità di acqua in grado di far reagire la percentuale di calce maggiore, conferendo resistenze meccaniche migliori.
- W = 21,50%: sia nel caso della prova CBR che in quello della resistenza a compressione, i risultati ottimali vengono riscontrati per il provino caratterizzato dal 4% di calce. Ciò può essere dovuto al fatto che in presenza di un'umidità così elevata non tutto il 5% di calce riesce a reagire entro sette giorni; a causa dell'acqua in eccesso rimasta all'interno del terreno, il legante non riesce a sviluppare sufficiente calore e la stabilizzazione non risulta pienamente efficace.

Anche la figura 5.23 mostra in maniera evidente l'andamento decrescente delle caratteristiche meccaniche all'aumentare del tasso di umidità nominale.

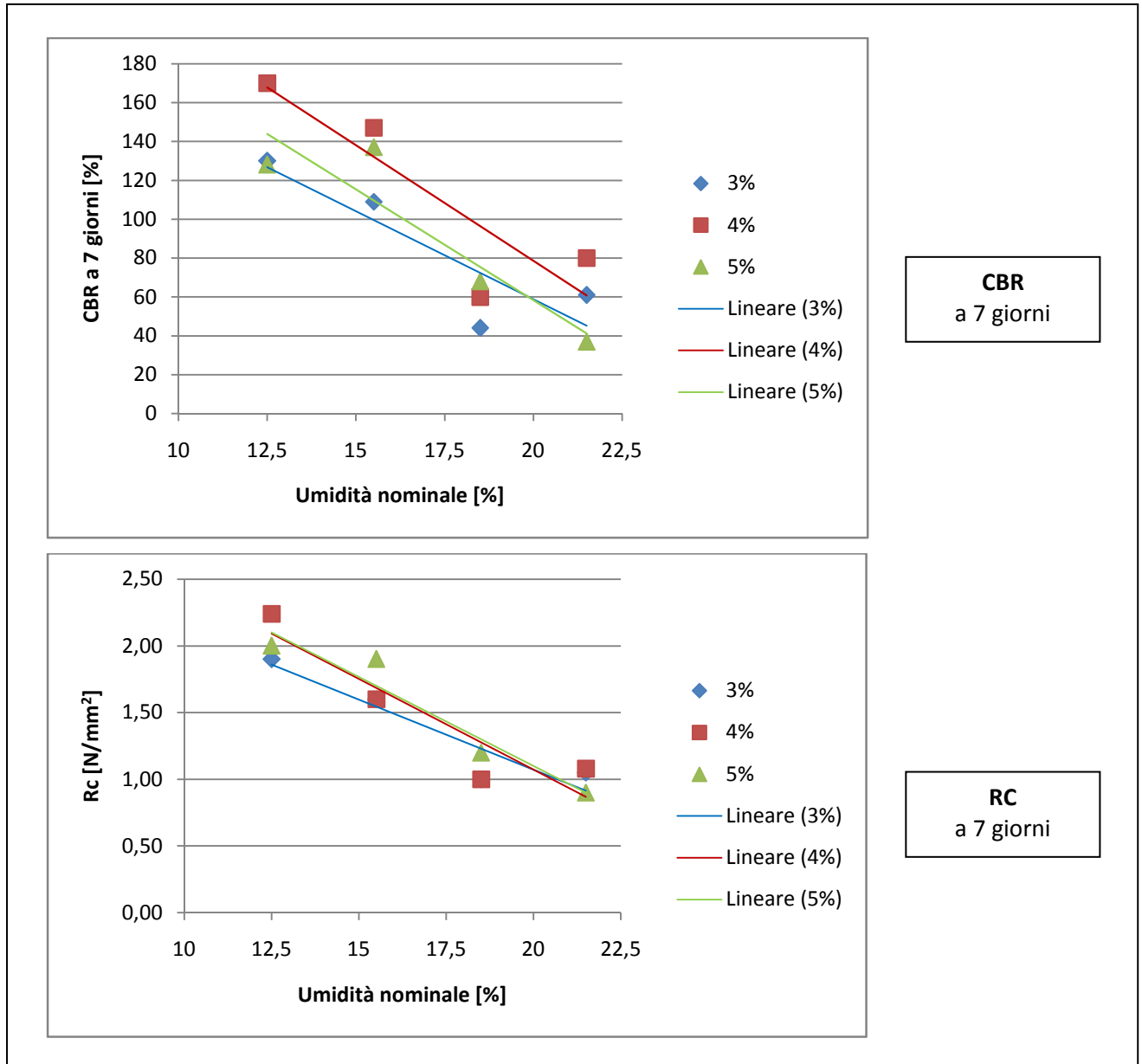


Figura 5.23 – Caratteristiche meccaniche in funzione dell'umidità nominale.

5.3.2. Compattazione Giratoria

Anche per la compattazione giratoria si è elaborato un secondo file Excel in cui vengono riportati i risultati delle prove CBR, della resistenza a compressione e della determinazione di umidità dopo la rottura. In questo caso ogni modulo contiene i dati relativi ai provini confezionati con la stessa umidità nominale e con tenori di calce diversi (3%, 4% e 5%).

<b><u>PRESSA GIRATORIA - CARATTERISTICHE MECCANICHE</u></b>				
<u>Ditta:</u> CGS Consolidamenti			<u>Terreno:</u> C	
<b>CBR (7 giorni)</b>				
<b>CNR 10009: 1964</b>		<b>Data:</b>	<b>Serie:</b>	
Percentuale di calce [%]	$w_{nom}$ [%]	$P_{2,5}$ [kg]	$P_{5,0}$ [kg]	Indice CBR [%]
3				
4				
5				
<b>RESISTENZA A COMPRESSIONE</b>				
<b>UNI EN 13286-41</b>		<b>Data:</b>	<b>Serie:</b>	
Diametro provino [mm] 150,00	Area del provino [mm <sup>2</sup> ] 17671,46		Incremento di carico [N/mm <sup>2</sup> /s] 0,05	
Percentuale di calce [%]	$w_{nom}$ [%]	Carico di rottura [N]	Abbassamento [mm]	Resistenza a compressione [N/mm <sup>2</sup> ]
3				
4				
5				
<b>Umidità (7 giorni)</b>				
<b>UNI CEN ISO/TS 17892-1</b>		<b>Data:</b>	<b>Serie:</b>	
Percentuale di calce	[%]			
$w_{nom}$	[%]			
Recipiente				
Tara	[g]			
Peso lordo umido	[g]			
Peso lordo secco	[g]			
Peso acqua	[g]			
Peso netto secco	[g]			
Umidità	[%]			

Figura 5.24– Modulo riassuntivo caratteristiche meccaniche.

In tabella 5.6 sono riportati i valori delle caratteristiche meccaniche relative ai provini compattati utilizzando la Pressa Giratoria.

Tabella 5.3 – Schema riassuntivo delle caratteristiche meccaniche.

CBR a 7 giorni [%]				RC a 7 giorni [N/mm <sup>2</sup> ]		
%calce	3	4	5	3	4	5
w%						
12,50	155	176	205	2,32	2,42	2,37
15,50	64	84	89	1,60	1,86	1,75
18,50	29	42	27	0,75	1,06	0,79
21,50	14	16	20	0,41	0,48	0,61

Anche in questo caso si elaborano due serie di grafici: nella prima l'indice CBR a sette giorni e la resistenza a compressione vengono espressi in funzione della percentuale di calce, mentre nella seconda le stesse grandezze sono graficate in funzione dell'umidità nominale utilizzata.

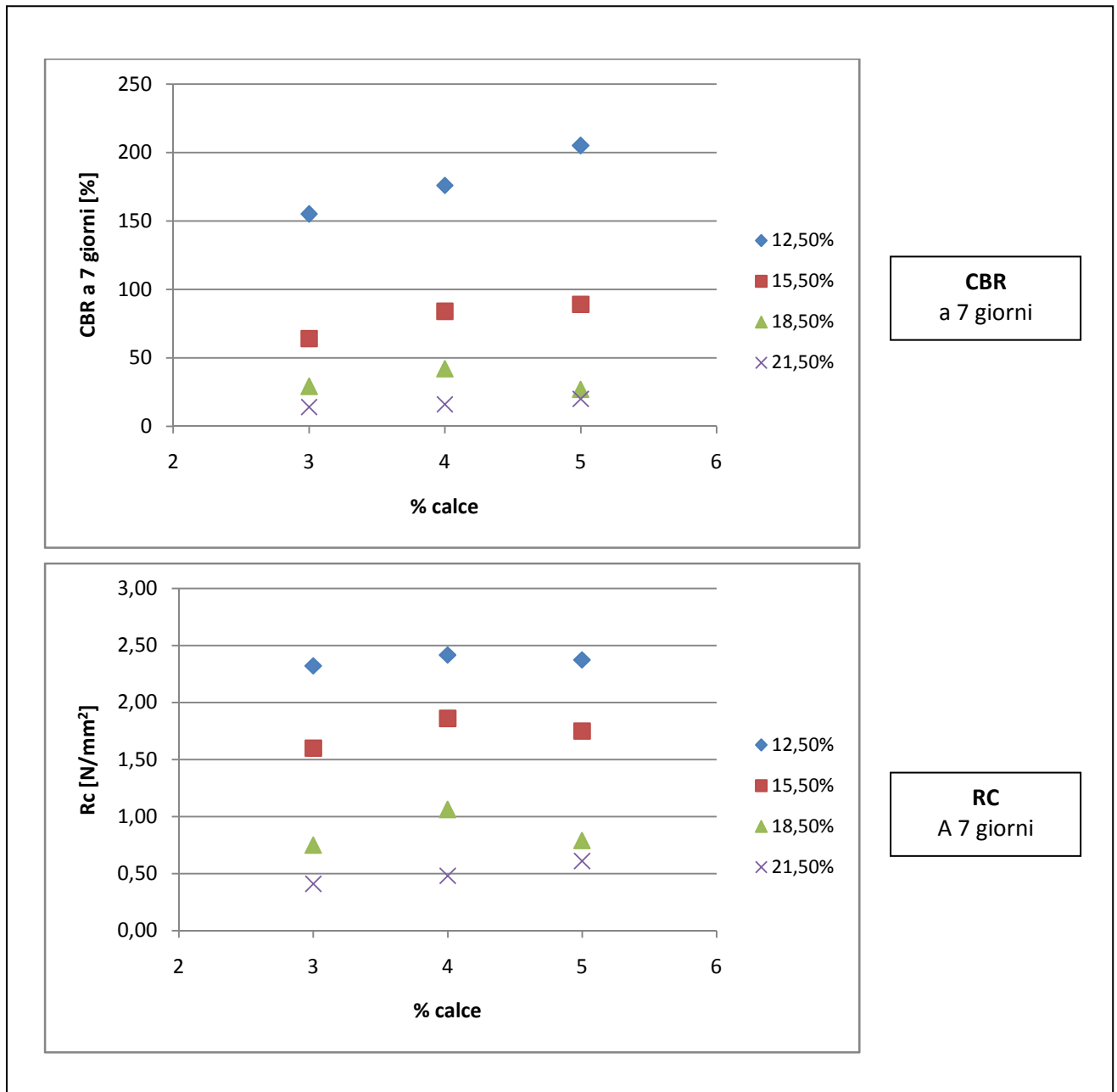


Figura 5.25 – Caratteristiche meccaniche in funzione della percentuale di calce.

Dalla figura 5.25 risulta evidente che anche per la compattazione giratoria i valori più elevati delle caratteristiche meccaniche vengono raggiunti in corrispondenza delle umidità nominali più basse.

In questo caso, come già visto per i campioni compattati con la Prova Proctor, la maggior parte dell'acqua viene impiegata per fare reagire la calce, conferendo così

buone caratteristiche meccaniche al terreno. Invece, se l'umidità nominale è elevata, nel terreno rimane acqua in eccesso e le resistenze meccaniche risultano inferiori.

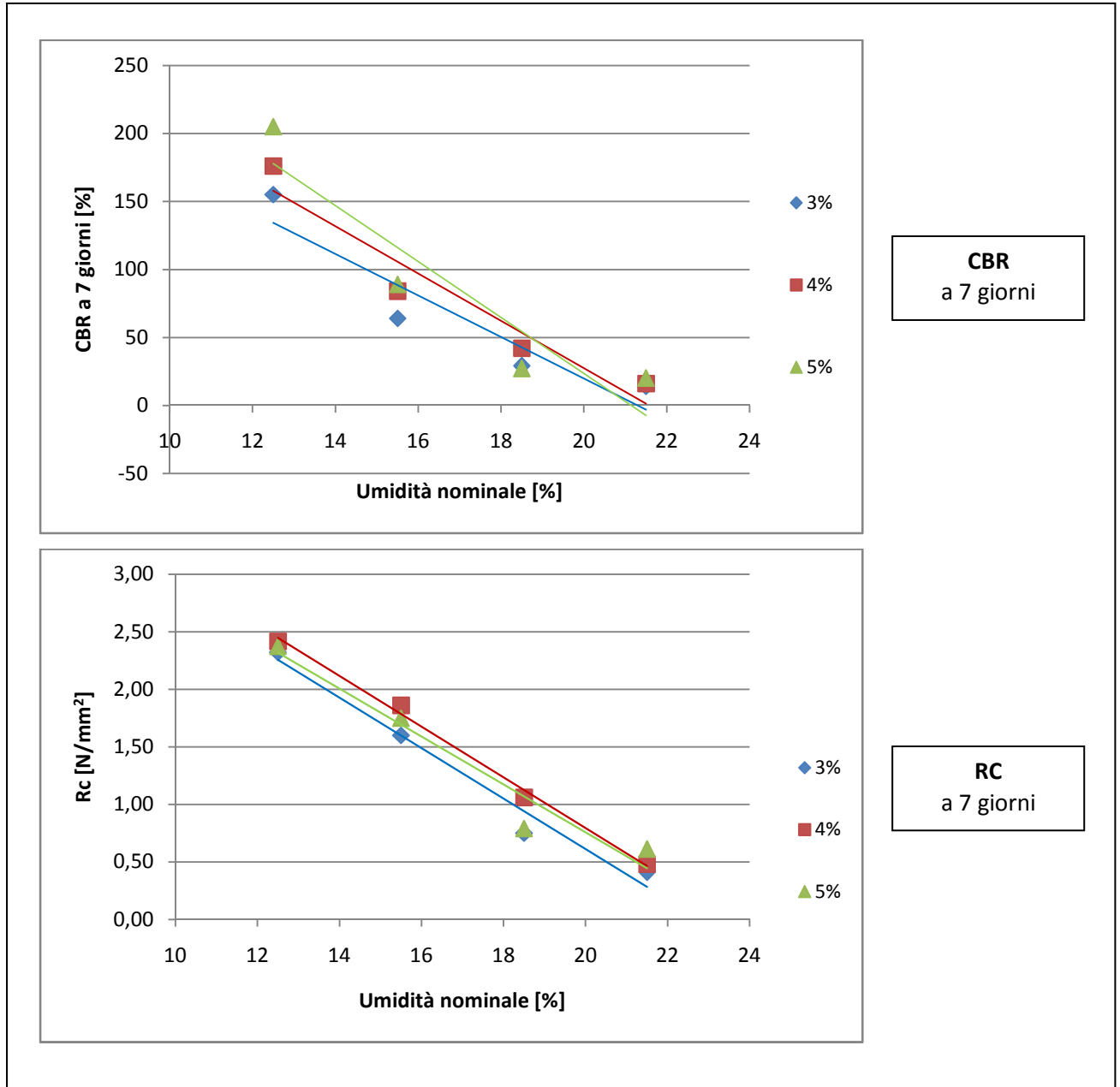


Figura 5.26 – Caratteristiche meccaniche in funzione dell'umidità nominale.

In particolare analizzando le figure 5.25 e 5.26 si possono fare le seguenti considerazioni:

- W = 12,50%: l'indice CBR risulta massimo per il provino caratterizzato dal 5% di calce. Ciò significa che anche un basso tenore di umidità è sufficiente a far reagire la percentuale di calce maggiore. I valori della resistenza a compressione appaiono invece paragonabili, anche se risulta leggermente superiore quello relativo al 4% di calce.
- W = 15,50%: anche in questo caso, come nel caso della serie precedente, il massimo valore di CBR si ottiene in corrispondenza della percentuale di calce più alta, e la resistenza a compressione risulta massima per il provino confezionato col 4% di calce.
- W = 18,50%: le caratteristiche meccaniche dei provini appartenenti a questa serie hanno il medesimo andamento. Infatti, sia per la prova CBR che per quella di resistenza a compressione, il massimo si raggiunge in corrispondenza del 4% di calce.
- W = 21,50%: la serie di provini caratterizzata dall'umidità nominale più elevata possiede valori di resistenza molto bassi; inoltre si può notare come la percentuale di calce utilizzata nella miscela, non influenzi in maniera significativa le caratteristiche meccaniche.

5.3.3. Osservazioni

Per rendere più immediato il confronto tra i valori dell'indice CBR relativi alle due differenti metodologie di compattazione si è realizzata la tabella 5.7:

Tabella 5.4 – Confronto indici CBR relativi alle due metodologie di compattazione.

CBR [%]						
%calce	3		4		5	
w <sub>nom</sub> [%]	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

I valori riportati nella suddetta tabella sono stati graficati mettendo in evidenza, grazie all'uso di due diversi colori, l' influenza delle due metodologie di compattazione sull' indice di portanza californiano.

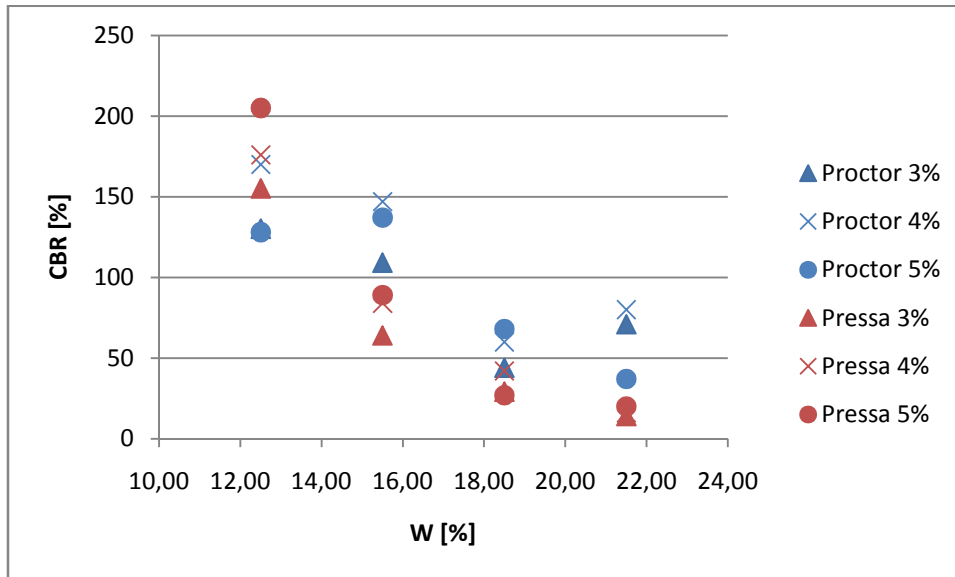


Figura 5.27 – Indici CBR relativi alle due metodologie di compattazione.

Osservando il grafico in figura 5.27 possiamo notare che per bassi tenori di umidità i provini compattati utilizzando la Pressa Giratoria forniscono valori dell'indice CBR



maggiori rispetto a quelli relativi ai provini compattati mediante prova Proctor. Per gradi di umidità elevati la tendenza appena descritta si inverte e i valori di portanza maggiori si ottengono per i provini sottoposti alla tradizionale compattazione impulsiva. Analogamente a quanto visto per l'indice CBR si riportano in tabella 5.8 i valori di resistenza a compressione relativi ad entrambe le tecniche di compattazione utilizzate nell'ambito della sperimentazione.

Tabella 5.8 – Confronto valori di resistenza a compressione relativi alle due metodologie di compattazione.

Rc [N/mm <sup>2</sup> ]						
%calce	3		4		5	
w <sub>nom</sub> [%]	Proctor	Pressa Giratoria	Proctor	Pressa Giratoria	Proctor	Pressa Giratoria
12,50	1,90	2,32	2,24	2,42	2,00	2,37
15,50	1,60	1,60	1,60	1,86	1,90	1,75
18,50	1,00	0,75	1,00	1,06	1,20	0,79
21,50	1,05	0,41	1,08	0,48	0,90	0,61

Utilizzando i dati raccolti in tabella 5.8 è stato elaborato un grafico (figura 5.28) in cui sono posti a confronto gli andamenti della resistenza a compressione relativi ai provini compattati con il macchinario Proctor e con la Pressa Giratoria.

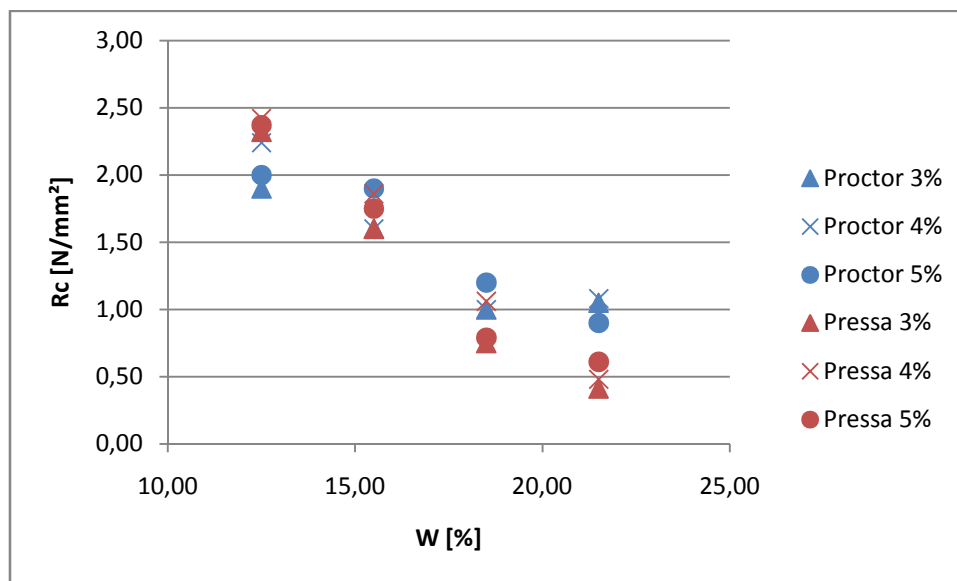


Figura 5.28 – Valori di resistenza a compressione relativi alle due metodologie di compattazione.

Analogamente a quanto visto per l'indice CBR anche i valori di resistenza a compressione alle basse umidità sono massimi per i provini compattati mediante Pressa Giratoria, mentre per gradi di umidità più elevati le resistenze 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.

#### **5.4. PROVINI CONFEZIONATI ALL'UMIDITA' OTTIMALE**

La fase finale della sperimentazione consiste nella realizzazione di due serie di provini confezionati alle umidità ottimali relative ad ogni percentuale di calce considerata, esse risultano diverse a seconda della metodologia di compattazione utilizzata (tabella 5.9):

Tabella 5.9 – Umidità ottimali compattazione Proctor e Giratoria.

	<b>Compattazione Proctor</b>	<b>Compattazione Giratoria</b>
Calce [%]	$W_{ott}$ [%]	$W_{ott}$ [%]
3	13,01	11,91
4	14,24	12,76
5	15,85	14,86

I provini confezionati sono stati sottoposti a prove di portanza CBR ed a prove di resistenza a compressione in condizioni di espansione laterale libera. Nei paragrafi successivi si riportano i risultati ottenuti.

**5.4.1. Compattazione Proctor**

La tabella 5.10 pone a confronto i valori dell'indice CBR e di resistenza a compressione dei 12 provini realizzati nella prima fase della sperimentazione, con quelli relativi ai tre provini confezionati con le tre diverse percentuali di calce e le rispettive umidità ottimali. Nei prospetti riportati in seguito tali valori vengono graficati prima in funzione della percentuale di calce, poi in funzione dell'umidità nominale considerata. Oltre al grafico riassuntivo delle caratteristiche meccaniche relative a tutti i 15 provini considerati, si riporta anche quello corrispondente alla sola serie confezionata all'umidità ottimale di compattazione.

Tabella 5.10 – Confronto indici CBR e resistenza a compressione a 7 giorni di maturazione.

%calce	CBR [%]			RC [N/mm <sup>2</sup> ]		
	3	4	5	3	4	5
w%						
12,50	130	170	128	1,9	2,24	2
15,50	109	147	137	1,6	1,6	1,9
18,50	44	60	68	1	1	1,2
21,50	71	80	37	1,05	1,08	0,9
Wott	172	172	154	2,2	2,33	2,1

Per la compattazione impulsiva Proctor i valori massimi dell'indice CBR (figure 5.29 e 5.30) e della resistenza a compressione (figure 5.31 e 5.32) vengono raggiunti, per ogni percentuale di calce considerata, dai provini confezionati utilizzando le umidità ottimali di compattazione.

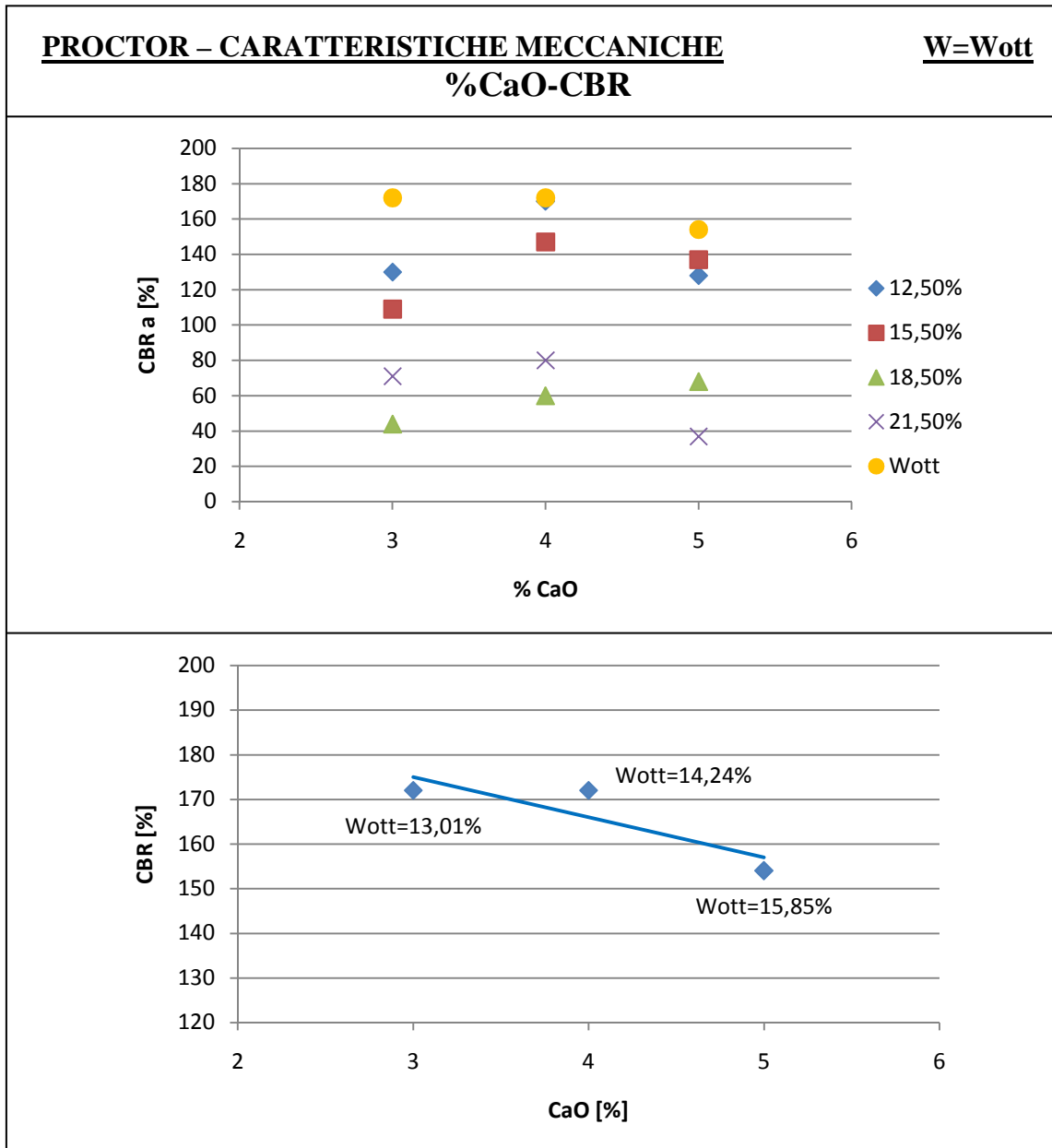


Figura 5.29 – Confronto dell'indice CBR dei provini realizzati nella prima parte della sperimentazione con quello relativo ai tre provini confezionati all'umidità ottimale in funzione della percentuale di calce.

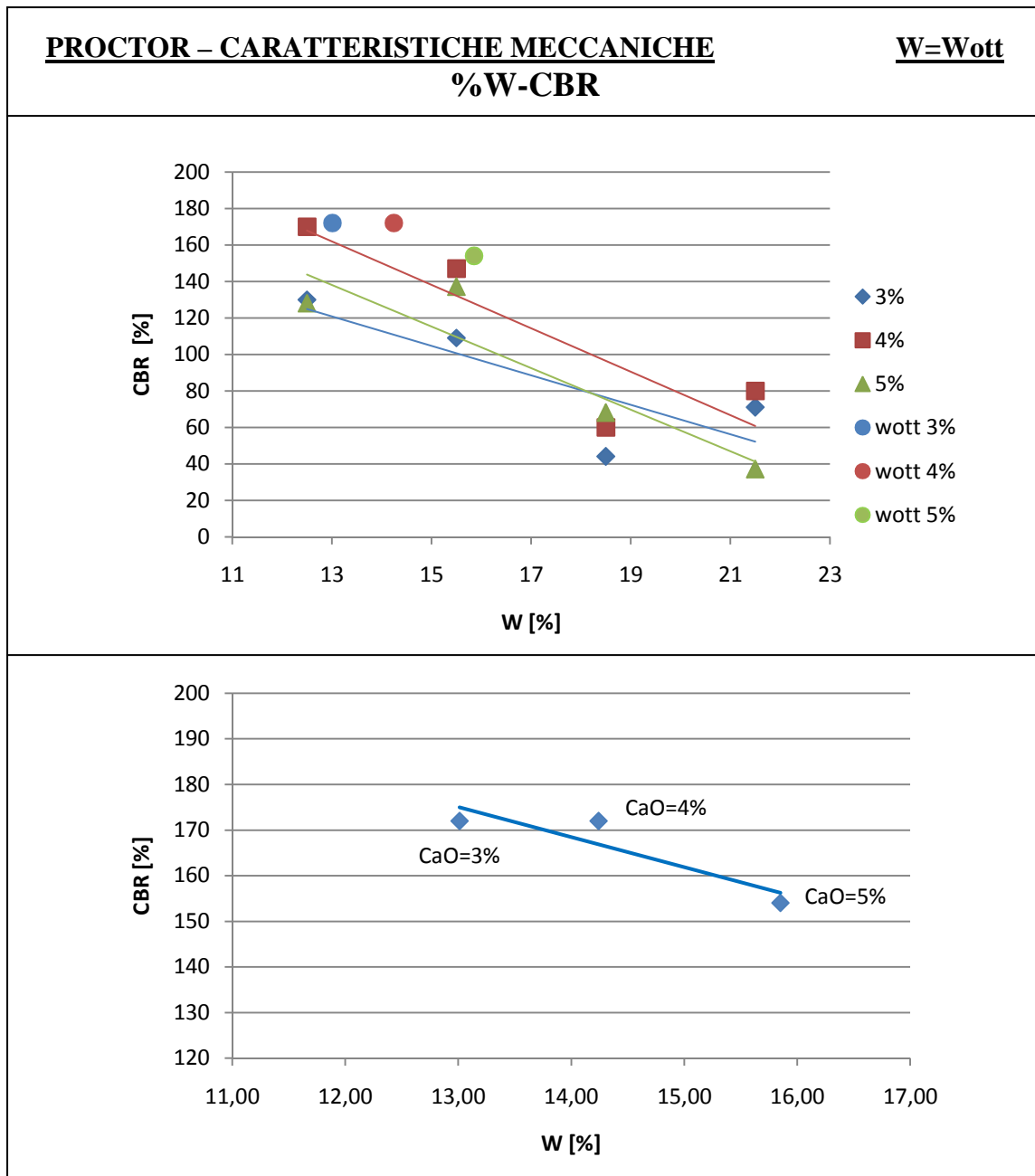


Figura 5.30 – Confronto dell'indice CBR dei provini realizzati nella prima parte della sperimentazione con quello relativo ai tre provini confezionati all'umidità ottimale in funzione dell'umidità nominale.

I provini confezionati con il 3% e il 4% di calce e le relative umidità ottimali possiedono lo stesso valore dell'indice CBR, ciò può essere dovuto al fatto che la differenza tra le due umidità è minima. Il terzo provino, caratterizzato dal 5% di calce e dall'umidità più elevata, ha un indice CBR inferiore; in questo caso è possibile che parte dell'acqua presente non riesca a reagire con la calce nell'intervallo di tempo a

disposizione per la reazione, rimanendo così all'interno del terreno e riducendone le caratteristiche meccaniche.

Osservando i grafici in figura 5.31 e 5.32 si nota che la resistenza a compressione dei provini compattati all'umidità ottimale risulta massima in corrispondenza del 4% di calce.

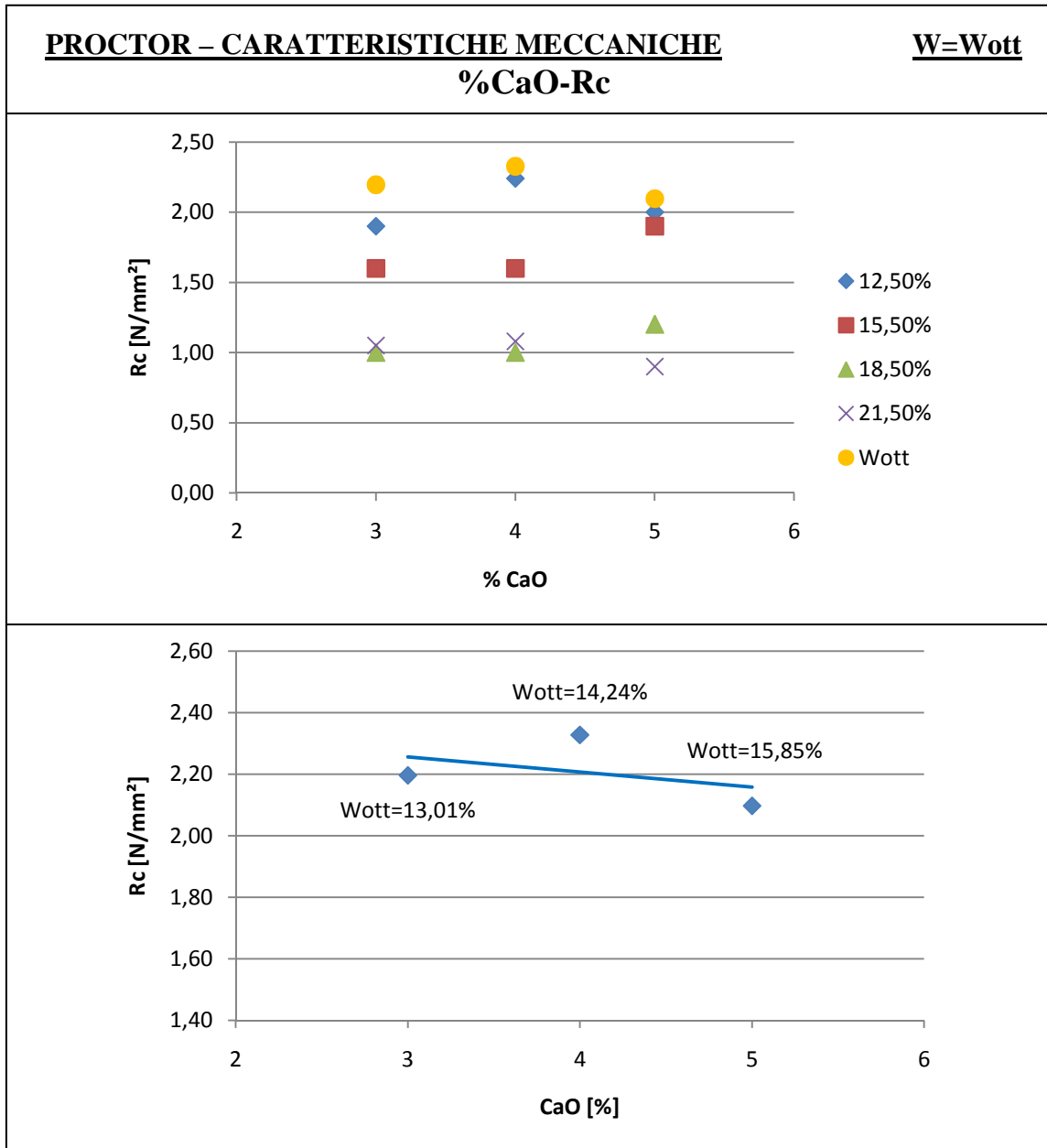


Figura 5.31 – Confronto del valore di resistenza a compressione dei provini realizzati nella prima parte della sperimentazione con quello relativo ai tre provini confezionati all'umidità ottimale in funzione della percentuale di calce.

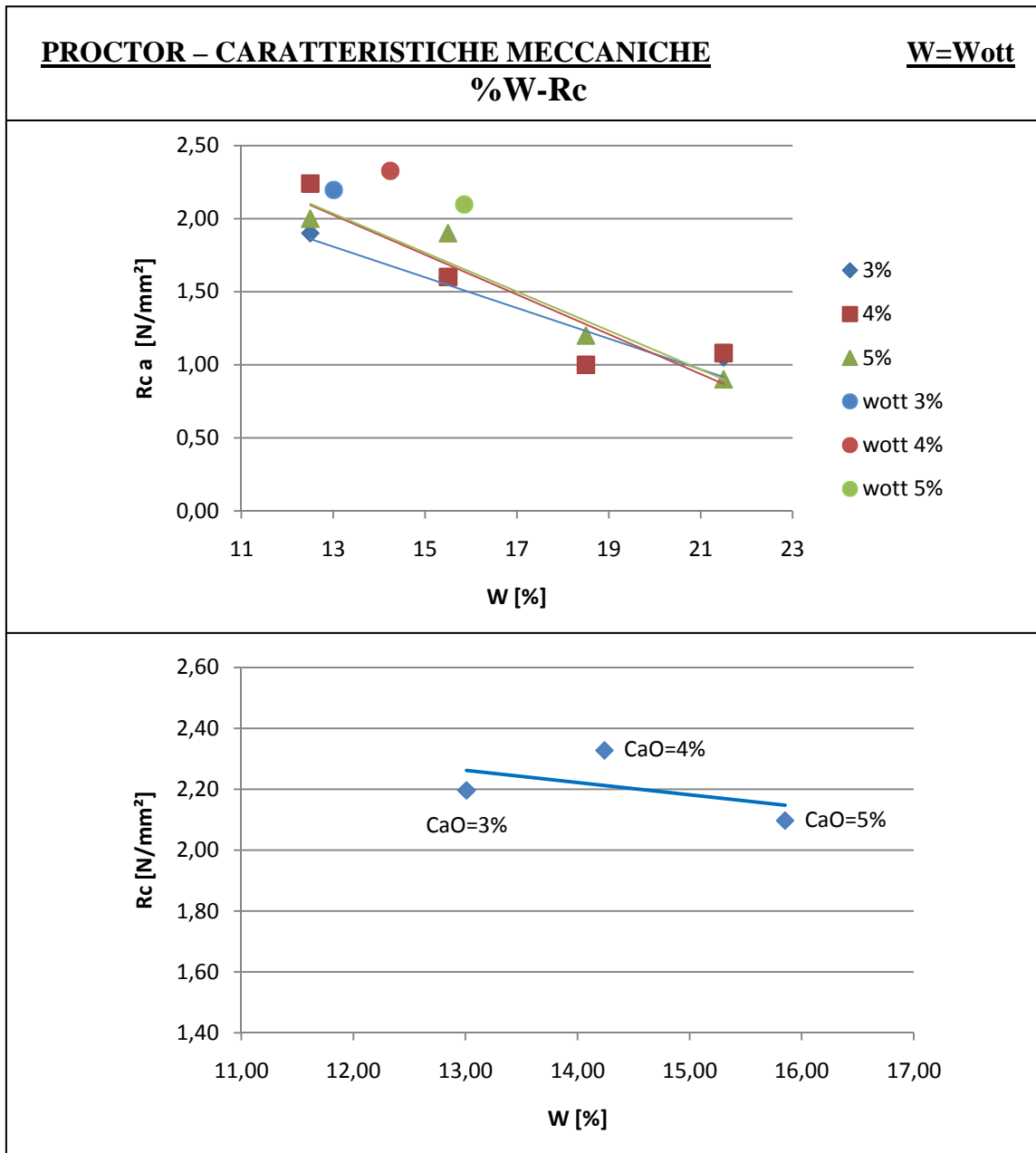


Figura 5.32 – Confronto del valore di resistenza a compressione dei provini realizzati nella prima parte della sperimentazione con quello relativo ai tre provini confezionati all'umidità ottimale in funzione dell'umidità nominale.

**5.4.2 Compattazione Giratoria**

I valori meccanici ottenuti con la compattazione giratoria vengono riportati in tabella 5.11. Anche in questo caso tali valori vengono graficati prima in funzione della percentuale di calce, poi in funzione dell'umidità nominale considerata.

Tabella 5.11 – Confronto indici CBR e resistenza a compressione a 7 giorni di maturazione.

%calce	CBR [%]			Rc [N/mm <sup>2</sup> ]		
	3	4	5	3	4	5
w%						
12,50	155	176	205	2,32	2,42	2,37
15,50	64	84	89	1,6	1,86	1,75
18,50	29	42	27	0,75	1,06	0,79
21,50	14	16	20	0,41	0,48	0,61
Wott	164	178	159	2,24	2,16	2,0



Per le miscele caratterizzate dal 3% e dal 4% di calce i valori di portanza più elevati vengono raggiunti in corrispondenza dei provini confezionati all'umidità nominale di compattazione; per il 5% di calce invece l'indice CBR risulta massimo per la serie caratterizzata dal 12,50% di umidità nominale (figure 5.33 e 5.34).

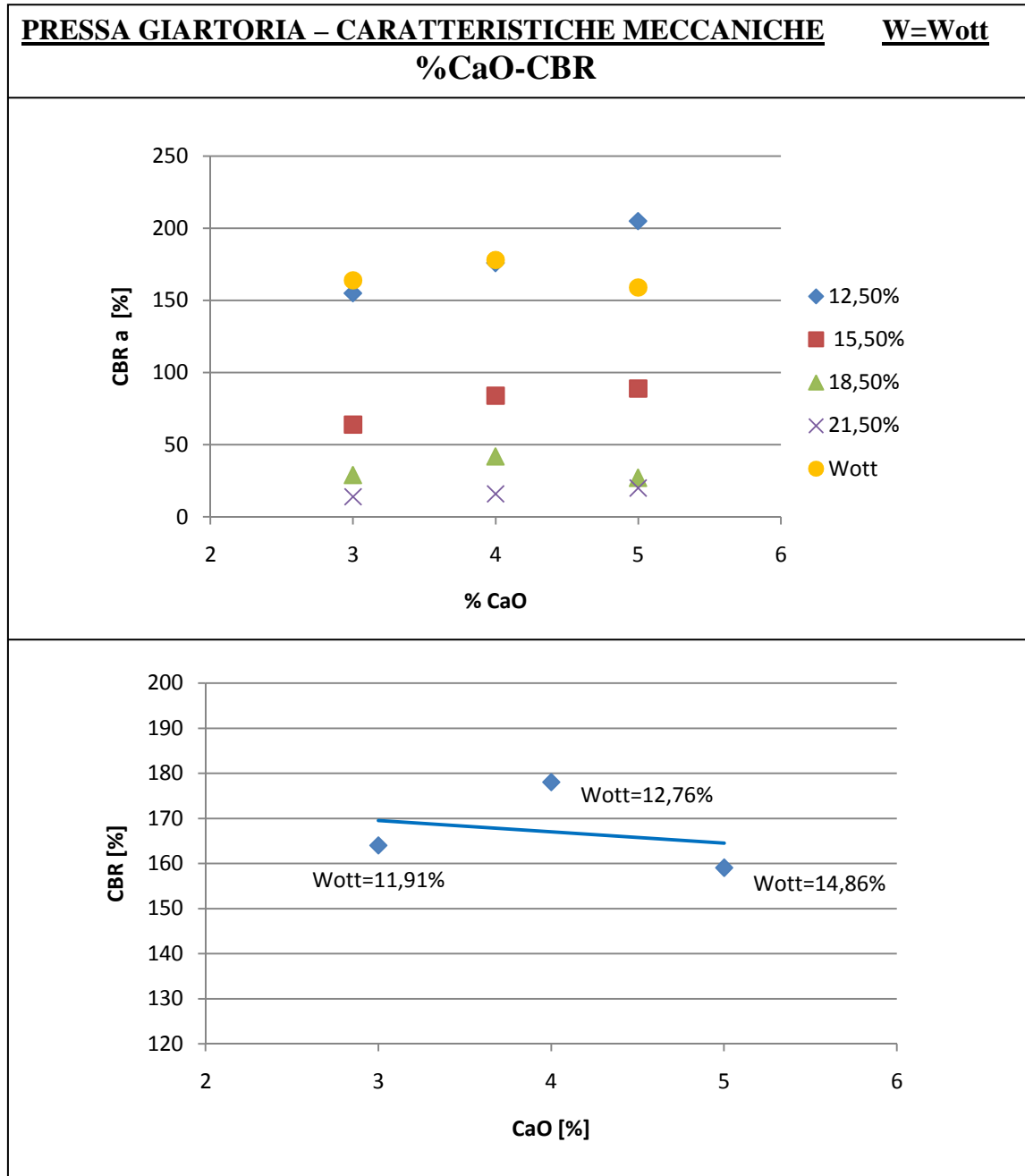


Figura 5.33 – Confronto dell'indice CBR dei provini realizzati nella prima parte della sperimentazione con quello relativo ai tre provini confezionati all'umidità ottimale in funzione della percentuale di calce.

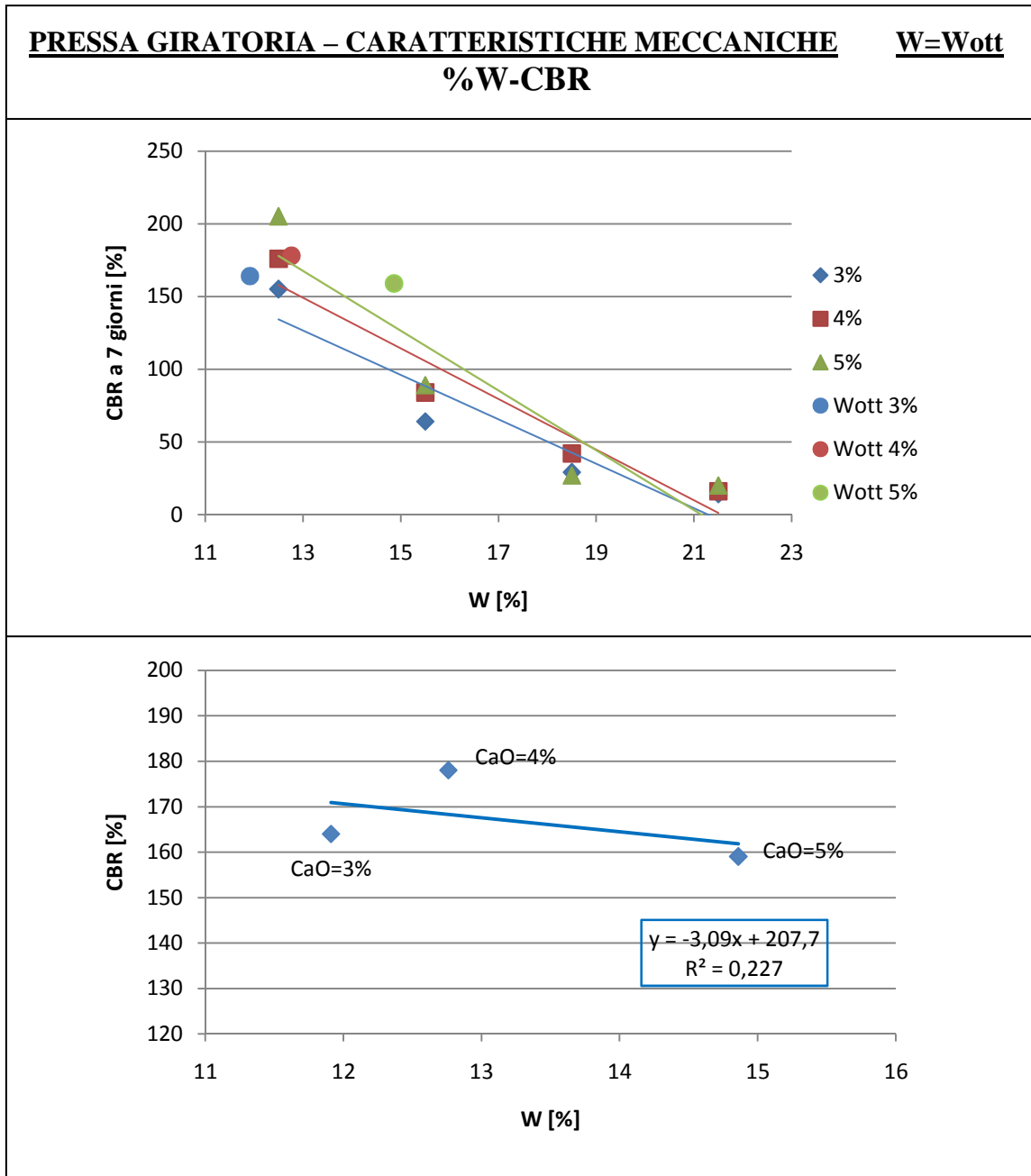


Figura 5.34 – Confronto dell'indice CBR dei provini realizzati nella prima parte della sperimentazione con quello relativo ai tre provini confezionati all'umidità ottimale in funzione dell'umidità nominale.

La resistenza a compressione dei provini confezionati con le umidità ottimali di compattazione cala all'aumentare del tasso di umidità, inoltre i valori relativi a questa serie non sono quelli massimi registrati. Infatti, osservando i grafici in figura 5.35 e 5.36 si può notare che i provini relativi alla serie con umidità nominale pari a 12,50% presentano caratteristiche meccaniche migliori.

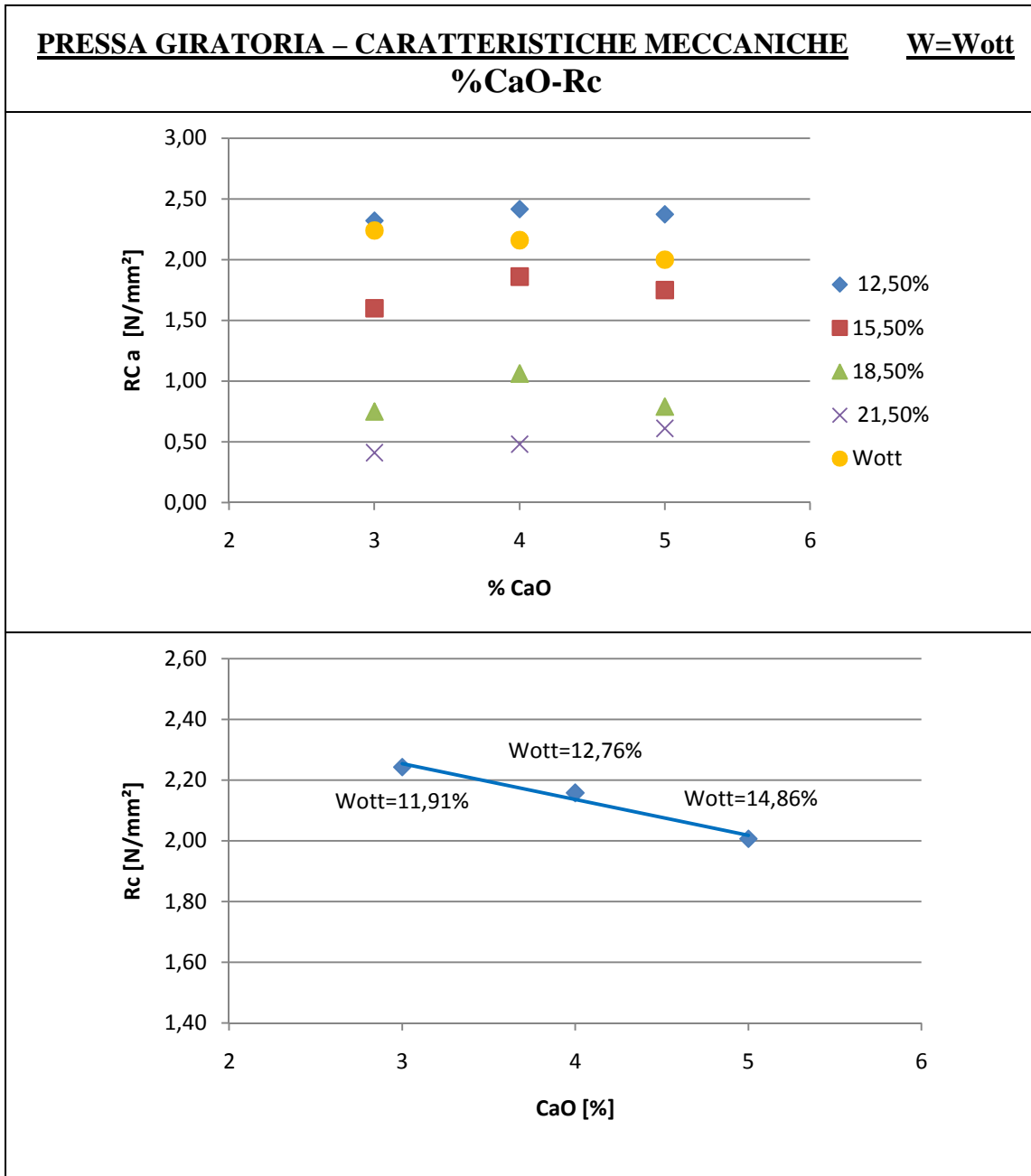


Figura 5.35 – Confronto del valore di resistenza a compressione dei provini realizzati nella prima parte della sperimentazione con quello relativo ai tre provini confezionati all'umidità ottimale in funzione della percentuale di calce.

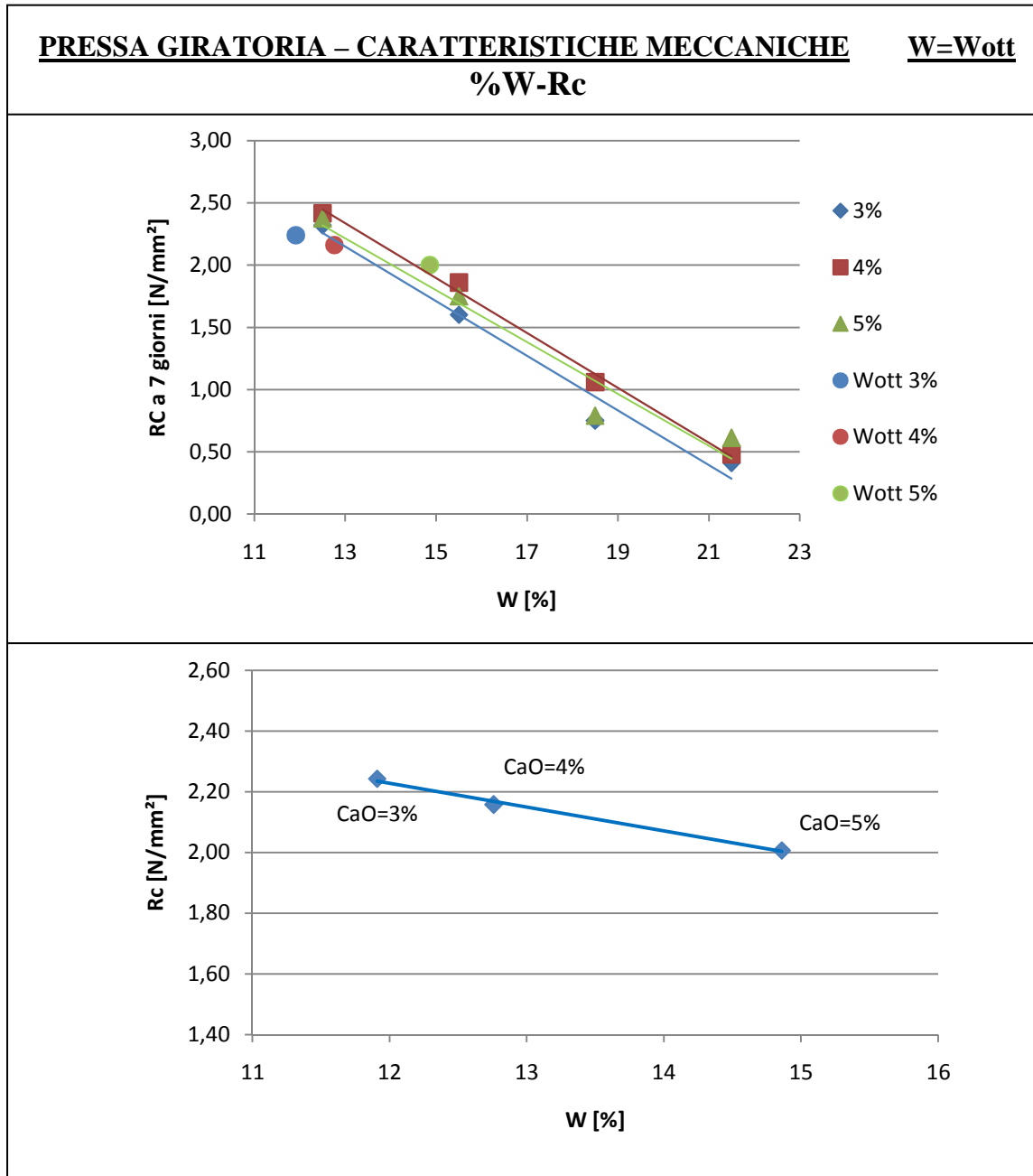


Figura 5.36 – Confronto del valore di resistenza a compressione dei provini realizzati nella prima parte della sperimentazione con quello relativo ai tre provini confezionati all'umidità ottimale in funzione dell'umidità nominale.

**5.4.3 Osservazioni**

Per rendere più immediato il confronto tra i valori delle caratteristiche meccaniche relative alle due serie di provini compattati all'umidità nominale è stata realizzata la tabella riassuntiva 5.12:

Tabella 5.12 – Confronto caratteristiche meccaniche dei provini confezionati con l'umidità ottimale di compattazione.

Calce [%]	<b>PROCTOR</b>			<b>PRESSA GIRATORIA</b>		
	Wott	RC [N/mm <sup>2</sup> ]	CBR [%]	Wott	RC [N/mm <sup>2</sup> ]	CBR [%]
3	13,01	2,20	172	11,91	2,24	164
4	14,24	2,33	172	12,76	2,16	178
5	15,85	2,10	154	14,86	2,00	159

Con i dati riassunti in tabella 5.12 sono stati elaborati quattro grafici in cui sono posti a confronto gli andamenti dell'indice CBR e della resistenza a compressione dei provini confezionati all'umidità ottimale, a seconda della metodologia di compattazione utilizzata. Tali valori sono graficati prima in funzione della percentuale di calce utilizzata (figure 5.37 e 5.39), poi in funzione dell'umidità ottimale corrispondente (figure 5.38 e 5.40).

Per i provini confezionati utilizzando il 4% ed il 5% di calce la compattazione giratoria permette di raggiungere valori più elevati dell'indice CBR rispetto alla compattazione impulsiva Proctor. Per la porzione di prova relativa al 3% di calce accade invece il contrario (figure 5.37 e 5.38).

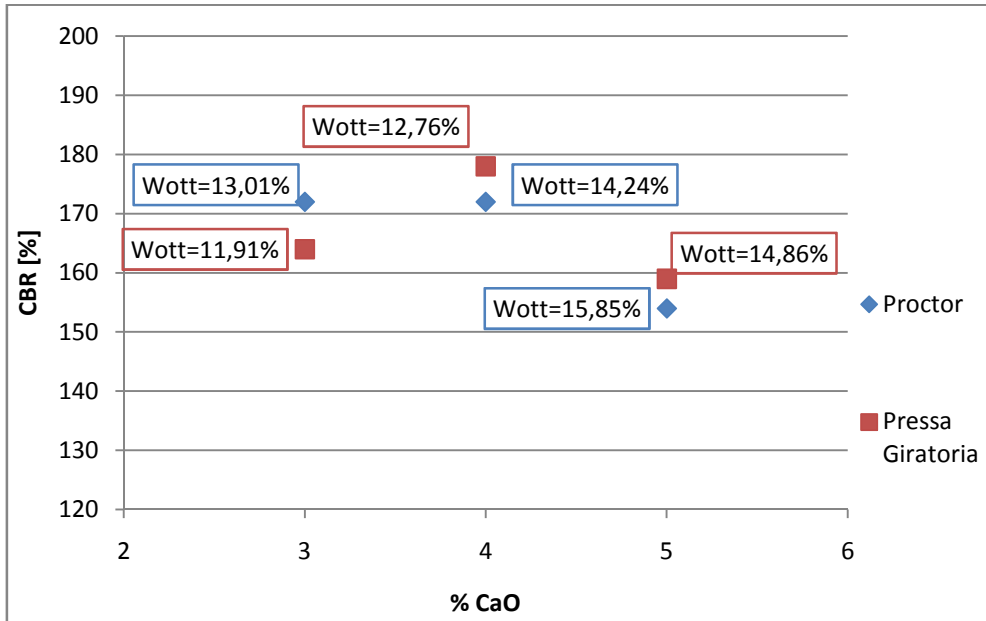


Figura 5.37 – Indice CBR dei provini confezionati all'umidità ottimale espresso in funzione delle percentuale di calce.

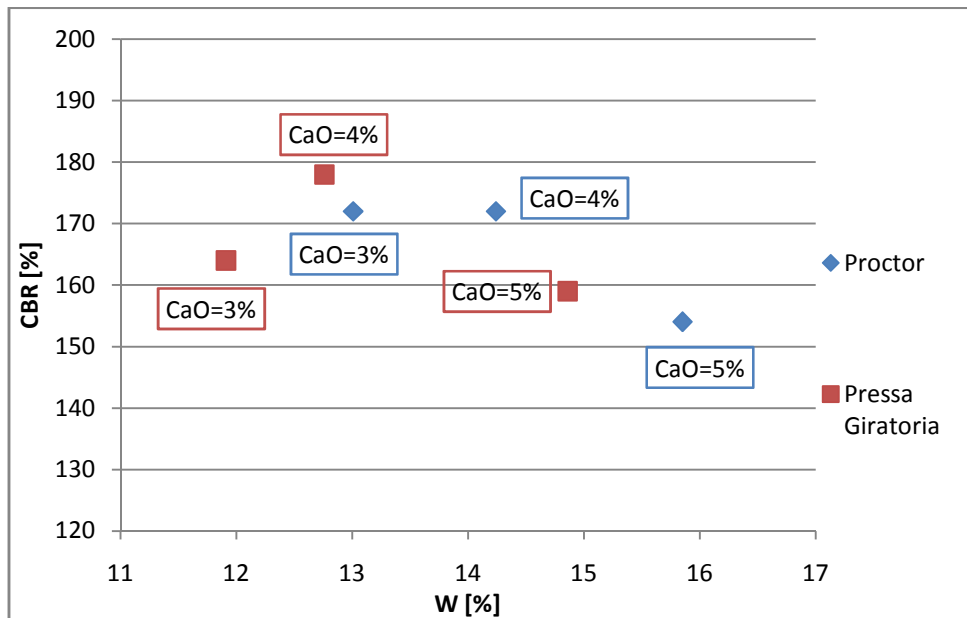


Figura 5.38 – Indice CBR dei provini confezionati all'umidità ottimale espresso in funzione del grado di umidità.

Com'è possibile osservare in figura 5.39 la resistenza a compressione relativa alla compattazione giratoria cala all'aumentare del grado di umidità presente nel terreno. Per la compattazione impulsiva Proctor invece, la resistenza a compressione non ha un andamento monotono e raggiunge il valore massimo in corrispondenza del 4% di calce.

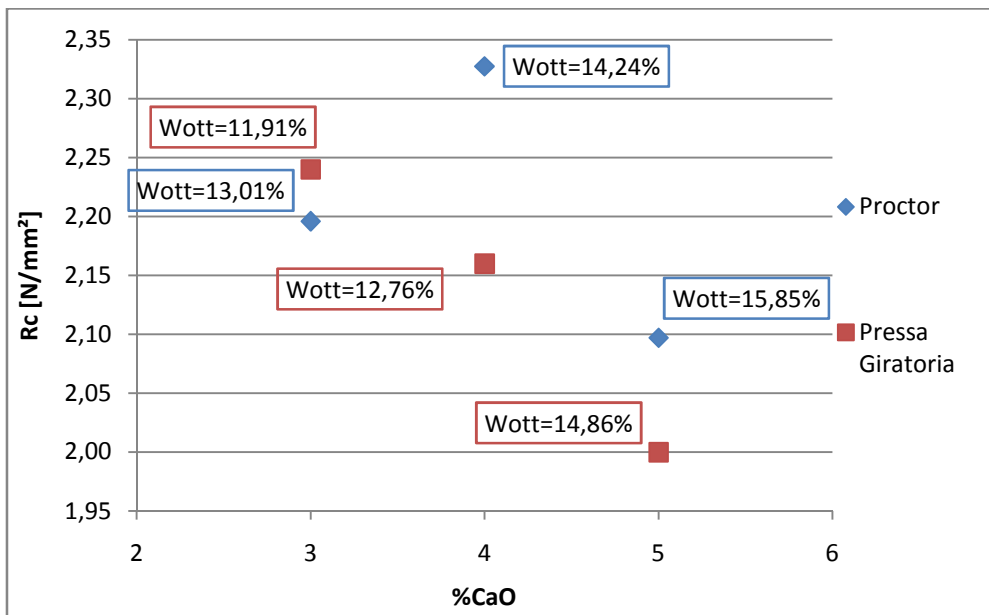


Figura 5.39 – Resistenza a compressione dei provini confezionati all'umidità ottimale espressa in funzione delle percentuale di calce.

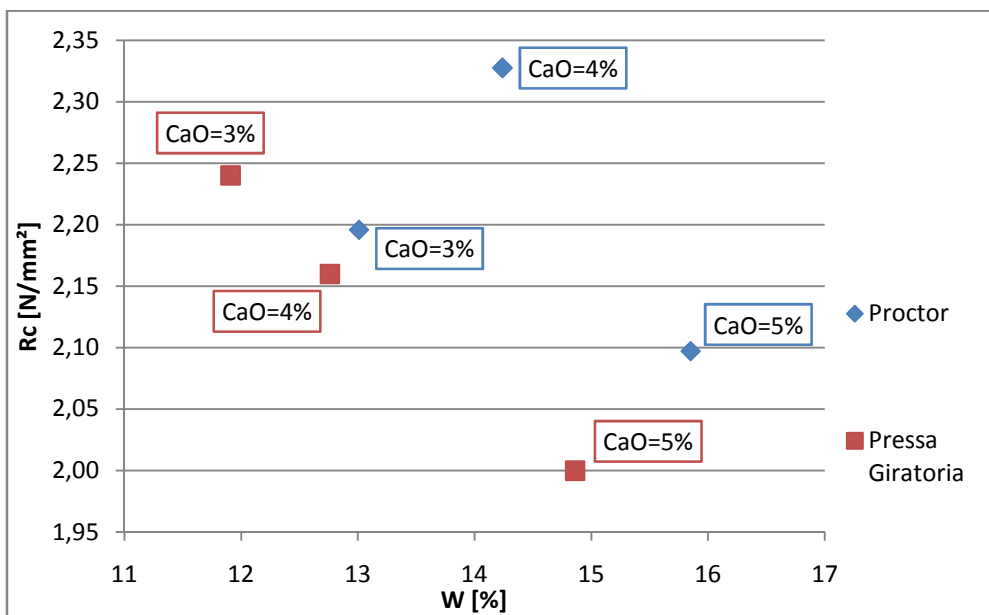


Figura 5.40 – Resistenza a compressione dei provini confezionati all'umidità ottimale espressa in funzione del grado di umidità.

## CONCLUSIONI

Lo studio effettuato si poneva l'obiettivo di progettare i trattamenti dei terreni con leganti in grado di fornire risultati altamente prestazionali in un'ottica di convenienza economica e di basso impatto ambientale.

Ad oggi la procedura di progettazione della miscela terra – acqua – calce prevede, nella fase di compattazione, l'utilizzo della tradizionale prova Proctor. Tale metodologia fornisce al terreno sollecitazioni di tipo impulsivo, differenti da quelle a cui il terreno risulta sottoposto sia in cantiere, ad opera dei rulli, sia durante la vita utile della pavimentazione, ad opera del traffico veicolare.

Può accadere quindi che le caratteristiche finali del terreno stabilizzato risultino differenti da quelle ottenute in laboratorio. Per questo motivo si vuole pervenire alla definizione di una procedura di costipamento del terreno stabilizzato utilizzando, al posto della tradizionale prova Proctor, la compattazione giratoria. La Pressa Giratoria è infatti un macchinario in grado di imprimere al terreno sollecitazioni più simili a quelle fornite in sito al momento della compattazione mediante rulli da cantiere, come dimostrato negli studi analizzati.

Per pervenire alla corretta progettazione della miscela terra – acqua – calce è fondamentale eseguire prove di prequalifica per indagare le caratteristiche chimico – fisiche del terreno e del legante. Terminata la procedura di prequalifica sono state confezionate due serie di provini caratterizzate da diversi gradi di umidità nominale e differenti percentuali di calce. Nell'ottica del confronto tra la compattazione impulsiva e quella giratoria una serie è stata compattata mediante prova Proctor e l'altra utilizzando la Pressa Giratoria. Una volta compattate, le miscele sperimentali sono state sottoposte a prove meccaniche di resistenza a compressione in condizioni di espansione laterale libera e prove di portanza CBR ed i risultati sono stati messi in relazione con le due variabili fondamentali da progettare: l'umidità ed il contenuto di legante.

I massimi valori delle caratteristiche meccaniche sono stati ottenuti in corrispondenza di bassi tenori di umidità e per compattazione con la Pressa Giratoria. All'aumentare del grado di umidità presente nel terreno i valori meccanici calano per entrambe le metodologie di compattazione.



Da un'analisi volumetrica delle due serie di provini sono state valutate la densità secca massima e l'umidità ottimale di compattazione.

Sia per la compattazione impulsiva che per quella giratoria, i valori di umidità ottimale relativi alle diverse percentuali di calce sono risultati essere non troppo elevati; ciò concorda col fatto che i massimi valori dell'indice CBR e di resistenza a compressione sono raggiunti in corrispondenza dei tenori di umidità inferiori. Infatti, in condizioni ottimali di costipamento, cioè per terreni caratterizzati dal grado di umidità ottimale e dal valore massimo di densità secca, le caratteristiche meccaniche risultano migliori.

Per progettare definitivamente la miscela ottimale, l'indice CBR e la resistenza a compressione delle miscele sperimentali devono essere confrontati con i valori meccanici previsti dai capitolati prestazionali di riferimento. La percentuale di calce da utilizzare per la stabilizzazione sarà superiore a quella minima in grado di garantire caratteristiche superiori ai limiti imposti, e funzione anche di criteri economici che non sono oggetto di questo studio; dopo aver determinato la percentuale di calce si ricava per regressione il grado di umidità ottimale a cui effettuare la miscelazione e la compattazione.

Oltre al confronto tra le due metodologie di compattazione è stata elaborata una procedura per la determinazione dell'assorbimento d'acqua all'interno delle diverse fasi della stabilizzazione.

Per tutte le umidità nominali considerate e per tutte le percentuali di calce prese in esame, si è riscontrato che il tenore di umidità cala con il trascorrere del tempo.

Nella fase iniziale della reazione la percentuale di calce presente influenza notevolmente l'assorbimento d'acqua; dal momento della miscelazione a quello della compattazione invece l'assorbimento risulta pressoché costante e appare quindi poco condizionato sia dall'umidità nominale che dalla quantità di calce.

Infine, all'interno della procedura per la determinazione dell'assorbimento, sono state rilevate la temperatura iniziale del terreno e quella massima raggiunta dal materiale in seguito alla miscelazione. La reazione acqua – calce è infatti una reazione fortemente esotermica e l'incremento di temperatura può essere considerato indice dell'efficacia della stabilizzazione. Si è riscontrato che per tutti i tenori di umidità nominali la temperatura aumenta con la percentuale di calce utilizzata: maggiore è la quantità di calce, maggiore è l'entità della reazione esotermica.

## BIBLIOGRAFIA

### RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] P. COLOMBO, F. COLLESELLI, “*Elementi di geotecnica*”, Zanichelli, 2002.
- [2] A. PRIOLO, “*Metodi di prequalifica dei materiali per la stabilizzazione a calce dei rilevati stradali*”, Tesi di laurea, 2009.
- [3] dispense “*Forum italiano calce*”, Internet.
- [4] CARMEUSE NATURAL CHEMICALS “*Lime Treated Soil*”, Internet.
- [5] UNICALCE, “*Stabilizzazione delle terre con calce*”, Internet.
- [6] A. CANZIANI, U. PRESSATO, “*Tecniche di lavorazione in sito della miscela terra-calce*”.
- [7] R. CANCELLIERI, “*Analisi comparativa sulle metodologie di costipamento delle terre in laboratorio*”, Tesi di laurea, 2009.
- [8] Z. I. KHAN, H. I. AL – ABDUL WAHAB, I. ASI, R. RAMADHAN, “*Comparative study of asphalt concrete laboratory compaction methods to simulate field compaction*”, Construction and Building Materials, 1998.
- [9] WWW. BUILDUP.IT, “*Il conglomerato bituminoso: alcuni chiarimenti su modulo di elasticità e l’Alto Modulo*”, sintesi tratta dalla rivista “*Rassegna sul bitume*” n° 57/07.
- [10] A. SIMONE, “*La caratterizzazione dei terreni mediante l’utilizzo della pressa giratoria*”, X Convegno SIIV, 2000.
- [11] K. LEE, M. PREZZI, N. KIM, “*Subgrade design parameters from samples prepared with different compaction methods*”, Journal of Transportation Engineering, Vol. 133 febbraio 2007.
- [12] A. STANGHELLINI, “*Studio sperimentale sulle tecniche di costipamento delle terre*”, Tesi di laurea, 2009

**TESTI CONSULTATI**

M. BOCCI, G. CERNI, *“Influenza delle modalità di lavorazione sulle caratteristiche di resistenza della miscela terra – calce”*, XI Convegno SIIV, 2001.

L. CARIBONI, A. CANZIANI, U. PRESSATO, *“Esperienze italiane nel ricupero di terre limo-argillose trattate con calce per le infrastrutture viarie”*, XI Convegno SIIV, 2001.

A. MONTEPARA, G. TEBALDI, *“Una nuova metodologia di prova per l’impiego di terre stabilizzate nel corpo stradale”*, X Convegno SIIV, 2000.

**RIFERIMENTI NORMATIVI****Norme CNR**

CNR BU 23/71 – *Analisi granulometrica di una terra mediante crivelli e setacci.*

CNR BU 27/72 – *Metodo di prova per la misura dell’equivalente in sabbia.*

CNR BU 36/73 – *Stabilizzazione delle terre con calce.*

CNR BU 69/73 – *Norme sui materiali stradali. Prova di costipamento di una terra.*

**Normative UNI**

UNI 10006: 2002 – *Costruzione e manutenzione delle strade. Tecniche di impiego delle terre.*

UNI 10014: 1964 – *Prove sulle terre. Determinazione dei limiti di consistenza (o di Atterberg) di una terra.*

**Normative UNI EN**

UNI EN 932 – 1: 1998 – *Metodi di prova per determinare le proprietà generali degli aggregati. Metodi di campionamento.*

UNI EN 932 – 2: 2000 – *Metodi di prova per determinare le proprietà generali degli aggregati. Metodi per la riduzione dei campioni di laboratorio.*

UNI EN 933 – 1: 1999 – *Metodi di prova per determinare le caratteristiche geometriche degli aggregati. Determinazione della distribuzione granulometrica. Analisi granulometrica per setacciatura.*

UNI EN 196 – 2: 2005 – *Metodi di prova dei cementi. Analisi chimica dei cementi.*

UNI EN 459 – 2: 2002 – *Calci da costruzione. Metodi di prova.*

UNI EN 1744 – 1: 1999 – *Metodi di prova per determinare le proprietà chimiche degli aggregati. Analisi chimica.*

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: 2004 – *Miscele non legate. Specifiche.*

UNI EN 13286 – 41: 2003 – *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 – 47: 2004 – *Miscele non legate e legate con leganti idraulici. Metodo di prova per la determinazione dell' indice CBR di miscele legate con leganti idraulici.*

### **Normative UNI EN ISO**

UNI EN ISO 14688 – 1: 2003 – *Indagini e prove geotecniche. Identificazione e classificazione dei terreni. Identificazione e descrizione.*

UNI EN ISO 14688 – 2: 2003 – *Indagini e prove geotecniche. Identificazione e classificazione dei terreni. Principi per una classificazione.*

UNI EN ISO/TS 17892 – 12: 2005 – *Indagini e prove geotecniche. Prove di laboratorio sui terreni. Determinazione dei limiti di Atterberg.*

### **Norme ASTM**

ASTM D 2974 – 87a – *Standard test methods for moisture, ash and organic matter of peat and other organic soils.*

ASTM D 6276 – 99a: 2006 – *Standard test methods for using pH to estimate the soil – lime proportion requirement for soil stabilization.*

**Siti web consultati**

[www.ascelibrary.org](http://www.ascelibrary.org)

[www.buildup.it](http://www.buildup.it)

[www.engineeringvillage2.org](http://www.engineeringvillage2.org)

[www2.sba.unibo.it](http://www2.sba.unibo.it)

[www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)