



COSTRUZIONE DEI RILEVATI STRADALI E FERROVIARI: VALUTAZIONE DELLE METODOLOGIE DI PROGETTO DELLE TERRE TRATTATE CON CALCE

Celauro B. ^{*}, Bevilacqua A. ^{*}, Dario Lo Bosco [†] e Celauro C. ^{*}

^{*}Dipartimento di Ingegneria delle Infrastrutture Viarie (DIIV)

Università di Palermo

Viale delle Scienze, 90128 Palermo, Italy

e-mail: bernardo.celauro@unipa.it

[†]Dipartimento di Informatica, Matematica, Elettronica e Trasporti

Università Mediterranea di Reggio Calabria

Via Graziella - Feo di Vito - 89124 Reggio Calabria, Italy

Key words: Road and railway works, lime treatment of fine soils, design methods.

Parole chiave: Lavori stradali e ferroviari, stabilizzazione terre con calce, metodi di progetto.

Sommario. *Nella costruzione delle opere civili e, soprattutto, delle infrastrutture di trasporto, elemento qualificante per la minimizzazione degli impatti economici ed ambientali è l'adozione del trattamento con calce dei terreni argillosi di scavo, di per sé non idonei ad essere impiegati nei manufatti in terra, e la loro utilizzazione - previo trattamento con calce, appunto - per la costruzione di rilevati ed altre opere in terra. La tecnica del trattamento con calce delle terre argillose permette di ottenere diversi vantaggi di ordine tecnico, economico ed ambientale. I progressi tecnologici conseguiti negli ultimi decenni, particolarmente per quanto riguarda gli studi di progetto, i mezzi di cantiere ed i processi costruttivi hanno permesso, di estendere tale tecnica con successo agli strati superiori del rilevato ed anche agli strati di fondazione della pavimentazione. Considerato che i principali Capitolati Italiani prevedono metodologie differenti per il progetto delle miscele terra-calce, alcune delle quali si distinguono nettamente da quanto previsto in campo internazionale e, in particolare, dalla norma armonizzata a livello europeo EN 14227-11 "Terreno trattato con calce", è parso opportuno valutare comparativamente tali metodologie con quelle internazionali più consolidate, al fine di verificare, tramite un ampio piano sperimentale, l'idoneità delle indicazioni e dei riferimenti per gli studi di formulazione delle miscele in esse contenute. Si dimostra che la metodologia ANAS si discosta significativamente oltre che dalle altre in uso in Italia (RFI), anche dalle principali normative internazionali e, considerata l'ampia diffusione di tali specifiche per i lavori stradali in Italia, i risultati presentati evidenziano la necessità di una pronta revisione di tale metodologia, anche per un utile allineamento a quanto previsto dalla normativa europea al riguardo..*

1 INTERESSE DELLA TECNICA

Il trattamento con calce dei terreni limo-argillosi è una tecnologia avanzata, sperimentata ormai da diversi anni, che, modificando le proprietà fisiche dei terreni fini di scavo, ne permette la riutilizzazione nella costruzione delle opere in terra, stradali e ferroviarie, così da minimizzare, allo stesso tempo, il fabbisogno di idonei materiali da cava di prestito e la necessità del trasporto a rifiuto delle materie non idonee.

In quest'ottica, il ricorso al trattamento con calce dei terreni fini limo-argillosi prodotti dagli scavi si iscrive tra le principali misure di salvaguardia ambientale per lo sviluppo sostenibile, rispondendo appieno ai "principi di minimizzazione dell'impegno di risorse materiali non rinnovabili e di massimo riutilizzo delle risorse naturali impegnate dall'intervento" espressamente richiamati dall'art.15 del D.P.R. 554/99 – "Regolamento di attuazione della legge quadro in materia di lavori pubblici", poiché evita la produzione di rifiuti ed il loro conferimento a discarica e minimizza il fabbisogno di materie da cave di prestito¹.

Per le notevoli quantità di materie di scavo coinvolte nei lavori stradali e ferroviari, il reimpiego delle terre argillose opportunamente stabilizzate con calce (o con calce e cemento) per formare il corpo dei rilevati, compresa la parte più prossima al piano di posa della pavimentazione, nonché gli strati di sottofondo della pavimentazione permette non solo di conseguire intuibili benefici economici legati al contenimento dei volumi di materie da portare a rifiuto e di quelli da approvvigionare da cave di prestito, ma contribuisce significativamente² alla riduzione dell'impatto ambientale in fase di esecuzione, poiché permette di ridurre gli effetti negativi legati al trasporto di tali materie da e per i luoghi di discarica e di approvvigionamento, che altrimenti graverebbe sulla viabilità ordinaria, nel breve arco di tempo della realizzazione dei lavori, con gravi conseguenze sul degrado strutturale delle pavimentazioni trafficate, data l'elevata aggressività dei mezzi di trasporto, e con elevato inquinamento atmosferico per le emissioni di inquinanti e di polveri.

Occorre aver presente, inoltre, che la stabilizzazione con calce (o con calce e cemento) delle terre non solo permette di ottenere strati di sottofondo di elevata qualità meccanica e funzionale³, ma consente oggi di realizzare strati del corpo della sovrastruttura, anche nel caso di strade destinate a sopportare elevati traffici pesanti⁴. La favorevole evoluzione a lungo termine delle caratteristiche strutturali ottenute per gli strati di sottofondo trattati con calce consente, infatti, di tenerne addirittura conto nel dimensionamento della sovrastruttura, per il contributo alla resistenza complessiva^{5,6}.

Si tratta, in questi casi, di ben governare gli elementi che, in fase di progetto e di esecuzione dei lavori, sono in grado di assicurare la qualità e le prestazioni finali delle miscele, in relazione alla prevista destinazione d'uso.

In Italia, a differenza che in numerosi altri Paesi, dove la tecnica è largamente utilizzata e sperimentata da diversi anni, solo a partire da quest'ultimo decennio si registra un certo interesse, correlabile, da un lato, soprattutto alle azioni legislative in materia ambientale, e d'altro lato al perfezionamento delle macchine specifiche per il trattamento (spanditrici e miscelatrici, principalmente), che offrono oggi ampie garanzie di qualità, quanto alle lavorazioni di cantiere.

2 RICHIAMI SUI MECCANISMI DI AZIONE DELLA CALCE SUI TERRENI ARGILLOSI

I principali fattori che governano il trattamento con calce dei terreni argillosi riguardano le

caratteristiche di identificazione dei componenti che entrano in miscela: terra, calce e, eventualmente, legante idraulico. I parametri più significativi sono:

- per le terre: la granulometria, la plasticità, il contenuto di sostanze nocive, il contenuto naturale d'acqua (fondamentale per quanto riguarda la scelta del tipo di calce ed il suo dosaggio), la presenza di elementi lapidei di grosse dimensioni che, in fase esecutiva, possono ostacolare la miscelazione;
- per la calce (aerea): la forma attraverso la quale essa è aggiunta alla terra (calce viva macinata, calce idrata in polvere, latte di calce), il suo tenore in calce libera e, per la calce viva, la sua reattività all'acqua ed il grado di finezza. Si fa notare che nello stesso cantiere possono essere utilizzati tutti e tre i tipi di calce, in relazione alla necessità di fare variare, più o meno sensibilmente, il contenuto d'acqua presente nella terra al momento dell'esecuzione dei lavori;
- per i leganti idraulici: la proporzione e la natura dei costituenti che condizionano la cinetica della presa idraulica, i livelli di prestazione e la compatibilità coi componenti chimici della terra.

In merito ai meccanismi che governano l'interazione tra la terra e la calce di apporto, vale la pena ricordare che questi vengono distinti, generalmente, in:

- effetti immediati, che si producono nel momento in cui la calce viene miscelata con la terra;
- effetti di lungo termine, che si sviluppano nel tempo (diversi mesi od anche anni), dopo la posa in opera delle miscele.

Rientrano tra gli effetti immediati la variazione del contenuto d'acqua e la modifica delle caratteristiche geotecniche della terra, dovuta alla flocculazione della frazione argillosa e, precisamente: la modifica della plasticità, la modifica delle caratteristiche di costipamento e l'aumento della resistenza a taglio.

Gli effetti di lungo termine sono dovuti, invece, all'azione pozzolanica della calce aerea, che, interagendo con i componenti chimici dell'argilla, dà luogo a specie minerali della stessa natura di quelli prodotti dai leganti idraulici. In ambiente divenuto fortemente basico ($\text{pH} \geq 12$), infatti, la calce aggiunta alla terra progressivamente ma lentamente gli ossidi costituenti l'argilla (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) e, in presenza d'acqua, si combina ad essi, dando luogo a silicati ed alluminati di calcio idrati. È da sottolineare inoltre che nel caso della stabilizzazione con calce, l'evoluzione della resistenza procede di pari passo con il consumo in calce, cioè con la percentuale di calce via via combinatasi⁷, e che quest'azione si sviluppa in tre fasi successive, con una cinetica nettamente differente da quella propria delle stabilizzazioni a cemento (per le quali si osserva una fase unica) e in tempi molto più lunghi, dipendenti dalla composizione mineralogica e dalla struttura delle argille. La terza ed ultima fase, che è poi quella nel corso della quale avviene il maggior sviluppo della resistenza meccanica, a temperatura ambiente si manifesta solo a distanza di diversi mesi.

Per argille molto plastiche, con una composizione di circa il 40% di montmorillonite, 40% di illite e 20% caolinite, è stato trovato, ad esempio, che la prima fase (rappresentativa delle condizioni di breve termine) si estende a circa tre settimane dopo la miscelazione della terra con calce e che la seconda fase dura fino al quarto mese di maturazione; ciò significa che tempi apparentemente lunghi di 90 giorni di maturazione delle miscele non consentono ancora di osservare lo sviluppo di resistenza tipico della terza fase⁸.

Pertanto, quando si prevede di impiegare la terra stabilizzata con calce in strati di sottofondo ed interessa, quindi, il raggiungimento di determinate soglie di prestazione meccanica, per l'acquisizione della necessaria stabilità all'acqua (e, se del caso, al gelo), l'età di stagionatura delle miscele da sottoporre a prova, a rigore, non può essere stabilita "a priori"

(come nel caso delle miscele cementizie), ma dovrebbe essere considerata una variabile del progetto da prendere in conto nella pianificazione dei lavori. In altri termini, in relazione al periodo dei lavori ed alle condizioni climatiche attese, negli studi di formulazione delle miscele terra-calce occorrerebbe seguire l'evoluzione della stabilizzazione per valutare i tempi entro i quali le prestazioni meccaniche ricercate e la stabilità all'acqua e, se necessario, al gelo possono essere acquisite.

3 CRITERI DI FORMULAZIONE E NORME DI QUALITÀ

Gli studi di formulazione di laboratorio mirano a precisare il prodotto di trattamento più idoneo per la data destinazione d'uso delle miscele ed i dosaggi da considerare per ottenere le prestazioni ricercate. Uno studio di formulazione di laboratorio delle miscele terra-calce comprende, generalmente:

- la caratterizzazione della terra e della calce per la verifica di idoneità dei prodotti al trattamento previsto;
- la valutazione del dosaggio minimo in calce;
- in relazione al campo delle umidità naturali prevedibili per il terreno in situ al momento dell'esecuzione dei lavori, le prove di comportamento fisico-meccanico volte alla determinazione dei dosaggi ottimali in legante da introdurre in miscela per il raggiungimento delle prestazioni desiderate.

Relativamente alla prima fase, in Italia, così come nella gran parte degli altri Paesi, i requisiti che vengono richiesti alle terre ed alla calce sono quelli riassunti nella Tabella 1, per alcuni di essi può farsi riferimento alle categorie e classi previste dalle Norme UNI EN 14227-11⁹ ed UNI EN 459, parti 1 e 2^{10,11}.

COMPONENTI	CRITERI DI IDONEITÀ	SOGLIE AMMISSIBILI
TERRA	Granulometria	preferibilmente < 63 mm
	Plasticità (IP)	preferibilmente $p_{0.063 \text{ mm}} > 12 \%$
	Materia Organica	preferibilmente IP > 5 %
	Solfati e Solfuri	strati di rilevato: M.O. < 4 %
	Rigonfiamento volumetrico (UNI EN 13286-49)	strati di sottofondo M.O. < 2 %
		strati di rilevato: < 0.1 %
		strati di sottofondo: < 0.25 %
		strati di rilevato: $G_v < 10 \%$
		strati di sottofondo: $G_v < 5 \%$
CALCE AEREA: viva (macinata)	Granulometria (finezza)	Categoria 1; Categoria 2
	Tenore calce libera (%CaO)	CL 90-Q; CL 80-Q
	Reattività all'acqua	$\geq 60^\circ\text{C}$ entro 25'
idrata (in polvere, latte di calce)		CL 90-S; CL 80-S

NOTA: per la parte superiore dei rilevati, posta a meno di 1,50 - 2,00 m dal piano di posa della pavimentazione valgono i requisiti indicati per gli strati di sottofondo.

Tabella 1. Criteri di idoneità e requisiti dei componenti delle miscele terra-calce

Per l'identificazione del dosaggio minimo in calce delle miscele, questo può essere valutato:

- secondo la Norma SNV 640503a¹², come quello minimo necessario a modificare la plasticità della terra e superato il quale sia il limite di plasticità LP che l'indice di plasticità IP non subiscono ulteriori significative variazioni. Questa determinazione, che ha il pregio di mettere in evidenza l'ampliamento dello stato solido delle miscele in funzione del dosaggio in calce, è d'immediata fruizione in cantiere per la stima dello stato di consistenza delle miscele terra-calce, considerate le necessità connesse alla circolazione dei mezzi ed alle operazioni dei movimenti di terra;
- secondo la Norma ASTM D6276¹³, come quel dosaggio minimo di calce capace di assicurare la flocculazione dei collodi argillosi, individuato nel contenuto di calce che porta ad un pH della miscela superiore a 12,4 (anche noto come CIC, Consumo Iniziale di Calce).

Le maggiori divergenze negli studi di stabilizzazione in uso nei diversi Paesi, riguardano, soprattutto, le metodologie ed i criteri di qualità relativi alla fase di ottimizzazione delle miscele. Di seguito, pertanto, si farà riferimento alle metodologie, già tra loro differenti, adottate in Italia da RFI ed ANAS, mettendole a confronto con quelle previste in altri paesi (Francia, Belgio USA) che hanno maturato una lunga esperienza in applicazioni e validazioni di campo.

3.1 Metodologia Francese e Belga

Nelle sue linee essenziali, la metodologia considerata sia in Francia^{4,14} che, sulla scorta di questa, in Belgio¹⁵, distingue gli studi in relazione all'impiego previsto per le miscele (strati di rilevato o di sottofondo).

Rilevato - Per la realizzazione degli strati di rilevato (con esclusione della parte superiore che costituisce di fatto il sottofondo della pavimentazione, ma compresa la bonifica del piano di posa dei rilevati stessi) il trattamento con calce dei terreni fini argillosi ha come obiettivo quello di permettere la riutilizzazione di terreni sensibili all'acqua, anche in condizioni di elevata umidità naturale, assicurando alle miscele condizioni di lavorabilità e di compattabilità idonee alla loro corretta posa in opera. Il parametro (criterio di qualità) giudicato idoneo a caratterizzare sotto il profilo meccanico le miscele è l'indice di portanza immediata (IPI), una variante dell'indice di portanza CBR misurato senza sovraccarichi e senza preventiva immersione in acqua, su campioni compattati ad energia Proctor Normale¹⁶, entro 90' dalla miscelazione¹⁷. Tale indice permette di valutare globalmente le prestazioni di breve termine richieste alle miscele, ovvero la portanza, la compattabilità e la capacità a sopportare il traffico di cantiere. La metodologia dello studio di formulazione di laboratorio consiste, in questo caso, nell'effettuare prove di costipamento e di portanza immediata, insieme, e nell'osservare le variazioni sia della densità secca, γ_d , sia di IPI, al variare del contenuto d'acqua e del dosaggio in calce. I risultati di questo studio, in definitiva, dovranno fornire:

- regole circa i dosaggi da adottare, in funzione della natura delle terre e, specialmente, del loro contenuto d'acqua durante i lavori, per il soddisfacimento dei requisiti richiesti alle miscele;
- riferimenti contrattuali per i controlli di qualità delle miscele (dosaggi in legante) e degli strati posti in opera (compattazione, proprietà meccaniche).

Strati di sottofondo - Nel caso di miscele destinate a strati di sottofondazione lo studio di formulazione delle miscele ha come obiettivi quello della scelta del prodotto di trattamento più adatto (calce o calce e cemento); quello della determinazione dei dosaggi che consentono di raggiungere, nei tempi e nei periodi previsti dal programma temporale dei lavori, le prestazioni meccaniche considerate in progetto ed infine quello di valutare l'incidenza dei

fattori che influenzano dette prestazioni (dosaggio in legante, tenore in acqua e densità delle miscele).

In definitiva, per le miscele ottimizzate, i requisiti minimi di IPI per il soddisfacimento delle condizioni di posa in opera sono quelli riportati in Tabella 2, in funzione della plasticità della terra e per le diverse destinazioni d'uso delle miscele stabilizzate. Per miscele destinate alla parte superiore dei rilevati ed agli strati di sottofondazione della pavimentazione occorre che sia pure soddisfatta la relazione $CBR_{PN}/IPI \geq 1$, essendo CBR_{PN} l'indice di portanza CBR valutato su provini compattati con energia Proctor Normale e sottoposti a prova dopo 4 giorni di immersione in acqua⁵.

CAMPI DI PLASTICITÀ DELLA TERRA	IP < 12	12 ≤ IP < 25	25 ≤ IP < 40
Strati di rilevato	10	7	5
Parte superiore del rilevato, a meno di 1,50m dal piano di posa della pavimentazione (esclusa la sottofondazione)	12	8,5	6
Strati di sottofondazione (ultimo strati di rilevato o bonifica di trincea)	20	15	10

Tabella 2. Requisiti di portanza immediata IPI delle terre argillose trattate con calce, in funzione della plasticità della terra (IP) e della destinazione d'uso delle miscele

Per la verifica dei requisiti di lungo termine (durabilità durante l'esercizio) delle miscele destinate a strati di sottofondo, inoltre, dopo aver preventivamente valutato l'idoneità della terra tramite rigonfiamento volumico G_V , lo studio di formulazione più semplice tra quelli previsti fa riferimento alla resistenza meccanica delle miscele, valutata tramite le seguenti prove:

- resistenza a rottura per compressione semplice, R_C , su provini cilindrici di altezza doppia del diametro, per le miscele stabilizzate con sola calce;
- resistenza a trazione per compressione diametrale (brasiliana), R_{tb} , per le miscele terra-calce-cemento, valutate a diverse età di stagionatura.

La resistenza a compressione viene utilizzata per verificare la resistenza all'acqua ed al gelo della terra stabilizzata. Nel caso di terre non eccessivamente plastiche - con valore di Blu di Metilene¹⁸ $MB < 6$ - la stabilità all'acqua si considera acquisita se risulta

$$I = \frac{R_C(28+32i)}{R_C(60)} \geq 0,8 \quad (1)$$

dove:

- I = indice di resistenza all'immersione;
- $R_C(28+32i)$ è la resistenza a compressione semplice di provini che, dopo 28 giorni di maturazione normale, in condizioni protette, sono poi immersi per 32 giorni in acqua (a 20 ± 2 °C);
- $R_C(60)$ è la resistenza a compressione semplice dopo 60 giorni di maturazione protetta, nelle stesse condizioni di temperatura.

Per terre maggiormente plastiche ($MB > 6$), può già accettarsi un indice di immersione $I > 0,6$. La resistenza al gelo delle miscele terra-calce viene ritenuta soddisfacente¹⁹ quando,

all'età corrispondente alla data di apparizione presunta del gelo nel cantiere considerato, risulta $R_C > 2,50$ MPa.

In regioni non interessate dal fenomeno di gelo, per le miscele stabilizzate con sola calce, come previsto per terreni argillosi da media ad alta plasticità ($IP > 20$), viene richiesto che sia:

$$CBR_{PN} > 20 \quad (2)$$

e

$$CBR_{PN} > IPI \quad (3)$$

Quanto al target di densità in sito, nel caso dei rilevati con terre trattate, questo viene fatto corrispondere, in via semplificativa, al 95% della densità ottima della prova Proctor Normale, γ_{OPN} , e, nel caso dei sottofondi, tale valore viene aumentato al 98,5% della stessa (96% su fondo strato).

Per questi ultimi, inoltre, e in generale per le miscele terra-calce dalle quali ci si aspetta un contributo alla resistenza meccanica del manufatto (ad es. parte superiore dei rilevati), deve sempre essere garantito il contenuto minimo di umidità necessario allo sviluppo dei processi pozzolanici, imponendo che il contenuto d'acqua finale della terra trattata al dosaggio stabilito, a partire dal contenuto d'acqua minimo del range di umidità naturali della terra non trattata, risulti maggiore di 0,9 w_{OPN} (w_{OPN} = contenuto ottimo d'acqua finale della miscela terra-calce, determinato secondo prova Proctor Normale).

3.2 Metodologia USA

Negli USA, avendo preliminarmente valutato l'idoneità della terra²⁰ e della calce per il trattamento previsto e dopo aver individuato il dosaggio minimo in calce (CIC) con l'Eades-Grimm Test (ASTM D 6276)¹³, gli studi di formulazione^{21,22} prevedono quanto segue:

- studio di compattabilità, per la miscela a contenuto in calce pari al minimo determinato (CIC), per valutare la densità massima Proctor Normale, *MDD Maximum Dry Density*, ed il contenuto ottimale d'acqua, OMC Optimum Moisture Content, secondo la Norma ASTM D 698¹⁶, coincidente con quello precedentemente chiamato w_{OPN} ;
- prove di resistenza a compressione semplice R_c (Unconfined Compressive Strength, UCS, secondo ASTM 5102)²³ su campioni con contenuto di calce pari al CIC ed umidità corrispondente all'ottimo $OMC \pm 1\%$ precedentemente individuato, previa attesa di 1 ÷ 24 ore e, nel caso di calce viva, di 20 ÷ 24 ore prima della formazione dei provini. I provini per R_c vanno sottoposti a maturazione accelerata, in condizioni protette da variazioni di umidità, per 7 giorni a 40°C e, successivamente, soggetti a imbibizione per risalita capillare per 24 ÷ 48 ore prima della prova. Contestualmente, deve esser valutato il rigonfiamento volumico, G_v , del campione imbibito, generalmente accettato, per tali condizioni di maturazione, fino a valori dell'1 ÷ 2%.

Nei capitolati, il requisito di prestazione meccanica viene valutato sulle miscele ai dosaggi ottimali, sottoponendole a prova di resistenza a compressione semplice R_c , previa imbibizione in acqua dei provini per 8 giorni. Inoltre, al fine di valutare la resistenza delle miscele al gelo, le prove di resistenza a compressione semplice sono precedute da un condizionamento dei provini con un opportuno numero di cicli di gelo-disgelo. In relazione alla destinazione d'uso delle miscele, viene suggerito, quindi, il rispetto dei requisiti prestazionali indicati in Tabella 3:

Raccomandazioni USA (NLA - National Lime Association)				
Destinazione prevista	Resistenza UCS (Unconfined Compressive Strength/ASTM 5102) R_C (kPa)			
	Dopo 8 giorni di imbibizione	Dopo N cicli di gelo-disgelo^a		
		N = 3	N = 7	N = 10
Sottofondazione di:				
a) Pavimentazioni rigide strati di fondazione	345	345	620	830
b) Pavimentazioni flessibili (s > 25 cm)^b	420	420	690	900
c) Pavimentazioni flessibili (s = 20 - 25 cm)^b	480	480	690	965
d) Pavimentazioni flessibili (s = 12 - 20 cm)^b	620	620	900	1100
e) Base	900	900	1170	1380

Note
^a numero di cicli di gelo-disgelo nella miscela terra-calce durante il primo inverno di esercizio della strada
^b spessore totale complessivo della pavimentazione al di sopra della sottofondazione

Tabella3. Quadro dei requisiti di resistenza meccanica delle miscele stabilizzate con calce, in relazione all'impiego²⁴

3.3 Metodologia RFI

Tra le Norme tecniche di riferimento in Italia, la Specifica Tecnica "Trattamento delle terre con Calce – RFI"²⁵, oltre alle verifiche di idoneità della terra e della calce, come prima specificato, prevede una complessa articolazione degli studi di formulazione e di ottimizzazione delle miscele per i rilevati ferroviari, con esclusione della parte superiore.

Lo studio preliminare di formulazione delle miscele prevede le seguenti distinte fasi di attività:

- identificazione del terreno, orientativamente come già descritto in Tabella 1, ma con la determinazione dello spettro diffrattografico della terra in studio;
- lo studio delle miscele sperimentali in laboratorio;
- realizzazione di uno specifico campo prove, per confermare i risultati dello studio di laboratorio e per ottimizzare il dosaggio in calce e le modalità di compattazione;

In relazione alla fase di studio delle miscele sperimentali, la Specifica Tecnica RFI prevede la determinazione del CIC, secondo ASTM 6276¹³ e, a partire da tale valore, con incrementi di 0,5% in calce, lo studio di almeno tre distinte miscele, valutandone

- l'analisi granulometrica continua;
- l'indice di plasticità, IP, e di consistenza, I_c;
- la portanza CBR dopo immersione, su provini confezionati con energia Proctor modificata²⁶, dopo 7 e 28 giorni di maturazione in condizioni protette da variazioni di umidità, seguiti da 4 giorni di immersione in acqua prima della prova (CRB7+4i e CRB28+4i);
- l'indice IPI, con individuazione, in relazione al contenuto naturale d'acqua della terra da trattare, della percentuale minima di calce necessaria ad ottenere la soglia prefissata di IPI = 10, indipendentemente dall'indice di plasticità della terra.

A tutte le prove precedenti vanno affiancate ulteriori prove sulle miscele:

- prova di costipamento Proctor Standard;
- prova di resistenza a compressione semplice R_c (dopo 24 ore, 7 e 28 giorni di maturazione protetta e, pertanto, tutte riferibili, per quanto prima detto, alla sola prima fase di sviluppo della resistenza meccanica delle miscele terra-calce, ovvero quella di

breve termine). Per tali prove, tuttavia, non vengono specificati valori di soglie ammissibili per esigenze specifiche;

- prove di rigonfiamento lineare e volumetrico, per le sole miscele con IPI > 10. Viene fissata una soglia ammissibile dell'1% senza, tuttavia, specificare il tipo di prova.

È, dunque, previsto che venga realizzato un campo prove tenendo conto della destinazione d'uso prevista per la miscela, mettendo in opera, a diverse energie di compattazione (numero di passaggi di rullo), almeno due miscele tra quelle risultate idonee dal precedente studio di laboratorio. Ciò rappresenta l'aspetto peculiare di tale protocollo²⁷ che, per quanto ispirato a quello francese nella fase di laboratorio, ottimizza il progetto delle miscele terra-calce tramite prove di campo, conducendo misure di modulo di deformazione Md, con prove di carico con piastra²⁸ su almeno 5 punti distinti per ciascuno strato costituente il rilevato di prova, a diversa età di maturazione della terra trattata in opera (a 0, 1, 3 e 7gg dal costipamento). Sull'ultimo strato sono pure richieste misure di Md a 30 gg dalla compattazione. A tali valori è previsto che vengano affiancati anche i valori di CBR in situ, nonché i controlli di densità e del contenuto d'acqua nelle aree prossimali ai punti di misura del modulo su piastra.

Nel caso di tre strati di rilevato, si intuisce come ciò comporti un onere considerevole quanto all'impegno economico ed alla durata del prove, giacché risultano necessarie almeno 6 settimane per completare una prova di campo, con la disponibilità dei relativi mezzi di cantiere e di laboratorio. Tale onerosità può essere giustificata solo per casi di grandi lavori, come quelli ferroviari appunto, per grandi volumi di terra omogenea da trattare dove risulta di fondamentale importanza la qualificazione preventiva delle miscele, la qualificazione delle attrezzature e delle macchine, la verifica e la messa a punto dei processi produttivi.

3.4 Metodologia ANAS

Per quanto riguarda la valutazione dell'idoneità delle terre e dei prodotti di trattamento, la metodologia ANAS²⁹ ricalca sostanzialmente quanto previsto dalle metodologie precedenti, adottando come soglie discriminanti per tale tipo di impiego essenzialmente quelle della Norma CNR 36/73³⁰.

Per lo studio di dosaggio in calce in laboratorio, sono previste prove di compattabilità Proctor, prove di portanza CBR e prove di resistenza a rottura per compressione semplice R_C . Tuttavia, a differenza di quanto avviene in tutte le altre metodologie, la norma tecnica ANAS fa riferimento, per lo studio di compattabilità e di portanza, a livelli di energia propri della Proctor Modificata (2,69 MJ/m³), ben maggiori, quindi, della Proctor Normale (0,6 MJ/m³). Inoltre, i valori della portanza CBR vengono determinati su provini che hanno subito, prima della rottura e dell'immersione normale (4 giorni a circa 20°C), un periodo di maturazione di 7 giorni in condizioni protette da evapotraspirazione. Il rigonfiamento lineare G_L è valutato nel corso delle prove CBR, su provini che hanno subito questo periodo di maturazione e condizionamento.

Differenziate per la destinazione d'uso prevista per le miscele, e corredate dai valori del modulo Md richiesti per gli strati posti in opera, secondo le metodologie della prova CNR 146/1992²⁸, le soglie prestazionali previste dalla metodologia ANAS sono quelle di Tabella 4:

	CBR(7+4i) (%)	G _L (%)	M _d (MPa)
Strati di rilevato (a più di 2,00 dal piano di sottofondo)	> 30	< 1,5	> 20
Parte superiore del rilevato (a meno di 2,00 dal piano di sottofondo)	> 60	< 1,0	> 50
Strato di sottofondo	> 60	< 1,0	> 50

Tabella 4. Quadro dei requisiti ANAS per le miscele stabilizzate con calce, in relazione all'impiego

4 CONSIDERAZIONI PER LA PREDISPOSIZIONE DEL PIANO SPERIMENTALE

Nel predisporre il piano sperimentale oggetto del presente lavoro, si è tenuto conto del quadro delle metodologie di studio per l'ottimizzazione dei dosaggi in calce prima riportato e, in particolare, dell'importanza dei riferimenti progettuali per la valutazione delle prestazioni meccaniche delle miscele e per il costipamento in cantiere, considerato che per alcuni capitolati italiani, dei quali si è prima detto, questi riferimenti sono ottenuti compattando le miscele con energia Proctor Modificata, anziché Proctor Normale, come generalmente previsto a livello internazionale. Infatti, il riferimento alla prova Proctor Modificata per l'addensamento delle miscele può portare a due ordini di inconvenienti. In primo luogo, occorre ricordare che le prestazioni delle miscele crescono con l'addensamento e che, pertanto, fare riferimento, in fase di progetto, a valori di densità secca di laboratorio molto elevati, non rappresentativi di quelle ottenibili in cantiere, porta a sovrastimare prestazioni meccaniche delle miscele che poi, di fatto, difficilmente potranno essere raggiunte dal materiale in situ.

In secondo luogo, nel caso particolare del trattamento con calce, occorre prestare attenzione al contenuto d'acqua di costipamento delle miscele, in quanto interessa non solo compattare correttamente il materiale, come avviene per le terre naturali, ma anche (e soprattutto) raggiungere le prestazioni meccaniche di medio-lungo termine, garantite dallo sviluppo dei processi pozzolanici.

Si fa osservare, infatti, che mentre per le terre naturali l'umidità ottimale di costipamento Proctor Modificata (w_{OPM}) è ancora all'interno, seppur prossima al limite superiore del campo di umidità per il quale si ottengono buone prestazioni meccaniche (portanza CBR, ad esempio), nel caso delle terre trattate con calce, tale riferimento può trovarsi al di sotto del contenuto d'acqua minimo necessario a garantire la flocculazione dell'argilla, l'idratazione dei composti chimici originati dalla sua dissoluzione e lo sviluppo dei processi pozzolanici (si ricordi al riguardo quanto prima osservato sul contenuto d'acqua minimo richiesto dalla metodologia francese⁴).

Viceversa, fare riferimento a livelli di addensamento realisticamente raggiungibili, come sono quelli associati alla prova Proctor Normale, e valutare per questi livelli di addensamento le prestazioni di progetto delle miscele, offre la possibilità, di fatto, di prevedere, con alti livelli di affidabilità, le prestazioni conseguibili in opera.

Sulla base di queste considerazioni, pertanto, si è predisposto un piano sperimentale con l'obiettivo di evidenziare l'eventuale accordo o discrasia tra le indicazioni fornite dalle diverse normative e capitolati prima richiamati, confrontando i risultati degli studi di

compattabilità Proctor, eseguiti sulle miscele a diversi dosaggi in calce, con energia normale e modificata e per diverse condizioni di maturazione (protetta ed imbibita), come specificato nel seguito.

4.1 Fattori considerati nella formulazione delle miscele

Il piano sperimentale ha avuto per oggetto la valutazione degli effetti prodotti dai principali fattori di composizione e di processo che si hanno nella fabbricazione dei prodotti terra-calce, in particolare:

- il dosaggio in calce d'apporto (c %, rispetto al peso secco della terra);
- il contenuto d'acqua naturale della terra, prima dell'aggiunta della calce (w_n %);
- l'energia di costipamento, secondo le prove Proctor Normale e Modificata³¹;
- il condizionamento dei provini: tempi di maturazione ed eventuale imbibizione.

Dosaggio in calce - Per le finalità del presente studio, nella produzione delle miscele da sottoporre a prova, si è scelto di adottare i contenuti di calce riportati in Tabella 5:

Livelli di dosaggio	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5
Contenuto in CaO (%)	0	1.5	2	3	6

Tabella 5. Livelli attribuiti al dosaggio in calce nel corso della sperimentazione

La scelta di tali dosaggi in calce è dipesa dalle seguenti considerazioni:

- quello nullo ($\text{CaO} = 0\%$), è stato considerato per i necessari confronti con la terra non trattata;
- i dosaggi intermedi ($\text{CaO} = 1,5 - 2,0 - 3,0\%$), sono rappresentativi dei dosaggi tipici utilizzati per le terre trattate destinate alla costruzione degli strati di rilevato e per simulare eventuali casi di sottodosaggio;
- il dosaggio più alto ($\text{CaO} = 6\%$), è rappresentativo delle terre stabilizzate con sola calce, destinate a strati di sottofondo delle pavimentazioni.

Umidità - Per questo fattore si è voluto esplorare il campo degli stati idrici possibili di un terreno come può riscontrarsi durante l'esecuzione dei lavori e che può oscillare tra :

- un limite superiore (w_{MAX}), rappresentativo di un terreno in stato plastico, considerato che al di sotto di 2,00 m circa dal piano di campagna, generalmente, il contenuto naturale d'acqua dei terreni è prossimo o superiore al limite di plasticità ($w_n > \text{LP}$);
- un limite inferiore (w_{MIN}), rappresentativo delle condizioni di umidità che possono aversi in condizioni di forte evapotraspirazione, come avviene nel periodo estivo ed in presenza di vento, quando le operazioni di scavo prevedono l'estrazione a strati, anziché quella frontale.

Per descrivere il campo delle umidità comprese tra i due estremi prima richiamati, sono stati considerati, differenziati per i diversi contenuti in calce delle miscele, almeno 5 contenuti iniziali d'acqua della terra tali da comprendere, oltre gli estremi, anche le probabili umidità ottimali di costipamento, secondo le due energie Proctor Normale e Modificata.

Per la terra in esame, il campo di umidità si è fatto, dunque, variare tra $w_{\text{MIN}} = 12\%$ e $w_{\text{MAX}} = 32\%$, campo che abbraccia il limite di plasticità della terra ($\text{LP} = 27,3\%$), come riportato in Tabella 6.

CaO in miscela (%)	Umidità iniziale di riferimento, w (%)						
0	12	15	19	22	25	29	29
1,5	15	19	22	25	29	-	-
2,0	15	19	22	25	29	-	-
3,0	15	19	22	25	29	32	32
6,0	15	19	22	25	29	32	32

Tabella 6. Livelli attribuiti al contenuto iniziale d'acqua, w, per la preparazione delle miscele terra-calce

Condizioni di compattazione e di maturazione - In base agli obiettivi prima descritti, lo studio è stato articolato secondo le variabili riassunte nello schema di Tabella 7.

Energia di compattazione	Proctor Normale	Proctor Normale	Proctor Modificata
Maturazione all'aria (giorni)	0	0	7
Maturazione in acqua a $T = 22 \pm 2^\circ\text{C}$ (giorni)	0	4	4
Periodo totale di condizionamento (giorni)	0	4	7 + 4
Denominazione delle prove	IPI	cbr(4i)	CBR(7+4i)

Tabella 7. Condizioni sperimentali per lo studio di compattabilità Proctor e di portanza CBR

Le temperature di prova, indipendentemente dal tipo di maturazione dei provini, all'aria o in acqua, sono state mantenute all'interno dell'intervallo $T = 22 \pm 2^\circ\text{C}$.

Per i provini sottoposti a condizioni di maturazione in acqua (cbr(4i) e CBR(7+4i)), sono state effettuate, durante il periodo di immersione di 4 giorni, misure di rigonfiamento in fustella CBR, al fine di valutare l'effetto del dosaggio in calce, dell'addensamento e delle condizioni di maturazione su questa caratteristica.

5 RISULTATI SPERIMENTALI

5.1 Prove di qualificazione della calce

La calce impiegata per la sperimentazione è una calce viva, dichiarata come CL 80-Q, secondo UNI EN 459-11¹⁰. Le prove preliminari di caratterizzazione e di idoneità della calce hanno fornito i risultati riassunti in Tabella 8:

Componente rilevato	%	Requisiti CL 80-Q ^{10,17}
H ₂ O (da Portlandite Ca(OH) ₂)	3,2	≤ 2
CO ₂	7,2	≤ 7
CaO	86,6	
MgO	0,6	≤ 5
Ossidi liberi (Cao + MgO)	87,2	≥ 80
Residuo non analizzabile	2,4	--
Passante a 5 mm	100	100
Passante a 2 mm	99	≥ 95
Passante a 0,18 mm	51	≥ 70
Passante a 0,075 mm	31	≥ 50
Prova di reattività (°C)	53,4	≥ 60

Tabella 8. Risultati delle analisi chimiche e granulometriche condotte sulla calce viva impiegata nello studio

5.2 Prove di qualificazione della terra

L'analisi granulometrica condotta sulla terra in studio per setacciatura e per sedimentazione ha fornito i risultati rappresentati in Figura 1:

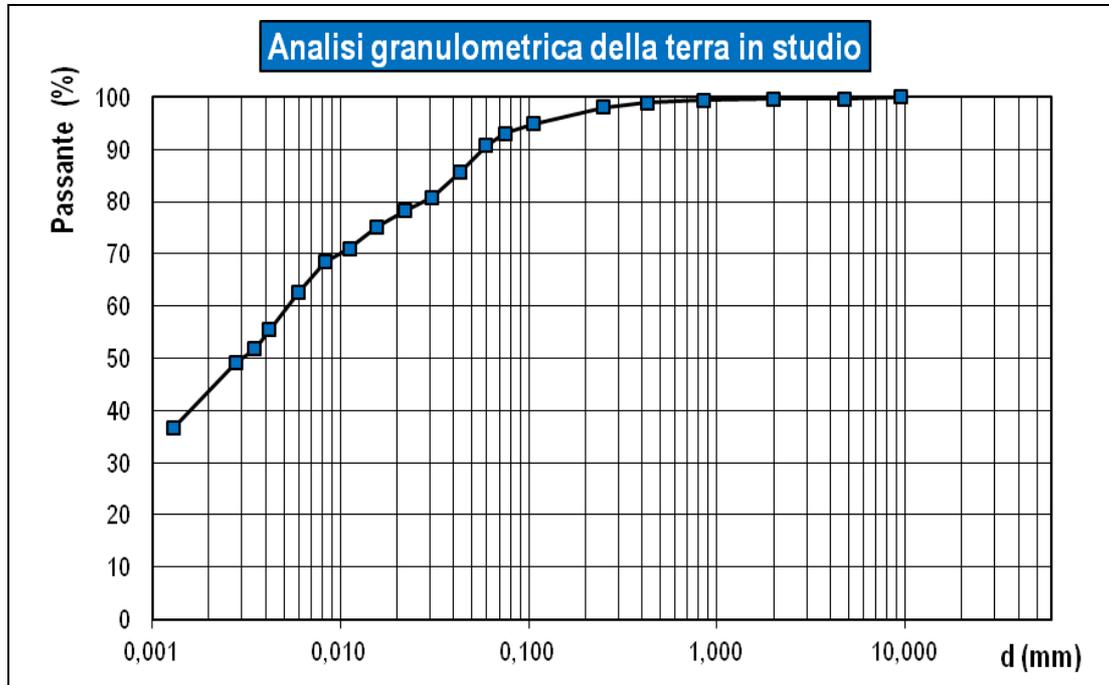


Figura 1 Analisi granulometrica della terra in studio

La determinazione dei limiti di consistenza ha fornito i seguenti valori:

- limite di liquidità $LL = 51,5 \%$; - limite di plasticità $LP = 27,3 \%$; - indice di plasticità $IP = 24,2 \%$.

L'esame dei risultati porta a concludere, quindi, che trattasi di un *limo con argilla debolmente sabbioso*, con passante allo 0,075 mm = 92%, e frazione argillosa molto elevata ($p_{0,002m} = 44\%$).

Classificata secondo CNR-UNI 10006³², la terra risulta appartenere alla sottoclasse A_{7-5} (con indice di gruppo $I_G = 16$) e, per caratteristiche granulometriche e di plasticità, risponde appieno ai requisiti richiesti per la stabilizzazione con calce, anche senza necessità di apporto di altro legante idraulico, nel caso di miscele destinate a strati di sottofondazione. L'analisi termica e quella in cromatografia ionica per la determinazione della presenza di sostanze nocive hanno fornito i valori di Tabella 9, tutti inferiori a quelli ammissibili per l'idoneità della terra al trattamento con calce.

Materia Organica (%)	Cl ⁻ (%)	NO ₃ ⁻ (%)	SO ₄ ²⁻ (%)	CO ₂
assente	0,069	0,021	0,17	12,4

Tabella 9. Risultati delle prove chimiche condotte sulla terra da trattare

5.3 Determinazione del dosaggio minimo in calce

CIC - La determinazione del contenuto minimo in calce secondo Eades & Grim test¹³ viene effettuata tramite misure di pH su cinque miscele a diverso dosaggio in calce e su una soluzione acquosa saturata in calce. I risultati sono quelli di seguito riportati in Figura 2a; secondo l'indicazione della Norma, il valor minimo da individuare è quello che corrisponde ad un pH della miscela di 12,40 che, per il caso in studio, corrisponde ad un dosaggio in calce del 3%.

SNV - Come da Norma svizzera SNV 640 503a¹², il dosaggio minimo si valuta sulla variazione dei limiti di consistenza delle miscele terra-calce, in funzione del dosaggio in calce, ed è definito come quello minimo necessario a modificare la plasticità della terra, superato il quale questa caratteristica non subisce ulteriori significative variazioni. Come evidenziato dalla Figura 2b, contenuti in calce viva superiori al 2 % sembrano già non apportare modifiche alle caratteristiche di consistenza delle miscele.

Dal confronto effettuato, si trova che le due metodologie portano ad indicazioni non pienamente coerenti tra loro. La valutazione secondo norma svizzera, tuttavia, per le applicazioni di cantiere, offre il vantaggio di fornire un quadro d'insieme delle variazioni dei limiti di consistenza e, in particolare, dell'ampliamento delle condizioni di stato solido (LP) delle miscele.

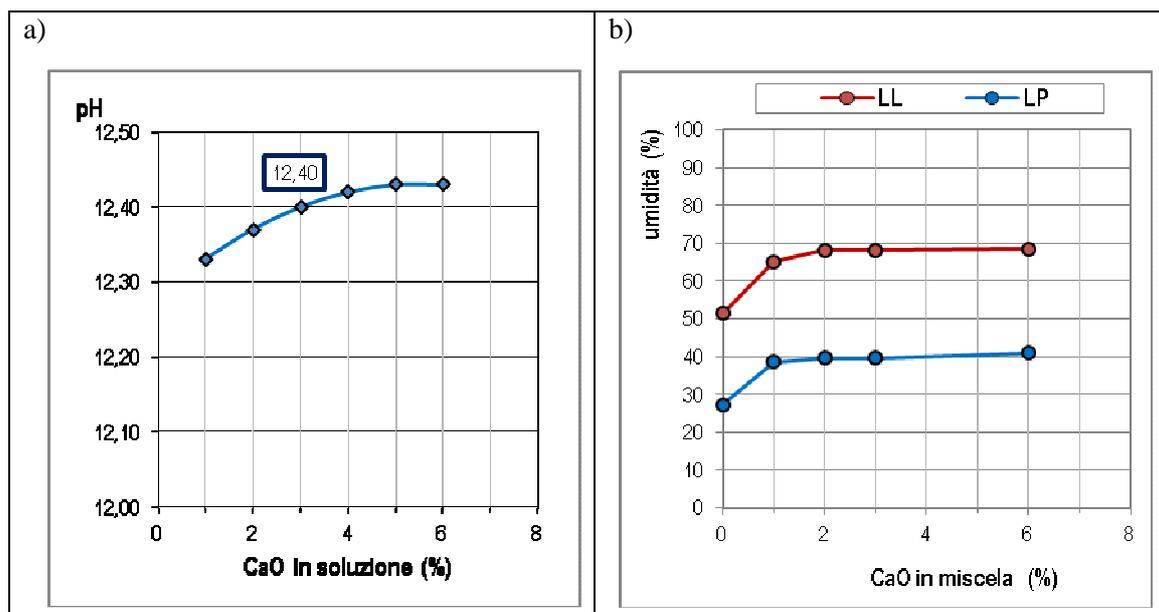


Figura 2. Dosaggio minimo in calce: a) secondo misure di pH¹³; b) secondo Norma SNV 640 503a¹²

5.4 Prove di costipamento Proctor

La Figura 3 riporta insieme i risultati delle prove di costipamento delle miscele, per i 5 dosaggi in calce di studio e per le due energie di compattazione considerate. Per entrambi i tipi di prova, si osserva chiaramente che all'aumentare del dosaggio di CaO i valori della densità secca massima diminuiscono, mentre l'umidità ottimale di costipamento si sposta nel verso delle umidità crescenti.

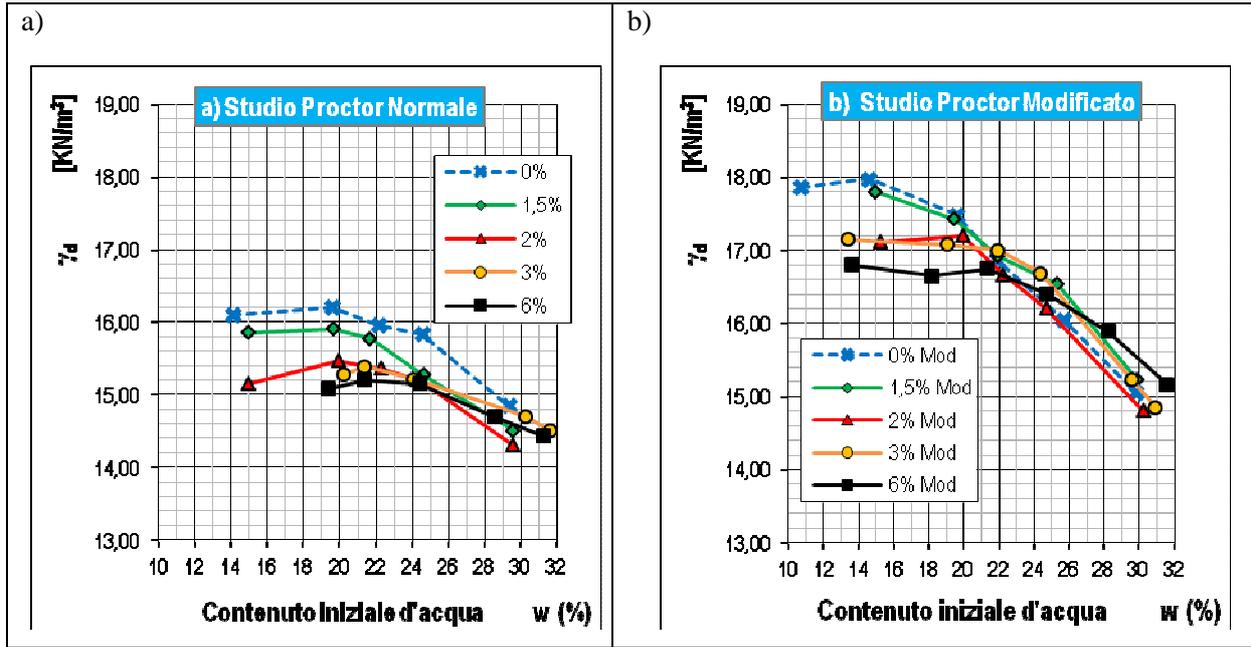


Figura 3. Risultati delle prove di costipamento Proctor ai vari dosaggi in calce: a) Proctor Normale; b) Proctor Modificata

I grafici di Figura 3 sono dati in funzione del contenuto iniziale d'acqua della terra prima dell'aggiunta della calce, cosa utile per l'aggiustamento dei dosaggi in calce da operare in cantiere, in funzione dell'umidità naturale della terra da trattare. Per le considerazioni che seguono è utile, tuttavia, riportare in Figura 4 i risultati del costipamento Proctor Normale in funzione delle umidità finali delle miscele, dopo completo spegnimento della calce (attesa di almeno 60'), dato che questo tipo di rappresentazione permette di apprezzare il valore del contenuto d'umidità ottimo, w_{OPN} , da confrontarsi secondo la metodologia francese con il contenuto d'acqua minimo richiesto per lo sviluppo dei processi pozzolanici, di cui si è detto.

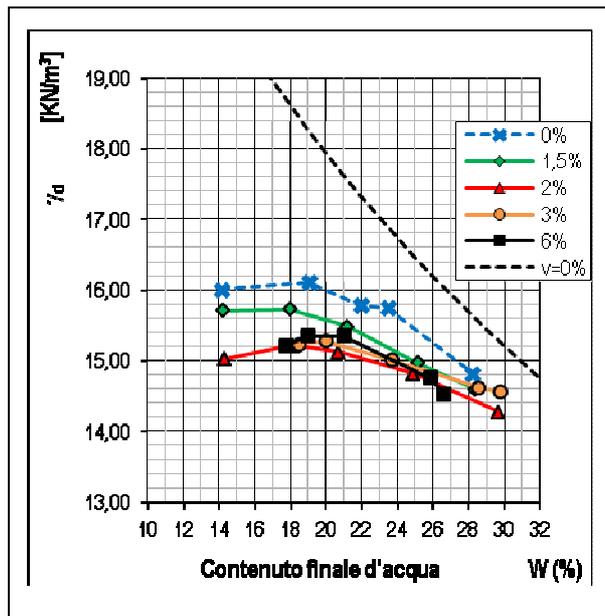


Figura 4 - Risultati delle prove di costipamento Proctor Normale, in funzione del w finale delle miscele

Nella Tabella 10, per le due energie di prova, sono dati i valori di umidità iniziale ottimale, w_{OPN} , ed i relativi valori di densità secca massima, γ_{dMAX} , desunti dalle curve interpolate di costipamento date nelle Figure 3. Si può osservare che, a parità di percentuale di calce, le umidità ottimali di costipamento delle prove Proctor Normale, w_{OPN} , risultano sempre maggiori di quelle delle prove Proctor Modificata, w_{OPM} , ($w_{OPN} = w_{OPM} + \Delta w$, dove la differenza di umidità Δw è anch'essa riportata in Tabella 10).

Dosaggio in calce CaO (%)	Proctor Normale			Proctor Modificate		Differenza
	w_{OPN} (%)	γ_{dOPN} (kN/m^3)	w_{MIN} (%)	w_{OPM} (%)	γ_{dOPM} (kN/m^3)	Δw
0	16,00	16,40	--	13,00	18,10	3,00
1,5	17,30	16,00	15,20	14,00	17,90	3,30
2	20,00	15,50	17,10	16,90	17,40	3,10
3	21,60	15,40	18,90	17,20	17,20	4,40
6	22,20	15,20	19,30	17,70	16,80	4,50

Tabella 10 – Valori ottimali di umidità iniziali e densità massime da prove Proctor Normale e Modificata

Nella stessa Tabella 10 è riportato pure, al variare del dosaggio in calce, il contenuto d'acqua finale minimo desunto dalla Figura 4 e da osservare nella produzione delle miscele, come suggerito dalla metodologia francese, (w_{MIN} della terra = 0,9 w_{OPN} della miscela) .

Come può osservarsi, per la terra in studio, l'umidità ottimale di costipamento Proctor Modificato delle miscele terra-calce è sempre inferiore a quello minimo necessario ad assicurare lo sviluppo delle prestazioni di lungo termine delle miscele e, pertanto, non può costituire un utile riferimento per l'umidità da osservare in corso d'opera.

5.5 Prove di portanza CBR

Le prove di portanza CBR sono state eseguite per differenti condizioni di preparazione e di maturazione delle miscele secondo il piano sperimentale prima riportato. Pertanto, i provini, compattati con energia Proctor Normale e Modificata, sono stati sottoposti a prova CBR:

- immediatamente dopo il confezionamento, per le prove IPI, ovvero cbr(0);
- dopo 4 giorni di immersione normale in acqua, per le prove cbr(4i);
- dopo 7 giorni di maturazione in condizioni protette, seguiti da 4 giorni di immersione in acqua, per le prove CBR (7+4i), modalità quest'ultima considerata solo per i campioni compattati con energia Proctor Modificata, secondo metodologia ANAS.

I risultati delle prove così condotte sono riportati nelle Figure da 5a a 5d.

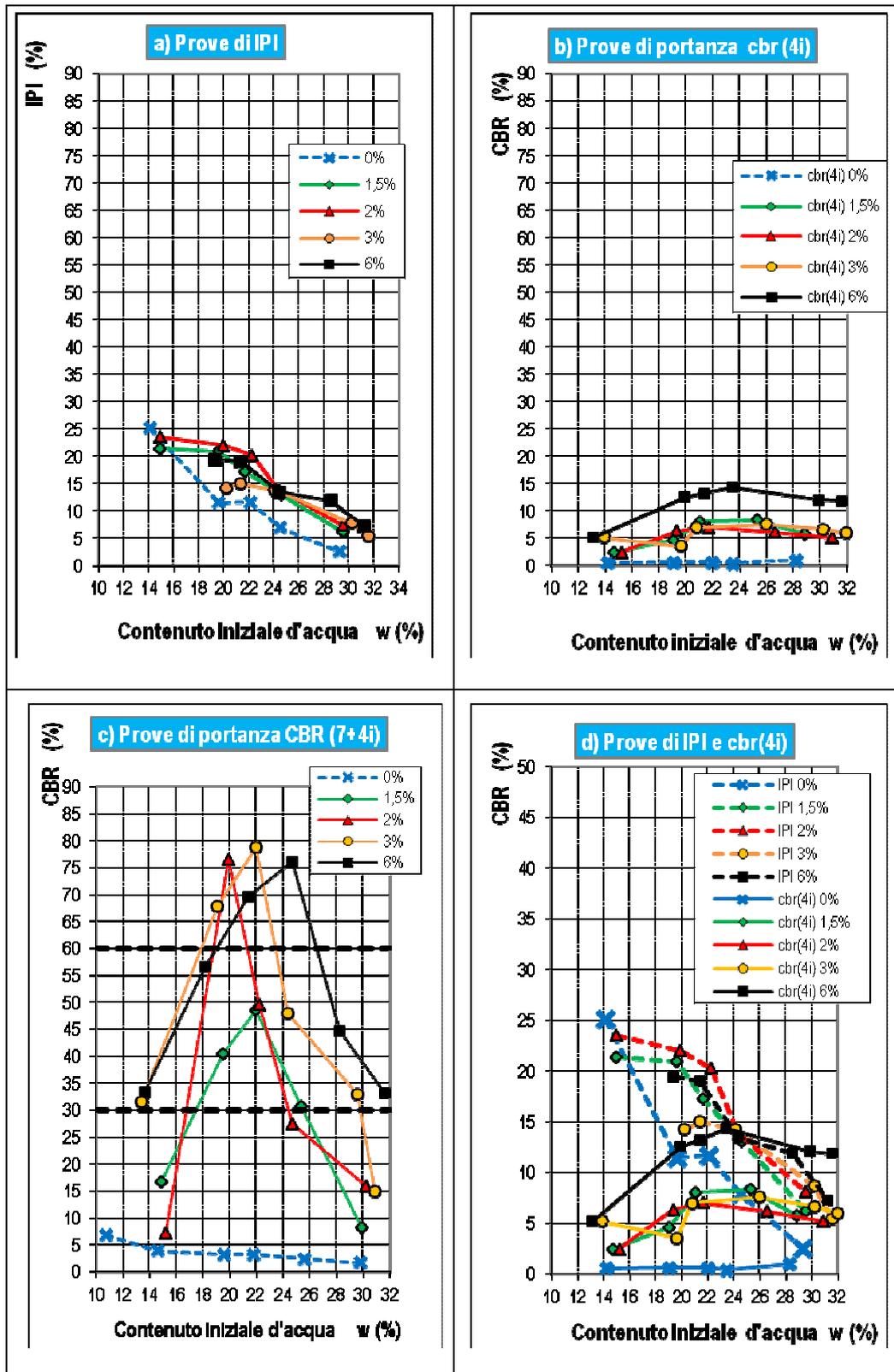


Figura 5. Risultati delle prove di portanza CBR, al variare del dosaggio in calce:
 a) prove di IPI; b) prove cbr (4i); c) prove CBR(7+4i); d) prove di IPI e cbr(4i)

L'esame dei risultati delle prove di portanza CBR(7+4i), dati in Figura 5c, mostra l'esistenza di un contenuto d'acqua ottimale nei confronti di questa caratteristica meccanica che, generalmente, cresce col dosaggio in calce e che, per i casi in studio, va dal 20% al 25%, collocandosi, quindi, nel ramo umido ($w > w_{OPM}$) delle curve di costipamento. Inoltre, per ciascun dosaggio in calce, l'umidità ottimale nei confronti della portanza è in media pari a circa $1,35 w_{OPM}$, quindi ben maggiore dell'ottimo di costipamento Proctor Modificata, individuato dallo studio di compattabilità dato in Tabella 10. Questo risultato differenzia il comportamento delle miscele terra-calce da quello tipico delle terre naturali, sia granulari, sia fini.

Per quanto riguarda i requisiti di portanza previsti dal Capitolato ANAS, questi risultano largamente soddisfatti in un ampio campo di umidità, riportato in Tabella 11 al variare del dosaggio in calce. In Figura 6c sono infatti rappresentati, per comodità di lettura, i livelli minimi dei requisiti richiesti per l'impiego di queste miscele in rilevato (CBR = 30 MPa) ed in strati di sottofondazione (CBR = 60 MPa), che risultano sempre soddisfatti, per tutti i dosaggi in calce considerati, compreso anche il caso del sottodosaggio, con CaO = 1,5%.

Dosaggio in calce CaO (%)	w @ CBR(7+4i) _{MAX} (%)	Range di umidità per il soddisfacimento requisiti ANAS	
		Rilevato (CBR ≥ 30MPa) W _{MNI} - W _{MAX} (%)	Sottofondo (CBR ≥ 60MPa) W _{MNI} - W _{MAX} (%)
0	--	mai	mai
1,5	21,90	17 ÷ 25	mai
2	20,00	17 ÷ 24	19 ÷ 21
3	22,00	sempre	18 ÷ 23,5
6	24,70	sempre	19 ÷ 26,5

Tabella 11 – Range delle umidità che, per i diversi contenuti in CaO, garantiscono il soddisfacimento dei requisiti di portanza ANAS per impieghi in rilevato ed in strati di sottofondo

Per quanto riguarda le prove condotte su campioni compattati con energia Proctor Normale, quelle di portanza immediata raffigurate in Figura 5a presentano valori di IPI decrescenti progressivamente all'aumentare delle umidità di costipamento della terra da trattare. Le prove di portanza condotte dopo 4 giorni di immersione normale (cbr(4i), riportate in Figura 5b), mostrano invece, in conseguenza del periodo di maturazione, anche se in acqua, un andamento che, come quello CBR(7+4i), presenta valori massimi di portanza che si collocano nel campo di umidità iniziale della terra compreso tra il 22% ed 25%, ovvero nel ramo umido delle curve di costipamento. Si fa osservare che in questo caso la risposta meccanica delle miscele appare meno sensibile alle variazioni del contenuto iniziale d'acqua della terra, dato che le curve interpolanti risultano più appiattite rispetto a quelle caratteristiche delle miscele compattate ad energia maggiore. Anche per il caso considerato, i valori ottimali del contenuto iniziale d'acqua nei confronti della portanza CBR aumentano all'aumentare del dosaggio in calce e risultano superiori a quelli ottimali per l'addensamento Proctor Normale, sebbene in misura ridotta a quanto visto per gli analoghi valori ottimi Proctor modificati. In questo caso, infatti, l'umidità ottimale nei confronti della portanza varia tra $1,1 w_{OPN}$ e $1,3 w_{OPN}$.

L'interpretazione secondo la metodologia francese dei risultati ottenuti (si vedano i requisiti di Tabella 2), circa le possibilità di impiego delle miscele, porta a concludere che la terra in studio soddisfa:

- i requisiti per l'impiego in strati di rilevato, con dosaggi di CaO non inferiori al 2%;
- i requisiti per l'impiego nella parte superiore dei rilevati, per il solo dosaggio al 6%;

- in nessun caso, i requisiti per l'impiego in strati di sottofondazione, dato che, pur essendo soddisfatta la relazione $CBR_{PN}/IPI > 1$, l'indice di portanza IPI risulta inferiore alla soglia minima richiesta per questa destinazione d'uso (in relazione alla plasticità della terra in studio, il minimo richiesto è, infatti, $IPI = 15\%$).

5.6 Prove di rigonfiamento CBR in acqua

Come detto, durante il periodo di immersione normale, per 4 giorni in acqua, precedente le prove di portanza $cbr(4i)$ e $CBR(7+4i)$, si è determinato il rigonfiamento verticale dei campioni di prova, per valutare l'influenza su questa caratteristica della composizione delle miscele, nelle diverse condizioni sperimentali (energie di costipamento, modalità e tempi di maturazione).

Si fa rilevare che il rigonfiamento CBR così determinato differisce da quello necessario ad identificare la classe di rigonfiamento LS (Linear Swelling) prevista dalla Norma UNI EN 14227-11¹⁷ per la valutazione delle miscele terra-calce e che viene, invece, monitorato per 28 giorni su campioni compattati con energia Proctor Normale.

Nelle Figure 6a e b sono riportati gli andamenti tipici del rigonfiamento misurato nel periodo di osservazione per le miscele terra-calce, ai diversi contenuti iniziali d'acqua delle miscele in studio. Come può osservarsi dalla Figura 6a, per i campioni compattati a bassa energia e posti in immersione senza preventiva maturazione in ambiente protetto, il rigonfiamento osservato nei quattro giorni di immersione non si stabilizza ma denuncia un accrescimento ancora significativo nel tempo. Inoltre, risulta evidente che il rigonfiamento si riduce all'aumentare del contenuto iniziale d'acqua della terra. Dalla Figura 6b, si osserva, invece, che il periodo di maturazione di 7 giorni in condizioni protette, oltre agli effetti del più alto livello di addensamento, per i provini di cui alle prove $CBR(7+4i)$ porta a valori del rigonfiamento del tutto trascurabili e che si mantengono stabili nel tempo (nel caso in studio, sempre inferiori allo 0,1%).

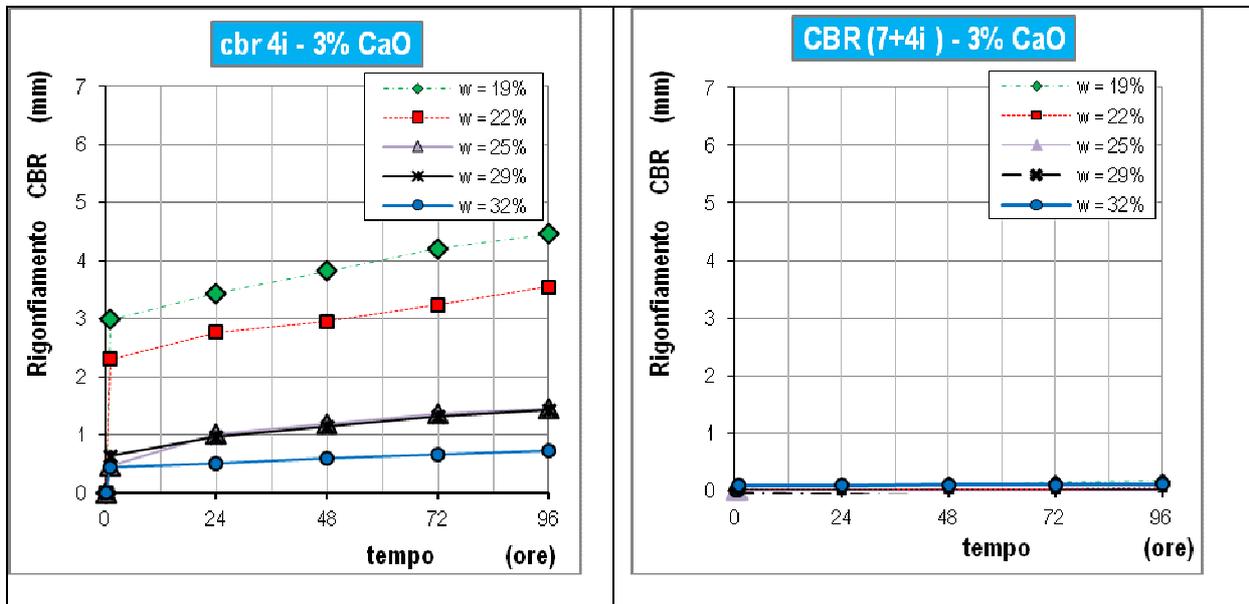


Figura 6. Rigonfiamento CBR durante il periodo di immersione di 4 giorni in acqua: a) per prove $cbr(4i)$; b) per prove $CBR(7+4i)$

Come può osservarsi dai risultati rappresentati in Figura 7, inoltre, il periodo di 7 giorni di maturazione in condizioni protette, soprattutto, insieme al più elevato livello di addensamento, rende le miscele CBR(7+4i) praticamente insensibili al rigonfiamento, indipendentemente dai valori di dosaggio in calce considerato. Valutare tale caratteristica sulle prove CBR(7+4i), pertanto, porta ad esprimere giudizi non corretti circa il potenziale di rigonfiamento delle miscele.

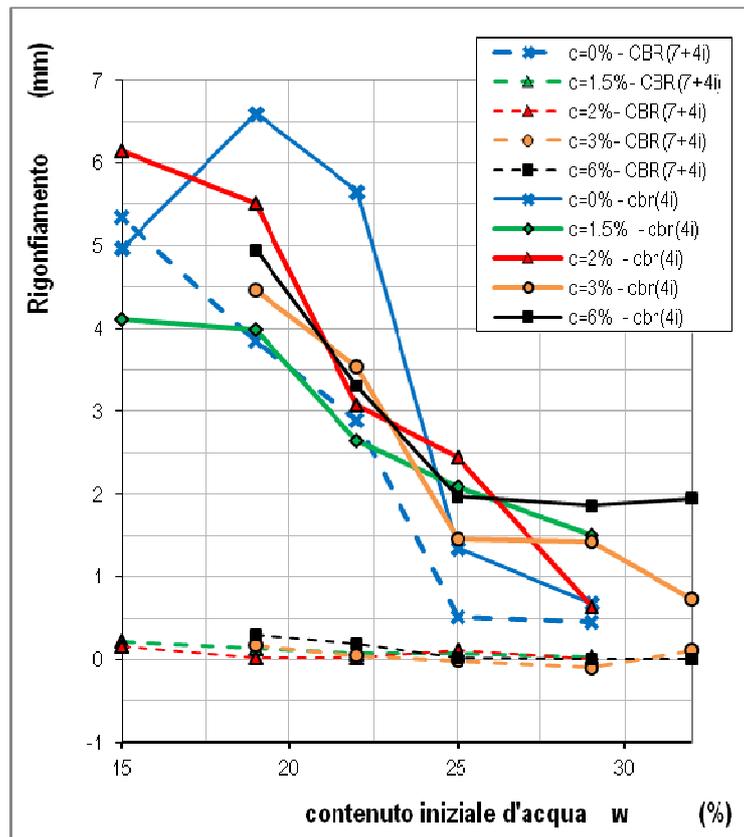


Figura 7 – Rigonfiamento finale CBR, dopo 4 giorni di immersione in acqua, al variare della composizione delle miscele, per le due condizioni di prova

6 CONCLUSIONI

Con il presente lavoro si sono passate in rassegna le diverse metodologie di studio di laboratorio per l'ottimizzazione delle miscele terra-calce, alla luce dello stato delle conoscenze, predisponendo un piano sperimentale con lo specifico obiettivo di verificare la coerenza tra le indicazioni fornite dalle diverse normative e capitolati quanto all'ottimizzazione delle miscele (dosaggio in calce e umidità da osservare) in relazione alla prevista destinazione d'uso.

Si è verificato che la metodologia ANAS si discosta oltre che dalle altre in uso in Italia, anche dalle principali normative internazionali, e, tra l'altro, non consente di fare uso delle specifiche previste dalla Norma Europea UNI EN 14277-11, quanto alla qualificazione dei prodotti ottenuti dal trattamento.

A prescindere dai valori di densità massima da utilizzarsi per i controlli del costipamento, tuttavia difficili da raggiungere in cantiere, l'umidità ottimale di costipamento determinata

dalle prove Proctor modificate orienta male le decisioni di cantiere, dato che, come mostrato dalla sperimentazione condotta, porta a valori di riferimento inferiori a quelli minimi che devono esser presenti nella terra per assicurarne, inizialmente, la ionizzazione a pH elevato, necessaria alla solubilizzazione dell'argilla e, poi, l'idratazione dei composti che danno luogo alla cementazione delle particelle

Ancora, per quanto riguarda i requisiti relativi alle prestazioni meccaniche delle miscele, in funzione delle diverse destinazioni d'uso, la metodologia ANAS porta ad un giudizio falsamente ottimistico, in contrasto con quanto deriva dalle applicazioni della metodologia francese, considerata pure da RFI in Italia. Inoltre, anche il giudizio sul potenziale di rigonfiamento delle miscele, quando basato sulle indicazioni ANAS risulta scarsamente attendibile, dato che porta a sottostimare tale potenziale, con i conseguenti possibili rischi per la stabilità delle opere realizzate con miscele così valutate.

Considerata l'ampia diffusione delle specifiche ANAS per i lavori stradali in Italia, i risultati presentati evidenziano la necessità di una pronta revisione della metodologia adottata, anche per un utile allineamento a quanto previsto dalla normativa europea al riguardo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] DPR. D.P.R. 21 dicembre 1999, N° 554 - *Regolamento di attuazione della legge quadro in materia di lavori pubblici 11 febbraio 1994, N° 109, e successive modificazioni*. G.U. N° 98 del 28 aprile 2000. (1999)
- [2] Celauro B., Celauro C. "Criteria for Laboratory Studies on Fine Soils Treated with Lime", In *Construction and Building: Design, Materials, and Techniques*. Doyle, S. Editor. Novapublisher, ISBN: 978-1-61761-211-4. (2010)
- [3] Kergoet M. "Exemple de traitement pour déterminer l'emploi d'un sol en couche de forme". *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées* (BLPC). N° 231, pp. 19-24. (2001).
- [4] SETRA Traitement des sols à la chaux et /ou aux liants hydrauliques - Application à la réalisation des assises de chaussées. Guide Technique, ISBN 978-2-11-094, Bagnex Cedex, France. (2007)
- [5] Leflaive E. and Schaeffner. M. "Le traitement des sols fins à la chaux". *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, Paris, No. 99, pp. 110-118. (1979)
- [6] Little, D.L. and Shafee F.A.M.Y. Example problem illustrating the application of the National Lime Association. Mixture Design and Testing Protocol (MDTP) to ascertain engineering properties of lime-treated subgrades for mechanistic pavement design/analysis. National Lime Association Report. (2001)
- [7] Estéoule J., Perret P. "Etude expérimentale des phénomènes de stabilisation des sols fins par la chaux". *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*. n. 99, pp. 99-109. (1979)
- [8] Celauro B., Giuffrè O. Tesoriere G. "Caractères de la stabilisation à la chaux et au ciment d'un sol argileux très plastique". *Revue Générale des Routes et des Aérodrômes*, n. 570, pp. 1-8. (1980)
- [9] UNI. UNI EN 13286-47. Miscela non legate e legate con leganti idraulici - Parte 47: Metodo di prova per la determinazione dell'indice di portanza CBR, dell'indice di portanza immediata e del rigonfiamento. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano. (2006)
- [10] UNI. UNI EN 459-1. Calci da costruzione - Parte 1: Definizioni, specifiche e criteri di conformità. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano. (2002).

- [11] UNI. *UNI EN 459-2. Calci da costruzione – Parte 2: Metodi di prova*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, 2002. (2002b)
- [12] VSS. *SN 640 503a, Stabilisation: Stabilisation à la chaux aérienne*. Union des professionnels suisses de la route (VSS), Association Suisse de Normalisation, Zurich. (1987)
- [13] ASTM. Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization. Designation ASTM D6276, American Society for Testing and Materials, USA. (2006)
- [14] SETRA. *Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Application à la réalisation des remblais et des couches de forme*. Guide Technique, ISBN 2-7208-3810-1, Bagnex Cedex, France. (2000)
- [15] CRR. *Code de bonne pratique pour le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Recommandations CRR R81/10*, Centre de Recherches Routières, Bruxelles. (2010)
- [16] ASTM. Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lb/ft) (Standard Proctor) Designation D698, American Society for Testing and Materials, USA. (2000)
- [17] UNI UNI EN 14227-11, *Miscela legata con leganti idraulici - Specifiche - Parte 11: Terra trattata con calce*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano. (2006)
- [18] UNI UNI EN 933-9:2000. *Prove per determinare le caratteristiche geometriche degli aggregati - Valutazione dei fini - Prova del blu di metilene*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano. (2000).
- [19] Celauro B., Giuffrè O. (1982) *Guida agli studi di trattamento a calce dei terreni fini in vista di un più esteso impiego di materie locali non tradizionali*. Atti del XIX Convegno Nazionale Stradale A.I.P.C.R., Rimini.
- [20] NLA Technical Memorandum – Guidelines for Stabilization of Soils Containing Sulfates. National Lime Association. (2000)
- [21] Little, D.L. *Evaluation of Structural Properties of Lime Stabilized Soils and Aggregates, Summary of Findings (Vol. 1)*, National Lime Association Report. (1999)
- [22] NLA *Lime-treated soil construction manual lime stabilization & lime modification*. National Lime Association, Bulletin 326. (2004)
- [23] ASTM. ASTM D5102 - 09 Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Compacted Soil-Lime Mixtures, American Society for Testing and Materials, USA. (2009)
- [24] NLA. *Mixture Design and Testing Procedures for Lime Stabilized Soil*. Technical Brief. NLA National Lime Association. October 2006. (2006)
- [25] RFI. *Specifica Tecnica - Trattamento delle Terre con calce*. Norma Interna. Divisione Infrastrutture FS, Roma. (1999)
- [26] ASTM. Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lb./ft) (Modified Proctor) Designation D1557, American Society for Testing and Materials, USA. (2007)
- [27] Benedetto A., De Stefani C., Marino M., Sdoga S. “Realizzazione del corpo ferroviario mediante trattamento a calce di terre non idonee. Il caso dell’Alta Capacità Modena Bologna“. In *Quarry and Construction*, 10, pp: 97-116. (2004)
- [28] CNR. *Bollettino Ufficiale 146/1992. Determinazione dei moduli di deformazione M_d e M_d^l mediante prova di carico a doppio ciclo con piastra circolare*. Consiglio Nazionale delle Ricerche, Roma. (1992)

- [29] ANAS. *Capitolato Speciale d'Appalto. Norme Tecniche – Opere Civili*. Ente Nazionale per le Strade, Roma. (2006)
- [30] CNR. *Bollettino Ufficiale 36/1973. Stabilizzazione delle terre con calce*. Consiglio Nazionale delle Ricerche, Roma. (1973)
- [31] UNI. *UNI EN 13286-2. Miscele non legate e legate con leganti idraulici - Parte 2: Metodi di prova per la determinazione della massa volumica e del contenuto di acqua di riferimento di laboratorio - Costipamento Proctor*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano. (2005)
- [32] UNI. *UNI 10006. Costruzione e manutenzione delle strade - Tecniche di impiego delle terre*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano. (2002)