

S.p.A.

DIREZIONE REGIONALE PER LA SICILIA

PA 12/09

CORRIDOIO PLURIMODALE TIRRENICO - NORD EUROPA

ITINERARIO AGRIGENTO - CALTANISSETTA - A19

S.S. N° 640 "DI PORTO EMPEDOCLE"

AMMODERNAMENTO E ADEGUAMENTO ALLA CAT. B DEL D.M. 5.11.2001

Dal km 44+000 allo svincolo con l'A19

VARIANTE TECNICA MIGLIORATIVA



(Art. 169 comma 4 del D.Lgs. N. 163/2006 e s.m.i.)

CONTRAENTE GENERALE

DIREZIONE LAVORI



— ITALCONSULT —

INTEGRAZIONE AL PROGETTO DI VARIANTE TRASMESSO CON NOTA ANAS Prot. CPA-0058164-P del 03/10/13

PIANO DI UTILIZZO DELLE TERRE E ROCCE DA SCAVO

GALLERIA NATURALE CALTANISSETTA

(redatto ai sensi del D.M. 161/2012)

TRATTAMENTO A CALCE - Relazione tecnica sullo studio per il reimpiego dei terreni argillosi prodotti dagli scavi mediante trattamento con calce

Codice Unico Progetto (CUP) : F91B09000070001

6227

Codice Elaborato:

PA12_09 - V 0 0 0 G E 2 2 4 P T 0 8 X R H 1 6 4 A ----

F																				
E																				
D																				
C																				
B																				
A	Aprile 2014																		M. LITI	P. PAGLINI
REV.	DATA																		APPROVATO	AUTORIZZATO

Il Progettista:



Il Consulente Specialista:



Il Geologo:

Il Coordinatore per la sicurezza in fase di esecuzione:



Il Direttore dei Lavori:

Responsabile del procedimento: Ing. CLAUDIO BUCCI

INDICE

1. INTRODUZIONE	2
2. METODOLOGIA DI STUDIO.....	3
3. CRITERI DI STUDIO E RIFERIMENTI PER L'IMPIEGO	6
3.1 CRITERI DI IDONEITÀ DELLE TERRE AL TRATTAMENTO CON CALCE	6
3.2 CRITERI DI IDONEITÀ DELLA CALCE.....	7
3.3 CRITERI DI IDONEITÀ DELLE MISCELE PER L'IMPIEGO IN RILEVATO.....	8
3.4 CRITERI DI IDONEITÀ DELLE MISCELE PER L'IMPIEGO IN STRATI DI SOTTOFONDO.....	9
4. STUDI DI LABORATORIO PER IL MIX DESIGN	10
4.1 PROVE SULLA CALCE.....	10
4.2 PROVE DI IDENTIFICAZIONE DELLE TERRE	10
4.3 PROVE DI FORMULAZIONE DELLE MISCELE TERRA-CALCE	13
4.3.1 Prove di compattabilità Proctor Normale e di portanza immediata IPI	15
4.3.2 Prove di portanza cbr(4i) – Studio di tenuta all'acqua delle miscele.....	19
4.3.3 Prove di portanza CBR(7+4i).....	25
5. STUDI E PROVE DI CAMPO.....	27
5.1 Finalità degli studi e delle prove di campo	27
5.2. OPERAZIONI ELEMENTARI E MODALITÀ ESECUTIVE SELEZIONATE	28
5.3 CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE DEL RILEVATO SPERIMENTALE	34
5.4 RISULTATI DELLE PROVE DI CAMPO E RIFERIMENTI PER LE N.T.A. integrative	38
6. CONSIDERAZIONI PER L'ESECUZIONE ED IL CONTROLLO DEI LAVORI.....	47

Cod. elab.: 000GE224PT08XRH164A	<i>Titolo: TRATTAMENTO A CALCE</i> Relazione tecnica sullo studio per il	<i>Data: Aprile 2014</i>
Nome file: 6227 relazione tecnica sullo studio tratt a calce	reimpiego dei terreni argillosi prodotti dagli scavi mediante trattamento con calce	<i>Pagina 1 di 50</i>

1. INTRODUZIONE

Nella costruzione delle infrastrutture stradali, elemento qualificante per la minimizzazione degli impatti economici ed ambientali è il trattamento con calce dei terreni fini di scavo in vista del loro reimpiego per la costruzione dei rilevati (ivi compresa la bonifica del piano di posa) e per l'esecuzione degli strati di sottofondo delle pavimentazioni.

Il trattamento con calce delle terre fini argillose di scavo è, infatti, una tecnologia avanzata ed ormai largamente sperimentata che, modificando le proprietà fisico-chimiche delle stesse, ne permette la riutilizzazione per gli impieghi sopra elencati, minimizzando allo stesso tempo il fabbisogno di idonei materiali da cava di prestito e la necessità del trasporto a rifiuto delle materie argillose scavate, di per sé non idonee al reimpiego.

Il ricorso alla stabilizzazione con calce dei terreni argillosi prodotti dagli scavi si iscrive, pertanto, tra le principali misure di salvaguardia ambientale, 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 Regolamento di attuazione della Legge Quadro in materia di lavori pubblici, di cui al D.P.R. N° 554/1999 e del D.P.R. N° 207/2010.

Nell'ottica dei suddetti principi, la Società Consortile Empedocle 2 S.c.p.A., ha inteso valutare la possibilità di reimpiego, previo trattamento con calce, dei terreni argillosi provenienti dagli scavi prodotti nel corso dei lavori di ammodernamento della S.S. 640 "di Porto Empedocle", 2° Tratto, incaricando della consulenza il sottoscritto Prof. Ing. Bernardo Celauro, nell'aprile del 2012. Tale incarico è stato in seguito formalizzato con contratto N° 169 - PE2 del 22/08/2012 (Cod. For. 016460), Codice CUP: F91B09000070001, Codice CIG: 03446004E9.

Per la fase di progetto, come concordato con la Committenza, l'incarico ha previsto la seguente articolazione:

- a.1 valutazione di idoneità delle terre di scavo basata sull'analisi delle indagini geologiche e geotecniche e degli studi di laboratorio effettuati in data precedente all'incarico nonché sui risultati di uno studio di approfondimento che portasse, attraverso ricognizione specifica dei luoghi, saggi con prelievo di campioni ed indagini di laboratorio ad hoc, alla qualificazione nel profilo geotecnico-stratigrafico dei terreni di scavo idonei al trattamento;
- a.2 scelta del tipo di trattamento e valutazione di idoneità della terra e dei prodotti di trattamento con definizione dei dosaggi minimi in calce secondo ASTM D 6276 o, se necessario, secondo SN 640 503a;
- a.3 studio di formulazione delle miscele condotto con valutazione della compattabilità Proctor e delle prestazioni meccaniche delle stesse in relazione ai campi d'impiego;
- a.4 definizione delle Norme Tecniche per l'esecuzione dei lavori in terra calce con messa a punto (attraverso prove preliminari di campo) delle modalità esecutive e dei riferimenti utili per i controlli di qualità ed il monitoraggio delle opere realizzate.

Cod. elab.: 000GE224PT08XRH164A	<i>Titolo: TRATTAMENTO A CALCE</i> Relazione tecnica sullo studio per il reimpiego dei terreni argillosi prodotti dagli scavi mediante trattamento con calce	Data: Aprile 2014
Nome file: 6227 relazione tecnica sullo studio tratt a calce		Pagina 2 di 50

2. METODOLOGIA DI STUDIO

Lo studio del trattamento con calce per il reimpiego delle terre argillose di scavo prodotte per i lavori di ammodernamento della S.S. N°640 è stato sviluppato per fasi, secondo un programma che permettesse di rispondere in modo progressivo alle richieste specifiche che interessano ciascuna fase dell'intero processo costruttivo: dagli studi per il progetto delle miscele, alla valutazione dei processi produttivi in cantiere ed al controllo di qualità dei lavori realizzati.

Gli aspetti relativi al progetto delle miscele, di importanza primaria sotto il profilo tecnico-economico ed ambientale, hanno considerato in primo luogo:

- *quello della identificazione delle terre*: loro localizzazione nel profilo geologico-stratigrafico e caratterizzazione geotecnica per valutarne l'idoneità al trattamento previsto in base alle indicazioni fornite dalla norma UNI EN 14227-11:2006 "Terreno trattato con calce";
- *quello della formulazione delle miscele*: determinazione dei dosaggi in legante da adottare in relazione all'impiego previsto, alla particolare natura dell'argilla presente, alle effettive caratteristiche del legante da impiegare e, specialmente, in relazione al campo dei prevedibili contenuti naturali d'acqua della terra di scavo al momento dell'esecuzione dei lavori.

L'intera fase di progetto ha considerato, pertanto, i seguenti tre momenti, articolati come appresso riportato in dettaglio.

a) VALUTAZIONE DI IDONEITÀ AL TRATTAMENTO CON CALCE DELLE TERRE DI SCAVO mediante:

- **analisi** dei risultati delle indagini geologiche e geotecniche e degli studi di laboratorio effettuati in data antecedente all'incarico ed esame di tutta la documentazione prodotta dalla Committenza, particolarmente per i siti di maggiore produzione di materie di scavo (relazioni geologiche e geotecniche, prove di laboratorio, profili stratigrafici);
- **definizione delle destinazioni d'uso** delle terre trattate, distinguendo:
 - *parte inferiore dei rilevati PIR* (strati posti a più di 1,50 m dal piano di posa della pavimentazione), compresa la bonifica del loro appoggio nel terreno naturale;
 - *parte superiore dei rilevati PSR* (strati posti a meno di 1,50 m dal piano di posa della pavimentazione), escluso lo strato di coronamento (strato di sottofondazione);
 - *strati di sottofondazione della pavimentazione, SSF* (coronamento dei rilevati e sottofondazione di trincea);
- **definizione dei nuovi saggi**, resa necessaria dal fatto che i precedenti (da PT1 a PT15 nella documentazione) si limitavano ad esplorare una profondità non superiore a 1,50 m

Cod. elab.: 000GE224PT08XRH164A	Titolo: TRATTAMENTO A CALCE Relazione tecnica sullo studio per il reimpiego dei terreni argillosi prodotti dagli scavi mediante trattamento con calce	Data: Aprile 2014
Nome file: 6227 relazione tecnica sullo studio tratt a calce		Pagina 3 di 50

dal piano di campagna ed interessavano, quindi, solo la coltre più superficiale del suolo, indipendentemente dalla stratigrafia dei siti. Tenuto conto delle profondità interessate dagli scavi di progetto e dei campioni di terra da prelevare e da caratterizzare, i nuovi saggi sono stati effettuati mediante:

- pozzetti esplorativi, eseguiti con escavatore (identificati con la sigla *NP*);
- sondaggi meccanici (sigla *NS*) eseguiti con carotiere discontinuo di adeguato diametro per il prelievo di campioni rimaneggiati posti a profondità maggiori di quelle permesse dall'escavatore.

Per tutti i siti la profondità di indagine è stata spinta fino alla quota di fondo scavo.

Nelle tavole relative ai "Profili Stratigrafici" che accompagnano la presente relazione è indicata l'ubicazione dei nuovi saggi (oltre a quella dei precedenti) e, per ciascuno di essi, è riportata una sintesi dei risultati delle prove di caratterizzazione geotecnica di laboratorio;

- **prelievo dei campioni** di terra rimaneggiata per le analisi e gli studi di laboratorio. Escludendo lo strato più superficiale di terreno vegetale attivo, per ogni sito di indagine, in relazione alla situazione stratigrafica evidenziata dagli studi di progetto, si è considerato un prelievo per ogni strato di caratteristiche litologiche significativamente omogeneo. Ciascun prelievo ha considerato quantità di terra sufficienti per poter effettuare sia le prove preliminari di caratterizzazione geotecnica, sia gli eventuali studi di formulazione delle miscele (per la determinazione del dosaggio in calce o in calce e cemento). Nel corso del campionamento, particolare rilievo è stato posto alla valutazione del contenuto d'acqua dei terreni in situ. Inoltre, nel caso di venute d'acqua, si è considerato anche di effettuare prelievi da sottoporre ad analisi chimica delle acque;
- **indagini di laboratorio ad hoc**, per una precisa qualificazione e quantificazione nel profilo geotecnico-stratigrafico dei terreni di scavo idonei al trattamento. Per la preliminare valutazione di idoneità delle terre si è fatto riferimento ai criteri indicati dalla norma UNI EN 14227-11 2006 "Terreno trattato con calce". In particolare, per ogni campione le prove di idoneità al trattamento con calce hanno riguardato:
 - misure del contenuto d'acqua in situ (w_n),
 - l'analisi granulometrica per setacciatura,
 - la plasticità (limiti di Atterberg),
 - il contenuto di sostanze organiche (se richiesto anche di pH),
 - il contenuto di solfati e solfuri;
 - il rigonfiamento volumetrico, G_v , secondo UNI EN 13286-49, nei casi di interesse;
- **definizione delle tratte omogenee**, cioè dei terreni provenienti da parti diverse del tracciato e che, in relazione alla variabilità ammissibile delle caratteristiche di natura

Cod. elab.: 000GE224PT08XRH164A	Titolo: TRATTAMENTO A CALCE Relazione tecnica sullo studio per il reimpiego dei terreni argillosi prodotti dagli scavi mediante trattamento con calce	Data: Aprile 2014
Nome file: 6227 relazione tecnica sullo studio tratt a calce		Pagina 4 di 50

(granulometria, plasticità, sostanze chimiche presenti) possono essere trattati allo stesso modo (stessi dosaggi e modalità esecutive) per gli impieghi previsti.

b) SCELTA DEL TIPO DI TRATTAMENTO E VALUTAZIONE DEI PRODOTTI

- in relazione agli impieghi previsti (*PIR, PSR, SSF*), individuazione dei terreni da trattare con sola calce e di quelli da stabilizzare, se di interesse, con calce e cemento;
- qualificazione dei *prodotti di trattamento* effettivamente da impiegarsi e, in particolare, del tipo di calce e della sua qualità secondo UNI EN 459-1:2002;
- definizione dei *dosaggi minimi in calce* secondo ASTM D 6276 (consumo iniziale in calce, C.I.C.) o secondo SN 640 503.

c) STUDIO DI FORMULAZIONE DELLE MISCELE TERRA-CALCE

Dopo preliminare qualificazione dei terreni, il progetto delle miscele ottenute da terre idonee all'impiego è stato effettuato valutandone la compattabilità mediante prove Proctor e le prestazioni meccaniche di laboratorio, in relazione ai campi d'impiego ritenuti di interesse per la Committenza. Per lo studio, come meglio precisato appresso, sono state adottate le metodologie ufficiali oggi più accreditate in campo nazionale ed europeo. Per dato terreno trattato con calce (o terreni da considerare ad esso assimilabili) i risultati di questo studio hanno fornito regole per l'adattamento in cantiere dei dosaggi in calce in funzione del contenuto d'acqua al momento dell'esecuzione dei lavori.

Cod. elab.: 000GE224PT08XRH164A	<i>Titolo: TRATTAMENTO A CALCE</i> Relazione tecnica sullo studio per il	<i>Data: Aprile 2014</i>
Nome file: 6227 relazione tecnica sullo studio tratt a calce	reimpiego dei terreni argillosi prodotti dagli scavi mediante trattamento con calce	<i>Pagina 5 di 50</i>

3. CRITERI DI STUDIO E RIFERIMENTI PER L'IMPIEGO

Si fa rilevare che l'attività svolta e, in particolare, i criteri adottati negli studi di progetto delle miscele terra-calce ed i requisiti prestazionali ad esse richiesti in relazione agli impieghi seguono la normativa e le direttive europee in materia e, specificamente:

- la norma UNI EN 14227-11 (2006): "Miscela legate con leganti idraulici, Parte 11: Terreno trattato con calce" insieme alla normativa a questa collegata;
- la guida tecnica SETRA-LCPC (2000) – Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Application à la réalisation des remblais et des couches de forme.

Detti criteri e relativi riferimenti di qualità sono riportati di seguito, segnatamente per:

- a) idoneità delle terre al trattamento con calce;
- b) idoneità della calce;
- c) idoneità delle miscele per l'impiego in rilevato;
- d) idoneità delle miscele per l'impiego in strati di sottofondo

3.1 CRITERI DI IDONEITÀ DELLE TERRE AL TRATTAMENTO CON CALCE

Tale studio ha preso in considerazione le caratteristiche di natura delle terre che ne determinano l'idoneità al trattamento: granulometria, plasticità, presenza di sostanze nocive al trattamento. Ove non espressamente richiamati nella normativa succitata, i requisiti di idoneità all'impiego considerati nel presente studio di consulenza sono stati quelli appresso specificati.

Granulometria: Il 95% della terra deve presentare dimensioni inferiori a 63 mm. In tal senso, vanno eliminati gli elementi di dimensione superiore a 150 mm, poiché di ostacolo all'intima miscelazione della terra con la calce quando si usano frese ad albero orizzontale. Il passante al setaccio di apertura 0,063 mm, inoltre, deve essere maggiore del 12%.

Indice di plasticità: l'indice di plasticità, IP, della terra, determinato secondo la norma CNR-UNI 10014, deve risultare preferibilmente compreso tra 10 e 40, ma in nessun caso inferiore a 5. Indici di plasticità maggiori di 40 possono essere considerati a condizione che, prima dell'esecuzione dei lavori, si dimostri l'idoneità del processo di miscelazione e la rispondenza delle prestazioni delle miscele in relazione all'impiego previsto.

Contenuto di materie organiche: le M.O., secondo le proporzioni in cui sono presenti nel terreno consumano, inizialmente, una quantità più o meno alta di calce per neutralizzare l'acidità del mezzo, quantità che viene meno per lo sviluppo delle reazioni pozzolaniche. Per limitare i consumi di calce ed i costi del trattamento, è opportuno che il tenore in materie organiche del terreno sia molto ridotto: inferiore al 2% in massa, nel caso di miscele destinate a strati di sottofondo, ed inferiore al 4% per miscele destinate a strati di rilevato. Tali limiti possono essere superati, purché, attraverso idonei studi di dosaggio in calce, si dimostri il raggiungimento dei requisiti di resistenza richiesti alle miscele.

Cod. elab.: 000GE224PT08XRH164A	Titolo: TRATTAMENTO A CALCE Relazione tecnica sullo studio per il reimpiego dei terreni argillosi prodotti dagli scavi mediante trattamento con calce	Data: Aprile 2014
Nome file: 6227 relazione tecnica sullo studio tratt a calce		Pagina 6 di 50

Contenuto di solfati e solfuri: le Norme Tecniche di Appalto fissano per il contenuto totale di sali di zolfo (solfati e solfuri) la soglia massima dell'1,0%. Tuttavia, tenuto conto dei rischi di rigonfiamento che - in considerazione anche dell'eventuale presenza di altre sostanze nocive - possono aversi quando il contenuto di sali di zolfo è prossimo a tale soglia, si ritiene opportuno di ridurre la soglia di accettabilità, portandola allo 0,25%, e di accettare terre con un contenuto di solfati superiore a tale limite (ma, in ogni caso, inferiore all'1,0%) solo sulla base di uno specifico studio di laboratorio, effettuato secondo la norma UNI EN 14227-11:2006. Secondo tale norma, infatti, quando esistono dubbi sulla presenza di sostanze chimiche nocive al trattamento con calce o con cemento (solfati, solfuri, nitrati, cloruri o altro materiale potenzialmente dannoso), in quantità tale da produrre rigonfiamenti inaccettabili per i prodotti del trattamento, l'idoneità della terra dovrà risultare da prove accelerate di rigonfiamento volumetrico (*Gv*), condotte in accordo alla norma UNI EN 13286-49:2004. L'idoneità al trattamento con calce delle terre si ritiene soddisfatta se risulta: $Gv < 10\%$, per impieghi in rilevato, e $Gv < 5\%$ per miscele destinate a strati di sottofondazione della pavimentazione.

3.2 CRITERI DI IDONEITÀ DELLA CALCE

Premesso che per il trattamento delle terre si possono adoperare, in generale, calci aeree calciche nelle diverse forme (calce viva macinata, calce idrata in polvere o in forma liquida), per motivi tecnici ed economici si è voluto considerare l'impiego di calce viva finemente macinata. Secondo la UNI EN 14227-11 precisata, questa deve essere conforme alla UNI EN 459-1 e del tipo CL 90-Q o CL 80-Q.

I requisiti che più interessano questo tipo di calce per il trattamento delle terre sono: il tenore in calce libera (CaO), la granulometria e la velocità d'idratazione.

Sono da preferire le calci con un *tenore in calce libera* maggiore di 85%; valori inferiori determinano un maggior consumo in calce.

La *granulometria* deve soddisfare i requisiti previsti dalla UNI EN 459-2 per le categorie 1 e 2, come dettagliato in **Tabella I**. Impiegando calci con granulometria di Categoria 2, occorre che la miscelazione venga effettuata in due distinte fasi separate da un periodo di 24 ore. Per l'impiego in strati di sottofondo è opportuno, inoltre, che la calce abbia dimensione non superiore a 2mm.

Cod. elab.: 000GE224PT08XRH164A	Titolo: TRATTAMENTO A CALCE Relazione tecnica sullo studio per il reimpiego dei terreni argillosi prodotti dagli scavi mediante trattamento con calce	Data: Aprile 2014
Nome file: 6227 relazione tecnica sullo studio tratt a calce		Pagina 7 di 50

Tabella I – Granulometria delle calce secondo UNI EN 459-2

Categoria 1	Categoria 2
$p_{5\text{ mm}} > 100\%$	$p_{10\text{ mm}} > 100\%$
$p_{2\text{ mm}} \geq 95\%$	$p_{5\text{ mm}} > 95\%$
$P_{0,2\text{ mm}} \geq 70\%$	
$P_{0,09\text{ mm}} \geq 50\%$	

Nella prova di reattività effettuata secondo la EN 459-2, la calce viva deve permettere di raggiungere la temperatura di 60 °C nel tempo massimo di 25 minuti. È preferibile, tuttavia, che il tempo di reattività sia inferiore a 10 minuti.

Acqua di apporto - Nel caso in cui dovesse essere necessario correggere in aumento (per umidificazione) il contenuto in acqua delle miscele, l'acqua di apporto dovrà essere esente da impurità e sostanze che possano compromettere negativamente le prestazioni meccaniche (di breve e lungo periodo) delle miscele.

3.3 CRITERI DI IDONEITÀ DELLE MISCELE PER L'IMPIEGO IN RILEVATO

Il parametro (criterio di qualità) più idoneo a caratterizzare sotto il profilo meccanico la lavorabilità e la compattabilità delle miscele è, in questo caso, l'indice di portanza immediata (IPI), determinato su campioni compattati in fustella CBR secondo le modalità della prova Proctor Normale e sottoposti a punzonamento immediato (entro 90' dalla miscelazione), senza preventiva immersione in acqua.

Nel progetto delle miscele terra-calce destinate a strati di rilevato possono essere considerati i riferimenti prestazionali riportati nella **Tabella II** (livelli di IPI, determinati secondo EN 13286/47), tratti dall'esperienza internazionale.

<i>Cod. elab.:</i> 000GE224PT08XRH164A	<i>Titolo:</i> TRATTAMENTO A CALCE Relazione tecnica sullo studio per il reimpiego dei terreni argillosi prodotti dagli scavi mediante trattamento con calce	<i>Data:</i> Aprile 2014
<i>Nome file:</i> 6227 relazione tecnica sullo studio tratt a calce		<i>Pagina</i> 8 di 50

Tabella II – Valori di IPI per l'impiego in rilevato di terre fini trattate con calce

CAMPI DI PLASTICITÀ DELLA TERRA	$I_p < 12$	$12 \leq I_p < 25$	$25 \leq I_p < 40$
Valori minimi assoluti di IPI per l'impiego in strati posti a più di 1,50 m dal piano di sottofondo (PIR)	10	7	5
Valori minimi consigliati di IPI per l'impiego in strati posti a più di 1,50 m dal piano di sottofondo (PIR)	12	8,5	6
Valori minimi consigliati di IPI per l'impiego in strati posti a meno di 1,50 m dal piano di sottofondo (PSR)	15	10	7,5
NOTA: Per miscele destinate alla parte superiore dei rilevati, PSR (cioè a strati posti a meno di 1,50 m. dal piano di sottofondo, escluso lo strato superiore di sottofondazione della pavimentazione) occorre considerare i valori di IPI specificati per la parte inferiore del rilevato, PIR, incrementati del 15÷20 % ed il rispetto della tenuta all'acqua a breve termine, espresso dall'ulteriore condizione: $cbr(4i)/IPI \geq 1,0$			

3.4 CRITERI DI IDONEITÀ DELLE MISCELE PER L'IMPIEGO IN STRATI DI SOTTOFONDO

Valutazioni tecnico-economiche effettuate da parte del Contraente Generale, visti i dosaggi in calce ed i provvedimenti esecutivi da adottare, hanno portato a non considerare questa destinazione d'uso per le miscele oggetto di consulenza. Pertanto, lo strato di coronamento del rilevato e lo strato di sottofondazione della pavimentazione in trincea saranno realizzati come da progetto, in misto granulare.

Cod. elab.: 000GE224PT08XRH164A	Titolo: TRATTAMENTO A CALCE Relazione tecnica sullo studio per il reimpiego dei terreni argillosi prodotti dagli scavi mediante trattamento con calce	Data: Aprile 2014
Nome file: 6227 relazione tecnica sullo studio tratt a calce		Pagina 9 di 50

4. STUDI DI LABORATORIO PER IL MIX DESIGN

È stato messo a punto il progetto per lo studio di laboratorio finalizzato alla formulazione delle miscele, definendo l'elenco delle prove da effettuarsi, come trasmesso al laboratorio incaricato (SIDERCEM) e dettagliato come segue.

4.1 PROVE SULLA CALCE

Per la calce, si è fatto riferimento al prodotto messo a disposizione dal Contraente Generale e che si ritiene di utilizzare effettivamente nel corso dei lavori. Trattasi di calce viva prodotta dalla Sanpellegrino SpA – Gruppo UNICALCE, certificata come CL 90-Q secondo UNI EN 459-1. I risultati delle prove di qualificazione richieste sono riportati nella seguente **Tabella III**.

Tabella III – Caratteristiche della calce

Caratteristiche fisiche e chimiche	
Passante al setaccio da 2 mm	100%
Passante al setaccio da 0,2 mm	99,0%
Passante al setaccio da 0,09 mm	86,2%
Passante al setaccio da 0,075mm	81,3%
(CaO+ MgO) totale	95,8%
di cui MgO	1,3%
Calce disponibile CaO	94,5%
Reattività all'acqua (t_{60})	3 min

Come può osservarsi dal confronto con i requisiti specificati al precedente paragrafo 3.2, la calce considerata per l'esecuzione dei lavori è del tipo CL 90-Q secondo UNI EN 459-1, e presenta, inoltre, elevata reattività all'acqua e finezza di macinazione (Categoria 1).

4.2 PROVE DI IDENTIFICAZIONE DELLE TERRE

Sui campioni di terra prelevati - tra il 25 giugno ed il 6 luglio 2012 - dai nuovi saggi mediante pozzetti esplorativi (n. 10 campioni) e mediante sondaggi meccanici (n. 15 campioni), sono state richieste le seguenti prove di identificazione e qualificazione:

- contenuto naturale d'acqua, w_n ;
- granulometria (fino al passante al setaccio di apertura 0,063 mm);
- limiti di Atterberg (LL, LP ed IP) ed indice di consistenza;
- contenuto di solfati, SO_4 ; tenuto conto della dispersione intrinseca al tipo di prova e dell'importanza dei risultati circa l'idoneità al trattamento delle terre, tale contenuto per ogni campione è stato ottenuto come media di tre determinazioni effettuate su prese differenti;

Cod. elab.: 000GE224PT08XRH164A	Titolo: TRATTAMENTO A CALCE Relazione tecnica sullo studio per il reimpiego dei terreni argillosi prodotti dagli scavi mediante trattamento con calce	Data: Aprile 2014
Nome file: 6227 relazione tecnica sullo studio tratt a calce		Pagina 10 di 50

- contenuto di materia organica, M.O. (ASTM D2974);
- consumo iniziale in calce, CIC, secondo ASTM C-977.

Le prove di caratterizzazione geotecnica e gli studi preliminari di idoneità al trattamento con calce delle terre fini di scavo interessate dai lavori in questione hanno fornito i risultati riportati, in sintesi, nella successiva **Tabella IV**.

Tabella IV – Caratteristiche geotecniche e chimiche dei campioni dei nuovi saggi

SIGLA	Progr. Km	Prof. prelievo [m]	Umidità naturale [%]	Passante a 0,063 mm [%]	LL [%]	LP [%]	IP [%]	Ic	Solfati SO ₄ [%]	Sostanza organica M.O. [%]	CIC [%]
NP1	0+240	1,50	16,445	90,5	58,71	29,35	29,36	1,44	0,14	8,72	5,0
NP2	2+200	3,00	35,759	99,4	94,55	43,83	50,72	1,16	2,77	7,36	4,4
NS1-C1	2+900	4,00	37,023	96,1	99,68	36,89	62,79	1,00	3,96	7,57	3,8
NS1-C2	2+900	8,00	27,496	99,5	100,2	37,69	62,51	1,16	0,05	4,70	3,0
NP3	2+520	4,50	34,17	98,9	69,06	31,40	37,66	0,93	0,77	5,28	4,0
NP1bis	1+600	2,00	43,710	97,9	95,69	47,05	48,64	1,07	4,40	6,30	--
NP4	5+140	2,50	40,054	97,0	99,72	38,60	61,12	0,98	0,09	6,90	4,4
NP5	6+640	3,00	20,901	91,7	50,86	22,3	28,56	1,05	0,31	4,35	2,8
NP6	8+860	1,00	10,962	61,6	36,96	19,32	17,64	1,47	0,04	3,66	2,4
NS2-C1	9+920	3,00	25,211	98,7	53,05	22,32	30,73	0,91	0,22	2,46	2,7
NS2-C2	9+920	12,00	22,453	96,1	43,54	19,67	23,87	0,88	0,12	3,12	1,6
NP8	22+400	2,00	21,747	99,6	63,37	28,10	35,27	1,18	0,45	4,00	1,9
NP7	21+300	2,50	21,800	97,3	68,44	24,09	44,35	1,05	1,25	4,63	3,3
NP9	24+355	2,00	20,854	94,6	55,79	21,66	34,13	1,024	0,40	4,06	2,0
NS7-C1	19+300	3,50	34,645	92,0	75,03	32,89	42,14	0,96	0,16	7,64	2,4
NS7-C2	19+300	7,00	23,470	93,8	63,64	24,2	39,44	1,019	0,64	7,20	3,0
NS5-C2	17+140	5,00	23,539	91,4	56,82	23,21	33,61	0,99	0,16	3,46	2,1
NS5-C1	17+140	2,50	17,550	88,8	61,02	24,58	36,44	1,193	0,79	6,06	2,0
NS6-C2	18+580	7,00	22,760	97,1	84,97	24,48	60,49	1,028	0,07	7,47	2,4
NS6-C1	18+580	3,50	25,280	92,2	63,79	22,99	40,8	0,944	0,56	5,27	2,6
NS8-C1	20+120	3,50	20,037	95,6	52,68	19,43	33,25	0,982	0,09	4,08	1,8
NS8-C2	20+120	7,00	23,994	98,3	59,87	23,67	36,2	0,991	0,05	4,64	1,8
NS4-C1	11+750	3,00	15,256	41,6	29,98	17,27	12,71	1,158	0,02	3,58	1,6
NS4-C2	11+750	7,50	19,886	90,2	43,94	16,3	27,64	0,87	0,06	4,18	1,4
NS3	10+600	50,00	18,990	58,3	31,00	20,48	10,52	1,14	0,04	2,03	1,0

Delle terre di scavo qualificate e sottoposte a prove di idoneità, quelle provenienti dagli scavi per la G. A. Favarella (cfr. saggi NS2-C1 ed NS2-C2 in Tabella, prelevate nello stesso foro di sondaggio, ma a profondità di 3,00 m e 12,00 m, rispettivamente) sono state prescelte per costituire le miscele destinate ai successivi studi di mix design di laboratorio ed alla realizzazione del rilevato sperimentale per le prove di campo. Tale scelta ha tenuto conto

Cod. elab.: 000GE224PT08XRH164A	Titolo: TRATTAMENTO A CALCE Relazione tecnica sullo studio per il reimpiego dei terreni argillosi prodotti dagli scavi mediante trattamento con calce	Data: Aprile 2014
Nome file: 6227 relazione tecnica sullo studio tratt a calce		Pagina 11 di 50

delle quantità di materie da estrarre e della loro significativa rappresentatività, per caratteristiche di natura, di buona parte dei terreni interessati dal tracciato.

Dall'esame dei risultati di qualificazione riassunti in tabella si evince infatti che, per le finalità del trattamento con calce, i terreni di scavo esaminati possono essere raggruppati in 4 gruppi fondamentali, come di seguito dettagliati:

a. Terreni a medio-alta plasticità (assimilabili a quelli della G.A. Favarella) $I_p < 35$

Sondaggi e localizzazioni	Verifiche necessarie (*)	NOTE
NP1, progressiva km 0+240	Dosaggio in calce (%)	Per elevata presenza di M.O.
NS 2-C1, progressiva km 9+920		Sono i terreni della G.A. Favarella oggetto dello studio preliminare di laboratorio e di quello di campo sul rilevato sperimentale
NS 2-C2, progressiva km 9+920		
NS4-C2, progressiva km 11+750	--	--
NS5- C2, progressiva km 17+140		
NS8-C1, progressiva km 20+120	--	--
NS8 -C2, progressiva km 20+120	--	--
NP3, progressiva km 2+520	Rigonfiamento accelerato (Gv) e dosaggi in calce per elevate M.O.,	Anche se il contenuto di solfati e solfuri rispetta la soglia di accettabilità (max. 1,0%) prevista dalle Norme Tecniche di Appalto ANAS, è necessario verificare i valori di rigonfiamento accelerato, Gv, secondo UNI EN 13286-49: 2006.
NP5, progressiva km 6+640	Rigonfiamento accelerato (Gv)	
NS5-C1, progressiva km 17+140	Rigonfiamento accelerato (Gv)	
NP8, progressiva km 22+400	Rigonfiamento accelerato (Gv)	
NP9, progressiva km 24+355	Rigonfiamento accelerato (Gv)	

NOTA (*)-Si ricorda che, prima di dare avvio ai lavori e successivamente in corso d'opera occorrerà, in ogni caso, monitorare l'omogeneità delle caratteristiche delle terre estratte e le prestazioni delle miscele con la frequenza prevista nelle Norme Tecniche di esecuzione dei lavori (cfr. Norme Tecniche integrative).

b. Terreni ad alta plasticità ($I_p > 35$)

Sondaggi e localizzazioni	Prove necessarie	Modalità di esecuzione delle prove
NS1-C2, progressiva km 2+900	Studio completo di dosaggio in calce (unico per $IP \cong 60\%$)	Questi studi formalmente analoghi a quelli svolti in laboratorio per le terre mediamente plastiche ($IP = 24 \div 31\%$) della G.A. Favarella, potranno essere ridotti considerando solo 3 contenuti d'acqua e 2 dosaggi in CaO.
NS6-C2, progressiva km 18+580		
NP4, progressiva km 5+140		
NS6-C1, progressiva km 18+580	Studio completo di dosaggio in calce (unico per $IP \cong 40\%$)	Per i terreni molto plastici ($IP \cong 60\%$) dovranno essere verificate le modalità di miscelazione, così da ottenere la finezza richiesta.
NS7-C1 e C2, progressiva km 19+300		

Cod. elab.: 000GE224PT08XRH164A	Titolo: TRATTAMENTO A CALCE Relazione tecnica sullo studio per il reimpiego dei terreni argillosi prodotti dagli scavi mediante trattamento con calce	Data: Aprile 2014
Nome file: 6227 relazione tecnica sullo studio tratt a calce		Pagina 12 di 50

c. Terreni sabbiosi (da trattare con calce o con calce e cemento qualora si preveda l'impiego in strati di sottofondazione della pavimentazione)

Sondaggi e localizzazioni	Prove necessarie	Modalità di esecuzione delle prove
NP6, progressiva km 8+860	Studio completo di trattamento	Di successivo approfondimento, se di interesse
NS3, progressiva km 10+600 (G.N. Papazzo)		
NS4-C1, progressiva km 11+750 (G.A. San Cataldo)		

È da notare che per i terreni rappresentati dal campione NS4-C1 (sabbie limose della G.A. San Cataldo) caratterizzati da un indice di gruppo $IG = 2$, può valutarsi, mediante preliminari prove di portanza di laboratorio, l'opportunità di impiegarli tal quali, senza alcun trattamento, per costituire strati della parte inferiore del rilevato, PIR.

Allo stesso modo si può procedere per i limi sabbiosi del campione NS3 della G.N. Papazzo, con $IG = 4$, che, a discrezione della D.L, possono essere impiegati tal quali negli strati della parte inferiore del rilevato, PIR, prevedendo, tuttavia, opportuni provvedimenti per la difesa dalle acque.

I limi sabbiosi rappresentati dal campione NP6, con $IG = 8$, necessitano, in ogni caso, di preventivo trattamento con calce (per l'impiego in rilevato) o con calce e cemento (per un eventuale impiego in strati di sottofondazione).

d. Terreni che, per vincoli di dosaggio massimo in calce indicati dal CG o per i provvedimenti costruttivi richiesti si reputa di non reimpiegare:

- NP1bis, progressiva km 1+600, per eccessivo contenuto di solfati;
- NP2, progressiva km 2+200, per eccessivo contenuto di solfati;
- NS1-C1 progressiva km 2+900, per eccessivo contenuto di solfati;
- NP7, progressiva km 21+300, con contenuto di solfati relativamente alto.

4.3 PROVE DI FORMULAZIONE DELLE MISCELE TERRA-CALCE

Come detto, lo studio di formulazione delle miscele è stato effettuato sulle terre provenienti dagli scavi della GA Favarella. Considerati i metodi di estrazione del materiale (per scavo frontale), il campione sottoposto alle prove è stato costituito mettendo insieme, in pari proporzioni, le terre provenienti dalle diverse profondità di prelievo del sito NS2 (50% di C1 e 50% di C2).

Cod. elab.: 000GE224PT08XRH164A	Titolo: TRATTAMENTO A CALCE Relazione tecnica sullo studio per il reimpiego dei terreni argillosi prodotti dagli scavi mediante trattamento con calce	Data: Aprile 2014
Nome file: 6227 relazione tecnica sullo studio tratt a calce		Pagina 13 di 50

Lo studio sulle miscele terra-calce per la definizione dei dosaggi in legante da adottare in corso d'opera, in funzione delle caratteristiche di natura dei terreni e del loro contenuto d'acqua al momento di esecuzione dei lavori, è stato basato sulle seguenti prove:

- a. prove di Consumo Iniziale in Calce (CIC), per la definizione del dosaggio minimo in CaO necessario per permettere la completa flocculazione dell'argilla e la solubilizzazione dei suoi componenti chimici. I risultati di tali prove, per tutti i campioni esaminati, sono riportati nella precedente Tabella IV, in uno ai risultati della caratterizzazione geotecnica;
- b. prove di compattabilità **Proctor Normale** per la determinazione dei valori di riferimento utili in fase di costruzione (densità secca massima, γ_{DPN} , per i controlli di addensamento degli strati posti in opera ed umidità minime, w_{min} , richieste alle miscele in fase di costipamento);
- c. prove di portanza di laboratorio, effettuate secondo la norma UNI-EN 13286-47:2006, per la determinazione dell'Indice di Portanza Immediata (IPI) e la verifica dei requisiti prestazionali richiesti in fase di esecuzione dei lavori;
- d. prove di portanza **cbr(4i)** su campioni compattati con modalità Proctor Normale e provati a rottura dopo 4 gg di immersione in acqua (con contestuale lettura del rigonfiamento e determinazione del contenuto d'acqua dei provini immediatamente dopo rottura), per la verifica della stabilità all'acqua e delle possibilità di impiego delle miscele negli strati superiori dei rilevati;
- e. prove di portanza **CBR(7+4i)** su campioni compattati secondo prova Proctor Modificata e che dopo 7 giorni di maturazione in condizioni protette da evapotraspirazione subiscono un periodo di 4 giorni di immersione in acqua. I risultati di tali prove sono stati considerati per valutare le miscele di progetto sulla base dei requisiti indicati dalle Norme Tecniche di Appalto, art. 3.3.1.3.1.

Per le miscela oggetto di studio, per valutare la variazione delle prestazioni fisiche e meccaniche in funzione del dosaggio in calce e delle variazioni del contenuto d'acqua:

- le prove di compattabilità Proctor Normale (b) e quelle di portanza immediata IPI (c) sono state effettuate a tre dosaggi in calce (CaO= 2,0%, 2,8% e 3,5%) ed ai seguenti contenuti d'acqua di riferimento, scelti in un campo di umidità rappresentative di quelle prevedibili in fase di esecuzione dei lavori:

$$w_1 = 15\% \quad w_2 = 18\% \quad w_3 = 20\% \quad w_4 = 22\% \quad w_5 = 25\%$$

- le prove di portanza *cbr(4i)* sono state eseguite agli stessi contenuti d'acqua delle prove di IPI, ma sono state limitate ai due maggiori dosaggi in CaO (2,8% e 3,5%);
- le prove *CBR(7+4i)* sono state effettuate a 3 contenuti d'acqua ($w_2 - w_3 - w_4$ delle prove di IPI) ed ad un dosaggio in calce (2,8%).

Cod. elab.: 000GE224PT08XRH164A	<i>Titolo: TRATTAMENTO A CALCE</i> Relazione tecnica sullo studio per il	Data: Aprile 2014
Nome file: 6227 relazione tecnica sullo studio tratt a calce	reimpiego dei terreni argillosi prodotti dagli scavi mediante trattamento con calce	Pagina 14 di 50

Per le miscele al maggior dosaggio in calce (CaO pari al 3.5%) sono state effettuate altresì prove di Rigonfiamento Volumetrico, *G_v*; secondo UNI EN 13286-49 per contenuti d'acqua pari al 20% ed al 22%.

4.3.1 Prove di compattabilità Proctor Normale e di portanza immediata IPI

I risultati delle prove di costipamento Proctor Normale e di Portanza Immediata IPI, per il campione ottenuto dal sondaggio NS2 (50% C1 + 50% C2) al variare delle umidità ed in funzione dei dosaggi in calce delle miscele, sono riportati nelle **Tabelle da V a VII**.

Si fa rilevare che le seguenti Tabelle riportano sia le umidità iniziali, della sola terra prima della miscelazione con la calce, sia le umidità delle miscele (terra+calce), in corso di costipamento. Gli stessi risultati di prova sono rappresentati nelle successive **Figure da 1 a 4**.

Tabella V - CaO = 2,0% - Risultati delle Prove Proctor e di IPI per il campione NS2 (50% C1 + 50% C2)

UMIDITÀ	w:	1	2	3	4	5
	di riferimento (%)	15	18	20	22	25
	effettiva iniziale (sola terra) (%)	17.3	20.6	21.4	25.0	26.9
	di costipamento (terra+calce) (%)	15.8	18.3	20.4	21.9	24.1
Massa volumica secca γ_d	[kg/m ³]	1485	1502	1489	1480	1517
Indice di Portanza Immediata	IPI (%)	26	24	23	21	17

Cod. elab.: 000GE224PT08XRH164A	Titolo: TRATTAMENTO A CALCE Relazione tecnica sullo studio per il reimpiego dei terreni argillosi prodotti dagli scavi mediante trattamento con calce	Data: Aprile 2014
Nome file: 6227 relazione tecnica sullo studio tratt a calce		Pagina 15 di 50

Tabella VI - CaO = 2,8% - Risultati delle Prove Proctor e di IPI per il campione NS2 (50% C1 + 50% C2)

UMIDITÀ	w:	1	2	3	4	5
di riferimento (%)		15	18	20	22	25
iniziale (%)		16.7	19.0	21.0	21.4	26.4
di costipamento (%)		15.0	18.0	19.1	21.0	24.4
Massa volumica secca γ_d [kg/m ³]		1465	1472	1481	1483	1459
Indice di Portanza Immediata IPI (%)		41	26	29	28	19

Tabella VII -- CaO = 3,5% - Risultati delle Prove Proctor e di IPI per il campione NS2 (50% C1 + 50% C2)

UMIDITÀ	w:	1	2	3	4	5
di riferimento (%)		15	18	20	22	25
iniziale (%)		16.5	19	21.3	22.1	26.2
di costipamento (%)		14.4	17.3	19.0	20.5	22.8
Massa volumica secca γ_d [kg/m ³]		1437	1466	1477	1479	1464
Indice di Portanza Immediata IPI (%)		30	24	35	25	23

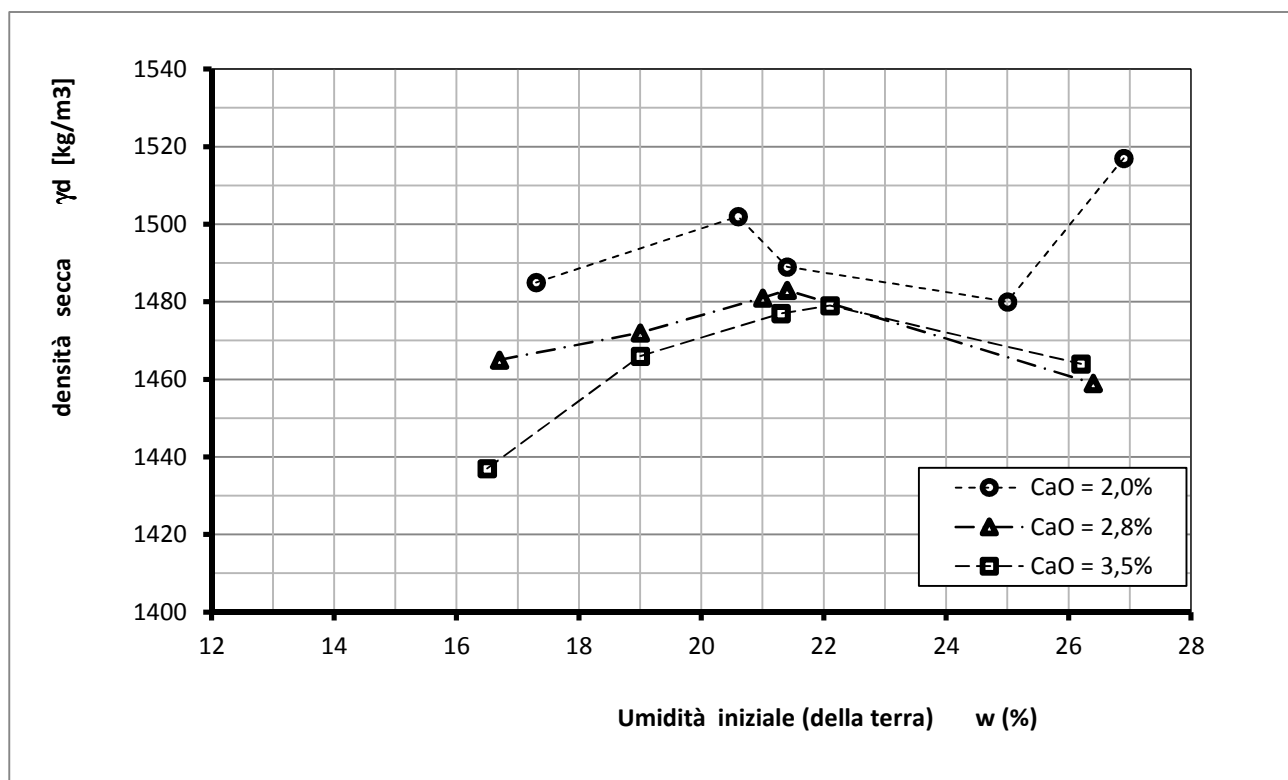


Figura 1 – Risultati delle prove di addensamento Proctor Normale, al variare del dosaggio in calce e dell'umidità presente nella terra, prima dell'aggiunta della calce

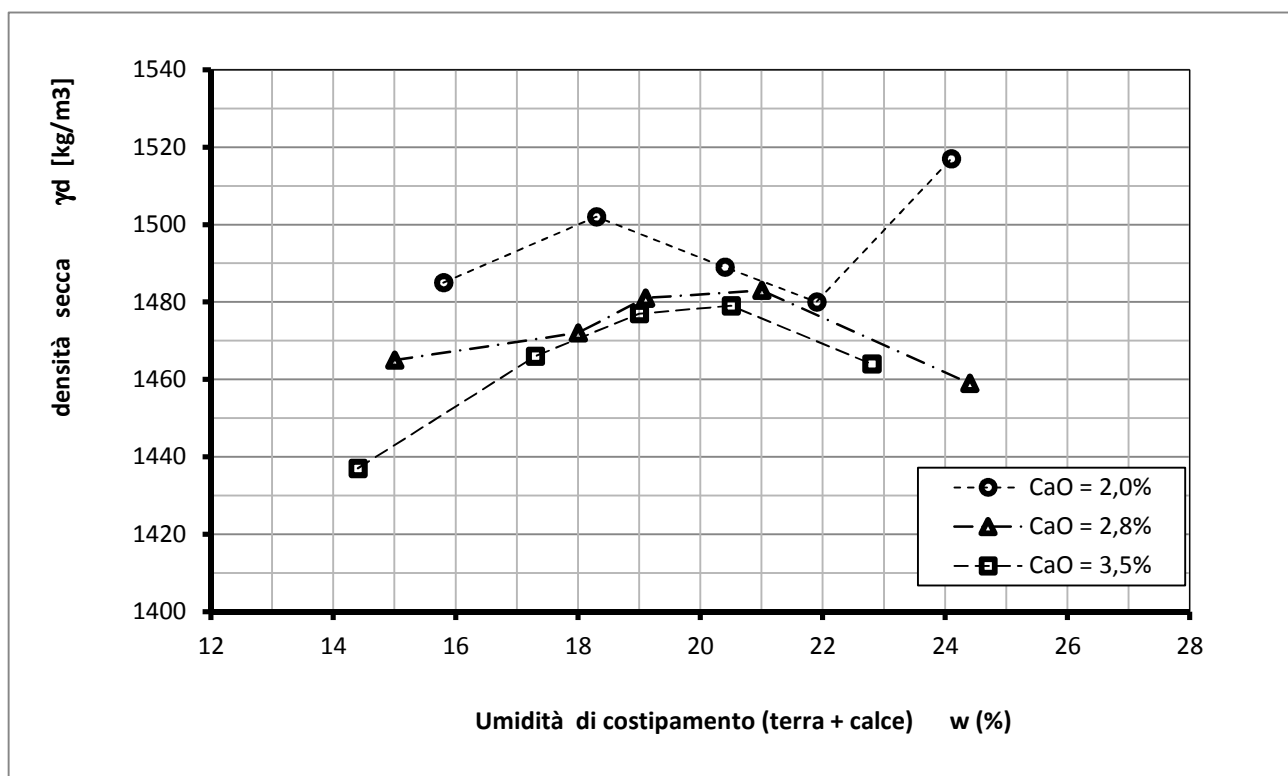


Figura 2 – Risultati delle prove di addensamento Proctor Normale, al variare del dosaggio in calce e dell'umidità di costipamento delle miscele terra-calce

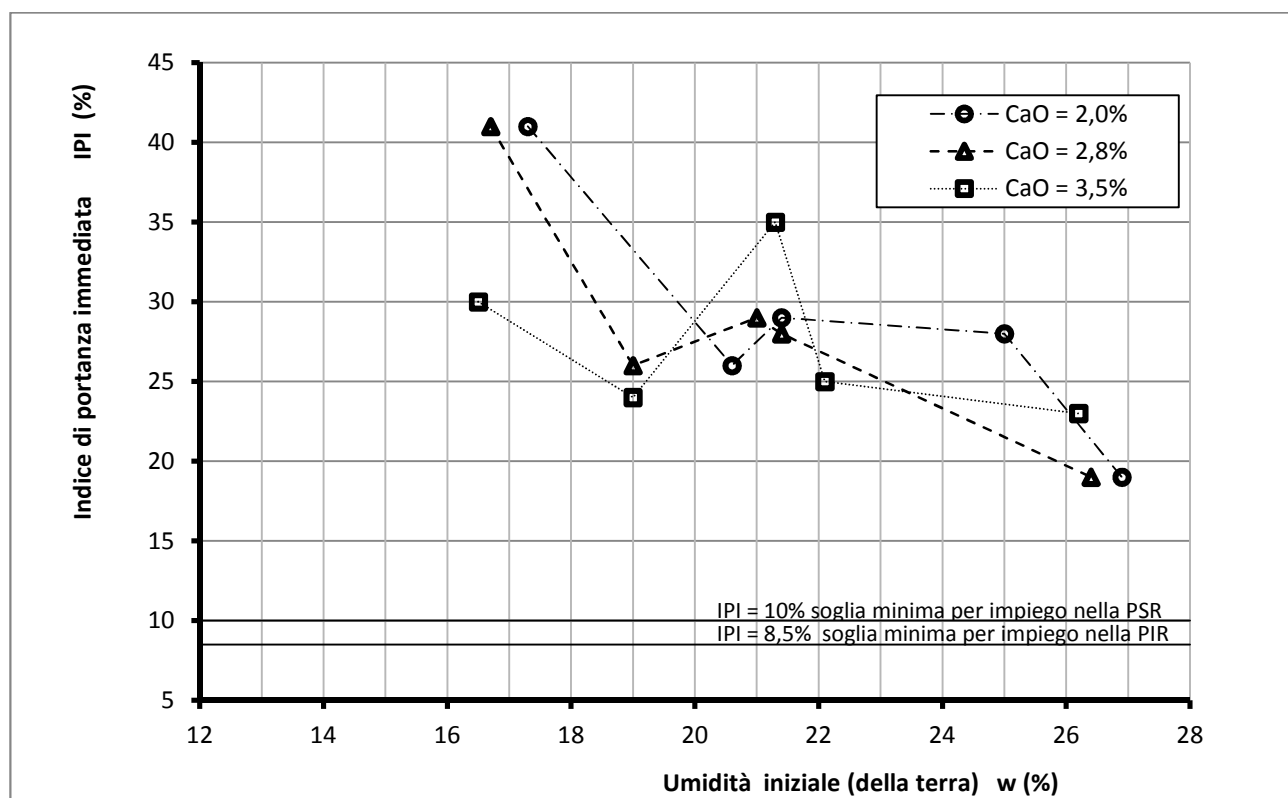


Figura 3 – Risultati delle prove di portanza immediata, IPI, al variare del dosaggio in calce e dell'umidità presente nella terra, prima dell'aggiunta della calce

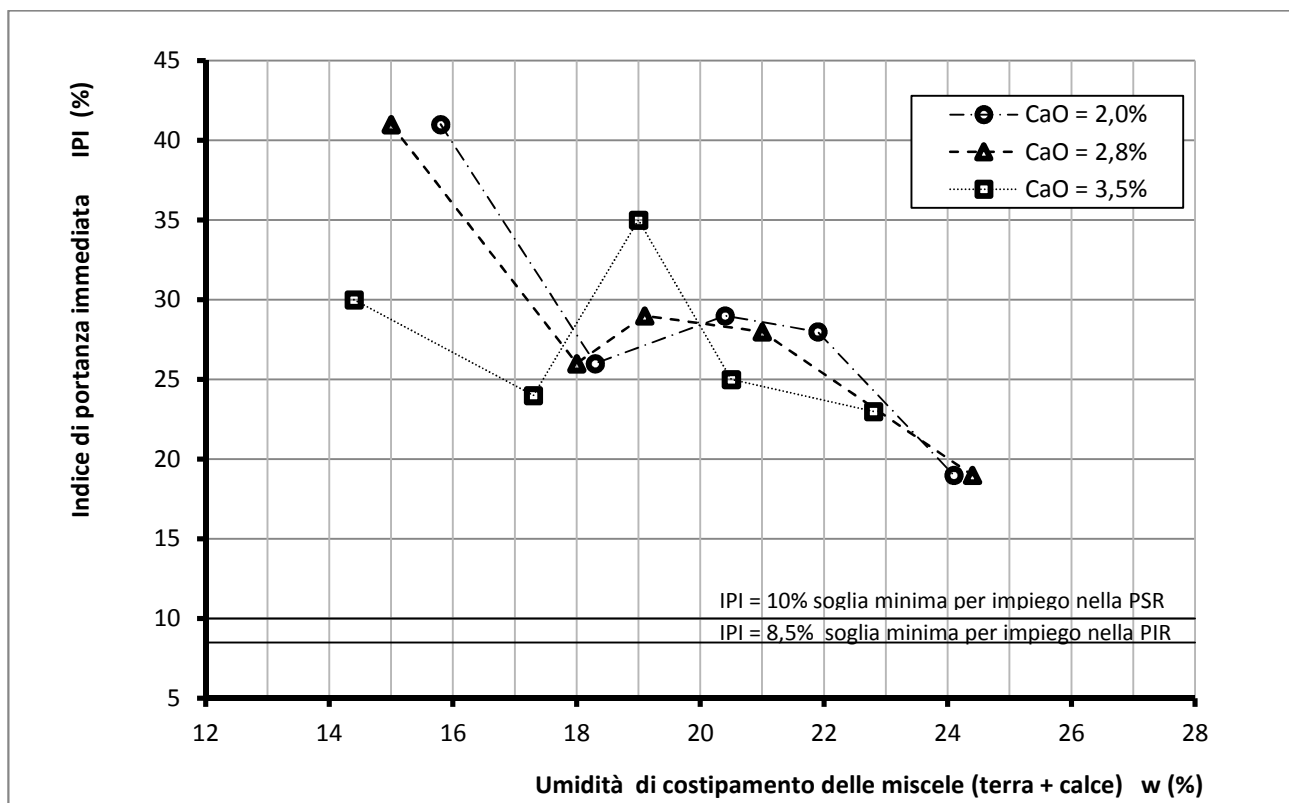


Figura 4 – Risultati delle prove di portanza immediata, IPI, al variare del dosaggio in calce e dell'umidità di costipamento delle miscele terra-calce

Nelle Figure 1 e 3, i risultati delle prove di addensamento Proctor e di portanza IPI, rispettivamente, sono dati in funzione dell'umidità presente nella terra prima dell'aggiunta della calce; ciò per ottenere un immediato riferimento, in fase di esecuzione dei lavori, dato che i controlli di umidità effettuati in cantiere per valutare la necessità o meno di umidificazione, per rispettare i contenuti d'acqua minimi richiesti alle miscele, vengono effettuati sulla terra, prima dell'aggiunta della calce.

Nelle Figure 2 e 4, gli stessi risultati sono dati, invece, in funzione dell'umidità delle miscele in fase di costipamento. Oltre ad evidenziare la riduzione di umidità causata dall'aggiunta della calce, esse permettono di determinare il contenuto d'acqua minimo, w_{MIN} , che deve essere presente nella miscela perché si abbia la flocculazione dell'argilla, l'idratazione dei composti che danno luogo alle reazioni pozzolaniche ed allo sviluppo delle prestazioni meccaniche nel tempo. Tale umidità minima viene posta pari a $w_{MIN} = 0,9 w_{OPN}$, cioè al 90% dell'umidità ottimale di costipamento Proctor Normale delle miscele. I valori di w_{MIN} così determinati, in relazione ai dosaggi in calce delle miscele, sono riportati in **Tabella VIII**.

Cod. elab.: 000GE224PT08XRH164A	Titolo: TRATTAMENTO A CALCE Relazione tecnica sullo studio per il reimpiego dei terreni argillosi prodotti dagli scavi mediante trattamento con calce	Data: Aprile 2014
Nome file: 6227 relazione tecnica sullo studio tratt a calce		Pagina 18 di 50

Tabella VIII – Risultati dello studio Proctor Normale ed umidità minime di riferimento

Dosaggio in calce CaO [%]	Densità secca massima γ_{OPN} [km/m ³]	Umidità ottimale w_{OPN} [%]	Umidità minime di riferimento w_{min} [%]	
			in miscela	nella terra
2,0	1505	18,5	16,5	18,5
2,8	1485	20,0	18,0	20,0
3,5	1480	20,5	18,5	20,5

4.3.2 Prove di portanza cbr(4i) – Studio di tenuta all'acqua delle miscele

Queste prove, analoghe alle precedenti di portanza immediata IPI, sono effettuate su campioni compattati con modalità Proctor Normale ma, in questo caso, sottoposti a rottura dopo 4 giorni di immersione in acqua. Nel periodo di immersione è stato rilevato pure il rigonfiamento del campione. I risultati di prova, al variare delle umidità ed in funzione dei dosaggi in calce, in questo caso 2,8% e 3,0%, sono riportati nelle **Tabelle IX e X**.

La tenuta all'acqua delle miscele è valutata positivamente se, per le miscele di pari dosaggio in calce e contenuto d'acqua risulta soddisfatta la relazione (1):

$$cbr(4i) > IPI \quad (1)$$

Tabella IX – Terreno NS2 + CaO = 2,8% - Risultati delle Prove di portanza cbr(4i), dopo immersione in acqua

UMIDITÀ	w	1	2	3	4	5
di riferimento (%)		15	18	20	22	25
iniziale (%)		16.0	18.9	23.0	24.0	27.8
di costipamento (%)		15.5	17.5	18.9	20.4	24.4
dopo rottura cbr (%)		25.7	26.2	26.4	27.5	29.3
Assorbimento d'acqua Δw (%)		10.2	8.7	7.5	7.1	4.9
Rigonfiamento percentuale(%)		1.57	1.56	0.97	1.05	1.65
Massa volumica secca γ_d [kg/m ³]		1467	1476	1482	1485	1464
Indice di Portanza cbr(4i) (%)		26	25	33	31	30
Rigonfiamento (mm)	dopo 3 ore	1.24	0.64	0.32	0.26	0.16
	dopo 24 ore	1.36	0.73	0.43	0.38	0.33
	dopo 48 ore	1.54	1.17	0.76	0.82	0.53
	dopo 72 ore	1.73	1.54	1.00	1.06	0.73
	dopo 96 ore	1.83	1.81	1.13	1.22	1.92

Tabella X – Terreno NS2 + CaO = 3,5% - Risultati delle Prove di portanza cbr(4i), dopo immersione in acqua

UMIDITÀ	w	1	2	3	4	5
di riferimento (%)		15	18	20	22	25
iniziale (%)		15.8	21.7	21.3	25.2	29.7
di costipamento (%)		14.2	16.6	18.0	20.5	22.9
dopo rottura (%)		28.4	27.7	27.3	27.4	28.1

Cod. elab.: 000GE224PT08XRH164A	Titolo: TRATTAMENTO A CALCE Relazione tecnica sullo studio per il reimpiego dei terreni argillosi prodotti dagli scavi mediante trattamento con calce	Data: Aprile 2014
Nome file: 6227 relazione tecnica sullo studio tratt a calce		Pagina 19 di 50

Assorbimento d'acqua Δw (%)	14.2	11.1	9.3	6.9	5.2
Rigonfiamento percentuale (%)	2.75	1.88	1.04	1.25	1.55
Massa volumica secca γ_d [kg/m ³]	1440	1474	1496	1493	1481
Indice di Portanza cbr(4i) (%)	16	26	32	29	39
Rigonfiamento (mm)					
dopo 3 ore	2.19	1.18	0.40	0.44	0.15
dopo 24 ore	2.35	1.35	0.60	0.80	0.35
dopo 48 ore	2.66	1.66	0.81	1.05	0.55
dopo 72 ore	2.97	2.00	1.02	1.34	0.70
dopo 96 ore	3.20	2.18	1.21	1.45	1.50

Per una migliore lettura delle variazioni di portanza in condizioni standard di immersione in acqua (4 giorni), i risultati dello studio di stabilità all'acqua sono pure riportati nelle successive **Figure 5 e 6**, dove, per i due dosaggi in calce considerati, le caratteristiche di addensamento e di portanza sono diagrammate in funzione dell'umidità di costipamento delle miscele.

Le **Figure 7 e 8** forniscono, invece, la rappresentazione dell'evoluzione del rigonfiamento CBR nel periodo di immersione in acqua dei campioni da sottoporre a prove di portanza, per i due dosaggi in calce considerati. In tali figure, le curve a tratteggio si riferiscono a miscele con un contenuto d'acqua inferiore a quello minimo da considerare in fase di esecuzione dei lavori e specificato nella precedente Tabella VIII.

Le **Figure 9 e 10**, infine, forniscono il confronto tra la portanza immediata, IPI, e quella offerta dalle miscele di pari composizione dopo 4 giorni di immersione in acqua, **cbr(4i)**, per i due dosaggi esplorati. In entrambe le Figure è messo in evidenza il campo di umidità, superiori a quella minima di Tabella VIII, per il quale risulta soddisfatta la relazione (1).

Cod. elab.: 000GE224PT08XRH164A	Titolo: TRATTAMENTO A CALCE Relazione tecnica sullo studio per il reimpiego dei terreni argillosi prodotti dagli scavi mediante trattamento con calce	Data: Aprile 2014
Nome file: 6227 relazione tecnica sullo studio tratt a calce		Pagina 20 di 50

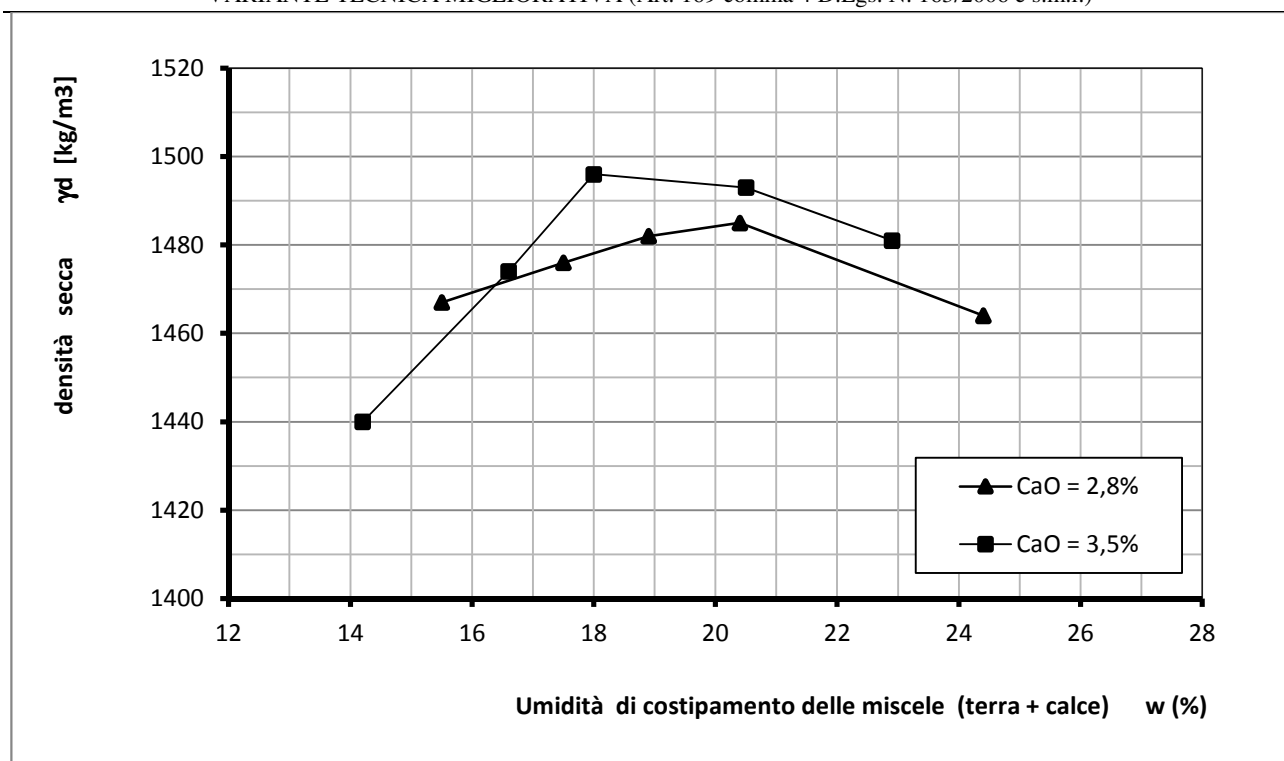


Figura 5 – Risultati delle prove di addensamento Proctor Normale, al variare dei dosaggi in calce e dell'umidità di costipamento delle miscele terra-calce, condotte sui campioni per prove cbr(4i)

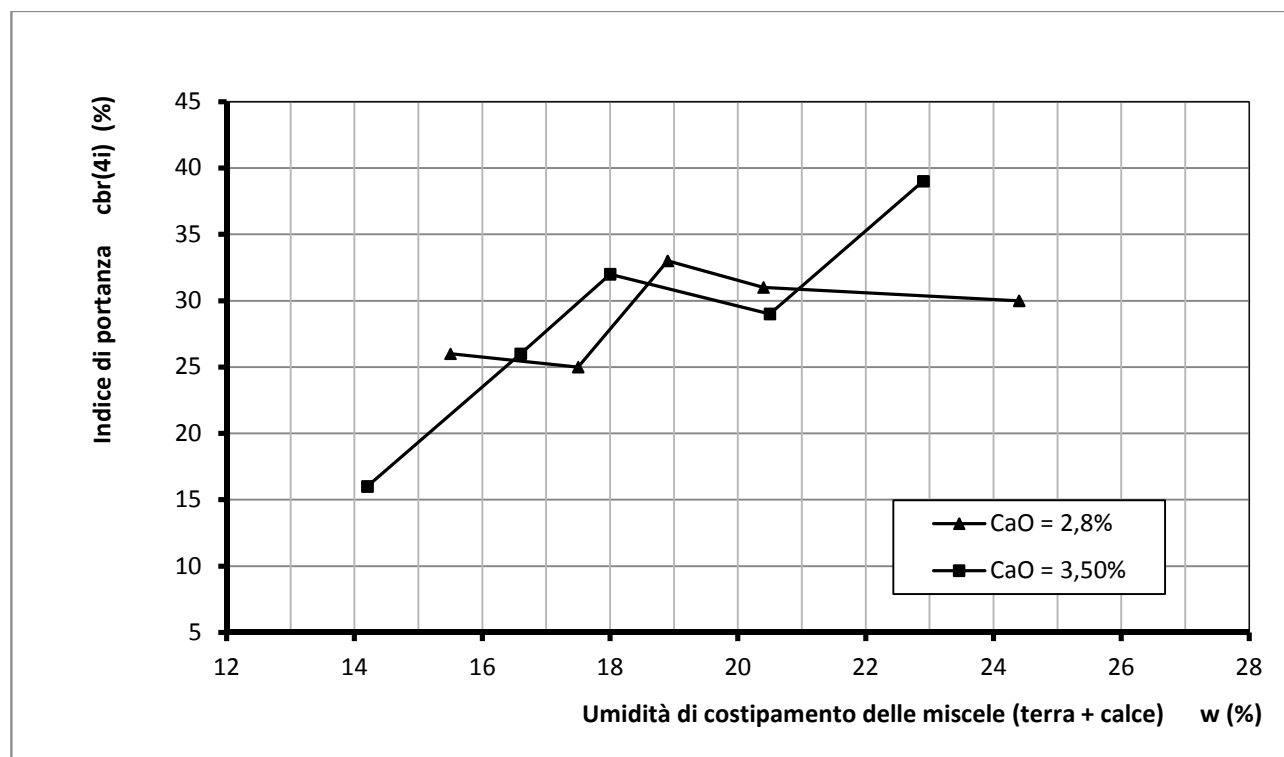


Figura 6 – Risultati delle prove di portanza cbr(4i), dopo 4 giorni di immersione in acqua, al variare dei dosaggi in calce e dell'umidità di costipamento delle miscele terra-calce

Cod. elab.: 000GE224PT08XRH164A	Titolo: TRATTAMENTO A CALCE Relazione tecnica sullo studio per il reimpiego dei terreni argillosi prodotti dagli scavi mediante trattamento con calce	Data: Aprile 2014
Nome file: 6227 relazione tecnica sullo studio tratt a calce		Pagina 21 di 50

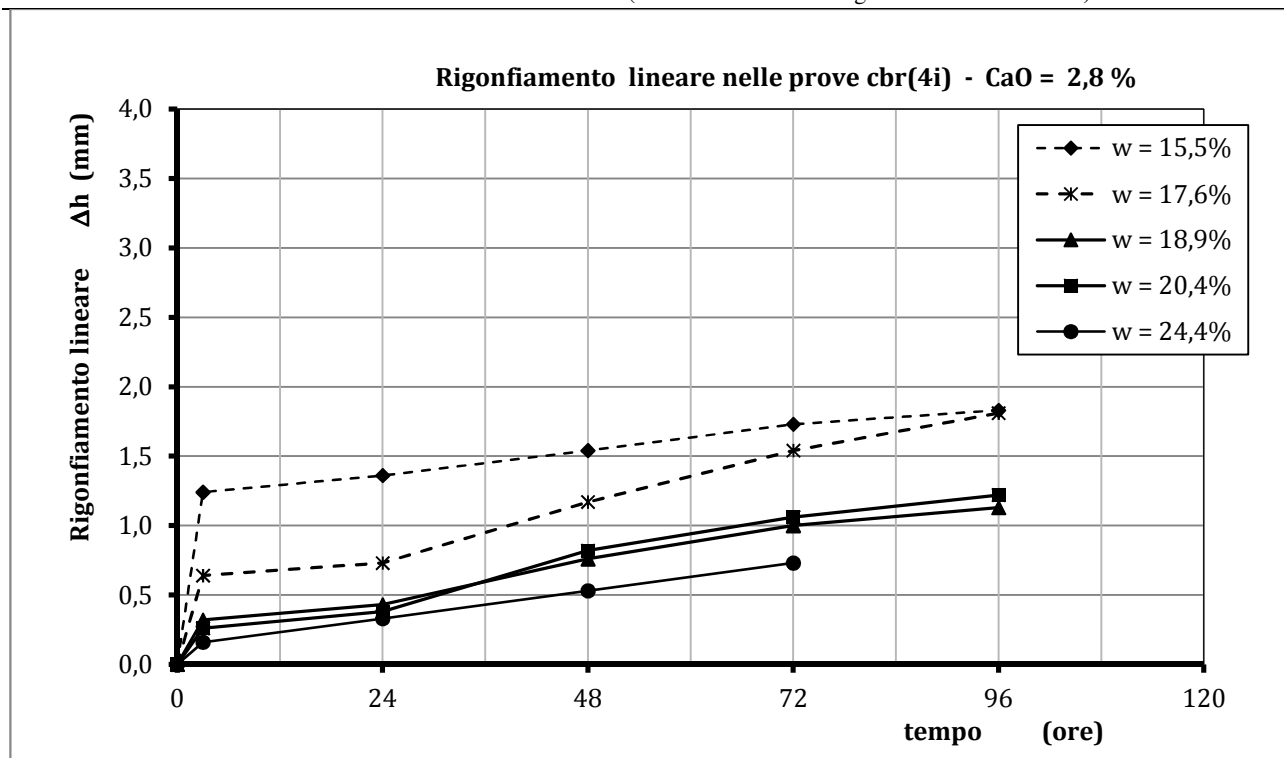


Figura 7 - Risultati delle prove di rigonfiamento nel corso delle prove cbr(4i) in funzione dell'umidità di costipamento delle miscele (CaO = 2,8%)

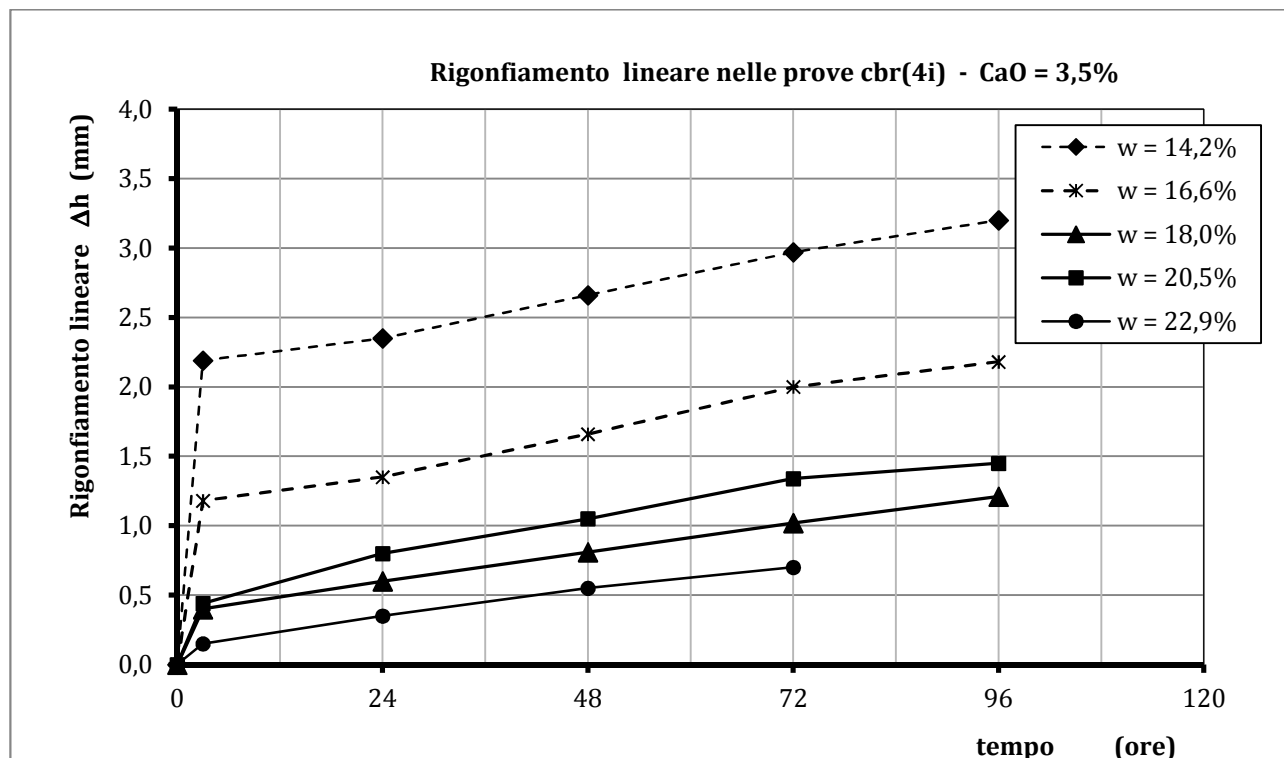


Figura 8 - Risultati delle prove di rigonfiamento nel corso delle prove cbr(4i) in funzione dell'umidità di costipamento delle miscele (CaO = 3,5%)

Cod. elab.: 000GE224PT08XRH164A	Titolo: TRATTAMENTO A CALCE Relazione tecnica sullo studio per il reimpiego dei terreni argillosi prodotti dagli scavi mediante trattamento con calce	Data: Aprile 2014
Nome file: 6227 relazione tecnica sullo studio tratt a calce		Pagina 22 di 50

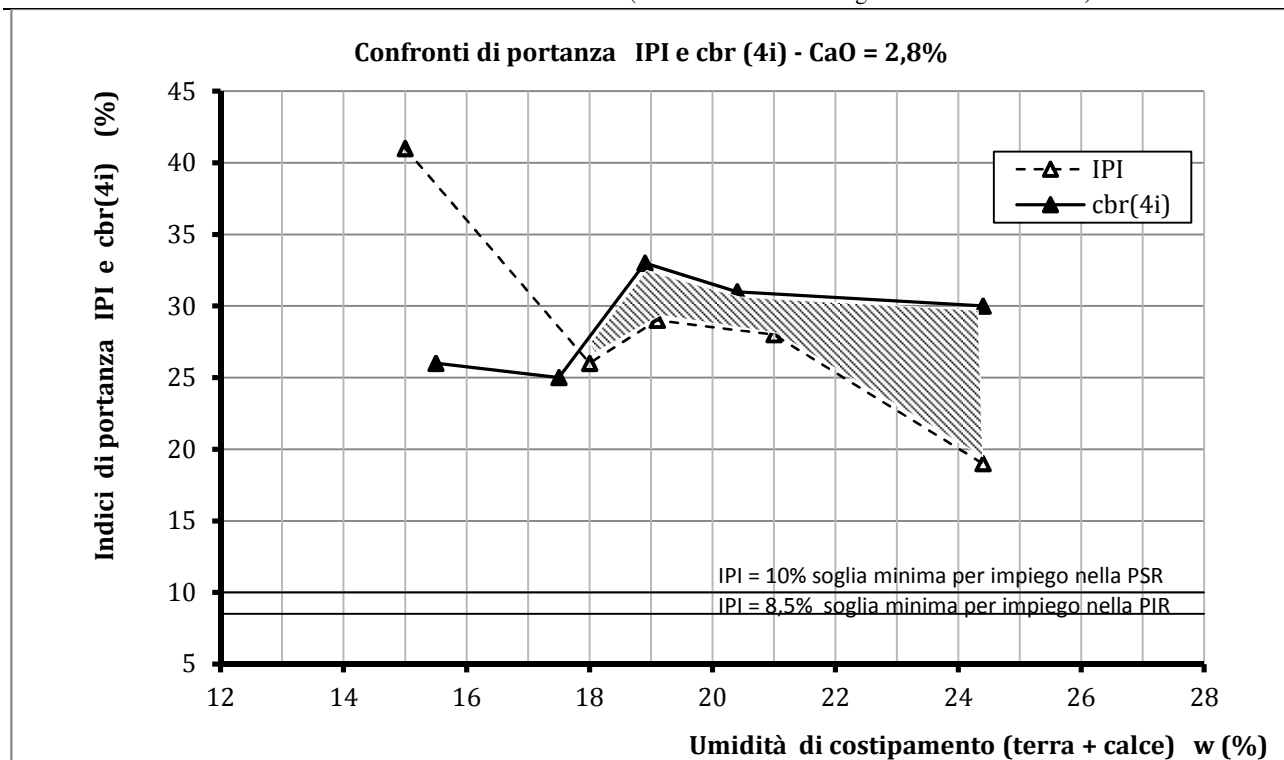


Figura 9 – Confronto tra i risultati delle prove di portanza IPI e cbr(4i), al variare e dell'umidità di costipamento delle miscele terra-calce (CaO = 2,8 %)

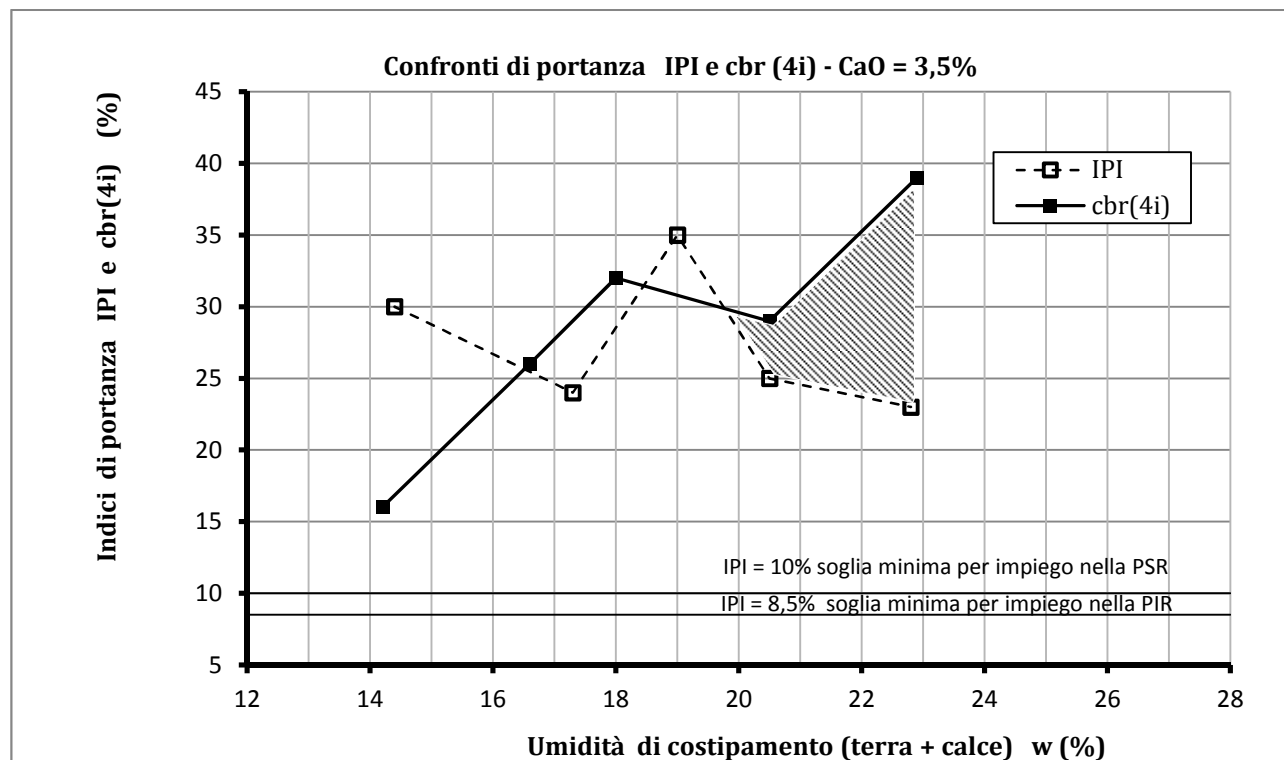


Figura 10 – Confronto tra i risultati delle prove di portanza IPI e cbr(4i), al variare e dell'umidità di costipamento delle miscele terra-calce (CaO = 3,5 %)

Cod. elab.: 000GE224PT08XRH164A	Titolo: TRATTAMENTO A CALCE Relazione tecnica sullo studio per il reimpiego dei terreni argillosi prodotti dagli scavi mediante trattamento con calce	Data: Aprile 2014
Nome file: 6227 relazione tecnica sullo studio tratt a calce		Pagina 23 di 50

Nonostante i terreni provenienti dalla G.A. Favarella presentassero un contenuto di solfati e solfuri inferiore allo 0,25% (quindi, ben minore dell'1%, soglia considerata accettabile dalle N.T. di Appalto riguardo ai rischi di rigonfiamento delle miscele per formazione di specie espansive), sulle miscele al maggior dosaggio in calce (CaO pari al 3,5%), è parso opportuno effettuare altresì prove accelerate di Rigonfiamento Volumetrico (Gv) secondo UNI EN 13286-49, per contenuti d'acqua pari al 20% ed al 22%. I risultati ottenuti sono riportati in **Tabella XI** ed evidenziano che, per le miscele considerate può essere previsto un impiego in strati di rilevato (Gv < 10%), ma non in strato di sottofondazione, risultando Gv > 5%, anche se in modesta misura.

Tabella XI - CaO = 3,5% - Risultati delle prove di rigonfiamento volumetrico, Gv (UNI EN 13286-49)

Campione	Gv (%)	
	w = 20%	w = 22%
1	5,34	1,95
2	8,15	7,39
3	7,22	5,68
Media	6,9	5,0

In relazione agli impieghi previsti per le miscele terra-calce e sulla base dei criteri specificati in precedenza (cfr. Tab. II), l'esame complessivo dei risultati dello studio di formulazione porta a concludere che:

- a) per l'impiego in strati di rilevato posti a più di 1,50 m dal piano di sottofondo (PIR), le miscele formulate soddisfano largamente i requisiti di portanza necessari (IPI > 8,5), per tutti i dosaggi in calce e per l'intero range di umidità considerate, anche per umidità superiori al contenuto d'acqua naturale riscontrato per le terre in sito ed anche al loro limite di plasticità, LP. Ciononostante, il dosaggio in calce determinato tramite il CIC, mediamente pari a circa il 2%, deve ritenersi un minimo assoluto al di sotto del quale non scendere perché non sarebbero altrimenti garantite le condizioni di pH del mezzo necessarie per la solubilizzazione dei costituenti chimici dell'argilla e lo sviluppo delle reazioni pozzolaniche;
- b) per l'impiego in strati di rilevato posti a meno di 1,50 m dal piano di sottofondo (PSR), il dosaggio in CaO del 2,8% deve ritenersi ampiamente soddisfacente, sia con riferimento ai requisiti di portanza e di tenuta all'acqua richiesti per questi strati (IPI > 10 e cbr(4i) > IPI), sia per garantire, anche nel caso di derive e di dispersioni di cantiere, lo sviluppo delle prestazioni meccaniche di lungo termine necessarie, considerata la posizione di questi strati, abbastanza prossima alla pavimentazione;

Cod. elab.: 000GE224PT08XRH164A	Titolo: TRATTAMENTO A CALCE Relazione tecnica sullo studio per il reimpiego dei terreni argillosi prodotti dagli scavi mediante trattamento con calce	Data: Aprile 2014
Nome file: 6227 relazione tecnica sullo studio tratt a calce		Pagina 24 di 50

c) per l'impiego in strati di sottofondazione, le prestazioni meccaniche riscontrate sulle miscele ai due dosaggi in calce esaminati (2,8 e 3,5%) risultano superiori ai requisiti richiesti per tale destinazione d'uso delle miscele: $IPI > 15$ e $cbr(4i) > IPI$, per miscele confezionate con umidità non inferiori al contenuto d'acqua minimo. Tuttavia, considerati i valori di Rigonfiamento Volumetrico, G_v , è da escludersi l'impiego di tali miscele nello strato posto immediatamente al di sotto della pavimentazione. D'altra parte, i valori di rigonfiamento CBR misurati avrebbero posto la necessità di proteggere dalle venute d'acqua lo strato di sottofondazione con idonei provvedimenti, ad esempio mediante impermeabilizzazione con emulsione bituminosa saturata da sabbia. Considerazioni di carattere economico da parte del CG portano a confermare, per tale strato la soluzione di progetto, ossia la realizzazione degli strati di sottofondazione con tout-venant di cava (A1a).

4.3.3 Prove di portanza CBR(7+4i)

Tali prove sono state effettuate su miscele contenenti il 2,8% di CaO, compattate ad alta energia, secondo prova Proctor Modificata, e maturate per 7 giorni in condizioni protette da evapotraspirazione all'aria, seguiti da 4 giorni di immersione in acqua. I risultati ottenuti dalle prove di rottura sono riportati di seguito, nella **Tabella XII**, nella quale è pure riportata l'evoluzione nel tempo del rigonfiamento lineare CBR, misurato durante i 4 giorni di immersione.

Tabella XII - CaO = 2,8% - Risultati delle prove di portanza CBR(7+4i)

UMIDITÀ	w	1	2	3
	di riferimento (%)	18	20	23
	iniziale (%)	18.6	20.5	23.7
	di costipamento (%)	17.2	19.6	21.8
	dopo rottura CBR(%)	19.0	20.9	21.1
Massa volumica secca	γ_d [kg/m ³]	1733	1702	1690
Indice di Portanza	CBR(7+4i) (%)	125	120	52
Rigonfiamento (mm)	dopo 24 ore	1.00	1.03	0.25
	dopo 48 ore	1.04	1.10	0.26
	dopo 72 ore	1.05	1.12	0.27
	dopo 96 ore	1.06	1.13	0.28
	Rigonfiamento lineare CBR: G_L (%)	0,91	0,97	0,28

Cod. elab.: 000GE224PT08XRH164A	Titolo: TRATTAMENTO A CALCE Relazione tecnica sullo studio per il reimpiego dei terreni argillosi prodotti dagli scavi mediante trattamento con calce	Data: Aprile 2014
Nome file: 6227 relazione tecnica sullo studio tratt a calce		Pagina 25 di 50

Dai valori in tabella si osserva che le miscele indagate, anche al variare del contenuto d'acqua all'interno del range di quelli prevedibili in cantiere, rispettano ampiamente i requisiti del Capitolato ANAS (valori minimi di CBR, all'umidità ottima di costipamento e rigonfiamento, GL), riepilogati in Tabella XIII, sia per l'impiego in strati di rilevato (parte superiore e inferiore), sia anche per l'impiego in strati di sottofondazione della pavimentazione stradale.

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

	CBR(7+4i) (%)	G_L (%)	Md (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
Strati di sottofondazione	> 60	< 1,0	> 50

I criteri di progetto adottati nel presente studio risultano, quindi, più cautelativi rispetto a quelli considerati nelle Norme Tecniche di Appalto (art. 3.3.1.3.1) cosa peraltro evidenziata dagli alti valori di modulo Md misurati nel corso delle prove di campo, come appresso riferito.

Cod. elab.: 000GE224PT08XRH164A	<i>Titolo: TRATTAMENTO A CALCE</i> Relazione tecnica sullo studio per il	<i>Data: Aprile 2014</i>
<i>Nome file: 6227 relazione tecnica sullo studio tratt a calce</i>	reimpiego dei terreni argillosi prodotti dagli scavi mediante trattamento con calce	<i>Pagina 26 di 50</i>

5. STUDI E PROVE DI CAMPO

Con la Direzione dei Lavori ed il Contraente Generale Empedocle 2 si è concordato di realizzare una prova di campo atta a valutare le modalità operative per l'impiego in rilevato delle terre fini provenienti dagli scavi della Galleria Favarella, previo trattamento con calce.

Definite le modalità di trattamento dagli esiti degli studi di laboratorio (dosaggi in calce ed umidità minime delle miscele), si è progettata la realizzazione di un rilevato sperimentale, di seguito dettagliato, localizzato lungo il tracciato di progetto delle opere da eseguire, impiegando la calce considerata nello studio preliminare di laboratorio e che effettivamente verrà utilizzata per la successiva realizzazione delle opere.

5.1 Finalità degli studi e delle prove di campo

La tecnica della stabilizzazione con calce (o con calce e cemento) dei terreni argillosi, per essere applicata secondo le attuali regole dell'arte, oltre ad essere fondata su idonei studi di progetto delle miscele, a livello esecutivo richiede:

- attrezzature e macchine specifiche, con prestazioni adeguate alle finalità del trattamento;
- metodi appropriati nell'esecuzione e nel controllo di qualità dei lavori.

L'obiettivo è stato quello di verificare, in primo luogo, che i processi costruttivi proposti dall'Impresa esecutrice dei lavori fossero in grado di soddisfare i requisiti di qualità richiesti per la realizzazione di rilevati in terra trattata con calce e, per quanto qui interessa, la realizzazione della base di appoggio (fondazione), della parte inferiore del rilevato (PIR) e della parte superiore dello stesso (PSR).

Inoltre, laddove nel corso della verifica si è evidenziata la possibilità di migliorare la produzione dei mezzi di cantiere, mediante maggiorazione dello spessore degli strati - fermi restando il numero di passate Nm della miscelatrice ed il numero di passate Nc del compattatore - si è ottimizzato il processo considerando strati di maggiore spessore rispetto quelli inizialmente previsti (da 30÷35 cm a circa 35÷40 cm).

Nello specifico, lo studio di campo, che è stato svolto tra l'ultima decade di agosto e la prima di settembre del 2012, ha inteso:

- valutare, in primo luogo, l'idoneità delle macchine e delle attrezzature rese disponibili per l'esecuzione dei lavori;
- mettere a punto i processi produttivi sulla base delle prove di campo allo scopo predisposte, definendo, per ogni operazione elementare in cui si articola la tecnica, le corrette modalità di esecuzione (le regole dell'arte, per il caso specifico,);
- stabilire, sulla base delle risultanze delle prove di campo condotte, un idoneo sistema di gestione in qualità dei lavori da assumere a riferimento nelle Norme Tecniche di Esecuzione dei lavori (cfr. elaborato allegato).

Cod. elab.: 000GE224PT08XRH164A	<i>Titolo: TRATTAMENTO A CALCE</i> Relazione tecnica sullo studio per il	Data: Aprile 2014
Nome file: 6227 relazione tecnica sullo studio tratt a calce	reimpiego dei terreni argillosi prodotti dagli scavi mediante trattamento con calce	Pagina 27 di 50

5.2. OPERAZIONI ELEMENTARI E MODALITÀ ESECUTIVE SELEZIONATE

Nel seguito vengono descritte le operazioni elementari del trattamento, le attrezzature impiegate, le caratteristiche controllate e le modalità di esecuzione selezionate.

Le variabili prese in considerazione durante la sperimentazione di campo, sia per ottimizzare il processo, sia per simulare possibili dispersioni di cantiere che possono poi riscontrarsi in corso d'opera, sono state:

- il contenuto d'acqua della terra, che si è fatto variare tra l'umidità minima ed il maggiore tra il contenuto naturale d'acqua dei terreni ed il limite di plasticità (LP);
- il dosaggio in calce, posto pari al 2%, per gli strati inferiori del rilevato e per la bonifica del piano di posa, ed al 2,8% per la parte superiore del rilevato;
- lo spessore di stesa, fatto variare in fase di ottimizzazione da 30 a 40 cm circa;
- il numero di passate della miscelatrice, per valutare la sua incidenza sulla granulometria finale delle miscele;
- le modalità di costipamento (numero di passate, ampiezza della vibrazione).

Preparazione del terreno – Per le terre destinate agli strati di rilevato (strati riportati) tale operazione ha previsto: l'estrazione frontale del materiale in cava, il trasporto nel sito di impiego, la stesa in strati di spessore adeguato e, ove necessario, un passaggio di fresa per lo sminuzzamento delle zolle. L'estrazione frontale garantisce, soprattutto in periodi di forte evapotraspirazione, ogni perdita di umidità, considerato che quella riscontrata nei terreni in situ rientra già nel campo delle umidità convenienti per la miscelazione. La regolazione degli strati in spessore costante, operazione fondamentale per garantire l'omogeneità delle miscele, in questo caso, deve essere realizzata con grader. Allo scopo si è utilizzato il Motor Grader 120M AWD della CAT munito di strumentazione GPS che, come verificato mediante rilievo topografico, permette di ottenere lo spessore impostato con ridotte dispersioni. Si è avuto modo di osservare, inoltre, che, in relazione alla variabilità dei terreni approvvigionati, un leggero passaggio di rullo favorisce la regolarità di spandimento della calce ed il grado di polverizzazione delle miscele. Per il trattamento in situ, considerato nella bonifica del piano di posa dei rilevati, ove non si renda necessario uno spietramento, come nel caso in studio, non occorre preliminare preparazione del terreno ma, considerate le prestazioni della fresa impiegata (appresso mostrata in **Figura 11**), la calce può essere sparsa direttamente sulla superficie dello strato, per essere successivamente miscelata alla terra.

Cod. elab.: 000GE224PT08XRH164A	Titolo: TRATTAMENTO A CALCE Relazione tecnica sullo studio per il reimpiego dei terreni argillosi prodotti dagli scavi mediante trattamento con calce	Data: Aprile 2014
Nome file: 6227 relazione tecnica sullo studio tratt a calce		Pagina 28 di 50



Figura 11 – Attrezzature per la stesa e la miscelazione della terra

Controllo di umidità ed eventuale umidificazione della terra - Si tratta di un'operazione indispensabile per la corretta esecuzione dei lavori in terra-calce, quando, per condizioni di stato idrico dei terreni di scavo e/o per condizioni climatiche di forte evapotraspirazione (come si è avuto durante il periodo di realizzazione del campo prove), il contenuto d'acqua delle miscele può risultare inferiore a quello minimo richiesto per il loro corretto costipamento e per lo sviluppo dei processi pozzolanici (cfr. Tabella VIII e § 4.3.1). Nel caso della prova di campo condotta, anche quando non strettamente necessario, volendo anticipare condizioni prevedibili in periodo invernale, si è provveduto ad umidificare ulteriormente la terra, realizzando, per uno stesso strato, alcune strisciate con forte aggiunta d'acqua, per esplorare la risposta del materiale in un ampio campo di contenuti d'acqua possibili.

In termini generali, va considerato che tutte le volte in cui occorre incrementare il tenore in acqua di oltre il 3% è necessario, a livello esecutivo, che la somministrazione d'acqua avvenga con gradualità, prevedendo sequenze successive nel corso della miscelazione e considerando tempi di attesa tra due sequenze sufficientemente ampi (da 2 a 3 ore, per le argille in esame). Considerato che l'umidificazione è avvenuta in fase di miscelazione della terra con la calce, la maggiore quantità di acqua di apporto (fino al 3%) è stata somministrata al primo passaggio delle fresa; eventuali ulteriori quantità sono state apportate nei successivi passaggi.

Si fa notare che, al fine di rispettare i contenuti d'acqua minimi degli studi di laboratorio (Tab. VIII, per la terra in esame), il controllo di umidità della terra va effettuato sulla stessa prima della miscelazione con la calce.

Spandimento della calce - Si è impiegato, per questa fase, lo Spandilegante SW 16 MC della Strew Master a 3 segmenti spanditori da 82 cm di larghezza, dotato di computer di bordo per il settaggio ed il monitoraggio della quantità effettiva di legante sparsa, in kg/m². Preliminarmente, si è effettuata la verifica della taratura della macchina tramite la

Cod. elab.: 000GE224PT08XRH164A	Titolo: TRATTAMENTO A CALCE Relazione tecnica sullo studio per il reimpiego dei terreni argillosi prodotti dagli scavi mediante trattamento con calce	Data: Aprile 2014
Nome file: 6227 relazione tecnica sullo studio tratt a calce		Pagina 29 di 50

determinazione della dispersione della massa di calce sparsa, attraverso quella raccolta entro teglie metalliche di superficie nota ($0,50 \times 0,50 = 0,25 \text{ mq}$) disposte sul terreno, lungo le strisciate di stesa, come in **Figura 12**, per un numero complessivo di non meno di 10 determinazioni per strato posto in opera. Il vantaggio offerto dalle teglie metalliche, rispetto al possibile uso di teli, è che, essendo rigide, assicurano una superficie di riferimento più affidabile rispetto a quella nominale dei teli flessibili. I risultati dei controlli di spandimento effettuati sono riportati nei successivi paragrafi.

La quantità di calce, Q , da spandere per metro cubo di miscela da trattare si può calcolare con la seguente espressione:

$$Q = c\% \cdot \gamma_{OPN} \cdot 1,06 \quad [\text{kg/m}^3]$$

ove: $c\%$ è il dosaggio in CaO considerato per lo strato di destinazione;

γ_{OPN} è la densità secca ottimale da prove Proctor Normale (cfr. Tab. VIII);

1,06 è la maggiorazione considerata per tener conto delle dispersioni di cantiere.

La quantità di calce da spandere in superficie, $q = Q s$ (in kg/m^2) è, com'è ovvio, commisurata allo spessore, s , dello strato da trattare.



Figura 12 - Spandimento della calce e controlli

Miscelazione - Per la miscelazione intima della terra con la calce (e, ove necessario, per la contemporanea umidificazione delle miscele) si è utilizzata la riciclatrice Wirtgen WR 2000, attrezzatura di elevate prestazioni, generalmente impiegata per il riciclaggio a freddo dei conglomerati bituminosi, il cui tamburo ad asse orizzontale permette una profondità massima di fresatura di 50 cm su una larghezza di lavoro di 200 cm. La macchina permette anche, mediante ugelli disposti all'interno del carter di miscelazione, la regolazione, tramite software asservito, dei quantitativi d'acqua d'apporto richiesti. Le modalità operative hanno previsto,

Cod. elab.: 000GE224PT08XRH164A	Titolo: TRATTAMENTO A CALCE Relazione tecnica sullo studio per il reimpiego dei terreni argillosi prodotti dagli scavi mediante trattamento con calce	Data: Aprile 2014
Nome file: 6227 relazione tecnica sullo studio tratt a calce		Pagina 30 di 50

in tutti i casi, un primo passaggio di fresa effettuato immediatamente dopo lo spandimento della calce (con contemporanea umidificazione regolabile tramite apposito software) ed un secondo passaggio realizzato dopo circa 3 ore dal primo, per dare modo alla calce di idratarsi e produrre gli attesi effetti immediati sull'argilla (riduzione del contenuto d'acqua e flocculazione). Dopo questo secondo passaggio, a seguito di controllo di umidità delle miscele, controllo della granulometria apparente delle miscele e valutazione delle dimensioni massime dei grumi formati, si decideva, di volta in volta, se fossero necessari ulteriori passaggi di fresa. I fattori controllati sono stati la finezza delle miscele, mediante granulometria a secco, e l'omogeneità della miscelazione. L'omogeneità stata valutata attraverso la colorazione delle miscele e la granulometria apparente delle stesse. Inoltre, per le miscele che soddisfacevano il requisito di finezza di cui sopra, si è verificata l'omogenea ripartizione della calce su tutto lo spessore dello strato mediante misure di pH effettuate in laboratorio su prelievi rappresentativi, per uno stesso posto, della parte superiore e della parte inferiore dello strato. Già dopo il primo passaggio, le prestazioni offerte dalla miscelatrice assicuravano una buona omogeneità delle miscele comprovata da una colorazione che appariva uniforme delle stesse e priva di striature. Le misure di granulometria apparente sono state effettuate dopo ciascun passaggio di fresa. Nel corso delle prove sono state stabilite correlazioni tra l'aspetto visivo delle miscele, reso attraverso fotografie, e la granulometria apparente di riferimento, come mostrato in **Figura 13**.

Si è potuto osservare che, al limite, tre passaggi di fresa assicurano una finezza conveniente per le miscele e che ulteriori passaggi non producono significativi miglioramenti sia per quanto riguarda la riduzione della dimensione massima dei grumi, sia per quanto riguarda il grado di polverizzazione delle miscele.



Figura 13 – Granulometria apparente delle miscele dopo due e tre passaggi di fresa

Cod. elab.: 000GE224PT08XRH164A	<i>Titolo: TRATTAMENTO A CALCE</i> Relazione tecnica sullo studio per il	Data: Aprile 2014
Nome file: 6227 relazione tecnica sullo studio tratt a calce	reimpiego dei terreni argillosi prodotti dagli scavi mediante trattamento con calce	Pagina 31 di 50

Costipamento - La compattazione degli strati è stata realizzata mediante rullo vibrante monocilindro liscio BW 219 DH-3 della BOMAG (in **Figura 14**) caratterizzato dai seguenti parametri:

- massa statica del tamburo: $M1 = 12.780 \text{ kg}$
- larghezza del tamburo: $L = 213 \text{ cm}$
- massa statica lineare esercitata dal tamburo: $M1/L = 60 \text{ kg/cm}$
- ampiezza della vibrazione: $A_0 = 2,14 \div 1,21 \text{ mm}$
- frequenza del sistema eccentrico: $F = 26/30 \text{ Hz}$

Si tratta di un compattatore tra quelli di maggior efficacia esistenti in commercio, classificabile da V4 a V5 secondo SETRA-LCPC, in relazione ai parametri di vibrazione impostati. Come si è potuto verificare attraverso i controlli di densità sugli strati posti in opera, con tale rullo si può considerare di compattare strati di $40 \div 45 \text{ cm}$ in unico spessore.



Figura 14 – Attrezzature impiegate per la compattazione degli strati posti in opera ed i controlli di densità

L'attività di messa a punto del processo di compattazione ha riguardato il controllo dell'addensamento con mezzi di misura della densità in situ che permettessero di apprezzare l'addensamento medio dello strato (valutato con volumenometro "maggiorato" da 30 cm di diametro, V_{30} , mostrato in **Figura 15**) e quello su fondo strato, quest'ultimo ottenuto per differenza ponderale tra l'addensamento medio e quello dalla parte superiore (valutato con volumenometro "normale" da 16 cm, V_{16}). Fra le variabili della compattazione sono state considerate (mantenendo sempre una velocità operativa di circa 3 km/h):

- la modalità della compattazione (statica o dinamica),
- il numero di passaggi di rullo. Si fa rilevare in proposito che un'andata ed un ritorno sono considerati due passaggi;

Cod. elab.: 000GE224PT08XRH164A	<i>Titolo: TRATTAMENTO A CALCE</i> Relazione tecnica sullo studio per il	Data: Aprile 2014
Nome file: 6227 relazione tecnica sullo studio tratt a calce	reimpiego dei terreni argillosi prodotti dagli scavi mediante trattamento con calce	Pagina 32 di 50

- l'ampiezza della vibrazione, A_0 (alta, media e bassa).

Considerata la larghezza operativa del rullo, corrispondente a circa un quarto della larghezza complessiva del rilevato sperimentale, si sono potuti realizzare, su uno stesso strato, zone (strisciate di 2,00 m circa di larghezza) compattate con diverse energie di compattazione, al fine di valutare l'effetto di tale variabile sui risultati.

Dai risultati ottenuti è emerso che tutte le modalità di compattazione adottate hanno permesso di ottenere sull'intero spessore un grado di compattazione superiore al 100% della densità secca ottimale da prove Proctor Normale (γ_{OPN}). L'ottimizzazione del processo ha portato a concludere che, data la grande efficacia del rullo impiegato, è possibile compattare nel rispetto dei requisiti di addensamento richiesti strati fino a 40 cm di spessore, con 4 passaggi di rullo (2 passaggi ad alta ampiezza di vibrazione seguiti da 2 passaggi ad ampiezza molto bassa, questi ultimi eventualmente eseguiti anche in condizioni statiche, per evitare sfogliamenti dello strato).

<i>Cod. elab.:</i> 000GE224PT08XRH164A	<i>Titolo:</i> TRATTAMENTO A CALCE Relazione tecnica sullo studio per il	<i>Data:</i> Aprile 2014
<i>Nome file:</i> 6227 relazione tecnica sullo studio tratt a calce	reimpiego dei terreni argillosi prodotti dagli scavi mediante trattamento con calce	<i>Pagina</i> 33 di 50



Figura 15 – Controlli di densità sull'intero spessore dello strato con volumenometro di grande diametro

5.3 CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE DEL RILEVATO SPERIMENTALE

Lo schema di seguito rappresentato in **Figura 15** riporta le caratteristiche previste in progetto per l'esecuzione del rilevato sperimentale di prova.

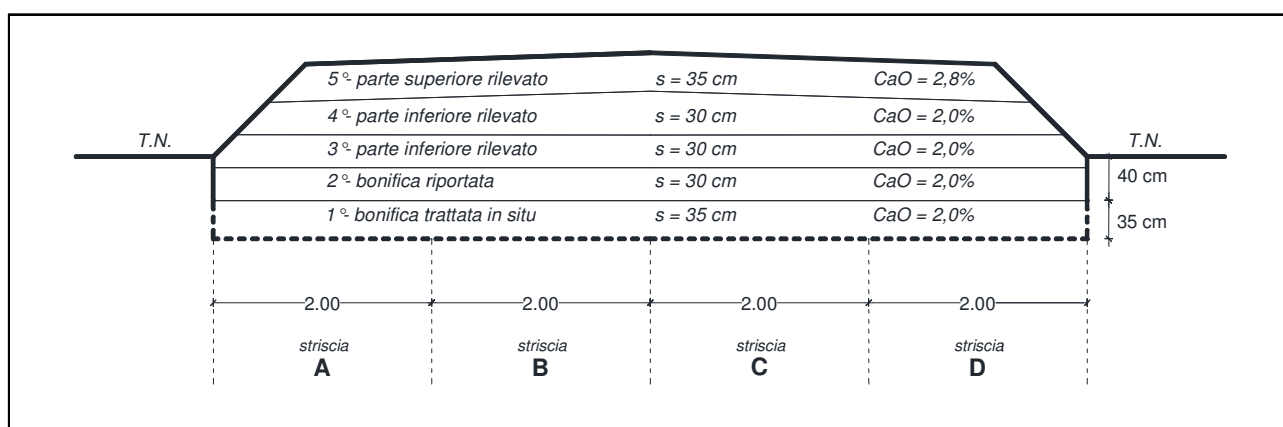


Figura 15 – Schema del rilevato sperimentale, come previsto in progetto

Sotto il profilo costruttivo, per essere rappresentativo delle opere da realizzare, il rilevato di prova è costituito da:

Cod. elab.: 000GE224PT08XRH164A	Titolo: TRATTAMENTO A CALCE Relazione tecnica sullo studio per il reimpiego dei terreni argillosi prodotti dagli scavi mediante trattamento con calce	Data: Aprile 2014
Nome file: 6227 relazione tecnica sullo studio tratt a calce		Pagina 34 di 50

- una fondazione (o bonifica del piano di posa del rilevato) idonea a garantire il corretto costipamento dei successivi strati ad essa soprastanti. Nel caso in esame, pertanto, detta bonifica è stata realizzata asportando i primi 40 cm di terreno vegetale e trattando con calce il terreno sottostante in situ per uno spessore di 35 cm. Per tale strato è stato previsto un dosaggio del 2% di CaO, corrispondente a $Q = 32 \text{ kg/m}^3$, ovvero ad uno spandimento in superficie di $q = 11,20 \text{ kg/m}^2$. Il requisito prestazionale richiesto per detto strato è stato un modulo di deformazione $Md \geq 25 \text{ MPa}$. Fa parte della bonifica un ulteriore strato (riportato) di terra trattata con calce che, in fase di progetto del rilevato sperimentale, è stato posto dello spessore di 30 cm. Le caratteristiche costruttive di questo strato sono analoghe a quelle degli strati della parte inferiore del rilevato (PIR). La fondazione trattata con calce ha, dunque, uno spessore complessivo di 65 cm;
- due strati, inizialmente previsti di spessore 30 cm ciascuno, il secondo dei quali successivamente portato a 40 cm, di terra trattata con calce (con un dosaggio del 2,0 % di CaO), rappresentativi degli strati destinati alla costruzione della parte inferiore dei rilevati (PIR);
- uno strato di 35 cm di terra trattata con calce (con un dosaggio del 2,8 % di CaO corrispondente a $Q = 44 \text{ kg/m}^3$), rappresentativo degli strati della parte superiore dei rilevati (PSR).

Quanto alla geometria del corpo del rilevato, questo presenta:

- **lunghezza:** 50 metri circa;
- **larghezza:** 8 metri alla base (4 strisciate di 2,00 m ciascuna), ridotta a circa 6,20 m in testa, dopo aver sagomato i fianchi del rilevato (scarpata 1:1) mediante taglio delle strisciate laterali dopo la costruzione (attraverso ritiro della parte superiore di circa 90 cm, da ambo i lati, come mostrato in **Figura 16**). Le strisciate sono state denominate con le lettere A, B, C e D, essendo A e D quelle di estremità, B e C le due centrali;
- **altezza totale fuori terra:** 110 cm circa, oltre la bonifica di fondazione.

Longitudinalmente, i raccordi di estremità sono stati realizzati con rampe con pendenza non superiore al 25%.

Cod. elab.: 000GE224PT08XRH164A	Titolo: TRATTAMENTO A CALCE Relazione tecnica sullo studio per il reimpiego dei terreni argillosi prodotti dagli scavi mediante trattamento con calce	Data: Aprile 2014
Nome file: 6227 relazione tecnica sullo studio tratt a calce		Pagina 35 di 50



Figura 16 - Rilevato sperimentale in fase di costruzione e dopo sagomatura delle scarpate

Controlli in corso di esecuzione - Le prove condotte su ogni strato e sulle diverse strisciate hanno riguardato controlli di:

- *dosaggio in calce* (controlli di spandimento);
- *resistenza meccanica*, mediante l'IPI, valutato in accordo alla norma EN UNI 13286/47 sulle miscele prodotte in cantiere e portate in laboratorio per essere compattate e sottoposte a rottura entro 90 minuti dalla fine della miscelazione. Tale parametro di resistenza (nel seguito indicato con IPI*, dato che si riferisce a miscele prodotte in cantiere e non in laboratorio) è stato qui considerato perché, misurato con cadenza giornaliera in fase di esecuzione dei lavori, permette di evidenziare preventivamente, in corso d'opera, eventuali anomalie e derive nella natura dei terreni o nei prodotti di trattamento approvvigionati;
- *omogeneità delle miscele*, attraverso confronto tra i valori di pH misurati in uno stesso posto per la parte superiore ed inferiore dello strato;
- *finezza di miscelazione*, attraverso granulometria e dimensione massima dei grumi, D_{max} , rilevate per setacciatura a secco dopo vari passaggi della miscelatrice;
- *spessore* dei vari strati, effettuato mediante livellazione topografica. Allo scopo si sono considerate 5 sezioni trasversali (distanziate longitudinalmente di 10 m ciascuna, dalla progressiva 5,00m alla progressiva 45,00m) e 4 punti per ogni sezione, in asse a ciascuna strisciata. Per ogni strato è stato calcolato il valor medio. Il coefficiente di variazione, C_v , è stato valutato solo sugli strati 2 e 3, dato che, per gli strati superiori (4 e 5), prima del costipamento, si è eseguita la profilatura delle superfici con tetto a doppia falda, per garantire sufficiente pendenza ai piani finiti;
- *densità in situ*, tramite misure con volumetri V_{30} e V_{16} , come prima detto;

Cod. elab.: 000GE224PT08XRH164A	<i>Titolo: TRATTAMENTO A CALCE</i> Relazione tecnica sullo studio per il	Data: Aprile 2014
Nome file: 6227 relazione tecnica sullo studio tratt a calce	reimpiego dei terreni argillosi prodotti dagli scavi mediante trattamento con calce	Pagina 36 di 50

- *portanza in situ*, mediante prove di carico con piastra a doppio ciclo (Md ed Md') e prove con piastra dinamica, LWD - Light Weight Deflectometer, i cui valori possono correlarsi a quelli di Md, per controlli speditivi in corso d'opera (cfr. **Figura 17**).



Figura 16 – Controlli di portanza con piastra dinamica (LWD) e prove di modulo di deformazione (Md)

Di seguito, in **Tabella XIV**, si riepilogano le modalità costruttive selezionate per il rilevato sperimentale, distinte, dove di interesse, per le strisciate A, B, C e D di ciascuno strato.

Tabella XIV – Modalità costruttive selezionate per il rilevato sperimentale

STRATO		Dosaggio in CaO (%)	Percentuale d'acqua d'apporto $\Delta w^{(1)}$ (%)		Spessor e reso (cm)	Numero di passaggi di rullo ⁽²⁾	
N	Posizione		A	B		A	B
5	Parte Superiore del Rilevato	2,8% (44 kg/m ³)	A	1	32,1	A	2N _A + 2N _B
			B	1		B	
			C	3 + 2		C	
			D	3 + 2		D	
4	Parte Inferiore del Rilevato	2,0% (32 kg/m ³)	A	0 + 0 + 1	29,0	A	2N _A + 1N _M
			B	0 + 0 + 1		B	
			C	0 + 0 + 1		C	2N _A + 2N _B
			D	0 + 0 + 1,5		D	
3	Parte Inferiore del Rilevato	2,0% (32 kg/m ³)	A	0 + 2,2 + 0 + 0	42,8 ⁽³⁾	A	2N _A + 2N _M + 2N _B
			B	0 + 2,2 + 0 + 0		B	
			C	0 + 2,2 + 3 + 0		C	2N _A + 2N _B
			D	0 + 2,2 + 0 + 0		D	
2	Bonifica (strato riportato)	2,0% (32 kg/m ³)	A	1,5 + 2 + 0 + 0	30,2	A	4N _A + 1N _S
			B			2N _A + 2N _B + 1N _S	
			C			2N _A + 2N _M + 2N _B + 1N _S	
			D				
1	Bonifica (trattata in sito)	2,0%	A	2,5 + 2 + 2	35,0	A	2N _A + 2N _B
			B	2,5 + 2		B	

Cod. elab.: 000GE224PT08XRH164A	Titolo: TRATTAMENTO A CALCE Relazione tecnica sullo studio per il reimpiego dei terreni argillosi prodotti dagli scavi mediante trattamento con calce	Data: Aprile 2014
Nome file: 6227 relazione tecnica sullo studio tratt a calce		Pagina 37 di 50

		(32 kg/m ³)	C			C	3 N _A + 3 N _B
			D			D	4 N _A + 4 N _B

(¹) sono riportate le % d'acqua di apporto in corrispondenza della sequenza di miscelazione considerata
 (²) N_A, N_M, N_B = passaggi di rullo ad Alta, Media, Bassa ampiezza di vibrazione, rispettivamente
 N_S = passaggi di rullo in modalità Statica, di chiusura superficiale
 (³) spessore regolato, per errore dell'operatore, a 40 cm.

5.4 RISULTATI DELLE PROVE DI CAMPO E RIFERIMENTI PER LE N.T.A. integrative

5.4.1. Controlli di spandimento

I risultati dei controlli di spandimento effettuati, sono riportati nelle **Tabelle XV e XVI** dove, per ciascuno strato, sono dati valori medi, coefficienti di variazione e scostamenti dai valori di riferimento.

Tabella XV – Controlli di spandimento: media e coefficiente di variazione della calce raccolta nei punti di misura

Strato	Calce raccolta nei diversi punti di misura (kg)													Quantità sparsa	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Media μ	q (kg/m ²)	C.V. (%)
1	--	--	--	--	2,80	2,70	2,70	2,60	2,81	2,72	2,51	2,84	2,71	10,84	4
2	2,79	2,98	2,93	2,50	2,40	3,07	2,95	2,98	2,64	2,21	2,51	2,30	2,69	10,75	12
3	2,37	2,28	2,45	2,71	2,86	2,89	2,73	2,52	2,69	2,63	2,59	2,75	2,62	10,49	5
4	2,41	2,79	3,03	2,66	2,39	2,69	2,86	2,92	2,27	2,77	2,78	2,90	2,71	10,82	8
5	4,70	4,22	4,20	4,38	2,80	4,12	4,15	3,96	4,09	3,70	3,84	3,29	3,95	15,82	11

NOTA: La quantità di calce raccolta nelle teglie (di dimensioni 0,50x0,50m) corrisponde ad 1/4 dello spandimento, q, previsto.

Tabella XVI – Controlli di spandimento: confronto tra i valori di riferimento e quelli realizzati

Strato	Spessore medio s (m)		Spandimento q (kg/m ²)			Dosaggio in calce CaO (%)	
	previsto	realizzato	previsto	realizzato	Δ (%)	previsto	realizzato
1	0,350	0,350	11,2	10,84	-3,2	2,0	2,1
2	0,300	0,313	9,6	10,75	12,0	2,0	2,3
3	0,300	0,421	9,6	10,49	9,3	2,0	1,6
4	0,300	0,318	9,6	10,82	12,7	2,0	2,3
5	0,350	0,321	15,4	15,82	2,7	2,8	3,3

Si fa notare che, considerati i sistemi di regolazione automatica di cui è dotato lo spandi legante impiegato, la quantità di calce effettivamente sparsa in superficie, q (kg/m²), risulta molto affidabile. Infatti, dopo la taratura della macchina, verificata lungo la strisciata esterna della bonifica trattata in sito, lo scarto della media, Δ, rispetto al valore di riferimento ed il coefficiente di variazione rispetto al valor medio, C.V., risultano molto bassi, sempre inferiori

Cod. elab.: 000GE224PT08XRH164A	Titolo: TRATTAMENTO A CALCE Relazione tecnica sullo studio per il reimpiego dei terreni argillosi prodotti dagli scavi mediante trattamento con calce	Data: Aprile 2014
Nome file: 6227 relazione tecnica sullo studio tratt a calce		Pagina 38 di 50

al 15%, limiti ben accettabili anche per riguarda l'esecuzione degli strati della parte superiore dei rilevati, *PSR*.

La dispersione degli spessori degli strati realizzati rispetto ai valori di riferimento risulta, invece, avere forte incidenza sui dosaggi in calce negli strati realizzati. Per tale motivo, i controlli preventivi di spessore (effettuati prima dello spandimento della calce) risultano di fondamentale importanza, al fine di evitare anomalie e limitare rischi di derive nei dosaggi.

<i>Cod. elab.: 000GE224PT08XRH164A</i>	<i>Titolo: TRATTAMENTO A CALCE</i>	<i>Data: Aprile 2014</i>
<i>Nome file: 6227 relazione tecnica sullo studio tratt a calce</i>	Relazione tecnica sullo studio per il reimpiego dei terreni argillosi prodotti dagli scavi mediante trattamento con calce	<i>Pagina 39 di 50</i>

5.4.2. Controlli di spessore

Considerato quanto prima detto circa la profilatura superficiale operata sul 4° e 5°, allo scopo di conferire ai piani finiti le pendenze trasversali e longitudinali necessarie per un rapido smaltimento delle acque, i controlli sulla regolarità di stesa e sulla relativa dispersione di spessore in fase di esecuzione (coefficiente di variazione) sono stati limitati al 2° e 3° strato. Per tutti gli strati, si sono calcolati i valori medi degli spessori realizzati e gli scostamenti di questi dal valore di riferimento (cfr. **Tabella XVII**).

Tabella XVII – Controlli di spessore: confronto tra i valori di riferimento e quelli realizzati

Strato	Spessore reso		Spessore di riferimento (cm)	Differenza media di spessore (cm)	Differenza media (%)
	media (cm)	C.V. (%)			
2	31,3	10	30	+1,3	4,3
3	42,1	3	40 ⁽¹⁾	+2,1	5,3
4	31,8	--	30	+1,8	--
5	32,1	--	35	-2,1	--

⁽¹⁾ Per questo strato, lo spessore di riferimento di progetto era di 30 cm, ma per errore dell'operatore è stato impostato, in fase esecutiva, pari a 40 cm.

Per quanto riguarda lo spessore dello strato di bonifica trattato in situ (strato N° 1), questo è stato governato in maniera automatica dalla fresatrice/miscelatrice, attraverso l'affondamento del tamburo rispetto ai riferimenti poggianti sulla superficie di lavoro, cosa che permette di rispettare in modo rigoroso lo spessore impostato.

5.4.3. Controlli di finezza delle miscele

I risultati dei controlli di finezza delle miscele, effettuati mediante granulometria a secco (percentuali medie di passante ai setacci da 31,5mm e da 4,76mm), in funzione del numero di passaggi della fresa, sono forniti, ove disponibili, in **Tabella XVIII**.

Tabella XVIII – Controlli di finezza delle miscele(% di passante ai setacci da 31,5mm e 4,76mm)

STRATI	2 - Bonifica (strato riportato)		3 - Parte Inferiore del Rilevato, PIR		4 - Parte Inferiore del Rilevato, PIR		5 - Parte Superiore del Rilevato, PSR	
	31,5	4,76	31,5	4,76	31,5	4,76	31,5	4,76
I passata	97,1	43,1	43,5	30,3	--	--	--	--
II passata	98,3	41,7	100	41,8	--	--	--	--
III passata	100	44,7	100	39,3	--	--	100	44,2
IV passata	100	63	100	63	--	--	--	--

Intendendo per Dmax, come da Norma, la dimensione corrispondente al 95% di passante nella curva granulometrica, come può osservarsi dai valori di tabella, bastano 2

Cod. elab.: 000GE224PT08XRH164A	Titolo: TRATTAMENTO A CALCE Relazione tecnica sullo studio per il reimpiego dei terreni argillosi prodotti dagli scavi mediante trattamento con calce	Data: Aprile 2014
Nome file: 6227 relazione tecnica sullo studio tratt a calce		Pagina 40 di 50

passaggi per soddisfare il requisito di dimensione massima dei grumi, secondo le indicazioni di Capitolato ($D_{max} = 31,5\text{mm}$). L'ulteriore requisito granulometrico ($p_{4,76\text{mm}} > 80\%$) riportato nelle Norme Tecniche di Appalto (ma considerato nei Capitolati internazionali solo miscele destinate agli strati di sottofondazione delle pavimentazioni), non risulta mai soddisfatto, neanche dopo due ulteriori passaggi di fresa. In particolare, si è osservato che il quarto passaggio di fresa non produce sostanziali aumenti del grado di finezza delle miscele rispetto al terzo. Si ricorda, al riguardo, che per gli strati di rilevato è ammessa, nei Capitolati, la miscelazione con aratri o con erpici a dischi, che mai possono consentire di raggiungere i requisiti granulometrici sopra specificati. Ciò porta ad esprimersi per l'accettazione della finezza delle miscele dopo 2 o 3 passaggi di fresa - purché risulti rispettato il requisito di $D_{max} < 31,5\text{mm}$. L'intima miscelazione della terra con la calce che si è potuto ottenere, è, del resto, confermata dalle elevate prestazioni meccaniche riscontrate sia sulle miscele (IPI), sia sugli strati realizzati (M_d) nelle prove di campo e di seguito riportate.

5.4.4. Controlli di densità in situ

I risultati dei controlli di densità in situ effettuati sui diversi strati del rilevato di prova, sono riportati in **Tabella XIX**, ove è pure fornito il grado di addensamento, $\alpha = \gamma_d / \gamma_{OPN}$, come determinato con riferimento ai risultati delle prove Proctor Normale di laboratorio, per ciascuna miscela (cfr. Tabella VIII). Questi risultati si riferiscono ai valori medi di addensamento degli strati, determinati con Volumometro di grandi dimensioni (V30).

Tabella XIX – Controlli di densità in situ, per ciascuno strato, alle diverse sezioni di prova

Protocollo Sidercem	Strato	Ubicazione		w [%]	γ_d [kg/m ³]	Grado di addensamento α (%)
		Strisciata	Progressiva [m]			
CBA 1894	1° Strato Bonifica (trattata in situ)	A	-	19,6	1.495	--
		B	-	19,0	1.628	--
		C	-	18,4	1.512	--
		D	-	18,1	1.347	--
CBA 1895		A	20,00	20,3	1.525	101
		B	20,00	22,5	1.582	105
		C	20,00	23,8	1.637	109
		D	20,00	23,1	1.690	112
CBA 1897	2° Strato Bonifica (strato riportato)	A	30,00	24,9	1.586	105
		B	30,00	24,1	1.586	105
		C	30,00	22,3	1.686	112
		D	30,00	22,4	1.747	116
		A	45,00	22,2	1.675	111
		B	45,00	21,8	1.688	112
		C	45,00	23,4	1.674	111
		D	45,00	24,4	1.724	115

Cod. elab.: 000GE224PT08XRH164A	Titolo: TRATTAMENTO A CALCE Relazione tecnica sullo studio per il reimpiego dei terreni argillosi prodotti dagli scavi mediante trattamento con calce	Data: Aprile 2014
Nome file: 6227 relazione tecnica sullo studio tratt a calce		Pagina 41 di 50

VARIANTE TECNICA MIGLIORATIVA (Art. 169 comma 4 D.Lgs. N. 163/2006 e s.m.i.)

CBA 1899	3° Strato Parte Inferiore del Rilevato	B	10,00	18,9	1.682	112
		C	10,00	21,9	1.616	107
		D	10,00	20,3	1.653	110
		B	23,00	21,7	1.606	107
		C	23,00	24,5	1.633	109
		A	40,00	20,6	1.648	110
		B	40,00	20,9	1.634	109
		C	40,00	24,4	1.610	107
		B	11,30	19,9	1.644	109
		C	11,30	22,2	1.620	108
		D	11,30	17,9	1.609	107
		A	41,30	21,0	1.613	107
		B	41,30	21,8	1.605	107
		C	41,30	24,9	1.642	109
CBA 1905	4° Strato Parte Inferiore del Rilevato	B	4,00	20,0	1.641	109
		C	4,00	21,6	1.619	108
		A	18,00	20,9	1.606	107
		B	18,00	20,6	1.645	109
		C	18,00	22,4	1.640	109
		B	43,00	20,6	1.670	111
		C	43,00	21,4	1.651	110
		D	43,00	21,6	1.686	112
CBA 1915	5° Strato Parte Superiore del Rilevato	A	15,00	20,6	1.531	103
		B	15,00	20,7	1.649	111
		C	15,00	24,8	1.591	107
		D	15,00	25,0	1.640	110
		B	32,00	21,1	1.673	113
		C	32,00	23,7	1.664	112
		B	38,00	22,5	1.653	111
		C	38,00	22,6	1.606	108

Con riferimento al 3° Strato, sono pure riportati in **Tabella XX**, i risultati dei valori di addensamento riscontrati sulla metà superiore dello strato (circa), determinati con Volumetro di piccole dimensioni (V16) e, per differenza con quelli medi, riferiti all'intero spessore, le densità desunte per la metà inferiore dello strato. Le misure messe a confronto, determinate coi Volumetri V30 e V16, si riferiscono a punti posti a distanza non superiore a 1,30 m tra loro.

Tabella XX - Controlli di densità in situ: confronto tra i valori medi di strato e quelli delle parti superiori ed inferiori, per il 3° Strato (Parte Inferiore del Rilevato)

Striscia	Progr. (m)	Valori medi dello strato			Parte superiore dello strato			Parte inferiore strato	
		umidità w (%)	densità secca γ_d [kg/m ³]	γ_d/γ_{OPN}	umidità w (%)	densità secca γ_d [kg/m ³]	γ_d/γ_{OPN}	densità secca γ_d [kg/m ³]	γ_d/γ_{OPN}
B	11,30	18,9	1682	1,12	19,9	1644	1,09	2046	1,36

Cod. elab.: 000GE224PT08XRH164A	Titolo: TRATTAMENTO A CALCE Relazione tecnica sullo studio per il reimpiego dei terreni argillosi prodotti dagli scavi mediante trattamento con calce	Data: Aprile 2014
Nome file: 6227 relazione tecnica sullo studio tratt a calce		Pagina 42 di 50

C	11,30	21,9	1616	1,07	22,2	1620	1,08	1995	1,33
D	11,30	20,3	1653	1,10	17,9	1609	1,07	2055	1,37
A	41,30	20,6	1684	1,12	21,0	1613	1,07	2088	1,39
B	41,30	20,9	1634	1,09	21,8	1605	1,07	2036	1,35
C	41,30	24,4	1610	1,07	24,9	1642	1,09	1961	1,30

Dai risultati delle precedenti tabelle si osserva che le umidità riscontrate nel corso dei controlli di densità risultano tutte maggiori di quelle minime richieste, prima definite per ciascun dosaggio in calce (cfr. Tabella VIII); inoltre, il grado di addensamento è sempre ampiamente maggiore del 97% dell'ottimo di densità secca Proctor Normale, assunto a requisito minimo da soddisfare nei controlli di qualità degli strati di rilevato posti in opera.

L'elevato grado di addensamento riscontrato mediamente sull'intero spessore dello strato, è ottenuto anche per quanto riguarda la parte superiore e quella inferiore dello stesso; si osserva, inoltre, che i valori riferiti al fondo strato risultano sempre maggiori di quelli della parte superiore e di quelli medi, nonostante l'elevato spessore compattato (42,8cm).

5.4.5. Controlli di IPI* (per le miscele prodotte in cantiere)

Si tratta, come detto, di controlli di portanza effettuati su miscele prodotte in cantiere e compattate in laboratorio per essere sottoposte a rottura entro 90 minuti dalla fine della miscelazione. L'indice di portanza proposto va considerato un parametro fondamentale per garantire la qualità delle opere in terra-calce, di rapida esecuzione e perciò compatibile con le esigenze di cantiere. Misurato con cadenza giornaliera, infatti, permette di evidenziare preventivamente ed in tempo utile per apportare le correzioni necessarie, eventuali anomalie e derive nella natura dei terreni o nei prodotti di trattamento.

I risultati delle prove di controllo effettuate sono riassunti nella **Tabella XXI** seguente.

Tabella XXI – Controlli di IPI su miscele prodotte in cantiere e provate in laboratorio secondo UNI EN 13286 - 47

Protocollo Sidercem	STRATO	Ubicazione		I.P.I* [%]	w [%]	γ _d [kg/m ³]
		Strisciata	Progressiva [m]			
CBA 1895	2 - Bonifica (strato riportato)	A - C1	35,00	17	26,4	1.447
		A - C2	35,00	18	26,3	1.453
		D	35,00	21	23,9	1.511
CBA 1899	3 - Parte Inferiore del Rilevato, PIR	A	15,00	25	21,0	1.509
		A	35,00	28	20,1	1.545
		D	15,00	21	21,1	1.487
		D	35,00	20	25,4	1.445
CBA 1905	4 - Parte Inferiore del Rilevato, PIR	A	15,00	22	21,7	1.533
		A	35,00	13	21,2	1.490
		Striscia D	15,00	22	21,9	1.514
		Striscia D	35,00	16	20,9	1.492

Cod. elab.: 000GE224PT08XRH164A	Titolo: TRATTAMENTO A CALCE Relazione tecnica sullo studio per il reimpiego dei terreni argillosi prodotti dagli scavi mediante trattamento con calce	Data: Aprile 2014
Nome file: 6227 relazione tecnica sullo studio tratt a calce		Pagina 43 di 50

CBA 1911	5 - Parte Superiore del Rilevato,PSR	Striscia D	15,00	16	20,3	1.473
		Striscia D	30,00	21	19,9	1.498
		Striscia A	15,00	18	20,5	1.426
		Striscia A	30,00	25	20,7	1.478

Come può osservarsi dal confronto con i valori di IPI ottenuti sulle miscele di pari umidità e dosaggio in calce (cfr. precedenti Tabella V e Figura 4), i risultati ottenuti sulle miscele prodotte in cantiere si accordano bene con quelli determinati negli studi preliminari di laboratorio. Inoltre, in tutti i casi esaminati, risultano ampiamente soddisfatte le soglie minime di IPI richieste per lo strato considerato (IPI \geq 8,5% per impieghi nella parte inferiore dei rilevati, PIR, ed IPI \geq 10 per impieghi nella parte superiore, PSR).

5.4.6. Controlli di pH delle miscele

Per valutare l'intima miscelazione della terra con la calce e l'omogenea distribuzione di quest'ultima all'interno dello strato, sull'intero spessore, sono state effettuate misure di pH, ponendo a confronto, per uno stesso sito, i valori determinati lungo la verticale nella parte inferiore e superiore dello strato. Come può osservarsi dai risultati dei controlli riportati in **Tabella XXII**, l'omogeneità delle miscele risulta molto elevata; le variazioni di pH tra la parte superiore e quella inferiore di ciascuno strato risultano, infatti, del tutto trascurabili e pari a quelle intrinseche alla dispersione della prova. Questo risultato conferma le considerazioni espresse circa la finezza delle miscele. E' da osservare, inoltre, che le misure di pH rappresentano un mezzo di controllo "a posteriori" del dosaggio in calce. Confrontando i valori riportati in Tabella XXII con quelli determinati sui campioni NS2 C1 ed NS2 C2, in occasione delle prove di consumo iniziale in calce, CIC, si osserva una piena corrispondenza.

Tabella XXII – Controlli di omogeneità delle miscele mediante misure di pH

Protocollo Sidercem	Strato	Ubicazione		pH
		Strisciata	Progressiva [m]	
CBA 1895	Bonifica (strato riportato)	A parte superiore	45,00	12,37
		A parte inferiore	45,00	12,45
		B parte superiore	10,00	12,41
		B parte inferiore	10,00	12,34
CBA 1899	1° Parte Inferiore del Rilevato PIR	A parte superiore	35,00	12,50
		A parte inferiore	35,00	12,52
		A parte superiore	15,00	12,44
		A parte inferiore	15,00	12,44
		D parte superiore	15,00	12,42
		D parte inferiore	15,00	12,47
		D parte superiore	35,00	12,30
		D parte inferiore	35,00	12,33

Cod. elab.: 000GE224PT08XRH164A	Titolo: TRATTAMENTO A CALCE Relazione tecnica sullo studio per il reimpiego dei terreni argillosi prodotti dagli scavi mediante trattamento con calce	Data: Aprile 2014
Nome file: 6227 relazione tecnica sullo studio tratt a calce		Pagina 44 di 50

5.4.7. Controlli di portanza degli strati (Md secondo norma CNR 146/92)

I risultati delle prove di modulo di deformazione effettuate sugli strati posti in opera sono riportati nella **Tabella XXIII**, in relazione alla posizione dello strato ed all'ubicazione dei punti di misura prescelti.

Tabella XXIII- Controlli di portanza in situ, Modulo di deformazione a primo (Md) e secondo ciclo (Md') di carico

Protocollo Sidercem	Strato	Ubicazione		Md [MPa]	Md' [MPa]
		Strisciata	Progressiva [m]		
CBA 1894	1 - Bonifica (trattata in sito)	A	10,45	61,2	130,4
		B	10,45	60,0	176,5
		C	10,45	65,2	166,7
		D	10,45	50,8	176,5
		A	35,00	36,1	111,1
		B	35,00	53,6	230,8
		C	35,00	63,8	250,0
		D	35,00	44,1	375,0
CBA 1895	2 - Bonifica (strato riportato)	A	45,00	90,9	111,1
		B	45,00	57,7	100,0
		C	45,00	78,9	120,0
		D	45,00	71,4	136,4
CBA 1897		A	28,00	85,7	107,1
		B	28,00	166,7	250,0
		C	28,00	142,9	187,5
		D	28,00	115,4	166,7
		A	22,00	103,4	142,9
		B	22,00	81,1	111,1
		C	22,00	100,0	150,0
		D	22,00	93,8	136,4
CBA 1901	3 - Parte Inferiore del Rilevato, PIR	A	7,00	115,4	157,9
		B	7,00	136,4	250,0
		C	7,00	150,0	272,7
		D	7,00	111,1	142,9
		B	35,00	187,5	250,0
		C	35,00	176,5	200,0
		B	47,00	130,4	214,3
		C	47,00	136,4	230,8
CBA 1908	4 - Parte Inferiore del Rilevato, PIR	B	15,00	88,2	107,0
		C	15,00	90,9	120,0
		B	33,00	103,4	187,5
		C	33,00	100	115,4
		A	25,00	107,1	150,0
		B	25,00	115,4	176,5
		C	25,00	93,8	130,4

Per quanto riguarda le caratteristiche di portanza degli strati finiti, si ricorda che i requisiti richiesti dalle N.T.A. per il modulo di deformazione al primo ciclo di carico, *Md*, sono:

Cod. elab.: 000GE224PT08XRH164A	Titolo: TRATTAMENTO A CALCE Relazione tecnica sullo studio per il reimpiego dei terreni argillosi prodotti dagli scavi mediante trattamento con calce	Data: Aprile 2014
Nome file: 6227 relazione tecnica sullo studio tratt a calce		Pagina 45 di 50

- $Md > 20 \text{ MPa}$, per lo strato trattato in sito di bonifica del piano di posa dei rilevati (di altezza maggiore di 2 metri). Come può osservarsi dai risultati riportati in Tabella XXII, i valori di Md determinati durante le prove di campo risultano tutti ampiamente superiori alla soglia richiesta (con valori variabili dal doppio al triplo), anche per quanto riguarda le prove condotte sui bordi laterali del rilevato.
- $Md > 20 \text{ MPa}$, per altezza di rilevato oltre i 2 m (strati della parte inferiore del rilevato);
- $Md > 50 \text{ MPa}$, per altezza di rilevato da 0 a 2 metri (parte superiore del rilevato);
- $Md > 50 \text{ MPa}$, per il piano di appoggio della sovrastruttura (sottofondo).

I valori di modulo di deformazione riscontrati nel corso delle prove di carico con piastra risultano per tutti gli strati del corpo del rilevato esaminati largamente superiori alla soglia contrattuale richiesta, senza eccezioni, sia per le strisciate centrali, sia anche per quelle di bordo laterale, con valori medi di strato pari a 2÷3 volte circa le soglie di 50 MPa richieste per gli strati della parte superiore dei rilevati e, perfino, per il sottofondo, come segue:

- $Md_{med} = 99,0 \text{ MPa}$ per lo strato di bonifica riportato (2° strato);
- $Md_{med} = 143,0 \text{ MPa}$ per il 3° strato realizzato (parte inferiore del rilevato),
- $Md_{med} = 99,8 \text{ MPa}$ per il 4° strato realizzato (parte inferiore del rilevato).

Si fa presente che le prove di carico con piastra previste per la determinazione della portanza dello strato superiore del rilevato (5° strato), da effettuarsi il giorno successivo ai controlli di densità, non sono state svolte per sopravvenuta interruzione delle attività, dovuta a chiusura dei cantieri a partire dal 7 settembre 2012.

Per lo stesso motivo non si è potuto realizzare la prevista protezione della superficie superiore del rilevato sperimentale, mediante emulsione bituminosa saturata con sabbia, e la protezione delle scarpate laterali mediante rivestimento con terreno vegetale.

Cod. elab.: 000GE224PT08XRH164A	<i>Titolo: TRATTAMENTO A CALCE</i> Relazione tecnica sullo studio per il	Data: Aprile 2014
Nome file: 6227 relazione tecnica sullo studio tratt a calce	reimpiego dei terreni argillosi prodotti dagli scavi mediante trattamento con calce	Pagina 46 di 50

6. CONSIDERAZIONI PER L'ESECUZIONE ED IL CONTROLLO DEI LAVORI

La messa a punto delle macchine e dei processi costruttivi permette di precisare le condizioni ottimali, sia per gli aspetti di progetto delle miscele e degli strati delle diverse parti del rilevato, sia per le modalità esecutive di ciascuna componente elementare di processo (regole dell'arte da osservare in fase di esecuzione dei lavori).

Riguardo agli aspetti di progetto (spessori resi dopo corretto costipamento), lo spessore di 35cm deve considerarsi ottimale, tenuto conto delle dispersioni intrinseche alle operazioni di cantiere, sia per la bonifica del piano di posa, sia per le parti inferiori e superiori di rilevato.

Dosaggi minimi in calce ed umidità minime delle miscele necessarie per lo sviluppo delle reazioni pozzolaniche sono riassunte di seguito, in funzione delle destinazioni delle miscele:

STRATO del Rilevato	SPESSORE (cm)	Umidità minima w_{min} (%)		Dosaggio minimo in calce		
		sola terra	miscela	CaO (%)	Q (kg/m ³)	q (kg/m ²)
Bonifica	35	19,0	17,0	2,0	32	11,20
PIR - Parte Inferiore	35	19,0	17,0	2,0	32	11,20
PSR - Parte Superiore	35	20,5	18,5	2,8	44	15,40

Riguardo agli aspetti costruttivi, le modalità di esecuzione dei lavori messe a punto nella prova di campo ed i risultati ottenuti nei controlli di esecuzione permettono di fornire le seguenti indicazioni relativamente alle varie fasi del processo costruttivo ed ai criteri e requisiti prestazionali da considerare nelle Norme Tecniche per l'esecuzione dei lavori in terra trattata con calce.

a. *Valutazione dell'umidità della terra prima dell'aggiunta della calce*

Tenuto conto dei tempi richiesti per l'essiccazione della terra ed il calcolo dell'umidità, occorre anticipare per quanto possibile tale determinazione rispetto alla fase di miscelazione, prevedendo un monitoraggio in continuo delle variazioni di umidità in situ dei terreni di scavo;

b. *Stesa - Fresatura - Regolazione dello spessore* - La stesa dovrà essere realizzata esclusivamente con motor grader, avendo cura di realizzare spessori costanti. Essa dovrà essere seguita da una fresatura, per ridurre le zolle e per favorire la regolarità di spessore dello strato di terra da trattare. Quando richiesto, secondo le indicazioni del D.L., un leggero passaggio di rullo (in condizioni statiche) potrà favorire

Cod. elab.: 000GE224PT08XRH164A	Titolo: TRATTAMENTO A CALCE Relazione tecnica sullo studio per il reimpiego dei terreni argillosi prodotti dagli scavi mediante trattamento con calce	Data: Aprile 2014
Nome file: 6227 relazione tecnica sullo studio tratt a calce		Pagina 47 di 50

l'uniforme spandimento della calce. Per evitare errori grossolani nella regolazione degli spessori di stesa occorre associare alla strumentazione di cui è dotato il motor grader (GPS) misure preventive di spessore mediante paletti metallici infissi negli strati di terra sciolta (prima dello spandimento della calce);

- c. *Umidificazione* – In presenza di condizioni climatiche di forte evapotraspirazione occorre verificare che il contenuto d'acqua delle miscele considerate non scenda al di sotto di quella minima necessaria per il corretto sviluppo dei processi pozzolanici. L'eventuale apporto d'acqua necessario sarà dato direttamente nella vasca di miscelazione, ripartendo il quantitativo previsto in concomitanza delle sequenze di miscelazione, preferibilmente a partire dalla prima. Salvo quanto precisato dal D.L., è opportuno considerare attese di non meno di 2,5 ore tra la prima e la seconda sequenza di miscelazione-umidificazione;
- d. *Spandimento della calce e controlli* – All'inizio di ogni giornata lavorativa si dovrà procedere alla verifica dei dispositivi di dosaggio automatici installati in macchina. Tale operazione sarà effettuata come descritto al riguardo nel precedente punto 5.2, considerando non meno di 10 punti di misura, distanziati tra loro di almeno 10 metri. La media delle misure effettuate non dovrà differire di oltre il 6% in meno rispetto al valore di riferimento, mentre il coefficiente di variazione rispetto alla media dovrà risultare C.V. < 15%;
- e. *Miscelazione* – Salvo quanto diversamente disposto dal D.L., per tale operazione saranno previsti 3 passaggi di miscelatrice, considerando tempi di attesa tra i primi due di non meno di 2,5 ore. I controlli di qualità della miscelazione saranno effettuati mediante valutazione della granulometria a secco dei grumi presenti nelle miscele e misure di pH, effettuati come indicato nel precedente §. 5.4. con la frequenza prevista dalle Norme Tecniche di esecuzione, allegate alla presente relazione. Si deve garantire una colorazione uniforme delle miscele, senza strisce visibili, ed una dimensione massima dei grumi, *D_{max}*, non superiore a: 40 mm per miscele impiegate per le bonifiche dei piani di posa dei rilevati e di 30 mm per gli strati di rilevato. Inoltre, nel caso di miscele destinate a strati della parte superiore dei rilevati, si deve verificare che almeno il 40% della miscela, ad esclusione delle porzioni lapidee, risulti passante al setaccio con apertura di 4,76 mm (n° 4 ASTM);
- f. *Strato di bonifica trattato in situ* – Per questo strato la preparazione del terreno è limitata alla rimozione dei massi ed al loro allontanamento, quando presenti.

Cod. elab.: 000GE224PT08XRH164A	Titolo: TRATTAMENTO A CALCE Relazione tecnica sullo studio per il reimpiego dei terreni argillosi prodotti dagli scavi mediante trattamento con calce	Data: Aprile 2014
Nome file: 6227 relazione tecnica sullo studio tratt a calce		Pagina 48 di 50

Normalmente, date le prestazioni delle macchine impiegate (miscelatrice), la calce può essere sparsa direttamente sulla superficie dello strato da trattare ed essere successivamente ben miscelata con la terra in situ, con due soli passaggi;

g. *Controlli di resistenza delle miscele prodotte in cantiere mediante misure di IPI** – Quando non si riscontrano variazioni apparenti nelle caratteristiche delle terre approvvigionate (disomogeneità rispetto ai terreni oggetto dello studio di dosaggio in calce) i controlli di IPI* saranno effettuati, come detto al precedente § 5.4, con frequenza giornaliera di 2-3 misure distanziate tra loro. In caso contrario detti controlli saranno effettuati con la frequenza ritenuta dal D.L., allo scopo di evidenziare, in tempo utile per le correzioni necessarie, eventuali anomalie e derive nelle caratteristiche di natura dei terreni o nei prodotti di trattamento;

h. *Costipamento: modalità operative e controlli di qualità* – Le modalità ottimizzate in campo prova prevedono: 4 passaggi di rullo complessivamente, le prime 2 (1 in andata + 1 in ritorno) ad alta vibrazione ($A_0 \cong 2,0$ mm) e bassa velocità ($V=2,5$ km/h circa), le altre due successive a vibrazione molto bassa e velocità $V=3$ km/h circa. I controlli di addensamento dovranno interessare l'intero spessore dello strato, per determinare la densità media, e perciò dovranno essere effettuati con volumometro di grandi dimensioni e diametro (V_{30}). Quando richiesto dal D.L. dovrà essere verificato pure l'addensamento della parte superiore e di quella inferiore dello strato; in questo caso si potrà impiegare il volumometro di piccolo diametro $\varnothing 16$. Nel corso delle prove di campo si è potuto verificare che, per le miscele terra-calce considerate e per spessori resi fino a 40 cm, i seguenti requisiti di densità secca richiesti dalle N.T.A integrative:

- media sull'intero spessore: $\gamma_d \geq 97 \% \gamma_{OPN}$;
- parte superiore o inferiore: $\gamma_d \geq 95 \% \gamma_{OPN}$;

possono essere ampiamente soddisfatti, nella totalità dei casi;

i. *Controlli di portanza (modulo di deformazione M_d – norma CNR 146/92)* – Considerate le prestazioni delle miscele terra-calce e la qualità dell'addensamento richiesto, in base a quanto emerso dalle prove di campo possono essere richieste nelle N.T.A. integrative soglie di M_d complessivamente superiori a quelle previste dal Capitolato ANAS e, precisamente:

- $M_d \geq 20$ MPa, per la bonifica del piano di posa del rilevato trattata in situ;
- $M_d \geq 40$ MPa, invece di 20 MPa, per gli strati di rilevato posti a più di 1,50 m dal piano di sottofondo,

Cod. elab.: 000GE224PT08XRH164A	<i>Titolo: TRATTAMENTO A CALCE</i> Relazione tecnica sullo studio per il	Data: Aprile 2014
Nome file: 6227 relazione tecnica sullo studio tratt a calce	reimpiego dei terreni argillosi prodotti dagli scavi mediante trattamento con calce	Pagina 49 di 50

- $M_d \geq 50$ MPa, per gli strati di rilevato posti a meno di 1,50 m dal piano di sottofondo (escluso lo strato di sottofondazione);
 - $M_d \geq 50$ MPa, per strati di bonifica trattati in situ, posti a meno di 1,50 m dal piano di sottofondo (escluso lo strato di sottofondazione della pavimentazione).
- j. *Controlli di spessore* – I controlli di spessore saranno effettuati per ciascuno strato mediante operazioni topografiche, rilevando un minimo di 15 punti ogni 1000 m² convenientemente distanziati. Il valore medio calcolato non dovrà differire di oltre il 10% dal valore di riferimento. Il coefficiente di variazione sulle misure effettuate dovrà risultare C.V. < 15%

Cod. elab.: 000GE224PT08XRH164A	<i>Titolo: TRATTAMENTO A CALCE</i> Relazione tecnica sullo studio per il	<i>Data: Aprile 2014</i>
Nome file: 6227 relazione tecnica sullo studio tratt a calce	reimpiego dei terreni argillosi prodotti dagli scavi mediante trattamento con calce	<i>Pagina 50 di 50</i>