

OSSERVATORIO



Prova di campo per i lavori di trattamento delle terre argillose con calce per lavori stradali e ferroviari

Field test of lime treatment of clayey soils for railways and road works

Prof. Ing. Camillo AIRÒ FARULLA^(*)
Dott. Ing. Bernardo CELAURO^(*)
Dott. Ing. Clara CELAURO^(*)
Dott. Ing. Marco ROSONE^(*)

1. Premessa

Si presentano i risultati di una prova di campo svolta su un rilevato sperimentale appositamente progettato e costruito per le finalità del trattamento con calce delle terre argillose. Tale prova di campo è stata sviluppata nell'ambito dei lavori di ammodernamento di una infrastruttura di grande comunicazione in Sicilia, per consentire il reimpiego delle argille di risulta dagli scavi previsti in progetti nella costruzione delle parti in rilevato della stessa. Il programma sperimentale messo a punto si è pertanto concentrato sull'identificazione e la caratterizzazione geotecnica delle argille di scavo al fine di definire le modalità esecutive del loro trattamento con calce.

Attraverso le prove in vera grandezza condotte, si è sviluppata una procedura di controllo che permette di definire le modalità di corretta esecuzione dei lavori di trattamento con calce dei terreni argillosi, con specifico riferimento alla loro caratterizzazione geotecnica, di fissare criteri e soglie prestazionali per l'accettazione delle lavorazioni in regime di qualità e di rigoroso rispetto dei principi di salvaguardia ambientale, nonché di intervenire in tempo utile per adottare correttivi in caso di derive di esecuzione.

2. Introduzione

Nell'ambito dei lavori per la costruzione dei rilevati stradali e ferroviari, per i quali casi le metodologie progettuali e costruttive sono identiche - e dunque le connesse problematiche - fino alla successiva realizzazione della specifica sovrastruttura, il controllo di qualità, inteso co-

1. Preface

The paper presents the results of a field test carried out on an experimental embankment especially designed and built for the purposes of the lime treatment of clayey soils. This field test was carried out with the aim of studying the use of clays, resulting from excavations, as construction material for embankments for works of modernization of a large communication infrastructure in Sicily. Hence the experimental programme carried out focused on the geotechnical characterization of excavated clay in order to define the manner of implementation of clay treatment with lime. By means of full-scale tests, a monitoring procedure was developed in order to define proper execution of lime treatment of clay soils, requirements and performance thresholds being set for acceptance of working in quality system and strict observance of the principles of environmental protection, as well as to intervene in time to take corrective action in case of drifts of execution.

2. Introduction

In the field of works for the construction of roads and railways, for which cases the design, construction methods and associated problems are identical until the subsequent construction of the superstructure, quality control, defined as the tests to be carried out "a posteriori" to ensure that the contractual requirements on the physical properties of the materials used in the work have been complied with by the executor, is considered significant but ineffective. More and more frequently, it is replaced by the adoption of methods and procedures intended to avoid penalty situations or rejection of un-

^(*) DICAM - Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, aerospaziale, dei Materiali - Università degli Studi di Palermo.

^(*) DICAM - Department of Civil, Aerospace, Environmental and Materials Engineering - University of Palermo.

OSSERVATORIO

me l'insieme delle verifiche da effettuare "a posteriori", per accertare che le prescrizioni contrattuali sulle caratteristiche fisiche meccaniche dei materiali posti in opera, siano state rispettate dall'esecutore, seppure significativo, è considerato ormai poco efficace. Progressivamente e sempre più frequentemente, esso viene sostituito con l'adozione di metodi e procedure che mirano ad evitare situazioni di penalità o di rifiuto di prodotti o manufatti non rispondenti ai requisiti di progetto, riducendo al minimo le operazioni di controllo, comunque indispensabili per l'accettazione delle opere nel rispetto dei requisiti contrattuali. In quest'ottica, la prova di campo preliminare all'esecuzione dei lavori costituisce uno strumento indispensabile per il controllo di qualità dei lavori di movimenti di terre, considerato che, oltre a permettere di valutare l'idoneità delle macchine e delle attrezzature rese disponibili, consente anche di mettere a punto le procedure esecutive e le modalità di controllo idonee per garantire la qualità (QA, quality assurance) delle opere da realizzare.

Nella costruzione dei rilevati con terreni granulari (sabbie e ghiaie) la prova di campo consiste essenzialmente in una prova di costipamento in sito, finalizzata alla regolazione degli spessori di stesa ed alla definizione delle modalità operative dei compattatori. Nel caso, invece dell'impiego dei terreni a grana fina e, in particolare, delle argille naturali o stabilizzate, la prova di campo acquista una rilevanza molto più significativa per le informazioni di carattere tecnico che devono essere ottenute e per il conseguente impegno organizzativo. Non sarebbe in questi casi del tutto improprio considerare la prova di campo alla stregua di una vera e propria ricerca sperimentale, che deve essere adeguatamente sviluppata sulla base di un apposito progetto.

Queste problematiche sono da tempo all'attenzione dei ricercatori del settore per la messa a punto delle procedure esecutive e dei criteri di accettabilità delle lavorazioni nella costruzione dei rilevati con l'impiego delle argille stabilizzate con calce.

Il trattamento con calce rappresenta una tecnologia avanzata ed applicata ormai da tempo [9], [10], [11], [12], [14], [15] che, modificando le proprietà fisico-chimiche delle argille, ne permette la riutilizzazione nelle costruzioni delle infrastrutture di trasporto, minimizzando allo stesso tempo il fabbisogno di idonei materiali da cava di prestito e la necessità del trasporto a rifiuto di queste terre, di norma di caratteristiche fisiche non adatte ad un loro impiego per gli scopi qui considerati. Oltre alla valorizzazione delle terre provenienti dagli scavi, tale tecnica consente di ottenere, quando ben governata, elevate caratteristiche meccaniche degli strati di sottofondo realizzati, di cui tenere conto per il dimensionamento delle sovrastrutture [13]. Tuttavia, nel caso del trattamento con calce, bisogna considerare che i processi di produzione delle miscele calce-argilla giocano un ruolo fondamentale sulle prestazioni dei materiali posti in opera.

Il trattamento con calce, infatti, per essere realizzato in modo efficace richiede attrezzature e macchine da can-

satisfactory products, minimizing the control operations that are essential for acceptance of works in accordance with the contractual requirements. In this context, a preliminary field test on the work is an indispensable tool for quality control of embankments, considering that it makes it possible to assess the suitability of the available equipment and, in addition, it allows one to develop enforcement procedures and control methods to ensure the appropriate quality assurance (QA) of the works.

In the construction of embankments with granular soils (sands and gravels), the field test is essentially compaction test in situ, aimed at regulating the thickness of paving and the definition of the operating modes of the compactors. In the case of the use of fine grain soils and, in particular, natural or stabilized clays, the field test acquires much greater importance for information of a technical nature and the resulting organizational commitment. In these cases it would not be totally inappropriate to consider the field trial equivalent to real experimental research, which must be properly carried out on the basis of a specific project.

These issues have long attracted the attention of researchers in the field for the development of enforcement procedures and criteria for acceptability in the construction of embankments with the use of clay stabilized with lime.

Lime treatment is an advanced technology that has been applied for many years [9], [10], [11], [12], [14], [15]. It modifies the physical and chemical properties of clays not suitable for the purpose and it allows their reuse in the construction of transport infrastructures, minimizing the need for suitable materials from borrow-pits and the need to transport waste soils to these lands. In addition to the exploitation of soil from the excavations, this technique allows one to obtain, when well-managed, high mechanical properties of the layers of the substrate achieved, to be taken into account for the design of the superstructure [13]. However, in the case of lime treatment, the production processes of lime-clay mixtures play an important role in the performance of the materials used.

Effective lime treatment requires construction equipment with performance appropriate to the purpose of the treatment, as well as rigorous methods in the execution of works and quality control of finished products.

Compared to traditional materials used in the construction of embankments and other earthworks, in lime treatment different levels of complexity due to multiple factors governing the technique are identified:

- *characteristics of the soil to be treated (quantity and nature of the clay fraction, presence of harmful chemicals, such as sulfates and organic substances which act negatively on the treatment);*
- *quality of the lime to be used for the treatment, not only*

OSSERVATORIO

riere specifiche e con prestazioni adeguate alle finalità del trattamento, oltre che metodi rigorosi nell'esecuzione dei lavori e nel controllo di qualità dei prodotti finiti.

Rispetto ai materiali tradizionali utilizzati nella costruzione dei rilevati e di altre opere in terra, entrano in gioco diversi livelli di complessità dovuti ai molteplici fattori che governano la tecnica e principalmente:

- le caratteristiche della terra da trattare (quantità e natura della frazione argillosa, eventuale presenza di sostanze chimiche nocive, quali solfati e materie organiche che agiscono negativamente sul trattamento);
- la qualità della calce da impiegare per il trattamento, non solo con riferimento al contenuto di CaO, ma anche alla finezza e reattività all'acqua, che condizionano prestazioni e tempi di produzione delle miscele;
- il dosaggio in calce, come definito negli appositi studi di laboratorio per la formulazione delle miscele, in relazione alle destinazioni d'uso ed alle prestazioni richieste;
- il contenuto d'acqua dell'argilla, sia per le esigenze di breve termine (posa in opera), sia per quelle di lungo termine (sviluppo delle resistenze meccaniche);
- l'omogeneità delle miscele, risultante sia dalla regolarità dello spandimento del legante in superficie, sia dalla uniformità degli spessori di stesa;
- la finezza delle miscele (granulometria e percentuale della frazione fina).

Alcuni dei fattori precedentemente elencati (i primi quattro) possono essere studiati tramite appositi studi di laboratorio; tuttavia, l'omogeneità e la finezza delle miscele - che fortemente influenzano le prestazioni meccaniche dei prodotti ed il loro sviluppo nel tempo - dipendono dai mezzi d'opera impiegati in cantiere, nonché dalle modalità operative adottate nelle varie fasi di produzione delle miscele.

Gli studi effettuati in laboratorio in fase di progettazione contengono, com'è noto, indicazioni indispensabili per le valutazioni di natura tecnica ed economica di progetto, nonché per le condizioni di esecuzione da specificare nelle norme tecniche di appalto. Essi, tuttavia, tengono conto di una situazione media presunta e, prima dell'esecuzione dei lavori, vanno necessariamente verificati in vera grandezza per tener conto delle effettive condizioni di cantiere, specialmente per quanto riguarda:

- variabilità delle caratteristiche fisiche naturali dei terreni provenienti dagli scavi;
- contenuto naturale d'acqua del materiale al momento dell'esecuzione dei lavori e le sue possibili variazioni in relazione alle condizioni climatiche ed ai procedimenti costruttivi;
- attrezzature e procedure di cantiere effettivamente impiegate per l'esecuzione dei lavori.

with reference to the CaO content, but also to fineness and reactivity to water, which affect performance and production times of mixtures;

- *lime content, as defined in appropriate laboratory studies for the formulation of mixtures, in relation to the intended use and performance requirements;*
- *water content of clay, for both short-term needs (laying), and long-term ones (development of mechanical strength);*
- *homogeneity of mixtures, resulting from both the regularity of the spreading of the binder on the surface, and the uniformity of the paving thickness;*
- *fineness of the mixtures (grain size and percentage of the fine fraction).*

Some of the factors listed above (the first four) can be studied by means of appropriate laboratory studies; however, the homogeneity and the fineness of mixtures - which strongly affect the mechanical performance of the products and their development over time - are dependent on the work vehicles used in construction, as well as the operational practices in the various stages of production of the mixtures.

Laboratory studies at the design stage of course contain the feedback information essential for the technical and economic feasibility of the project, as well as for the execution conditions to be specified in the technical standards of the contract. However, they take into account an average situation that, before the execution of the works, necessarily needs to be verified in full scale in order to take into account the actual conditions of the site, especially with regard to:

- *natural variability of the physical characteristics of soils from excavations;*
- *natural water content of the material at the time of execution of the work and its possible relation to changes in climatic conditions and construction procedures;*
- *equipment and procedures actually used for the construction of works.*

For these reasons, and because they allow one to optimize the use of large amounts of non-renewable natural resources, field tests are of extreme interest in order to define the proper mode of lime treatment of clay materials in road and rail construction.

With regard to these issues, the article presents the results of laboratory tests and full-scale field test carried out on an embankment constructed using experimental clay treated with lime. The research was carried out as part of the studies for the implementation of the modernization work of an important road infrastructure in Sicily, in order to use clays from the adjoining excavation areas in the construction of embankments.

OSSERVATORIO

Per tali motivi e poiché consentono l'ottimizzazione dell'uso di importanti volumi di risorse naturali non rinnovabili, sono di estremo interesse le ricerche di campo per la definizione delle modalità di corretto trattamento con calce dei materiali argillosi nei lavori stradali e ferroviari.

Con riferimento a tali problematiche, nell'articolo si presentano i risultati di prove di laboratorio e di campo in vera grandezza eseguite su di un rilevato sperimentale costruito utilizzando argille trattate con calce. La ricerca è stata sviluppata nell'ambito degli studi eseguiti per l'esecuzione dei lavori di ammodernamento di una importante infrastruttura stradale in Sicilia, allo scopo di impiegare nella costruzione dei rilevati le argille provenienti dalle contigue zone di scavo.

3. Progettazione della prova di campo

Lo scopo della prova di campo è quello di definire in dettaglio le caratteristiche dei materiali da impiegare e le modalità della loro posa in opera per il raggiungimento delle prestazioni richieste, in termini di resistenza, rigidità e durabilità. Con riferimento a tali modalità, in particolare, occorre definire e verificare con apposite misure di controllo le seguenti operazioni:

- la preparazione delle terre provenienti dalle zone di scavo, incluse le eventuali fasi di scarificazione, spietramento, trasporto nei luoghi di esecuzione e disgregazione delle zolle di argilla;
la stesa della terra in strati di spessore costante;
- lo spandimento del legante, previa regolazione della spanditrice mediante verifica del quantitativo di calce sparso in superficie;
- la miscelazione della terra con la calce, che, sulla scorta dei controlli di omogeneità e di finezza delle miscele, porta a definire il numero di passate della miscelatrice ed i tempi di attesa tra passate successive;
- le caratteristiche dei mezzi e le modalità di costipamento, con verifica dell'addensamento e delle prestazioni meccaniche delle miscele poste in opera.

Inoltre, le prove preliminari di campo risultano indispensabili per valutare l'influenza della variabile "tempo", allorché, per diversi motivi, il controllo delle prestazioni meccaniche delle opere realizzate viene differito ad un momento successivo a quello della loro esecuzione. Bisogna considerare, infatti, che la stabilizzazione meccanica progredisce nel tempo insieme a quella chimica, facendo registrare un aumento nel tempo delle proprietà meccaniche del materiale e, quindi, della portanza degli strati posti in opera [6]. Il diagramma di flusso proposto in fig. 1 sintetizza schematicamente le principali fasi degli studi di trattamento, dalla progettazione (nella quale vanno approfondite, tipicamente prevedendo indagini integrative ad hoc, le possibilità di trattamento delle terre di scavo, alla luce degli studi geologici e geotecnici di dettaglio del-

3. Proposal for a field trial design

Field trials are essential for defining the correct execution procedures in the case of lime treatment, not only with regards to compaction, but also to each single production phase that may affect the final performance of the structure. These phases, in detail, are:

- *soil excavation*
- *soil preparation (including soil surface scarification, removal of large blocks, transport to the site of interest and fragmentation of clogs);*
- *soil laying in layers of constant thickness;*
- *lime spreading, after regulation via accurate control of the quantity of the binder spread per square metre;*
- *mixing of the lime with the soil (based on controls on mixture homogeneity and fineness, the number of passes of the mixer and the waiting time needed between subsequent passes may be set);*
- *compaction, together with density controls and measurements of the mechanical performances of the mixtures laid.*

Furthermore, field trials are essential in order to evaluate the influence of the "time" variable, above all in the case of performance control postponed for a certain time after construction. In this connection, it should be remembered that mechanical stabilization proceeds with time, as does chemical stabilization, and that this implies an increase with time of the mechanical properties of the material and, therefore, of the overall bearing capacity of the structure [6].

The flow chart given in fig. 1 briefly details the main phases of this kind of studies, starting from the Design development stage (the possibilities of treatment of the excavation soils should be further explored providing additional ad hoc surveys, in the light of geological and geotechnical details of the formations affected by the route) to the phase that anticipates the construction and that corresponds to the design and construction of the trial embankment for field tests.

According to the technical guide to treatment of the Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes [18], in order to correctly design a field trial it is necessary to clearly define aims, quality criteria and modes for testing. This requires preliminary identification of the parameters of the trials to be assumed as variables and those to be kept constant, as well as the definition of the testing equipment to be used together with the number of tests to be carried out for each type of tests so that, if necessary, an acceptable dispersion coefficient of the variables studied may be obtained to associate with the average values determined during field testing.

The main variables to be considered in a study for lime treatment of fine soils are:

OSSERVATORIO

le formazioni interessate dal tracciato) a quella che precede l'esecuzione dei lavori e che si concretizza con la realizzazione di un cantiere sperimentale per la prova di campo.

Come specificato dalla guida tecnica al trattamento del Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA) [18], per progettare adeguatamente una prova di campo occorre definire chiaramente gli obiettivi della stessa, i criteri di qualità, gli strumenti e le modalità di misura. Ciò comporta che siano, preliminarmente, identificati i parametri da far variare e quelli da mantenere costanti, che vengano definiti i mezzi di misura da impiegare ed il numero di misure da eseguire per ciascuna grandezza di interesse, in modo che ai valori medi determinati possa essere associata una dispersione accettabile delle misure stesse.

Le principali variabili da considerare nel caso del trattamento con calce [17], sono:

- il contenuto d'acqua dell'argilla, da fare variare tra quello minimo, w_{min} , necessario per lo sviluppo dei processi pozzolanici (e ricavato dagli studi di laboratorio) e quello massimo prevedibile in sito, w_{max} , ovvero nell'intervallo di umidità rappresentativo delle condizioni ambientali che saranno operative in cantiere;
- il dosaggio in calce, in funzione delle destinazioni d'uso previste per le miscele e del contenuto d'acqua, secondo le indicazioni tratte dallo studio di formulazione delle miscele in laboratorio;
- lo spessore di stesa, per definire le condizioni ottimali di produzione in relazione ai mezzi disponibili per le fasi di miscelazione e di costipamento;
- il numero di passaggi della miscelatrice ed i tempi di attesa tra ciascun passaggio, per valutare la loro incidenza sulla finezza delle miscele;
- le modalità di costipamento (mezzi e loro condizioni di utilizzazione).

Il campo prove, inoltre, va localizzato su un'area di portanza ben caratterizzata e rappresentativa di quelle effettivamente interessate dai lavori. Con riferimento alla geometria, la lunghezza del campo prove potrà essere dell'ordine di 40-50 m, mentre la larghezza dovrà essere pari ad un multiplo (non inferiore a 3) della larghezza del compattatore che si impiegherà per la sua costruzione, dipendente dal numero di strisciate centrali che consentono di realizzare la variazione dei fattori presi in considerazione. Al riguardo si osserva che le misure dello stato di addensamento e le prove di carico possono essere condotte, per economia, solo nelle zone centrali e che altre misure (quali controlli di spandimento e di finezza di miscelazione) possono essere condotte anche nelle fasce laterali.

Le misure di densità devono riguardare sia la densità media del singolo strato, in un numero sufficiente di punti di misura, sia la densità della parte inferiore e superiore dello strato, al fine di evidenziare eventuali difetti di

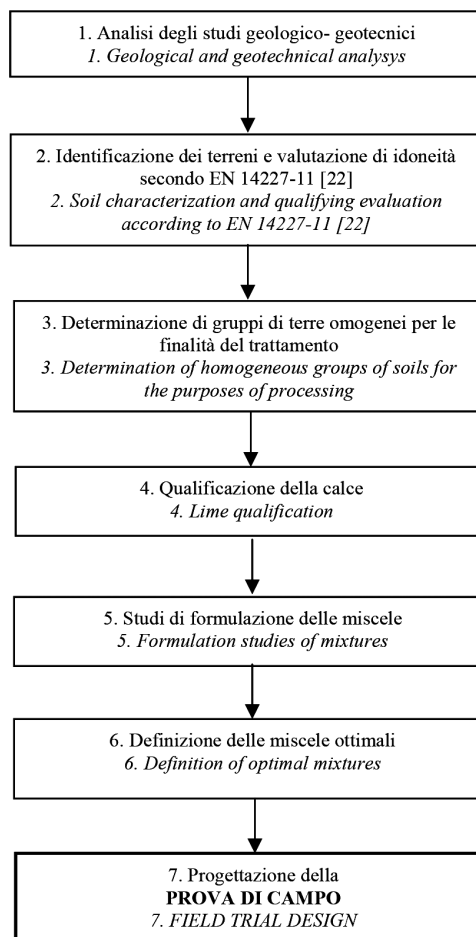


Fig. 1 - Quadro delle attività e delle prove per lo studio di trattamento.

Fig. 1 - Framework of the activities and tests for the study of treatment.

- the water content in the soil, to be allowed to range between the minimum content, w_{min} , as measured in the laboratory, that guarantees the development of mechanical strength and the maximum natural water content in the field, w_{max} , i.e. range of humidity that is representative of the possible condition during construction;
- the lime content in the mixture, as a function of its intended use and water content, according to the results of the mix-design study in the laboratory,

OSSERVATORIO

addensamento, confrontando i risultati delle varie misurazioni. Di conseguenza, vanno impiegati mezzi di misura della densità che siano in grado di valutare l'efficacia dei mezzi di compattazione sull'intero spessore (ad esempio, volumetri di adeguate dimensioni).

Anche gli spessori degli strati vanno sempre regolati considerando l'addensamento che è possibile ottenere con i mezzi meccanici a disposizione in cantiere. La loro uniformità dovrà essere controllata con particolare cura, considerata la forte ripercussione che le variazioni di spessore esercitano sul dosaggio in legante delle miscele poste in opera. Tradizionalmente, particolare attenzione va riservata ai controlli di omogeneità ed alla finezza delle miscele prodotte, da valutare con opportuni controlli di colore e granulometria apparente delle stesse.

Per il caso di studio, oltre alle indicazioni tipiche per le prove di campo in precedenza descritte, si è ritenuto opportuno eseguire misure di pH a diverse profondità di ciascuno strato. Tali misure, quando lette unitamente ai risultati delle misure di spandimento del legante e degli spessori degli strati posti in opera, sono in grado di fornire informazioni importanti circa l'omogeneità delle miscele ed il loro dosaggio in legante.

Viene proposto, inoltre, di valutare la qualità della fabbricazione delle miscele mediante misure di indice di portanza immediata – valutate tramite l'indice IPI [21] – ovvero effettuate su campioni di miscela prelevati in cantiere e successivamente compattati in laboratorio e sottoposti a prova di rottura entro 90' dalla miscelazione. Tali misure rappresentano, infatti, un parametro di valore globale delle prestazioni, perché in grado di evidenziare eventuali difetti o inadeguatezze delle lavorazioni precedenti. Esso, inoltre, ha carattere "preventivo", perché potendo essere valutato nel giro di qualche ora, permette di adottare in tempo utile i correttivi necessari alla prosecuzione dei lavori).

Infine, è necessario effettuare accurati controlli delle caratteristiche meccaniche dei materiali posti in opera mediante misure di resistenza meccanica valutata tramite prove di carico con piastra, associate a misure di umidità e densità.

4. La metodologia RFI

Tra le Norme tecniche di riferimento in Italia, la Specifica Tecnica "Trattamento delle terre con Calce – RFI" [16], prevede una complessa articolazione degli studi di formulazione e di ottimizzazione delle miscele per i rilevati ferroviari, con esclusione della parte superiore.

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

- identificazione del terreno, orientativamente come descritto dalla guida SETRA ed alle sue precedenti versioni [17], [18], ma con la determinazione dello spettro diffrattografico della terra in studio;

- the laying thickness, in order to define the optimal production conditions, depending on the laying and compaction equipment in the field;
- the number of passes of the mixer as well as the time elapsing between two consecutive passes, in order to evaluate their influence on the fine gradation of the final mixtures;
- the compaction procedures and modes (equipment to be used and its working conditions).

Furthermore, the site of the field trial has to be carefully chosen in order to be representative of those involved in the works [17], [18]. With respect to the geometry, the length of the trial embankment should be about 40 – 50 m, while its width should be a multiplier (not less than 3) of the working width of the compaction equipment, in relation to the number of central compacted tracks making it possible to carry out the programmed number of control tests. In this connection, control tests such as compaction tests and bearing capacity tests must only be located in the central area of the trial embankment, while other kinds of controls may also be located on the lateral side.

Density measurements should be carried out both in terms of average layer density, evaluated on a sufficient number of measurements, and density of the upper and lower part of the layer, also in order to identify possible compaction defects via analysis of the measured density gradient.

The layer thickness has to be set in relation to the final density that it is possible to achieve with the available equipment. Layer regularity should be carefully checked, in consideration of the strong influence that layer thickness has on the final binder content of the mixture laid.

Similarly specific attention should be paid to mixture homogeneity and fineness, to be evaluated via adequate tests such as visual inspection for assessing the uniform colour of the mixtures and its apparent gradation.

In this paper, the Authors suggest complementing the homogeneity test with pH measurements taken at different depths for each layer since these measurements are able to summarize homogeneity and binder dosage criteria (especially when binder spreading and layer thickness dispersions may occur).

Furthermore, it is proposed to evaluate the production quality of the mixture based on the Immediate Bearing Index (IBI) [21] measurements taken on samples of the mixtures directly obtained in the field, and then compacted in the laboratory and tested till rupture within 90' of mixing. In this connection, these measures provide a parameter for evaluation of mixture performance which is global (since it brings to light any possible defect deriving from the previous operations) and preventive in nature (due to its rapid execution, it allows one to adopt in time the needed remedial actions for carrying on with the works). Control tests on

OSSERVATORIO

- lo studio delle miscele sperimentali in laboratorio;
- realizzazione di uno specifico campo prove, per confermare i risultati dello studio di laboratorio e per ottimizzare il dosaggio in calce e le modalità di compattazione;

In relazione alla fase di studio delle miscele sperimentali, la Specifica Tecnica RFI prevede la determinazione del CIC, secondo ASTM 6276 [3] e, a partire da tale valore, con incrementi di 0,5% in calce, lo studio di almeno tre distinte miscele, valutandone

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

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

- prova di costipamento Proctor Standard [2];
- prova di resistenza a compressione semplice R_c (dopo 24 ore, 7 e 28 giorni di maturazione protetta e, pertanto, tutte riferibili, per quanto prima detto, alla sola prima fase di sviluppo della resistenza meccanica delle miscele terra-calce, ovvero quella di breve termine). Per tali prove, tuttavia, non vengono specificati valori di soglie ammissibili per esigenze specifiche;
- prove di rigonfiamento lineare e volumetrico, per le sole miscele con $IPI > 10$. Viene fissata una soglia ammissibile dell'1% senza, tuttavia, specificare il tipo di prova.

È sempre previsto che venga realizzato un apposito campo prove tenendo conto della destinazione d'uso prevista per la miscela, mettendo in opera, a diverse energie di compattazione (numero di passaggi di rullo), almeno due miscele tra quelle risultate idonee dal precedente studio di laboratorio. Ciò rappresenta l'aspetto peculiare di tale protocollo [5] che, per quanto prossimo a quello francese nella fase di laboratorio, ottimizza il progetto delle miscele terra-calce tramite prove di campo, conducendo misure di modulo di deformazione M_d , con prove di carico con piastra [8] su almeno 5 punti distinti per ciascuno strato costituente il rilevato di prova, a diversa età di maturazione della terra trattata in opera (a 0, 1, 3 e 7 gg dal costipamento). Sull'ultimo strato sono pure richieste misure di M_d a 30 gg dalla compattazione. A tali valori è previsto che vengano affiancati anche i valori di CBR in situ, nonché i controlli di densità e del contenuto d'acqua nelle aree prossime ai punti di misura del modulo su piastra.

mechanical performances have to couple bearing capacity tests on in situ layers with moisture and density measurements taken in the same location.

4. RFI methodology

In Italy, the National Agency for Railways (RFI) applies an internal Technical Specification [16] that is based on a complex design methodology structured as follows:

- *soil identification, basically as described by the SETRA guide and its previous versions, but including a X-ray diffractographic examination.*
- *laboratory study of the soil-lime mixtures. The mechanical test here considered is the CBR with modified effort [3] and mixtures tested after 7 or 28 days of curing in air, followed by 4 days of soaking. The IBI is also considered for determining the minimum lime dosage that ensures $IBI = 10$, independently of the plasticity of the soil. Furthermore, a standard Proctor compaction study is also required, together with the Unconfined Compressive Strength (UCS) (after 24 hours, 7 days and 28 days of curing in air). As far as UCS testing is concerned, it should be noticed that the RFI Specification does not set any specific requirement in relation to the intended use of the mixture. Furthermore, both linear and volumetric swelling have to be determined, for the mixture with $IBI > 10$: an admissible limit of 1% is given, without specifying the testing standards to comply with.*
- *full-scale in situ testing on a trial embankment, in order to validate the laboratory results for the optimum lime dosage and the laying conditions. At least two optimized mixtures have to be laid with different compaction effort (number of roll passes). This is a peculiar aspect of this Specification [5] which is largely inspired by the French method but defines the final mixture via in situ testing for determining the deformation modulus M_d with loading plate tests [8] on at least 5 different locations of each layer of the trial embankment, at different curing times (0, 1, 3 and 7 days after compaction). On the upper layer, the deformation modulus after 30 days has to be determined, together with in situ CBR, density controls and moisture content determination on areas close to the modulus testing.*

It is clear that this procedure is money and time consuming, since at least 6 weeks are necessary for the third phase alone, together with the availability of laboratory and field equipment. This kind of method may be justified only for major works, such as railways, where large volumes of homogeneous soil have to be treated. In the case of minor construction sites, this method is not applicable.

OSSERVATORIO

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

5. Il caso di studio

Nel corso dei lavori di ammodernamento di una infrastruttura (stradale) di grande comunicazione in Sicilia si è valutata la possibilità del reimpiego, previo trattamento con calce, dei terreni argillosi provenienti dagli scavi, predisponendo i necessari studi di laboratorio e di campo, in accordo alle considerazioni espresse nel precedente paragrafo e sintetizzate nel diagramma di fig. 1. Infatti, in accordo al p.to 1 della predetta figura, a seguito dell'analisi degli studi geotecnici di progetto si è disposto un piano di indagini di approfondimento che portasse, attraverso ricognizione specifica dei luoghi, alla qualificazione nel profilo geotecnico-stratigrafico dei terreni di scavo idonei al trattamento. Ciò ha comportato il prelievo dei campioni di terra rimaneggiata per le analisi e gli studi di laboratorio previsti al p.to 2 di fig. 1.

In particolare, 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 i successivi eventuali studi di formulazione delle miscele (per la determinazione del dosaggio in calce o in calce e cemento) previsti al p.to 5 di fig. 1. 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 previsto anche di effettuare prelievi da sottoporre ad analisi chimica delle acque.

Sulla base di tale studio, si sono determinati i gruppi di terra da considerarsi omogenei per le finalità del trattamento. Tra questi, si è messa a punto una specifica prova di campo, della quale si riferisce con dettaglio nel presente articolo, per le terre più rappresentative per caratteristiche di natura e volumi coinvolti e provenienti prevalentemente dai lavori di apertura di una galleria artificiale. I campioni rappresentativi dei siti di scavo sono quelli denominati C1 e C2, prelevati a diverse profondità dallo stesso pozzetto esplorativo, le cui caratteristiche geotecniche e chimiche sono riepilogate in tabella 1.

5. The case study

In the course of modernization works for a big communication infrastructure (road) in Sicily the possibility of re-use, after treatment with lime, of clayey soils from excavations was evaluated, the necessary laboratory and field studies being provided, according to the considerations made in the previous section and summarized in the diagram in fig. 1. In this connection, according to point 1 of the figure above, after the preliminary geotechnical analysis a plan for intensive investigations was prepared for the purpose of recognition of soils suitable for treatment. Along the route, in the areas interested by excavation, many samples were collected for characterization and laboratory tests, as recalled at the 2nd point in the scheme in Figure 2, were carried out.

In particular, excluding the topsoil, for each survey site, a sample was taken for each layer of substantially homogeneous lithology, according to the stratigraphic situation, highlighted by the geotechnical studies of the project. Each sample was sufficient to perform both the preliminary tests for geotechnical characterization, and the subsequent possible studies for formulation of the mixtures (for the determination of the dosage in lime or lime and cement) provided at point 5 of in fig. 1. During sampling, particular emphasis was placed on evaluation of the water content of the soil in situ. Furthermore, in the case of noticeable presence of water, chemical analysis of the water were carried out, too.

Based on this study, groups of soil were defined and considered homogeneous for the purposes of treatment. Among these, a specific field test was carried out, presented in this paper, on the soil most representative for characteristics of nature and volumes involved, excavated mainly from the work for opening an artificial tunnel. The representative samples of the excavation sites are called C1 and C2, taken at different depths from the same exploratory trench, whose geotechnical characteristics and chemical properties are summarized in table 1. The subsequent experimental programme in the laboratory was carried out on specimens made up of equal proportion of these samples, in order to take into account the stratigraphy of the site, the modes of extraction and the volumes involved during soil excavation.

This mixed sample ends up being very homogenous and, in terms of gradation, having chemical characteristics and plasticity suitable for lime treatment, with no need of other hydraulic binder, even for the intended use of the sub-foundation. The specific gravity of the sample is on average equal to a $\gamma_s = 26.8 \text{ kN/m}^3$. From the mineralogical point of view, based on x-ray diffraction analysis, the prevalent clay minerals were qualitatively identified as follows: about 40 % illite; 30% smectite and 30% kaolinite. Other minerals such as quartz, calcite, feldspar and dolomite were also evident. Based on the previous results, the soil studied may be classified as an inorganic highly plastic clay, with normal activity ($I_p = 0.95$).

OSSERVATORIO

TABELLA 1 - TABLE 1

CARATTERISTICHE GEOTECNICHE E CHIMICHE DEI CAMPIONI DEL SITO MAGGIORMENTE RAPPRESENTATIVO
SOIL CHARACTERISTICS IN THE MOST REPRESENTATIVE SITE OF EXCAVATION

Sigla Sample	Profondità di prelievo Depth (m)	Umidità naturale Water content [%]	Passante a 0,063 mm Passing $p_{0,063\text{ mm}}$ [%]	Limite di liquidità Liquid li- mit [%]	Limite di plasticità Plastic li- mit [%]	Indice di plasticità Plasticity index [%]	Indice di consistenza Consistency index	Solfati SO_4 Sulph. content SO_4 [%]	Sostanza organica Organic matter content M.O. [%]	Classe AASHTO Class AASHTO	Contenuto iniziale in calce Initial consump- tion of lime [%]
C1	4,00	25,211	98,7	53,05	22,32	30,73	0,91	0,22	2,46	A7-6 (20)	2,7
C2	8,00	22,453	96,1	43,54	19,67	23,87	0,88	0,12	3,12	A7-5 (20)	1,6

La successiva sperimentazione di laboratorio, preliminare alla prova di campo in vera grandezza, è stata condotta su un campione costituiti in parti uguali, in peso, dai precedenti campioni C1 e C2 perché, considerata la stratigrafia dei siti, le modalità di estrazione previste ed i volumi coinvolti in fase di scavo, tale campione "misto" risulta rappresentativo delle terre da trattare in opera sia per la realizzazione della prova di campo, sia per la successiva fase di esecuzione dei lavori. Il campione così ricostituito risulta ben omogeneo e, per caratteristiche granulometriche, chimiche e di plasticità, rispondente ai requisiti per la stabilizzazione con calce, senza necessità di apporto di altro legante idraulico, anche per il caso di miscele destinate a strati di sottofondazione.

Il peso specifico dei grani è risultato mediamente pari a $\gamma_s = 26.8 \text{ kN/m}^3$. Dal punto di vista mineralogico, da analisi diffrattometriche risulta che le particelle argillose sono costituite per il 40% circa da illite e per il 30% circa sia da smectite che da caolinite. Sono presenti nel complesso anche quarzo, calcite, feldspati e dolomite. Sulla base dei precedenti risultati, il materiale in studio si può classificare come un'argilla ad alta plasticità, inorganica, con attività normale ($I_a = 0.95$).

6. Studi preliminari di laboratorio

In accordo ai p.ti 4 e 5 dello schema di fig. 1, gli studi preliminari di laboratorio eseguiti per le finalità della prova di campo hanno riguardato la caratterizzazione della calce utilizzata e lo studio di formulazione delle miscele, condotto con valutazione della compattabilità Proctor e delle prestazioni meccaniche delle stesse in relazione ai campi d'impiego [7].

Tenuto conto dei prevedibili impieghi delle miscele e dei risultati di Consumo Iniziale di Calce - CIC [3] riportati in tabella 1, per gli studi di mix design si sono adottati tre dosaggi in calce pari al 2,0%, 2,8% e 3,5%, rappresentativi di quelli tipici utilizzati per miscele destinate alla costruzione degli strati dei rilevati, sia per la parte superiore (Parte Superiore dei Rilevati - PSR) - ad esclusione del coronamento - sia per la parte inferiore, (Parte Inferiore dei Rilevati - PIR).

6. Preliminary laboratory studies

In accordance with points 4 and 5 in fig. 1, the preliminary studies dealt with the characterization of the lime used and the mix design of the mixtures via evaluation of their Proctor compaction properties as well as of their mechanical performances, in relation to the intended use [7].

Therefore, in consideration of the potential use of the mixtures as well as of the results in terms of minimum lime content [3] summarized in table 1, three lime contents were selected, set equal to 2.0%, 2.8% and 3.5%, in order to be representative of those typically adopted for mixtures to be used for embankment layers, both in the lower part and in the upper part - excluding the capping layer.

In any case, with reference on the evolution in time of the mechanical performance of the mixtures, the authors presented the first results of a laboratory study [1], still in progress, concerning the stiffness, the shear strength and the microstructure, measured at different curing times, of the same lime treated clay.

6.1. Lime characterization

The lime used for this study is a quicklime, certified as CL 90-Q according to the EN 459-1 Standard [19], highly reactive to water and with high fineness (Category 1). The results of the qualification tests are summarized in table 2.

6.2. Standard proctor compaction and Immediate Bearing Index tests (IBI)

The results of Standard Proctor compaction [2] as a function of water and lime content in the mixtures are plotted in fig. 2. The compaction results are essential to identify the reference values to be assumed for the construction phase: maximum dry density, MDD, and minimum moisture content, w_{min} , as needed for the correct hydration of the lime and the development of pozzolanic reactions fig. 3 shows the results of tests of immediate

OSSERVATORIO

In ogni caso, per un maggiore approfondimento sull'evoluzione nel tempo delle prestazioni meccaniche delle miscele si rinvia allo studio di laboratorio condotto dagli Autori [1], parte del quale ancora in corso di esecuzione, nel quale vengono presentati i primi risultati riguardanti la rigidità, la resistenza al taglio e la microstruttura delle medesime argille trattate con calce, valutate a diversi tempi di maturazione.

6.1. Prove di qualificazione della calce

La calce utilizzata è una calce viva, certificata CL 90-Q secondo UNI EN 459-1 [19], caratterizzata da elevata reattività all'acqua e finezza di macinazione (Categoria 1). I risultati delle prove di qualificazione richieste sono riportati nella seguente tabella 2.

6.2. Prove di compattabilità Proctor Normale e di Portanza Immediata IPI

I risultati delle prove di costipamento Proctor Normale [2] al variare dell'umidità ed in funzione dei dosaggi in calce sono diagrammati in fig. 2. Tali dati sono fondamentali per la determinazione dei valori di riferimento utili in fase di costruzione: densità secca massima, γ_{OPN} (per i controlli di addensamento), ed umidità minime di costipamento, w_{min} , necessarie per l'idratazione della calce e lo sviluppo dei processi pozzolanici. In fig. 3 sono invece riportati i risultati delle prove di portanza immediata IPI secondo standard UNI EN 13286-47 [21], fondamentali per la valutazione delle prestazioni di breve termine, richieste cioè in fase di esecuzione dei lavori.

I valori in corrispondenza dell'ottimo dello studio di compattabilità Proctor (densità secca massima, γ_{OPN} , e umidità ottimale, w_{OPN}) per la terra oggetto di studio sono riassunti in tabella 3. Si ricorda che le umidità minime perché il trattamento possa aver luogo con successo secondo la metodologia di mix design del SETRA [17] sono quelle che si ottengono imponendo che il contenuto d'acqua finale della terra trattata al dosaggio stabilito sia pari a $w_{min} \approx 0.9 w_{OPN}$. Ciò comporta che la terra prima del trattamento deve essere portata, con i necessari apporti d'acqua, ad umidità ancora superiori a quella minima identificata (in funzione del tipo di calce usata), sufficiente a consentire

TABELLA 2 - TABLE 2
CARATTERISTICHE DELLA CALCE VIVA UTILIZZATA
RESULTS OF CHARACTERIZATION TESTS
ON LIME USED

Passante al setaccio da 2 mm Percent passing to sieve of opening size 2 mm	100%
Passante al setaccio da 0,2 mm Percent passing to sieve opening 0.2 mm	99,0%
Passante al setaccio da 0,09 mm Percent passing to sieve opening 0.09 mm	86,2%
Passante al setaccio da 0,075 mm Percent passing to sieve opening 0.075 mm	81,3%
CaO ed MgO totale Total (CaO+ MgO)	95,8%
di cui MgO amount of MgO	1,3%
Calce disponibile CaO Available lime CaO	94,5%
Reattività all'acqua (t_{60}) Water reactivity (t_{60})	3'

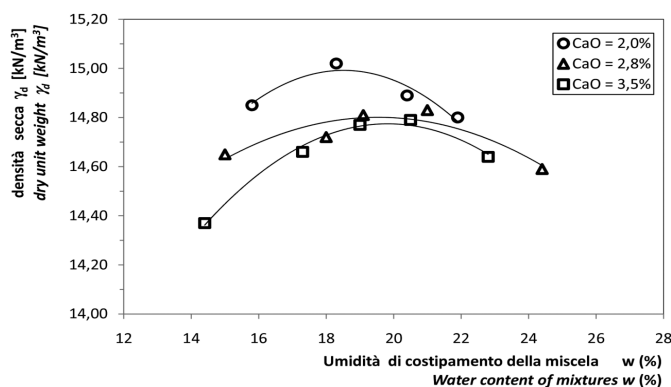


Fig. 2 - Risultati delle prove di addensamento Proctor Normale, al variare della percentuale di calce e del contenuto d'acqua delle miscele terra-calce.

Fig. 2 - Results of Standard Proctor Compaction as a function of water and lime content in the mixtures.

TABELLA 3 - TABLE 3

RISULTATI DELLO STUDIO DI COMPATTABILITÀ PROCTOR NORMALE
ED UMIDITÀ MINIME DI RIFERIMENTO
NORMAL PROCTOR RESULTS AND MINIMUM WATER CONTENT

Dosaggio in calce Lime content CaO [%]	Densità secca massima γ_{OPN} Dry unit weight $\gamma_{D,OPN}$ [kN/m³]	Umidità ottimale w_{OPN} Optimum water content w_{OPN} [%]	Umidità minime delle miscele w_{min} Minimum water content of mix- tures w_{min} [%]
2,0	14,98	18,5	16,5
2,8	14,80	20,0	18,0
3,5	14,77	20,5	18,5

OSSERVATORIO

lo spegnimento della calce che ad essa viene aggiunta.

6.3. Prove di portanza CBR(4i) e studio di tenuta all'acqua delle miscele

Queste prove, analoghe alle precedenti di Portanza Immediata IPI ed i cui risultati sono riportati nelle figg. 4 e 5, sono state effettuate su campioni compattati con modalità Proctor Normale e sottoposti a rottura dopo 4 giorni di immersione in acqua, con contestuale rilevamento del rigonfiamento nel periodo di immersione.

La tenuta all'acqua (ovvero l'adeguato comportamento delle terre trattate in opera in caso di improvvise e prolungate venute d'acqua per eventi meteorici avversi o altro) delle miscele destinate alla PSR, che rispettino la soglia minima di Portanza Immediata richiesta ($IPI > 10\%$), è valutata positivamente secondo la metodologia [17] se, per le miscele di pari dosaggio in calce e contenuto d'acqua, risulta soddisfatta la relazione (1), graficamente rappresentata nelle figg. 6 e 7:

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

Considerate le elevate prestazioni meccaniche ottenute, si è voluto indagare sulla possibilità di impiego anche in strati di sottofondazione delle miscele col maggior dosaggio in calce ($CaO = 3,5\%$). A tal fine sono state effettuate prove accelerate di Rigonfiamento volumetrico- (Gv) secondo UNI EN 13286-49 [20] per porre i risultati a confronto con i valori massimi ammissibili previsti dalla Guida Tecnica del SETRA [18]. I risultati di rigonfiamento ottenuti, riportati in tabella 4, evidenziano che, nel caso di contenuti d'acqua pari al 20% ed al 22%, le miscele considerate possono essere impiegate in strati di rilevato, poiché risulta $Gv < 10\%$, ma non in strato di sottofondazione, risultando $Gv > 5\%$.

L'esame complessivo dei risultati dello studio di formulazione condotto in laboratorio, come può riscontrarsi dai confronti di portanza forniti in fig. 3, ha portato a concludere che:

- 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; tuttavia, il dosaggio in calce determinato tramite il CIC, mediamente pari a circa il 2%, deve ritenersi un minimo assoluto;

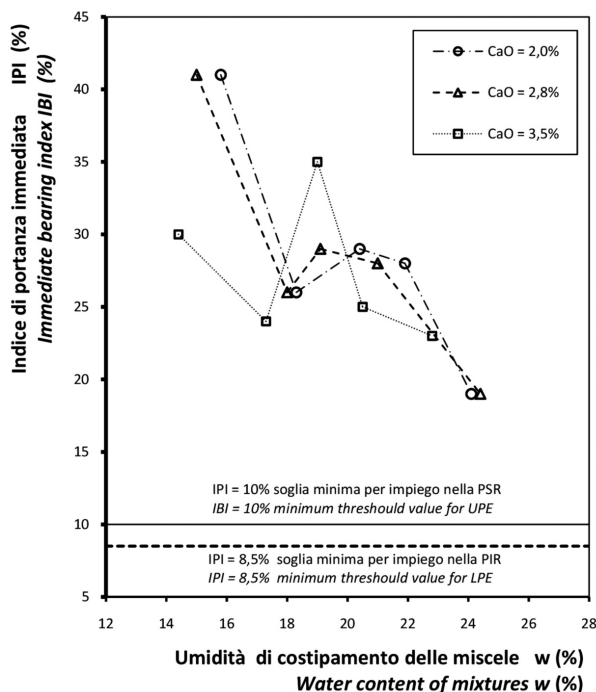


Fig. 3 – Risultati delle prove di portanza immediata, IPI, al variare della percentuale di calce e del contenuto d'acqua delle miscele terra-calce.
Fig. 3 - Results of immediate bearing index tests, IBI, as function of content in lime and water content of mixtures.

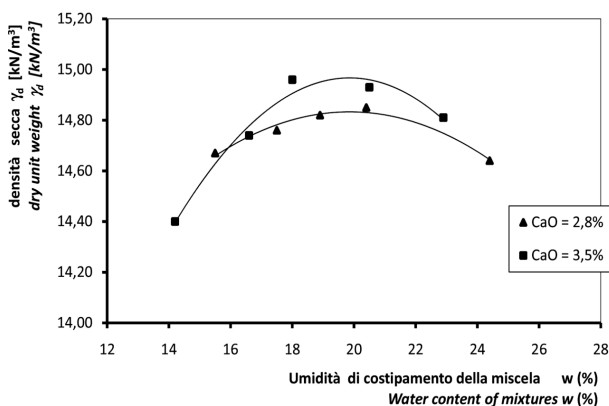


Fig. 4 – Risultati delle prove di addensamento Proctor Normale, al variare della percentuale di calce e del contenuto d'acqua delle miscele terra-calce, condotte sui campioni per prove cbr(4i).
Fig. 4 - Results of Standard Proctor Compaction as a function of water and lime content in the mixtures, carried out on samples subjected to cbr(4i) tests.

OSSERVATORIO

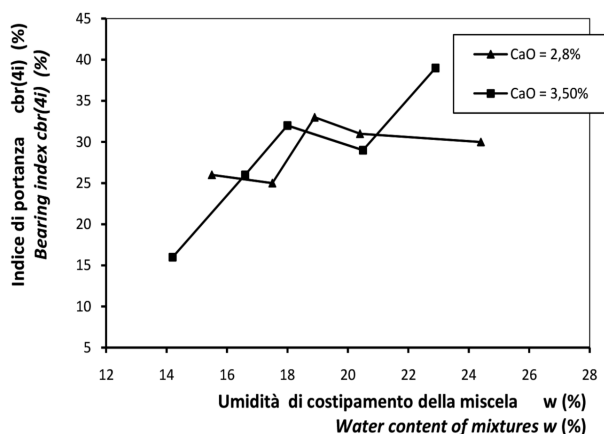


Fig. 5 – Risultati delle prove di portanza cbr(4i), dopo 4 giorni di immersione in acqua, variare della percentuale di calce e del contenuto d'acqua delle miscele terra-calce.

Fig. 5 – Results of cbr(4i) bearing tests, after 4 days of soaking in water, as a function of lime and water content of mixtures.

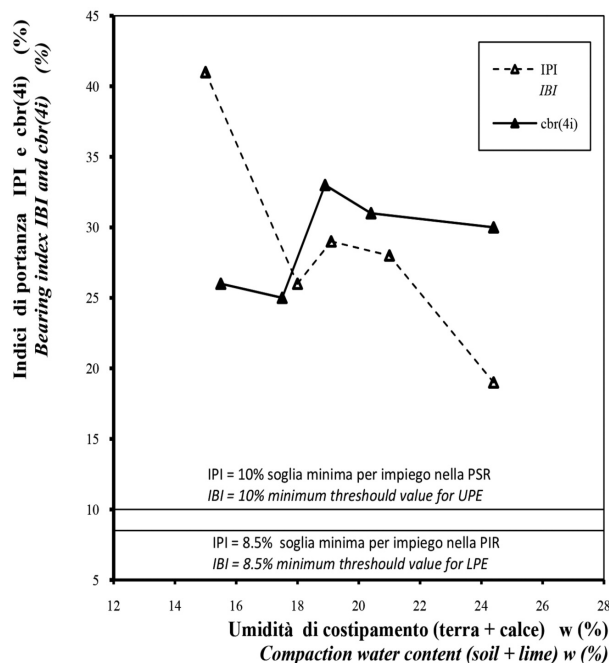


Fig. 6 – Confronto tra i risultati delle prove di portanza IPI e cbr(4i), al variare del contenuto d'acqua delle miscele terra-calce (CaO = 2,8 %).

Fig. 6 – Comparison between Immediate Bearing Index IBI and bearing tests cbr(4i), as a function of the water content of the mixtures (CaO = 2,8 %).

bearing index IBI [21] standard, which are essential for short-term performance evaluation, required during the execution of the works.

The Proctor optimum values for the soil studied are given in table 3. The minimum moisture contents in Table 4 are determined in accordance with the French mix design methodology [17], i.e. by assuming that the final moisture content of the treated soil is equal to $w_{MIN} \approx 0.9$ OWC. This implies that the soil must be humidified before, with the necessary intake of water, at water content still higher than the minimum identified (as a function of the type of lime used), sufficient to allow the extinction of the lime that is added to it.

6.3. Cbr(4i) bearing tests and water resistance of mixtures

These tests, similar to previous Immediate Bearing Index tests, are carried out on Standard Proctor compacted samples subjected to failure after 4 days of soaking in water. During the soaking period, the swelling strain was also measured. The test results are reported in figg. 4 and 5, where compaction and bearing characteristics are showed as a function of the compaction water content and lime content of the mixtures.

According to [17], the water resistance of mixtures, having an immediate bearing index higher than the minimum value requested equal to 10%, designed for the upper part of the embankment is evaluated with a positive judgment if, for mixtures with the same CaO and water content, the following relationship is satisfied:

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

This relationship is graphically represented in figg. 6 and 7 where the Immediate Bearing Index, IBI, values are compared to the bearing of mixtures after 4 days of soaking in water, cbr(4i), for the two CaO contents useful for use in the upper part of embankment. The minimum performance threshold requested, for the different possible uses, are also plotted in the figure.

Considering the high mechanical performance obtained, it was decided to investigate whether the material could also be used as a sub-foundation layer. Hence mixtures with CaO content equal to 3.5 % were subjected to accelerated volumetric swelling tests (Gv) according to UNI EN 13286-49

OSSERVATORIO

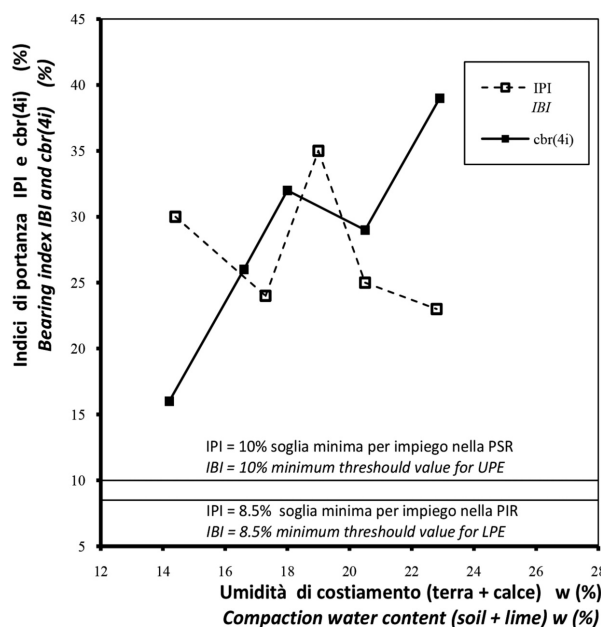


Fig. 7 – Confronto tra i risultati delle prove di portanza IPI e cbr(4i), al variare del contenuto d'acqua delle miscele terra-calce (CaO = 3,5 %).

Fig. 7 – Comparison between immediate bearing index IBI and bearing tests cbr(4i), as a function of the water content of the mixtures (CaO = 3.5 %).

- 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, per i contenuti d'acqua prevedibili, con riferimento ai requisiti di prestazione meccanica e di tenuta all'acqua richiesti per questi strati;
- c) per l'impiego in strati di sottofondazione, le prestazioni meccaniche riscontrate risultano superiori ai requisiti minimi richiesti. Tuttavia, considerati i valori di Rigonfiamento Volumetrico, Gv, deve escludersi l'impiego di tali miscele nello strato posto immediatamente al di sotto della pavimentazione.

7. La progettazione della prova di campo

7.1. Caratteristiche di progetto del campo prove

Sulla base dei risultati dello studio di laboratorio ed in accordo con la metodologia prima proposta, è stata progettata una prova di campo, tale da realizzare un buon compromesso tra l'impegno economico della sperimentazione e le variabili da esaminare.

Nel caso specifico, inoltre, è risultato di particolare interesse definire le norme di qualità (criteri e soglie pre-

[20]). The test results, showed in table 4, show that mixtures with moisture equal to 20 and 22% can be used in embankment layers but cannot be used in sub-foundation layers because Gv > 5%.

The analysis of the results of laboratory lime treatment, as showed in fig. 3, lead to the conclusion that:

- a) for embankment layers at a lower depth from the sub-foundation level than 1.50 m (Lower Part of Embankment LPE), the designed mixtures amply satisfy the bearing requirements but the estimated minimum lime content, on average equal to about 2%, should be considered an absolute minimum;
- b) for embankment layers at a higher depth from the sub-foundation level than 1.50 m (Upper Part of Embankment UPE), mixtures with lime content equal to 2.8% and designed moisture amply satisfy the bearing and volumetric swelling requirements
- c) for sub-foundation layers, the mechanical performances of the designed mixtures are higher than the minimum requirements even though this mixtures should not be used in layers immediately below the pavement because of the volumetric swelling, Gv.

7. Field trial design

7.1. Design features of field trial

In order to achieve a good compromise between variables to be examined and the cost of the experimentation, on the basis of preliminary laboratory studies and according to the suggested method a field trial was designed.

In this case, too, definition of quality standards (crite-

TABELLA 4 - TABLE 4

RISULTATI DELLE PROVE DI RIGONFIAMENTO VOLUMETRICO, Gv, PER LE MISCELE CON CaO = 3,5%
Gv TEST RESULTS, CaO = 3.5%

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

OSSERVATORIO

stazionali) da specificare ad integrazione dei capitolati tecnici, dato che la tecnica di trattamento con calce non era stata prevista nei lavori di contratto.

Le caratteristiche geometriche della sezione di rilevato sono state mantenute costanti in senso longitudinale; la predisposizione di due strisciate centrali ha permesso di differenziare le modalità di costipamento e, quando richiesto, le umidità delle miscele. In questo caso sono state considerate due umidità nettamente distinte: l'una prossima a w_{OPN} e l'altra pari a circa $w_{OPN} + 4\%$.

Per essere rappresentativo delle diverse parti che compongono i rilevati (fondazione, parte inferiore e superiore), il rilevato di prova risulta costituito da:

- una fondazione realizzata in due strati, il primo dei quali ottenuto asportando i primi 40 cm di terreno vegetale e trattando con calce il terreno sottostante in situ per uno spessore di 35 cm. Il secondo, così come tutti i soprastanti, è stato realizzato mediante la tecnica del trattamento in rilevato della terra ivi trasportata e stesa in strati di spessore costante. Per la fondazione è stato previsto un dosaggio del 2% di CaO, pari al minimo identificato dalle prove di CIC;
- uno strato, dello spessore di 40 cm, di terra trattata con 1,6% di CaO, rappresentativo di eventuali casi di sottodosaggio in calce;
- uno strato, dello spessore di 30 cm, di terra trattata con 2,0% di CaO, rappresentativo degli strati destinati alla costruzione della PIR;
- uno strato di 35 cm di terra trattata con calce con dosaggio del 2,8%, rappresentativo degli strati della PSR.

Quanto alla geometria del corpo del rilevato, questo presenta:

- lunghezza di poco superiore a 50 metri;
- larghezza di 8 metri alla base (4 strisciate di 2,00 m ciascuna), ridotta, dopo la costruzione del rilevato, a 6,20 m in testa, per sagomatura dei fianchi (scarpata 1:1) mediante taglio delle strisciate laterali.
- altezza totale fuori terra pari a 105 cm circa, oltre la bonifica di fondazione di 75 cm.

Longitudinalmente, il raccordo al piano di campagna è stato realizzato con rampe di estremità con pendenza non superiore al 25%.

Quanto alle variabili costruttive considerate, queste sono state:

- il dosaggio in calce, considerando quelli ottimizzati in laboratorio (2,0 e 2,8%), oltre ad uno rappresentativo di casi di sottodosaggi per eccesso di spessore steso;
- il contenuto d'acqua delle miscele, regolato tramite successivi apporti d'acqua in fase di miscelazione per valutare anche condizioni con eccessi d'acqua;
- lo spessore dello strato trattato, variabile da 30 a 40 cm;
- le modalità di miscelazione e di costipamento.

ria and performance thresholds) in addition to technical specifications was particularly interesting because the technique of lime treatment was not contemplated in the contract.

The geometric characteristics of the section were maintained constant in the longitudinal direction. The preparation of two central strips made it possible to differentiate the compaction methods and, when required, the humidity of the mixtures. In this case two clearly distinct humidity values were considered: one close to w_{OPN} and the other equal to about $w_{OPN} + 4\%$

To be representative of the different parts (foundation, lower and upper part), the experimental embankment was constituted by the following:

- *a foundation made of two layers; the first was obtained by removing 40 cm of topsoil and treating the underlying soil with lime in situ for a thickness of 35 cm. The second, as well as all the upper layers, was created with the technique of embankment treatment of soil transported there and applied in layers of constant thickness. For the foundation a lime content equal to 2% was set, as the minimum identified by the evidence of initial consumption of lime (ICL);*
- *a layer of soil 40 cm thick treated with 1.6% CaO, representative of possible cases of lime underdosing;*
- *a layer of soil 35 cm thick treated with 2.8% CaO, representative of the upper part of the embankment.*

With regards to the geometry of the body of the embankment, it presented the following feature:

- *length of over 50 m;*
- *width of 8 m (4 strips of 2.00 m each) reduced after the construction of the embankment to 6.20 m at the head by means of shaping of lateral strips (1:1 slope); total height above ground of 105 cm, in addition to the treatment of the foundations for 75 cm.*

Longitudinally, the connection to the ground surface was made with end ramps with a slope no greater than 25%.

With regards to the constructive variables considered, these were the following:

- *the dosage in lime, whereas those optimized in the laboratory (2.0 and 2.8%), as well as one representative case of underdosing for excess thickness laying;*
- *the water content of the mixtures, adjusted by subsequent adding of water in the mixing step to also evaluate conditions with excess water;*
- *the thickness of the treated layer, varying from 30 to 40 cm between the different layers;*
- *the methods of mixing and compaction.*

Below, in table 5, the construction methods selected for the experimental embankment detected, distinct for the

OSSERVATORIO

Di seguito, in tabella 5, si riepilogano le modalità costruttive selezionate per il rilevato sperimentale, distinte per le strisciate A, B, C e D di ciascuno strato.

Lungo ciascuna strisciata, come può notarsi, si sono mantenute costanti le variabili considerate in progetto

strips A, B, C and D of each layer are summarized. In this connection, along each of them the variables considered in the project are kept constant in order to assess the effect of the variability of the factors of interest, through control tests conducted mainly in the center stripes.

TABELLA 5 - TABLE 5

MODALITÀ COSTRUTTIVE SELEZIONATE PER IL RILEVATO SPERIMENTALE
CONSTRUCTIVE METHODS OF EXPERIMENTAL EMBANKMENT

Strato Layer		Dosaggio in CaO <i>Lime content</i>	Spessore (cm) <i>Thickness (cm)</i>		Numero di passaggi di rullo <i>Number of roller passes</i>	
N	Posizione <i>Position</i>		Previsto <i>Expected</i>	Reso <i>Obtained</i>		
1	Bonifica (trattata in situ) <i>Treated foundation (in situ soil)</i>	2,0%	35,0	35,0	A	$2 N_A + 2 N_B$ $2 N_H + 2 N_L$
					B	
					C	$3 N_A + 3 N_B$ $3 N_H + 3 N_L$
					D	
2	Bonifica (strato riportato) <i>Treated foundation (reported soil)</i>	2,0%	30,0	30,2	A	$4 N_A$ $4 N_H$
					B	$2 N_A + 2 N_B$ $2 N_H + 2 N_L$
					C	$2 N_A + 2 N_M + 2 N_B$ $2 N_H + 2 N_M + 2 N_L$
					D	
3	Parte inferiore del rilevato <i>LPE</i>	1,6%	40,0	42,8	A	$2 N_A + 2 N_M + 2 N_B$ $2 N_H + 2 N_M + 2 N_L$
					B	
					C	$2 N_A + 2 N_B$ $2 N_H + 2 N_L$
					D	
4	Parte inferiore del rilevato <i>LPE</i>	2,0%	30,0	29,0	A	$2 N_A + 2 N_M$ $2 N_H + 2 N_L$
					B	
					C	$2 N_A + 2 N_B$ $2 N_H + 2 N_L$
					D	
5	Parte superiore del rilevato <i>UPE</i>	2,8%	35,0	32,1	A	$2 N_A + 2 N_B$ $2 N_H + 2 N_L$
					B	
					C	
					D	
N_A, N_M, N_B = passaggi di rullo ad Alta, Media, Bassa ampiezza di vibrazione, rispettivamente N_H, N_M, N_L = steamroller passing at High, Medium and Low vibration amplitude, respectively						

OSSERVATORIO

per poter valutare l'effetto della variabilità dei fattori di maggior interesse, tramite controlli condotti soprattutto nelle fasce centrali.

7.2. Attrezzature impiegate

Per la preparazione del terreno e la livellazione degli strati si è utilizzato un Motor Grader munito di strumentazione GPS che, come verificato mediante rilievo topografico di precisione, permette di ottenere lo spessore impostato con ridotte dispersioni. Per lo spandimento della calce, si è impiegato uno spandilegante a segmenti dotato di computer di bordo per il settaggio ed il monitoraggio della quantità effettiva di legante sparsa, in kg/m^2 . La miscelazione intima della terra con la calce è stata effettuata impiegando una fresatrice ad alte prestazioni, il cui tamburo ad asse orizzontale permette una profondità massima di fresatura di 50 cm su una larghezza di lavoro di 200 cm.

La compattazione degli strati è stata realizzata mediante rullo vibrante monocilindro liscio della larghezza di 213 cm caratterizzato da massa statica del tamburo pari a $M = 12.800 \text{ kg}$ ed ampiezza della vibrazione λ , variabile nel range $2,14 \div 1,21 \text{ mm}$. Si tratta, quindi, di un compattatore di grande efficacia che, come si è potuto verificare, permette di ben compattare strati di $40 \div 45 \text{ cm}$ in unico spessore.

7.3. Prove di controllo e risultati

Alla luce degli obiettivi posti, sono state condotte prove di controllo di:

- dosaggio in calce: si tratta di controlli di spandimento tramite misura della massa di calce sparsa in superficie, q (kg/m^2);
- spessore, effettuato mediante livellazione topografica come appresso descritto;
- finezza di miscelazione, attraverso valutazione della granulometria e dimensione massima dei grumi, D_{max} ;
- omogeneità delle miscele, tramite esame visivo (colorazione) e misure di pH;
- densità in situ, mediante volumetri di diversa dimensione;
- resistenza meccanica delle miscele prodotte in cantiere, prima del loro costipamento, mediante determinazione dell'IPI;
- prestazione meccanica degli strati in opera, mediante prove di carico con piastra a doppio ciclo.

Controlli di spandimento

I risultati dei controlli della quantità di calce sparsa sono riportati nelle tabelle 6 e 7 dove, per ciascuno strato, sono dati valori medi, μ , e coefficienti di variazione,

7.2. Equipment used

For the preparation of the soil and laying of the layers, a motor grader equipped with GPS instrumentation was used. As verified by topographic surveys, this made it possible to obtain the thickness set with small dispersion. A lime spreader with an on-board computer was used for setting and monitoring the actual amount of binder spread, in kg/m^2 . The intimate mixing of the clay with the lime was carried out using a high-performance milling machine: the drum in the horizontal axis allows a maximum milling depth of 50 cm over a working width of 200 cm.

The compaction of the layers was carried out by means of a smooth drum vibratory roller with a width 213 cm characterized by static mass of the drum equal to $M_1 = 12,800 \text{ kg}$ and vibration amplitude $A_0 = 2.14 \div 1.21 \text{ mm}$. It was therefore a very effective compactor that, as has been verified, allows well compacted layers of $40 \div 45 \text{ cm}$ in one thickness. A lime spreader with on-board computer for the setting and monitoring of the actual amount of binder spread was used.

7.3. Test programme and results

In the light of these objectives, tests were carried out to check:

- *lime content, spreading controls by means of measurement of the mass of lime spread on the surface, q (kg/m^2);*
- *thickness, performed by topographic levelling as described below;*
- *mixture fineness, through evaluation of the particle size and maximum size of the lumps, D_{max} ;*
- *homogeneity of the mixtures, by visual examination (staining) and pH measurement;*
- *density in situ, carried out using volumeters of different sizes;*
- *mechanical strength of the mixtures produced in situ, before compaction, by determination of the IBI;*
- *bearing of the layers, by means of in situ plate load tests (two loading cycles).*

Spreading control tests

The results of the checks on the amount of lime spread are given in table 6 and 7, which for each layer shows the average values, μ , and standard deviation SD. It is to be noted that the content in lime actually spread is equal to the nominal reference dosage plus 6%, to take into account dispersion on the construction site.

It may be noted that the low dispersion of lime dosages depends on both the low dispersion of the spreading and, above all, on the modest dispersion of the thickness of the layers compared to the designed thickness, obtained by the

OSSERVATORIO

TABELLA 6 - TABLE 6

CONTROLLI DI SPANDIMENTO: MEDIA E COEFFICIENTE DI VARIAZIONE DELLA CALCE RACCOLTA
NEI PUNTI DI MISURA
SPREADING CONTROLS: AVERAGE VALUES AND COEFFICIENT OF VARIATION OF LIME COLLECTED
AT MEASURING POINT

Strato Layer	Calce raccolta nei diversi punti di misura (kg) Lime collected at measuring point (kg)													Quantità sparsa Spreading	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Media μ	q (kg/m ²)	CV (%)
1	--	--	--	--	2,80	2,70	2,70	2,60	2,81	2,72	2,51	2,84	2,71	10,84	4,1
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	9,6
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	9,3
4	2,41	2,79	3,03	2,66	2,59	2,69	2,86	2,92	2,27	2,77	2,78	2,90	2,71	10,82	8,5
5	4,70	4,22	4,20	4,38	3,80	4,12	4,15	3,96	4,09	3,70	3,84	3,29	3,95	15,82	8,1

TABELLA 7 - TABLE 7

CONTROLLI DI SPANDIMENTO: CONFRONTO TRA I VALORI DI RIFERIMENTO E QUELLI REALIZZATI
SPREADING CONTROLS: COMPARISON BETWEEN NOMINAL REFERENCE VALUES AND LIME ACTUALLY

Strato Layer	Spessore medio Average thickness s (cm)		Spandimento Spreading q (kg/m ²)			Dosaggio in calce Lime content CaO (%)		
	Previsto Predicted	Realizzato Real	Previsto Predicted	Realizzato Real	Δ (%)	Nominale Nominal	Impostato alla spandilegante Value Set	Riscontrato Real
1	35,0	35,0 ⁽¹⁾	11,20	10,84	-3,3	2,0	2,1	2,1
2	30,0	30,2	9,60	10,75	10,7	2,0	2,1	2,3
3	40,0	42,8	10,2	10,49	3,1	1,6	1,7	1,5
4	30,0	29,0	9,60	10,82	11,3	2,0	2,1	2,3
5	35,0	32,1	15,40	15,82	2,7	2,8	3,0	3,3

⁽¹⁾ Per lo strato n. 1, bonifica trattata in situ, si ipotizza che sia rispettato il valore impostato di affondamento del tamburo della fresatrice impiegata, come regolato dal dispositivo servo idraulico della stessa.
⁽¹⁾ For layer #1, soil treated in situ, it is assumed that the sinking of the milling drum used is equal to the value set.

CV. Si fa notare che il dosaggio in calce effettivamente sparso, come impostato alla macchina spandilegante, è pari a quello teorico aumentato di un quantitativo necessario a tenere conto della dispersione di cantiere (ipotizzato pari al 6% della percentuale di calce da ottenere).

Si può notare che la bassa dispersione dei dosaggi in calce dipende sia dalla bassa dispersione dello spandimento sia, soprattutto, dalla modesta dispersione degli spessori degli strati realizzati rispetto a quelli di progetto, resa possibile dalla particolare attenzione riservata nel cantiere sperimentale agli spessori di stesa.

Controlli di spessore

Considerata la prevista profilatura superficiale del 4° e 5° strato, allo scopo di conferire ai piani finiti le pendenze trasversali e longitudinali necessarie per un rapido smaltimento delle acque, i controlli dettagliati sulla regolarità di stesa e sulla relativa dispersione di spessore reso dopo costipamento sono stati limitati al 2° ed al 3° strato

special attention given in the experimental site to the paving thickness.

Thickness control tests

In order to give the finite planes transverse and longitudinal gradients necessary for quick rain water drainage, the detailed controls on the regularity and paving on the relative dispersion of thickness after compaction were limited to the 2nd and 3rd layer. The control procedure consisted of precision levelling with 35 measuring points (7 cross-sections and 5 points per section). For all the layers, in each case, the average values of the thicknesses achieved and the deviations of these from the reference value were calculated (table 8).

Mixture fineness tests

The results of the mixture fineness tests, carried out by sieving after every pass of the mixer, are reported in table 9.

OSSERVATORIO

per i quali è stata effettuata una livellazione di precisione con 35 punti di misura (7 sezioni trasversali e 5 punti per sezione). Per tutti gli strati, in ogni caso, si sono calcolati i valori medi degli spessori realizzati e gli scostamenti di questi dal valore di riferimento (tabella 8).

Controlli di finezza delle miscele

I risultati dei controlli di finezza effettuati per setacciatura dopo ciascun passaggio della miscelatrice sono riportati in tabella 9.

Si è trattato di controlli limitati ai soli primi due strati riportati (2° e 3°), per la messa a punto del processo di miscelazione (numero di passate e tempi di attesa). Si è osservato che per la terra in opera il quarto passaggio di fresa non produce sostanziali aumenti del grado di finezza delle miscele rispetto al terzo. Del resto, da indagine visiva, date le prestazioni della miscelatrice impiegata, le miscele si presentavano di colore perfettamente omogeneo già dopo il primo passaggio.

La qualità della miscelazione è confermata dalle elevate prestazioni meccaniche riscontrate sia sulle miscele, sia sugli strati realizzati, come mostrato appresso.

In order to study the mixing process (number of passes and waiting times), tests were only carried out on the first two layers reported (2nd and 3rd). The cutter machine at the fourth pass did not produce substantial increases in the degree of fineness of the mixtures compared to the third pass. Moreover, by visual investigation, given the performance of the mixer used, the mixtures presented perfectly homogeneous colour even after the first passage.

The mixing quality is confirmed, as shown below, by the high mechanical performance observed in mixtures and in the layers. Taking into account the mechanical performance observed, the fineness of the mixtures was considered acceptable after 2 or 3 steps of milling machine, as long as the requirement $D_{max} < 31.5$ mm was verified.

Mixture homogeneity control tests

For mixtures satisfying the requirement of fineness indicated above, the homogeneous distribution of lime on the entire thickness of the layer was verified by means of pH measurements by comparing, for the same measuring point, the values determined in the lower part and in the upper part of each layer.

TABELLA 8 - TABLE 8

CONTROLLI DI SPESSORE: CONFRONTO TRA I VALORI DI RIFERIMENTO E QUELLI REALIZZATI
THICKNESS CHECK: COMPARISON BETWEEN REFERENCE VALUES AND ACHIEVED THICKNESS

Strato Layer	Spessore di riferimento Nominal reference thickness (cm)	Spessore reso Achieved thickness		Differenza media Average difference (cm)	Differenza percentuale Percentage difference (%)
		Media Average value (cm)	C.V. Standard deviation SD (%)		
2	30,0	31,3	10	+1,3	4,3
3	40,0	42,1	3	+2,1	5,3
4	30,0	31,8	n,d	+1,8	n,d
5	35,0	32,1	n,d	-2,1	n,d

TABELLA 9 - TABLE 9

Tenuto conto delle prestazioni meccaniche riscontrate, la finezza delle miscele è da ritenersi accettabile dopo 2 o 3 passaggi di fresa, purché i risultati rispettino il requisito di $D_{max} < 31,5$ mm.

Controlli di omogeneità delle miscele

Per le miscele che soddisfacevano il requisito di finezza di cui sopra, avendo già riscontrato il dosaggio in calce sparso e lo spessore degli strati realizzati, si è potuta verificare l'omogenea ripartizione della calce sull'intero spessore dello strato mediante misure di pH ponendo a confronto, per uno stesso punto di misura, i valori determinati nella parte inferiore e superiore dello strato.

CONTROLLI DI FINEZZA DELLE MISCELE (% DI PASSANTE AI SETACCI
DA 31,5 mm E 4,76 mm)
MIXTURE FINENESS TEST RESULTS (% PASSING)

Strati Layers	Strato n. 2 - Bonifica (strato riportato) Layer 2 - Treated foundation (reported soil)		Strato n. 3 - Parte Inferiore del rilevato, PIR Layer 3 LPE	
Setacci (mm) Sieve (mm)	31,5	4,76	31,5	4,76
I passata 1st pass	97,1	43,1	43,5	30,3
II passata 2nd pass	98,3	41,7	100	41,8
III passata 3rd pass	100	54,7	100	59,3
IV passata 4th pass	100	63	100	63

OSSERVATORIO

Come può osservarsi dai risultati di tabella 10, a parte aver riscontrato quasi in tutti i punti di misura un pH pari o superiore al minimo – pari a 12,4 – definito tramite il CIC (ed in ogni caso si sottolinea che le prove sul rilevato sperimentale sono state condotte in condizioni di temperatura estive, molto più elevate di quella richiesta per le misure di pH secondo il metodo di Eades & Grimm, con i conseguenti minori valori di pH da attendersi in miscela [3]), l'omogeneità delle miscele risulta, in ogni caso, molto elevata. Le variazioni di pH misurate tra la parte superiore e quella inferiore di ciascuno strato si dimostrano essere, infatti, del tutto trascurabili e pari a quelle intrinseche alla dispersione della prova.

Controlli di densità in situ

I risultati dei controlli di densità in situ sono riportati in tabella 11, ove è pure fornito il grado di addensamento, $\alpha = \gamma_{gd}/\gamma_{OPN}$, come determinato con riferimento ai risultati delle prove Proctor Normale di laboratorio (cfr. fig. 2), per ciascuna miscela. Questi risultati si riferiscono ai valori medi di strato, in quanto determinati sull'intero spessore con volumometro di grandi dimensioni ($\phi = 300$ mm).

Con riferimento al 3° strato, sono pure riportati in tabella 12, i risultati dei valori di addensamento riscontrati sulla metà superiore dello strato, determinati con volumometro di piccole dimensioni ($\phi = 160$ mm) e le densità desunte per la metà inferiore, per differenza ponderale con quelli medi.

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 3); 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 contrattuali.

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 (42,8 cm), evidenziando così l'elevata prestazione del rullo vibrante impiegato, ad alta ampiezza di vibrazione.

As shown in table 10, the homogeneity of the mixtures was very high; indeed, the pH changes between the top and bottom of each layer were completely negligible and equal to those intrinsic to the dispersion of the test.

pH measurements were equal to or greater than the minimum – equal to 12.4 – defined by the ICL; in any case it should be noted that the tests were conducted with summer temperature conditions, much higher than those required for pH measurements according to the method of Eades & Grimm. Temperature affects the pH measurements, as it is well known, being the pH values measured at high temperature lower than those carried out at the standard temperature [3].

In situ density control tests

The results of the in situ density control tests are shown in table 11, which also gives the degree of densification, $\alpha = \gamma_{gd}/\gamma_{OPN}$ as determined for each mixture with reference to the results of Proctor Normal laboratory tests (see table 3). These results refer to the average values of the layer, as determined over the entire thickness with a high dimension volumenometer ($\phi = 300$ mm).

TABELLA 10 - TABLE 10

CONTROLLI DI OMOGENEITÀ DELLE MISCELE MEDIANTE MISURE DI pH MIXTURE HOMOGENEITY TESTS WITH pH MEASUREMENTS

Strato Layer	Ubicazione Position		pH
	Strisciata Strip	Progressiva [m] Progressive length [m]	
Bonifica (strato riportato) Treated foundation (reported soil)	A - parte superiore A - upper part	45,00	12,37
	A - parte inferiore A - lower part	45,00	12,45
	B - parte superiore B - upper part	10,00	12,41
	B - parte inferiore B - lower part	10,00	12,34
1° Parte Inferiore del Rilevato PIR Layer 3 LPE	A - parte superiore A - upper part	35,00	12,50
	A - parte inferiore A - lower part	35,00	12,52
	A - parte superiore A - upper part	15,00	12,44
	A - parte inferiore A - lower part	15,00	12,44
	D - parte superiore D - upper part	15,00	12,42
	D - parte inferiore D - lower part	15,00	12,47
	D - parte superiore D - upper part	35,00	12,30
	D - parte inferiore D - lower part	35,00	12,33

OSSERVATORIO

Controlli di IPI

Le miscele prodotte in cantiere dalle miscelatrici sono state inviate in laboratorio per l'esecuzione delle prove di IPI, secondo UNI EN 13286 - 47 [21]. I valori medi, determinati per ciascuna delle strisciate laterali, sono riassunti nella tabella 13.

Come può osservarsi dal confronto con i valori di IPI ottenuti sulle miscele di pari umidità e dosaggio in calce (cfr. fig. 2), 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.

Tali controlli permettono di garantire, molto più che i controlli di finezza, la qualità della fabbricazione della miscela dato che i risultati ottenuti consentono di valutare la coerenza delle prestazioni conseguite con quelle attese dagli studi di formulazione delle miscele e di evidenziare difetti nelle fasi del processo costruttivo. Inoltre, data la rapidità di tali prove, queste possono condursi agevolmente in corso d'opera, con il vantaggio di consentire l'adozione tempestiva dei correttivi che dovessero rendersi necessari.

Controlli di portanza degli strati (Md)

I risultati delle prove di modulo di deformazione sugli strati posti in opera [8] sono riportati nella tabella 14, in

CONTROLLI DI DENSITÀ IN SITU MEDIA DI STRATO
DENSITY TESTS: AVERAGE VALUES OF LAYER

Strato Layer	Strisciata Strip	w [%]	γ_d [kN/m ³]	Grado di addensamento Degree of densification $\alpha = \gamma_d/\gamma_{OPN}$
2° Strato Bonifica (strato riportato) Layer 2 Treated foundation (reported soil)	A	22,5	15,7	1,06
	B	22,8	15,9	1,07
	C	23,2	16,3	1,11
	D	23,3	16,9	1,14
3° Strato Parte Inferiore del Rilevato Layer 3 LPE	A	20,8	16,0	1,09
	B	20,6	16,0	1,09
	C	23,6	15,9	1,08
	D	19,7	16,1	1,09
4° Strato Parte Inferiore del Rilevato Layer 4 LPE	A	20,9	16,2	1,10
	B	20,4	16,2	1,10
	C	21,8	16,1	1,09
	D	21,6	16,5	1,12
5° Strato Parte Superiore del Rilevato Layer 5 UPE	A	20,6	15,0	1,03
	B	21,4	16,3	1,12
	C	23,7	15,9	1,09
	D	25,0	16,1	1,10

With reference to the 3rd layer, table 12 also shows the results of the densification values measured with a small dimension volumenometer ($\phi = 160$ mm) on the upper half of the layer, and the density calculated for the lower half, by difference with the average unit weight.

From the results of the previous tables it could be

TABELLA 12 - TABLE 12

CONTROLLI DI DENSITÀ IN SITU: CONFRONTO TRA I VALORI MEDI DI STRATO E QUELLI DELLE PARTI SUPERIORI ED INFERIORI, PER IL 3° STRATO (PIR)
COMPARISON BETWEEN THE AVERAGE DENSITIES OF THE LAYER AND THOSE OF THE UPPER AND LOWER PARTS, FOR THE 3RD LAYER

Striscia Stripe	Progr. Progressive length (m)	Valori medi dello strato Average value			Parte superiore dello strato Upper part of the layer			Parte inferiore strato Lower part of the layer	
		Umidità Water content w (%)	densità secca dry unit weight γ_d [kN/m ³]	γ_d/γ_{OPN}	Umidità water content w (%)	densità secca dry unit weight γ_d [kN/m ³]	γ_d/γ_{OPN}	densità secca dry unit weight γ_d [kN/m ³]	γ_d/γ_{OPN}
B	11,30	18,9	16,50	1,12	19,9	16,13	1,09	20,07	1,36
C	11,30	21,9	15,85	1,07	22,2	15,89	1,08	19,57	1,33
D	11,30	20,3	16,22	1,10	17,9	15,78	1,07	20,16	1,37
A	41,30	20,6	16,52	1,12	21,0	15,82	1,07	20,48	1,39
B	41,30	20,9	16,03	1,09	21,8	15,75	1,07	19,97	1,35
C	41,30	24,4	15,79	1,07	24,9	16,11	1,09	19,24	1,30

OSSERVATORIO

TABELLA 13 - TABLE 13

CONTROLLI DI IPI SU MISCELE PRODOTTE IN CANTIERE
IBI TESTS CARRIED OUT ON MIXTURES PRODUCED IN SITU

Strato Layer	Strisciata Strip	IPI IBI [%]	w [%]	γ_d [kN/m ³]
2 - Bonifica (strato riportato) 2 - Treated foundation (reported soil)	A	17,50	26,35	14,23
	D	21,00	23,90	14,82
3 - Parte Inferiore del Rilevato, PIR 3 - LPE	A	26,50	20,55	14,98
	D	20,50	23,25	14,39
4 - Parte Inferiore del Rilevato, PIR 4 - LPE	A	17,50	21,45	14,83
	D	19,00	21,40	14,75
5 - Parte Superiore del Rilevato, PSR 5 - UPE	A	21,50	20,60	14,25
	D	18,50	20,10	14,58

observed that the humidity detected with in situ density tests are greater than the minimum required, first defined for each lime content (see table 3). Furthermore, the degree of densification is always much greater than 97% of the optimum Proctor Normal dry density, assumed as a minimum requirement to satisfy contractual controls.

The high degree of densification found on average over the entire thickness of the layer was also obtained as regards the upper part and the lower part of the layer. It is also to be noted that the values reported for the bottom layer are always higher than those of the upper and the average, despite the high thickness of the compacted layer (42.8 cm), thus highlighting the effect of the use of a vibrating roller with high vibration amplitude.

IBI control tests

The mixtures produced in situ by mixing were sent to the laboratory for testing of IPI, according to UNI EN 13286-47 [21]. The mean values determined for each of the side strips are summarized in table 13.

As can be observed from the comparison with the IPI values obtained on mixtures with equal humidity and lime content (see figure 1), the results obtained on mixtures produced in situ agree with those determined in preliminary laboratory tests. In addition, in all cases, the minimum thresholds of IBI required for the layer in question are largely verified.

These controls, more than mixture fineness tests, allow one to ensure the quality of manufacture of mixtures since the results allow one to assess the consistency of the performance obtained with those expected from the studies on mix design and to highlight defects in the early stages of the construction process. Moreover, given the rapidity of these tests, they can easily be carried out in the process, with the advantage of allowing timely adoption of corrective measures that may be required.

TABELLA 14 - TABLE 14

CONTROLLI DI PORTANZA IN SITU. MODULO DI DEFORMAZIONE A PRIMO (Md₁) E SECONDO CICLO (Md₂) DI CARICO
IN SITU BEARING TESTS RESULTS, DEFORMATION MODULUS AT FIRST (Md₁) AND SECOND (Md₂) LOADING CYCLE

Strato Layer	Ubicazione Location	Md ₁ [MPa]	Md ₂ [MPa]	Md ₂ Md ₁
	Strisciata Strip			
2 - Bonifica (strato riportato) 2 - Treated foundation (reported soil)	A	93,3	120,4	1,3
	B	101,8	153,7	1,5
	C	107,3	152,5	1,4
	D	93,5	146,5	1,6
3 - Parte Inferiore del Rilevato, PIR 3 - LPE	A	115,4	157,9	1,4
	B	151,4	238,1	1,6
	C	154,3	234,5	1,5
4 - Parte Inferiore del Rilevato, PIR 4 - LPE	B	102,3	157,0	1,5
	C	94,9	121,9	1,3



OSSERVATORIO

relazione alla posizione dello strato ed all'ubicazione dei punti di misura prescelti. I dati in tabella sono ottenuti come valori medi di non meno di tre punti di misura per le strisciate centrali, B e C. I valori lungo le strisciate laterali A e D sono stati misurati per evidenziare eventuali problemi di portanza ad 1,20 m dal bordo.

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 alle soglie minime tipicamente richiesti per gli strati di rilevato, in relazione alla destinazione d'uso, ed evidenziano il miglioramento prestazionale che è possibile conseguire, già a breve termine, rispetto all'impiego dei materiali naturali tradizionalmente utilizzati per la costruzione dei rilevati.

Il rapporto tra il modulo al secondo ciclo di carico e quello al primo ciclo evidenzia, per altra via, gli elevati livelli di addensamento conseguiti, già con soli quattro passaggi di rullo (due in andata e due in ritorno), nelle modalità selezionate.

8. Conclusioni

Il ricorso al trattamento con calce dei terreni argillosi prodotti di scavo si iscrive tra le principali misure di salvaguardia ambientale poiché, migliorando le caratteristiche di resistenza - sia quella immediata, sia quella di lungo termine - e riducendo la sensibilità all'acqua delle terre fini di scavo ed il rigonfiamento, ne permette il reimpiego in tecnica stradale e ferroviaria. Ciò permette di limitare il conferimento in discarica, il consumo di risorse non rinnovabili da approvvigionare da cave di prestito, oltre gli effetti negativi sull'ambiente connessi al trasporto delle materie tipicamente movimentate nel corso dei lavori di costruzione delle infrastrutture stradali e ferroviarie.

Nel presente articolo vengono presentati i risultati di prove di campo e di studi di laboratorio eseguite nel corso dei lavori di ammodernamento di una infrastruttura lineare e tese a validare le soluzioni progettuali ed i processi costruttivi della tecnica di trattamento con calce, per consentire il riutilizzo con profitto di notevoli volumi di materie argillose di scavo altrimenti portate a rifiuto. Del resto, i costi altrimenti connessi al conferimento in discarica dei materiali di scavo ed il trasporto sui luoghi di impiego di materie da cave di prestito risultano economicamente non sostenibili e/o giustificati laddove possa farsi ricorso a valide alternative tecniche, anche avanzate.

Nello specifico caso dei lavori di trattamento con calce, la prova di campo si dimostra essere strumento indispensabile per la messa a punto delle diverse fasi del processo produttivo, (in relazione alle macchine ed ai prodotti effettivamente impiegati per i lavori) e per permettere di anticipare e risolvere problemi di esecuzione. In particolare, per garantire la qualità della produzione della miscela, in aggiunta ai controlli di finezza (granulometria) si evidenzia come risultino particolarmente utili misure semplici e di rapida risposta riguardanti sia l'omogenea ripar-

Bearing tests (M_d)

The results of the bearing tests on the layers [8] are shown in table 14, in relation to the position of the layer and the location of the measuring points. The data in the table are obtained as average values of not less than three measurement points for the central strips, B and C. The values along the lateral strips A and D were measured to detect possible problems of final thickness at 1.20 m from the edge.

The modulus values observed in the load plate tests are, for all layers of the body of the embankment examined, well above the minimum thresholds required for typical layers found in relation to the intended use. Indeed, the results highlight the improvement performance that it is possible to achieve, even in the short term, compared to the natural materials traditionally used for the construction of embankments.

The relationship between the module at the second load cycle to the first cycle shows, in another way, the high levels of compaction already achieved with just four roller passes (two forward and two backward), carried out with selected modes.

8. Conclusions

The use of lime treatment of clay soils produced by excavation is among the main environmental protection measures because, improving the strength characteristics - both immediate and long-term - and reducing water sensitivity and swelling, it allows reuse in road building construction. Treatment with lime of clayey soils makes it possible to limit landfill, consumption of non-renewable resources from borrow-pits, as well as the negative environmental effects associated with carriage of materials.

In this paper the results of field trials and laboratory studies performed in the course of modernization works of a linear infrastructure are presented. They were designed to validate the solutions and construction processes of treatment with lime, to allow profitable reuse of large volumes of excavated clay otherwise rejected. Moreover, the costs associated with landfill of excavated material and transportation of the construction materials from borrow pits are economically unsustainable and/or are justified only if no other advanced technical alternatives are possible. In the specific case of lime treatment, the field trial is an indispensable tool for the study of the different stages of the production process (in relation to machines and products actually used), and to anticipate and solve contingent implementation problems.

In particular, in order to ensure the quality of mixture manufacture, simple measures with rapid response have been proposed in addition to fineness controls (particle size). The homogeneous distribution of the binder in the





OSSERVATORIO

tizione del legante nella massa trattata (misure di pH), in uno ai controlli del dosaggio in calce e degli spessori in opera, sia le prestazioni meccaniche delle miscele prodotte in cantiere e di valutare la loro coerenza con le prestazioni definite negli studi di formulazione delle miscele in laboratorio (misure di IPI). I risultati ottenuti da tali controlli permettono, infatti, di validare le norme di qualità definite per le varie fasi del processo costruttivo che precedono il costipamento e, in corso d'opera, di valutare la qualità delle miscele prodotte, con la possibilità di adottare in tempo utile i necessari correttivi.

treated mass (pH measurement) and the mechanical performance of mixtures produced were tested on site (IBI tests), in order to assess their consistency with the laboratory studies on mix design.

The results obtained from these controls make it possible to validate the quality standards defined for the various phases of the construction process prior to compaction as well as, to evaluate the quality of the produced mixtures in the construction phase, with the possibility of adopting the necessary corrective measures in time.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] AIRO FARULLA C., CELAURO C. ROSONE M. (2013), "Caratterizzazione geotecnica di un'argilla di alta plasticità trattata con calce", Atti dell'Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica, IARG 2013, Perugia, 16-18 Settembre 2013, pp. 1-5.
- [2] ASTM (2000), "Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort", (12,400 ft-lb/ft) (Standard Proctor) Designation D698, American Society for Testing and Materials, US.
- [3] ASTM (2006), "Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization", Designation ASTM D6276, American Society for Testing and Materials, US.
- [4] ASTM (2007), "Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort", (56,000 ft-lb/ft) (Modified Proctor) Designation D1557, American Society for Testing and Materials, USA.
- [5] BENEDETTO A., DE STEFANI C., MARINO M., SDOGA S. (2004), "Realizzazione del corpo ferroviario mediante trattamento a calce di terre non idonee. Il caso dell'Alta Capacità Modena Bologna", Quarry and Construction, 10, pp: 97-116.
- [6] CELAURO B., BEVILACQUA A., LO BOSCO D., CELAURO C. (2012a), "Design Procedures for Soil-Lime Stabilization for Road and Railway Embankments", Part 1-Review of Design Methods. Procedia - Social and Behavioral Sciences 53:3, 755-764.
- [7] CELAURO B., BEVILACQUA A., LO BOSCO D., CELAURO C. (2012b), "Design Procedures for Soil-Lime Stabilization for Road and Railway Embankments", Part 2-Experimental Validation. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 53: 3, 568-579.
- [8] CNR (1992), "Determinazione dei moduli di deformazione M_d e M_d , mediante prova di carico a doppio ciclo con piastra circolare", Bollettino Ufficiale 146/1992. Consiglio Nazionale delle Ricerche, Roma.
- [9] CRR. (2010), "Code de bonne pratique pour le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques", Recommandations CRR R81/10, Centre de Recherches Routières, Bruxelles.
- [10] ESTÉOULE J., PERRET P. (1979), "Etude expérimentale des phénomènes de stabilisation des sols fins par la chaux", Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées. 99, 99-109.
- [11] KERGOET M. (2001), "Exemple de traitement pour déterminer l'emploi d'un sol en couche de forme", Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées. 231, 19-24.
- [12] LEFLAIVE E. & SCHAEFFNER M. (1979), "Le traitement des sols fins à la chaux. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées", 99, 110-118.
- [13] LITTLE, D.L. (1999), "Evaluation of Structural Properties of Lime Stabilized Soils and Aggregates", Summary of Findings (volume 1, National Lime Association Report.
- [14] LITTLE D.L. AND SHAFEE F.A.M.Y. (2001), "Example problem illustrating the application of the National Lime Association", Mixture Design and Testing Protocol (MDTP) to ascertain engineering properties of lime-treated subgrades for mechanistic pavement design/analysis. National Lime Association Report.
- [15] NLA (2004), "Lime-treated soil construction manual lime stabilization & lime modification", National Lime Association, Bulletin 326.
- [16] RFI (1999), "Specifica Tecnica - Trattamento delle Terre con calce. Norma Interna", Divisione Infrastrutture FS, Roma.
- [17] SETRA (2000), "Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Application à la réalisation des remblais et des couches de forme", Guide Technique, ISBN 2-7208-3810-1, Bagnex Cedex, France.





OSSERVATORIO

- [18] SETRA (2007) - Traitement des sols à la chaux et /ou aux liants hydrauliques - Application à la réalisation des assises de chaussées. Guide Technique, ISBN 978-2-11-094, Bagneux Cedex, France
- [19] UNI (2002) UNI EN 459-1. Calci da costruzione – Parte 1: Definizioni, specifiche e criteri di conformità. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.
- [20] UNI (2004) UNI EN 13286-49, Miscele non legate e legate con leganti idraulici - Parte 49: Prova di rigonfiamento accelerata per suoli trattati con calce e/o legante idraulico
- [21] UNI (2006a) UNI EN 13286-47, Miscele non legate e legate con leganti idraulici - Parte 47: Metodo di prova per la determinazione dell'indice di portanza CBR, dell'indice di portanza immediata e del rigonfiamento. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.

LINEE GUIDA PER GLI AUTORI

(Istruzioni su come presentare gli articoli per la pubblicazione sulla rivista "Ingegneria Ferroviaria")

La collaborazione è aperta a tutti - L'ammissione di uno scritto alla pubblicazione non implica, da parte della Direzione della Rivista, riconoscimento o approvazione delle teorie sviluppate o delle opinioni manifestate dall'Autore - I manoscritti vengono restituiti.

La riproduzione totale o parziale di articoli o disegni è permessa citando la fonte.

La Direzione della Rivista si riserva il diritto di utilizzare gli articoli ricevuti e la documentazione ad essi connessa anche per la loro pubblicazione, in lingua italiana o straniera, su altre riviste del settore editate da soggetti terzi. In ogni caso, la pubblicazione degli articoli ricevuti, anche su altre riviste avverrà sempre a condizione che siano indicati la fonte e l'autore dell'articolo.

Al fine di favorire la presentazione delle memorie, la loro lettura e correzione da parte del Comitato di Redazione nonché di agevolare la trattazione tipografica del testo per la pubblicazione su "Ingegneria Ferroviaria", si ritiene opportuno che gli Autori stessi osservino gli standard di seguito riportati.

L'articolo dovrà essere necessariamente su supporto informatico, preferibilmente in formato WORD per Windows, accettato dalla redazione (e-mail, CD-Rom, DVD, pen-drive...).

Tutte le figure (fotografie, disegni, schemi, ecc.) devono essere progressivamente richiamate nel corso del testo. Le stesse devono essere fornite complete della relativa didascalia. Tutte le figure devono essere inserite su supporto informatico (e-mail, CD-Rom, DVD o Pen Drive) e salvate in formato TIF o EPS ad alta risoluzione (almeno 300 dpi). È richiesto inoltre l'invio delle stesse immagini in formato compresso JPG (max 50KB per immagine).

È consentito includere, a titolo di bozza di impaginazione, una copia cartacea che comprenda l'inserimento delle figure nel testo.

Si pregano i signori autori di utilizzare rigorosamente, nei testi presentati, le unità di misura del Sistema Internazionale (SI), utilizzando le relative regole per la scrittura delle unità di misura, dei simboli e delle cifre e di richiamare nel testo con numerazione progressiva tutti i riferimenti bibliografici.

All'autore di riferimento è richiesto di indicare un indirizzo di posta elettronica per lo scambio di comunicazioni con il Comitato di Redazione della rivista e di sottoscrivere apposita liberatoria per la pubblicazione degli articoli.

Per eventuali ulteriori informazioni sulle modalità di presentazione degli articoli contattare la Redazione della Rivista – Tel. 06.4827116 – Fax 06.4742987 - redazioneif@cifi.it

