

Convegno “Stabilizzazione delle terre con calce”

Ferrara 5 maggio 2006

Il trattamento dei terreni nella costruzione delle linee ferroviarie ad alta velocità/capacità

Vittorio Misano

Istituto Sperimentale – Rete ferroviaria Italiana

La costruzione delle linee ad alta velocità è iniziata in Italia nei primi anni '90 con la tratta Roma – Napoli. E' proseguito con la Firenze- Bologna e successivamente con la Bologna Milano.

La linea Roma- Napoli è entrata in esercizio nello scorso dicembre mentre le altre due tratte saranno ultimate rispettivamente nel 2007 e nel 2009.

Secondo alcune previsioni nel 2011 entrerà in esercizio tutta la linea ad alta velocità nel seguito denominata linea ad Alta Capacità Napoli – Milano.

Contestualmente alla realizzazione di questa linea dorsale, è iniziata la costruzione della “trasversale” Torino-Venezia con due tratte che riguardano la Torino-Novara-Milano e la Padova-Mestre.

La linea Napoli –Milano, con le tre tratte suddette, ha visto la realizzazione di linee completamente diverse l'una dall'altra sia per caratteristiche topografiche che geologiche.

La tratta Napoli – Roma si sviluppa infatti su un tracciato molto vario con alternarsi di pianure e rilievi di varia copertura nonché di terreni litologicamente eterogenei interessando serie vulcaniche, carbonatiche e fluvio-lacustri.

La tratta Firenze- Bologna è stata costruita quasi completamente in galleria in formazioni per lo più litoidi.

La tratta Bologna-Milano si sviluppa contrariamente tutta a cielo aperto sui terreni quaternari della Pianura Padana.

Come è facile immaginare quindi, la necessità del trattamento dei terreni per la costruzione delle linee ad alta velocità si è evidenziata esclusivamente sulla tratta Bologna –Milano.

Su questa linea infatti sono presenti terreni fini coesivi a media plasticità ed il recupero dei terreni di scavo ha costituito, per quanto possibile, un obiettivo fondamentale delle scelte progettuali e dell'organizzazione produttiva del Consorzio responsabile della realizzazione delle opere.

Va inoltre evidenziato che nelle vicinanze della costruenda linea sono assenti cave di prestito a distanza economica conveniente.

Al fine di verificare l'idoneità dei terreni di scavo, provenienti dalla miriade di opere in costruzione, al trattamento a calce, è stata condotta una articolata sperimentazione consistente in pozzetti esplorativi, prelievo di campioni a varia profondità ed analisi di laboratorio.

Nelle varie centinaia di campioni analizzati si è evidenziata la predominante presenza della frazione fine con valori mediamente pari al 90% come mostrato nella figura 1.

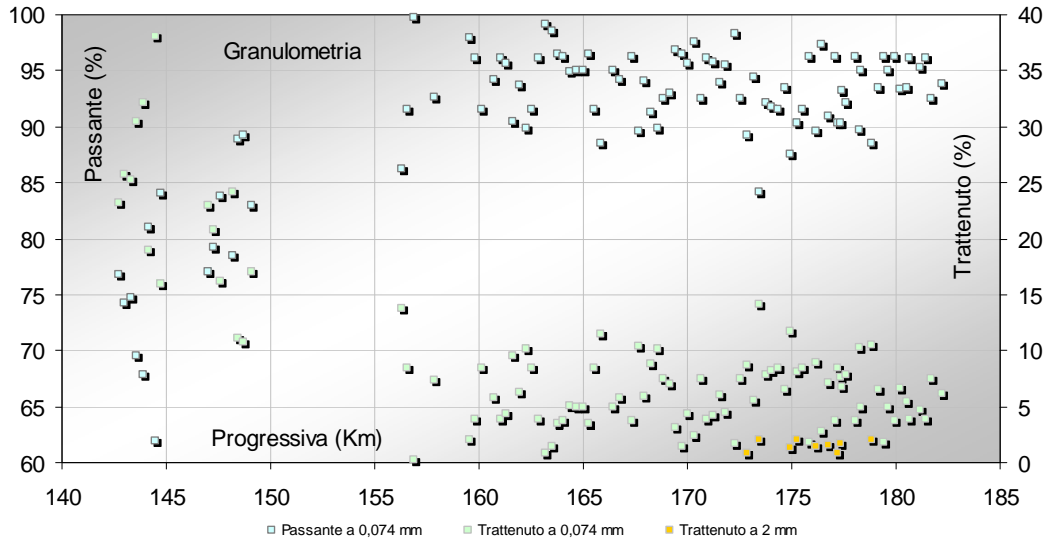


Fig 1 caratteristiche granulometriche lungo la tratta

L'analisi dei limiti di Atterberg ha mostrato come l'indice di plasticità vari mediamente tra il 10 ed il 25% per tratte omogenee (fig 2).

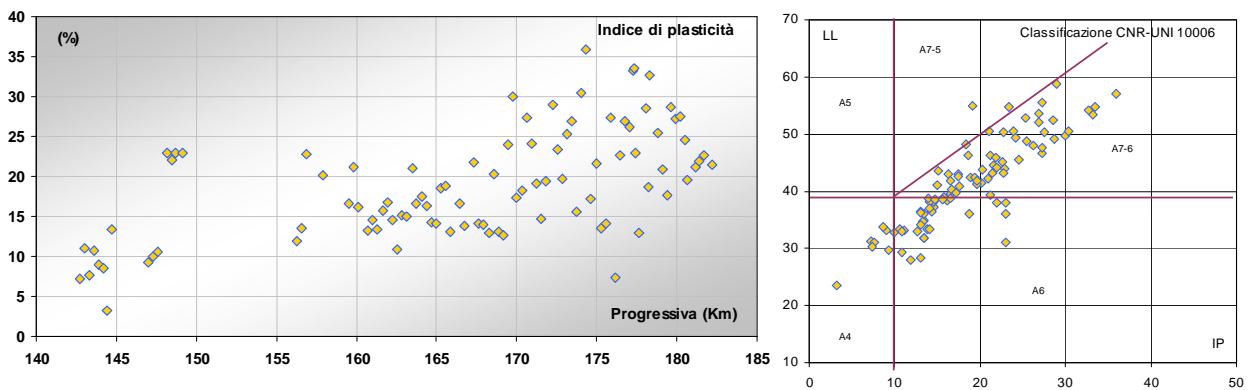


Fig. 2 . Indice di plasticità e classificazione CNR-UUNI dei terreni

L'analisi chimiche hanno evidenziato solo in alcuni casi un contenuto di sostanze organiche superiore alla concentrazione limite prescritta nella Specifica mentre il contenuto in solfati è sempre risultato inferiore ai limiti di accettazione.

Sulla base di queste analisi preliminari sono stati definiti volumi di terreno omogeneo idonei al trattamento a calce.

La Specifica Tecnica delle Ferrovie Italiane

Il ricorso alla calce nel trattamento delle terre destinate alla costituzione dei rilevati ferroviari è regolamentato dalla specifica tecnica "Trattamento delle terre con calce", emessa da RFI nel 1998 e successivamente aggiornata.

Schematizzando, il ricorso al trattamento è vincolato ad una sperimentazione che, in accordo con la Specifica, prevede essenzialmente tre fasi:

- caratterizzazione, nell'ottica del trattamento a calce, del materiale disponibile,
- esecuzione di prove preliminari di laboratorio sul materiale "tal quale" e sulle miscele terra-calce,
- realizzazione dei campi prova.

Per ognuna di queste fasi la specifica indica le prove da eseguire e gli standard da raggiungere.

Nella fase di caratterizzazione vengono identificati, tramite prove granulometriche e valutazione dei limiti dei Atterberg, nonché prove atte a vagliare il contenuto di fattori inibitori del processo di stabilizzazione (materie organiche, solfati, nitrati), i volumi di terra che, non risultando idonei agli standard costruttivi a causa della forte sensibilità all'acqua e delle scadenti caratteristiche meccaniche (terre limo-argillose) o per necessità di stabilizzazione granulometrica (materiali pozzolanici), si prestano tuttavia ad un efficace trattamento con la calce.

Campioni rappresentativi dei volumi di terra, analizzati nella fase precedente, vengono sottoposti, tramite prove di laboratorio, ad un approfondito studio di caratterizzazione meccanica e reologica, che viene messo a confronto con i risultati dei test sulle miscele realizzate con differenti percentuali di calce.

Le prove sul "tal quale" definiscono in primis la curva granulometrica e gli indici di consistenza e plasticità dei campioni rappresentativi di porzioni di materiale omogeneo. Successivamente, attraverso le prove Proctor e CBR, ne specificano le caratteristiche di compattazione in termini di umidità naturale e densità secca e le capacità portanti pre- e post-imbibizione del campione. Le miscele, realizzate con diversi dosaggi di calce, scelti, in relazione alla capacità di scambio cationico dei materiali argillosi, in modo da soddisfare le reazioni immediate terra-calce, vengono sottoposte, oltre ai test già detti, a prove di compressione ad espansione laterale libera ed a prove di taglio diretto.

Una volta definito il comportamento a breve e lungo termine del materiale trattato è possibile stabilire, in prima approssimazione, in funzione degli standard costruttivi auspicati e delle presumibili condizioni di lavorazione (umidità del materiale), il dosaggio di calce "ottimale".

La verifica dei dati emersi in questa fase viene demandata ad un'analisi sperimentale su grande scala: i campi prova.

Quest'ultimo aspetto costituisce una peculiarità della Specifica Italiana rispetto alle Normative Internazionali sull'argomento. La realizzazione dei campi prova, dunque, oltre a permettere di stabilire definitivamente la miscela ottimale, ha come scopo la ricerca delle migliori soluzioni tecnologiche possibili. Nel loro allestimento si lascia alle imprese esecutrici ampio margine di discrezionalità sia nella scelta delle modalità operative, sia nella scelta delle macchine da impiegare,

rimandando il giudizio sulle scelte effettuate ai controlli sul prodotto finale. A tal proposito la Specifica che “i campi prova costituiscono il riferimento per la costruzione dei rilevati”.

Tipo e frequenza di prove da effettuare sul campo sono riportati nella tabella seguente.

	Prove	Frequenza	Standard richiesti	
IN SITO	<u>Prove di carico su piastra</u> (con valutazione del modulo di deformazione di primo e secondo ciclo e del rapporto dei moduli)	Al tempo 0 (cioè subito dopo la compattazione), 1, 3, 7 giorni (anche a 30 giorni per l'ultimo strato)	<ul style="list-style-type: none"> • 20 MPa nell'intervallo 0,05-0,15 MPa per il piano di posa dei rilevati ferroviari e delle strade di pertinenza FS, e nell'intervallo 0,15-0,25 MPa per gli strati dei rilevati per una fascia di 1 m dal bordo superiore della scarpata; • 40 MPa nell'intervallo 0,15-0,25 MPa per i il corpo dei rilevati ferroviari e di strade di pertinenza F.S. e per i piani di posa in trincea; • 15 MPa nell'intervallo di carico 0,05-0,15 MPa per le dune, colline artificiali, ritombamenti, sistemazioni ambientali, etc. 	
	<u>CBR in sito</u>			
	<u>Densità in sito</u> (con valutazione del grado di costipamento)		<ul style="list-style-type: none"> • 95% per il piano di posa dei rilevati ferroviari e delle strade di pertinenza F.S.; • 98% per i rilevati ferroviari e delle strade di pertinenza F.S., per i piani di posa in trincea; • 90% per le dune, colline artificiali, ritombamenti, sistemazioni ambientali, ecc. 	
	<u>Contenuto d'acqua</u>		Al tempo 0 (nei pressi delle zone di misurazione della densità)	Compreso tra $\pm 2\%$ w_{opt}
	<u>Spessore dello strato finito</u>			Non superiore a 30 cm
SU CAMPIONI PRELEVATI IN SITO	Determinazione delle <u>caratteristiche meccaniche</u> in termini di coesione ed angolo di attrito interno in condizioni drenate e non (c' , Φ' , c_u)	<p>A 28 giorni dal trattamento ed a 28 giorni + <i>stress</i> ⁽¹⁾</p> <p>-----</p> <p>⁽¹⁾ La revisione di Gennaio 2003 della Specifica Tecnica esplicita le seguenti condizioni di <i>stress</i>:</p> <ul style="list-style-type: none"> • cicli di imbibizione ed essiccamento, ciascuno composto da completa imbibizione in acqua per almeno 4 giorni ed essiccamento per 24 ore in forno a 105°C; • completa saturazione in acqua per almeno 7 giorni 	I valori dei parametri di resistenza così determinati devono garantire la stabilità del corpo del rilevato (condizioni a breve e a lungo termine)	

TABELLA 1 – Standard previsti dalla Specifica Tecnica di RFI

Studio preliminare

Lo studio è stato realizzato su un campione di terra ottenuto da miscelazione previa quartatura di numerosi campioni rappresentativi di volumi di terre omogenee.

Il materiale tal quale risultava costituito da argille inorganiche a bassa plasticità che come dimostra il basso valore di CBR e l'elevato valore dell'indice di rigonfiamento non offrivano alcuna garanzia di portanza.

Tutti i parametri considerati erano compatibili con un efficace trattamento a calce.

Nella tabella 2 sono indicate le caratteristiche del campione di terra

PARAMETRO	VALORE MEDIO
LL (%)	44
IP (%)	23.5
USCS	CL
Nitrati (%)	0.03
CIC (%)	2
w _{opt} (%)	17.3
$\gamma_{d,max}$ (kN/m ³)	16.64
IPI (%)	10
CBR (%)	3
I _{rig} (%)	2.32

TABELLA 2 – Caratteristiche del campione di terra

Si è dunque proceduto al confezionamento di tre miscele a partire dal valore indicato dalla prova sul contenuto iniziale di calce (CIC).

- Miscela A = Terra + Calce al 2% (CIC);
- Miscela B = Terra + Calce al 2,5% (CIC + 0.5%);
- Miscela C = Terra + Calce al 3% (CIC + 1%)

Secondo le prescrizioni della Specifica Tecnica le tre miscele avevano i prerequisiti richiesti, IPI > 10 e rigonfiamento volumetrico < 1%, per l'impiego nella realizzazione delle opere in terra.

Relativamente ai limiti di Atterberg, si sono verificati da un lato una diminuzione, rispetto alla terra "tal quale", del campo plastico del materiale di circa il 15 %, dall'altro uno spostamento di tale campo verso contenuti d'acqua maggiori in media del 9%, del limite di liquidità.

La figura seguente riporta i risultati in forma grafica.

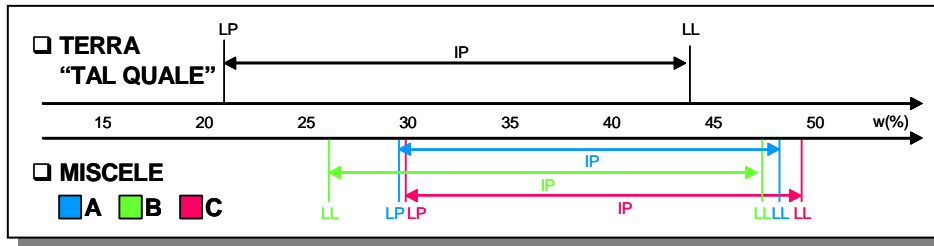


Fig. 3 – Variazione dei limiti di Atterberg e del campo di plasticità per effetto della miscelazione con calce

Essa evidenzia come la terra trattata resta allo stato solido, indipendentemente dal dosaggio di calce impiegato, fino a contenuti d'acqua del 26%.

Circa le caratteristiche di compattazione misurate con la prova Proctor, si sono misurati una diminuzione in media dell'8,7%, rispetto al "tal quale", della densità $\gamma_{d,max}$ ed un aumento del w_{ott} del 19,6%, 25,3%, 37,6% rispettivamente col 2%, 2,5%, 3% di CaO, tabella 4).

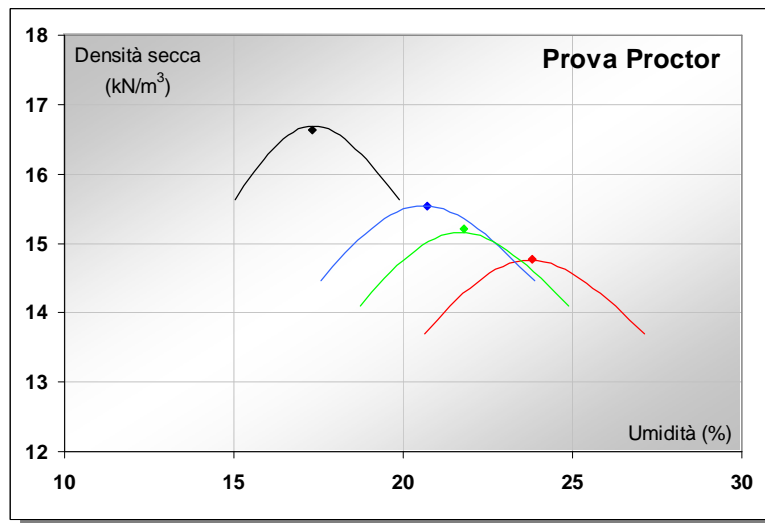


Fig. 4 – Curve di costipamento per le miscele stabilizzate

Dosaggio di calce (%)	0	2	2,5	3
w_{opt} (%)	17,3	20,7	21,8	23,8
$\gamma_{d,max}$ (kN/m ³)	16,64	15,54	15,21	14,78

TABELLA 3 – Umidità ottima e densità secca massima al variare del dosaggio in calce

Le prove CBR hanno evidenziato inoltre sensibili benefici in termini di portanza a seguito del trattamento.

Le prove immediate (IPI) hanno evidenziato come il materiale, a seguito delle azioni di breve termine della calce sulla terra, incrementi, proporzionalmente alla quantità di calce aggiunta, le proprie prestazioni valutate in termini di resistenza alla penetrazione.

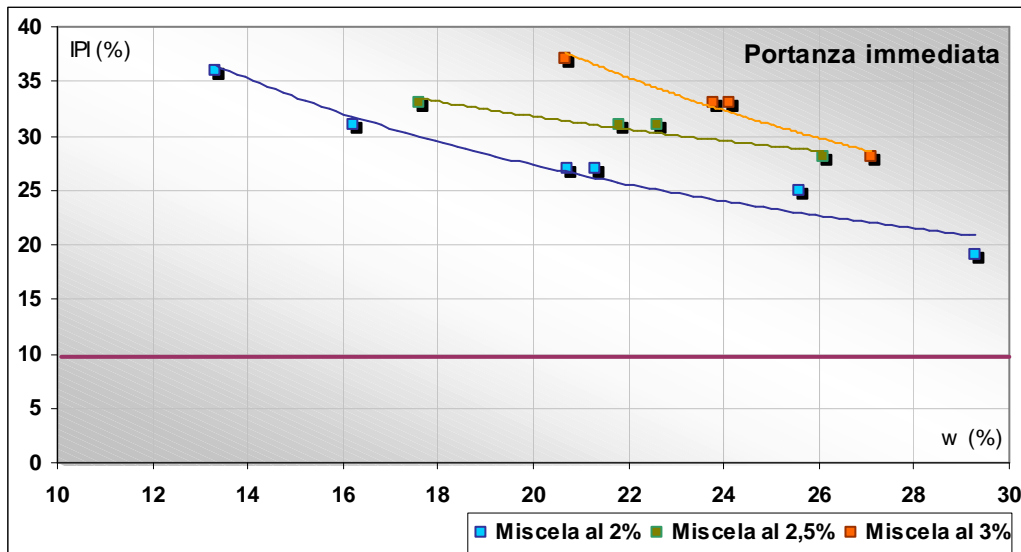


Fig. 5 – Andamento del CBR al variare del contenuto d'acqua per le tre miscele

Le prove CBR effettuate dopo stagionatura e successiva imbibizione del campione, per le tre miscele testate, hanno fornito valori estremamente elevati: a 28 giorni sono stati rilevati valori sempre maggiori di 50 .

Le caratteristiche meccaniche delle miscele terra-calce migliorano sensibilmente con il tempo; ciò è stato confermato dalle prove di compressione ad espansione laterale libera di cui si riportano i risultati in forma grafica. Esse evidenziano che a 28 giorni di stagionatura si conseguono resistenze a rottura nell'ordine dei 900 kPa.

Sulla base dei risultati positivi emersi nello studio preliminare di laboratorio si è potuto procedere alla sperimentazione in sito previsto dalla specifica tecnica.

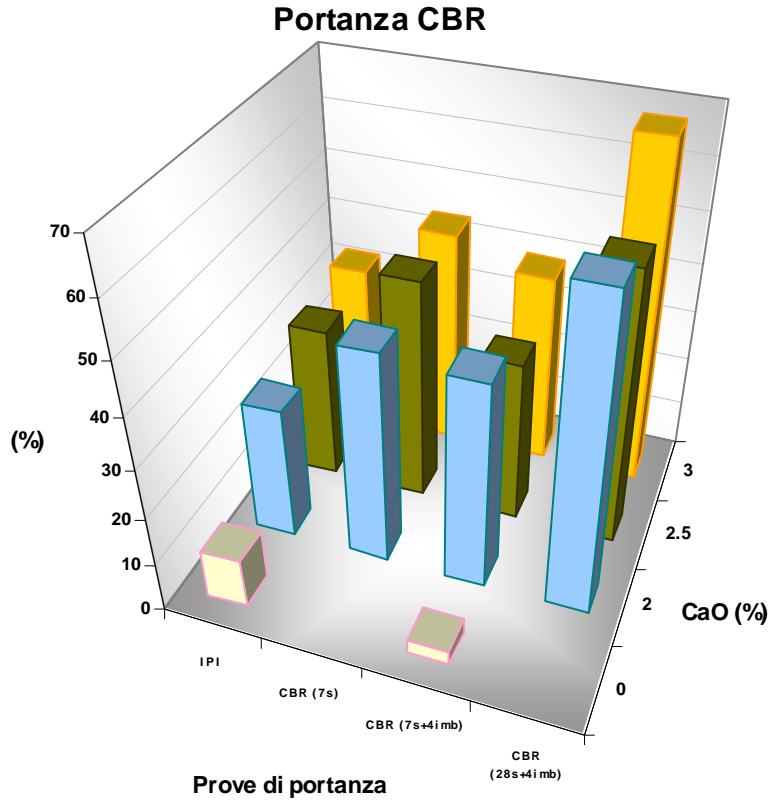


Fig 6 – CBR in diverse condizioni di stagionatura ed imbibizione

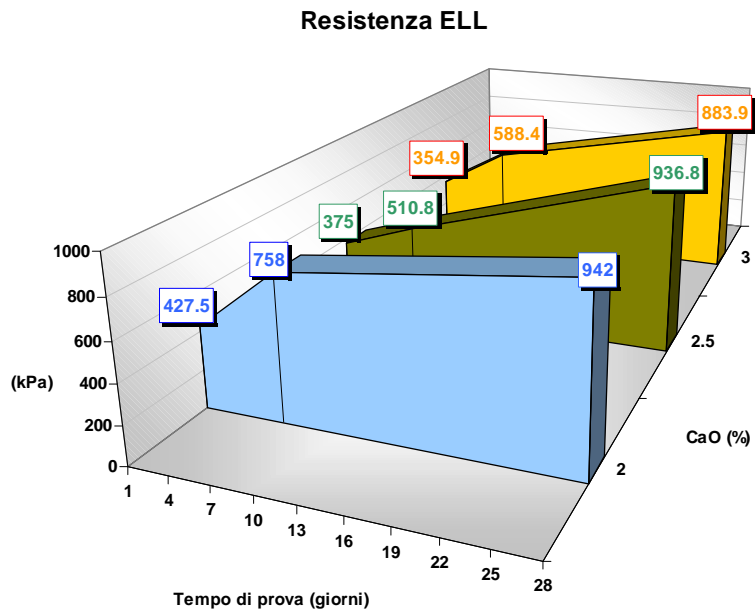


Fig 7 – Evoluzione nel tempo della resistenza a rottura (Espansione Laterale Libera) delle tre miscele

Campi prova

La sperimentazione in sito ha riguardato vari aspetti della fase costruttiva.

In particolare i campi prova sono stati finalizzati allo studio di fattibilità delle seguenti lavorazioni:

- consolidamento e/o la bonifica dei terreni in sito;
- trattamento di terre da scavo per il rinterro conseguente alle operazioni di scotico
- trattamento di terre da scavo da destinarsi alla realizzazione degli strati del corpo del rilevato.

Nei campi prova sono stati sperimentate diverse modalità riguardanti il tipo di compattatore e di schema di rullatura; naturalmente è stata scelta quella che ha offerto migliori caratteristiche meccaniche del prodotto finale.

Lo schema di compattazione ottimale è risultato essere quello ottenuto con un numero di passaggi non superiore a 6 di rullo liscio vibrante nella sequenza: un passaggio statico, un passaggio vibrante minima ampiezza e quattro passaggi statici. con uno spessore massimo dello strato di 30 cm .

<i>Modalità</i>	<i>Standard</i>	<i>Modalità 1</i>	<i>Modalità 2</i>
Tipo(i) di compattatore(i)	rullo liscio vibrante da 18.5 t	rullo tassellato e rullo liscio da 18.5 t	rullo tassellato da 18.5 t e rullo gommato
	1 passaggio statico (figura 8)	4 passaggi vibranti a minima ampiezza con rullo tassellato	4 passaggi vibranti a minima ampiezza con rullo tassellato
Schema di rullatura	1 passaggio vibrante a minima ampiezza 4 passaggi statici	1 passaggio di livellamento con graeder 1 passaggio statico con rullo liscio	1 passaggio statico con rullo gommato

TABELLA 4 – Modalità di costipamento adottate

In ogni campo prova, sono state eseguite le seguenti prove di controllo :

- misura del contenuto d'acqua;
- prova di carico su piastra a doppio ciclo (ai tempi 0, 1, 3, 7 giorni e, solo sull'ultimo strato, anche a 30 giorni);
- densità (stessa frequenza delle prove su piastra);
- prova CBR (stessa frequenza delle prove su piastra).

- compressione ad espansione laterale libera (a 28 giorni di maturazione; a 28 giorni di maturazione + 7 di saturazione + 5 cicli di imbibizione ed essiccamento),
- taglio diretto nelle stesse condizioni delle prove di compressione.

I risultati ottenuti dalla vasta campagna di prove effettuate in sito consentono di esprimere un giudizio complessivamente positivo sull'efficacia del trattamento a calce di terre a medio-bassa plasticità. Nel processo di trattamento assumono particolare importanza da un lato il tempo di stagionatura, che favorisce l'aumento della portanza del materiale trattato, dall'altro la scelta di un efficace schema di rullatura, fondamentale in parte nel conseguimento di addensamenti immediati maggiori, ma soprattutto nell'ottenimento di un prodotto finale contraddistinto da migliori caratteristiche meccaniche.

Le prove eseguite restituiscono valori del modulo di deformazione M_d sempre superiori ai valori minimi contrattuali ($M_d = 40$ MPa). Inoltre il trattamento a calce migliora sensibilmente il CBR, dunque la portanza, ottenuto sul terreno naturale.

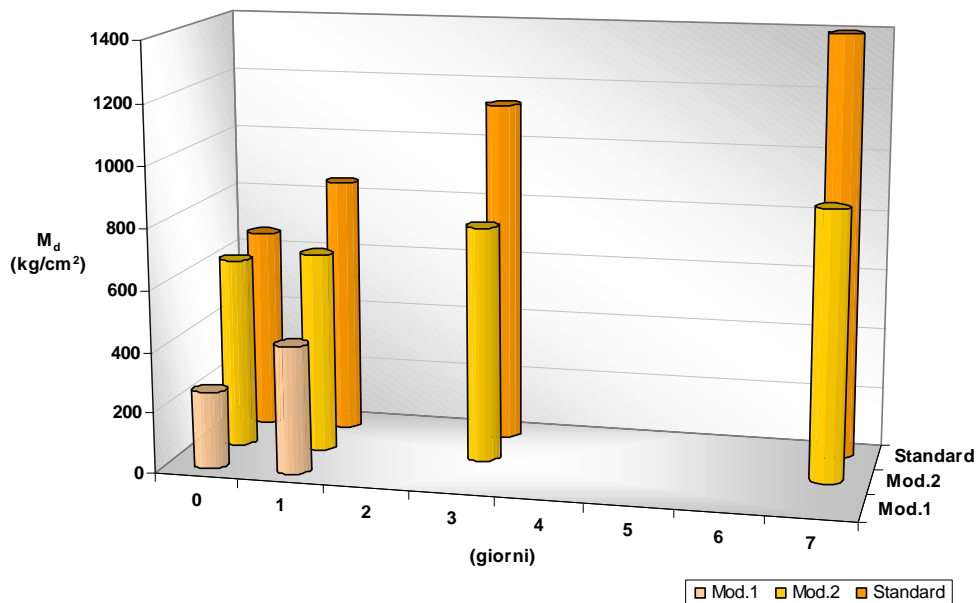


FIGURA 8 – Risultati delle prove di carico su piastra ottenuti con i diversi mezzi e schemi di rullatura

<i>Fasi di studio</i>		γ (kN/m ³)	Φ' (°)	c' (kPa)
Studio di laboratorio	(miscela al 3% di calce)	18,3	35,5	26,5
Verifiche di stabilità		19,0	28	20

TABELLA 5 - Parametri di resistenza di progetto

<i>Compattazione</i>	<i>Campione</i>	γ (kN/m ³)	Φ' (°)	c' (kPa)
Modalità 2	Campione 1 (28gg)	18,86	31,4	19,3
(tass. + gomm.)	Campione 1 (28gg + 7gg sat. + 5 cicli)	19,70	50,0	27,3
Standard	Campione 2 (28gg)	19,23	31,8	20,7
(liscio)	Campione 2 (28gg + 7gg sat. + 5 cicli)	20,01	49,7	34,0

TABELLA 6 – Riepilogo dei risultati delle prove di taglio diretto su campioni prelevati nel campo prove

Oltre alla prove di taglio diretto sono state effettuate prove di compressione ad espansione laterale libera. I valori di resistenza a rottura (σ_r) e relativa deformazione (ε) sono riportati nella tabella 7.

Oltre alla prove di taglio diretto sono state effettuate prove di compressione ad espansione laterale libera. I valori di resistenza a rottura (σ_r) e relativa deformazione (ε) sono riportati nella tabella 7.

<i>Compattazione</i>	<i>Campione</i>	σ_r (kg/cm ²)	ε (%)
Modalità 2	Campione 1 (28gg)	8,2	3,15
(tass. + gomm.)	Campione 1 (28gg + 7gg sat. + 5 cicli)	9,8	1,2
Standard	Campione 2 (28gg)	9,8	3,82
(liscio)	Campione 2 (28gg + 7gg sat. + 5 cicli)	10,1	0,83
Studio di laboratorio (28gg)		9,46	8,15

TABELLA 7– Riepilogo dei risultati delle prove di compressione ELL su campioni prelevati nel campo prove

Le terre trattate a calce, quindi caratterizzate da cinematismi chimici intrinseci, non conservano le loro caratteristiche fisico-chimiche, specie a breve termine. I risultati in termini di rapporto di moduli difficilmente possono essere quelli imposti dagli standard tradizionali. È peraltro plausibile attendersi, con l'esaurirsi delle reazioni che regolano il processo di stabilizzazione, valori del rapporto crescenti nel tempo, come risulta dalla sperimentazione nei diversi campi prova realizzati (Fig. 9).

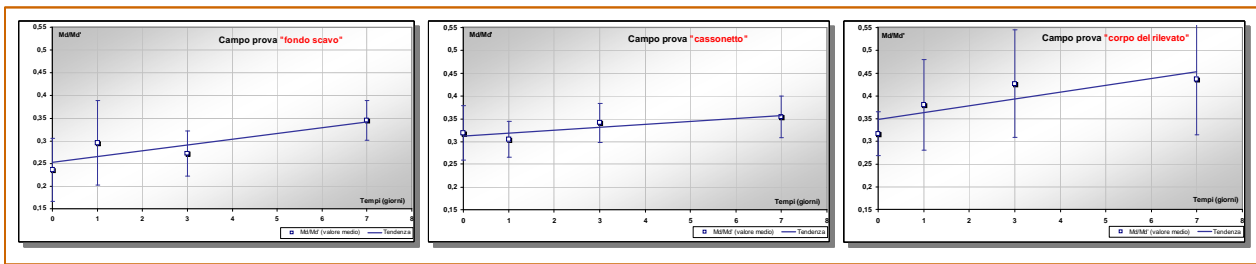


Fig 9 – Evoluzione del rapporto dei moduli di deformazione nel tempo (terre trattate al 3% di calce)

Conclusioni

Nella maggioranza delle verifiche eseguite, i risultati di campo sono risultati maggiori di quelli riscontrati nello studio preliminare di laboratorio.

A seguito delle sperimentazioni di laboratorio e di campo, nell' aprile 2001 sono iniziati i lavori di trattamento delle terre con calce; oggi quasi al completamento.

Sono stati trattati circa 6.000.000 metri cubi di terra con un impiego di 300.000 tonnellate di calce

Il ricorso al trattamento delle terre con calce, configurandosi come una profonda innovazione tecnologica per le Ferrovie Italiane, ha comportato, la messa in atto di un'estesa e approfondita sperimentazione.

La difficoltà sempre maggiore di reperire inerti idonei alla realizzazione dei rilevati, unitamente alla significativa presenza di terreni naturali ad elevata componente limo-argillosa, rendono di sicuro interesse dal punto di vista organizzativo ed economico il ricorso alle stabilizzazioni, in special modo mediante calce.

Sotto il profilo ambientale, la stabilizzazione può rappresentare un'opportunità per effetto sia del minor consumo di risorse naturali che del reimpiego di terreni altrimenti asportati e sostituiti perché privi delle caratteristiche meccaniche necessarie.

Per il concreto riutilizzo è tuttavia necessario il controllo delle caratteristiche del materiale prima e dopo la stabilizzazione, al fine di garantire le prestazioni progettualmente attese, effettuato sia con studi preliminari di laboratorio che con la messa a punto di campi prova.

La Specifica Tecnica di RFI, adottata da Italferr per il trattamento delle terre con calce, ha costituito una guida essenziale.

L'applicazione della Specifica al caso di alcuni rilevati della tratta A.C. Milano-Bologna ha consentito la messa a punto di una articolata sperimentazione di laboratorio ed in sito.