



# STUDIO SPERIMENTALE DELLE PRESTAZIONI IN UN RILEVATO FERROVIARIO DI UNA TERRA STABILIZZATA A CALCE

Antonio Montepara\*  
Gabriele Tebaldi\*\*  
Elena Romeo\*\*\*  
Franco Ori\*\*\*\*

Nella scelta dei materiali per la realizzazione dei rilevati stradali e ferroviari è importante valutarne la resistenza meccanica, ma occorre studiarne anche il comportamento sotto l'azione dei carichi dinamici, in quanto potrebbero generare un accumulo di deformazioni permanenti che nel tempo potrebbe risultare eccessivo rispetto a quanto tollerabile dalla sovrastruttura posta sul rilevato. Nel caso dei rilevati ferroviari, per evitare l'insorgere di questo genere di problemi, l'impiego delle terre stabilizzate a calce è stato in molti casi limitato al solo corpo del rilevato, ovvero si è mantenuto l'impiego dei materiali granulari tradizionali per la realizzazione degli ultimi strati dei rilevati, quelli immediatamente sottostanti lo strato di sub-ballast in conglomerato bituminoso.

### Introduzione

Questo studio sperimentale, nell'ottica di costruire i rilevati ferroviari interamente con terre stabilizzate a calce, ha indagato la tendenza ad accumulare deformazioni permanenti di una miscela terra calce sotto l'azione dei carichi dinamici tipici del traffico ferroviario.

La ricerca ha origine dagli studi condotti dai ricercatori dell'Università di Parma [1, 2, 3] volti ad introdurre la caratterizzazione prestazionale a fianco della caratterizzazione meccanica nel mix design delle stabilizzazioni a calce, ovvero tenere conto, nel determinarne l'accettabilità, anche delle specifiche sollecitazioni a cui il materiale è sottoposto in esercizio.

Lo studio è stato condotto inizialmente tramite una serie di prove di laboratorio ed infine completato con una simulazione numerica alle elementi finiti, tramite l'impiego del programma Strauss7.



Figura 1

### Terra [terra limo-argillosa tipo A7-6]

Frazione sabbiosa: 9%
Frazione limosa: 60%
Frazione argillosa: 31%
Limite liquido ( $W_L$ ): 42%
Limite plastico ( $W_P$ ): 26%
Indice plastico (IP): 16
Contenuto in sostanze organiche: 1,08%
Consumo iniziale di calce (C.I.C.): 1,67%
Umidità ottima Proctor ( $W_{opt}$ ): 18%
Densità secca massima ( $\gamma_{dmax}$ ): 1,64 kg/dm <sup>3</sup>
Indice CBR dopo saturazione: 2,5%
Coesione non drenata ( $C_u$ ): 50 kPa
Coesione (C'): 0,00 kPa
Angolo di attrito interno ( $\phi'$ ): 22°

### Calce [Ossido di calcio UNICALCE - EN 459-1 C190-Q]

Titolo in ossidi liberi: > 90%
Contenuto di MgO: < 5%
Contenuto di CO <sub>2</sub> : < 4%
Passante al setaccio da 2 mm: 100%
Passante al setaccio da 0,2 mm: > 90%

### I materiali utilizzati

Per la sperimentazione si sono utilizzati ossido di calcio e una terra limo-argillosa classe A7-6 (Tabella 1) prelevata dai cumuli di materiale impiegato per la realizzazione del raddoppio della linea ferroviaria Bologna-Verona [4]. Le caratteristiche fisico-meccaniche della terra sono riassunte in Tabella 1.

Assumendo come riferimento il valore del consumo iniziale di calce sono state studiate tre miscele terra-calce, rispettivamente con contenuti di calce viva (ossido di calcio) pari al 2,0%, 2,5% e 3,0% sul peso del terreno secco.

### Tabella - Caratteristiche dei materiali impiegati

\* determinati secondo la metodologia di compattazione AASHTO Modificata



Sulla base dei risultati della caratterizzazione meccanica [4] di tali miscele è stata scelta come miscela di studio quella con il 2% di calce. Tutti i provini necessari per la campagna di prove di laboratorio sono stati confezionati con un contenuto d'acqua pari all'ottimo Proctor e conservati per 28 giorni in sacchetti sigillati e a temperatura costante di 25°C. Il tempo di maturazione di 28 giorni è stato scelto in quanto trascorso questo tempo si può ipotizzare che siano terminate le reazioni connesse alla presenza della calce non coinvolta nel processo di flocculazione (in realtà le reazioni pozzolaniche sono completate per circa il 90-95%, quindi per quanto ancora presenti è lecito, ai fini di un'analisi delle prestazioni delle miscele, trascurarne gli effetti), quindi è possibile ipotizzare che il materiale sia nelle condizioni in cui verrà a trovarsi in esercizio.

## Le metodologie di prova

Per valutare il comportamento visco-plastico si è scelto di eseguire una prova di creep dinamico basata sulla metodologia di prova proposta da Montepara [1] e confrontare la deformazione cumulata nel materiale con la deformazione massima possibile nel materiale, ovvero la deformazione associata al carico di rottura.

La prova di creep dinamico consiste nell'applicare un carico assiale a un provino di terra stabilizzata a calce per misurare, tramite una coppia di estensimetri applicati ai lati del provino, l'andamento delle deformazioni conseguenti alla tensione applicata.

Per definire frequenza e intensità di carico da utilizzare nel test si è fatto riferimento ai risultati dello studio sperimentale pubblicato da Mele e alt. [5] in cui sono stati rilevate frequenze di carico e tensioni nel corpo del rilevato al passaggio di diversi tipi di convogli ferroviari.

I dati pubblicati indicano tensioni di compressione variabili tra 16 kPa e 95 kPa e frequenze di carico tra 1,6 Hz e 160 Hz, a seconda della velocità di passaggio del convoglio. Alla luce di questi dati, al fine di considerare la situazione più gravosa possibile è stato considerato un carico massimo di 100 kPa e una legge di carico di tipo sinusoidale con frequenza di 0,1 Hz, quindi:

$$\sigma_t = \sigma_0 \sin \omega t + \sigma_c$$

dove:

$\sigma_c$  = tensione di precarico (minimo carico in grado di mantenere il contatto tra piatti e provino)

$\sigma_0$  = tensione massima applicata al provino: il suo valore è tale che

$$\sigma_0 + \sigma_c = 100 \text{ kPa}$$

$$\omega = 2\pi f \text{ con } f = 0.1 \text{ Hz}$$

La configurazione di prova ipotizzata è quella di compressione a espansione laterale libera, quindi una prova in assenza di confinamento laterale. La considerazione alla base di questa scelta è stata che nel rilevato il materiale verrebbe a trovarsi in una posizione superficiale, profondità a cui la pressione laterale che agisce su un generico concio di materiale ha un'intensità stimabile tra 7 kPa e 35 kPa [1], quindi un confinamento che si può considerare trascurabile ai fini della prova.

Per verifica, si è fatto ricorso alla prova di trazione indiretta impiegata per la valutazione delle caratteristiche meccaniche dei terreni trattati con leganti idraulici [6]. Lo scopo è assumere come stima della coesione interna del materiale la resistenza a trazione indiretta e confrontarla con la possibile intensità del confinamento a cui potrebbe essere soggetto il materiale. Come illustrato in Figura 2, la tensione resistente alla sollecitazione a trazione indiretta ha direzione uguale e contraria alla tensione di confinamento, quindi è lecito supporre che una resistenza a trazione indiretta di intensità di molto superiore all'intensità del confinamento possa permettere di trascurarlo.

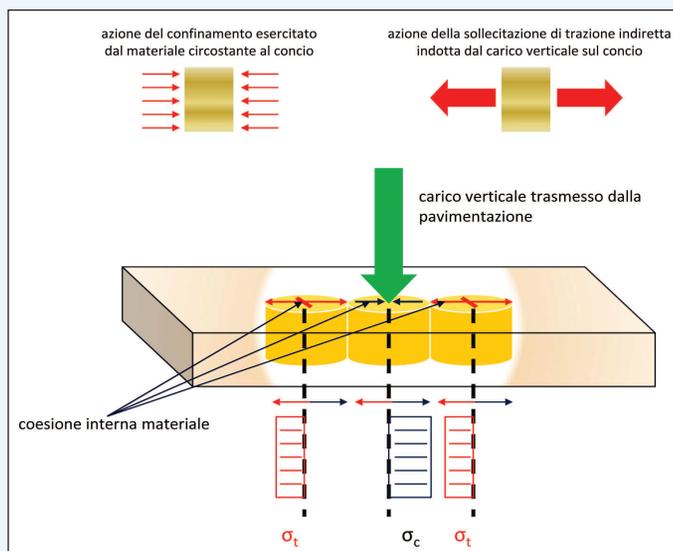


Figura 2 - Schemi delle sollecitazioni indotte dalla trazione indiretta e dal confinamento

Come si evince dal grafico riportato in Figura 3, su cinque provini testati la resistenza massima a trazione indiretta della miscela studiata è di almeno un ordine di grandezza superiore alla pressione di confinamento a cui può essere soggetto un concio di materiale posto nella sommità di un rilevato al di sotto di una pavimentazione, pertanto l'ipotesi di trascurare l'effetto del confinamento scegliendo la configurazione di prova ad espansione laterale libera è assolutamente lecita. Per determinare la massima deformazione verticale, è stata eseguita una serie di test di compressione a espansione laterale libera i cui risultati sono riportati in Figura 4, con a fianco la tensione massima di compressione; in media, la miscela considerata ha mostrato una deformazione massima, corrispondente alla tensione di rottura, pari a 0,0185 mm/mm.

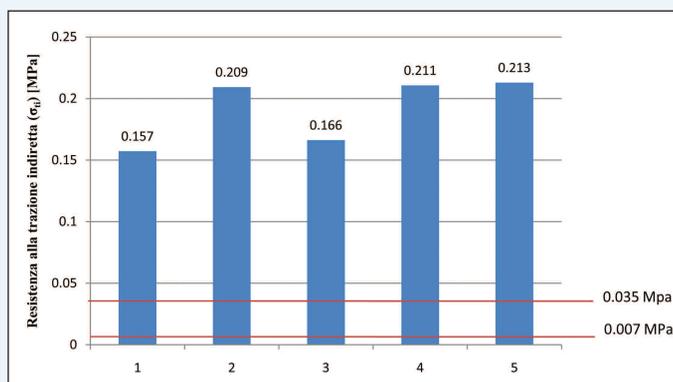


Figura 3 - Il confronto tra l'intensità del confinamento e l'intensità della tensione massima di trazione indiretta

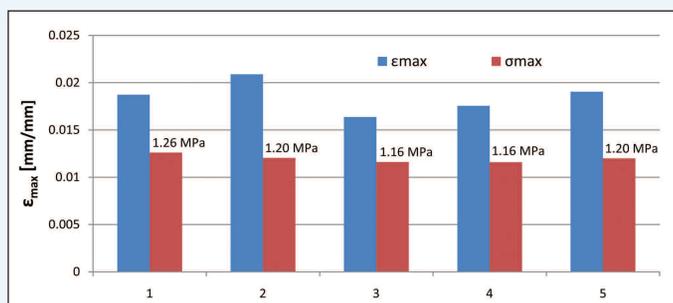


Figura 4 - Le deformazioni e le tensioni massime di compressione ottenute dalle prove di compressione

## I risultati delle prove di creep dinamico

I test di creep dinamico, eseguiti secondo la metodologia sopra illustrata, è stata effettuata con una durata fissata in 100.000 cicli. Questa doveva essere una durata di primo tentativo per valutare poi, alla luce dei risultati ottenuti, se fosse stato necessario utilizzare una durata maggiore per avere informazioni utili su un comportamento a lungo termine del materiale sottoposto a un'azione continua del carico. I risultati (Figure 5 e 6) hanno però evidenziato una tendenza all'accumulo di deformazioni permanenti estremamente bassa: si è registrata una deformazione permanente massima non superiore a 0,00014 mm/mm contro una deformazione massima sopportabile dal materiale pari a 0,0185 mm/mm, ovvero una differenza tra deformazione cumulata e deformazione massima di oltre due ordini di grandezza.

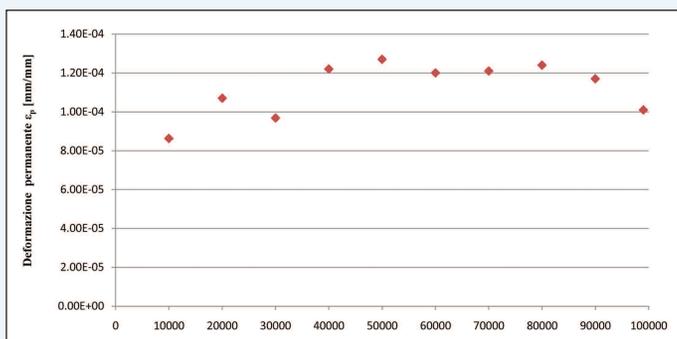


Figura 5 - La deformazione permanente campionata ogni 1.000 cicli

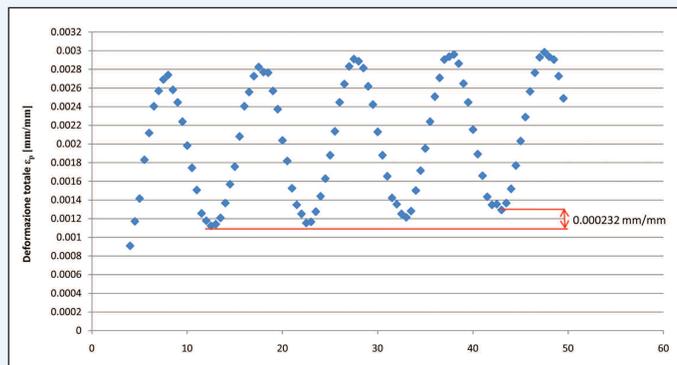


Figura 6 - La deformazione totale registrata su quattro generici cicli

Alla luce di tutto questo, si è reputato molto più significativo procedere con una simulazione numerica del test, in quanto il basso valore delle deformazioni permanenti registrate lasciava ipotizzare durate dei test dell'ordine dei milioni di cicli, con notevoli problemi connessi sia con la possibilità di avere una numerosità di risultati adeguati per una significativa analisi statistica dei dati sia con la necessità di mantenere costante l'umidità del campione.

## La simulazione numerica della prova di creep dinamico

Per simulare il test di creep dinamico si è fatto ricorso ad un modello visco-plastico agli elementi finiti, simulando poi il test di creep dinamico con il programma Strauss 7.0. La caratterizzazione del materiale è avvenuta tramite prove triassiali [4] che hanno indicato per il materiale in esame un angolo di attrito interno  $\varphi = 39^\circ$  e una coesione  $C' = 116$  kPa. I risultati della simulazione del test di creep dinamico con durate superiori a un milione di cicli confermano i risultati sperimentali; si registrano infatti spostamenti indotti nel provino inferiori al decimo di millimetro e una tendenza all'accumulo di deformazioni permanenti dell'ordine dei  $10^{-4}$  mm/mm.

Le quattro immagini riportate in Figura 7 mostrano come il modello riproduca un abbassamento nel provino, ma mostra anche come si mantenga sistematicamente al di sotto del decimo di mm (si osservi la scala cromatica riportata a lato di ciascuna immagine) e che non vi sia un significativo accumulo di deformazioni permanenti.

## Conclusioni

In conclusione, le prove di creep dinamico e le successive simulazioni numeriche, eseguite per considerare una durata di prova superiore ai 100.000 cicli, mostrano come la miscela terracalce studiata, se sottoposta alle sollecitazioni a cui è soggetto il materiale posto nella sommità di un rilevato ferroviario, non manifesti una tendenza all'accumulo di deformazioni permanenti tale da indurre cedimenti incompatibili con le condizioni di esercizio di una sovrastruttura ferroviaria.

Infine si può osservare come lo studio del creep dinamico delle terre stabilizzate a calce fornisca un'appropriata chiave di discernimento in merito alla possibilità di impiego nella realizzazione degli strati alla sommità dei rilevati ferroviari, così come Montepara [1] aveva dimostrato fosse in grado di supportare il mix design delle terre stabilizzate per gli strati di fondazione delle pavimentazioni e per gli strati superiori dei rilevati stradali.

\* Professore Ordinario di Costruzione di Strade, Ferrovie ed Aeroporti e Preside della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Parma

\*\* Ricercatore dell'Università di Parma

\*\*\* Studentessa di Dottorato di Ricerca in Ingegneria Civile del Corso congiunto tra Università di Parma e University of Florida

\*\*\*\* Geologo del Laboratorio Geotecnico CGG

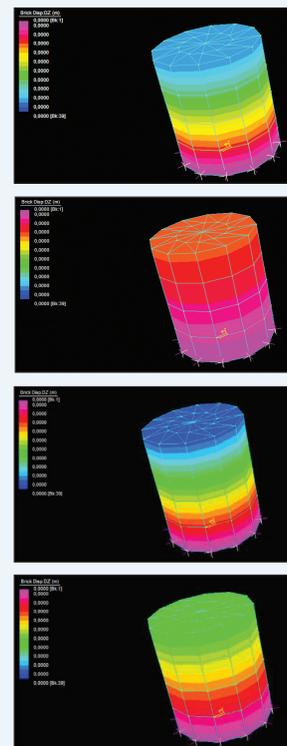


Figura 7 - I risultati della simulazione agli elementi finiti del test di creep dinamico

## BIBLIOGRAFIA

- [1]. A. Montepara, G. Tebaldi - Una nuova metodologia di prova per l'impiego di terre stabilizzate nel corpo stradale, memoria pubblicata negli atti del "X Convegno Nazionale della Società Italiana Infrastrutture Viarie"; Catania, Ottobre 2000.
- [2]. G. Tebaldi - Definizione di un protocollo di prova per lo studio del creep dinamico nelle terre stabilizzate a calce; memoria presentata e pubblicata negli atti del "XII Convegno Internazionale della Società Italiana Infrastrutture Viarie"; Parma, Ottobre 2002.
- [3]. G. Tebaldi - Appropriate use of lime stabilization technology for diggings reuse in road constructions memoria presentata e pubblicata negli atti del "VARIEREI 2005 - V Congress and International Exposition Added Value and Recycling of Industrial Wastes"; L'Aquila, Giugno 2005.
- [4]. Casali, F. Ori, Tranquillo - Alcuni risultati di un trattamento con calce di terreni argillosi, memoria pubblicata nel numero 3-2006 di "Strade & Autostrade".
- [5]. Mele, Buonanno, Mosca, Misano, Di Giangiaco - La sperimentazione A.V. sul corpo stradale; Ingegneria Ferroviaria 1993.
- [6]. Laboratoire Central des Pont et Chaussées Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Guide technique. Paris Cedex, 2000.