

COSTRUZIONE DEI RILEVATI TRA CREVALCORE E NOGARA

# I rilevati ferroviari DELLA BOLOGNA-VERONA

DOTT. GEOL. STEFANO CIUFEJNI, DOTT. GEOL. RENATO BRIGANTI, ING. STEFANO SDOGA\*  
DOTT. GEOL. FRANCO ORI\*\*

## Premessa

Per la costruzione dei rilevati del raddoppio della linea Bologna-Verona sono stati recuperati tutti i terreni provenienti sia da scavi di sbancamenti, fondazioni superficiali ecc. sia quelli provenienti dallo scavo dei pali di fondazione.

Essendo prevalentemente rappresentati da terreni plastici sono stati stabilizzati con ossido di calcio.

Questa nuova organizzazione delle lavorazioni ha permesso notevoli vantaggi:

- è stato risolto il problema della messa a discarica del materiale proveniente dagli scavi;
- è stato ridotto drasticamente l'impatto della circolazione dei veicoli connessi al cantiere con la viabilità esistente, sia per quanto riguarda i mezzi in uscita dal cantiere per il trasporto a discarica sia quelli connessi alla costruzione dei rilevati;
- sono state, in questo modo, recepite le indicazioni degli Enti Locali sul riutilizzo, quanto più possibile, di materiali provenienti da altre lavorazioni;
- è stata ridotta al minimo la quantità di materiale da estrarre da cava.

Nel presente articolo verranno esaminati gli studi preliminari eseguiti per verificare la fattibilità tecnica del riutilizzo dei terreni pro-

venienti dallo scavo dei pali con fanghi bentonitici mediante la stabilizzazione con ossido di calcio.

Saranno poi presentati gli studi e i risultati ottenuti in laboratorio per lo studio delle miscele con particolare riguardo alla percentuale di ossido di calcio e di acqua da utilizzare per i gruppi principali di terreni presenti nell'area di intervento (A4 e A6/A7-6).

Successivamente saranno presentati i risultati dei campi prova eseguiti e le scelte conseguenti.

Infine saranno analizzati i risultati delle prove di densità in sito e delle prove di carico su piastra eseguite per il controllo delle lavorazioni sui circa 50 km di rilevati realizzati tra Crevalcore e Nogara.

La stabilizzazione delle terre è un'ottima alternativa all'impiego dei materiali pregiati tradizionali, specie nelle opere in cui ne sono richieste grosse quantità, con tutte le prerogative necessarie.

Ecco l'esempio della costruzione di rilevati ferroviari tra Crevalcore e Nogara con terreni plastici, provenienti da scavi, stabilizzati con ossido di calcio

## La stabilizzazione a calce

Come oramai è largamente risaputo, la stabilizzazione a calce delle terre argillose e limo-argillose consiste nella miscelazione di queste con calce (ossido calcio e/o idrossido di calcio) ed eventualmente con acqua, nelle quantità opportune in modo da modificarne le caratteristiche di lavorabilità e di resistenza meccanica.

La calce è il primo vero legante prodotto dall'uomo, l'impasto di terra reattiva e calce è stato usato per costruire e gli antichi Romani, sapienti costruttori, realizzarono anche le prime strade con fondazioni stabilizzate con la calce. L'effetto della calce produce il miglio-

\* ITALFERR SPA

\*\* C.G.G. GEOTECHNICAL ANALYSIS SRL,  
PONTECCHIO MARCONI (BO)

mento della lavorabilità delle terre fini plastiche, l'energica riduzione dei rigonfiamenti, l'eliminazione della possibile contaminazione dello strato trattato da parte di particelle fini limo-argillose presenti nelle terre naturali sottostanti, l'incremento delle resistenze all'erosione e al gelo-disgelo, e non ultimo l'indurimento lento e graduale e il conseguente aumento della capacità portante, sia a breve che a lungo termine, della terra dovuto allo svolgersi di reazioni pozzolaniche cementanti.

La calce aerea può essere impiegata sia nella forma di calce viva macinata oppure in quella di calce idrata in polvere, l'esperienza ha fatto privilegiare la prima.

Miscelata con la terra umida, la calce viva in polvere fine, reagisce subito con l'acqua e sviluppa calore e l'umidità del terreno si riduce in funzione della quantità di calce aggiunta, oltre che della temperatura ambiente.

In questo modo le particelle argillose perdono la capacità di trattenere l'acqua e si aggregano in grumi stabili. La terra passa dallo stato plastico a quello solido, diventa subito lavorabile, può essere facilmente stesa in strati e costipata alle densità prescritte.

Il considerevole incremento della coesione e dell'angolo di attrito interno delle terre argillose trattate con la calce si traduce in un aumento di portanza degli strati costipati.

Ma oltre a questi effetti immediati si hanno anche graduali reazioni nel tempo avvengono tra le terre e la calce.

La nota reazione di indurimento delle pozzolane con la calce è basata sulla formazione di silicoalluminati di calcio con caratteristiche cementanti.

Analoghe reazioni si sviluppano nel corso di mesi tra i minerali argillosi e la calce.

Le trasformazioni immediate (scambio cationico) e a medio-lungo termine (reazioni pozzolaniche) indotte dalla calce sono permanenti.

Risalgono agli anni cinquanta i primi importanti lavori di stabilizzazione ben documentati che dimostrano la validità

della tecnica e la durabilità delle opere. Dal 1973 l'Italia dispone del Bollettino Ufficiale CNR n. 36, che disciplina l'uso delle terre argillose trattate con calce per costruzioni stradali.

Alcune significative esperienze di lavori ferroviari furono svolte fino dalla metà degli anni '80 del secolo scorso, soprattutto per la bonifica degli strati di posa dei rilevati.

### Gli studi preliminari per il riuso dei terreni contenenti fanghi bentonitici

Come detto prima dell'inizio delle lavorazioni sono stati eseguiti degli studi preliminari per la verifica della fattibilità del riuso dei terreni provenienti dagli scavi compresi quelli provenienti dalla realizzazione dei pali di grande diametro eseguiti con l'impiego di fanghi bentonitici. È stata scelta una zona in cui sia la stratigrafia che le caratteristiche dei terreni fossero rappresentative per tutta l'estensione dell'intervento ed il programma di indagine è stato suddiviso in due fasi distinte.

Nella prima fase si è proceduto al prelievo di numerosi campioni in profondità con sondaggi a carotaggio continuo al fine di verificare la tipologia dei terreni costituenti il sottosuolo della zona.

Dopo aver verificato che le caratteristiche fisiche e meccaniche dei terreni non cambiano con la profondità e che questi non sarebbero stati idonei ad essere riutilizzati tali e quali per la realizzazione dei rilevati, si è passati alla sperimentazione per verificare la possibilità di procedere alla loro stabilizzazione con ossido di calcio.

Sono stati, quindi, analizzati e trattati con ossido di calce sia i terreni così come sono, simulando i materiali di risulta degli scavi superficiali (plinti di fondazione ecc.), sia quelli "inquinati" dalla presenza della bentonite utilizzata per la perforazione dei pali di fondazione.

Su di un campione prelevato in superficie dopo aver eseguito le prove di classificazione si è proceduto alla sua essicca-

zione e frantumazione in modo da poter suddividere il campione in varie parti omogenee.

Il campione originario è stato quindi suddiviso in tre parti denominate rispettivamente W - A - B.

Il campione W, rappresentato da terreno tale e quale è stato poi ulteriormente suddiviso in tre parti a ciascuna delle quali è stata aggiunta una quantità crescente di ossido di calcio; ottenendo i tre campioni seguenti:

- **W1** = Terreno miscelato con il 2.0% di ossido di calcio.

- **W2** = Terreno miscelato con il 2.5% di ossido di calcio.

- **W3** = Terreno miscelato con il 3.0% di ossido di calcio.

Ai campioni A e B è stata aggiunta, oltre alla calce, la bentonite per simulare, come detto i terreni provenienti dallo scavo dei pali.

Quindi dopo aver aggiunto al campione A una percentuale di bentonite pari allo 0.5% sul peso del terreno secco, questo è stato suddiviso in tre porzioni, a ciascuna delle quali è stata aggiunta una quantità crescente di ossido di calcio ottenendo i tre campioni seguenti:

- **A1** = Terreno miscelato con lo 0.5% di bentonite e 2.0% di ossido di calcio.

- **A2** = Terreno miscelato con lo 0.5% di bentonite e 2.5% di ossido di calcio.

- **A3** = Terreno miscelato con lo 0.5% di bentonite e 3.0% di ossido di calcio.

Analogamente si è proceduto con il campione B aggiungendo al terreno una percentuale di bentonite pari al 1.0% ed ottenendo i seguenti tre campioni:

- **B1** = Terreno miscelato con 1.0% di bentonite e 2.0% di ossido di calcio.

- **B2** = Terreno miscelato con 1.0% di bentonite e 2.5% di ossido di calcio.

- **B3** = Terreno miscelato con 1.0% di bentonite e 3.0% di ossido di calcio.

Su ciascuno dei campioni così ottenuti sono state eseguite le seguenti prove:

- Analisi granulometrica per vagliatura per via umida e per sedimentazione.

- Determinazione dei limiti di Atterberg.

- Prova di compattazione AASHTO Standard.

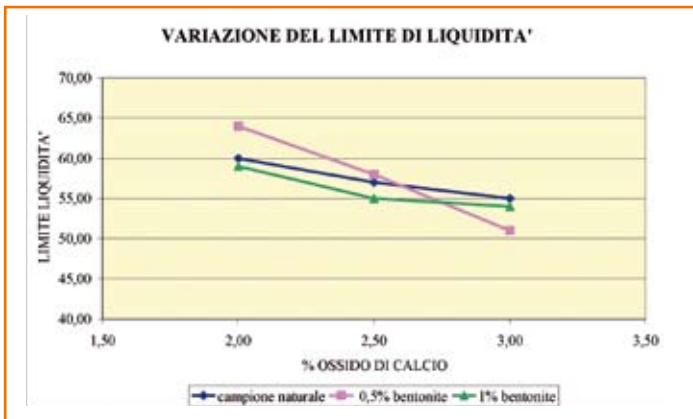


Figura 1 - Variazione limite di liquidità in funzione dell'aggiunta di calce

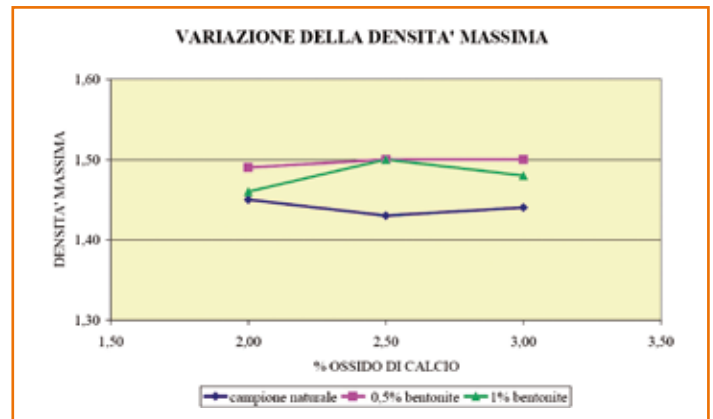


Figura 2 - Variazione della densità secca massima in funzione dell'aggiunta di calce

CaO (%)	campione naturale	0,5% bentonite	1% bentonite
2,00	60,00	64,00	59,00
2,50	57,00	58,00	55,00
3,00	55,00	51,00	54,00

Tabella 1 - Variazione limite di liquidità in funzione dell'aggiunta di calce

CaO (%)	campione naturale	0,5% bentonite	1% bentonite
2,00	1,45	1,49	1,46
2,50	1,43	1,50	1,50
3,00	1,44	1,50	1,48

Tabella 2 - Variazione della densità secca massima in funzione dell'aggiunta di calce

• Prova di compressione semplice su provini compattati in laboratorio con energia AASHTO Standard ed umidità ottimale e stagionati a temperatura ed umidità controllata per sette giorni (almeno due provini per ogni campione).

### I risultati ottenuti

I risultati ottenuti sono riassunti nelle tabelle e grafici sopra riportati.

Dal complesso delle prove eseguite è possibile trarre le seguenti conclusioni.

L'aggiunta di ossido di calcio al terreno addizionato con bentonite porta ad una diminuzione dei valori del limite di liquidità e dell'indice di plasticità e contemporaneamente la frazione fine diminuisce notevolmente.

I valori della densità secca massima tendono ad aumentare con la presenza di bentonite nella miscela, così come i valori del contenuto ottimale in acqua. All'aumentare del contenuto in bentonite i valori della resistenza a compressione presentano una modesta diminuzione, comunque tale da non inficiare i risultati del trattamento a calce.

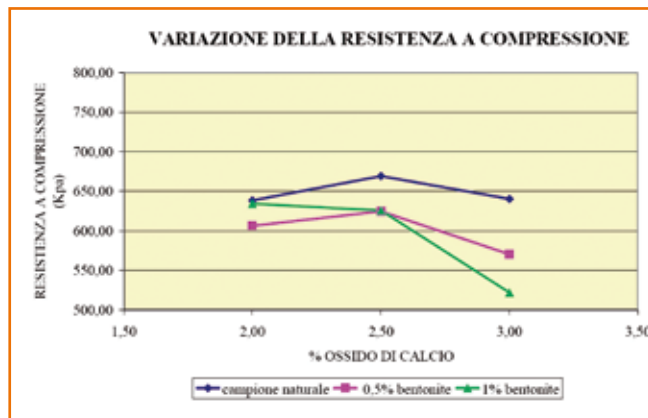


Figura 3 - Variazione della resistenza a compressione in funzione dell'aggiunta di calce

CaO(%)	campione naturale	0,5% bentonite	1% bentonite
2,00	638,26	606,26	634,22
2,50	669,25	624,57	625,62
3,00	640,35	570,21	521,92

Tabella 3 - Variazione della resistenza a compressione (Kpa) in funzione dell'aggiunta di calce

Con la sperimentazione eseguita è stato dimostrato che la bentonite non impedisce la fattibilità del trattamento a calce dei terreni, infatti, come detto in precedenza la variazione della resistenza a compressione subisce una diminuzione di circa il 10% per valori di calce vicini a quelli da utilizzare.

Sulla base di questi risultati è stato previsto il recupero anche dei terreni provenienti dallo scavo dei pali di fonda-

zione anche se "inquinati" con bentonite.

L'unica limitazione posta, tenendo conto della possibile non omogeneità del contenuto in bentonite, è stata quella di utilizzare questi terreni per il riempimento dei cassonetti di bonifica, pertanto i materiali contenenti bentonite dovevano essere stoccati separatamente da quelli provenienti dagli scavi superficiali.

Verificata la fattibilità del processo, è stata sviluppata la sperimentazione così come previsto nelle prescrizioni e normative in vigore, sia in laboratorio che in campi prova per lo studio delle miscele da utilizzare per la messa in opera del materiale.

### Lo studio delle miscele

L'intervento analizzato come detto riguarda la realizzazione dei rilevati nel tratto della nuova linea ferroviaria tra Crevalcore e Nogara, per una lunghezza complessiva di circa 50 km, la cui gran parte è realizzata su rilevato.

Il volume di terreno necessario tra bonifica del piano di posa e corpo rilevato supera il milione di metri cubi, mentre il

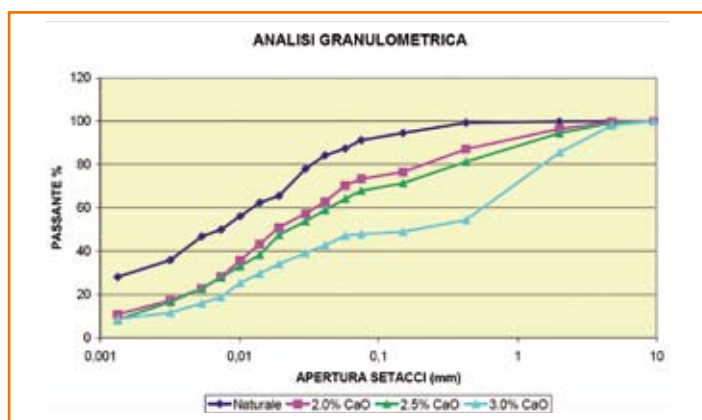


Figura 4a - Analisi granulometriche terreni tipo  $A_6-A_{7.6}-A_{7.5}$

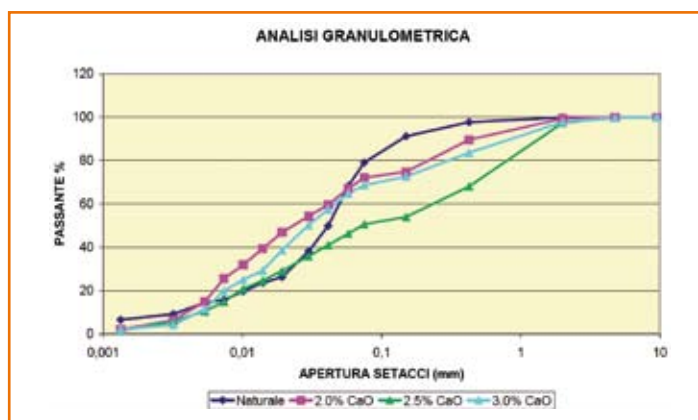


Figura 4b - Analisi granulometriche terreni tipo  $A_4$

CaO (%)	WI A6/A7-6 (%)	WI A4 (%)
0	40,00	26,00
2,00	45,00	25,00
2,50	45,00	28,00
3,00	42,00	28,00

Tabella 4 - Andamento dei limiti di Atterberg

Figura 5 - Andamento del limite di liquidità

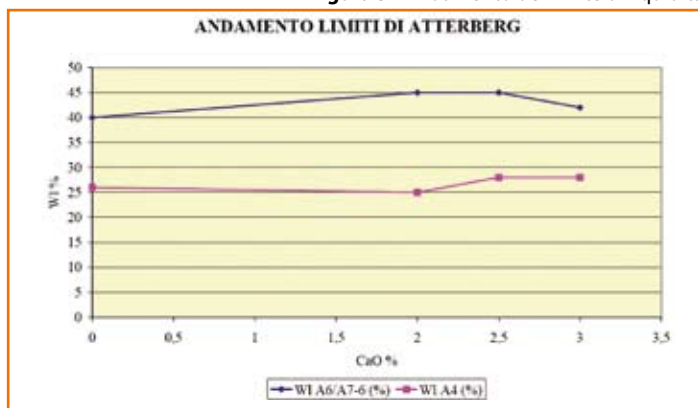


Tabella 5a - Prove di costipamento (AASHTO Mod) terreni tipo  $A_6-A_{7.6}-A_{7.5}$

Naturale		CaO 2.0%		CaO 2.5%		CaO 3.0%	
W(%)	$\gamma_d$	W(%)	$\gamma_d$	W(%)	$\gamma_d$	W(%)	$\gamma_d$
9,67	16.669	9,01	15.720	8,97	15.808	8,76	15.657
12,38	17.079	11,97	16.005	12,11	15.971	11,8	15.957
15,03	17.007	15,25	16.409	14,47	16.081	14,5	16.215
18,05	16.690	17,91	16.770	18,07	16.445	17,77	16.455
21,67	15.983	20,76	16.149	20,77	16.418	20,65	16.437
		22,59	15.855	23,4	15.784	23,02	15.941

Tabella 5b - Prove di costipamento (AASHTO Mod) terreni tipo  $A_4$

Naturale		CaO 2.0%		CaO 2.5%		CaO 3.0%	
W(%)	$\gamma_d$	W(%)	$\gamma_d$	W(%)	$\gamma_d$	W(%)	$\gamma_d$
9,36	17.660	7,53	16.691	7,64	16.279	7,95	16.342
12,38	17.946	10,32	16.909	10,68	16.950	10,54	16.782
15,09	17.905	13,39	17.281	13,42	17.393	13,45	17.306
17,81	17.004	16,36	17.528	16,19	17.416	16,32	17.256
		19,39	16.629	19,24	16.648	19,3	16.605
		22,12	15.693	21,93	15.786	21,91	15.760

terreno da portare a discarica, tra quello proveniente dagli scavi per le fondazioni delle opere d'arte e dalla bonifica del piano di imposta dei rilevati, sarebbe stato di circa 600.000 m<sup>3</sup>.

Come detto la stabilizzazione a calce avrebbe permesso di recuperare tutto questo materiale con una drastica riduzione dell'impatto sul territorio riducendo la circolazione dei mezzi pesanti.

Per le quantità mancanti sono state analogamente utilizzate terre provenienti da scavi eseguiti per la costruzione di altre nuove opere (casce di espansione, costruzione nuovo porto sul Canal Bianco ad Ostiglia, ecc.) nei pressi della nuova linea ferroviaria riducendo al minimo la fornitura da cave di prestito.

Sulla base degli studi preliminari e delle esperienze maturate sono state modificate e adattate le specifiche esistenti, soprattutto nell'ottica dell'uso delle terre stabilizzate con calce per la realizzazione del corpo dei rilevati oltre che per la bonifica del piano di posa.

In particolare è stato scelto che la densità secca massima fosse determinata con la prova di costipamento secondo la AASHTO modificata.

Tale scelta è stata frutto sia delle esperienze maturate, in quanto la densità in sito, laddove la prova di costipamento era stata eseguita con la AASTHO standard, superava il 100%, sia alla luce del fatto che la densità massima standard varia tra l'85% e il 97% della densità massima

modificata, passando da terreni fini a quelli granulari.

Inoltre essendo prevista anche la realizzazione del rilevato con terre stabilizzate con ossido di calcio sono state eseguite prove di taglio in cella triassiale del tipo CID a 28 giorni di maturazione su una serie di campioni ottenuti costipando la miscela terra/calce con energia AASHTO modificata e umidità pari a quella ottimale, minore e maggiore del 2% rispetto a quella ottimale, sia "tal e quali" che dopo completa saturazione in acqua (per un tempo massimo di 7 giorni).

Analogamente, sono stati determinate, mediante prove di laboratorio su campioni indisturbati prelevati dal terreno trattato, le caratteristiche meccaniche



## *Soluzioni giuste per lavori di finitura eccellenti*

Ogni nostro prodotto è la giusta soluzione ad una specifica esigenza applicativa: **GIUSTOFOND** e **GIUSTOMALT** sono le nostre nuove soluzioni per lavori di finitura. Giustofond è il legante per sottofondi ideato per il confezionamento di massetti, mentre Giustomalt è il cemento da muratura per il confezionamento di malte da intonaco ed allettamento. Per ottenere i migliori risultati scegli sempre il giusto prodotto per ciascuna applicazione ed esigenza progettuale.

[www.holcim.it](http://www.holcim.it)



 **Holcim**<sup>®</sup>



Crushing Plant

**CRIFI** SRL

Via S.Gervasio • 61037 Mondolfo (PU)  
Tel. 0721/959931 Fax 0721/957132

**IMPIANTI E MACCHINE  
PER LA FRANTUMAZIONE**

ASSISTENZA • SERVIZIO RICAMBI



Mulini ad impatto della serie  
CMP, MPS e MP SG



Vagli vibranti della serie VS



Recuperatrici a tazze

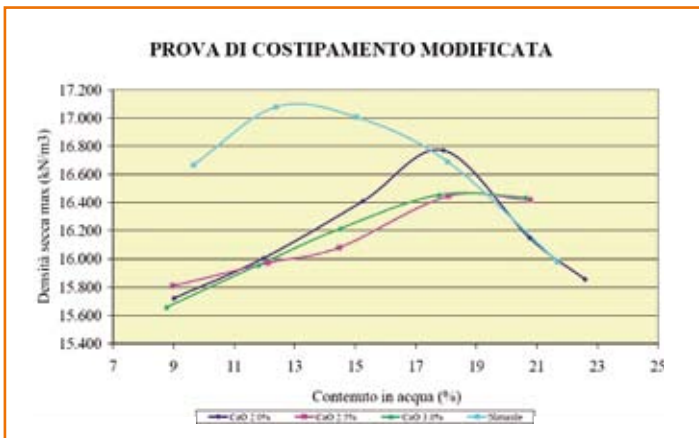


Figura 6a - Prove di costipamento (AASHTO Mod) terreni tipo A<sub>6</sub>-A<sub>7.6</sub>-A<sub>7.5</sub>

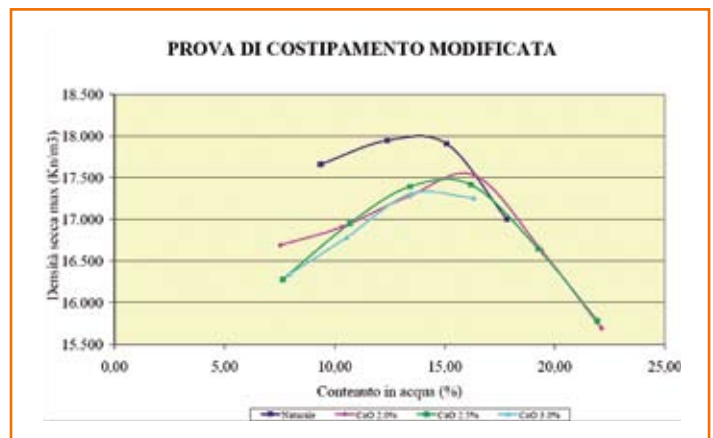


Figura 6b - Prove di costipamento (AASHTO Mod) terreni tipo A<sub>4</sub>

in termini di coesione e angolo di attrito interno, in condizioni drenate e non ( $c'$ ,  $\phi'$ ,  $c_u$ ). Le prove sono state eseguite su campioni maturati per 28 giorni sia "tal quali" sia dopo 5 cicli di imbibizione ed essiccamento, ciascuno composto da completa imbibizione d'acqua per almeno 4 giorni ed essiccamento per 24 ore in forno a 105°C.

Sui campioni trattati come per la ricerca delle caratteristiche meccaniche, sono state eseguite prove di creep in cella triassiale, con pressioni di carico pari al 90% del carico massimo medio di rottura, registrato con le prove precedenti.

Per la caratterizzazione dei terreni di imposta dei rilevati, lungo il tracciato della nuova linea ferroviaria, sono stati eseguiti circa 150 pozzetti geognostici, la cui profondità era generalmente intorno al metro.

Per verificare la possibilità di utilizzare per la formazione del corpo dei rilevati

i terreni provenienti dai maggiori scavi previsti dal progetto per le fondazioni delle opere d'arte sono stati eseguiti anche alcuni saggi approfonditi fino a circa 3.50 - 4.00 rispetto all'attuale piano di campagna. Sui campioni prelevati sono stati eseguite prove di laboratorio per individuare le miscele terre/calce da provare poi su appropriati campi prova.

Di seguito sono descritte le prove eseguite sia in laboratorio che nei campi prova ed i risultati ottenuti.

**Prove di laboratorio**

Le indagini di laboratorio sono state eseguite in due fasi distinte.

**Prima fase**

Nella prima fase di indagine su tutti i campioni prelevati nei vari saggi sono state eseguite le seguenti prove:

- analisi granulometrica per via umida ai setacci con aperture da 2.00 mm -

0.425 mm - 0.075 mm [ASTM D422-63(R02)];

- determinazione dei limiti di liquidità e di plasticità [CNR-UNI 10014];
- classificazione [CNR-UNI 10006];
- contenuto in sostanze organiche [ASTM D 2974 - (00)].

Da queste analisi è emerso che circa il 60% dei campioni sono classificabili come A<sub>6</sub>-A<sub>7.6</sub>-A<sub>7.5</sub> ed il restante 40% come A<sub>4</sub>.

Il valore dell'indice di plasticità risulta compreso tra 5 e 9 per i terreni appartenenti al gruppo A<sub>4</sub>, mentre per i terreni appartenenti ai gruppi A<sub>6</sub>-A<sub>7.6</sub> il valore dell'indice di plasticità risulta compreso tra 11 e 38.

Le prime prove hanno dimostrato che anche i terreni di tipo A<sub>4</sub>, avendo un IP elevato potevano essere stabilizzati con ossido di calce. Tenendo conto, quindi, della loro estensione si è ritenuto opportuno verificare, con uno studio

Figura 7a - Indice di portanza immediata terreni tipo A<sub>6</sub>-A<sub>7.6</sub>-A<sub>7.5</sub>

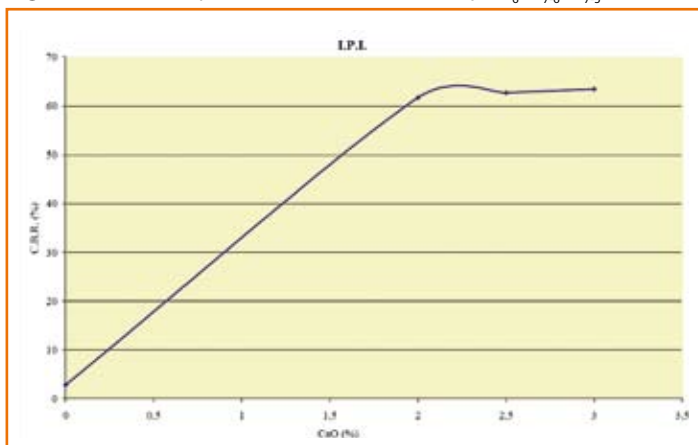
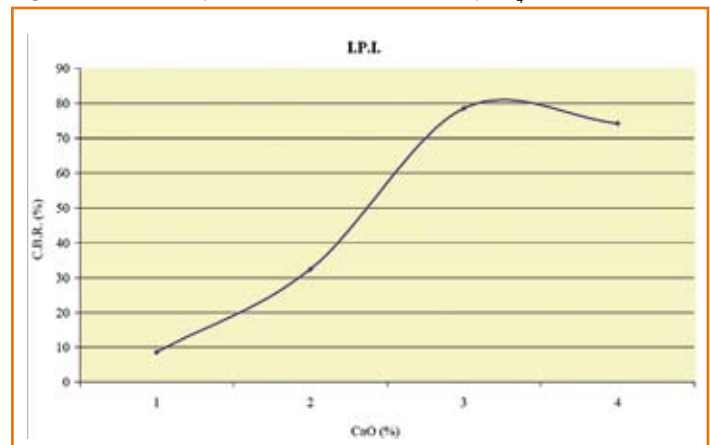


Figura 7b - Indice di portanza immediata terreni tipo A<sub>4</sub>



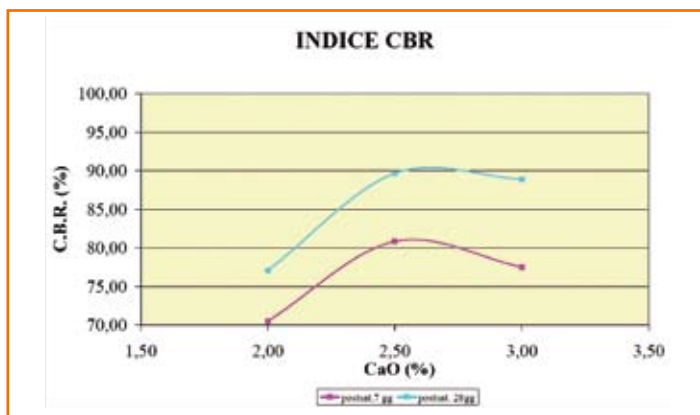


Figura 8a - Indice C.B.R. terreni tipo  $A_6-A_{7.6}-A_{7.5}$

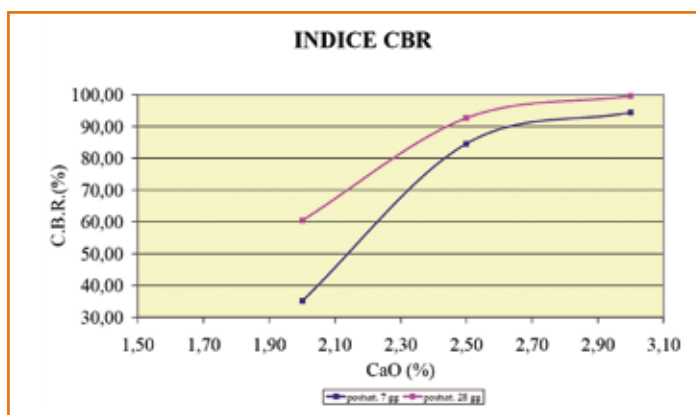


Figura 8b - Indice C.B.R. terreni tipo  $A_4$

Tabella 6a - Indice C.B.R. terreni tipo  $A_6-A_{7.6}-A_{7.5}$

Postsatur. - 7 gg + 4 gg		Postsatur. - 28 gg + 4 gg	
C.B.R. (%)	CaO (%)	C.B.R. (%)	CaO (%)
70,50	2,00	77,05	2,00
80,83	2,50	89,64	2,50
77,50	3,00	88,89	3,00

Tabella 6b - Indice C.B.R. terreni tipo  $A_4$

Postsatur. - 7 gg + 4 gg		Postsatur. - 28 gg + 4 gg	
C.B.R. (%)	CaO (%)	C.B.R. (%)	CaO (%)
35,08	2,00	60,43	2,00
84,60	2,50	92,66	2,50
94,42	3,00	99,54	3,00

approfondito, anche per questi terreni la possibilità di un loro riuso dopo averli stabilizzati con calce.

Essendo la bonifica del piano di posa eseguita stabilizzando terreni in sito è stata redatta una planimetria con riportate le aree aventi terreni appartenenti allo stesso gruppo.

Nella seconda fase gli studi e le prove sono stati, quindi, sviluppati su due tipi di campioni risultanti rispettivamente dalla miscelazione di tutti i campioni appartenenti al gruppo  $A_4$  prelevati dai vari saggi e dalla miscelazione di tutti i campioni appartenenti ai gruppi  $A_6 - A_{7.6}$  ed  $A_{7.5}$ .

### Seconda fase:

A seguito dei risultati ottenuti nella prima fase di indagine, come già accennato, si è proceduto alla miscelazione preliminare di tutti i campioni appartenenti al gruppo  $A_4$  prelevati dai vari saggi eseguiti ed alla miscelazione di tutti i campioni appartenenti ai gruppi  $A_6 - A_{7.6}$

Tabella 7a - Resistenza a compressione terreni tipo  $A_6-A_{7.6}-A_{7.5}$

Matur. 24 ore		Matur. 7 gg		Matur. 28 gg	
ELL	CaO	ELL	CaO	ELL	CaO
(kPa)	(%)	(kPa)	(%)	(kPa)	(%)
821,86	2,00	909,61	2,00	1081,62	2,00
856,20	2,50	993,45	2,50	1191,20	2,50
892,37	3,00	970,17	3,00	1148,8	3,00

Figura 9a - Resistenza a compressione terreni tipo  $A_6-A_{7.6}-A_{7.5}$

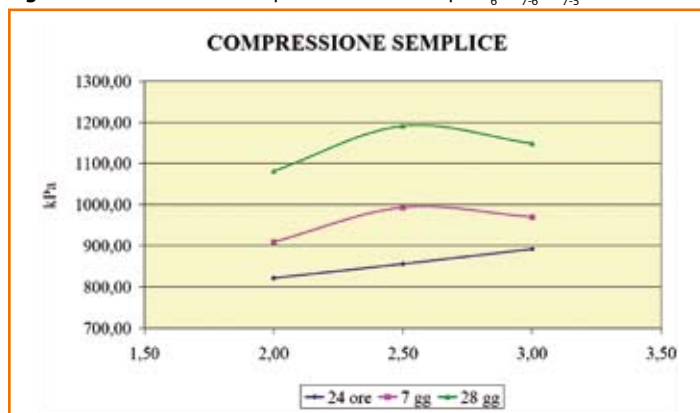
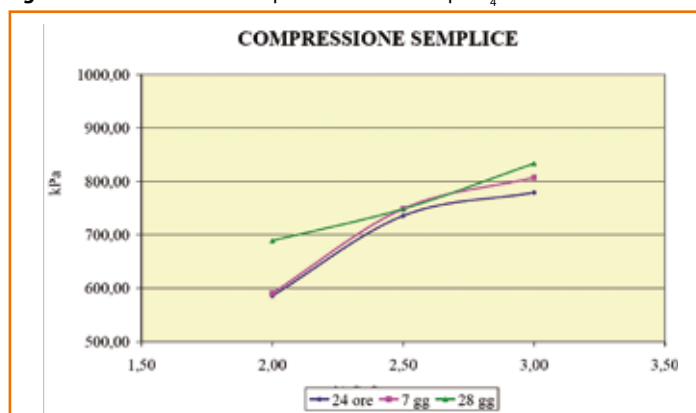


Tabella 7b - Resistenza a compressione terreni tipo  $A_4$

Matur. 24 ore		Matur. 7 gg		Matur. 28 gg	
ELL	CaO	ELL	CaO	ELL	CaO
(kPa)	(%)	(kPa)	(%)	(kPa)	(%)
585,34	2,00	590,51	2,00	688,86	2,00
735,53	2,50	748,57	2,50	748,47	2,50
779,10	3,00	807,07	3,00	833,56	3,00

Figura 9b - Resistenza a compressione terreni tipo  $A_4$





ed  $A_{7,5}$  in maniera tale da ottenere due campioni omogenei ( $A_4$  e  $A_6-A_{7,6}-A_{7,5}$ ) sui quali si sono eseguite inizialmente le seguenti prove:

- determinazione dei limiti di Atterberg;
- analisi granulometrica per via umida con setacci e con aerometro;
- determinazione del contenuto in sostanze organiche;
- determinazione del contenuto in solfati;
- determinazione del contenuto in nitrati;
- determinazione del consumo iniziale di calce (CIC);
- prova di costipamento AASHTO Modificato;
- determinazione dell'indice di portanza immediata (IPI);
- determinazione dell'indice CBR post-saturazione.

Accertato che i campioni così ottenuti risultavano adatti ad essere miscelati con calce, si è provveduto, per ciascuno dei due campioni, a realizzare tre diverse miscele con contenuto di calce crescente (2.0% - 2.5% - 3.0%); su tali miscele, ottenute dalla miscelazione dei terreni con ossido di calcio (CaO) ed acqua, si sono eseguite le seguenti prove:

- determinazione dei limiti di Atterberg;
- analisi granulometrica per via umida con setacci e con aerometro;
- prova di costipamento AASHTO Modificata;
- determinazione dell'indice di portanza immediata (IPI);
- determinazione dell'indice CBR post-saturazione a 7 e 28 giorni di maturazione;
- determinazione del rigonfiamento;
- determinazione della resistenza a compressione dopo 24 ore, 7 e 28 giorni di maturazione;
- prove triassiali CD con diversi tenori di umidità (Wott, Wott+2%, Wott-2%) a 28 giorni di maturazione su campioni "tal quali" e dopo completa immersione per 7 giorni in acqua.

I risultati delle prove eseguite sono riassunti nelle tabelle e grafici precedenti.

Dall'analisi dei risultati delle prove eseguite in laboratorio è emersa chiaramente l'idoneità di entrambi i tipi litologici esaminati ad essere stabilizzati con calce ed al fine di verificare in scala reale quanto emerso in laboratorio, per completare lo studio è stata eseguita la terza ed ultima fase con la realizzazione dei campi prova.

### I campi prova

I due campi prova, come detto uno per ognuna delle tipologie dei terreni riscontrati, sono stati eseguiti in due zone aventi le medesime caratteristiche dei terreni utilizzati nello studio.

Sulla base di quanto emerso dalle prove di laboratorio le percentuali in peso di ossido di calcio utilizzata sono state del 2.0 e 2,5%.

Quindi entrambi i campi prova sono stati divisi in due quadranti per testare 2 diverse percentuali di calce da utilizzare, aventi, alla base, una lunghezza di 50 m e una larghezza di circa 23 m.

L'obiettivo dei campi prova era quello di testare la fattibilità della stabilizzazione a calce sia dei terreni per la bonifica del piano di imposta, che di quelli per la costruzione del rilevato.

Per la realizzazione del campo prova sono state eseguite le stesse operazioni previste per la realizzazione dei rilevati che sono qui riassunte:

- scotico del terreno interessato dal campo per una profondità di 30 cm ed allontanamento del terreno di risulta;
- fresatura del terreno di base per una profondità di 50 cm, fino a che le zolle abbiano una dimensione tale che tutto il terreno risulti passante al setaccio con aperture da 40 mm (figura 10);
- controllo dell'umidità del terreno fresato;
- taratura della spandicalce al fine di ottenere il dosaggio di calce voluto;
- determinazione degli schemi di rullatura in area adiacente al campo prova;
- spandimento della calce (figura 11) ed ulteriore fresatura (figura 12) del terreno al fine di ottenere una miscelazione omogenea e comunque fino a che tutto il terreno miscelato non risulti passante al setaccio da 25 mm;
- controllo dell'umidità della miscela terra-calce;
- compattazione dello strato di terreno in sito così ottenuto, con passaggi di rullo a piastre e successivi passaggi di rullo liscio sia in conformazione statica che vibrante, così come previsto dallo

Figura 10 - Fresatura terreno in sito





**Figura 11** - Spandimento della calce



**Figura 12** - Miscelazione terreno/calce

schema precedentemente determinato (figura 13);

- esecuzione delle prove di controllo previste;
- realizzazione del secondo strato del cassonetto di bonifica e degli altri 3 strati successivi, dello spessore di 30 cm, con terreno miscelato con ossido di calcio in un' area adiacente al campo prova.

Appare evidente che dovendo eseguire le prove di controllo in giorni successivi alla messa in opera del terreno stabilizzato gli strati successivi a quello di bonifica in sito avevano una larghezza decrescente lasciando una striscia dello

strato sottostante accessibile per l'esecuzione delle prove.

L'ammorsamento degli strati successivi è stato garantito dalla rugosità della superficie superiore degli strati sottostanti dovuta alle impronte dei tasselli del rullo (figura 14).

#### **Determinazione dello schema di rullatura**

Come detto un passaggio molto importante è stato determinare lo schema di rullatura che è stato utilizzato sia nel campo prova che nelle successive fasi costruttive del rilevato.

In una zona limitrofa al campo prova è stato stabilizzato con calce uno strato di terreno dello spessore di 0.50 m e su di esso sono stati sperimentati diversi schemi di rullatura eseguendo diverse prove di carico su piastra dopo diversi passaggi di rullo al fine di poter determinare il numero ottimale di passate del rullo stesso necessario per ottenere i risultati richiesti.

I risultati di tali verifiche sono riportati nel grafico di figura 15 dove in ascissa sono riportate il numero di passate e il ordinate il valore del Modulo di deformazione.

**Figura 13** - Compattazione con rullo tassellato



**Figura 14**





# Produzioni di calcestruzzi certificati

www.grafocem.it



Ricerca, sviluppo tecnologico, processi innovativi e qualità eccellente, sono gli obiettivi di un'azienda leader i cui progetti, al servizio del mondo del "calcestruzzo", offrono affidabilità di prestazioni, economicità del servizio e sicurezza per gli operatori.

Un'ampia gamma di impianti sono la proposta CIFA per soddisfare qualsiasi necessità di installazione e capacità produttiva, nel rispetto dell'impatto ambientale. La soluzione ideale per produrre calcestruzzi di qualità certificata.



**tecnologia per**  
**materiali perfetti**



**IMPIANTI E MACCHINE PER IL TRATTAMENTO DEGLI INERTI**

i nostri frantoi, mulini,  
sfangatrici, vagli, alimentatori  
ci permettono  
di costruire per voi  
impianti per realizzare un prodotto unico

**OMIG S.r.l.**

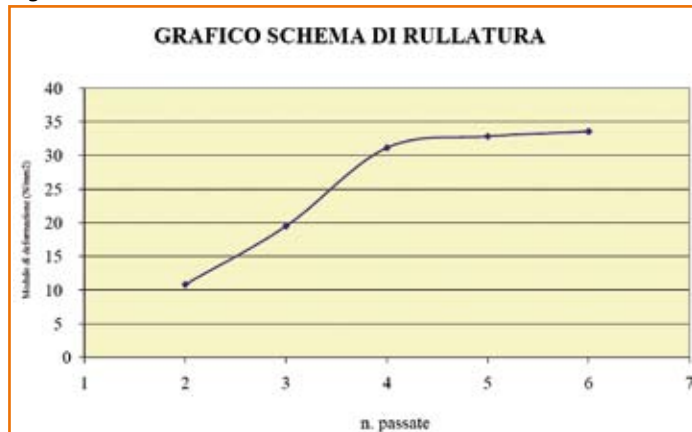
Via Fiagnano, 3

48024 S. Martino in Pedriolo (Bologna) - Italy

tel. +39 051 949641 - fax +39 051 940731

e-mail: [ufficio@omig.biz](mailto:ufficio@omig.biz) - [www.omig.biz](http://www.omig.biz)

Figura 15



Le passate, intese come una andata e un ritorno fanno riferimento a quelle del rullo tassellato; ad esso sono sempre da aggiungere due passate di rullo gommato per la regolarizzazione del piano di lavoro.

Sulla base dei risultati ottenuti lo schema di rullatura prescelto è risultato il seguente:

- n° 4 passate di rullo compattatore da 20 t con tamburo tassellato;
- n° 2 passate di rullo gommato (o liscio) da 21 t.

### Prove di controllo in sito

Allo scopo di verificare i risultati ottenuti con la stabilizzazione a calce in sito, e per poterli confrontare con quelli ottenuti in laboratorio, si sono eseguite diverse prove a diversi tempi di maturazione della miscela terra-calce.

Le prove sono state eseguite in numero di 5 per ogni percentuale di calce utilizzata e su ogni strato nella fascia che sarebbe rimasta esposta in modo da poter confrontare tra loro i risultati ottenuti a diversi tempi di maturazione nelle stesse posizioni.

Le prove eseguite sono state:

- determinazione della densità in sito con volumometro a sabbia (CNR BU N. 22 – 1972), (figura 17), eseguita immediatamente dopo la compattazione;
- prove di carico su piastra con diametro pari a 30 cm per ogni settore e con doppio ciclo di carico con la determinazione di  $Md_1$  e  $Md_2$  (CNR BU N. 146 – 1992) (figura 18). Su tutti gli strati le prove sono state eseguite immediatamente dopo la compattazione, dopo 24 ore, dopo 3 gg e dopo 7 gg. Solo sull'ultimo strato del rilevato sono state ripetute dopo 30 gg dalla compattazione;
- determinazione dell'indice CBR in sito (ASTM D 4429 – 93); in posizioni prossime a quelle dove si sono eseguite le prove di carico su piastra, e con le stesse cadenze.

La determinazione del grado di costipamento è stata eseguita riferendo la densità secca ottenuta in campo mediante il



Figura 16 - Esecuzione prova per la determinazione densità in sito

volumometro a sabbia alla densità secca massima determinata in laboratorio durante la fase di studio preliminare mediante la prova di costipamento Proctor Modificata.

Di seguito sono riportati i risultati delle prove sui 2 campi prova.

### Terreni tipo A6-A7-6-A7-5

Analogamente ai terreni del tipo precedente già con il 2.0% (sul peso secco del terreno) di ossido di calcio si ottengono

Figura 17 - Esecuzione prova su piastra



risultati nettamente superiori a quanto richiesto, infatti che già immediatamente dopo la compattazione il modulo  $Md_1$  è superiore a  $350 \text{ N/mm}^2$  e che dopo 7 giorni di maturazione esso raggiunge valori superiori a  $70 \text{ N/mm}^2$  per il primo strato di bonifica e superiori a  $85 \text{ N/mm}^2$  per il secondo strato.

Per quanto riguarda le prove di densità in sito, esse hanno

evidenziato che con gli schemi di rullatura proposti si ottengono sempre valori di addensamento superiori al 90% della densità secca massima determinata in laboratorio.

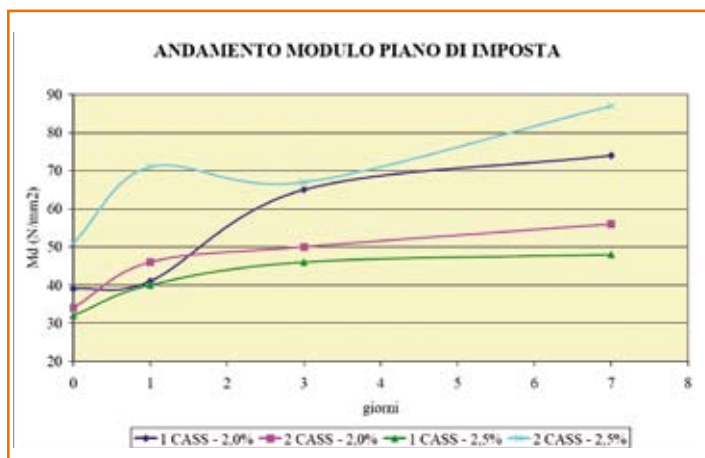
Anche per la realizzazione del rilevato, da un esame dei risultati delle prove eseguite, emerge che già con il 2.0% (sul peso secco del terreno) di ossido di calcio si sono ottenuti risultati nettamente superiori a quanto richiesto, è risultato infatti che già immediatamente dopo la compattazione il modulo  $Md_1$  è superiore a  $35 \text{ N/mm}^2$  e che dopo 7 giorni di maturazione esso raggiunge valori superiori a  $60 \text{ N/mm}^2$ .

La densità in sito è risultata superiore al 96% della densità secca massima determinata in laboratorio.

### Terreni A4

Da un esame dei risultati delle prove eseguite sul piano di imposta dei rilevati emerge che i terreni del tipo A4 già con il 2.0% (sul peso secco del terreno) di ossido di calcio danno risultati nettamente superiori a quanto richiesto dalle Specifiche Tecniche; risulta infatti che già immediatamente dopo la compattazione il modulo  $Md_1$  è superiore a  $45 \text{ N/mm}^2$  e che dopo 7 giorni di maturazione esso raggiunge valori superiori a  $90 \text{ N/mm}^2$ . Per quanto riguarda le prove di densità in sito, esse hanno evidenziato che con gli schemi di rullatura proposti si ottengono sempre valori di addensamento superiori al 95% della densità secca massima determinata in laboratorio.

Analogamente anche per la realizza-



**Figura 18** - Grafico andamento Modulo di deformazione piano di imposta rilevato per terreni tipo  $A_6-A_{7.6}-A_{7.5}$

zione del rilevato, sempre con le terre appartenenti al gruppo A4 con il 2.0% (sul peso secco del terreno) di ossido di calcio si ottengono risultati nettamente superiori a quanto richiesto: si sono avuti infatti, già immediatamente dopo la compattazione il modulo  $Md_1$  è superiore a 45 N/mm<sup>2</sup> e che dopo 7 giorni di maturazione esso raggiunge valori superiori a 60 N/mm<sup>2</sup> (figura 20).

I valori della densità sono risultati per tutti gli strati oltre il 96% della densità massima determinata in laboratorio.

In entrambi i campi prova eseguiti per le 2 tipologie di terreni non sono state rilevate sostanziali differenze nei risultati ottenuti con le due diverse percentuali di calce, si è deciso, pertanto di stabilizzare le terre per la bonifica del piano di posa e del corpo del rilevato con il 2% di calce viva.

Completato il ciclo di prove in sito, e deciso quale miscela utilizzare, dall'ultimo strato del rilevato di prova sono stati prelevati alcuni campioni indisturbati di terreno stabilizzato per l'esecuzione in laboratorio delle seguenti prove:

- Prove triassiali consolidate isotropicamente e drenate per la determinazione dei parametri di resistenza in termini di tensioni efficaci.
- Prove triassiali non consolidate e non drenate per la determinazione dei parametri di resistenza in termini di tensioni totali.
- Prove di creep in cella triassiale.

#### Prove triassiali

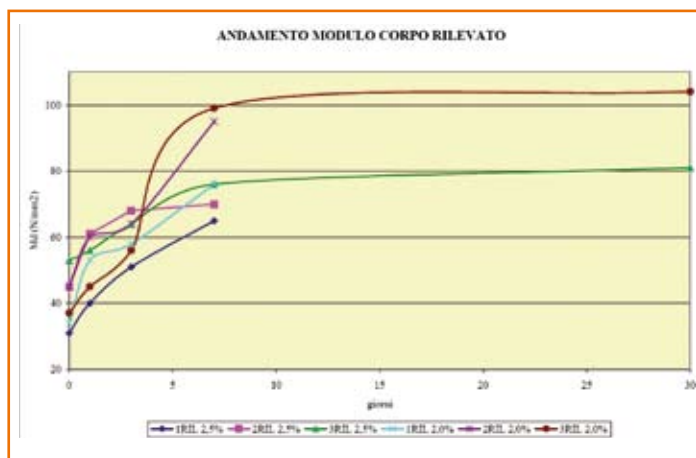
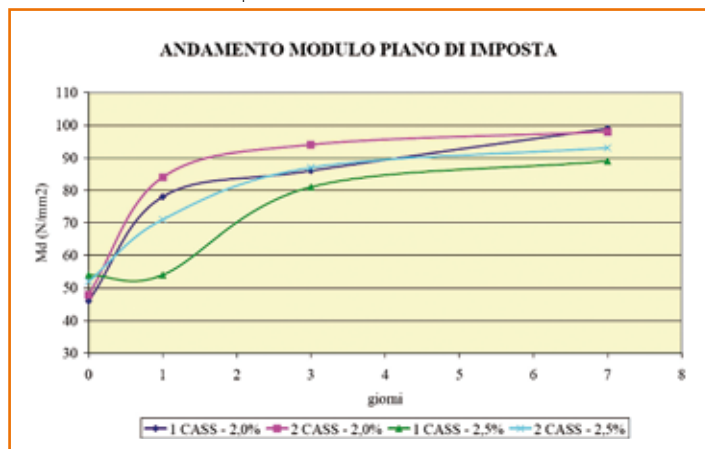
Come detto dall'ultimo strato si sono prelevati dei blocchi di terreno stabilizzato e da questi sono stati ricavati diversi

provini per le prove triassiali (diametro di 3.81 cm e altezza di 7.62 cm) mediante carotiere da laboratorio a pareti sottili con corona diamantata.

Su questi provini così ottenuti si sono eseguite le seguenti prove:

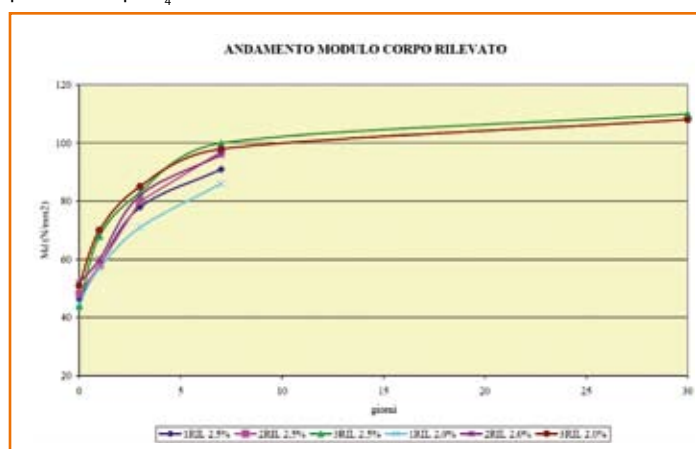
- prove triassiali non consolidate e non drenate su provini nelle condizioni in cui sono stati prelevati;
- prove triassiali non consolidate e non drenate su provini sottoposti a 5 cicli di imbibizione ed essiccamento (ciascuno composto da completa imbibizione in acqua per 4 giorni ed essiccamento in forno alla temperatura di 105° per 24 ore) e successiva saturazione in acqua per 7 giorni;
- prove triassiali consolidate e drenate su provini nelle condizioni in cui sono stati prelevati;

**Figura 20** - Grafico andamento Modulo di deformazione piano di imposta rilevato per terreni tipo  $A_4$



**Figura 19** - Grafico andamento Modulo di deformazione strati rilevato per terreni tipo  $A_6-A_{7.6}-A_{7.5}$

**Figura 21** - Grafico andamento Modulo di deformazione strati rilevato per terreni tipo  $A_4$



Campione	% CaO	c' (KPa)	$\varphi'$ (° sess.)	$c_u$ (KPa)
A <sub>4</sub> TQ	2.0	57	34	672
A <sub>4</sub> R	2.0	77	30	547
A <sub>6</sub> -A <sub>7-6</sub> -A <sub>7-5</sub> TQ	2.0	32	35	446
A <sub>6</sub> -A <sub>7-6</sub> -A <sub>7-5</sub> R	2.0	75	34	332

**Tabella 8** - Risultati prove triassiali (dove: TQ = campione nelle condizioni di prelievo e R = campione sottoposto a cicli di imbibizione ed essiccamento e successiva saturazione)

Campione	% CaO	Carico Vert. (KPa)	Def. Max (mm)
A <sub>4</sub> TQ	2.0	650	1.075
A <sub>4</sub> R	2.0	600	1.090
A <sub>6</sub> -A <sub>7-6</sub> -A <sub>7-5</sub> TQ	2.0	600	1.235
A <sub>6</sub> -A <sub>7-6</sub> -A <sub>7-5</sub> R	2.0	550	1.120

**Tabella 9** - Risultati prove di creep (dove: TQ = campione nelle condizioni di prelievo e R = campione sottoposto a cicli di imbibizione ed essiccamento e successiva saturazione)

- prove triassiali consolidate e drenate su provini sottoposti a 5 cicli di imbibizione ed essiccamento (ciascuno composto da completa imbibizione in acqua per 4 giorni ed essiccamento in forno alla temperatura di 105° per 24 ore) e successiva saturazione in acqua per 7 giorni;
- prove di creep in cella triassiale su provini nelle due diverse condizioni sopra illustrate e sottoposti ad un carico verticale pari a circa il 90% del carico di rottura determinato nelle precedenti prove triassiali.

Nelle tabelle 8 e 9 sono riportati i risultati delle suddette prove.

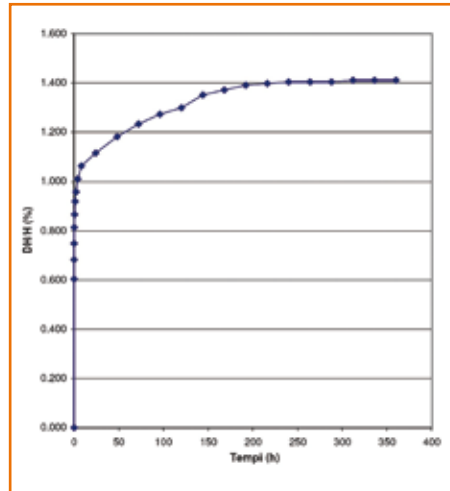
Tenuto conto che i terreni naturali avevano una coesione non drenata ( $C_u$ ) di circa 50 Kpa, una coesione drenata di circa 0 Kpa e un angolo di attrito in condizione drenate di poco superiore a 20° si può osservare come la stabilizzazione a calce porta ad un notevole aumento della resistenza al taglio di picco.

L'immersione in acqua del terreno stabilizzato non comporta un sostanziale decadimento delle sue caratteristiche tecniche. Infine i campioni hanno dimostrato, in campo statico, un ottimo comportamento e soprattutto si presentano assolutamente stabili anche in presenza di acqua (figure 22 e 23).

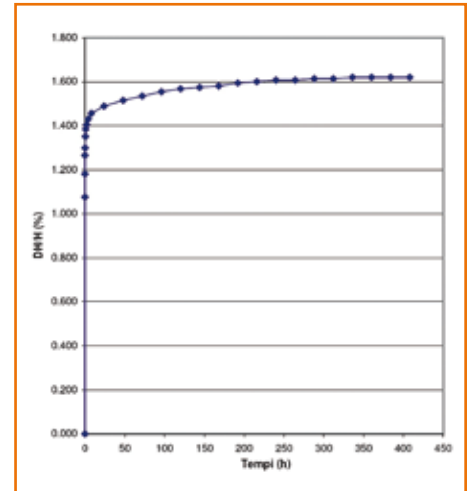
### La realizzazione dei rilevati - Studio delle miscele

Sulla base degli studi e delle prove in laboratorio e in campo, i rilevati della nuova linea Bologna – Verona tra Crevalcore e Nogara, sono stati eseguiti, come detto con terre stabilizzate a calce.

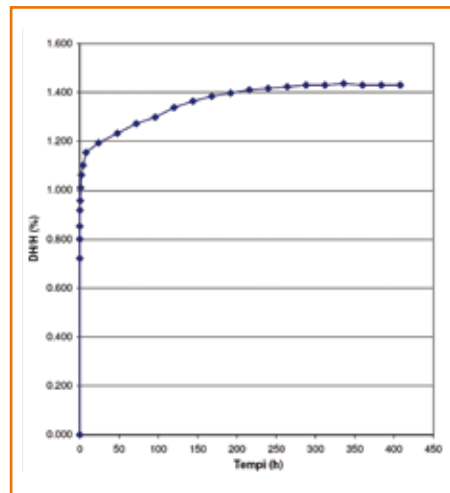
Per il controllo della corretta esecuzione sono state eseguite circa 2000 prove su piastra e circa 1.900 prove di densità in sito.



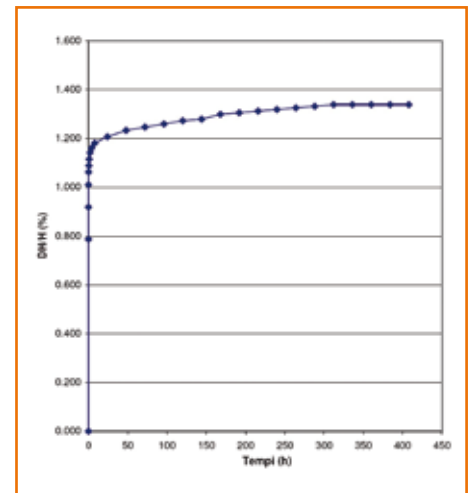
**Figura 22a** - Grafico prova di creep eseguita su provini di terreno A<sub>4</sub> tal e quali



**Figura 22b** - Grafico prova di creep eseguita su provini di terreno A<sub>6</sub>-A<sub>7-6</sub>-A<sub>7-5</sub> tal e quali



**Figura 23a** - Grafico prova di creep eseguita su provini di terreno A<sub>4</sub> dopo cicli di imbibizione ed essiccamento e successiva saturazione per 7 giorni



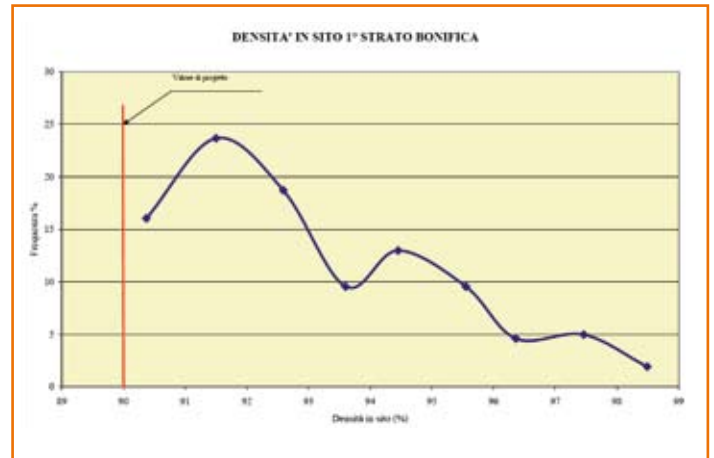
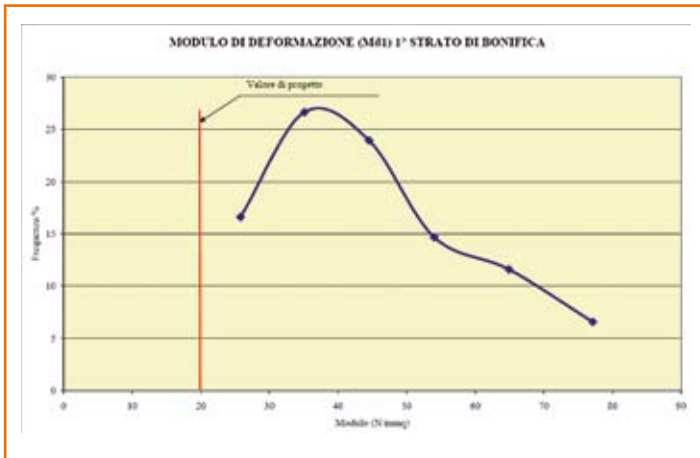
**Figura 23b** - Grafico prova di creep eseguita su provini di terreno A<sub>6</sub>-A<sub>7-6</sub>-A<sub>7-5</sub> dopo cicli di imbibizione ed essiccamento e successiva saturazione per 7 giorni

Le prove sono state eseguite su tutti gli strati e generalmente entro le 24 ore dalla fine della compattazione.

Di seguito sono analizzati i risultati ottenuti, sono stati considerati anomali e non considerati per il calcolo della media sia i valori troppo elevati che quelli che non hanno dato i risultati richiesti.

Infatti, quando sono stati registrati risultati al di sotto di quelli richiesti è stata ripetuta la rullatura nel tratto tra due prove successive positive, e successivamente, per controllo, è stata rifatta la prova nella posizione iniziale.

Va infine rilevato che mentre ad un valore inferiore a quello richiesto del



**Figura 24** - Andamento modulo di deformazione nel primo strato di bonifica

**Figura 25** - Andamento densità in sito nel primo strato di bonifica

modulo di deformazione corrisponde un valore inferiore al minimo richiesto per la densità in sito, non è sempre vero il contrario, infatti in alcuni casi mentre il modulo di deformazione superava, anche se di poco, il valore richiesto la densità in sito risultava essere inferiore a quella di progetto.

Di seguito sono analizzati i risultati delle prove eseguite.

### 1° strato di bonifica

Nel primo strato di bonifica sono state eseguite circa 300 prove su piastra con solo 7 risultati negativi.

La media del modulo di deformazione  $Md_1$  è stata di 44,69 N/mm<sup>2</sup>, con una deviazione standard di 14,61 N/mm<sup>2</sup>.

In figura 24 è riportato la distribuzione del modulo di deformazione.

Le prove di densità in sito in questo strato

sono state circa 280 e i risultati negativi sono stati 16.

Il valore medio è stato di 93,07% con una deviazione standard di 2,15%.

Nella figura 25 è riportato il grafico con l'andamento della densità in sito per il primo strato di bonifica.

### 2° strato di bonifica

Anche nel secondo strato di bonifica sono state eseguite circa 300 prove su piastra con solo 8 risultati negativi.

La media del modulo di deformazione  $Md_1$  è stata di 48,45 N/mm<sup>2</sup>, con una deviazione standard di 17,91 N/mm<sup>2</sup>.

In figura 26 è riportato la distribuzione del modulo di deformazione.

Le prove di densità in sito in questo strato sono state circa 230 e i risultati negativi sono stati solamente 2.

Il valore medio è stato di 93,80% con una

deviazione standard di 2,32%.

Nella figura 27 è riportato il grafico con l'andamento della densità in sito per il primo strato di bonifica.

### Corpo del rilevato

Nel corpo del rilevato sono state eseguite circa 1350 prove su piastra con 67 risultati negativi.  $Md_1$  è stata di 71,74 N/mm<sup>2</sup>, con una deviazione standard di 22,08 N/mm<sup>2</sup>.

In figura 28 è riportato la distribuzione del modulo di deformazione.

Le prove di densità in sito in questo strato sono state circa 1340 e i risultati negativi sono stati 111.

Il valore medio è stato di 97,80% con una deviazione standard di 2,32%.

Nella figura 29 è riportato il grafico con l'andamento della densità in sito per il corpo del rilevato.

**Figura 26** - Andamento modulo di deformazione nel secondo strato di bonifica

**Figura 27** - Andamento densità in sito nel secondo strato di bonifica

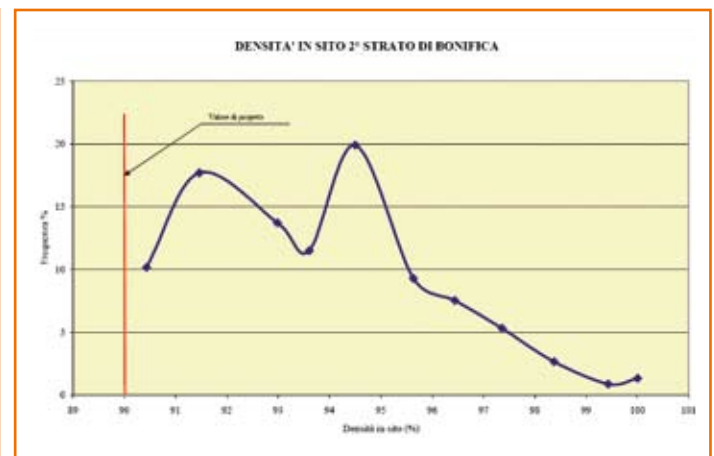
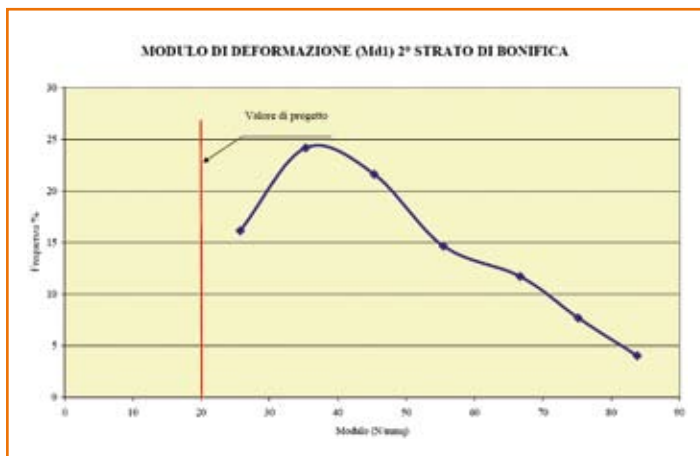






Figura 28 - Andamento modulo di deformazione nel corpo del rilevato

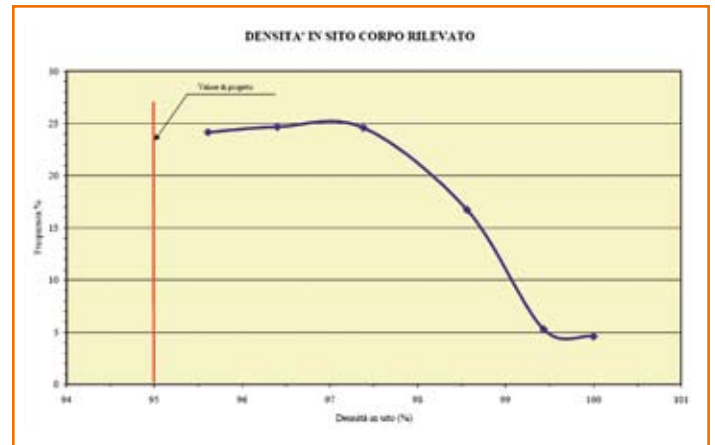


Figura 29 - Andamento densità in sito nel corpo del rilevato

### Conclusioni

Per la costruzione dei rilevati del raddoppio della linea Bologna – Verona sono stati recuperati tutti i terreni provenienti sia da scavi di sbancamento, fondazioni superficiali ecc., compresi quelli provenienti dallo scavo dei pali di fondazione. Questa esperienza ha confermato come la stabilizzazione delle terre sia un’ottima alternativa all’impiego dei materiali

pregiati tradizionali, specie nelle opere in cui ne sono richieste grosse quantità, con tutte le prerogative già sottolineate in fase introduttiva.

Resta peraltro necessario lo sviluppo di approfonditi studi per la verifica della fattibilità e la presenza in cantiere di una figura professionale con conoscenze specifiche della tecnica, che pianifichi adeguatamente lo svolgimento dei lavo-

ri e la loro corretta esecuzione. Occorre programmare e sviluppare un controllo continuo per la verifica delle lavorazioni per correggere immediatamente eventuali anomalie.

Se queste fasi saranno rispettate si può avviare un percorso virtuoso con notevoli benefici sia dal punto di vista ambientale che economico per la realizzazione di grandi e piccole opere. ■

# Tagliato su misura

IMF 132: impianto mobile di frantumazione secondaria e terziaria progettato e costruito sulle tue esigenze



Disponibile anche a noleggio

**O.L.F.**

DAI CREATORI DEL MARTELLO INTELLIGENTE

# INDECODZILLA

HP 18000

IL DEMOLITORE PIÙ GRANDE DEL MONDO



## LE DIMENSIONI CONTANO

CON I SUOI 4,6 METRI DI ALTEZZA E 11.050 KG DI PESO, IL NUOVO INDECO HP 18000 È IL PIÙ GRANDE DEMOLITORE MAI APPARSO SUL MERCATO. GRAZIE ANCHE ALLA SUA AVANZATISSIMA TECNOLOGIA È IN GRADO DI SCARICARE SU DI UN UTENSILE DEL DIAMETRO DI BEN 250 MM, UNA POTENZA DISTRUTTIVA MAI VISTA. ANCORA UNA VOLTA, ALLA INDECO, PENSIAMO ALLE COSE CHE CONTANO, DAVVERO.

 **INDECO**

YOUR PARTNERS IN DEMOLITION

[www.indeco.it](http://www.indeco.it)