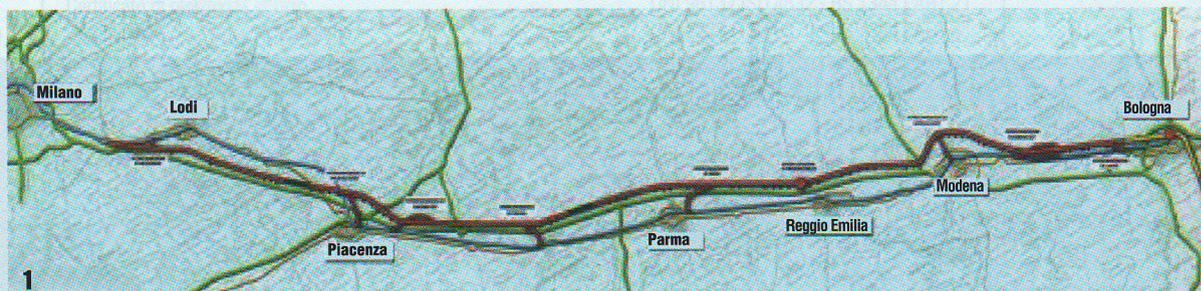


# Riciclo di terre stabilizzate con calce



Si riporta l'esperienza maturata dal Consorzio Modena Scarl nell'ambito della costruzione della tratta ad Alta Velocità Modena-Bologna che ha utilizzato terre plastiche stabilizzate con calce, recuperate dalla demolizione di un rilevato provvisorio, per la costruzione di nuovi rilevati permanenti. La miscela recuperata ha soddisfatto pienamente le richieste prestazionali della nuova linea ferroviaria, caratterizzando le terre plastiche - trattate con calce - come un ottimo materiale da costruzione, con notevoli valenze anche dal punto di vista ambientale.

Il lavoro è stato presentato in occasione del II Simposio Internazionale TREMTI (Treatment and Recycling of Materials for Transport Infrastructure) tenutosi lo scorso mese di ottobre a Parigi.

Angelo Canziani  
Luigi Cariboni  
Umberto Pressato  
Tecnici Unicalce SpA

**L'**Italia sta sviluppando e ammodernando la propria rete ferroviaria ad Alta Velocità-Alta Capacità sulle direttrici Nord-Sud ed Est-Ovest. La nuova linea Milano-Napoli, con un percorso complessivo di 719 km, è la più lunga tra quelle ora in costruzione. Sulla tratta Roma-Napoli (245 km) dal 1995 si sta facendo largo uso della calce nella costruzione di rilevati recuperando terre dagli scavi. Le altre due tratte in costruzione sono la Bologna-Firenze (79 km) e la Milano-Bologna (182 km); anche per queste i trattamenti con la calce stanno trovando una estensiva applicazione. La tratta Firenze-Roma (254 km) ha caratteristiche di Alta Velocità già dal 1978, ed è ora oggetto di ammodernamenti.

1. La tratta Milano-Bologna

“Treno Alta Velocità” (TAV) concessionaria di “Rete Ferroviaria Italiana” (RFI) è la Project Company del Gruppo Ferrovie dello Stato che gestisce e sviluppa il sistema ferroviario nazionale. TAV ha assegnato la costruzione della linea Milano-Napoli a tre differenti General Contractor: Cepav Uno per la tratta settentrionale della linea, compresa tra Milano e Bologna, Cavet per la Bologna-Firenze e Iricav Uno per la Roma-Napoli.

Italferr è la società di ingegneria di RFI incaricata da TAV di supervisionare e approvare tutte le elaborazioni tecnico-ingegneristiche realizzate dalle imprese di costruzione coinvolte nell'opera.

In particolare, Italferr ha sovrinteso e poi approvato diversi campi prova proposti ed eseguiti dai General Contractor per valutare e ottimizzare le lavorazioni con la calce. Italferr è anche la prima società pubblica italiana che nel 1998 ha emesso un dettagliato capitolato per i trattamenti delle terre con la calce.

Il Gruppo Unicalce che promuoveva e tuttora promuove in Italia i trattamenti delle terre con la calce ha dato il proprio sostegno a Italferr per tale compito.

L'Impresa Pizzarotti & C. SpA di Parma, una delle società costituenti il consorzio Cepav Uno, è la società a cui è stata affidata la conduzione della Consortile (tra Snamprogetti e Pizzarotti) Modena Scarl, assegnataria della costruzione della tratta tra Modena e Bologna, lunga circa 42 km. Pizzarotti, dal 1995 al 1999 aveva già eseguito con successo in Italia alcuni interventi di trattamento delle terre con la calce, ad esempio nella costruzione della linea ferroviaria Ferrara-Suzzara (Consorzio Fescof). La proficua collaborazione tra l'Impresa Pizzarotti e il Gruppo Unicalce si sviluppò già per quella grande opera e sta continuando per la linea ferroviaria ad Alta Velocità Milano-Bologna.

## LA SUB TRATTA MODENA-BOLOGNA

### Il tracciato e il territorio

Il Consorzio Modena Scarl sta completando 40 km di linea Alta Velocità a doppio binario tra Modena e

Bologna; di questi circa 22 km sono costituiti dal "Sistema Viadotti Modena", importante opera d'arte a Nord di Modena, prevista per minimizzare le interferenze con la viabilità e il territorio. L'opera si compone di 755 travi (lunghezza max 31,5 m) in calcestruzzo armato precompresso, prefabbricate in cantiere dall'Impresa Pizzarotti. Per la loro particolare sagoma i manufatti sono denominati travi a omega. Il viadotto comprende anche 9 impalcati iperstatici a tre campate (di lunghezza complessiva pari a 136 m) in calcestruzzo precompresso gettato in opera.

Nell'assegnazione della Modena Scarl sono inoltre compresi rilevati ferroviari per circa 25 km di linea AV e circa 8 km del raddoppio della linea ferroviaria Modena-Mantova, nel tratto tra Modena e Soliera. Nel totale, l'insieme dei lavori eseguiti dalla Modena Scarl comporta un fabbisogno di materiali per rilevati di circa 2,5 milioni di metri cubi, che ammontano a circa 5 milioni di m<sup>3</sup> considerando gli aggregati per il confezionamento del calcestruzzo per la realizzazione delle opere d'arte.

Secondo la tecnica di costruzione dei rilevati e i capitoli esistenti in Italia fino alla metà degli anni '90, le terre limo-argillose dovevano essere sempre asportate e sostituite unicamente con terre non plastiche estratte da cave esterne o di cantiere. Successivamente, anche su invito degli Osservatori Ambientali indirizzati al recupero e riutilizzo delle risorse, vennero introdotte apposite specifiche tecniche per la stabilizzazione a calce delle terre e il relativo reimpiego nella costruzione di rilevati.

In quest'ottica, considerata l'esigua disponibilità estrattiva stabilita per il territorio attraversato dalla Alta Velocità nelle provincie di Modena e Bologna, già durante lo sviluppo del progetto esecutivo, il recupero delle terre plastiche stabilizzabili con la calce era pertanto diventato un obiettivo fondamentale.

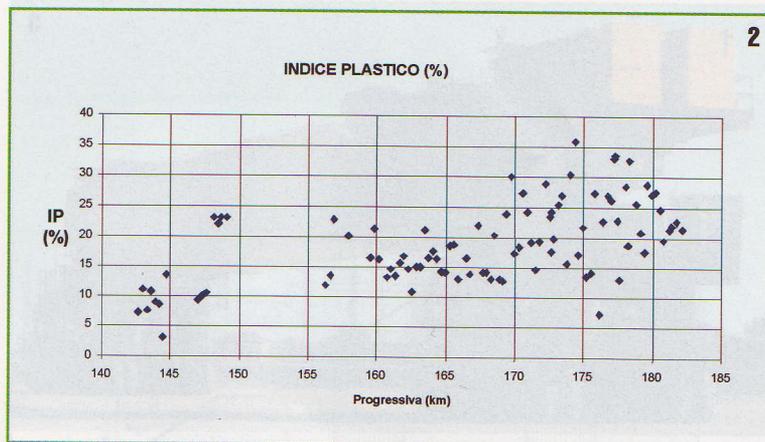
### La scelta della stabilizzazione con calce

Le indagini geonostiche condotte lungo il tracciato di 40 km prima dell'inizio dei lavori confermarono che le terre interessate dagli scavi erano di tipo argilloso, come illustrato dai valori dell'Indice Plastico (IP) presentati in fig. 2.

Per realizzare le diverse opere d'arte previste dal progetto, dovevano essere scavati circa un milione e mezzo di metri cubi di terre, provenienti principalmente da:

- plinti di fondazione, per 350.000 m<sup>3</sup> circa,
- pali trivellati e diaframmi di sottofondazione, per 700.000 m<sup>3</sup> circa,
- pali a elica di consolidamento dei rilevati, 400.000 m<sup>3</sup> circa.

Considerati gli ingenti quantitativi di materiale disponibili e l'idoneità degli stessi ad essere riutilizzati nella costruzione delle opere in terra una volta trattati a calce, la Modena Scarl decise di intraprendere la stra-



da del recupero dei materiali di scavo, in accordo alle specifiche tecniche Italferr e alla normativa vigente.

Ad oggi, i quantitativi di terre sopra esposti sono stati tutti riutilizzati mediante il trattamento a calce: quelli provenienti dagli scavi profondi (sottofondazioni) per realizzare per opere di viabilità interferita (rampe di cavalcaferrovia, strade), per le opere di cantizzazione (piste di cantiere, piazzali di lavoro) e per il reinterro di opere d'arte. Quelli provenienti dagli scavi di fondazioni superficiali sono invece serviti per la costruzione di rilevati sulla linea ad alta velocità e sui rami di Interconnessione. Complessivamente, i volumi di terre trattate a calce hanno interamente soddisfatto il fabbisogno dei cantieri, limitatamente alla parte dei rilevati ferroviari in cui secondo le prescrizioni Italferr può essere utilizzata la stabilizzazione a calce, (è attualmente escluso lo strato superiore del rilevato di spessore 1,5/2,0 m a seconda dell'altezza del rilevato, posto sotto il piano di appoggio della fondazione ferroviaria).

### IL RILEVATO PROVVISORIO

Alla progressiva 151+200, in un tratto in cui al doppio binario della Linea Alta Velocità si affianca un terzo binario di accesso al costruendo scalo ferroviario della zona industriale di Modena, venne realizzato nei mesi di maggio e giugno 2003 un rilevato provvisorio (RIBX).

Questo rilevato servì per consentire il transito dello speciale carro varo (del peso di 350 ton) impiegato abitualmente per trasportare e varare le travi a omega prefabbricate (ciascuna del peso di 650 ton) verso il viadotto in affiancamento alla Linea AV.

Il rilevato provvisorio venne costruito utilizzando terre di scavo dei plinti di fondazione del viadotto stabilizzate con calce e rimase in esercizio per 15 mesi, fino al settembre 2004, quando iniziò la sua demolizione.

A questo punto, seguendo la stessa filosofia del recupero delle risorse disponibili, in primo luogo si voleva verificare se il materiale risultante dalla demolizione del rilevato provvisorio fosse stato idoneo ad essere riutilizzato le per altre opere in terra. In

2. Valori dell'Indice Plastico rilevati lungo la tratta Modena-Bologna

4. Sezioni del rilevato provvisorio RIB X

5. Valori IPI e CBR (7-4) per il rilevato RIB X e per i due rilevati permanenti



3

### Lo studio della miscela terra-calce

Le attività di stabilizzazione delle terre con calce presso la Modena Scarl iniziarono con lo studio di laboratorio delle miscele, finalizzato a verificare la fattibilità del trattamento in funzione delle caratteristiche dei materiali disponibili in sito. Successivamente furono realizzati diversi campi prova, relativi alle diverse parti costituenti il rilevato ferroviario (fondo scavo, bonifica, corpo del rilevato), finalizzati alla definizione della percentuale di legante ottimale, delle modalità di posa in opera (fresatura, spandimento legante, miscelazione, livellazione e compattazione), delle attrezzature di lavoro e dei controlli in corso d'opera.

La tab. 1 riporta le caratteristiche del materiale "tal quale" (come in natura), su cui è stato condotto lo studio delle miscele con la calce.

Osserviamo che il materiale risultava mediamente plastico, con valore di CBR saturo piuttosto basso.

In tab. 2 sono riportati i risultati di laboratorio delle miscele al 2% e al 3% di calce viva. Le caratteristiche chimiche della calce erano conformi al tipo CL90 della norma EN 459-1; il prodotto risultava passante per oltre il 90% al setaccio da 0,090 mm. Una terza miscela con il 2,5% di calce viva aveva fornito risultati intermedi ai precedenti.

Lo studio veniva completato con prove edometriche e di taglio diretto su provini realizzati con la miscela al 3% di calce, i cui risultati sono riportati in tab. 3.

Sulla base delle conferme agli studi di laboratorio ottenute dai campi prova, veniva individuata quale miscela da utilizzare in produzione quella al 3% di calce, in quanto aveva mostrato le caratteristiche più promettenti e anche per garantire una certa quantità di calce libera nella miscela, utile in condizioni di umidità localmente superiori al valore teorico e per qualsiasi ulteriore evenienza, quale quella poi verificatasi con il riutilizzo del materiale proveniente dalla demolizione del rilevato provvisorio RIBX.

3. Trasporto con il carro speciale di una trave a omega del viadotto Modena

secondo luogo, se tale materiale necessitasse di una qualche forma di "rigenerazione", ad esempio mediante l'aggiunta di legante. Era cioè necessario valutare le caratteristiche prestazionali residue di una miscela terra-calce realizzata più di un anno prima, con cui era stato realizzato, secondo le stesse modalità in uso per le opere definitive, un'opera provvisoria.

Il caso si presentava inoltre interessante in quanto rappresentava l'occasione per indagare "dal di dentro" un rilevato realizzato con materiali stabilizzati a calce, al pari dei rilevati definitivi, valutandone quindi lo stato di conservazione a più di un anno di esercizio dalla costruzione, dopo cioè un periodo significativo durante il quale erano stati ciclicamente applicati, mediante il transito del carro varo, importanti carichi mobili (superiori a quelli solitamente indotti dal transito dei convogli ferroviari) e con minori protezioni agli agenti atmosferici rispetto ai rilevati definitivi, in cui lo stabilizzato a calce è coperto da 1,5-2,0 m di materiali "tradizionali", dallo strato supercompattato dallo strato di sub-ballast in conglomerato bituminoso.

In altre parole, poteva essere verificata l'efficacia del trattamento delle terre con calce nel tempo, in condizioni pari se non più gravose di quelle a cui sono soggetti i rilevati ferroviari.

**TAB. 1 CARATTERISTICHE MEDIE DELLA TERRA UTILIZZATA PER IL RILEVATO PROVVISORIO**

Granulometria		LL	IP	$\gamma_s$	Wopt.	USCS	IPI	CBR (0+4)	Rig.
< 0,075 (mm)	< 0,42 (mm)	(%)	(%)	(daN/m <sup>3</sup> )	(%)		(%)	(%)	lineare (%)
97,6 %	100 %	44	23	1.664	17,3	CL	10	3	2,32

**TAB. 2 CARATTERISTICHE DELLE MISCELE TERRA-CALCE (CL90)**

Calce (%)	LL (%)	IP (%)	Wopt (%)	$\gamma_s$ (daN/m <sup>3</sup> )	IPI Wopt (%)	CBR (28+4)gg (%)	Rig. lineare (%)	Rc - 7gg (daN/cm <sup>2</sup> )	Rc - 28gg (daN/cm <sup>2</sup> )
2	48	18	20,7	1.587	27	62	0,5	4,71	8,84
3	49	19	23,8	1.511	33	68	0,3	5,95	9,42

**TAB. 3 RISULTATI MEDI DELLE PROVE EDOMETRICHE E DI TAGLIO**

Prova di Taglio		Prova Edometrica	
Coesione c' (kPa)	Angolo d'attrito (°)	Pressione (daN/cm <sup>2</sup> )	Modulo Edometrico (Mpa)
26,48	35,48	0,125 - 0,250	8,16
		0,250 - 0,500	12,23
		0,500 - 1,00	16,27
		1,00 - 2,00	14,97

### La geometria del rilevato e le modalità costruttive

Il volume del rilevato provvisorio RIBX era di poco superiore a 60.000 m<sup>3</sup>. Le dimensioni lineari erano 50,0 m di larghezza alla base e 24,00 m in sommità, 8,0 m di altezza massima, 200 m circa di lunghezza.

La fig. 4 mostra una sezione del rilevato in cor-

rispondenza delle pile del Viadotto Modena in esso inglobate.

Per contenere gli sforzi di taglio indotti dal forte peso del carro che trasportava le travi a omega, durante la costruzione sono state inserite orizzontalmente nel rilevato geogriglie da 100x100 kN/m, posate su piani distanziati tra loro 2 metri. La sovrastruttura del rilevato era costituita unicamente da uno strato di misto cementato di spessore 40 cm. Il materiale proveniente dallo scavo dei plinti di fondazione veniva trasportato sul sedime del rilevato provvisorio in costruzione, steso in strati di spessore uniforme pari a 30 cm e ne veniva controllata l'umidità (che risultava frequentemente compresa tra il 25% e il 27%). Mediamente sono stati posti in opera 1700 m<sup>3</sup>/giorno di miscela terra-calce, con punte fino a 2000 m<sup>3</sup>/giorno, equivalenti a circa 4900 m<sup>2</sup>/giorno di strati costipati, con punte di 5700 m<sup>2</sup>/giorno.

**I controlli durante la costruzione del rilevato**

I risultati dei controlli di produzione sono riportati nella tab. 4; i valori di IPI sono riferiti alla miscela prelevata immediatamente dopo la miscelazione terra-calce; i valori della densità massima secca (g dry) e del contenuto d'acqua (W) sono riferiti agli strati costipati.

**TAB. 4 I CONTROLLI DURANTE LA COSTRUZIONE DEL RILEVATO RIBX (\*) - tre giorni dopo la compattazione**

	Miscela		Strato compattato	
	IPI (%)	$\gamma_s$ (daN/m <sup>3</sup> )	W (%)	Modulo di deformazione Md (daN/m <sup>3</sup> ) (*)
Valore Min	21	1.526	22,7	682
Valore Max	26	1.542	23,4	857
Valore medio	23,4	1.534	23,0	765
Var. (%)	6,4	0,31	1,04	7,3

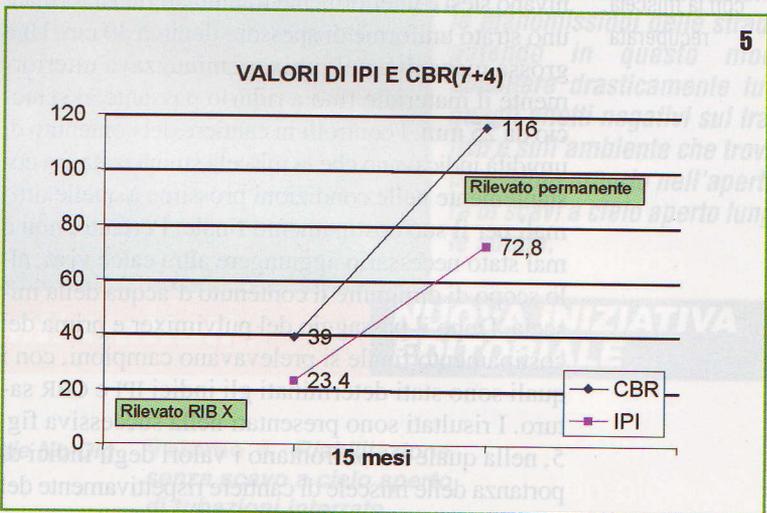
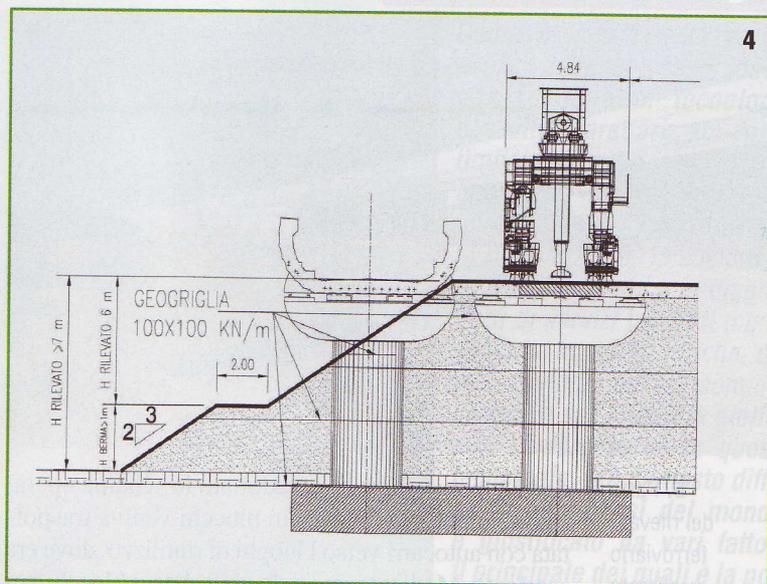
Sugli strati finiti sono stati determinati i moduli di deformazione Md, utilizzando una piastra da 30 cm di diametro nell'intervallo di carico 1,5-2,5 daN/cm<sup>2</sup>; i risultati delle prove eseguite dopo tre giorni dal costipamento finale degli strati seguono parallelamente nei valori minimi, medi e massimi i valori trovati per gli IPI.

**IL RICICLAGGIO DELLE TERRE STABILIZZATE**

Il rilevato provvisorio RIBX è rimasto in esercizio per i 15 mesi necessari al varo delle travi a omega. Durante la sua vita utile, in particolare nei mesi invernali, non si è manifestato alcun fenomeno di cedimento o ammaloramento. Per la demolizione graduale è stato utilizzato un escavatore cingolato da 250 CV con benna da 1,4 m<sup>3</sup>. Giornalmente si producevano 400-500 m<sup>3</sup> di miscela spaccata in blocchi con

**TAB. 5 CARATTERISTICHE DI LABORATORIO DELLA MISCELA RICICLATA**

Granulometria			IP (%)	Wopt. (Proct. St) (%)	$\gamma_s$ (Proct. St) (daN/m <sup>3</sup> )	Calce libera (%)
<2 (mm)	<0,4 (mm)	<0,075 (mm)	(%)	(%)	(Proct. St) (daN/m <sup>3</sup> )	libera (%)
73,3 %	46,8 %	37,8 %	N.P.	23,4	1.509	0,2 - 0,6



dimensioni di alcune decine di cm. Gli strati da demolire si rivelavano abbastanza resistenti e ciò ha comportato una marcata usura dei denti della benna. Non si evidenziarono tuttavia altri problemi rilevanti oltre a questo.

Il materiale, inizialmente accumulato nel luogo stesso della demolizione, è stato riutilizzato per costruire altri due rilevati: le rampe di un cavalcaviaferrovia in Campogalliano (MO) e il rilevato ferroviario di un ramo di interconnessione adiacente alla zona di demolizione.

Prima del riutilizzo, la miscela proveniente dalla demolizione è stata ri-caratterizzata in laboratorio; i nuovi risultati sono riportati nella tab. 5.

I valori trovati sono risultati estremamente soddisfacenti e hanno consentito il riutilizzo del materiale senza ulteriori trattamenti. Per la realizzazione

4. Sezioni del rilevato provvisorio RIB X

5. Valori IPI e CBR (7+4) per il rilevato RIB X e per i due rilevati permanenti



6. Parte del rilevato ferroviario realizzato con la miscela recuperata

dei due nuovi rilevati si è adottato lo schema operativo seguente: la miscela in blocchi veniva trasportata con autocarri verso i luoghi di riutilizzo, dove era scaricata. Mediante una pala cingolata, i blocchi venivano stesi e ulteriormente frantumati fino a formare uno strato uniforme di spessore di circa 30 cm. Una grossa macchina pulvimixer sminuzzava ulteriormente il materiale fino a ridurlo passante al setaccio da 25 mm. I controlli in cantiere del contenuto di umidità indicavano che la miscela sminuzzata era costantemente nelle condizioni prossime a quelle ottimali per il suo costipamento finale. Pertanto, non è mai stato necessario aggiungere altra calce viva, allo scopo di diminuire il contenuto d'acqua della miscela. Dopo il passaggio del pulvimixer e prima del costipamento finale si prelevavano campioni, con i quali sono stati determinati gli indici IPI e CBR saturo. I risultati sono presentati nella successiva fig. 5, nella quale si confrontano i valori degli indici di portanza delle miscele di cantiere rispettivamente del rilevato provvisorio RIB X e dei due definitivi.

È evidente che entrambe le caratteristiche di portanza del materiale sono risultate notevolmente incrementate: sia l'IPI sia il CBR saturo sono infatti aumentati di circa 3 volte. La costruzione dei due nuovi rilevati fu eseguita in diverse riprese; ciascuna squadra di lavoro metteva in opera la miscela riciclata al ritmo di circa 2000 m<sup>3</sup>/giorno. Il costipamento finale degli strati è stato eseguito unicamente con un rullo metallico liscio in condizioni vibranti. È stato sempre rispettato il requisito minimo di progetto del 98% della densità massima Proctor Standard, raggiungendo mediamente il 102%. Anche i valori di Modulo di Deformazione Md relativi ai diversi strati dei due nuovi rilevati misurati con la piastra da 30 cm di diametro a tre giorni dalla posa in opera, sono risultati incrementati dai valori 700-810 daN/cm<sup>2</sup> del rilevato RIB X ai valori 1030-1210 daN/cm<sup>2</sup> dei nuovi rilevati. L'incremento delle caratteristiche meccaniche ottenute con la rilavorazione della miscela terracalce trova una credibile giustificazione nello sviluppo delle reazioni chimiche a lungo termine tra le argille e la calce intervenute durante i 15 mesi di vita utile del rilevato RIBX.

## CONCLUSIONI

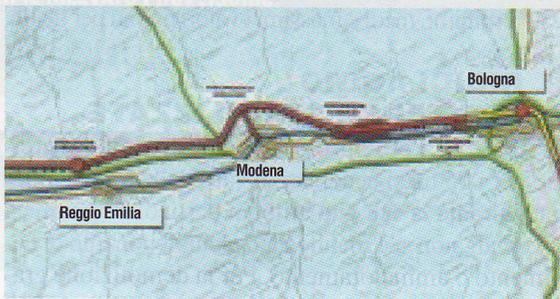
In Italia, i trattamenti di stabilizzazione con la calce delle terre limo-argillose hanno ormai assunto una diffusione comparabile con quella di altri paesi, nei quali la tecnica si era affermata già negli anni '70. Questa rimonta è stata sostenuta primariamente dai lavori pubblici, anche se ormai sono diventati numerosi in Italia i cantieri per costruzioni private, come ad esempio per i centri di distribuzione delle merci. Nell'ambito dell'Alta Velocità ferroviaria Milano-Napoli, l'Impresa Pizzarotti ha svolto un'interessante lavoro di recupero di terre plastiche ricavate dagli scavi di pali e plinti di fondazione dell'opera d'arte denominata: "Sistema Viadotti Modena".

È stato inizialmente costruito un rilevato provvisorio necessario per la posa in opera di travi a omega del predetto viadotto. A fine vita il rilevato è stato demolito e la miscela terra-calce al 3% di calce viva è stata ritenuta idonea per costruire due nuovi rilevati permanenti.

Tutte le qualifiche di laboratorio fatte sulle terre recuperate e sulle miscele lavorate hanno garantito che la costruzione del rilevato provvisorio prima e dei rilevati permanenti dopo, avvenissero nel pieno rispetto delle prescrizioni tecniche del capitolato Italferr.

La demolizione del rilevato provvisorio, seppure impegnativa per la sua robustezza, è avvenuta a condizioni tecnico-economiche pienamente accettabili. Durante i quindici mesi di esercizio del rilevato provvisorio non si sono verificati ammaloramenti degli strati trattati a calce. Durante la ri-lavorazione della miscela recuperata non è stato necessario correggere l'umidità risultata ancora adeguata alle nuove fasi di costipamento.

Il pieno rispetto di tutte le prescrizioni di lavorazione, anche nel caso dei due nuovi rilevati costruiti con la miscela recuperata, attesta che le terre plastiche trattate con la calce sono un ottimo materiale da costruzione che permette di alleviare la scarsità di terre non plastiche e soddisfa le esigenze di minimo impatto ambientale di opere importanti come la nuova linea ferroviaria ad Alta Velocità Milano-Napoli.



Si ringraziano il Consorzio Cepav Uno e la Modena Scarl, in particolare il Geom. Urssi, per l'iniziativa e la sperimentazione di laboratorio, il geom. Tosoratti per la realizzazione delle attività di campo e gli ingegneri Tenna e Catini per le prove in situ, la ricerca documentale e gli utili consigli e suggerimenti offerti.