



La costruzione di rilevati di tipo tradizionale su aree instabili con terreni di scarse caratteristiche meccaniche è spesso motivo di innesco di importanti cedimenti e/o di riattivazione di antichi corpi di frana, creando situazioni difficili per il collasso e le condizioni di esercizio dell'opera

L'ATTRAVERSAMENTO DI AREE IN FRANA CON RILEVATI STRADALI E FERROVIARI SUPER LEGGERI

Massimo Chiarelli*

Nella realizzazione dei rilevati stradali o ferroviari l'impiego di materiali con peso specifico ridotto, associati a particolari tecniche costruttive, consente di ottenere risultati notevoli dal punto di vista della leggerezza e quindi in termini di carichi trasmessi ai terreni sui quali queste opere vengono costruite.

Stabilire il tracciato stradale o ferroviario ideale sulla base di esigenze e valutazioni di carattere tecnico-economiche, trova quale condizione di vincolo e quindi di difficoltà, la costruzione del corpo del rilevato su terreni di scarse caratteristiche meccaniche o su aree instabili soggette a fenomeni di tipo franoso sia superficiale che di tipo gravitativo profondo (DGPV - Deformazioni Gravitative Profonde di Versante). In questi casi la costruzione di rilevati tradizionali, con il proprio peso, si configurerebbero quale potenziale elemento di innesco di importanti cedimenti e/o di riattivazione di antichi corpi di frana trovandosi in condizioni difficili sia per ciò che riguarda il collasso sia per le condizioni di esercizio dell'opera stessa. L'utilizzo di georinforzi può agevolmente e in modo economico risolvere il problema del collasso del rilevato, ma altrettanto non può essere sostenuto se vengono considerati i problemi legati alla funzionalità dell'opera, ovvero se si valutano i cedimenti.

I cedimenti che si manifestano a seguito della realizzazione di un rilevato posto su un terreno cedevole vengono distinti in cedimenti immediati e cedimenti differiti nel tempo. Questi ultimi possono essere generati dal fenomeno della consolidazione generata dal peso proprio del rilevato, dal comportamento viscoso dei terreni, dalla ciclicità dei carichi indotti dai mezzi transitanti sul rilevato (traffico veicolare o ferroviario), dalle azioni sismiche.

Un modo semplice ma efficace per ridurre il cedimento totale, consiste nella realizzazione di rilevati leggeri aventi pesi propri fortemente ridotti rispetto ai rilevati di tipo tradizionale.

Il raggiungimento di tale obiettivo è possibile grazie all'impiego di materiali leggeri nella costruzione (per esempio argille espanse e polistirene espanso sinterizzato), associati con la formazione artificiale di grandi vuoti all'interno del corpo del rilevato stesso (per esempio l'inserimento di grandi tubi prefabbricati in lamiera ondulata zincata), nonché mediante la tecnica della compensazione dei carichi.



Figura 1 - Un particolare dei granuli di un'argilla espansa comune

La tecnica della compensazione parziale o totale dei carichi, consiste nella sostituzione (parziale o totale) del terreno di fondazione, sul quale dovrà insistere il rilevato, con del terreno o dell'argilla espansa, il tutto opportunamente steso e compattato in modo da ottenere uno con migliori caratteristiche meccaniche. La sostituzione del terreno di fondazione dovrà essere eseguita fino al raggiungimento della compensazione parziale o totale del carico trasmesso dall'opera da realizzare.

Nel seguito verranno presentate le scelte progettuali e la tecnologia impiegata per la realizzazione di un rilevato stradale lungo circa 1.100 m attraversante un'area in provincia di Ascoli Piceno, nelle vicinanze di Campofilone, soggetta a importanti fenomeni franosi e, quindi, con un terreno non più in posto e di scarse caratteristiche meccaniche, essendo il risultato di antiche stratificazioni da frana.

Nel caso specifico, oltre all'impiego della tecnica di compensazione parziale dei carichi, nel corpo del rilevato sono stati posti in opera una serie di tubi in lamiera zincata ondulata di grande diametro rinfiancati e completati con argilla espansa fino alla quota di imposta prevista della fondazione stradale.

L'argilla espansa

È un materiale inerte artificiale ottenuto mediante un processo termico di cottura delle argille naturali e avente quale caratteristica principale il suo ridotto peso specifico (Figura 1).

La grande quantità di pori presenti all'interno del materiale, individua due tipi differenti di vuoti: intergranulari (fra granulo e granuli) e intragranulari (all'interno dei granuli stessi).

Mentre i primi sono interconnessi e vengono saturati facilmente quando il materiale è posto sotto falda, i pori intragranulari si riempiono d'acqua con molta difficoltà e alcuni di essi, addirittura, non si satureranno mai.



	Argilla espansa	Sabbia naturale
Peso specifico medio dei granuli	$\leq 8,50 \text{ kN/m}^3$	$\sim 26 \text{ kN/m}^3$
Peso specifico in mucchio (non vibrato e/o compattato)	$\leq 4,50 \text{ kN/m}^3$	$\sim 16 \text{ kN/m}^3$

Tabella 1 - I pesi specifici tipici dell'argilla espansa e della sabbia naturale

Nella Tabella 1 vengono messi a confronto il peso specifico medio dei granuli e quello in mucchio per una comune argilla espansa e una comune sabbia naturale silicea.

I tubi in lamiera zincata ondulata

La tecnologia della condotta in acciaio è attualmente tra le più apprezzate in ambito internazionale, sia per la semplicità di installazione, sia per la molteplicità degli usi cui questo prodotto può essere vantaggiosamente destinato: costruzione di piccoli ponti, ricoprimento di canali, usi idraulici, strutturali in generale e non per ultimo nella realizzazione di rilevati leggeri.

Per quanto concerne i vantaggi di ordine prettamente economico, si possono individuare tutte le caratteristiche positive di un prefabbricato costituito da due soli componenti: le piastre ondulate e calandrate e la bulloneria.

Le condotte sono costituite da elementi prefabbricati in acciaio di qualità, ondulati e zincati a caldo. Gli elementi, curvati al raggio richiesto, non offrono difficoltà di trasporto e in cantiere vengono facilmente giuntati per mezzo di bulloni ad alta resistenza, oppure mediante graffe, onde ottenere la struttura progettata. Ultimato il montaggio, che può essere effettuato anche fuori opera sistemando, in tal caso, la struttura sul fondo stabilito, si inizia il rinterro procedendo contemporaneamente da ambo i lati con materiale idoneo da compattarsi con mezzi meccanici o manuali. L'operazione di rinterro deve essere eseguita con cura particolare. Infatti, il binomio metallo-terreno (oppure impiegando l'argilla espansa quale materiale di riempimento/formazione del rilevato) è intimamente connesso e può essere considerato quasi un complesso strutturale unico.

All'atto pratico tutto ciò si traduce in rapidità di installazione e intervento, impossibilità di errori di assemblaggio anche accidentali, alto livello qualitativo del lavoro finito.

La tubazione che per se stessa non realizza la condizione di equilibrio avendo necessità tutt'intorno delle pressioni derivanti dal carico del terreno/argilla espansa di copertura e di rinfianco, viene stabilizzata da tutto ciò che, nelle altre tipologie strutturali (prefabbricati in c.a. o c.a.p. o manufatti di tipo tradizionale in calcestruzzo o acciaio) costituisce invece carico per la struttura stessa. Una siffatta struttura, quindi, consente di sfruttare le pressioni e i carichi agenti per l'ottenimento della condizione di equilibrio determinando la collaborazione, assieme alla lamiera, del terreno o dell'argilla espansa compattata circostante nell'assorbimento dei carichi. L'interazione che si instaura così tra acciaio e riempimento conduce a un'economia del materiale acciaio.

Il rilevato super leggero

Nella costruzione del rilevato stradale in questione l'impiego congiunto dell'argilla espansa e delle tubazioni in acciaio ondulate zincate, ha dato vita a una tecnologia costruttiva leggera la quale ha fornito ottimi risultati sia a breve che a lungo termine considerata anche l'instabilità dell'area attraversata e le scarse caratteristiche meccaniche del terreno sul quale è sorta l'opera.

La creazione di grandi vuoti all'interno del corpo del rilevato, mediante l'inserimento di tubi prefabbricati di grande diametro e l'utilizzo dell'argilla espansa quale materiale di rinfianco e di realizzazione del corpo del rilevato, ha permesso di ridurre fortemente i carichi trasmessi al terreno di fondazione rispetto a quanto si sarebbe avuto con la costruzione di un rilevato tradizionale. A ciò è stata associata anche la tecnica della compensazione parziale dei carichi e, quindi, sostituendo parte del terreno di fondazione con strati di argilla espansa e misto di cava granulare. Infatti, nella costruzione di rilevati in cui si impiega l'argilla espansa, l'interposizione di uno strato di misto granulare di cava ne consente il perfetto livellamento e la compattazione mediante rullatura degli strati sottostanti (è opportuno che lo spessore dello strato di misto granulare finito e compattato non sia mai inferiore a 20 cm).

E' stato ottenuto così un risultato notevole dal punto di vista della leggerezza dell'opera e quindi in termini di carichi trasmessi al terreno su cui l'intera opera poggia (Figura 2).

Operativamente si è proceduto con le fasi di seguito brevemente descritte. Nella fase iniziale è stato approfondito lo scavo di sbancamento dal piano campagna al piano di fondazione previsto sul quale, opportunamente livellato, è stato steso uno strato di geotessile (tessuto non tessuto) con funzione di separatore. Il geotessile, oltre a meglio distribuire i carichi, serve a evitare il fenomeno del pompaggio di materiale fine che altrimenti tenderebbe a mischiarsi con i materiali granulari che costituiscono il rilevato stesso.

La quota di scavo è stata determinata in fase progettuale in maniera tale da realizzare la compensazione parziale dei carichi trasmessi dal rilevato sostituendo il terreno asportato con l'argilla espansa; la quota media di scavo è risultata di -200 cm dal piano campagna (P.C.).

La seconda fase, infatti, ha previsto proprio il riempimento dello scavo di prima fase con un pacchetto alleggerito di argilla espansa che,



Figura 2 - Una vista generale del rilevato super leggero



Figura 3 - Una vista del tratto finale del rilevato super leggero

innalzato a quota +50 cm dal P.C., ha consentito di ospitare, dopo la stesa di uno strato di geotessile e di uno strato di misto granulare di cava di 20 cm, i tubi in lamiera ondulata di forma ellissoidica aventi il raggio maggiore di 90 cm.

Quest'ultimi hanno trovato collocazione su una serie di selle parallele alla sezione del rilevato alte circa 35 cm realizzate con misto di cava e rinforzate con delle georeti. Lo scopo delle selle è stato quello di creare una sede precisa ed equidistante l'una dall'altra dove posizionare i tubi, impedire il loro rotolamento mantenendoli in posizione e, non per ultimo, aumentare la sicurezza dei lavoratori che, contemporaneamente alla posa, eseguivano il rinfiacco con l'argilla espansa compattandola a strati con tavole vibranti.

La stesa del telo di geotessile e la posa del misto granulare con spessore finito di 20 cm, è stata eseguita al raggiungimento di ogni strato di argilla espansa di 100 cm. Questa sequenza di posa è stata ripetuta fino alla quota finita di imposta della fondazione stradale (+400 cm dal P.C.) evidenziando che l'ultimo strato di misto granulare, sul quale è stato realizzato successivamente lo strato di base e la pavimentazione stradale, è stato posto in opera con uno spessore di 40 cm per gli evidenti problemi associati ai carichi dinamici agenti in superficie (traffico veicolare).

Man mano che venivano realizzati gli strati di argilla espansa e misto separati dal geotessile, il compattamento è stato eseguito con rullo compressore dinamico, mentre i compattamenti intermedi, ovvero per ogni strato di 50 cm di argilla espansa posta in opera, è avvenuto con dei rulli leggeri di piccole dimensioni e/o tavole vibranti. Infatti, è buona norma porre in opera l'argilla espansa a strati di spessore variabile tra i 50÷80 cm addensati di volta in volta con piastre vibranti o rulli a tamburo lisci statici o dinamici con caratteristiche di peso e frequenza da definire in funzione dello strato (Figura 3).

Si consideri che un corretto addensamento di un'argilla espansa commerciale corrisponde indicativamente a un calo volumetrico pari a circa il 16÷18% (contro il 24÷27% del misto di cava tradizionale).



Figura 5 - Alcune prove di carico su piastra eseguite sul rilevato

Le prove triassiali

Al fine di determinare un angolo di attrito utilizzabile nelle principali applicazioni geotecniche di calcoli e/o verifiche, è stata eseguita una prova triassiale caricando verticalmente, sino a rottura, un campione di forma cilindrica di argilla espansa sottoposto a una pressione radiale di confinamento.

Incrementando la pressione radiale di confinamento in condizioni drenate e con pressioni via via sempre crescenti di 20, 200 e 600 kPa, si è potuto determinare, con buona approssimazione, un angolo di attrito interno all'argilla espansa compreso tra 39,5°÷40,5° considerando una pressione di confinamento di 200 kPa (Figura 4).

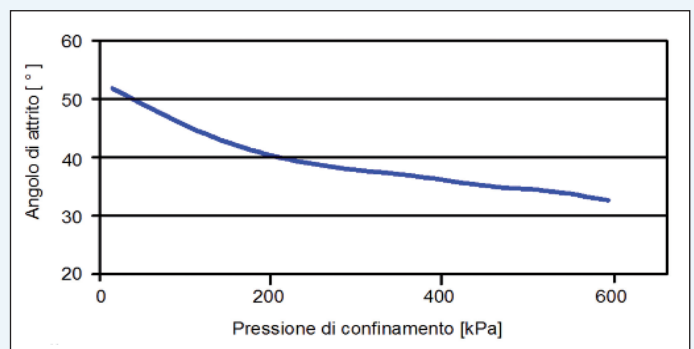


Figura 4 - Il risultato della prova triassiale eseguita su un campione cilindrico di argilla espansa comune

Le prove di carico su piastra

Man mano che si procedeva con il completamento del rilevato super leggero, al fine di verificare le assunzioni fatte durante la progettazione dell'opera, sono state eseguite una serie di prove di carico su piastra sui diversi strati e a diverse quote dello strato di separazione in misto di cava (Figura 5).

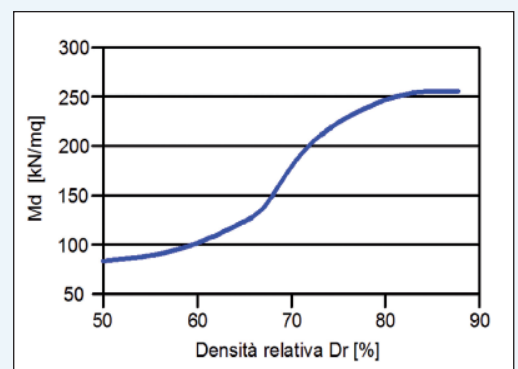


Figura 6 - Il grafico risultante dalle diverse prove di carico su piastra eseguite sul rilevato

Così facendo si è potuto determinare la rigidità media superficiale di ciascun pacchetto realizzato (argilla espansa-misto), nonché dell'ultimo costituito anch'esso da argilla espansa e 40 cm di misto di cava al fine di meglio assorbire e ripartire, come già detto in precedenza, le sollecitazioni trasmesse dallo strato di base della pavimentazione in conglomerato bituminoso e generate dal traffico veicolare.



In grafico è riportato il modulo di deformazione M_d in funzione della densità relativa D_r . Man mano che si procedeva con il compattamento dell'argilla espansa e dello strato di misto di cava superficiale, ci si attestava a valori di M_d maggiori di 200 kN/m^2 con una densità relativa compresa tra il 73 e il 75% (Figura 6).

La modellazione numerica

Per la realizzazione di modelli di calcolo che consentano una progettazione affidabile di un rilevato siffatto, è fondamentale l'individuazione dei meccanismi con i quali può manifestarsi il collasso e l'analisi degli stati limite (ultimi e di servizio) possibili. Lo stato attuale delle conoscenze sul comportamento meccanico di rilevati realizzati impiegando questa tecnologia e i numerosi studi teorici a riguardo consentono di definire con chiarezza le modalità con cui si manifesta il collasso.

Nel caso specifico il meccanismo di rottura preminente è strato ipotizzato circolare e tangente al substrato di base considerato rigido, mentre le azioni trasmesse dal rilevato sono state stimate applicando la teoria di Mononobe-Okabe in cui il coefficiente sismico verticale K_v è stato posto pari alla metà di quello orizzontale K_h ($K_v = \pm 0,5 K_h$).

In merito alle verifiche sismiche eseguite sul rilevato, si è tenuto conto di quanto riportato nelle Norme Tecniche e nell'Eurocodice 8 in cui si propone una verifica pseudo-statica nei confronti dello stato limite ultimo (nello specifico è stata eseguita un'analisi alla Newmark), mentre per le verifiche dello stato limite di esercizio, si è ricorso all'uso di accelerogrammi reali rappresentativi dell'area su cui sorge l'opera (analisi dinamica non lineare agli elementi finiti) al fine di valutare, con una certa accuratezza, le deformazioni permanenti del suolo e dell'opera tenendo conto dell'effettivo contenuto in frequenza dei segnali e delle reali correlazioni tra le componenti orizzontali e verticali del moto. Nell'analisi dinamica si è ipotizzato un comportamento del materiale elasto-plastico isotropo con una legge di rottura per l'argilla espansa alla Tresca.

Nell'ambito dell'analisi pseudo-statica, l'azione sismica è stata rappresentata da una serie di forze statiche equivalenti, orizzontali e verticali, date dal prodotto dei pesi delle masse in gioco per i coefficienti sismici. Per quanto concerne le azioni sismiche in direzione verticale, esse potendo agire sia verso l'alto, sia verso il basso, si è adottato di volta in volta il verso cui corrispondevano gli effetti più sfavorevoli.

Nella determinazione delle forze sismiche, si è tenuto conto della dipendenza esistente tra la loro intensità e lo spostamento ammissibile e realmente consentito dall'opera. Lo spostamento ammissibile d_r è stato confrontato con valori di soglia che sono proporzionali all'accelerazione di picco in superficie e pertanto, variano in funzione del tipo di sottosuolo e della zona sismica in cui è situata l'opera.

L'analisi della risposta meccanica del rilevato alleggerito è stata condotta mediante l'utilizzo del codice FLAC il quale ha richiesto l'implementazione di un affidabile modello numerico, effettuato mediante la definizione di una griglia di 280×110 mesh, nonché l'assegnazione di opportune condizioni iniziali e al contorno.

Per la caratterizzazione degli strati di misto granulare di cava interposti tra gli strati di argilla espansa, si sono adottati valori tipici di parametri meccanici, mentre per la modellazione del terreno di fondazione e del geotessile di base è stata effettuata un'ampia variazione parametrica delle caratteristiche meccaniche allo scopo di valutare l'influenza delle stesse sul comportamento del sistema nel suo insieme e sui meccanismi di interazione terreno-geotessile-argilla espansa che ne contraddistinguono la risposta.

La risposta del terreno di fondazione, ipotizzato omogeneo, è stata analizzata mediante un approccio non drenato nel quale il valore di coesione non drenato è stato imposto costante con la profondità.

L'analisi dei risultati numerici

I risultati della modellazione numerica sono stati analizzati e confrontati allo scopo di esaminare l'insorgere di meccanismi di collasso del sistema e definire in quali casi l'instabilità del sistema fosse dovuta alle caratteristiche del rilevato e/o del terreno di fondazione e in quali al comportamento dei tubi inseriti nel corpo del rilevato stesso (Figura 7).

Si è osservato che, nella gran parte della casistica esaminata, il collasso del sistema si verifica per instabilità globale del terreno di fondazione che si manifesta con una rottura profonda, caratterizzata da superfici di scorrimento di tipo pseudo-rotazionale.

E' interessante, inoltre, sottolineare che nei casi presi in esame imponendo precise condizioni iniziali e al contorno, l'inserimento dei tubi in lamiera all'interno del corpo del rilevato costituisce un vero e proprio irrigidimento trasversale all'asse stradale che porta a un incremento del fattore di sicurezza dell'intero rilevato e di quello di stabilità delle scarpate nelle verifiche dinamiche (Figura 8).

Inoltre, è importante notare che dall'esame della risposta dell'opera nell'analisi dinamica, il fattore di sicurezza del rilevato alleggerito migliora sensibilmente all'aumentare dello spessore di compensazione.

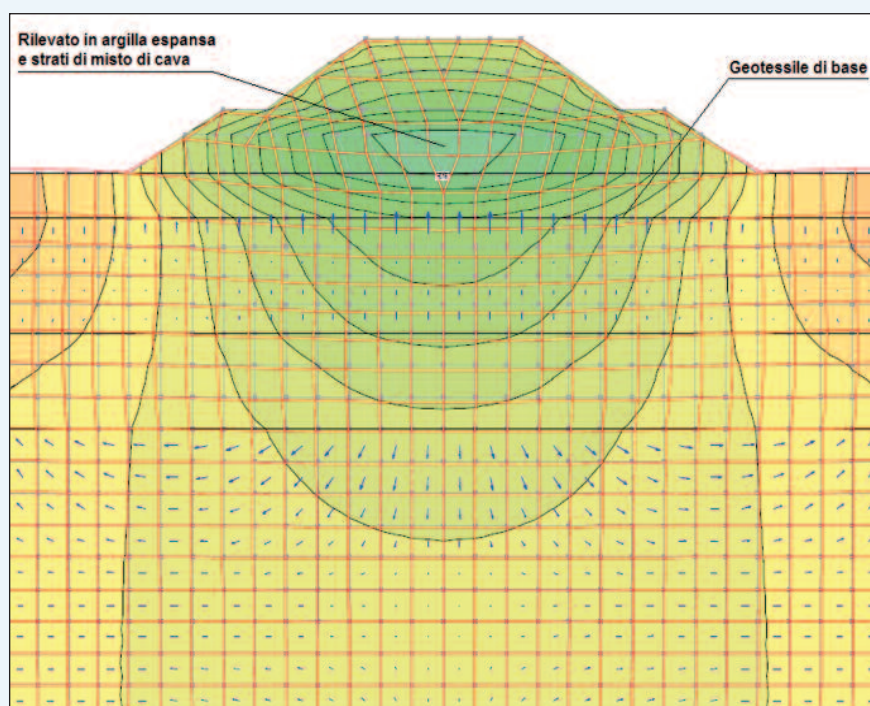


Figura 7 - La schematizzazione delle deformazioni del rilevato ipotizzato costruito con sola argilla espansa e in assenza dei tubi in lamiera ondulata zincata nel corpo del rilevato, in uno dei casi presi in esame durante l'analisi dinamica FEM

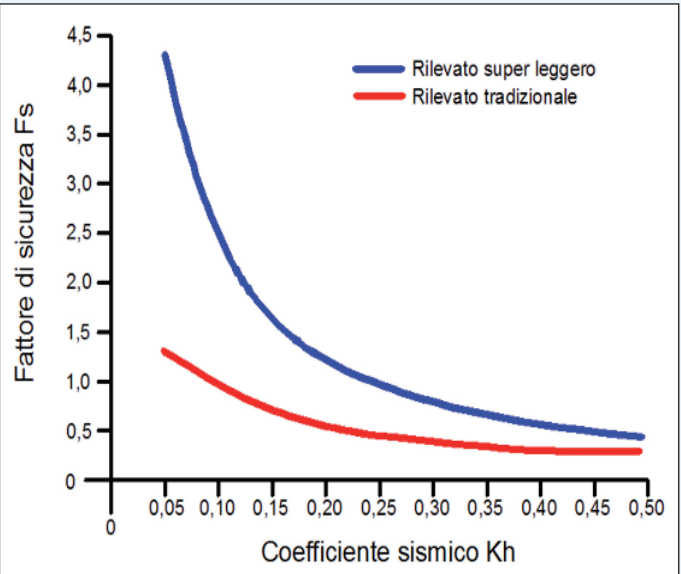


Figura 8 - La linea blu mostra la variazione del fattore di sicurezza al variare del coefficiente sismico K_h del rilevato super leggero, mentre la linea rossa la variazione tipica per un rilevato di tipo tradizionale

Conclusioni

La costruzione di rilevati super leggeri per l'attraversamento di aree instabili mediante l'impiego congiunto delle tubazioni in acciaio ondulato zincate, dell'argilla espansa e della tecnica di compensazione parziale dei carichi, ha dato vita a una tecnologia di costruzione che ha fornito ottimi risultati sia a breve che a lungo termine per quanto concerne la funzionalità dell'opera.

Le assunzioni fatte nella fase progettuale sono state confermate dalle verifiche eseguite durante la realizzazione, nonché in esercizio. L'analisi derivante dalla modellazione numerica ha consentito di stabilire che rilevati siffatti collassano per instabilità globale del terreno di fondazione manifestando rotture profonde caratterizzate da superfici di scorrimento di tipo pseudo-rotazionali.

L'inserimento dei tubi prefabbricati in lamiera, oltre a consentire l'alleggerimento, fornisce rigidità al rilevato facendo aumentare il fattore di sicurezza globale e di stabilità delle scarpate nelle verifiche dinamiche. Il fattore di sicurezza aumenta, altresì, all'aumentare dello spessore di compensazione dei carichi. ■

* *Ingegnere Progettista e Construction Manager della Saipem SpA*

BIBLIOGRAFIA

- [1]. M. Chiarelli - "Condotte ondulate in lamiera zincata", L'Arte del costruire gallerie, pp. 131-135, Editrice Uni Service, Trento, 2009.
- [2]. M. Chiarelli - "Le vibrazioni degli edifici indotte dalle ferrovie sotterranee", "Strade & Autostrade" n° 2 Marzo/Aprile 2004, EDI-CEM Srl, Milano.
- [3]. M. Chiarelli - "Il rinforzo delle Pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso con reti in fibra di vetro", "Strade & Autostrade" n° 5 Settembre/Ottobre 2004, EDI-CEM Srl, Milano.
- [4]. M. Chiarelli - "L'Arte del costruire gallerie", Editrice Uni Service, Trento, 2009.
- [5]. M. Chiarelli - "Le argille espanse nella costruzione di rilevati artificiali", Atti del Convegno "Manutenzione Ordinaria e Straordinaria della rete viaria", Ente Provincia di Macerata (settore viabilità) e ANAS, Macerata, Gennaio 2004.