

# UNA SOLUZIONE COSTRUTTIVA INNOVATIVA PER LA REALIZZAZIONE D GALLERIE NATURALI SENZA COPERTURA

**Prof. Ing. Pietro Lunardi** - Studio d'Ingegneria Lunardi, Milano

**Dott. Ing. Alessandro Focaracci** - Rocksoil Spa, Milano

**Geom. Dino Ricci** - Società Italiana per Condotte D'Acqua Spa, Roma

**Dott. Ing. Antonio Valente** - Rocksoil Spa, Milano

## 1. Premessa

Nell'ambito dei lavori per la realizzazione della nuova linea ferroviaria ad alta velocità Roma-Napoli è previsto lo scavo di gallerie per circa 22 Km. Alcune di queste, per l'ubicazione altimetrica del tracciato e per la morfologia piuttosto dolce dei versanti da attraversare, presentano, in calotta, coperture assai ridotte, tanto che il progetto originario prevedeva di realizzarle, per lunghi tratti, in artificiale. Si tratta, in particolare, delle gallerie Piccilli 1, Piccilli 2, Castagne, Santuario, Caianello e Bricelle.

Lo scavo di una galleria in artificiale comporta, però, la necessità di eseguire incisioni profonde nel versante da attraversare, con conseguenti problemi di:

- sicurezza nei riguardi della stabilità del versante stesso;
- sistemazione degli ingenti volumi di materiale scavato;
- risoluzione di eventuali interferenze esistenti in superficie;
- situazione statica più gravosa in caso di sisma;
- impatto ambientale e paesaggistico.

Queste considerazioni hanno indotto a studiare una soluzione alternativa, an-

che dal punto di vista economico, che permettesse di realizzare le suddette gallerie direttamente in naturale, bypassando così tutte le problematiche che avrebbe comportato l'esecuzione *tout-court* del progetto originario.

## 2. Le ipotesi

Come noto, la stabilità e quindi l'esistenza di una galleria a breve e a lungo termine è subordinata all'instaurarsi, nel terreno al contorno dello scavo, di un "effetto arco" attraverso il quale le sovratensioni, che si generano nel materiale in seguito allo scavo, vengono canalizzate e trasmesse all'ammasso intatto sottostante.

Nel caso di una galleria corticale, mancando sulla calotta della stessa lo spessore di terreno necessario, l'"effetto arco" non può generarsi per via naturale, per cui è necessario che il progettista si preoccupi di garantirne la formazione con provvedimenti costruttivi idonei.

Un modo tradizionale di affrontare il problema è quello di costruire la galleria in artificiale. In tal modo l'effetto arco viene realizzato dal rivestimento stesso di calcestruzzo che, a lungo ter-

mine, sarà caricato dal peso del terreno di riporto.

Un altro sistema è quello di consolidare il terreno al contorno del cavo prima di iniziare lo scavo della galleria in naturale, in modo da conferirgli, per uno spessore adeguato, le caratteristiche di resistenza indispensabili a realizzare la canalizzazione delle tensioni. È una strada percorribile con buoni risultati solo se, sulla calotta della galleria da scavare, esiste lo spessore di terreno minimo per realizzare il consolidamento e, naturalmente, se il terreno in gioco è consolidabile a costi ragionevoli.

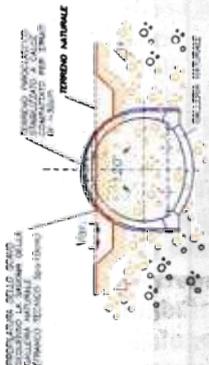
Nel caso delle gallerie in questione le coperture assai ridotte (*vedi profilo longitudinale in fig. 1*) rendevano impercorribile questa seconda soluzione, mentre la prima non convinceva per gli inconvenienti già evidenziati in premessa.

Si è quindi studiata e messa a punto una soluzione innovativa, che sfruttando alcune caratteristiche peculiari dei terreni piroclastici da affrontare, ha permesso di superare le difficoltà e di scavare le gallerie in naturale rispettando le esigenze paesaggistiche ed ambientali.

L'idea, scaturita dall'intuizione degli



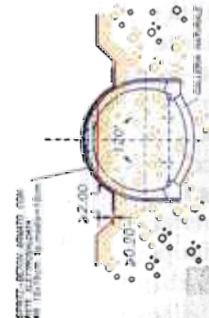
SEZIONE A-A



FASE 1

ESECUZIONE DEGLI SBANCAMENTI E PROFILATURA DELLO SCAVO SECONDO IL PROFILO DI SCAVO DELLA GALLERIA NATURALE (FRANCO TECNICO Sp~10cm)

SEZIONE A-A

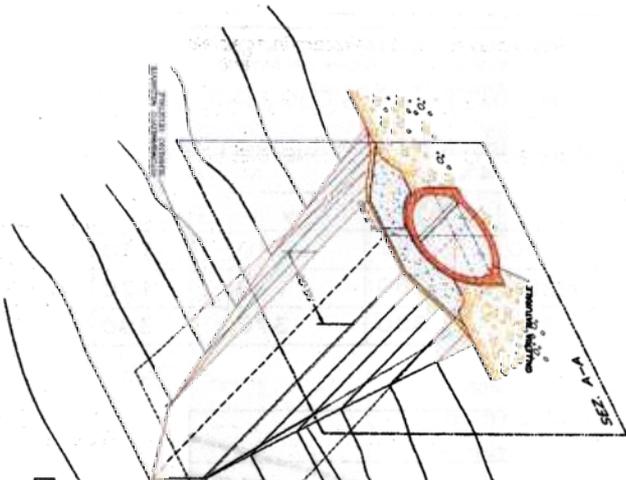


FASE 1bis

POSA IN OPERA DI SPRITZ-BETON DI PROTEZIONE (Sp.medio 10cm) ARMATO CON RETE ELETTROSALDATA #6 15x15

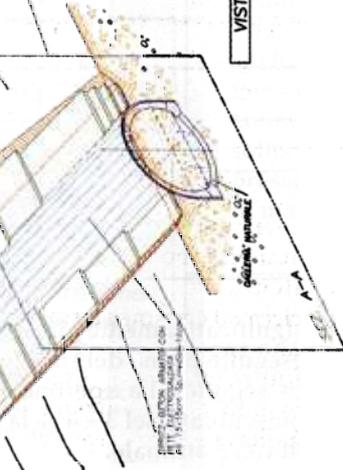
VISTA ASSONOMETRICA

FASE 3/4



VISTA ASSONOMETRICA

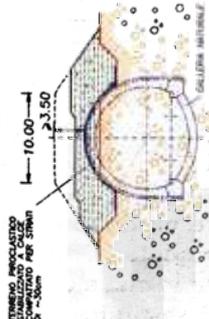
FASE 1/1bis



VISTA ASSONOMETRICA

FASE 2

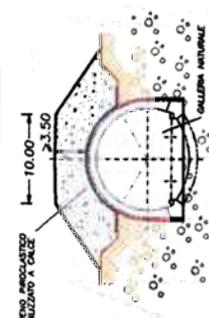
SEZIONE A-A



FASE 2

ESECUZIONE DEL RIVESTIMENTO MISTO DI TERRICCI, PRODOTTO STABILIZZATO A CALCE COMPACTATO PER STRATI DI ~30cm, FINO A FORMARE UNO SPESORE DI CALOTA DI 3.50m (min.)

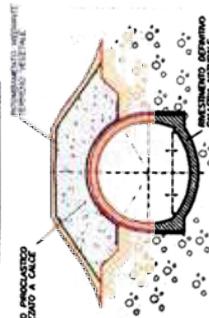
SEZIONE A-A



FASE 3

SCAVO DELLA GALLERIA NATURALE E MESSA IN OPERA DEL RIVESTIMENTO DI SPRITZ-BETON (Sp.~20cm) E CENTINE

SEZIONE A-A



FASE 4

GETTO DEL RIVESTIMENTO DEFINITIVO DELLA GALLERIA E RIFORMANDAMENTO DEFINITIVO MEDIANTE TERRENO VEGETALE - SISTEMAZIONE DEFINITIVA

Fig. 2: descrizione grafica della metodologia costruttiva proposta

Fig. 3: diagrammi dell'evoluzione nel tempo della resistenza a compressione del terreno piroclastico trattato con calce in funzione dell'intensità del trattamento

Stagionatura (giorni)	Misto calce 3%			Misto calce 4%			Misto calce 5%		
	Prov. 1	Prov. 2	Valore medio	Prov. 1	Prov. 2	Valore medio	Prov. 1	Prov. 2	Valore medio
3	200	200	200	180	190	185	100	110	106
7	240	230	235	250	250	250	160	170	165
28	340	300	320	340	320	330	370	380	375

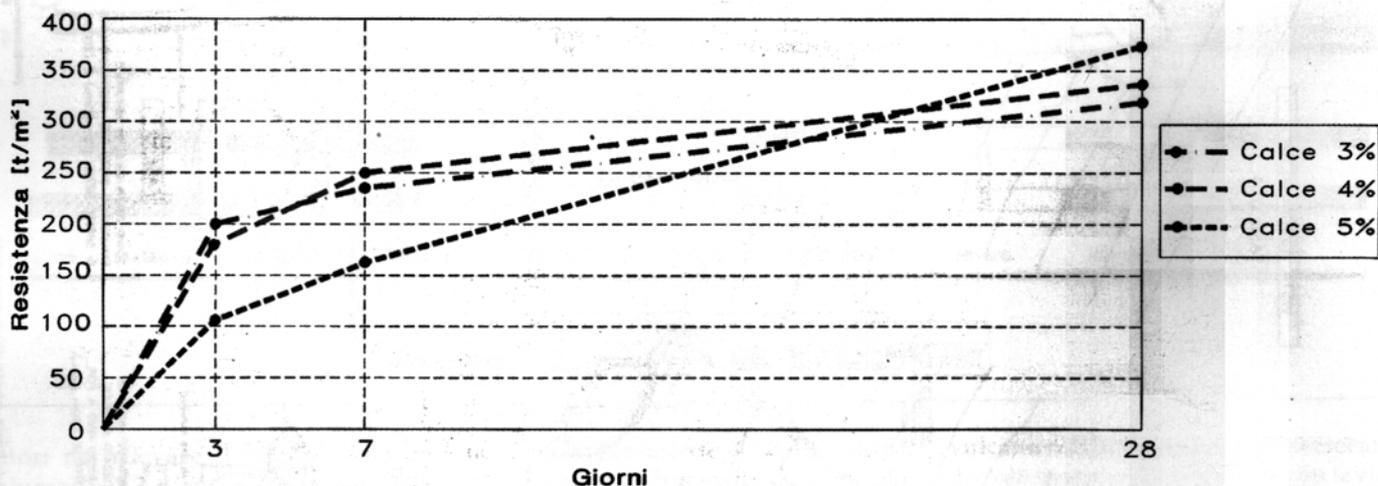


Foto 1: prova di resistenza a compressione monoassiale di un campione di terreno piroclastico trattato con calce

significativamente diversi da quelle eseguite prima del trattamento.

In seguito alla sperimentazione si è individuata nel 3 + 4 % la percentuale di calce ottimale.

Per verificare i risultati ottenuti in laboratorio si è realizzato anche un campo prove che ha dato risultati conformi alle aspettative.

### 3.2 Verifiche statiche

La fattibilità della nuova soluzione e la sua affidabilità statica sono state verificate mediante un'analisi numerica agli elementi finiti, condotta in campo non lineare mediante il codice di calcolo per elaboratore ADINA 6.0.

A questo scopo, si è considerata una sezione trasversale tipica di galleria

corrente (con rivestimento definitivo di c.a. di 80 cm di spessore in calotta e 90 cm nell'arco rovescio), che abbiamo schematizzato con elementi isoparametrici "plane strain" a quattro nodi.

Per quelli rappresentativi del terreno, naturale o trattato, si è scelto un modello di comportamento tensodeformativo di tipo elastoplastico secondo Drucker-Prager; per quelli rappresentativi dei rivestimenti di pri-

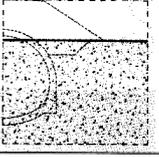
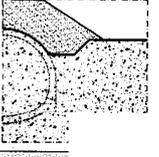
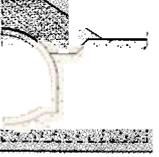
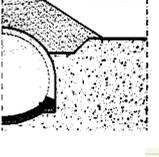
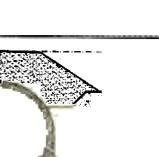
lasciati a maturare in ambiente saturo di vapor d'acqua.

Le prove di resistenza a compressione eseguite dopo 3, 7 e 28 giorni di maturazione (vedi diagrammi in fig. 3 e foto 1) hanno evidenziato valori medi superiori rispettivamente a 200 t/m<sup>2</sup>, 250 t/m<sup>2</sup>, 320 t/m<sup>2</sup>. Le prove di compattazione non hanno mostrato risultati

TABELLA I

TERRENI	$\gamma$ (t/m <sup>3</sup> )	E (t/m <sup>2</sup> )	$\nu$	c (t/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)
Terreno superficiale alterato	1,8	7000	0,30	2,00	30
Piroclastiti	1,8	20000	0,30	10,00	30
Piroclastiti trattate a calce (time 2+5)	2,0	40000	0,30	20,00	30
Piroclastiti trattate a calce (time 6+7)	2,0	7000	0,30	0	30

Fig. 4: fasi del calcolo F.E.M.

TIME	MODELLO	DESCRIZIONE
1		CALCOLO GEOSTATICO
2		BONIFICA E RINTERRO CON TERRENO PIROCLASTICO TRATTATO CON CALCE
3		SCAVO DELLA GALLERIA A PIENA SEZIONE E PRERIVESTIMENTO DI SPRITZ-BETON E CENTINE  RILASSAMENTO NUCLEO: 70%
4		GETTO DELL'ARCO ROVESCIO E DELLE MURETTE  RILASSAMENTO NUCLEO: 80%
5		MATURAZIONE DELL'ARCO ROVESCIO RILASSAMENTO NUCLEO: 90%
6		GETTO DELLA CALOTTA E ABBATTIMENTO DELLE CARATTERISTICHE GEOMECCANICHE DEL TERRENO TRATTATO CON CALCE  RILASSAMENTO NUCLEO: 100%
7		AZIONE SISMICA

ma e seconda fase si è adottato, invece, un modello elastico lineare.

L'analisi, volendo studiare il comportamento tenso-deformativo dell'intero sistema terreno-struttura nelle diverse fasi costruttive e in quella di esercizio, è stata sviluppata attraverso sette *time* di calcolo (vedi fig. 4), per modellare, nella maniera più realistica possibile, la successione delle suddette fasi e la messa in opera degli interventi durante le lavorazioni di cantiere.

La progressiva demolizione del fronte di scavo, dovuta all'avanzamento, nel modello è stata simulata riducendo progressivamente a zero le caratteristiche di resistenza e deformabilità degli elementi rappresentativi del materiale scavato. I parametri di calcolo adottati per il terreno naturale e per quello trattato sono riassunti nella *Tabella I*. In particolare, a favore di sicurezza si sono ipotizzati valori a lungo termine (fase di esercizio) estremamente ridotti per i parametri di resistenza e deformabilità del terreno consolidato a calce, mentre il peso di volume di entrambi (terreno naturale e terreno trattato) è stato assunto pari a  $2,00 \text{ t/m}^3$ . Infine, in sommità al modello è stato considerato un sovraccarico accidentale di  $2,00 \text{ t/m}^2$ .

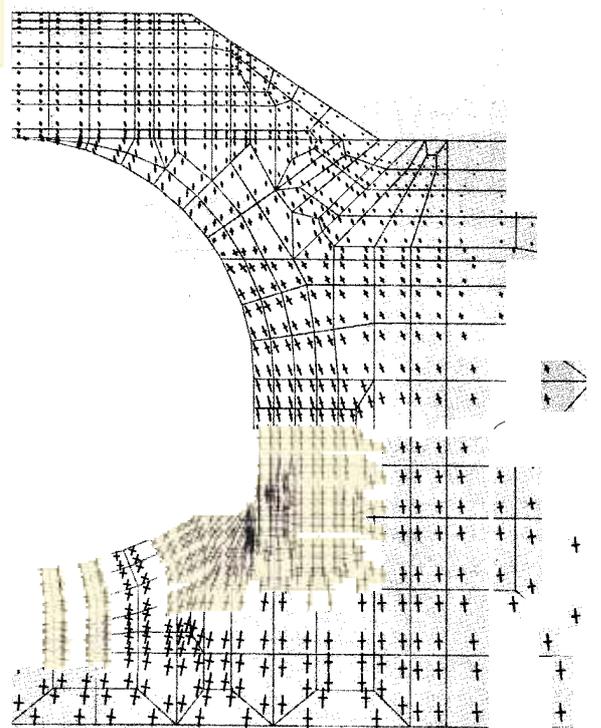
### 3.2.1 Risultati delle verifiche statiche

I risultati del calcolo hanno confermato la possibilità di far avanzare la galleria in naturale, a piena sezione, sotto la protezione delle protesi di terreno trattato a calce, secondo la geometria e le modalità costruttive illustrate.

Dal punto di vista deformativo essi hanno fornito valori di convergenza diametrale assai modesti (inferiori a 2 mm), mentre dal punto di vista tensionale, hanno evidenziato l'importanza del ruolo svolto dal trattamento eseguito sulla calotta della galleria prima di iniziarne lo scavo: grazie alla sua forma arcuata, il terreno consolidato risulta sollecitato da contenute azioni di sola compressione ( $\sigma_{\max} = 12,9 \text{ t/m}^2$  alla *time* 5), che vengono appropriatamente canalizzate al contorno della galleria e trasmesse al terreno naturale ai lati della stessa (fig. 5).

Allo stesso modo, risulta completamente compresso ( $\sigma_{\text{media}} \leq 210 \text{ t/m}^2$ ) tutto il rivestimento di prima fase di spritz-beton. Quello definitivo di c.a., chiuso con l'arco rovescio, risulta verificato anche se privo di armatura (che comunque viene messa in opera contro eventuali dissimmetrie o anomalie locali), essendo soggetto a lievissime sollecitazioni di trazione ( $\leq 18 \text{ t/m}^2$ ) in calotta e presso l'attacco dell'arco rovescio e a sollecitazioni massime di compressione inferiori a  $220 \text{ t/m}^2$ .

Fig. 5: Output grafico del calcolo F.E.M.: sollecitazioni principali nel terreno al contorno della galleria calcolate alla *time* 5



### 3.3 Costruzione

Una volta accertata la fattibilità e l'affidabilità statica della soluzione studiata, si è passati alla realizzazione sperimentale, secondo le modalità e le fasi già descritte e illustrate nelle figg. 2 e 6. Si è iniziato dalla galleria Piccilli 2, dove l'avanzamento in naturale, sotto la protezione delle "protesi", si è realizzato per oltre 250 m. Le foto in fig. 6 e la foto 2 illustrano alcune fasi delle diverse lavorazioni eseguite.

Per miscelare la pozzolana con la calce, in cantiere si seguono due differenti procedimenti:

- servendosi di un impianto con tramoggia per lo stoccaggio della calce (foto 3), si prepara la miscela presso l'impianto, quindi si trasporta sul sito, si stende in spessori non superiori a 30 cm e si rulla a umidità ottimale;



Fig. 6: sintesi illustrata delle fasi costruttive principali

#### SINTESI ILLUSTRATA DELLE FASI COSTRUTTIVE

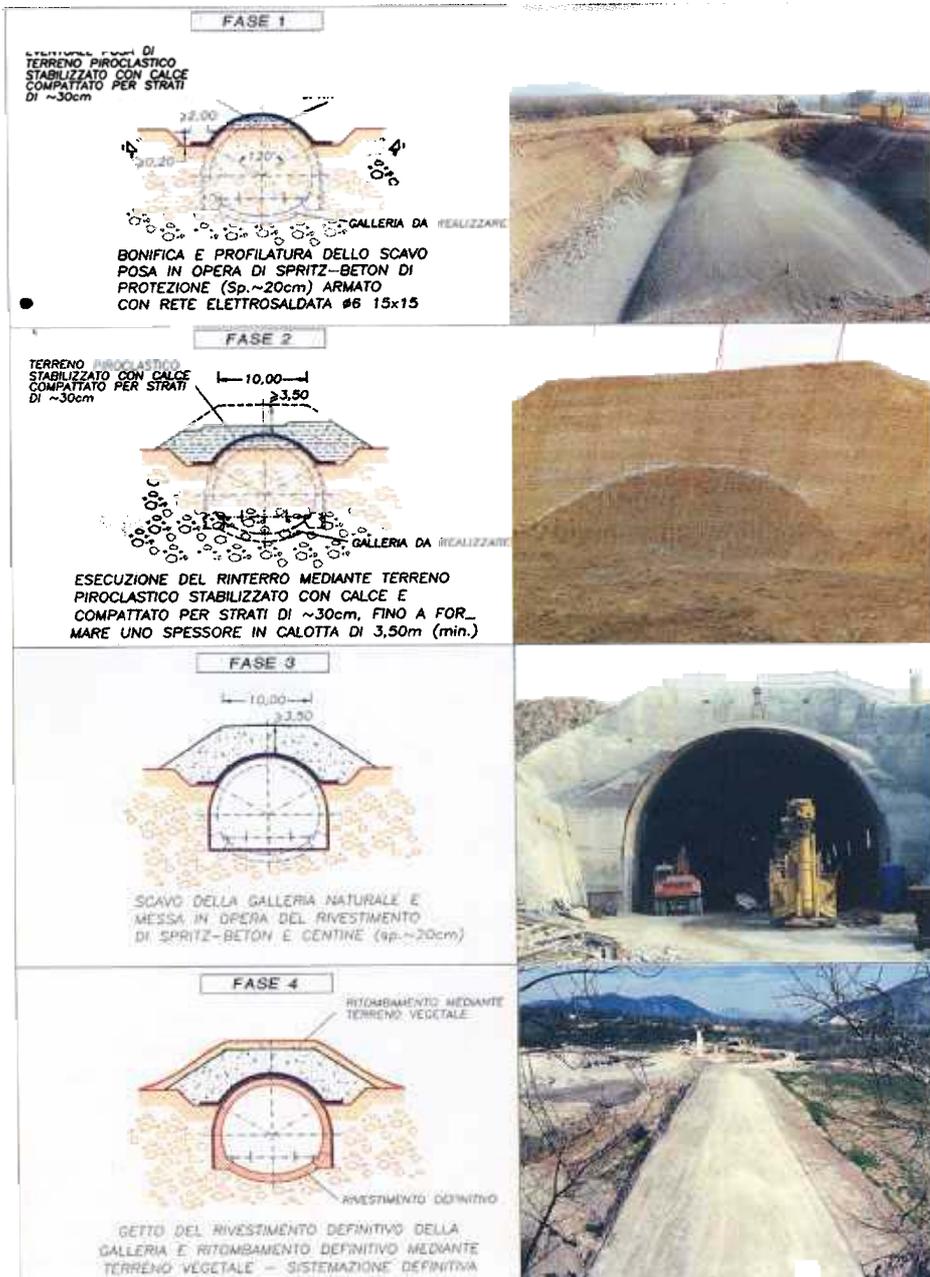


Foto 2: avanzamento in galleria naturale: profilatura della calotta sotto la protezione della protesi

oppure:

- si fresa puntualmente la pozzolana, già stesa e cosparsa con un adeguato quantitativo di calce, e successivamente si rulla come sopra.

I lavori sono proseguiti con regolarità per tutti i 250 m previsti senza che sorgessero inconvenienti di nessun tipo, per cui si è deciso di estendere la nuova soluzione anche alle altre gallerie del lotto aventi problematiche analoghe.

La Tabella II riassume lo stato d'avanzamento dei lavori aggiornato al 3 aprile 1997: su una lunghezza complessiva di applicazione delle protesi pari a circa 832 m ne sono state realizzate per circa 296 m, di cui il 36% già "operativi" essendo stato completato lo scavo a foro cieco.

### 3.4 Controlli e misure in corso d'opera

Il progetto delle "protesi", in fase costruttiva, richiede di eseguire una serie di controlli per verificare la rispondenza, di quanto realizzato, alle ipotesi progettuali. In particolare:

- per il misto pozzolana-calce:
  - la resistenza media a compressione dopo 7 giorni di maturazione non deve essere inferiore a 80 t/m<sup>2</sup>;
  - la densità conseguita in sito non deve scendere sotto il 95% della densità massima conseguita in laboratorio;
- per lo spritz-beton:
  - la resistenza media a compressione a 48 ore non deve essere inferiore a 1300 t/m<sup>2</sup>;

- la stessa a 28 giorni non deve essere inferiore a 2000 t/m<sup>2</sup>.

In corso d'opera si è proceduto quindi sistematicamente al prelievo di campioni che, sottoposti a prova, hanno fornito sempre risultati superiori ai minimi prescritti. In particolare, per quanto riguarda il misto pozzolana-calce, si è riscontrata una resistenza caratteristica media pari a 300 t/m<sup>2</sup>, simile a quella ottenuta in laboratorio.

Oltre alle prove per il controllo di qualità dei materiali, si sono eseguite diverse misure di carico posizionando celle di carico sul piano di sbancamento, circa all'altezza delle reni della futura galleria, nonché ai piedi delle centine. Le prime indicano un valore medio di 2 t/m<sup>2</sup>, rilevato però prima dello scavo a foro cieco della galleria e quindi poco significativo, mentre le seconde evidenziano un valore medio di 30 t/m<sup>2</sup>. Vengono inoltre sistematicamente monitorate le convergenze del cavo: il valore medio delle letture eseguite su stazioni a cinque chiodi oscilla tra 1 e 2 mm, assai prossimo, quindi, a quello previsto dal calcolo F.E.M..

#### 4. Conclusioni

Lo scavo di gallerie artificiali per il superamento di tratte prive della copertura di terreno necessaria sopra la futura calotta per poter avanzare a foro cieco comporta inevitabilmente l'esecuzione di incisioni profonde nei versanti da attraversare, con conseguenti problemi di sicurezza, impatto ambientale, ecc..

Si è quindi ideata una soluzione alternativa che consente di realizzare le suddette gallerie in naturale, by-passando tutte le

TABELLA II

GALLERIA	LUNGHEZZA DI GALLERIA ARTIFICIALE TRASFORMATA IN NATURALE NEL PROGETTO COSTRUTTIVO [m]	LUNGHEZZA DI GALLERIA PREVISTA SOTTO "PROTESI" [m]	LUNGHEZZA DI GALLERIA SCAVATA SOTTO "PROTESI" [m]	PERCENTUALE DI GALLERIA SCAVATA SOTTO "PROTESI" [%]
Piccilli 1	65	58	0	0
Piccilli 2	255	251	251	100
Castagne	289	73	45	52
Santuario	322	87	0	0
Caianello	622	363	0	0
<b>Totali</b>	<b>1488</b>	<b>832</b>	<b>296</b>	<b>36</b>

problematiche connesse con la costruzione in artificiale.

La nuova soluzione, studiata e realizzata sperimentalmente per lo scavo di alcune gallerie della nuova linea ferro-

viaria ad Alta Velocità Roma-Napoli, si è dimostrata estremamente pratica, sicura e vantaggiosa anche dal punto di vista economico oltre che ambientale e paesaggistico.

Foto 3: impianto per la miscelazione del terreno piroclastico con la calce



CONCESSIONARIA  
DEI LAVORI:  
T.A.V. S.p.A.

GENERAL CONTRACTOR:  
IRICAV UNO S.p.A.

ALTA SORVEGLIANZA:  
ITALFERR-SIS T.A.V. S.p.A.  
Dott. Ing. Raffaele Marchisella  
Dott. Ing. Riccardo La Torre

IMPRESA ESECUTRICE:  
SOCIETÀ ITALIANA  
PER CONDOTTE D'ACQUA S.p.A.  
Geom. Dino Ricci  
Geom. Lorenzo Contin

PROGETTAZIONE:  
ROCKSOIL S.p.A.  
Prof. Ing. Pietro Lunardi  
Dott. Ing. Alessandro Focaracci  
Dott. Ing. Antonio Valente

ASSISTENZA TECNICA:  
ROCKSOIL S.p.A.  
Dott. Geol. Geremia Romano