

SOCIETÀ ITALIANA GALLERIE



**IL CONSOLIDAMENTO DEL SUOLO E DELLE ROCCE
NELLE REALIZZAZIONI IN SOTTERRANEO**

***SOIL AND ROCK
IMPROVEMENT IN UNDERGROUND WORKS***

Milano, 18-20 Marzo 1991

R. Cotza, A. Focaracci, N. Grassi, P. Lunardi

**PROBLEMATICHE STATICHE E COSTRUTTIVE NELLO SCAVO
DELLA DISCENDERIA MINERARIA DI NURAXI FIGUS**

*STATIC AND CONSTRUCTION PROBLEMS IN THE INCLINED
SHAFT OF THE NURAXI FIGUS MINE*

ESTRATTO/REPRINT

ATTI
PROCEEDINGS

VOL. I

PROBLEMATICHE STATICHE E COSTRUTTIVE NELLO SCAVO DELLA DISCENDERIA MINERARIA DI NURAXI FIGUS

STATIC AND CONSTRUCTION PROBLEMS IN THE INCLINED SHAFT OF THE NURAXI FIGUS MINE

Raffaele Cotza, Università di Cagliari, Cagliari, Italia
Alessandro Focaracci, Rocksoil S.p.A., Milano, Italia
Natale Grassi, Torno S.p.A., Milano, Italia
Pietro Lunardi, Università di Parma, Parma, Italia

Durante lo scavo della discenderia d'accesso della miniera di Nuraxi Figus, in Sardegna, si è avuto un importante ed imprevisto richiamo di acqua in galleria durante l'attraversamento dei terreni vulcanici più superficiali, in corrispondenza di un potente banco trachitico.

Lo scavo ha potuto superare tale tratta, di circa 120 m, grazie alla messa a punto di un intervento basato su iniezioni a bassa pressione eseguite in avanzamento rispetto al fronte di scavo.

The inclined shaft of the mine at Nuraxi Figus in Sardinia is made up of three straight flights (gradient 14%) with two inversion tunnels.

Starting from the country level, during excavation some vulcanites, a sedimentary series and the formation of the productive material were found.

Vulcanites are made up alternatively of tuff and trachyte lithotypes. Trachytes show a very high degree of alteration and include pressure water beds.

The presence of a remarkably wide bench of trachytes at the progr 711 caused water inflows in the tunnel which ranged from 30 to 40 l/sec.

Thus it was impossible to carry on the excavation. The drainage effect of the tunnel could have brought about an alteration of the hydrological balance in the surrounding area.

The problems of the trachyte bench were easily overcome by means of a combined injection of resins and concrete mixt along the arch. Therefore, a ring of waterproof soil was created by the injection, obtaining also better mechanical conditions.

The treatment was performed in advance with respect to the face of the tunnel. The excavation was carried out by 15 m consecutive ashlar.

The treatment was adapted according to the different characteristics of the soil. Four different concrete mixtures had been combined, according to the various conditions. As far as the chemical injections are concerned, several products were being studied and the results studied. The water inflows were reduced to 10+12 l/sec.

During work progress the superficial piezometric level was been checked up. Monitoring revealed the correlation between drainage in the tunnel and the water bed.

The results obtained showed to be optimal and on line with the project expectations.

1. GENERALITÀ

La discenderia d'accesso alla miniera di Nuraxi Figus collegherà i futuri impianti di trattamento del carbone all'aperto con la struttura mineraria di base, a circa 460 m sotto il piano campagna.

Il progetto in esame prevede la realizzazione di 3 rampe in galleria con pendenza del 14%, per una lunghezza complessiva di circa 3.2 Km che, partendo dalla quota +80 m s.l.m. del piano campagna, permette di raggiungere la profondità di -375 m s.l.m.

La sezione tipo ha un raggio massimo di 4.10 m, per un'altezza di circa 6.20 m. In corrispondenza dei due punti di inversione delle rampe è prevista la realizzazione di cameroni aventi luce pari a 21.12 m e altezza massima di 13.38 m, per una lunghezza complessiva di circa 57 m.

Le caverne, di cui la prima, alla progressiva 1142, è già stata realizzata, sono costituite da tre tratte di diversa luce ed altezza, raccordate tra loro in modo da rispettare gli ingombri previsti dall'attrezzatura e, nello stesso tempo, minimizzare l'entità degli scavi. A tutt'oggi, lo scavo ha quasi raggiunto il secondo camerone di inversione.

Le difficoltà maggiori riscontrate durante l'avanzamento sono dovute all'elevata pendenza della galleria ed alla presenza d'acqua diffusa. Pur essendo di modesta entità, valutabile in circa 7 l/sec nella zona delle vulcaniti, le venute rendono spesso il piano di lavoro impraticabile imbibendo il terreno al fronte, specie se di natura tufitica o bentonitica. Il progetto statico è stato messo a punto in funzione delle condizioni di stabilità del cavo ed operative di cantiere.

L'avanzamento è quindi proceduto regolarmente, pur con le difficoltà già precisate, fino alla progressiva 711, a ridosso di un importante banco trachitico, dove si è verificata una importante ed imprevista venuta idrica in galleria, con portata dell'ordine dei 40 l/sec, che ha reso proibitive le condizioni di lavoro.

Nel seguito verranno illustrate le problematiche connesse con detto fenomeno esponendo le soluzioni tecniche adottate per permettere la prosecuzione dei lavori ed i risultati conseguiti dall'intervento eseguito.

2. QUADRO GEOLOGICO GENERALE E OPERE DI STABILIZZAZIONE

Nella zona in esame si situa la più ampia lacuna stratigrafica del Paleogene della Sardegna sud-occidentale, per cui gli strati orizzontali dell'Eocene poggiano direttamente su rocce del Cambriano medio-inferiore. Successivamente, nel bacino del sulcis si ha una deposizione di tipo clastico continentale-marino, probabilmente oligocenica. L'attività vulcanica post-mesozoica a carattere bimodale chiude il ciclo deposizionale.

Tenendo presente la genesi del territorio, dai dati emersi dai sondaggi eseguiti, si è giunti ad individuare la seguente successione stratigrafica, a partire dal piano campagna (Fig. 1):

- vulcaniti a carattere trachitico-tufitico fino a circa progr. 870;
- alternanza di arenarie, argille, marne, conglomerato fino a progr. 2700;
- alternanza di argille e marne con intercalazione di livelli di carbone e strati calcarei oltre la succitata progressiva.

Nella presente analisi ci si soffermerà principalmente sulle deposizioni vulcaniche, all'interno delle quali si è verificata la venuta d'acqua in esame. Le vulcaniti sono caratterizzate da un'estrema eterogeneità che va messa in relazione con la loro genesi. Inoltre all'interno di uno stesso tipo litologico esiste una serie di sistemi di discontinuità con riempimento plastico che condiziona pesantemente le caratteristiche geomeccaniche di insieme.

Più precisamente, le trachiti si sono mostrate generalmente tenaci, resistenti e compatte, talora interessate da fratturazioni ed alterazioni. Le fratture, dallo spessore variabile fino a qualche centimetro, riempite da strati di argilla talora bentonitica, hanno determinato il distacco, in galleria, di blocchi di roccia variamente conformati e comunque di volume piuttosto ridotto.

I termini tufacei hanno presentato invece differenziazioni notevoli in funzione del grado di consistenza, estremamente variabile in senso sia verticale, sia orizzontale. In genere, si sono riscontrate tenacità e resistenza medio-basse, aspetto massivo, alterazioni più o meno intense e intercalazioni di livelli argillosi.

La falda superficiale è stata incontrata a progr. 180 m (+55 m slm).

Lungo tutto il tracciato si sono verificate venute d'acqua la cui intensità è dipesa dalle caratteristiche dell'ammasso e dei singoli strati. All'interno della zona

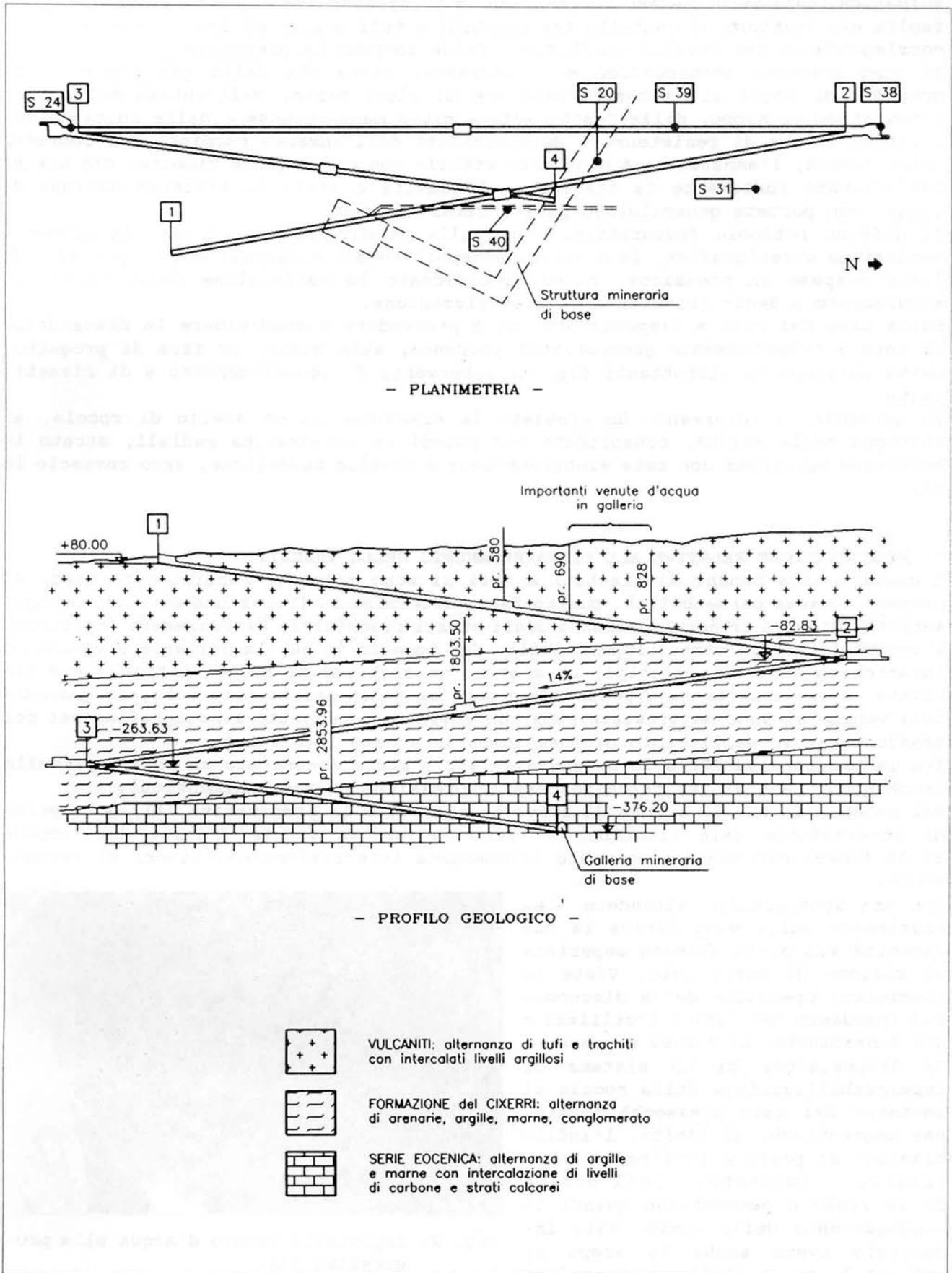


Fig. 1: Planimetria generale e profilo geologico.
 General planimetry and geological profile of the Nuraxi Figus mine.

vulcanica, tali venute erano concentrate in corrispondenza di punti singolari quali faglie e/o fratture al contatto tra trachiti e tufi mentre si sono riscontrate, in corrispondenza dei livelli trachitici, falde sospese in pressione.

Il comportamento geomeccanico è influenzato, oltre che dalla già riconosciuta presenza di acqua sia interstiziale che di riempimento, dall'entità del carico litostatico in gioco, dalla fratturazione più o meno intensa e dalle ipotizzabili caratteristiche di resistenza e deformabilità dell'ammasso roccioso. Al contorno della cavità, l'ammasso si è mantenuto stabile con convergenze ridotte. Ciò che ha condizionato fortemente la statica della cavità è stata la presenza diffusa di acqua, con portate generalmente pari a circa 7 l/sec.

Il diffuso reticolo fessurativo, con faglie di diversa importanza, la notevole variazione stratigrafica, la diversa permeabilità dei materiali con la presenza di falde sospese in pressione, hanno condizionato la definizione degli schemi di avanzamento e degli interventi di stabilizzazione.

Sulla base dei dati a disposizione, si è provveduto a suddividere la discenderia in zone a comportamento geomeccanico omogeneo, alle quali, in fase di progetto, hanno corrisposto altrettanti tipi di interventi di consolidamento e di rivestimento.

In generale, l'intervento ha previsto la creazione di un anello di roccia, al contorno della cavità, consolidato con chiodi in vetroresina radiali, strato in betoncino spruzzato con rete elettrosaldata e centine metalliche, arco rovescio in cls.

3. PROBLEMATICHE RELATIVE ALL'ATTRAVERSAMENTO DELLE TRACHITI

A contatto tra banchi di trachiti e tufi si sono rilevate generalmente fasce di terreno a bassa permeabilità. Questo fatto determina la formazione di veri e propri serbatoi d'acqua in corrispondenza degli strati trachitici, diffusamente fratturati e compresi tra due strati impermeabili. Nel momento in cui la galleria è venuta ad interferire con tali litotipi, si è avuto un richiamo di acqua al fronte e sulla cavità la cui importanza dipende dalla potenza dello strato fessurato. In generale tali venute si sono manifestate come concentrate al contatto stratigrafico per poi trasformarsi in stillicidio diffuso lungo lo strato interessato.

Tra la progressiva 728 e la progressiva 852 è stato incontrato un potente livello trachitico, sede di una falda sospesa in pressione di vaste dimensioni.

Nel momento in cui il fronte di scavo ha raggiunto la progressiva 711, poco prima di intercettare tale litotipo, si sono registrate venute d'acqua dell'ordine di 30 l/sec. che hanno comportato l'immediata interruzione dei lavori di avanzamento.

Non era ipotizzabile attendere l'esaurimento della vena idrica la cui capacità era stata stimata superiore al milione di metri cubi. Viste le condizioni operative della discenderia (pendenza del 14%) e l'utilizzo a cui è destinata, si è resa necessaria la disposizione di un sistema di impermeabilizzazione della roccia al contorno del cavo pressochè totale, che consentisse, al limite, l'infiltrazione di portate facilmente smaltibili, valutate nell'ordine di 10 l/sec e permettesse quindi il proseguimento dello scavo. Tale intervento aveva anche lo scopo di evitare le presumibili ripercussioni sulla falda del drenaggio attuato dal



Fig. 2: Importanti venute d'acqua alla progressiva 711.
Iremarkable water inflows at the progr. 711.

cunicolo e quindi lo sconvolgimento del delicato equilibrio idrogeologico dell'intera zona. In generale, le fasi operative sono state così previste:

- 1) trattamento di impermeabilizzazione e consolidamento in avanzamento oltre il fronte di scavo di una fascia di roccia al contorno del cavo mediante iniezioni combinate di sostanze polimeriche e cementizie;
- 2) avanzamento mediante esplosivo o mezzi meccanici e immediata posa in opera di centine e spritz-beton, eventualmente coadiuvati da una cucitura della roccia ed una successiva iniezione per la ricementazione delle fessure apertesesi a seguito degli spari, tramite tubi radiali in vetroresina.

4. INTERVENTO TRA LE PROGRESSIVE 690 E 711

Come intervento preliminare, è stato necessario ridurre le venute d'acqua registrate in corrispondenza del fronte, alla progressiva 711, provenienti prevalentemente dall'arco rovescio che si intesta a pochi metri sopra il livello trachitico, con l'iniezione di opportune miscele nella fascia di terreno sottostante il solettone all'interno della trachite (fig. 3). In un primo momento, si è cercato di impedire l'insorgere di eccessive spinte sul solettone a seguito dell'iniezione eseguendo 40 fori di sfiato (\varnothing 85 mm) nella struttura.

Quindi si è proceduto alle perforazioni per le iniezioni che si sono intestate per tre metri nel sottostante banco trachitico. Con venute superiori ad $1+2$ l/sec si sono iniettate resine silicate, con portate inferiori, malte cementizie.

La portata d'acqua è stata ridotta, in questo modo a 14 l/sec.

La presenza dei pozzetti di raccolta sul solettone non ha permesso di raggiungere risultati migliori in quanto l'acqua di filtrazione dilavava la miscela iniettata senza dare il tempo alla resina di indurire e occludere tutte le cavità. Per questo motivo, è stato necessario chiudere i fori di sfiato e procedere ad una seconda iniezione che ha permesso di ridurre le portate a 7 l/sec. Si è dovuto però accettare la fessurazione dell'arco rovescio, il quale è stato successivamente ancorato al banco trachitico utilizzando 28 barre dywidag \varnothing 26.

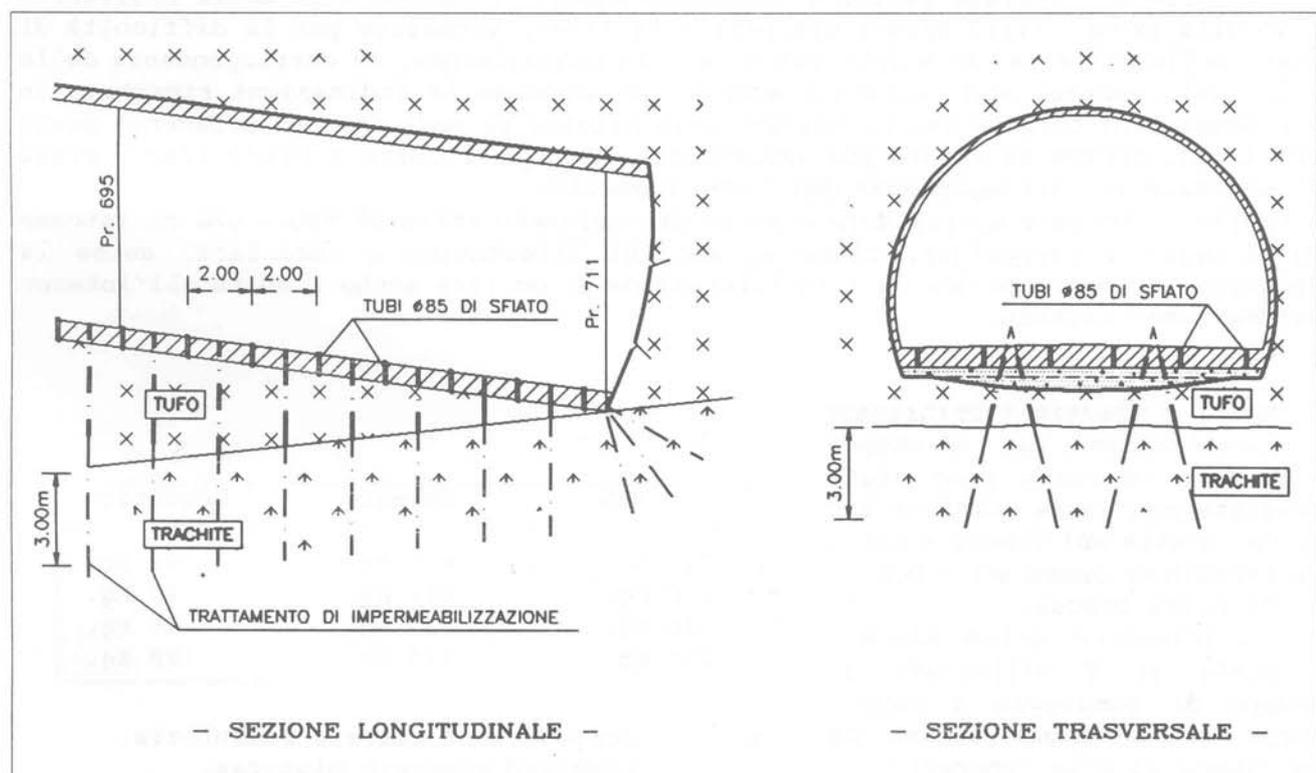


Fig. 3: Interventi tra le progressive 695 e 711.
Interventions between the 659 and 711 progr.

In un secondo tempo, per evitare la risalita d'acqua lungo l'intercapedine tra giunte e terreno ed aumentare la resistenza del tufo, sono state eseguite delle iniezioni cementizie sino all'altezza dei piedritti.

5. ATTRAVERSAMENTO DELLE TRACHITI

Si è potuto a questo punto procedere allo scavo della galleria per tratte successive di 15 m (figg. 5 e 6) secondo le seguenti fasi:

- sigillatura del fronte di scavo con un tampone di spritz-beton, previa perforazione $\varnothing 96$ mm e posa in opera di tubi di acciaio (89 x 89) per raccordare i tubi valvolati di iniezione. I fori sono disposti secondo una circonferenza avente raggio 3.80 m;
- perforazione dei fori di impermeabilizzazione per una lunghezza di 18 m, diametro $\varnothing 67$ mm. Nel caso in cui il risultato si sia dimostrato insufficiente, si è proceduto alla riperforazione e successiva ulteriore iniezione;
- perforazione dei fori di consolidamento, $l=21$ m, $\varnothing 67$ mm, con successiva iniezione di miscela cementizia;
- perforazioni sul fronte, $l = 18$ m, per la creazione di un tampone impermeabile di 3 m di spessore oltre il fronte di scavo, in corrispondenza del successivo avanzamento;
- scavo della galleria per i successivi 15 m.



Fig. 4: Venute d'acqua in galleria
Water inflows.

Completato l'attraversamento del banco trachitico, la portata globale misurata all'esterno è risultata pari a 21 l/sec. L'aumento rispetto alla media registrata fino alla progr. 711 (7 l/sec) era pari a 14 l/sec, eccessivo per le difficoltà di scavo della galleria. Si è intervenuti allora puntualmente, in corrispondenza delle principali venute, con iniezioni aggiuntive, secondo le indicazioni riportate in precedenza. Al termine del trattamento, in calotta si registravano solamente degli stillicidi mentre le venute più importanti, comunque ridotte a 10+12 l/sec, erano localizzate in corrispondenza dell'arco rovescio.

L'anello di terreno consolidato è stato dimensionato affinché abbia una resistenza sufficiente a sopportare, oltre ai carichi litostatici e idraulici, anche le pressioni di corrente dovute alla filtrazione di portate anche ridotte all'interno del terreno trattato.

6. MEZZI E MATERIALI UTILIZZATI

Le perforazioni nel solettone dell'arco rovescio sono state eseguite con sonda KLEMM KR 805 D. Per quelle sul fronte è stato utilizzato un Jumbo Atlas Boomer H 175 a tre bracci.

Per l'iniezione delle miscele chimiche si è utilizzato un gruppo di pompaggio a doppio corpo con ingranaggi azionati da un motore ad aria compressa.

H ₂ O	Cemento	Bentonite
340 Kg.	400 Kg.	60 Kg.
300 Kg.	250 Kg.	50 Kg.
340 Kg.	200 Kg.	60 Kg.
200 Kg.	110 Kg.	120 Kg.

Tab. 1: Composizioni miscele cementizie.
Combined concrete mixtures.

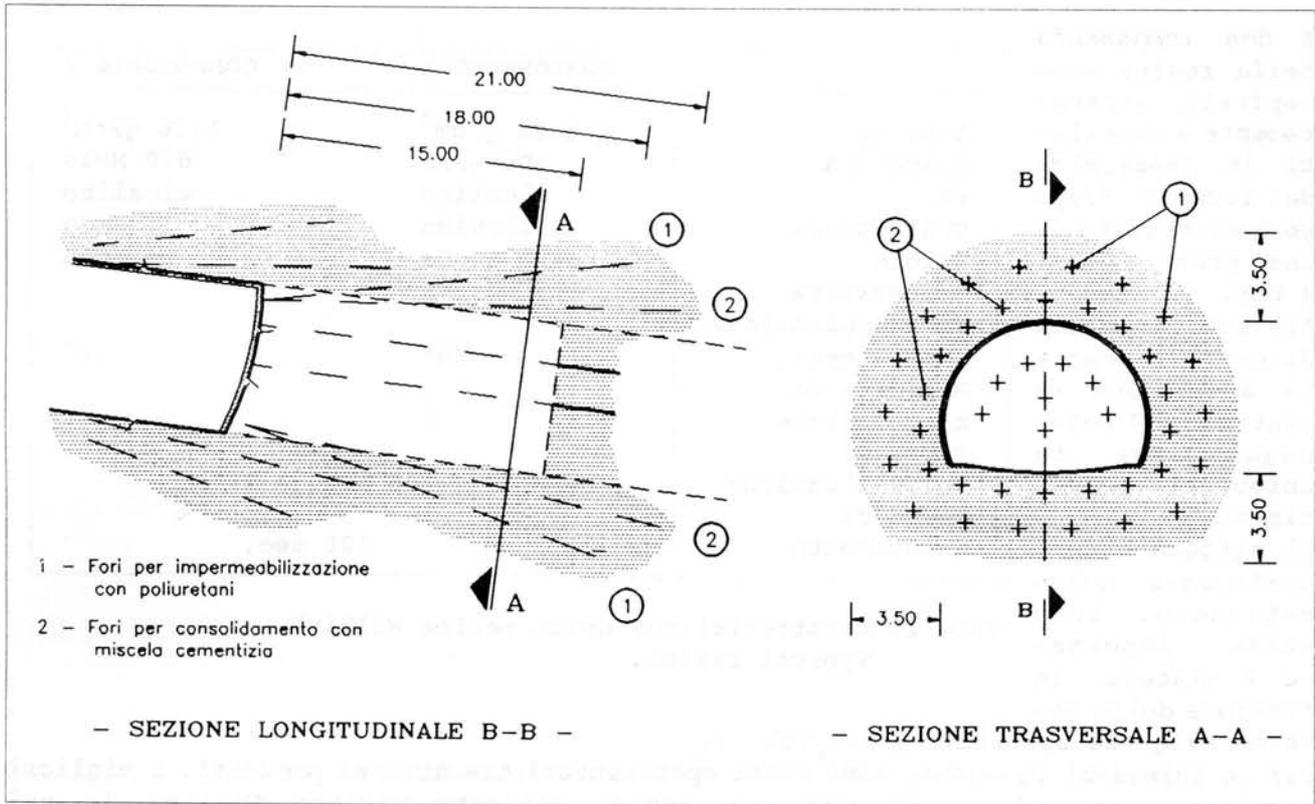


Fig. 5: Intervento tipo per concio di 15 m
Standard intervention in each 15m ashlar.

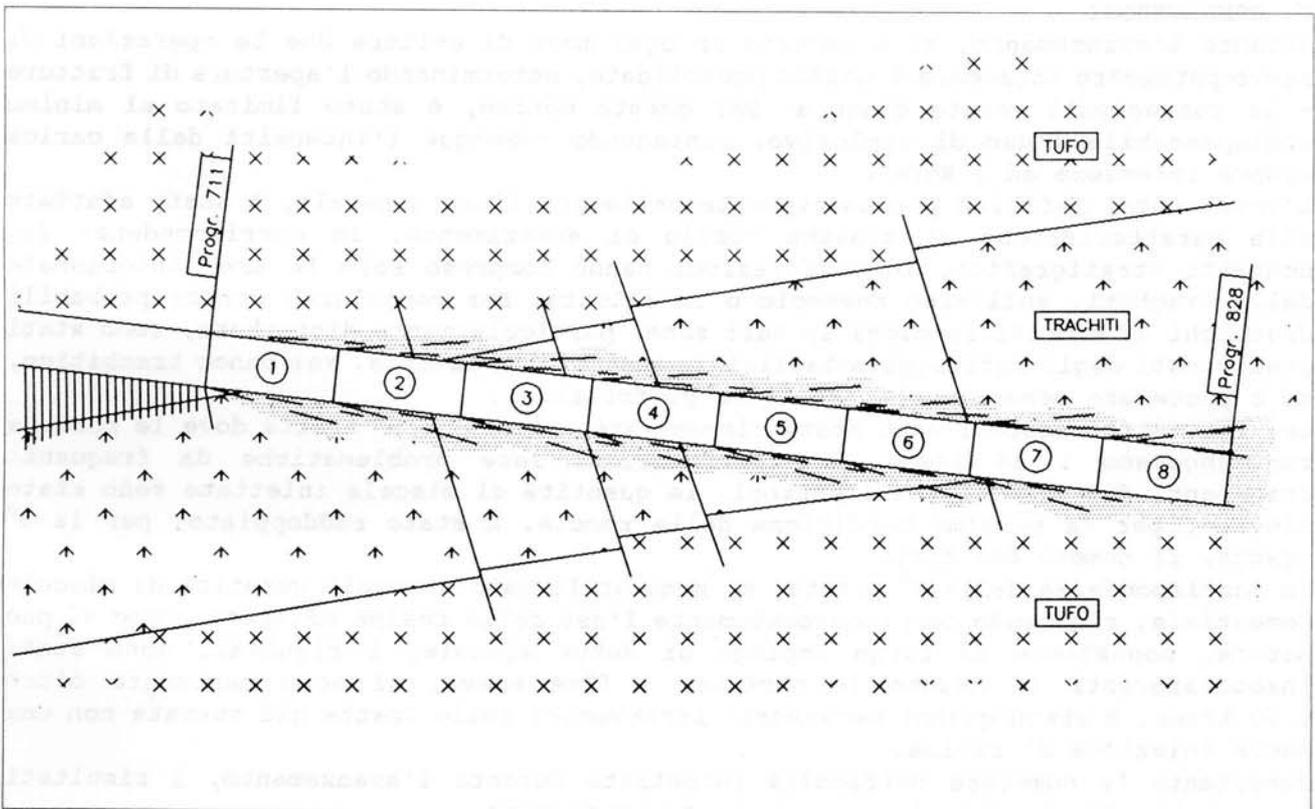


Fig. 6: Schema avanzamenti nel banco trachitico.
Progress scheme in the trachyte bench.

I due componenti della resina sono aspirati separatamente e miscelati in prossimità del foro. Il gruppo è alimentato da una pressione di 4 bar.

All'esterno della discenderia è stata approntata la centrale del betonaggio per le iniezioni cementizie.

Il sistema è completamente automatizzato. Sono state impostate 4 miscele, in funzione delle diverse esigenze operative (cfr. tab.1).

Per le iniezioni chimiche, sono stati sperimentati tre diversi prodotti. I migliori risultati sono stati ottenuti con resina silicato Wisitom Willich le cui caratteristiche sono riportate nella tabella 2.

	COMPONENTE A	COMPONENTE B
Densità	1.31 g/cm ³	1.26 g/cm ³
Viscosità	100 MPas	600 MPas
PH	alcalino	alcalino
Consistenza	liquido	liquido
Colore	rosso tenue	marrone
Temperatura di conservazione (Max 6 mesi)	20°	20°
Rapporto di miscelazione	1	1
Tempo di solidificazione	35 sec. a 20°	
Tempo di indurimento	120 sec.	

Tab. 2: Caratteristiche delle resine Willich. Typical resins.

7. CONCLUSIONI

Durante l'avanzamento, si è cercato in ogni modo di evitare che le operazioni di scavo potessero intaccare l'anello consolidato, determinando l'apertura di fratture e le conseguenti venute d'acqua. Per questo motivo, è stato limitato al minimo indispensabile l'uso di esplosivo, mantenendo comunque l'intensità della carica sempre inferiore ad 1 Kg/m³.

L'intervento, definito precedentemente nelle sue linee generali, è stato adattato alle caratteristiche di ciascun concio di avanzamento. In corrispondenza dei contatti stratigrafici, le perforazioni hanno compreso solo le aree interessate dalle trachiti, sull'arco rovescio o in calotta. Per cautelarsi contro probabili distacchi di blocchi rocciosi in tali zone, particolarmente disturbate, sono stati predisposti degli infilaggi metallici di sostegno in calotta. Nel banco trachitico, si è proceduto generalmente con 18+18 perforazioni.

Le difficoltà maggiori sono state riscontrate nella 4^a e 5^a tratta dove le portate raggiungevano i 40 l/sec, con perforazioni rese problematiche da frequenti franamenti del foro. In tali settori, le quantità di miscela iniettate sono state elevate, per la pessima condizione della roccia. È stato raddoppiato, per la 5^a tratta, il numero dei fori.

In corrispondenza della 6^a tratta, si sono utilizzate notevoli quantità di miscele cementizie, riducendo corrispondentemente l'uso della resina silicato. Come si può notare, nonostante il largo impiego di dette miscele, i risultati sono stati insoddisfacenti in quanto le portate, a fine scavo, si sono mantenute oltre i 30 l/sec. È stato quindi necessario intervenire sulle tratte già scavate con una nuova iniezione di resine.

Nonostante le numerose difficoltà incontrate durante l'avanzamento, i risultati sono stati ottimi ed in linea con quanto prefissato.

Le portate si sono mantenute su livelli accettabili, con un aumento medio, sui 120 metri trattati, di 0.12 l/metro e portate finali, dopo l'attraversamento, di circa 21 l/sec.

Con i dati a disposizione, non è stato possibile definire con precisione la complessa idrogeologia del sottosuolo. I dati relativi alla quota del livello piezometrico in corrispondenza di due sondaggi (S39-S40) confrontati con le portate d'acqua in galleria durante l'avanzamento dello scavo (fig. 7) sembrano correlare il fenomeno in atto con la falda superficiale. Infatti, durante l'esecuzione dei lavori, il livello piezometrico si è abbassato mediamente di circa 10 m, con leggere risalite in corrispondenza dei periodi con portate emunte più ridotte. L'impermeabilizzazione del cavo ha quindi permesso di ridurre gli effetti del drenaggio in galleria sulla falda i quali, sulla base di quanto rilevato, sarebbero stati presumibilmente molto più accentuati.

L'ulteriore intervento nelle tratte già scavate ha permesso di ridurre la presenza di acqua in galleria fino a 10÷12 l/sec.

Si ringraziano per la collaborazione la Carbosulcis S.p.A., la Consonda S.p.A. e l'ing. Tentori della Rocksoil S.p.A.

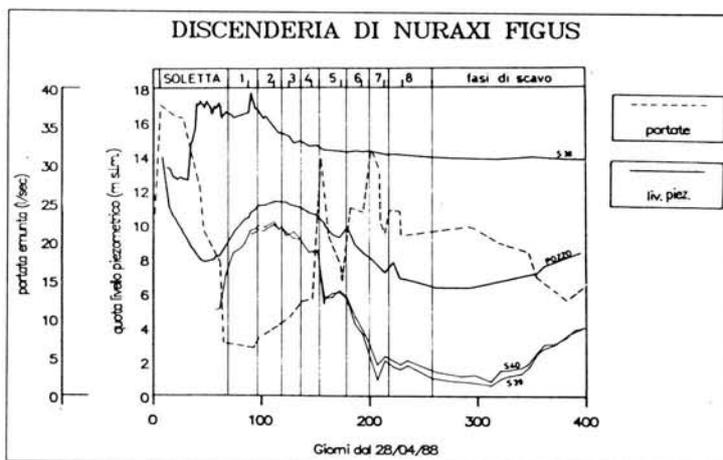
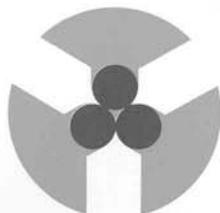


Fig. 7: Variazioni delle portate in galleria e del livello piezometrico durante le varie fasi di scavo.
Variations of the water inflows in the tunnel and of the piezometric level during the excavation phases.

Lavoro:	Discenderia mineraria di Nuraxi Figus
Committente:	Carbosulcis S.p.A.
Impresa generale:	Torno S.p.A.
Impresa specializzata:	Consonda S.p.A.
Progettazione esecutiva:	Rocksoil S.p.A.

SOCIETÀ ITALIANA GALLERIE



**IL CONSOLIDAMENTO DEL SUOLO E DELLE ROCCE
NELLE REALIZZAZIONI IN SOTTERRANEO**

***SOIL AND ROCK
IMPROVEMENT IN UNDERGROUND WORKS***

Milano, 18-20 Marzo 1991

G. Biagi, V. Pellegrini, P. Lunardi

**L'APPLICAZIONE DEL SISTEMA JET - GROUTING NEL PROGETTO E NELLA
COSTRUZIONE DELLE GALLERIE DELL'AUTOSTRADA LIVORNO - CIVITAVECCHIA**

*APPLICATION OF THE JET - GROUTING TECHNIQUE IN THE PROJET AND
CONSTRUCTION OF THE TUNNELS ALONG THE LIVORNO - CIVITAVECCHIA MOTORWAY*

ESTRATTO/REPRINT

ATTI
PROCEEDINGS

VOL. II