

il metodo del pretaglio

Pietro Lunardi, Renzo Bindi, Alessandro Focaracci

In condizioni geologiche difficili, questa tecnica modernissima permette di avanzare più in fretta e con minimi rischi, consolidando preventivamente il fronte di scavo.

La realizzazione di una galleria attraverso terreni soffici o semicoesivi saturi, specie se di tipo alterabile, comporta spesso seri problemi, sia per lo scavo sia per il conseguimento della completa stabilizzazione dell'opera a lungo termine. Il decadimento della pressione di confinamento provocato dalle operazioni di avanzamento di tipo tradizionale, in rapporto alle ridotte qualità geomeccaniche del materiale e allo stato di coazione originario, porta inevitabilmente all'estrusione del fronte d'avanzamento ed alla conseguente formazione di una vasta zona collassata nell'ammasso circostante lo scavo. Ne conseguono importanti fenomeni deformativi a carattere irreversibile, al fronte della galleria e al suo contorno.

In terreni saturi la distensione dell'ammasso porta ad un richiamo d'acqua nella zona decomposta; si accelera il decadimento delle caratteristiche geomeccaniche del materiale e si innescano vistosi fenomeni deformativi, conseguenti alla rottura progressiva del terreno, che portano al rifluimento di materiale in galleria e alla chiusura del cavo fino al crollo. Poiché in terreni di questo tipo il disturbo prodotto dall'azione di avanzamento del fronte di scavo, ovvero la riduzione del contenimento fornito dal nucleo di terreno da scavare, può indurre fenomeni deformativi di tipo irreversibile culminanti con il crollo della galleria, l'unica maniera possibile per operare con successo è anticipare i fenomeni deformativi, intervenendo, per una certa sezione, con adeguati sistemi di stabilizzazione, prima dell'arrivo del fronte.

A questo scopo occorre operare in fase di scavo in modo da assicurare costantemente al terreno circostante la pressione di confinamento minima necessaria a mantenere lo stato di sollecitazione entro livelli di sicurezza.

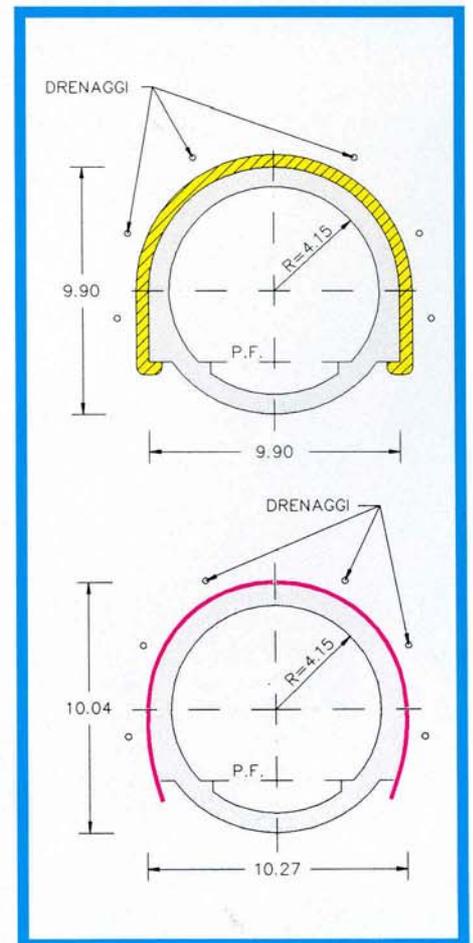
"Jet grouting" (iniezione di miscela cementizia ad altissima pressione) e pretaglio meccanico (come precontenimento del cavo), chiodi al fronte e drenaggi (come preconsolidamento del fronte) sono gli strumenti a disposizione del progettista; nelle varie condizioni geotecniche essi, se ben impiegati, permettono di scavare anche a piena sezione, quindi in condizioni operative ideali, entro terreni soffici coesivi o semicoesivi sotto falda, fino ad oggi affrontati con sistemi tradizionali a sezione parzializzata.

Mentre la tecnologia *jet grouting* accoppiata ai drenaggi in avanzamento è ormai abbastanza nota, il pretaglio meccanico accoppiato ai drenaggi o al preconsolidamento del fronte di scavo mediante chiodi di vetroresina è una tecnica messa a punto solo recentemente. In questa breve esposizione ci proponiamo di descriverla, riferendo sulle esperienze maturate in due importanti cantieri italiani.

Sulla linea Sibari—Cosenza

La variante della linea ferroviaria a semplice binario Sibari—Cosenza, tra le stazioni di San Marco Roggiano e Mongrassano-Cervicati, prevede la realizzazione di quattro gallerie per uno sviluppo complessivo di circa 4.000 m, di cui oltre 3.500 m già realizzati. Le indagini geolo-

giche e geotecniche condotte in fase conoscitiva hanno permesso di acquisire i seguenti elementi: 1) i terreni attraversati appartengono alla formazione pliocenica-calabrianica costituita da argille grigio-azzurrognole sormontate da sabbie gialle. Lo strato delle argille, nella parte superiore, dove prevalentemente si intesta il



tracciato ferroviario, presenta intercalazioni di sottili livelli sabbiosi che delimitano i piani di stratificazione; 2) le sabbie, di buona permeabilità, presentano una circolazione idrica che si anastomizza in più falde; 3) le indagini puntuali hanno confermato la variabilità geotecnica dei terreni esaminati.

In fase di diagnosi lo studio con le linee caratteristiche ha permesso di stabilire che le deformazioni al fronte sarebbero state incompatibili con le caratteristiche di deformabilità del terreno, dependendo per una situazione di fronte instabile. Infatti la convergenza specifica in corrispondenza del fronte di scavo, in assenza di preconsolidamenti, sarebbe stata dell'ordine del 22%, valore, questo, eccessivo per il tipo di terreno in gioco, quindi inaccettabile.

In fase di terapia si sono pertanto scelti interventi di precontenimento del cavo da dosare in funzione delle caratteristiche geotecniche dei terreni. In particolare, il precontenimento con la tecnica del pretaglio meccanico è stato scelto per le zone in cui prevaleva la componente argillosa, mentre quello con il sistema *jet grouting* orizzontale è stato scelto per le tratte in cui prevaleva la componente sabbiosa, comunque integrati da drenaggi in avanzamento per abbattere le pressioni idrostatiche all'interno del nucleo al fronte.

Essendo stata questa la prima applicazione della tecnica del pretaglio in territorio nazionale e la prima in assoluto a piena sezione in galleria di 10 m di diametro, riteniamo utile esporre gli studi e i riscontri in cantiere che hanno permesso di metterla a punto.

Il pretaglio meccanico

Questo metodo consiste nel praticare sul fronte di scavo, lungo la traccia del profilo di estradosso della galleria, un taglio di spessore e lunghezza predeterminati. Il taglio viene immediatamente riempito con calcestruzzo spruzzato, opportunamente additivato in maniera da ottenere eccellenti doti di resistenza in tempi brevi. La natura del sistema, tutto volto più verso la prevenzione che verso il semplice contenimento dei fenomeni deformativi, ha comportato un approccio concettuale diverso ai problemi di avanzamento e stabilizzazione della cavità, rispetto ai sistemi più comunemente adottati.



Galleria in costruzione sulla ferrovia Sibari—Cosenza: nucleo d'avanzamento costituito da terreno argilloso con lenti di sabbia, protetto da gusci di calcestruzzo spruzzato fibrorinforzato realizzati mediante pretaglio meccanico (foto Rocksoil).

in basso
Macchina per l'esecuzione del pretaglio (foto Rocksoil).

nella pagina opposta
Sezioni di galleria realizzate col metodo del "jet grouting" (sopra) e col metodo del pretaglio (sotto).

In particolare è stato necessario definire attentamente: i criteri di stabilizzazione del cavo da seguire nei riguardi della stabilità trasversale e soprattutto nei riguardi di quella del fronte; la geometria del tegolo di priverestimento; le sue caratteristiche globali di resistenza.

Per la stabilità del fronte, presupposto indispensabile per la buona riuscita del metodo, è stato necessario sagomare il fronte stesso, in fase di avanzamento, a forma concava e proteggerlo con uno strato di calcestruzzo spruzzato (*Spritz Beton*) di alcuni centimetri. In presenza di falda si sono realizzati drenaggi in avanzamento per ridurre le pressioni in-





Esecuzione del pretaglio della sezione di scavo (foto Rocksoil).

nella pagina opposta
Fronte di scavo della galleria Talleto, a semplice binario sulla Direttissima Firenze—Roma, stabilizzato in avanzamento col metodo del pretaglio (foto Ferrocemento).

terstiziali e aumentare la resistenza a taglio del terreno costituente il nucleo al fronte. Qualora questi interventi non fossero risultati sufficienti ad assicurare la stabilità del fronte, ci si è sempre tenuti pronti ad operare un preconsolidamento del fronte stesso mediante chiodi di vetroresina.

La stabilità trasversale del cavo è garantita, per circa 1—1,5 diametri di distanza del fronte, dai soli tegoli di calcestruzzo spruzzato fibrorinforzato. A distanze non superiori si è eseguito il getto delle murette e dell'arco rovescio, mentre il rivestimento definitivo è stato comple-

tato successivamente. Quando l'assetto strutturale del terreno è apparso tale da influire negativamente sull'uniformità delle spinte, si sono rinforzati i tegoli con centine, opportunamente controventate, e calcestruzzo spruzzato.

Lo spessore dell'incisione praticabile nel terreno (massimo circa 20 cm) determina lo spessore del tegolo di pretaglio. È evidente a questo punto l'importanza di dare a questo tegolo la geometria del flusso di tensioni ed evitare l'insorgere al suo interno di sforzi di trazione. Per adeguare le caratteristiche meccaniche alle esigenze del progetto, è stato approntato un campo prove per il confezionamento delle miscele cementizie in conformità ai tipi richiesti, variando opportunamente genere e quantità di leganti, fibre ed additivi.

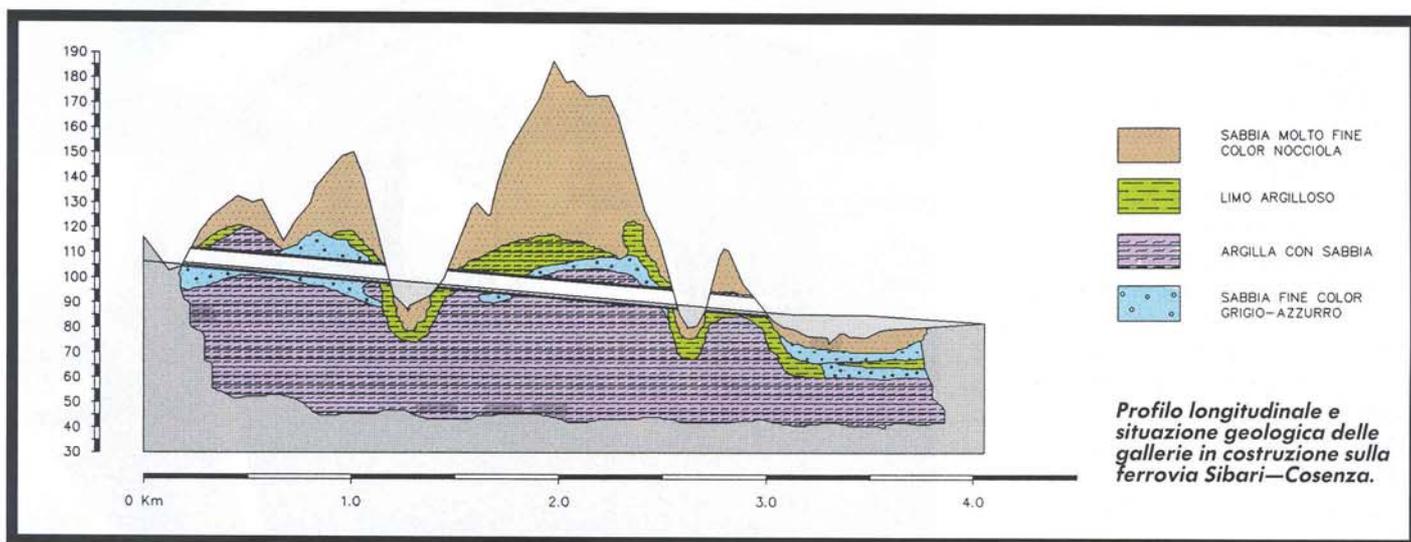
Operazioni di verifica

Trattandosi della prima applicazione di questa tecnologia a piena sezione (10 m di diametro) e per di più in terreni plastici sotto falda, in fase di verifica in corso d'opera si è condotto un accurato controllo delle convergenze, superficiali e profonde, in corrispondenza del fronte e del contorno del cavo. La lettura e l'interpretazione dei controlli hanno permesso di seguire l'evoluzione del comportamento della galleria durante le varie fasi di scavo e di calibrare tipologia e geometria degli interventi di stabilizzazione mettendo a punto le fasi e le cadenze dell'avanzamento. In particolare, si sono progettate e realizzate tre stazioni di misura attrezzate per l'esecuzione di: misure di convergenza del cavo mediante nastro d'acciaio Invar; misure estensimetriche dall'alto mediante posa in opera di

tre estensimetri multibase ad asta; misure pressometriche mediante inserimento di celle di pressione entro i tegoli del pretaglio.

Mettendo in opera gli estensimetri in anticipo rispetto all'arrivo del fronte di scavo è stato possibile seguire l'evoluzione dei fenomeni deformativi con il progredire dell'avanzamento e valutare la quantità di deformazione già subita dalla galleria al fronte.

L'esame delle letture estensimetriche e di convergenza ha permesso di ottenere importanti informazioni sul comportamento del cavo. Due delle tre stazioni di misura, denominate A e B ed entrambe corrispondenti ad una sezione di galleria scavata con pretaglio, mostrano un'evoluzione dei fenomeni deformativi tendenzialmente simile. In particolare si osserva: a) prima dell'arrivo del fronte, in corrispondenza della sezione strumentata non si producono spostamenti apprezzabili; b) durante il passaggio del fronte si innescano i primi movimenti. I fenomeni deformativi si sviluppano per circa il 50% del valore nell'arco di 3 o 4 giorni, ovvero quando il fronte oltrepassa di circa 8—10 m la stazione strumentale; c) il valore massimo raggiunto dagli spostamenti, misurati a 2 m sopra la calotta della galleria, è circa 30 mm per la stazione A e circa 40 mm per la stazione B; d) il gradiente di deformazione è massimo durante lo scavo dell'arco rovescio, il getto del quale produce un'immediata stabilizzazione del cavo. Di conseguenza il getto del rivestimento definitivo non produce visibili modifiche sullo stato deformativo. Le misure di convergenza evidenziano l'effetto della sosta prolungata del fronte nei riguardi dei fenomeni deformativi: in corrispondenza della stazio-



Profilo longitudinale e situazione geologica delle gallerie in costruzione sulla ferrovia Sibari—Cosenza.

ne B, in particolare, si sono misurate deformazioni diametrali dell'ordine di 120 mm contro i 40—60 misurati correntemente.

È interessante confrontare le misure eseguite in corrispondenza delle stazioni A e B con quelle della terza stazione C, posta in corrispondenza di una sezione di galleria scavata mediante *jet grouting* sub-orizzontale. Questa stazione, collocata in una zona con coperture superiori a quelle dei casi A e B, presenta, almeno inizialmente, un'evoluzione dei fenomeni deformativi decisamente più marcata: a) durante la fase di *jet grouting* una millimetrica risalita dell'ancoretta posta a circa 2 m al di sopra della calotta della galleria, con ogni probabilità riconducibile all'effetto dell'iniezione ad alta pressione; b) all'atto dello scavo della galleria, un rapido incremento dei fenomeni deformativi, circa doppio rispetto all'incremento misurato nelle stazioni A e B.

In genere le misure di convergenza eseguite in corrispondenza delle tratte scavate mediante *jet grouting* sub-orizzontale hanno fatto registrare valori di deformazione molto superiori rispetto a quelli misurati nelle tratte scavate mediante pretaglio.

Una volta messo a punto il sistema, sulla scorta dei risultati di calcoli semplificati e di riscontri in cantiere, si è ritenuto utile eseguire un'analisi agli elementi finiti non lineari per prevedere, in maniera attendibile, il comportamento che il cavo avrebbe avuto sotto le coperture maggiori. I risultati ottenuti, in termini sia di deformazioni sia di sollecitazioni, sono conformi a quelli delle misure che sono state eseguite in tempi successivi.

Per quanto riguarda lo stato tensionale nel terreno, è interessante notare come la realizzazione dei tegoli di calcestruzzo spruzzato prima dello scavo, possibile grazie alla tecnica del pretaglio, contribuisca in maniera sensibile a creare un "effetto arco" al contorno della zona da scavare: il terreno circostante il cavo non appare infatti molto disturbato dallo scavo praticato. Si notano solo alcune plasticizzazioni locali in corrispondenza della base d'appoggio del guscio di calcestruzzo spruzzato sulla superficie inferiore dello scavo. Quanto allo stato deformativo, si nota chiaramente la tendenza al rifluimento del terreno nella parte inferiore dello scavo. Tutto questo pone in evidenza l'importanza di assicurare un'adeguata fondazione ai tegoli di pretaglio, per evitare punzonamenti del



terreno che limiterebbero drasticamente l'efficacia del sistema.

Nel comportamento del manufatto, i tegoli di calcestruzzo spruzzato risultano gradualmente caricati man mano che il fronte si allontana dalla sezione di calcolo. Localmente tensioni di trazione elevate potrebbero causare l'apertura di fessurazioni nel piedritto, soprattutto all'attacco con l'arco rovescio. Il rivestimento definitivo risulta sollecitato da sforzi massimi mai superiori ai valori ammissibili.

Sulla direttissima Firenze—Roma

La tratta compresa fra Figline Valdarno e Arezzo Sud fa parte del bacino del Valdarno Superiore, localizzato sul versante tirrenico dell'Appennino Settentrionale, che rappresenta il colamento, da parte di sedimenti lacustri e fluvio-lacustri, della depressione morfologica e strutturale delimitata dalle due dorsali dei Monti del Chianti Meridionale e del Pratomagno. Questa dinamica di formazione ha fatto sì che l'area sia caratterizzata da sabbie limose e limi sabbiosi,

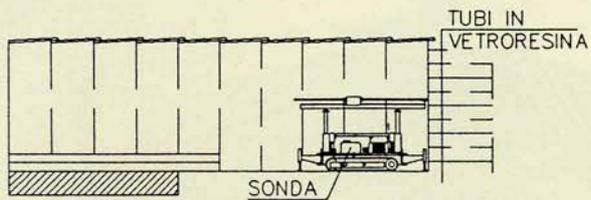
intercalati da livelli argillo-limosi contenenti lenti e livelli sabbiosi saturi d'acqua.

In fase conoscitiva sono state eseguite sia indagini superficiali sia indagini profonde. In laboratorio si sono ricavati i parametri di resistenza al taglio del terreno e di estrusione del nucleo.

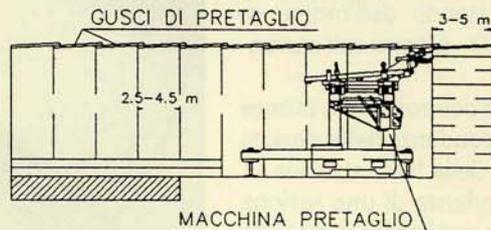
In fase di diagnosi lo studio con le linee caratteristiche ha evidenziato deformazioni inaccettabili per le doti di resistenza e deformabilità del nucleo di terreno al fronte, facendo prevedere un comportamento instabile anche con basse coperture.

In fase di terapia è apparso quindi necessario eseguire l'avanzamento sotto la protezione di sistemi di precontenimento e preconsolidamento del cavo sistemati, lanciati in avanzamento rispetto al fronte di scavo, con un'impostazione analoga a quella del caso precedente (linea FS Sibari—Cosenza). In più, dovendosi contenere deformazioni più elevate rispetto al caso precedente, si è scelto di integrare l'intervento di preconsolidamento al contorno del cavo con l'esecuzione di un preconsolidamento del terreno al nucleo del fronte di scavo.

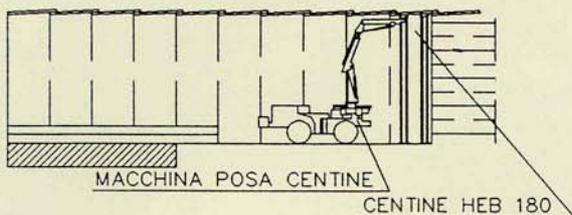
FASE 1 - PRECONSOLIDAMENTO DEL NUCLEO



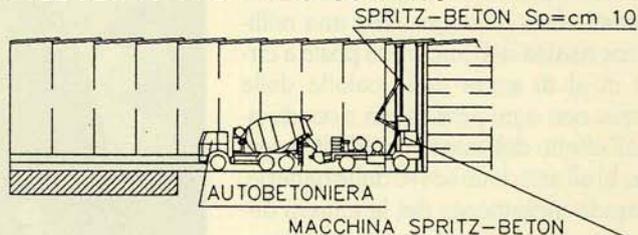
FASE 2 - ESECUZIONE PRETAGLIO



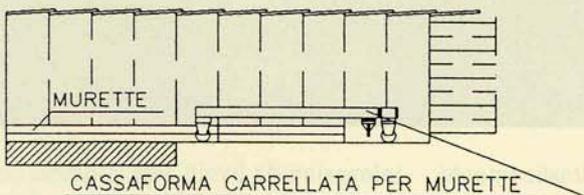
FASE 3 - POSA DELLE CENTINE SULL'ULTIMO PRETAGLIO SCAVATO



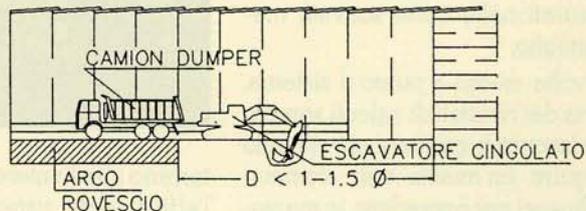
FASE 4 - ESECUZIONE SPRITZ-BETON SULL'ULTIMO PRETAGLIO SCAVATO



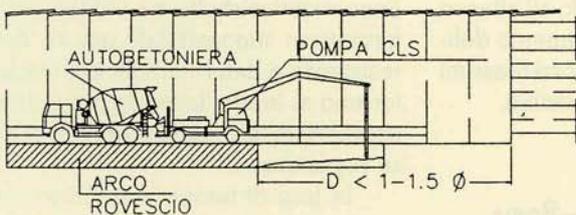
FASE 5 - ESECUZIONE MURETTE



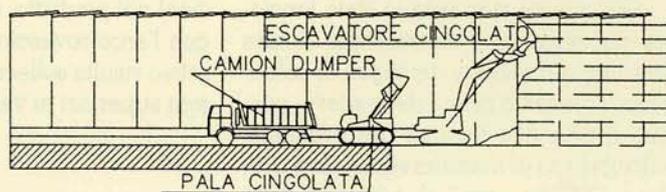
FASE 6 - SCAVO ARCO ROVESCIO



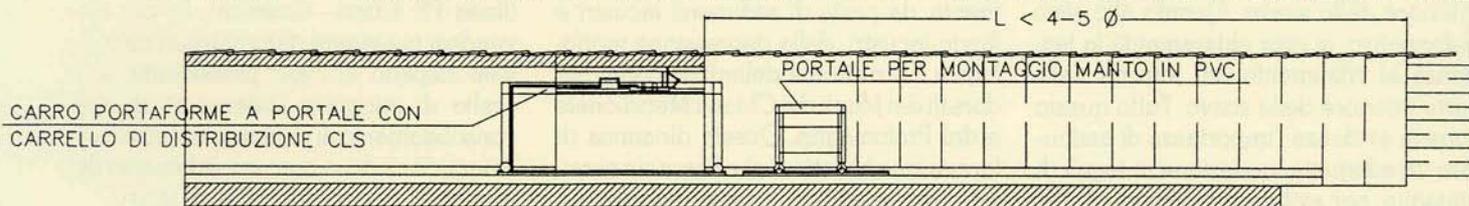
FASE 7 - GETTO ARCO ROVESCIO



FASE 8 - SCAVO DI AVANZAMENTO (IL CICLO DI SCAVO RIPRENDE DALLA FASE 1)



FASE 9 - POSA IN OPERA IMPERMEABILIZZAZIONE IN PVC ED ESECUZIONE RIVESTIMENTO FINALE



In pratica gli interventi sono consistiti in: drenaggi in avanzamento; pretaglio meccanico sul contorno di scavo e tubi di vetroresina iniettati sul nucleo di terreno al fronte (nel caso di materiali dotati di coesione); *jet grouting* sul contorno di scavo e tubi di vetroresina iniettati sul nucleo di terreno al fronte (nel caso di materiali incoerenti).

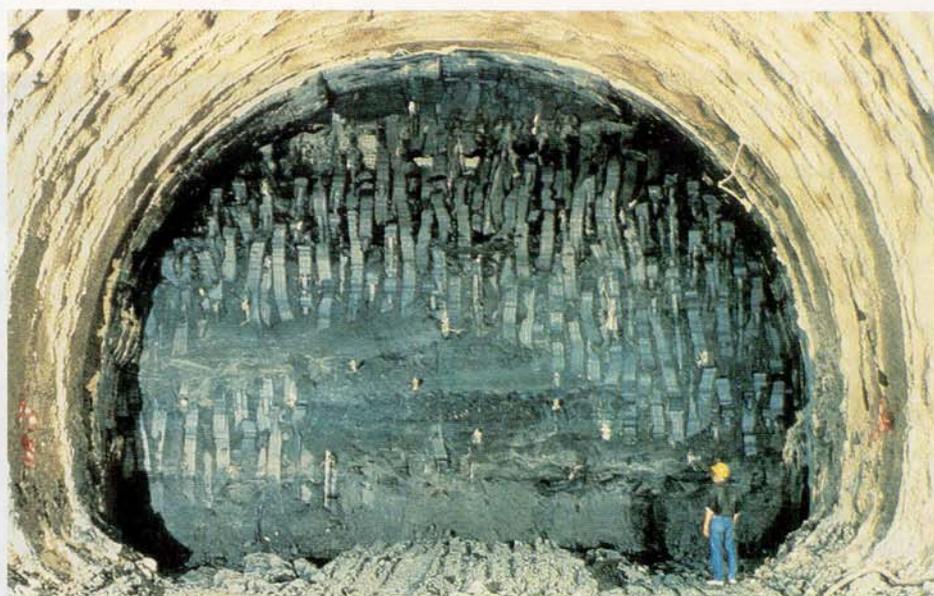
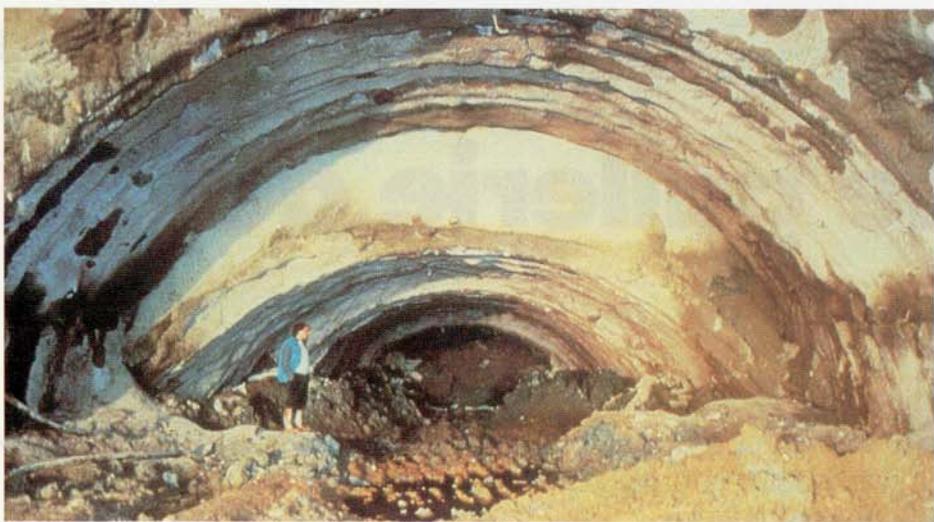
Per dimensionare l'intervento è stato necessario valutare l'effetto sul terreno, in termini di aumento di resistenza, dei tubi di vetroresina. Si sono quindi preparati degli abachi, in cui la resistenza del nucleo di terreno al fronte è funzione delle caratteristiche meccaniche intrinseche del terreno (coesione ed angolo d'attrito) e della densità del preconsolidamento (numero di tubi per metro quadrato).

In fase di verifica in corso d'opera si è osservato che i primi fenomeni d'instabilità del fronte di scavo avvenivano per valori di copertura più ridotti di quelli previsti. Questo fatto è riconducibile alla presenza d'acqua. Pertanto, ove erano presenti intercalazioni sabbiose sature, già per coperture minori di 30 m è stato necessario rinforzare il nucleo di terreno al fronte. Durante l'interpretazione dei risultati delle prove di estrusione è quindi necessario valutare in che modo un incremento, anche minimo, del contenuto d'acqua nel terreno può far variare il coefficiente di stabilità all'estrusione. L'insieme delle misure eseguite ha fornito qualche interessante risultato: l'innesco dei fenomeni a monte del fronte di scavo, ad interventi di preconsolidamento realizzati, è limitato ad una porzione d'ammasso pari circa metà diametro e la completa stabilizzazione del cavo avviene entro una distanza dal fronte pari a due diametri.

L'effetto del preconsolidamento del nucleo di terreno al fronte d'avanzamento è stato studiato anche mediante l'elaboratore elettronico, utilizzando metodi numerici in campo non lineare. L'analisi dei risultati ottenuti suggerisce l'opportunità di chiodare il nucleo secondo direzioni il più possibile attraversate dalle linee di scorrimento, in modo da sfruttare al massimo, compatibilmente con le esigenze operative, le caratteristiche di resistenza al taglio dei tubi di vetroresina.

Conclusioni

A tutt'oggi si sono scavati con i sistemi sopra descritti circa 30.000 metri di galleria, nei tempi programmati e in piena



in alto
Collasso della volta di una galleria della Direttissima Firenze-Roma, poco dopo lo scavo eseguito con metodo tradizionale a mezza sezione

sotto
Fronte d'avanzamento della medesima galleria, in terreno argilloso, scavata a piena sezione previo consolidamento del nucleo mediante chiodi tubolari di vetroresina (foto Rocksoil).

nella pagina opposta
Fasi di scavo a piena sezione di una galleria col metodo del pretaglio.

sicurezza operativa, malgrado la natura dei terreni attraversati, notoriamente difficile. Questo è stato possibile da un lato grazie all'efficienza del pretaglio meccanico, quale sistema di precontenimento del cavo, e del preconsolidamento del nucleo d'avanzamento mediante chiodi di vetroresina, dall'altro lato grazie alla correttezza dell'impostazione progettisti-

ca e alla buona organizzazione delle lavorazioni in sotterraneo, tese ad ottimizzare il più possibile le operazioni al fronte.

Circa le produzioni registrate, è rimarchevole la costanza degli avanzamenti giornalieri con valori medi dell'ordine dei due metri al giorno. Le buone produzioni raggiunte in rapporto alle caratteristiche geomeccaniche del terreno e la suddetta regolarità dimostrano che operando in questo modo si riesce ad industrializzare lo scavo di avanzamento anche entro i terreni mobili, come non si era mai riusciti prima con i sistemi di stabilizzazione tradizionali.

Il sistema appare suscettibile di sviluppi interessanti anche per quanto riguarda la sua applicabilità su gallerie di grande luce. A questo proposito è stata studiata la sua applicazione ad una galleria di stazione della metropolitana di Roma, di circa 18 m di luce e di prossima realizzazione. □