

ASPETTI PROGETTUALI E COSTRUTTIVI DELLA GALLERIA "VASTO"

Prof. Ing. Pietro Lunardi, Milano

Dott. Ing. Alessandro Focaracci, Rocksoil S.p.A., Milano

Inquadramento geologico

Il tracciato della galleria si sviluppa nel sottosuolo del rilievo collinare che ospita l'abitato di Vasto.

Dal punto di vista geologico (fig. 1), detto rilievo risulta costituito, nella parte basale e mediana, da un complesso di terreni a prevalente costituzione limo-argillosa, di colore grigio, stratificati, con sottili intercalazioni sabbiose e, nella parte sommitale, da un banco di conglomerati, più o meno cementati, al quale è sovrapposto un orizzonte di terreni sabbioso-limosi di colore bruno giallastro.

La galleria si sviluppa interamente entro la formazione argillosa di base ad eccezione dei tratti iniziali presso gli imbocchi.

In particolare, all'imbocco Nord si evi-

denza la seguente successione stratigrafica dall'alto verso il basso: sabbie e sabbie limose (spessore circa 8-10 m), banco di conglomerati (circa 6 m), substrato argilloso. Il tracciato della galleria, attraversando per le prime decine di metri i conglomerati sommitali, intercetta successivamente la superficie di contatto tra il banco conglomeratico e la formazione argillosa di base a quota progressivamente crescente verso monte.

All'imbocco Sud, invece, i terreni da attraversare si presentano assai eterogenei, con forte presenza di lenti sabbioso-limose. Il versante è contraddistinto da evidenti sintomatologie di dissesto gravitativo di natura profonda. I sondaggi ed i rilievi inclinometrici eseguiti in asse tracciato collocano la superficie di scivolamento a circa 50 m

di profondità. Si tratta del margine meridionale di una antica frana, attualmente in fase quiescente ed oggetto, nel tempo, di numerosi studi ed interventi di stabilizzazione. Inoltre, sempre nei pressi dell'imbocco Sud, è presente un edificio residenziale in muratura, da sottopassare con soli otto metri di copertura a circa 30 m dall'imbocco in naturale. Dal punto di vista idrogeologico, l'intero tracciato in galleria è sotto falda; di conseguenza, pur essendo la permeabilità delle formazioni attraversate estremamente ridotta, la presenza di intercalazioni e lenti sabbiose fa prevedere la possibilità di venute d'acqua anche consistenti.

Breve storia dello scavo

Considerata la delicatezza della situazione rilevata all'imbocco Sud (ubicato su un versante sede di un'antica frana ed in presenza di un edificio da sottopassare con pochi metri di copertura), si preferì iniziare i lavori di scavo dall'imbocco Nord. Questi iniziati nel 1984, si sono protratti fino all'aprile 1990, quando in seguito a ripetuti seri dissesti (fig. 2), fu evidente la necessità di una pausa di riflessione, per ristudiare il progetto e mettere a punto

interventi di stabilizzazione diversi e più adatti al tipo di terreno in gioco.

L'avanzamento aveva cominciato a presentare i primi importanti problemi d'instabilità appena penetrati nel substrato argilloso. Il progetto originario prevedeva lo scavo a mezza sezione, subito protetto con un rivestimento provvisorio costituito da spritz-beton, centine e rete elettrosaldata. Il rivestimento definitivo in calcestruzzo armato, di un metro di spessore, veniva gettato a stretto ridosso del fronte d'avanzamento, sempre in presenza

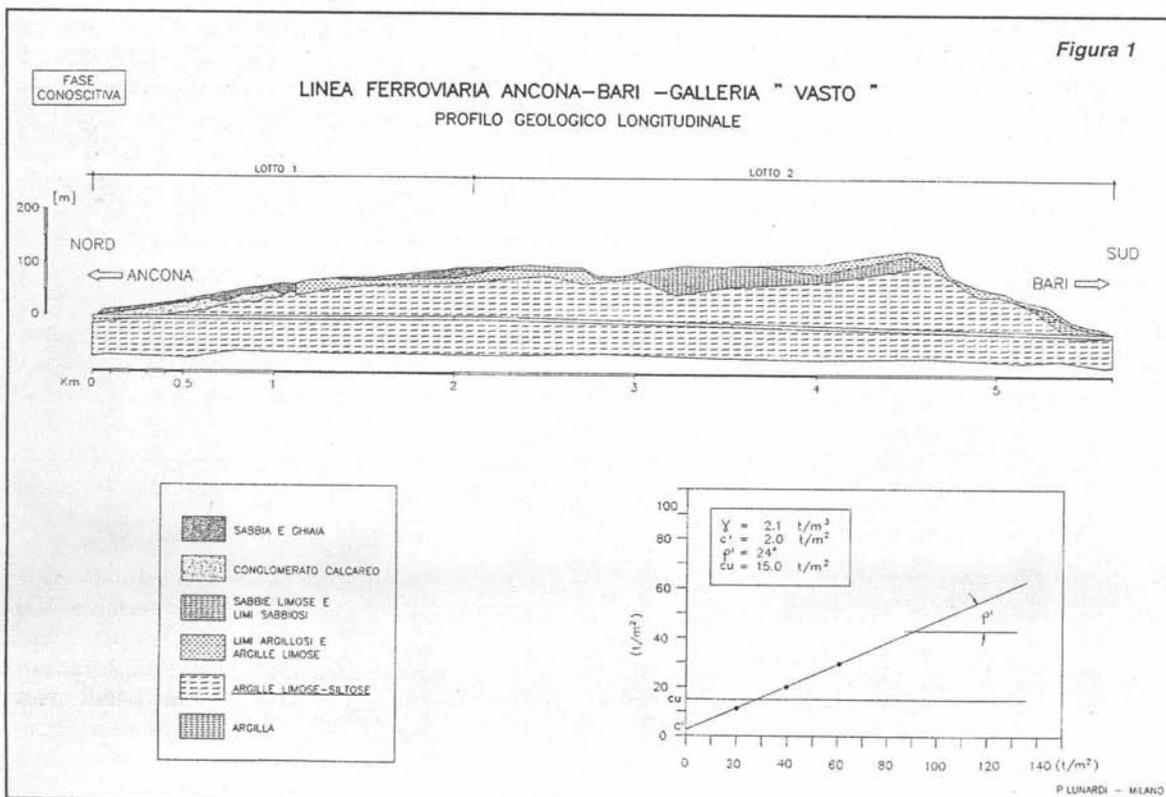
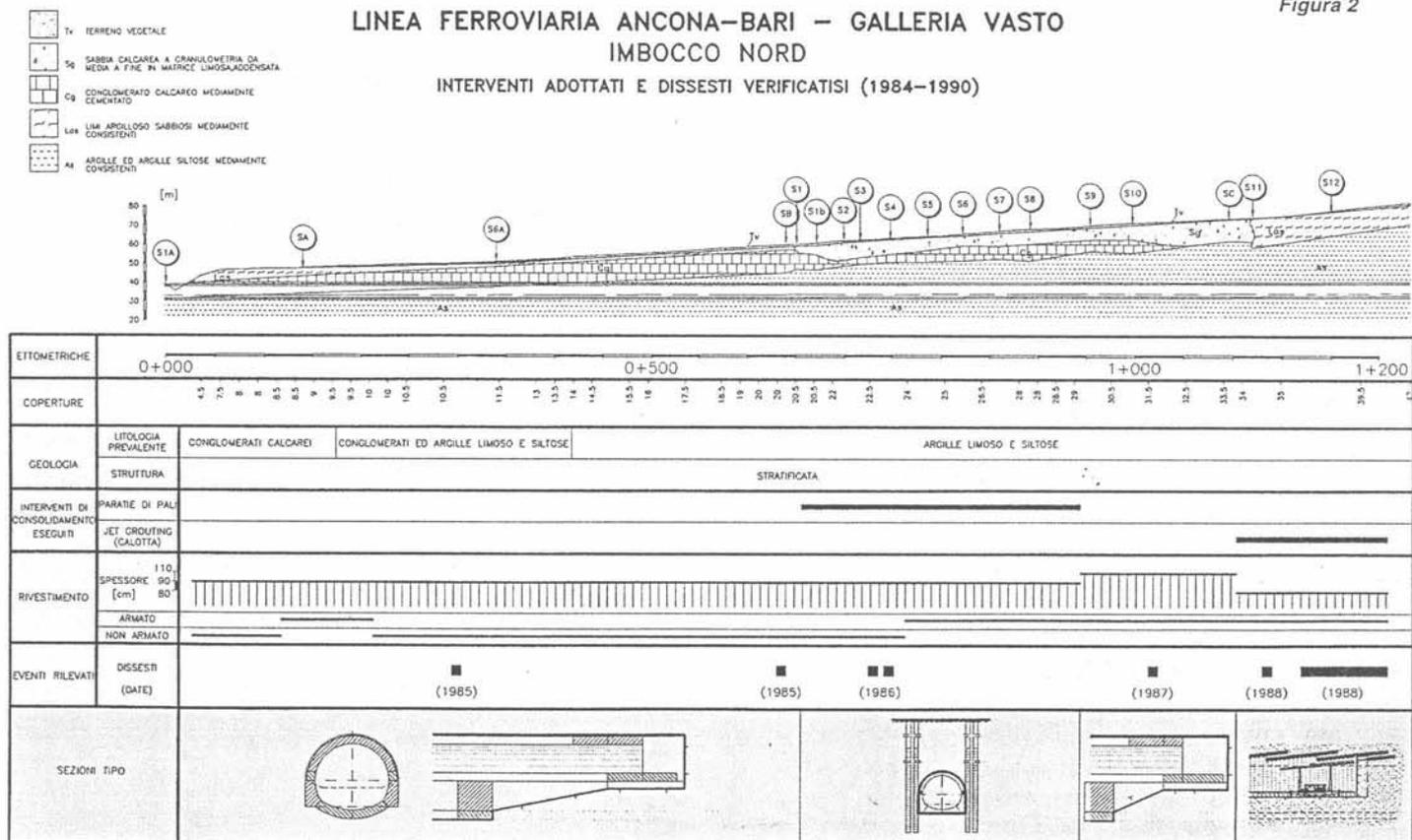


Figura 1

LINEA FERROVIARIA ANCONA-BARI - GALLERIA VASTO
IMBOCCO NORD
INTERVENTI ADOTTATI E DISSESTI VERIFICATISI (1984-1990)



P. LUNARDI - MILANO

di nucleo. I piedritti della galleria venivano gettati successivamente per sottomurazione ed il getto dell'arco rovescio completava l'intervento. Il primo importante dissesto si manifestò in seguito al cedimento dei terreni di appoggio delle centine, nonostante che il rivestimento definitivo della mezza sezione si trovasse a soli sei metri dal fronte. Si produceva, di conseguenza, un rilascio in calotta, nel tratto non rivestito, con rifluimento di materiale in galleria. Seguiva il dissesto generale del rivestimento provvisorio e lo sfornellamento dello strato argilloso sino al banco conglomeratico superiore che, provvidenzialmente, riusciva ad assorbire senza collassare le sollecitazioni dovute al peso proprio ed ai terreni sovrastanti. Riparato il danno, si cercò di proseguire l'avanzamento con una metodologia di

scavo differente, ritenuta più cautelativa. Questa prevedeva la realizzazione, dall'esterno, in anticipo sullo scavo, di due paratie di pali disposte parallelamente ai lati della galleria. Si pensava di poter trasferire così i carichi provenienti dallo strato conglomeratico al terreno in profondità, sotto il piano di scavo. L'intervento non ebbe però il successo

atteso: da un lato le perforazioni per l'esecuzione dei pali, favorendo l'imbibizione profonda del substrato argilloso da parte della falda sovrastante, producevano indirettamente la riduzione della sua resistenza al taglio, dall'altro lato si veniva ad isolare una striscia di materiale conglomeratico che, anziché sostenere i terreni in sommità, andava a gravare esso stesso sulla

galleria, producendo fenomeni deformativi di notevole entità. Dopo circa 250 metri scavati con questo sistema tra notevoli difficoltà, questi arrivarono ad interessare persino il rivestimento definitivo, che registrò abbassamenti fino a 70 cm. Fu allora deciso di abbandonare tale modo di procedere e di studiare ancora una volta un diverso schema d'attacco. Il nuovo schema messo a punto prevedeva il ricorso al nuovo sistema di avvanza-

Foto 1



mento mediante jet-grouting in orizzontale, che si sapeva aver riscosso successo in casi analoghi. Esso consisteva nell'applicare questa tecnologia a mezza sezione. Lo scavo della mezza sezione veniva poi stabilizzato con la messa in opera delle centine e di uno strato di spritz-beton armato con rete elettrosaldata. Seguiva il getto del rivestimento definitivo, a ridosso del fronte, fino all'altezza del piano di scavo di prima fase, mentre quello dei piedritti avveniva successivamente per sottomurazione. Gli interventi indicati erano completati dallo scavo e dal getto dell'arco rovescio.

Purtroppo, il progressivo decadimento delle caratteristiche geomeccaniche del terreno, con ogni probabilità indotto dalla non corretta geometria dell'intervento e dalle modalità d'avanzamento non adeguate, davano luogo a fenomeni deformativi ingenti che, dopo circa 170 m di applicazione di questa tipologia di lavorazioni, culminarono in un evento franoso a prog. km 38+075, sotto 38 m di copertura ed a circa 1200 m dal portale Nord (foto 1).

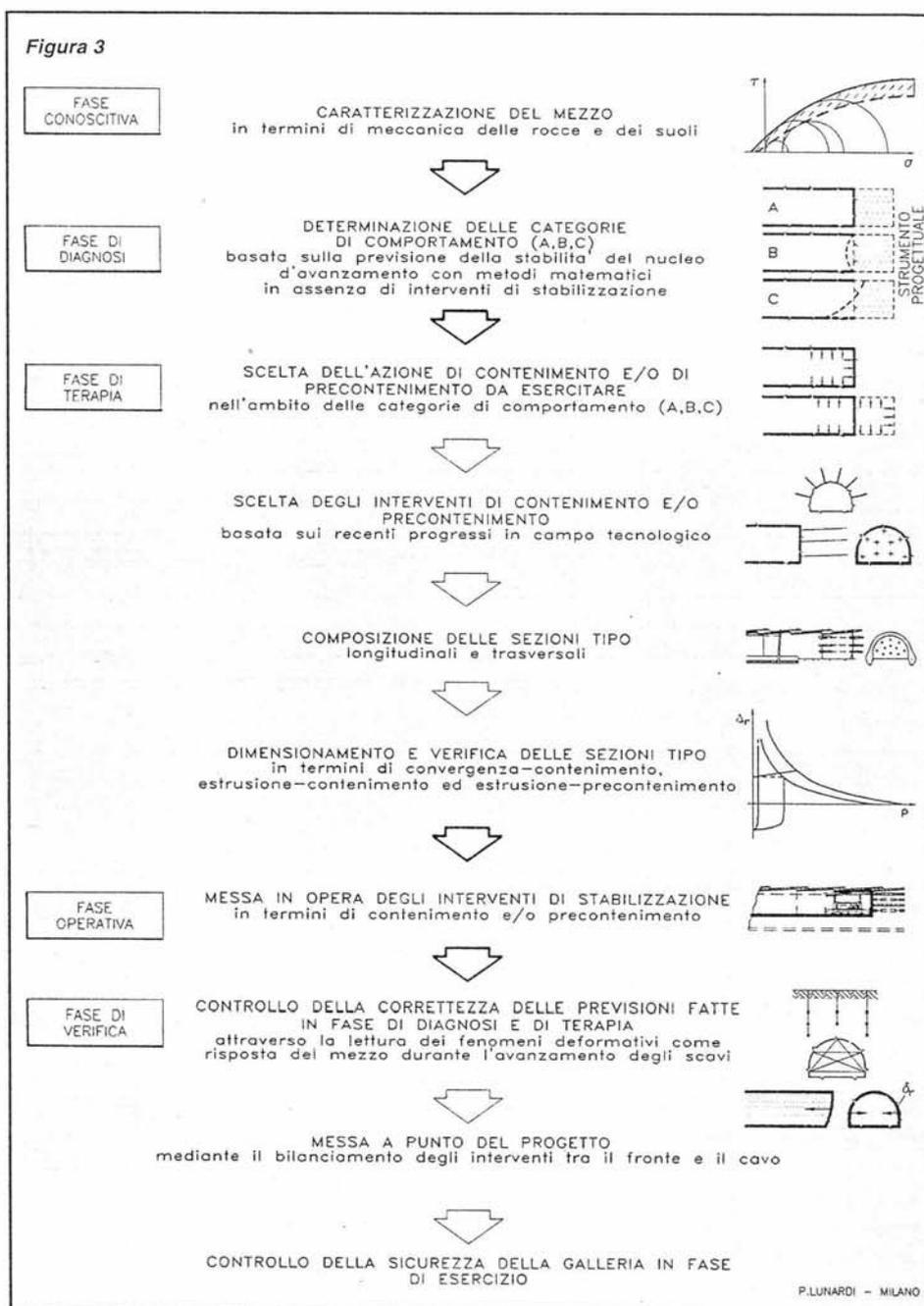
Il dissesto coinvolse il fronte e una tratta di circa 40 m a valle dello stesso, producendo nel rivestimento definitivo deformazioni di enorme entità (superiori ad 1 m), tali da rendere impossibile la prosecuzione dei lavori.

La Rocksoil S.p.A. di Milano, chiamata a questo punto per trovare una soluzione che consentisse di riprendere il lavoro interrotto e di proseguirlo sino alla completa realizzazione della galleria, affrontò il non semplice problema cambiando radicalmente l'impostazione progettuale secondo i principi dell'approccio basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli (fig. 3) [4], [5], [9], [10], [11], [12]. Qui di seguito viene esposto come si è proceduto in fase progettuale e costruttiva.

Fase conoscitiva per la galleria "Vasto"

L'approccio alla progettazione basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli prevede di iniziare lo studio di qualsiasi galleria da una fase conoscitiva, durante la quale il progettista, in relazione ai terreni interessati dalla galleria stessa,

Figura 3



procede alla caratterizzazione del mezzo in termini di meccanica delle rocce o dei suoli per compiere l'analisi degli equilibri naturali preesistenti e poter operare correttamente nella successiva fase di diagnosi.

Nel caso della galleria "Vasto", la fase conoscitiva si è svolta in due momenti. 1) In un primo momento ci si dedicò all'acquisizione ed allo studio di tutto il materiale sino ad allora prodotto riguardo alle indagini geognostiche ed alle prove di resistenza e deformabilità dei terreni interessati dai lavori di scavo.

In particolare, risultava indagata in maniera approfondita soltanto la formazione argillosa di base e la campagna di laboratorio, basata esclusivamente su campioni indisturbati prelevati da sondaggi eseguiti dall'esterno, comprendeva:

- la determinazione delle caratteristiche fisiche del terreno quali: granulometria, peso di volume, umidità naturale, indici e limiti caratteristici (di liquidità, plasticità, ecc.);
- l'esecuzione di prove di resistenza (taglio diretto e compressione triassiale) CU e UU;

visione del tracciato da realizzare in sotterraneo in tratte a comportamento deformativo omogeneo, nell'ambito delle tre categorie fondamentali A, B e C previste dall'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli (fig. 5) Lo studio di diagnosi è quindi proseguito con l'analisi dei meccanismi di rottura e dei cinatismi d'instabilità che si sarebbero prodotti in seguito all'evolvere dei fenomeni deformativi, per concludersi con la valutazione dell'estensione delle zone instabili e dell'entità dei carichi mobilitati.

3.1 Valutazione della categoria di comportamento

A questo scopo si è idealmente suddiviso il tracciato in una serie di tratte in base all'uniformità geologico-geotecnica dei terreni interessati ed all'importanza delle coperture sulla galleria. Per ognuna di queste tratte e per le diverse possibili condizioni di copertura, la valutazione della categoria di comportamento è stata condotta attraverso due diverse procedure (fig. 6), entrambe valide per bassi, medi ed elevati stati tensionali: la prima, più immediata, fa riferimento alla teoria delle linee caratteristiche (calcolate a seconda della situazione con metodi analitici o per via numerica), l'altra, più laboriosa, che fa riferimento alle prove di estrusione in cella triassiale, già illustrate nel paragrafo relativo alla fase conoscitiva.

a) In particolare, per quanto riguarda il metodo delle linee caratteristiche, si sono tracciate, per ogni situazione da esaminare, le curve di convergenza-confinamento:

- del nucleo d'avanzamento;
 - della cavità nella sezione in corrispondenza al fronte d'avanzamento;
 - della cavità in una sezione lontana dalla zona del fronte e comunque al di fuori del suo raggio d'azione statica.
- Si è quindi valutato ogni volta, sulla base dei diagrammi ottenuti, se le deformazioni in corrispondenza del nucleo di terreno al fronte d'avanzamento sarebbero avvenute in campo elastico (comportamento a fronte stabile - categoria A), elastoplastico (comportamento a fronte stabile a breve termine - categoria B) o di rottura (comportamento a fronte instabile - categoria C).

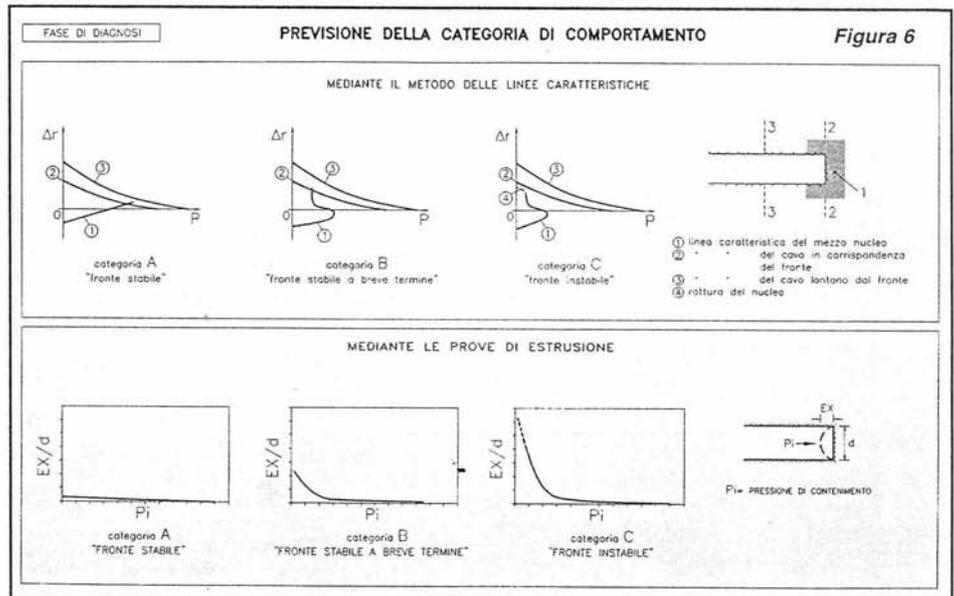


Figura 6

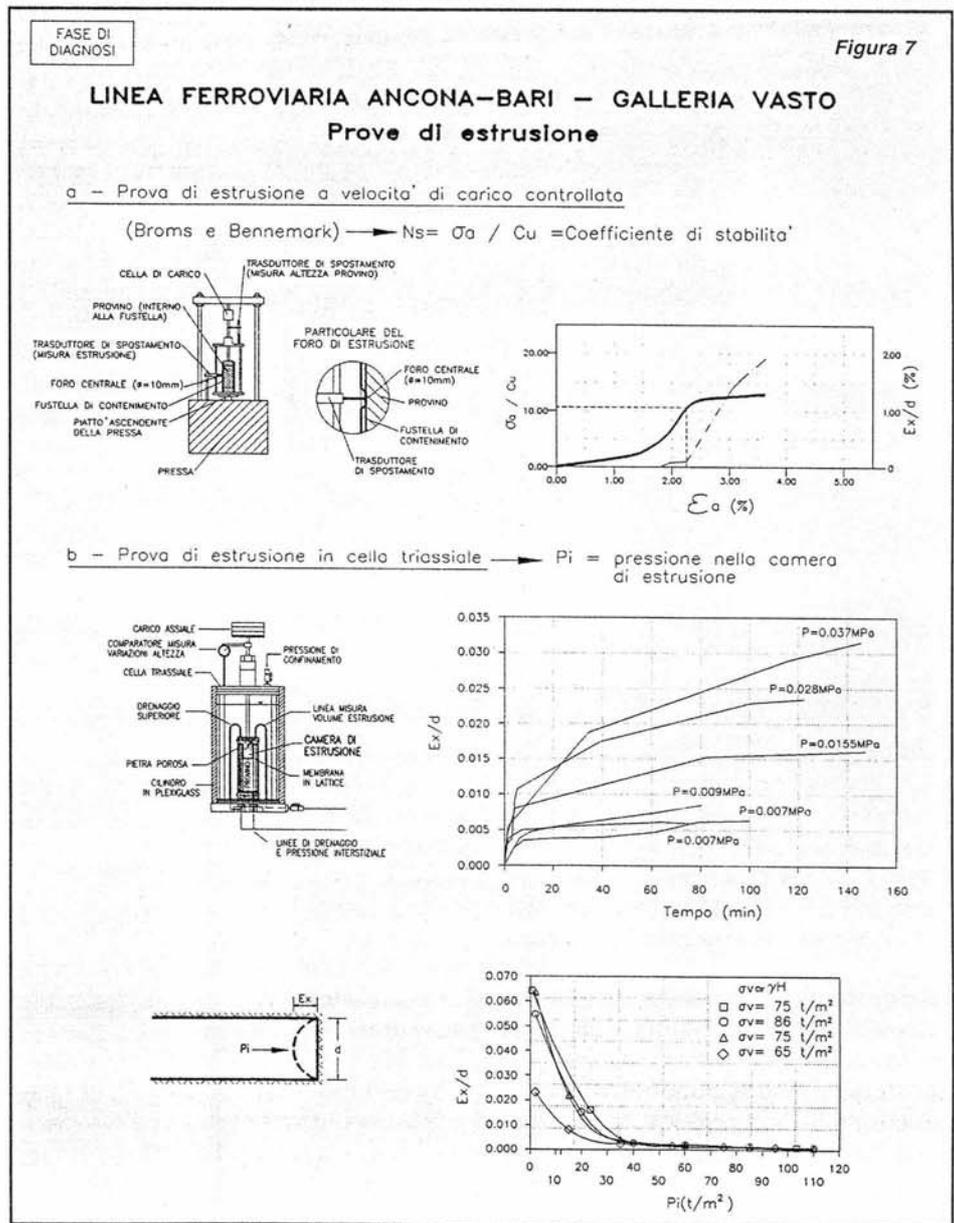


Figura 7

Infatti come illustrato nella fig. 6, se la linea caratteristica del nucleo incontra quella della cavità relativa al fronte conservando condizioni di elasticità, si può prevedere che la futura galleria avrà un comportamento a **fronte stabile** (categoria A).

Se la linea caratteristica del nucleo incontra quella della cavità relativa al fronte in condizioni di elastoplasticità, avremo condizioni di **fronte stabile a breve termine** (categoria B).

Se la linea caratteristica del nucleo non incontra quella della cavità relativa al fronte perchè deformandosi in elastoplasticità giunge a rottura, avremo condizioni di **fronte instabile** (categoria C).

b) Analogamente a quanto fatto con le linee caratteristiche, il comportamento della galleria è stato valutato, nelle diverse situazioni di consolidazione naturale del terreno in funzione delle coperture, attraverso l'interpretazione delle prove di estrusione in cella triassiale (fig. 7).

In particolare, si sono considerate le curve di estrusione in funzione della pressione di camera P_v , dal cui andamento è possibile prevedere l'importanza del fenomeno estrusivo,

quindi le condizioni di stabilità del sistema fronte di scavo-nucleo d'avanzamento sulla base del criterio illustrato in fig. 6.

Nel caso della galleria "Vasto" entrambe le procedure di analisi hanno segnalato, ad esclusione di brevi tratti vicino agli imbocchi, un comportamento a fronte instabile, evidenziando importanti movimenti estrusivi e, di conseguenza, anche di preconvergenza e convergenza (oltre 100 cm radiali). Si tratta di valori tali da produrre gravi manifestazioni d'instabilità, quali il crollo del fronte e di conseguenza il collasso della cavità. Queste previsioni si accordano perfettamente col comportamento deformativo mostrato dalla galleria all'imbocco Nord prima dell'arresto dell'avanzamento.

Meccanismi di rottura

Lo studio dei meccanismi di rottura che verosimilmente avrebbero interessato il sistema fronte di scavo-nucleo d'avanzamento della galleria è stato condotto, a seconda degli stati tensionali in gioco, attraverso analisi numeriche agli elementi finiti o secondo l'approccio suggerito da Tamez [2].

In particolare, la simulazione numerica delle prove di estrusione in cella triassiale con modelli FEM assialsimmetrici ha permesso di evidenziare un comportamento deformativo del sistema fronte di scavo-nucleo d'avanza-

Estensione delle zone instabili ed entità dei carichi mobilitati

La simulazione numerica delle prove di estrusione in cella triassiale ha permesso di appurare che il fenomeno estrusivo, se non adeguatamente contenuto, si sarebbe esteso entro l'ammasso per circa un diametro di scavo dal fronte d'avanzamento. Per quanto riguarda i carichi mobilitati a seguito delle operazioni di scavo, la forte entità degli stati deformativi calcolati in campo elastoplastico faceva deporre per lo sviluppo di anelli di terreno plastizzato al contorno del cavo con conseguenti carichi

uniformemente distribuiti al contorno dello stesso. A questo modello prevalente si sarebbero potuti sovrapporre, nelle tratte più corticali, ed a più alta presenza di sabbie e di limi, solidi di carico localizzati soprattutto sulla calotta della galleria.

Prima di terminare con la fase di diagnosi, è opportuno sottolineare che, specialmente quando è necessario considerare attentamente l'effetto del-

la gravità, è utile avvalersi anche di prove di estrusione in centrifuga. Esse consentono: da un lato di considerare l'effetto delle pressioni geostatiche agenti al contorno dello scavo anche nel caso di coperture medio-alte, dall'altro lato di seguire accuratamente, attraverso trasduttori di pressione e di spostamento inseriti appropriatamente all'interno del modello, l'andamento nel tempo del fenomeno estrusivo. Una serie di prove di estrusione in centrifuga è stata eseguita per la realizzazione della galleria San Vitale sulla linea ferroviaria Caserta-Foggia. Il lettore interessato può trovarne una descrizione nella memoria [8] riportata in bibliografia.

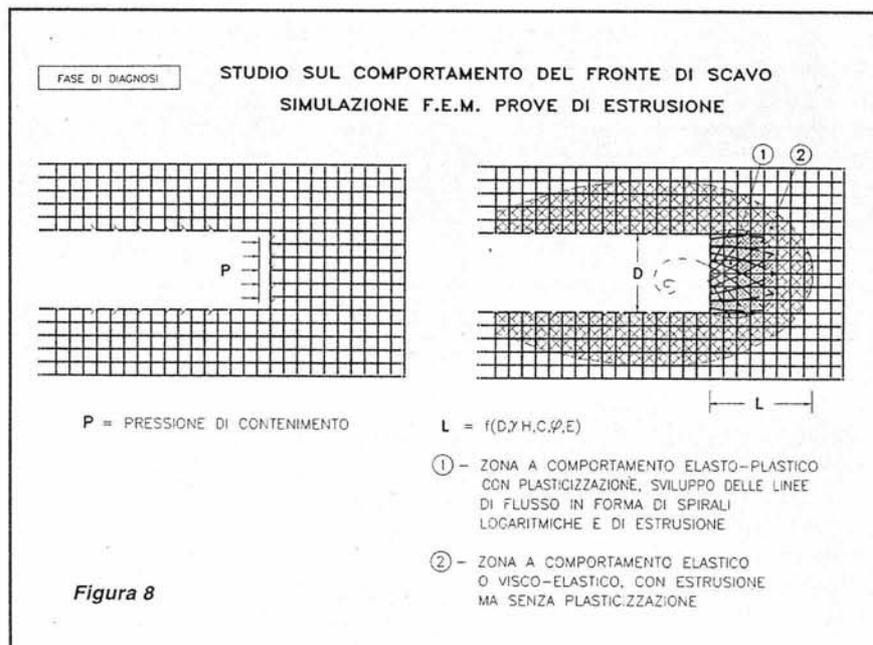


Figura 8

mento (fig. 8):

- di tipo elastoplastico, anche sotto coperture relativamente modeste, per il terreno più prossimo alla parete esposta, con plasticizzazioni diffuse, immediatamente a monte del fronte stesso, lungo linee di scorrimento a forma di spirale logaritmica (zona 1);
 - di tipo elastico e viscoelastico per il terreno del nucleo d'avanzamento più interno all'ammasso (zona 2).
- Infatti, sebbene le deformazioni evidenziate dal calcolo e dalle prove di laboratorio permangano di notevole entità anche ad una certa distanza dal fronte (estrusioni pari al 10% del diametro di scavo), non si sono evidenziate rotture o plasticizzazioni in quelle parti del nucleo d'avanzamento più interne all'ammasso.

Fase di terapia per la galleria "Vasto"

Sulla base delle previsioni fatte in fase di diagnosi, si è quindi operata la scelta del tipo di azione da esercitare (precontenimento o semplice contenimento) e degli interventi necessari, nell'ambito delle tre categorie di comportamento A, B, C, per ottenere la completa stabilizzazione della galleria.

Per quanto riguarda il tunnel ancora da scavare (compreso l'imbocco Sud attaccato in frana), considerate le caratteristiche dei terreni da attraversare ed il risultato dello studio di diagnosi, che evidenziava un comportamento a fronte instabile per tutta la lunghezza del tracciato sotterraneo (categoria C: sollecitazioni in campo di rottura, effetto arco nullo, manifestazioni d'instabilità tipiche: crollo del fronte, collasso della cavità), si sceglieva di stabilizzare la galleria con

azioni di precontenimento del cavo, intervenendo in maniera decisa a monte del fronte d'avanzamento per garantire la formazione di un effetto arco artificiale in anticipo sul fronte stesso. In particolare, si decideva di avanzare a piena sezione previa adozione di interventi conservativi misti, che realizzano l'azione di precontenimento agendo sia al contorno del nucleo (azione protettiva) sia direttamente sullo stesso (azione consolidante). Si sono quindi composte tre sezioni tipo (fig. 9), da adottare in alternativa a seconda del grado di omogeneità e di consistenza dei terreni incontrati durante i lavori di scavo.

Lavorazioni comuni a tutte e tre sono il preconsolidamento del nucleo d'avanzamento mediante tubi di vetroresina, iniettati per l'intera lunghezza, e la realizzazione di drenaggi in avanzamento.

Esse si differenziano esclusivamente per il tipo di trattamento (preconsolidamento-precontenimento) da eseguire in avanzamento al contorno del cavo. Infatti, una volta conferita al nucleo d'avanzamento la rigidità necessaria affinché esso possa compiere la propria funzione di regimazione dei fenomeni deformativi, che si sviluppano a monte del fronte di scavo, rimaneva da mettere a punto l'intervento protettivo del nucleo idoneo a garantire la mobilitazione, per via artificiale, dell'effetto arco.

La scelta di tale tipo di intervento, naturalmente, è strettamente connessa alla natura ed alla consistenza acquisita del terreno da attraversare.

Nei terreni granulari o poco coesivi, caratterizzati da debole resistenza al taglio, numerose esperienze indicano come preferibile l'impiego del sistema *jet-grouting* in orizzontale per creare in

avanzamento, al contorno del cavo e del nucleo, una fascia di terreno consolidato di buone caratteristiche geomeccaniche. Questo tipo di consolidamento risulta particolarmente efficace anche in presenza di terreni decompressi ed alterati.

Contrariamente alle iniezioni tradizionali, dove la miscela permea attraverso i vuoti intergranulari lasciando quasi inalterata la disposizione dello scheletro solido del terreno, il sistema *jet-grouting* produce, all'interno del raggio d'azione del getto ad altissima pressione, un completo rimaneggiamento del terreno, che mescolandosi con la miscela iniettata, assume un nuovo assetto strutturale formando una colonna di materiale consolidato simile ad un calcestruzzo di discreta qualità. Questa sua caratteristica, di produrre un completo rimescolamento del terreno, rende questo trattamento assai effi-

cace anche in materiali eterogenei, come quelli che si trovano all'imbocco Sud della galleria in esame.

Nei terreni coesivi compatti ed omogenei, invece, la tecnologia che si è dimostrata più adatta per realizzare in avanzamento dei gusci resistenti a protezione del nucleo, idonei a garantire la mobilitazione dell'"effetto arco", è, come ormai noto, quella del pretaglio meccanico.

Affinché questa tecnologia possa essere applicata, però, come d'altra parte anche nel caso della coronella di terreno consolidato mediante *jet-grouting* suborizzontale, è necessario che sia garantita la continuità del guscio di *spritz-beton*, dal quale dipende l'inesco dell'effetto arco per via artificiale.

Questo, nel caso del pretaglio meccanico, è garantito solo nei terreni che presentano valori di coesione non drenata non inferiori a 0,02 MPa, tali cioè da assicurare la

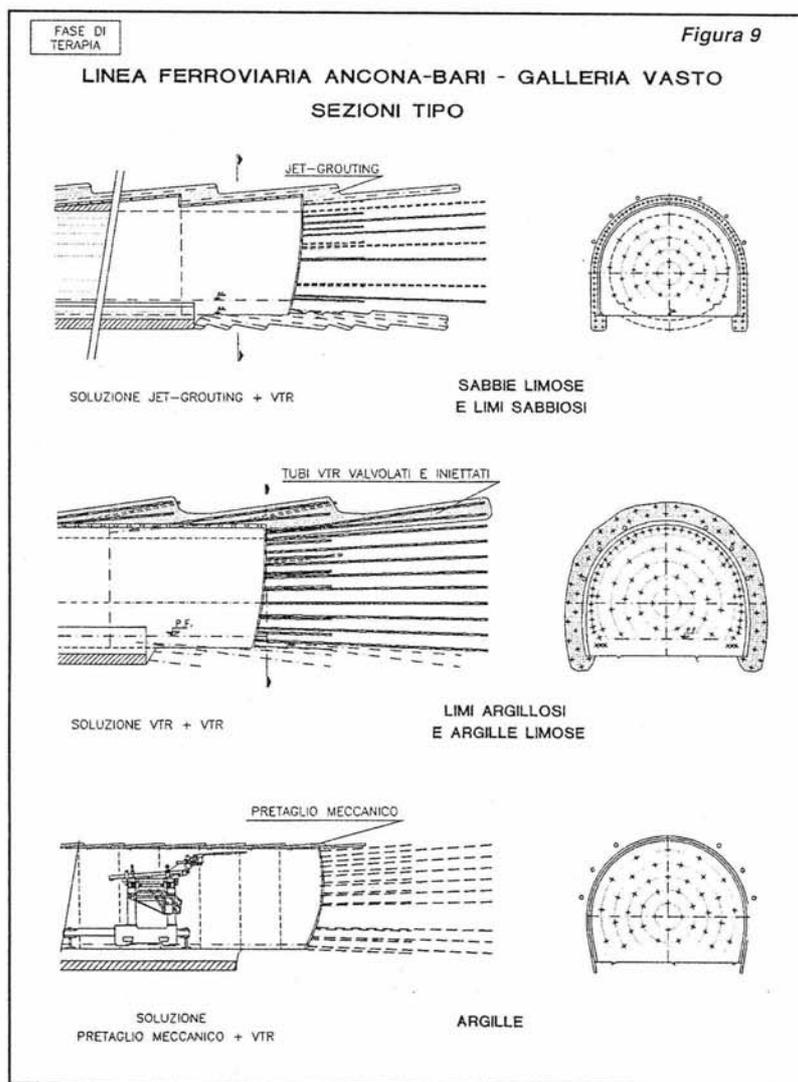
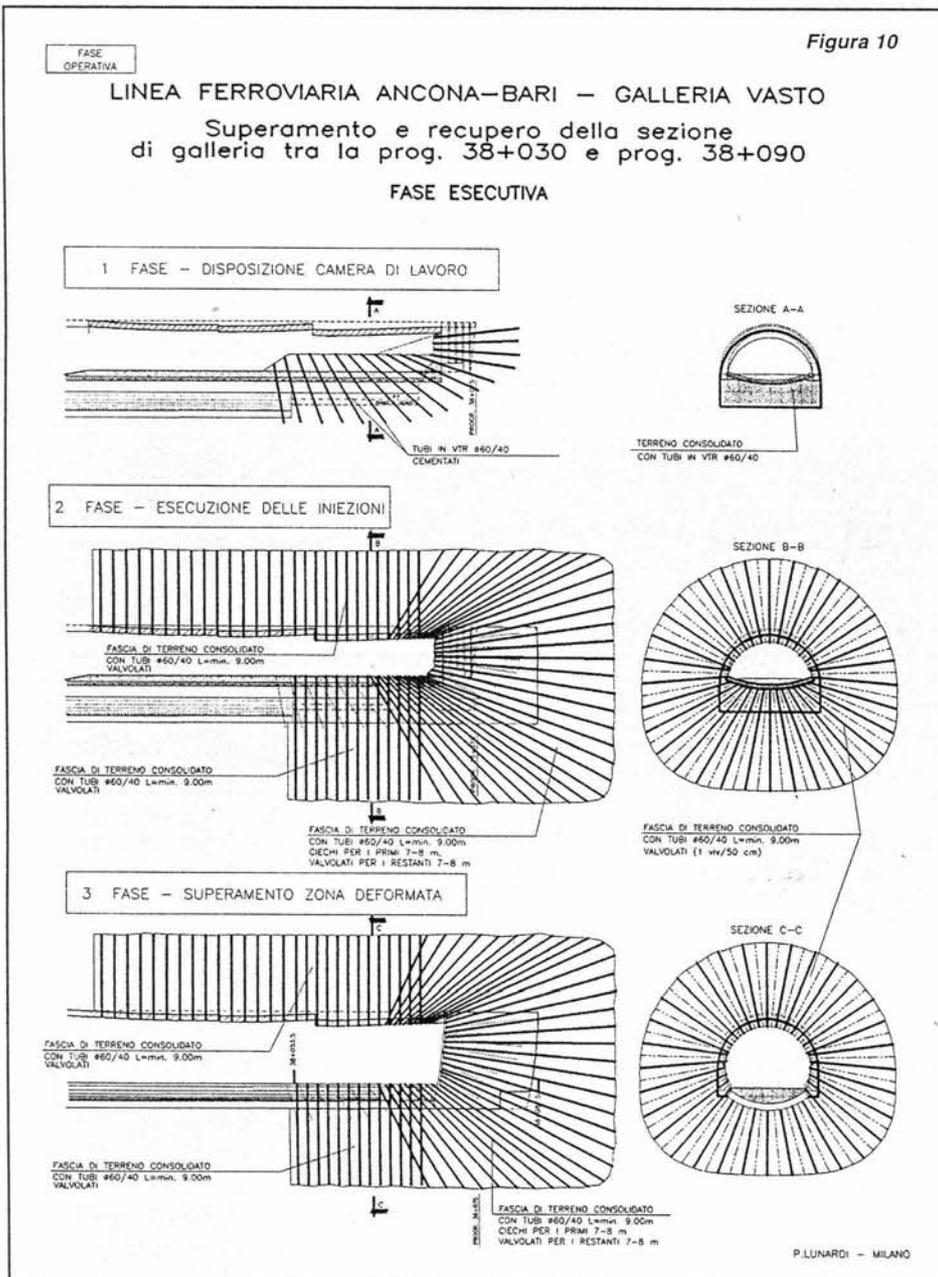


Figura 10



stabilità del pretaglio per il tempo intercorrente tra la sua apertura ed il successivo riempimento.

Nei terreni che presentano valori di resistenza al taglio e coesione non drenata tali da sconsigliare:

- da un lato, l'esecuzione del trattamento *jet-grouting* suborizzontale, perché le colonne di terreno consolidato non risulterebbero del diametro necessario per ottenere una perfetta compenetrazione, con la conseguenza che la coronella riuscirebbe discontinua;
- dall'altro lato, l'esecuzione del pretaglio meccanico, perché la non sufficiente coesione del terreno o la sua

eccessiva disomogeneità non consentirebbero la buona riuscita dei gusci di *spritz-beton*;

è possibile ottenere una fascia di terreno consolidato in avanzamento al contorno del cavo e del nucleo mediante iniezioni di *claquage* realizzate attraverso tubi di vetroresina appositamente equipaggiati.

Sulla base di queste considerazioni, si è dunque scelto di adottare:

- la sezione tipo 1 (preconsolidamento del terreno al contorno del cavo con coronelle di terreno trattato mediante *jet-grouting* suborizzontale) nella prima tratta all'imbocco Sud (circa 350 m

di galleria), dove i terreni sono piuttosto eterogenei e caratterizzati da una significativa presenza di lenti sabbioso-limose;

- la sezione tipo 2 [preconsolidamento al contorno del cavo mediante tubi di vetroresina valvolati attrezzati per l'esecuzione di iniezioni di *claquage* (anello di terreno consolidato)], nelle tratte da scavare entro i limi argillosi le cui caratteristiche sconsigliano, per le ragioni viste, l'utilizzo sia della tecnologia del *jet-grouting* suborizzontale sia di quella del pretaglio meccanico;

- la sezione tipo 3 [pretaglio meccanico al contorno del cavo (guscio di *spritz-beton* fibrorinforzato)], nelle tratte entro l'argilla di base più consistente ed omogenea.

Tutte e tre le sezioni tipo prevedono, a completamento, un intervento di contenimento di prima fase a valle del fronte di scavo costituito da centine e *spritz-beton*, chiuso con l'arco rovescio, e, successivamente, l'esecuzione del rivestimento di seconda fase in calcestruzzo. Riguardo, invece, all'intervento da progettare per il superamento ed il recupero della tratta di galleria collassata nel 1990 all'imbocco Nord, tra le progr. km. 38+030 e Km. 38+090, esso doveva soddisfare a due requisiti principali:

- garantire la massima sicurezza operativa in fase di scavo e ripristino della parte dissestata;
- assicurare un contenimento adeguato delle deformazioni al contorno dello scavo per ripristinare l'effetto arco nel terreno ed impedire ulteriori pericolose decompressioni dello stesso.

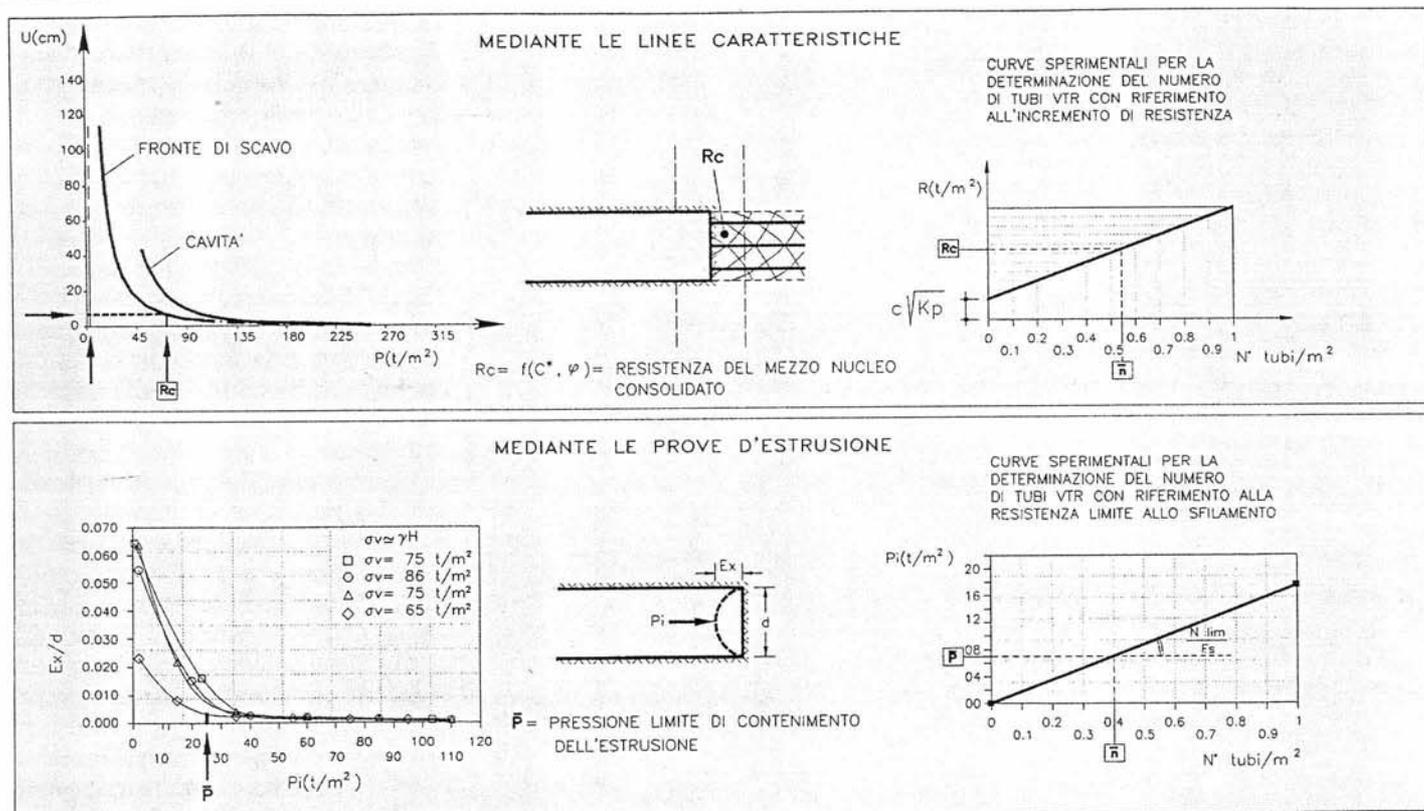
Si optava, di conseguenza, per un'energica azione di precontenimento da realizzare attraverso il consolidamento del terreno decompresso sia al contorno sia oltre il fronte della cavità collassata. L'intervento progettato è consistito nella messa in opera, sul fronte ed al contorno del cavo, di tubi di vetroresina - valvolati ed iniettati ad alta pressione con miscele cementizie - disposti secondo la geometria indicata in fig. 10, appositamente studiata per ricanalizzare il flusso delle tensioni al contorno della galleria da recuperare.

Dimensionamento e verifica delle sezioni tipo

Particolarmente interessante appare la metodologia adottata per il dimensionamento

FASE DI TERAPIA

VALUTAZIONE DELL'INTENSITA' DI CONSOLIDAMENTO DEL NUCLEO NECESSARIA PER EVITARE LA SUA INSTABILITA'



namento dell'intervento di preconsolidamento del nucleo d'avanzamento mediante tubi di vetroresina, che prevede la determinazione del numero di tubi da mettere in opera, della loro lunghezza e della geometria secondo cui disporli al fronte.

Dimensionamento del numero di tubi di vetroresina

In analogia al tipo di approccio adottato in fase di diagnosi per la previsione del comportamento del cavo, il dimensionamento del numero di tubi di vetroresina è stato condotto con due diverse procedure (fig. 11).

La prima procedura si basa sull'utilizzo del metodo delle linee caratteristiche, tenendo conto, in maniera semplificata, dell'effetto del preconsolidamento del nucleo nel calcolo della linea caratteristica corrispondente.

La resistenza del mezzo nucleo viene, cioè, modificata considerando l'incremento di resistenza al taglio dovuto all'effetto di precontenimento offerto dalla chiodatura.

La seconda procedura di dimensionamento dell'intervento di preconsolidamento del nucleo si basa, invece, sull'interpretazione delle curve di estrusione ricavate dalle prove in cella triassiale: individuata sulla curva la pressione di contenimento minima P_i necessaria per la stabilizzazione del fronte (definita come pressione di confine tra il ramo "elastico" e quello "elastoplastico" della curva di estrusione), si valuta su diagrammi sperimentali, del tipo di quello riportato nella stessa figura, il numero di tubi da mettere in opera per garantire, con il coefficiente di sicurezza desiderato, la stabilità del fronte.

La costruzione di questi diagrammi viene generalmente eseguita sulla base dei risultati di prove di resistenza a taglio-trazione dei tubi di vetroresina e di prove in situ di sfilamento degli stessi dal terreno. Entrambi gli approcci (prove di estrusione e linee caratteristiche) hanno fornito risultati tra loro confrontabili, a conferma dell'analogia concettuale che li lega.

Determinazione della lunghezza dei tubi di vetroresina

La lunghezza dei tubi in vetroresina è stata definita in funzione dei meccanismi cinematici evidenziati entro il sistema fronte di scavo-nucleo d'avanzamento dalla simulazione numerica delle prove di estrusione (tratto di tubi ad azione prevalente di taglio-trazione), nonché in base alla lunghezza d'ancoraggio necessaria per assicurare l'efficacia del singolo tubo, valutata in funzione della resistenza dello stesso allo sfilamento.

Non risulta invece possibile determinare la lunghezza dei tubi con il metodo delle linee caratteristiche.

Studio della geometria del preconsolidamento in tubi di vetroresina

L'utilizzazione di un modello ad elementi finiti tridimensionale in campo non lineare (fig. 12), nella fase finale delle valutazioni di terapia, permette, qualora si desideri eliminare le approssimazioni insite nei procedimenti di calcolo sopra descritti, di dimensiona-

Figura 12

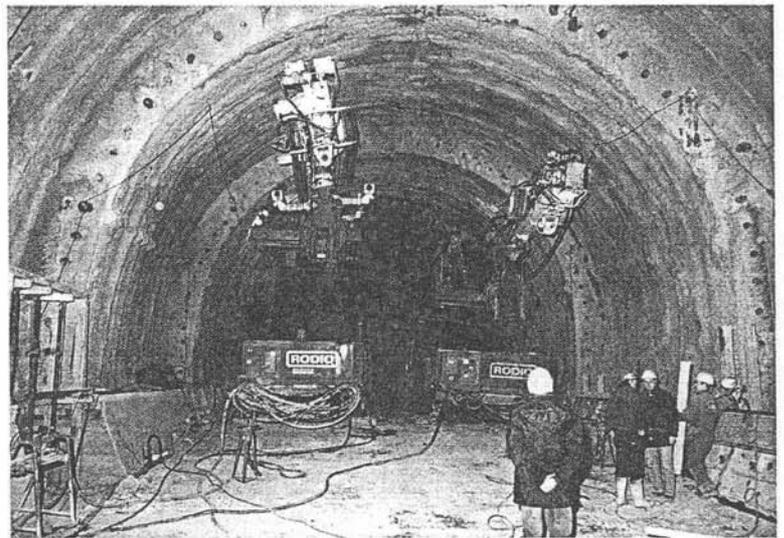
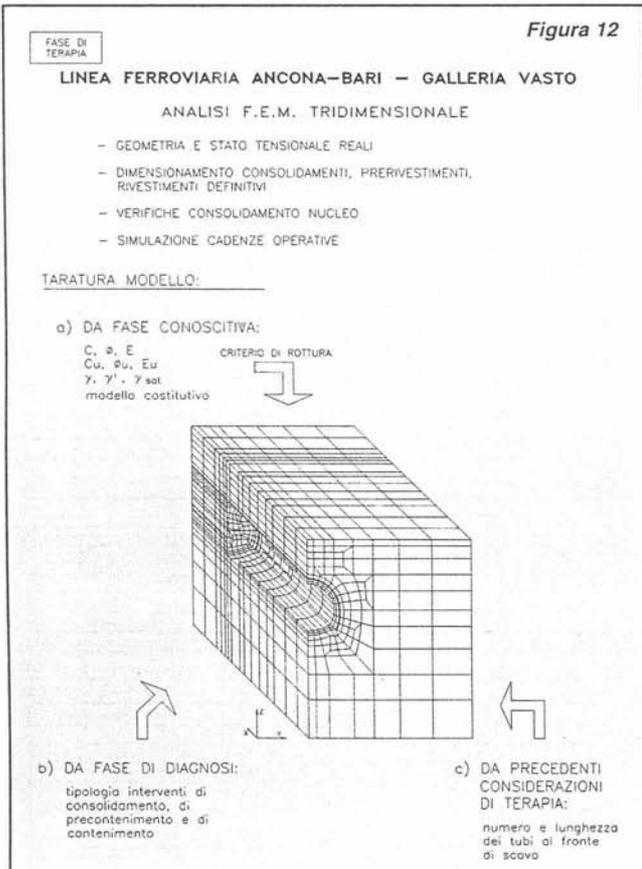


Foto 2

e lunghezza degli stessi), evidenziando le zone del fronte che più necessitano di contenimento.

Fase operativa per la galleria "Vasto"

Questo studio chiude idealmente il ciclo delle fasi della progettazione costruttiva, permettendo la simulazione accurata delle reali geometrie e delle diverse fasi costruttive nel rispetto delle cadenze operative.

La ripresa dei lavori è avvenuta nel 1992 quasi contemporaneamente sui due imbocchi: all'imbocco Nord, per ripristinare la tratta di galleria crollata, all'imbocco Sud, per iniziare l'attacco della galleria naturale.

re nel dettaglio gli interventi di consolidamento e di contenimento previsti, verificandone l'efficacia durante le diverse fasi di lavoro.

Consente, in particolare, di ottimizzare la geometria dell'intervento (distribuzione geometrica dei tubi sul fronte

ometrie e delle diverse fasi costruttive nel rispetto delle cadenze operative. Nel caso della galleria "Vasto", i risultati degli studi di diagnosi e di terapia si sono infine sintetizzati sul profilo geomeccanico della galleria riprodotto in fig. 13.

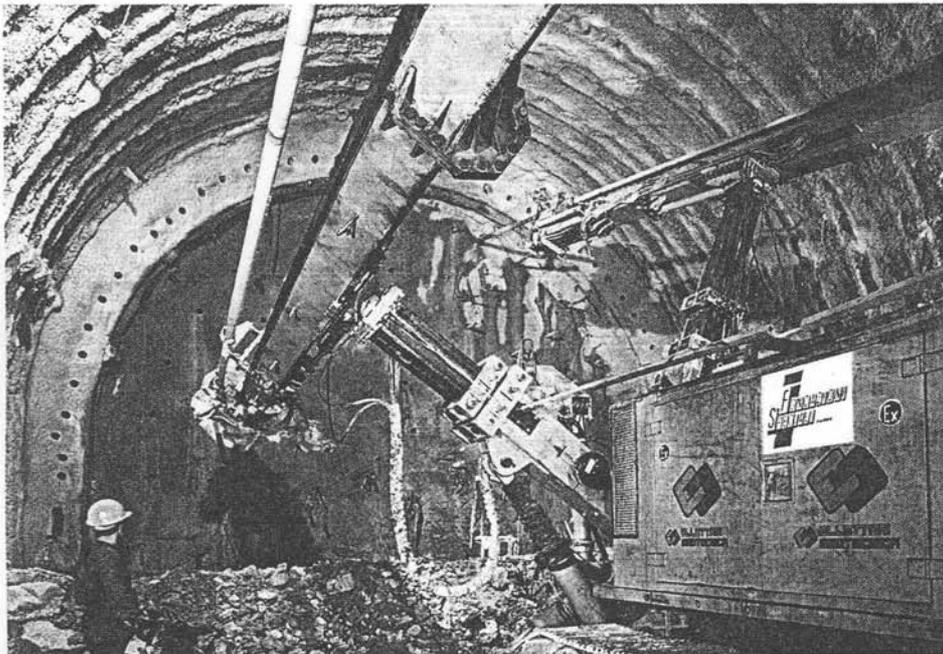
Allo stato attuale sono stati eseguiti 2500 m dall'imbocco Sud e circa 2400 m dall'imbocco Nord. La produzione media, lavorando 7 giorni/settimana è stata di circa 60 m/mese di galleria finita a imbocco.

Mentre gli aspetti operativi riguardanti l'intervento di ripristino, peraltro svoltosi con regolarità, non appaiono particolarmente significativi, riteniamo interessante, invece, fornire qualche dettaglio operativo dell'avanzamento presso l'imbocco Sud, attaccato in frana (fig. 14).

Qui, infatti, si sono applicati per la prima volta accoppiati l'intervento di preconsolidamento del contorno del cavo mediante jet-grouting in orizzontale e quello del nucleo mediante tubi di vetroresina (sezione tipo 1). Le fasi operative delle lavorazioni sono riportate in fig. 15.

Considerata la stabilità precaria del versante, il passaggio sotto l'edificio ubicato a pochi metri dall'imbocco, con soli 8 m di copertura, appariva particolarmente delicato. Per precauzione in questo tratto il trattamento jet-grouting è stato rinforzato con l'esecuzione di una doppia coronella ed il passaggio è avvenuto senza il minimo danno per l'edificio e senza particolari problemi

Foto 3



FASE OPERATIVA

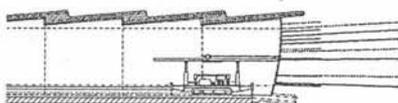
LINEA FERROVIARIA ANCONA-BARI - GALLERIA VASTO

AVANZAMENTO A PIENA SEZIONE MEDIANTE PRECONSOLIDAMENTO DEL NUCLEO E JET-GROUTING SUB-ORIZZONTALE AL CONTORNO DEL CAVO

FASI ESECUTIVE

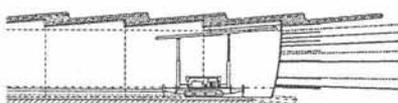
FASE 1

Preconsolidamento del fronte di scavo con tubi in vetroresina



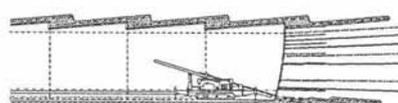
FASE 2

Esecuzione di una coronella di colonne di terreno consolidato



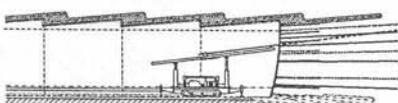
FASE 3

Esecuzione di colonne sub-orizzontali al di sotto del piano di scavo



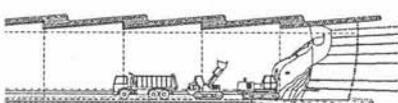
FASE 4

Esecuzione al contorno di un'aureola di fori drenanti



FASE 5

Avanzamento a piena sezione per 10m con immediata posa in opera di centine e spritz-beton sp=20cm



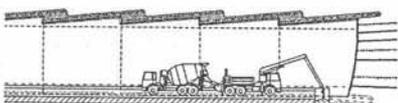
FASE 6

Sagomatura del fronte di scavo a forma concava e immediata esecuzione di uno strato di spritz-beton sp=5cm



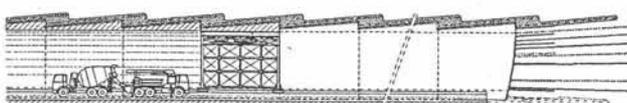
FASE 7

Scavo e getto delle murette e dell'arco rovescio



FASE 8

Posa in opera impermeabilizzazione e getto del rivestimento definitivo a una distanza dal fronte $4 + 5 \text{ m}$

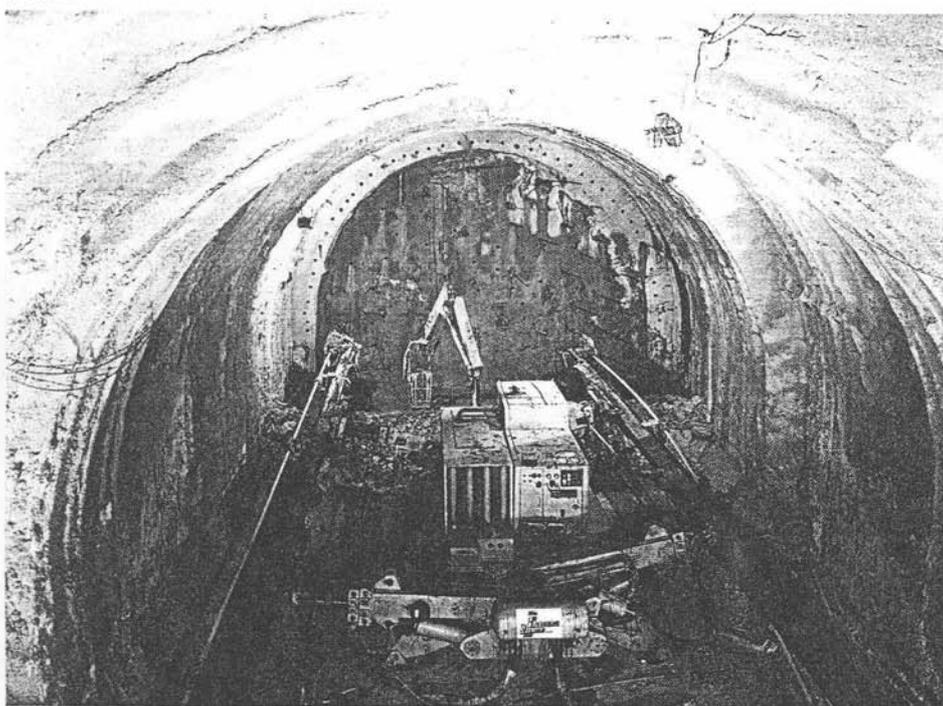


in galleria (foto 4).

In questo tratto, la produzione media,

lavorando 6 giorni/settimana con un solo posizionatore, è stata di circa 30

Foto 4



m/mese di galleria finita. Invece, dove si è eseguita un'unica coronella si sono registrati avanzamenti di circa 70 m/mese, a fronte di 7 giorni lavorativi/settimana utilizzando un doppio posizionatore.

Superati i primi 350 m di galleria, diminuendo la componente sabbiosa si è passati alla sezione tipo 2, che prevede di eseguire il preconsolidamento del contorno del cavo mediante tubi di vetroresina lanciati in avanzamento ed iniettati con miscela cementizia (la fig. 16 illustra le fasi operative dell'intervento).

In figura 17 abbiamo messo a confronto i diagrammi delle produzioni medie mensili con quelli delle convergenze misurate nel periodo. È particolarmente significativa la netta tendenza dei valori delle seconde a seguire in proporzione inversa l'andamento delle prime, a conferma del fatto che meno tempo si lascia al nucleo per deformarsi, più si limita l'innesco dei fenomeni di estrusione e preconvergenza, dai quali dipende il fenomeno di con-

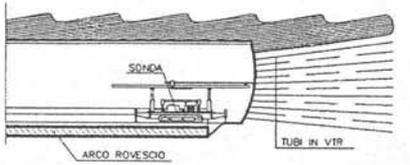
LINEA FERROVIARIA ANCONA-BARI - GALLERIA VASTO
AVANZAMENTO A PIENA SEZIONE MEDIANTE PRECONSOLIDAMENTO
DEL FRONTE E DEL CONTORNO DELLA CAVITA' CON TUBI IN VTR

Figura 16

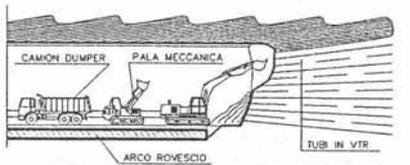
FASE OPERATIVA

Fase d'esecuzione

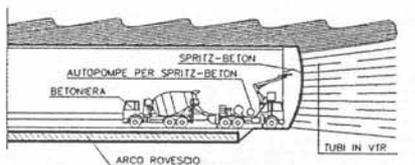
FASE 1
 Preconsolidamento del nucleo e del terreno al contorno mediante tubi in VTR



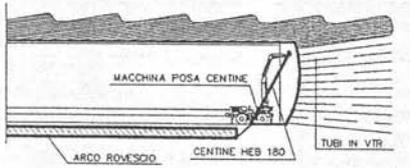
FASE 2
 Avanzamento a piena sezione (mt 0.70 + 1.00)



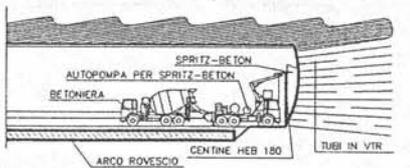
FASE 3
 Esecuzione dello spritz-beton al fronte ed al contorno della cavit  per la protezione delle pareti di scavo (sp= 5cm)



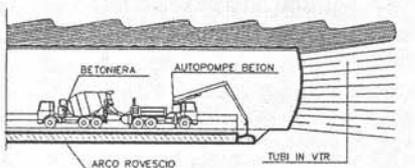
FASE 4
 Posa in opera di centine in corrispondenza dello scavo eseguito in fase 2



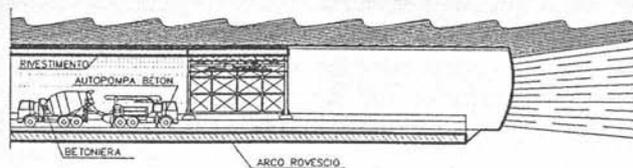
FASE 5
 Avanzamento del rivestimento in spritz-beton armato (S=35cm)



FASE 6
 Scavo e getto di murette ad arco rovescio



FASE 7
 Successivo getto del rivestimento



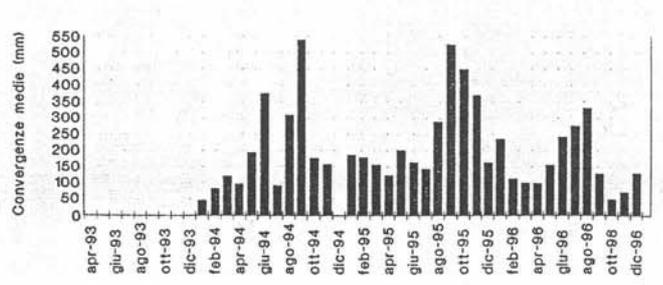
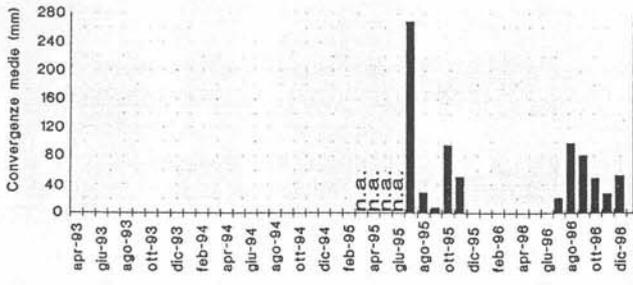
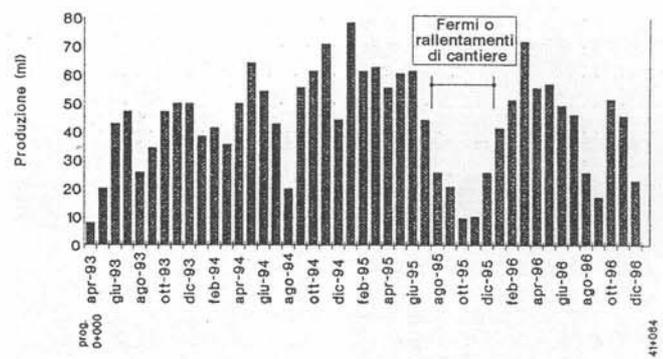
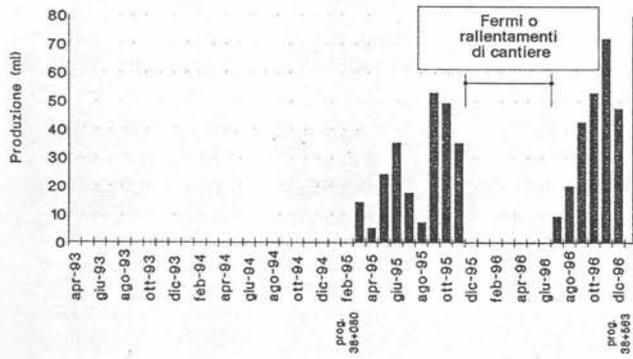
FASE OPERATIVA

LINEA FERROVIARIA ANCONA-BARI - GALLERIA " VASTO "
PRODUZIONE MENSILE E CONVERGENZE MEDIE MISURATE

Figura 17

primo lotto - imbocco Nord

secondo lotto - imbocco Sud



vergenza che risulta, di conseguenza, più contenuta.

Fase di verifica in corso d'opera per la galleria "Vasto"

Contemporaneamente alla ripresa dei lavori di scavo ha avuto inizio la fase di verifica, che prevede la lettura della risposta deformativa del mezzo allo scavo ai fini di un'adeguata ottimizzazione e taratura degli interventi di stabilizzazione della galleria. Il sistema di avanzamento adottato, che ha come obiettivo la creazione dell'effetto arco anticipatamente sullo scavo, richiede, ai fini di verificarne l'efficacia, il monitoraggio continuo dei fenomeni deformativi del fronte e del cavo; ciò permette al sistema stesso di essere messo a punto tempestivamente in funzione della loro evoluzione a fronte degli interventi di stabilizzazione operati. In particolare, l'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli

prevede, di base, l'esecuzione di:

- misure assestometriche dalla superficie, nelle tratte a ridotta copertura, operate in modo da poter rilevare l'andamento delle preconvergenze e convergenze a monte ed a valle del fronte d'avanzamento della galleria in corrispondenza alla stazione di misura;
- misure di estrusione del terreno appartenente al sistema fronte di scavo-nucleo d'avanzamento;
- misure di convergenza del cavo, all'interno della galleria, mediante nastro d'acciaio Invar;
- misure di pressione tra le strutture di stabilizzazione e l'ammasso circostante, oltreché nelle strutture di rivestimento.

Nel caso della galleria "Vasto" si è proceduto, di conseguenza, secondo questa falsariga.

In particolare, all'imbocco Sud sono state messe in opera:

- stazioni assestometriche dalla superficie, in corrispondenza del fabbricato da sottopassare a 30 m dall'imbocco

con soli 8 m di copertura;

- deformometri sul fabbricato per la lettura di eventuali lesioni;
- stazioni di convergenza del cavo;
- stazioni per la misura delle pressioni.

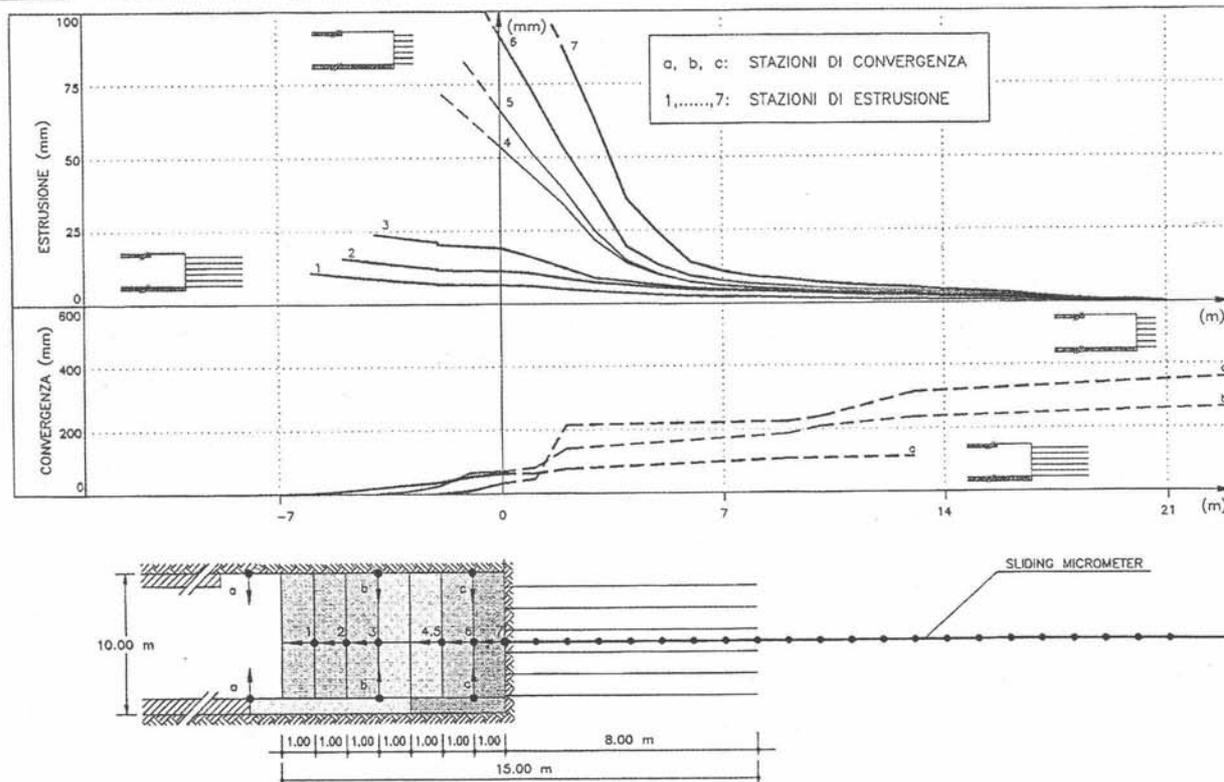
Oltre a queste misure base, nella galleria "Vasto" si sono operate anche **misure sistematiche e contemporanee di estrusione e convergenza**, che costituiscono una novità di particolare interesse anche per i risultati che hanno sino ad oggi fornito.

Mentre le convergenze, essendo ormai un'operazione di routine nella pratica costruttiva, sono state rilevate dalla stessa Impresa che opera lo scavo, le misure dell'estrusione del fronte sono state eseguite dall'ISMES S.p.A. di Bergamo, che vanta una riconosciuta esperienza in questo campo, mediante l'inserimento di "sliding micrometer" di circa 30 metri di lunghezza all'interno del nucleo di avanzamento.

I primi risultati di queste misurazioni sono mostrati sinteticamente nei dia-

Figura 18

LINEA FERROVIARIA ANCONA-BARI - GALLERIA VASTO DIAGRAMMI ESTRUSIONE-CONVERGENZA IN FUNZIONE DELL'AVANZAMENTO



grammi riportati in fig. 18, che evidenziano simultaneamente l'andamento delle estrusioni e delle convergenze all'interno di un ciclo completo di lavorazioni.

Quest'ultimo consiste nel consolidamento del nucleo con tubi di vetroresina per una profondità di 15 m e nel successivo scavo di avanzamento con sfondi di un metro, al termine di ciascuno dei quali viene posizionata una centina ed eseguito un manto protettivo di spritz-beton. Ogni 5 m di avanzamento viene gettato l'arco rovescio, la cui distanza dal fronte non supera mai i 6 m.

Se i valori delle misure rilevati non suggeriscono di operare diversamente, compiuti 10 m di avanzamento viene operato un nuovo consolidamento del nucleo con tubi di vetroresina ed inizia così un altro ciclo di lavorazioni. Dall'analisi dei diagrammi in fig. 18, si nota come, a seguito dell'avanzamento del fronte, al progressivo ridursi, cioè, della profondità del nucleo consolidato dai 15 m iniziali a soli 5 m (con conseguente riduzione anche della sua rigidità media) si sviluppi una risposta deformativa del nucleo stesso (estrusione) e della cavità a valle del fronte (convergenza) progressivamente più spostata da un andamento di tipo elastico ad uno di tipo elastoplastico. In particolare, le curve di convergenza, da un andamento iniziale tipico di una situazione che evolve rapidamente verso la stabilità (con valori massimi dell'ordine di 10 cm, che si producono in seguito a movimenti estrusivi massimi inferiori a 2,5 cm), assumono gradatamente andamenti che evidenziano una crescente difficoltà dei fenomeni deformativi ad esaurirsi. Ad esempio, quando la lunghezza del nucleo consolidato scende a soli 5 m, si sviluppano estrusioni dell'ordine di 10 cm, che danno luogo a convergenze quadruplicate rispetto a quelle rilevate all'inizio del ciclo di lavorazione. La lettura combinata di estrusione e convergenza del cavo diventa allora, in questa ottica, un segnale importantissimo per il progettista, al fine di stabilire il momento in cui è necessario arrestare l'avanzamento per eseguire un nuovo

consolidamento e ripristinare la profondità di nucleo consolidato minima per mantenere l'ammasso, se non in campo elastico, quanto meno lontano dal campo di rottura.

Bibliografia

- [1] LOMBARDI G., AMBERG W.A., "Une méthode de calcul élasto-plastique de l'état de tension et de déformation autour d'une cavité souterraine", Congresso Internazionale ISRM, Denver, 1974
- [2] TAMEZ E., "Estabilidad de tuneles excavados en suelos", Conferenza presso la Mexican Engineering Academy, Messico 1984
- [3] KOVARI K., "On the Existence of the NATM: Erroneous Concepts behind the New Austrian Tunnelling Method", Tunnel, 1/1994
- [4] LUNARDI P., "Progetto e costruzione di gallerie: presentazione dell'approccio ADECO-RS", ISMES - Programma di istru-

zione permanente - Bergamo, 14-16 novembre 1988

[5] LUNARDI P., BINDI R., FOCARACCI A., "Technical and financial planning of underground works: the ADECO-RS method", VI Forum Europeo di Ingegneria Economica - Università Bocconi - Milano, 13-14 Maggio 1993

[6] LUNARDI P., "Aspetti progettuali e costruttivi nella realizzazione di gallerie in situazioni difficili: interventi di precontenimento del cavo", Convegno Internazionale su "Il consolidamento del suolo e delle rocce nelle realizzazioni in sotterraneo" - Milano 18-20 Marzo 1991

[7] LUNARDI P., "Glass-resin tubes to stabilize the face of tunnels in difficult cohesive soils", SAIE: Seminario su "The application of fiber Reinforced Plastics (FRP) in civil structural engineering" - Bologna, 22 Ottobre 1993

[8] LUNARDI P., "La stabilité du front de taille dans les ouvrages souterrains en terrain meuble: études et expériences sur le renforcement du noyau d'avancement", Symposio Internazionale su "Renforcement des sols: expérimentations en vraie grandeur des années 80", Parigi, 18 novembre 1993

[9] LUNARDI P., "Progetto e costruzione di gallerie secondo il metodo basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli - Parte prima: Presostegno e preconfinamento", Quarry and Construction, Marzo 1994

[10] LUNARDI P., "L'importanza del precontenimento del cavo in relazione ai nuovi orientamenti in tema di progetto e costruzione di gallerie", Gallerie e grandi opere in sotterraneo, n. 45 anno 1995

[11] LUNARDI P., "Progetto e costruzione di gallerie secondo il metodo basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli - Parte seconda: Ruolo e risultati della ricerca sperimentale", Quarry and Construction, Marzo 1995

[12] LUNARDI P., "Progetto e costruzione di gallerie secondo il metodo basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli - Parte terza: Proposta del nuovo approccio", Quarry and Construction, Aprile 1996

SCHEDA TECNICA

Impresa FIORONI SISTEMA S.p.A.:

Dott. Ing. Stefano Fioroni	<i>Direttore tecnico</i>
Geom. Francesco Palchetti	<i>Direttore di cantiere</i>
Dott. Geol. Celestino Picchio	<i>Geologia</i>
Geom. Francesco Roscini	<i>Responsabile tecnico</i>
Geom. Umberto Cantagallo	<i>Capo cantiere</i>

Alta Sorveglianza F.S.:

Dott. Ing. Mario Malerbi
Dott. Ing. Michele Monfreda
Geom. Antonio Isgrò

Ingegneria Specialistica F.S.:

Dott. Ing. Piero Pietrantoni
Dott. Geol. Francesco Marchese

Progettazione

ROCKSOIL S.p.A. dal 1991:
Prof. Ing. Pietro Lunardi
Dott. Ing. Alessandro Focaracci

Assistenza Tecnica

ROCKSOIL S.p.A. dal 1991:
Dott. Ing. Claudio De Giudici