

Lo scavo delle gallerie mediante cunicolo pilota

Dopo aver analizzato le funzioni svolte sino ad oggi dal cunicolo pilota come "mezzo di costruzione" per le gallerie, viene proposta agli addetti ai lavori una metodologia originale, indicata come il "Metodo RS" del foro pilota, che utilizza il cunicolo stesso come "mezzo di progettazione" per la galleria definitiva. Si sono prese in esame tutte le implicazioni tecnico-operative, programmatiche, contrattuali, economiche che può comportare l'adozione di questa nuova impostazione nel campo delle realizzazioni in sottoterraneo, confrontando questa proposta con i primi risultati derivanti dall'applicazione del cunicolo pilota come "mezzo di progettazione" in alcune gallerie ferroviarie attualmente in costruzione.

1 - PREMESSA

Il cunicolo pilota, inteso come galleria a sezione ridotta lanciata in avanzamento a garanzia della fattibilità di una sezione di scavo più grande, è un'applicazione costruttiva in uso da sempre nel campo delle realizzazioni nel sottosuolo.

Quindi se si parla di cunicolo o foro pilota come "mezzo di costruzione" per una generica galleria non si cita niente di originale.

La novità invece, in tema di cunicoli pilota, consiste nel fatto che essi, avendo oggi la possibilità di realizzarli con sistemi meccanizzati molto rapidi ed affidabili in una gamma di terreni ormai

sempre più ampia, possono essere efficacemente utilizzati, per la galleria da realizzare, anche come "mezzo di progettazione".

Ciò che ci si propone in questo lavoro è, dopo aver esaminato la funzione del cunicolo pilota come "mezzo di costruzione" nel corso dei tempi, di dimostrare, sulla base di alcune recenti applicazioni, come il cunicolo possa essere considerato come "mezzo di progettazione" e come ciò possa rappresentare una vera e propria svolta storica nel campo delle realizzazioni in sottoterraneo per gli indubbi vantaggi programmatici, contrattuali ed economici che potrà comportare la sua sistematica adozione.

2 - IL CUNICOLO PILOTA COME MEZZO DI COSTRUZIONE

Ci sembra importante, prima di entrare nel merito dell'impiego del cunicolo pilota come "mezzo di costruzione" per la galleria, sottolineare alcuni aspetti:

a - l'utilizzazione del cunicolo pilota è stata in passato e può essere tutt'oggi, o limitata ad alcune tratte rispetto all'intero sviluppo della galleria, per la risoluzione di situazioni di emergenza normalmente imprevedibili ed imprevedibili, oppure estesa sistematicamente a tutta la galleria da realizzare, per l'espletamento di servizi ricorrenti lungo il tracciato in sottoterraneo;

b - la sua collocazione geometrica sia in senso longitudinale sia in senso trasversale, rispetto alla sezione di scavo definitiva, può essere riconducibile alle situazioni sotto descritte:

- 1 - per la collocazione in senso longitudinale (Fig. 1):
 - L 1: cunicolo pilota lanciato sistematicamente in avanzamento per tratte limitate, dal fronte di scavo a piena sezione
 - L 2: cunicolo pilota lanciato in avanzamento dal fronte di scavo a piena sezione ed utilizzato solo localmente per il superamento di accidenti tettonici o idrogeologici
 - L 3: cunicolo pilota "passante", realizzato preventivamente allo scavo di

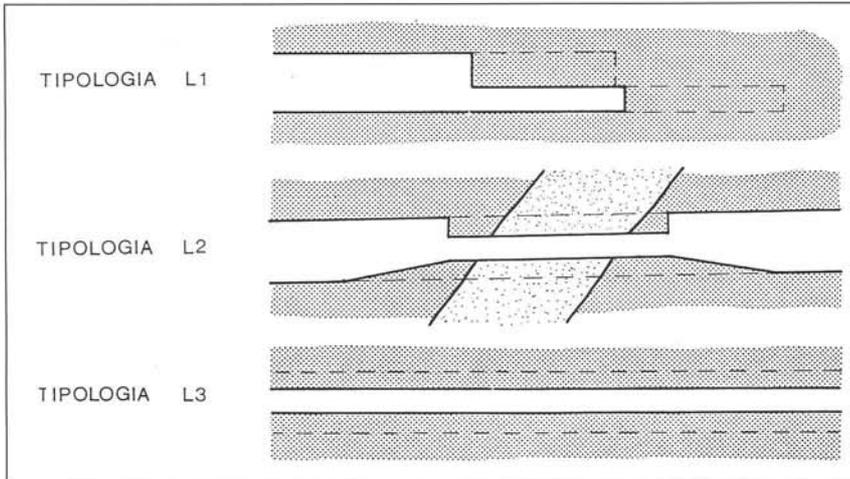


Fig. 1 - Scavo della galleria mediante cunicolo pilota - Situazione longitudinale.

piena sezione, lungo tutto lo sviluppo della galleria da realizzare;

- 2 - per la collocazione in senso trasversale (Fig. 2):
- T 1: cunicolo pilota ricavato all'interno della sezione della galleria da realizzare; da notare che la sua collocazione altimetrica rispetto al piano dei centri viene di volta in volta dettata dalla specifica utilizzazione. Ad esempio se il cunicolo viene realizzato con funzione esclusivamente drenante, allora sarà collocato in platea della costruenda galleria; se viene

invece impiegato per realizzare dei preconsolidamenti, il cunicolo verrà collocato preferibilmente nella zona di calotta o centralmente alla sezione di scavo definitiva;

- T 2: cunicolo pilota collocato lateralmente, all'esterno della sezione di scavo della galleria definitiva, con interasse tale da rendere minima l'influenza reciproca dei due cavi;
- T 3: cunicolo pilota collocato nella zona di calotta, all'esterno della sezione di galleria da realizzare, ad una quota tale da non compromettere lo scavo della galleria definitiva.

Foto 1 - Autostradale del Gran Sasso (1973) - Cunicolo pilota scavato mediante esplosivo.

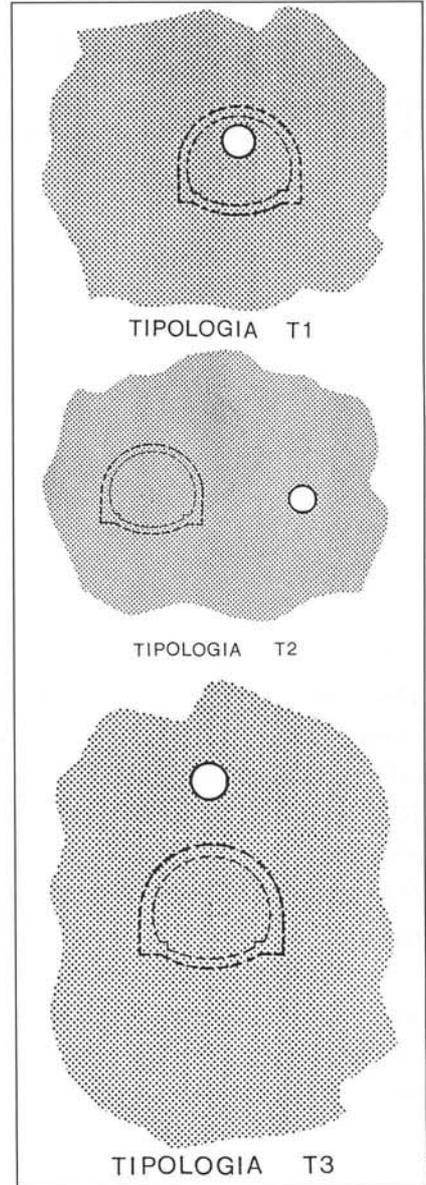
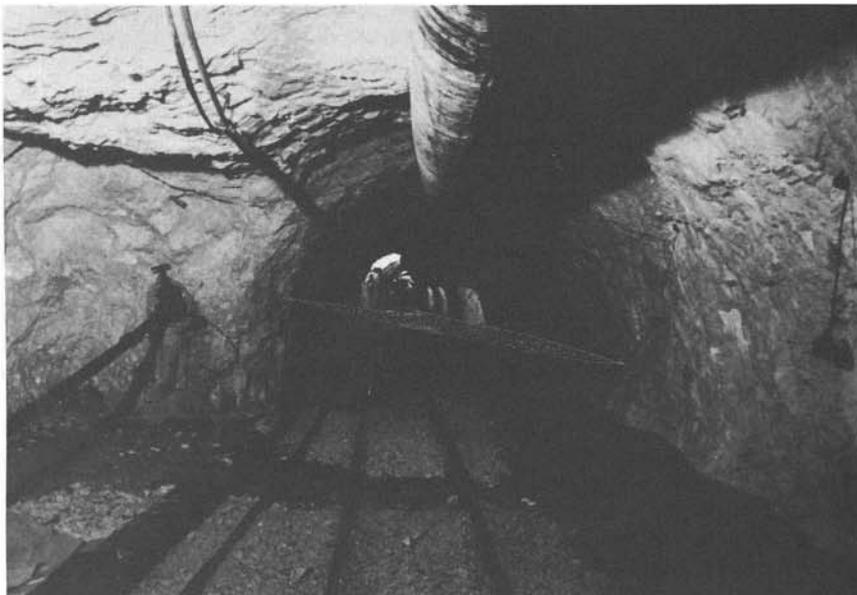


Fig. 2 - Scavo della galleria mediante cunicolo pilota. Situazione trasversale.

c - nei riguardi dei sistemi di scavo, che possono essere impiegati per la realizzazione del foro pilota, normalmente si fa riferimento, a seconda dei tipi di terreni da affrontare, allo:

- scavo con il "metodo tradizionale" (Foto 1), o avanzamento mediante volate successive, con incidenze di esplosivo sempre piuttosto elevate e normalmente superiori del 100% rispetto a quelle dell'avanzamento a piena sezione. Questo sistema, che ben si adatta ai terreni lapidei, permette produzioni medie di 10 m/g;
- scavo mediante "scudo" più o meno

attrezzato per lo scavo meccanizzato in terreni sciolti e in terreni coesivi, con produzioni medie di 20 m/g (Foto 2);

- scavo con "fresa" ad attacco integrale e continuo, con produzioni medie di 40 m/g per terreni lapidei (Foto 3).

Questo sistema di scavo si è rivelato, sulla base di recenti esperienze, particolarmente flessibile, consentendo avanzamenti, su tratte limitate, anche in terreni sciolti, in terreni coesivi, in occasione di forti gradienti e di manifestazioni idrauliche dell'ordine di qualche migliaio di litri al secondo (foro pilota Galleria FS S. Leopoldo, 3600 l/sec. Foto 4).

Che l'impiego del cunicolo pilota non rappresenti una novità nello scavo delle gallerie lo testimoniano le numerose applicazioni registrate nel passato e che ancora oggi trovano largo impiego. Si ritiene interessante, a questo proposito, ripercorrere insieme alcune delle principali applicazioni, con particolare riferimento all'analisi dei motivi che, nelle diverse realizzazioni, hanno portato all'adozione di cunicoli pilota (Fig. 3).

Traforo Ferroviario del Frejus Anno 1860 Lunghezza 12800 m

In questo caso, come per gli altri grandi trafori alpini quali il S. Gottardo ed il Sempione, il cunicolo pilota, chiamato "galleria di direzione", precedeva sistematicamente l'avanzamento del cantiere d'allargo (Biadego, 1906).

Durante il traforo del Frejus, in particolare il cunicolo d'avanzamento venne realizzato all'interno della sezione definitiva a quota platea (Fig. 4), con la funzione primaria di vano ad uso dei topografi per il tracciamento e secondaria di decompressione preventiva dell'ammasso roccioso sotto forte coazione a causa degli elevati carichi litostatici. A proposito di quest'ultima funzione è interessante aprire una parentesi per far notare come la carenza di mezzi adeguati, per il contenimento delle pareti di scavo (spritz-beton e bullonatura), obbligasse progettisti e costruttori a subire passivamente i fenomeni deformativi, conseguenti l'apertura del cavo stesso, senza la minima possibilità di poter intervenire per regimarli; ciò significava, quindi, accettare anche la creazione di una zona plasticizzata di notevole potenza al contorno della futura sezione e l'innescare di quei fenomeni di fluage, che normalmente risultano proporzionali ai



Foto 2 - Metropolitana di Milano Linea 3 (1985) - Cunicolo pilota scavato con scudo meccanizzato ad attacco integrale e continuo.

volumi di roccia interessati dalla rottura per sovratensione.

Galleria Autostradale S. Rocco (Roma Aquila) Anno 1967 Lunghezza 4120 m

Nel caso particolare, per esigenze di ventilazione nelle gallerie già forate per circa 3 Km, si rese necessaria l'esecuzione di un cunicolo pilota lungo 1200 m circa, ricavato in platea in asse ad una delle due canne.

Traforo Autostradale del Gran Sasso Anno 1971 Lunghezza ≈ 10150 m

L'adozione del cunicolo pilota durante le fasi di realizzazione delle gallerie autostradali venne finalizzata ad esigenze di:

- tipo idrogeologico;
 - superamento di accidenti tettonici.
- Nel primo caso, l'avanzamento nelle formazioni dolomitiche, interessate da importanti acquiferi con pressioni idrostatiche variabili da 1 a 60 atm, impo-

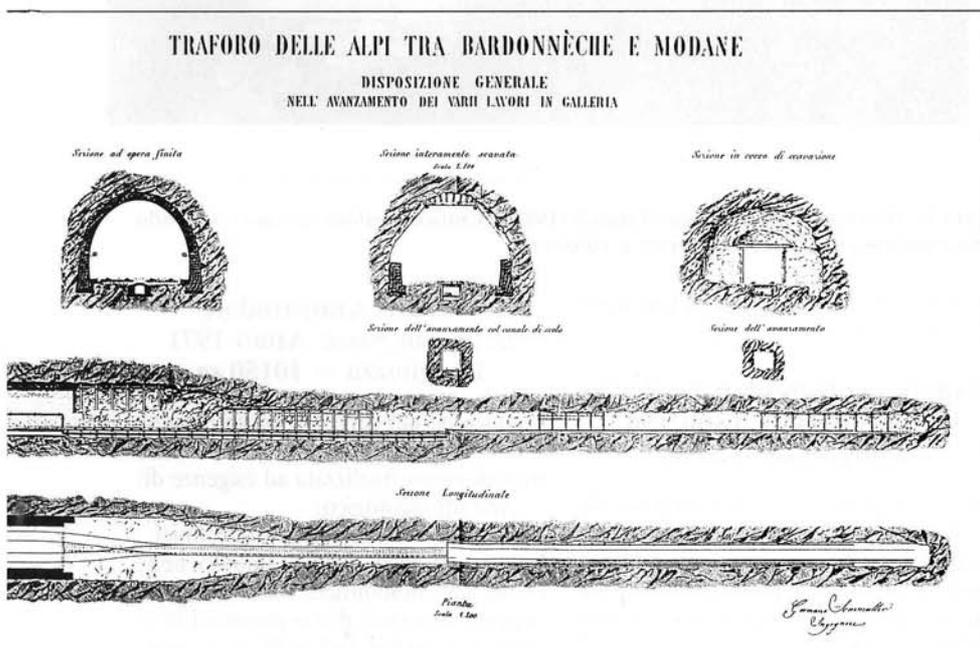
ANNO	GALLERIA	COMMITTENTE	LUNGHEZZA DI CUNICOLO	TIPO DI ROCCIA	TIPOLOGIA	FUNZIONE	SCHEMA
1860	Frejus	F.S.	12'800	Calcescisto Calcemiscelato	T1/L1	Topografica Statica	
1967	S. Rocco	A.N.A.S.	4'120	Calcere Dolomitico	T1/L1	Ventilazione	
1971	Gran Sasso	A.N.A.S.	- 10'150	Calcere Dolomitico	T1/L1 T1/L2	Drenante Preconsolidamento	
1982/83	Tarvisio	A.N.A.S.	4'600	Dolomia dello Schlern	T1/L3	Controllo vibrazioni Accelerazione	
1983	Zuc del Bor	F.S.	650	Detrito di frana	T3/L2	Preconsolidamento	
1984	Forca Canapine	A.N.A.S.	4'500	Calcere	T1/L3	Prospezione Accelerazione	
1984	S. Martino	A.N.A.S.	3'700	Calcere	T1/L3	Controllo vibrazioni	
1984	Monte Olimpino 2	A.N.A.S.	4'495	Calcere Conglomerati	T1/L1	Prospezione Controllo vibrazioni	
1983/85	Linea 3 Passante	MM	- 3'000	Alluvioni	T1/L3	Preconsolidamento	
1985	Caponero	F.S.	3'570	Flysh	T1/L2	Controllo vibrazioni	
1986	Zuc del Bor	F.S.	3'800	Calcere Dolomitico	T2/L2	Prospezione Accelerazione	

Fig. 3

neva agli esecutori, per la regimazione dei gradienti idraulici in gioco ed a fronte di permeabilità d'ammasso estremamente eterogenee, l'adozione sistematica di un cunicolo realizzato con sistema tradizionale, posizionato in platea e lanciato di 200÷300 m oltre il can-

tiere d'avanzamento a piena sezione; il cunicolo aveva lo specifico compito di abbattere le pressioni idrostatiche e di regolare i gradienti in gioco (Foto 5). Nel secondo caso, la necessità di superare sistemi principali di faglie con importanti spessori di materiali dolomitici

Fig. 4



cataclasi e milonitizzati in presenza di falda caratterizzata da carichi idrostatici elevati (20 atm), gradienti idraulici talvolta superiori alle 20-30 unità, imponeva l'adozione di preconsolidamenti da realizzarsi in un primo tempo in avanzamento, in un secondo tempo radialmente da cunicolo pilota, ubicato all'interno della sezione di scavo e passante rispetto agli stessi accidenti tettonici (Foto 6).

In Fig. 5 è riportato lo schema d'intervento utilizzato per il superamento della faglia di Valle Fredda.

Galleria Autostradale di Tarvisio Anno 1982/83 Lunghezza 4600 m (su due canne)

I motivi che hanno indotto gli esecutori dell'opera all'uso del cunicolo pilota passante sono stati da una parte l'estrema limitatezza dei tempi di esecuzione previsti dal contratto e dall'altra il problema delle vibrazioni, che in prossimità del centro abitato di Tarvisio avrebbero potuto, se non contenute, arrecare danni a strutture già fortemente provate dal sisma del 1976 (Cusciana e altri, 1986).

Tale scelta, ad opera conclusa, si è dimostrata vincente sotto entrambi gli aspetti.

Galleria Ferroviaria Zuc del Bor (Udine) Anno 1983 Lunghezza di cunicolo 650 m

La galleria Zuc del Bor appartiene al tronco Carnia-Pontebba della linea ferroviaria Udine-Tarvisio ed è la più lunga opera sotterranea (9233 m) nell'ambito del raddoppio della Pontebbana.

Per superare un accumulo di materiale (detrito di frana) completamente incoerente, eterogeneo ed instabile nella zona iniziale dell'imbocco Sud, è stato realizzato un cunicolo pilota, ubicato fuori della sezione di scavo in zona calotta, che ha permesso il consolidamento preventivo del terreno attorno alla sezione di scavo definitiva, garantendo in tal modo la sicurezza operativa e permettendo l'avanzamento sistematico a piena sezione della galleria principale.

Lo schema, con le varie tipologie di consolidamento, è riportato in Fig. 6; la Foto 7 illustra gli imbocchi del cunicolo e della galleria.



Foto 3 - Galleria FS Zuc del Bor (1986) - Cunicolo pilota scavato con fresa ad attacco integrale e continuo.



Foto 5 - Traforo Autostradale del Gran Sasso (1973) - Cunicolo drenante.

**Galleria Stradale di Valico di Forca Canapine Anno 1984
Lunghezza 4500 m**

Quest'opera appartiene alla Strada Provinciale di Forca Canapine, che collega Ascoli Piceno con Norcia.

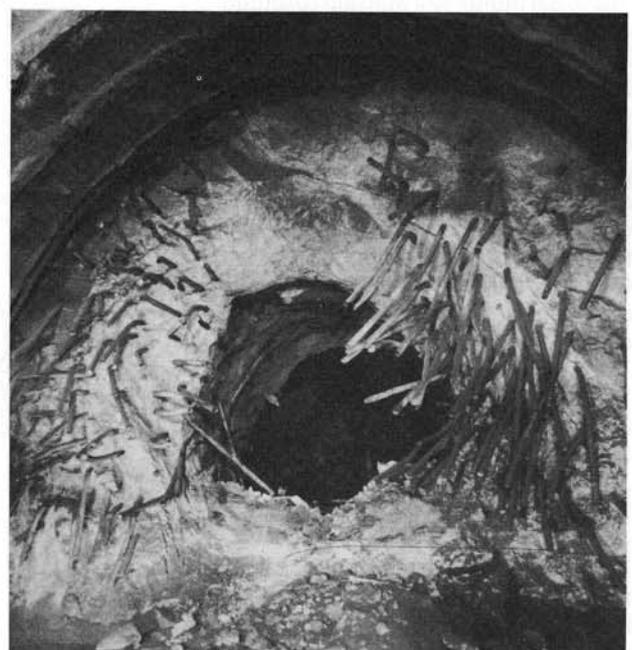
A causa dei ridotti tempi di costruzione previsti dall'appalto e delle sfavorevoli condizioni morfologiche, per effettuare una pur minima campagna geognostica di superficie, l'Impresa Esecutrice e l'Ente Appaltante per non affrontare la costruzione della galleria in oggetto con

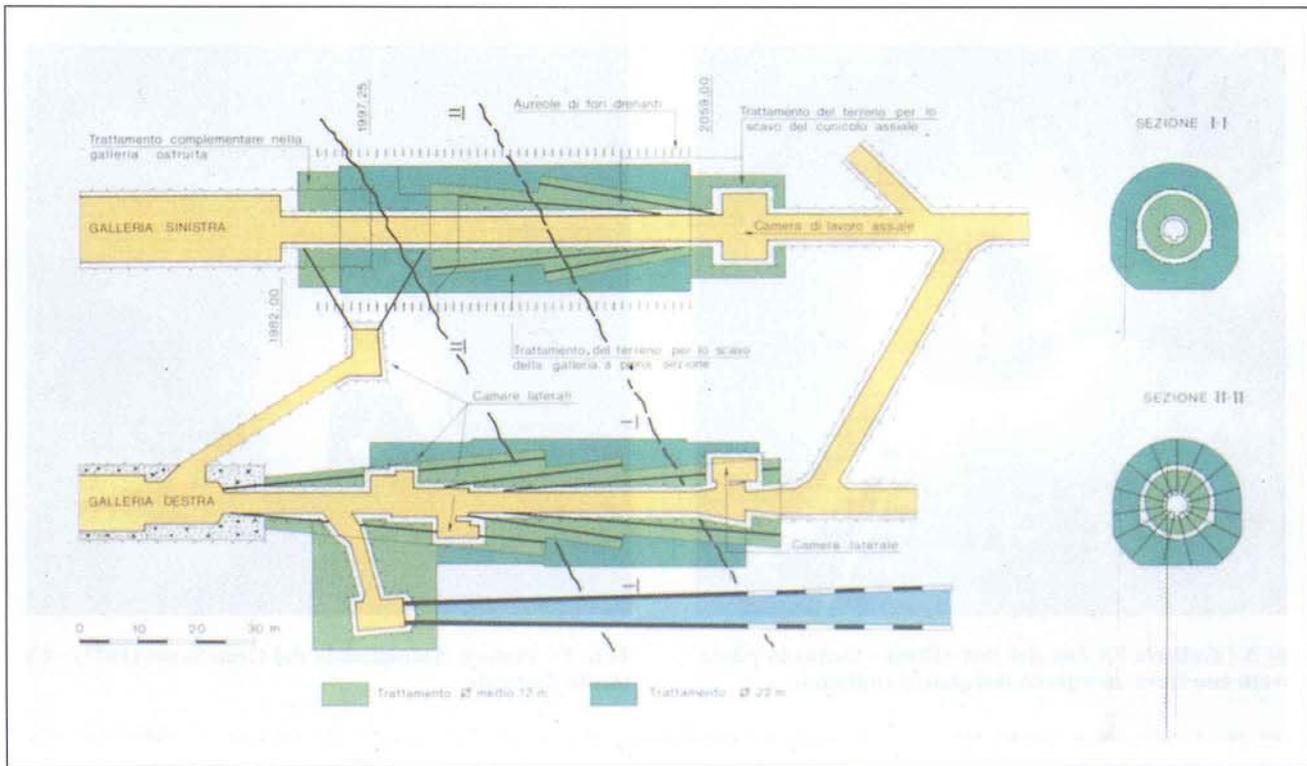
cognizioni del tutto insufficienti, decisero di concerto di realizzare un cunicolo pilota passante, ubicato all'interno della sezione di scavo, nella zona di calotta con funzione di prospezione geologico-geotecnica continua lungo il tracciato (Oliva ed altri, 1986).

Foto 4 - Galleria FS S. Leopoldo (1986) - Grossa venuta alla progr. 1080 d'acqua (≈ 3600 l/sec).



Foto 6 - Traforo Autostradale del Gran Sasso (1973) - Scavo di allargò dopo il consolidamento con iniezioni.





▲ Fig. 5

▼ Fig. 6

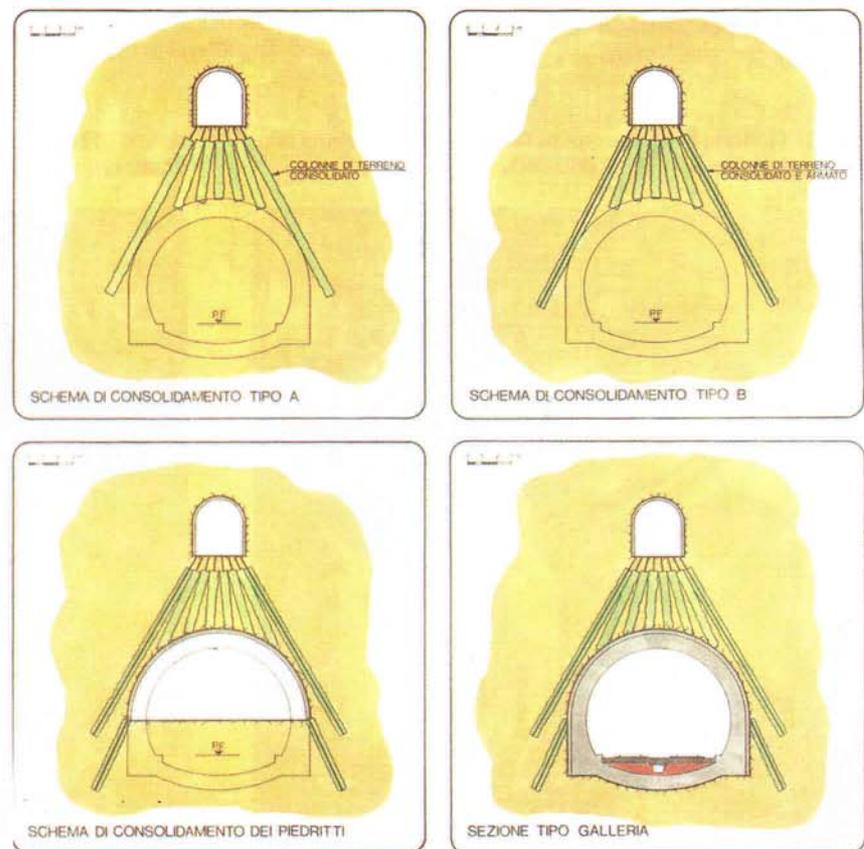
**Galleria Autostradale
S. Martino (Lecco) Anno 1984
Lunghezza di cunicolo 3700 m
(su due canne)**

La Galleria S. Martino rappresenta una variante della S.S. 36, ed attraversa il rilievo del Monte San Martino costituito da un ammasso omogeneo di calcare dolomitico.

La presenza di importanti sistemi di discontinuità, all'interno dell'ammasso dolomitico, fa sì che sulle acclivi pareti perimetrali del rilievo, per l'azione degli agenti atmosferici, si siano isolati, nel corso degli anni, grossi blocchi di materiale roccioso in equilibrio.

Onde evitare, con il brillamento delle cariche e le susseguenti vibrazioni indotte, l'instaurarsi di potenziali situazioni di crollo con pericolo per le vicine abitazioni della periferia di Lecco e per il traffico sulla strada sottostante, è stato eseguito un cunicolo pilota realizzato con fresa ad attacco integrale e continuo Ø 3.60 m, all'interno della sezione di scavo, nella zona di calotta.

In fasi di allargo, avendo già eliminato la rinora, è stato possibile contenere l'intensità delle vibrazioni indotte dallo sparo delle volate entro una soglia che



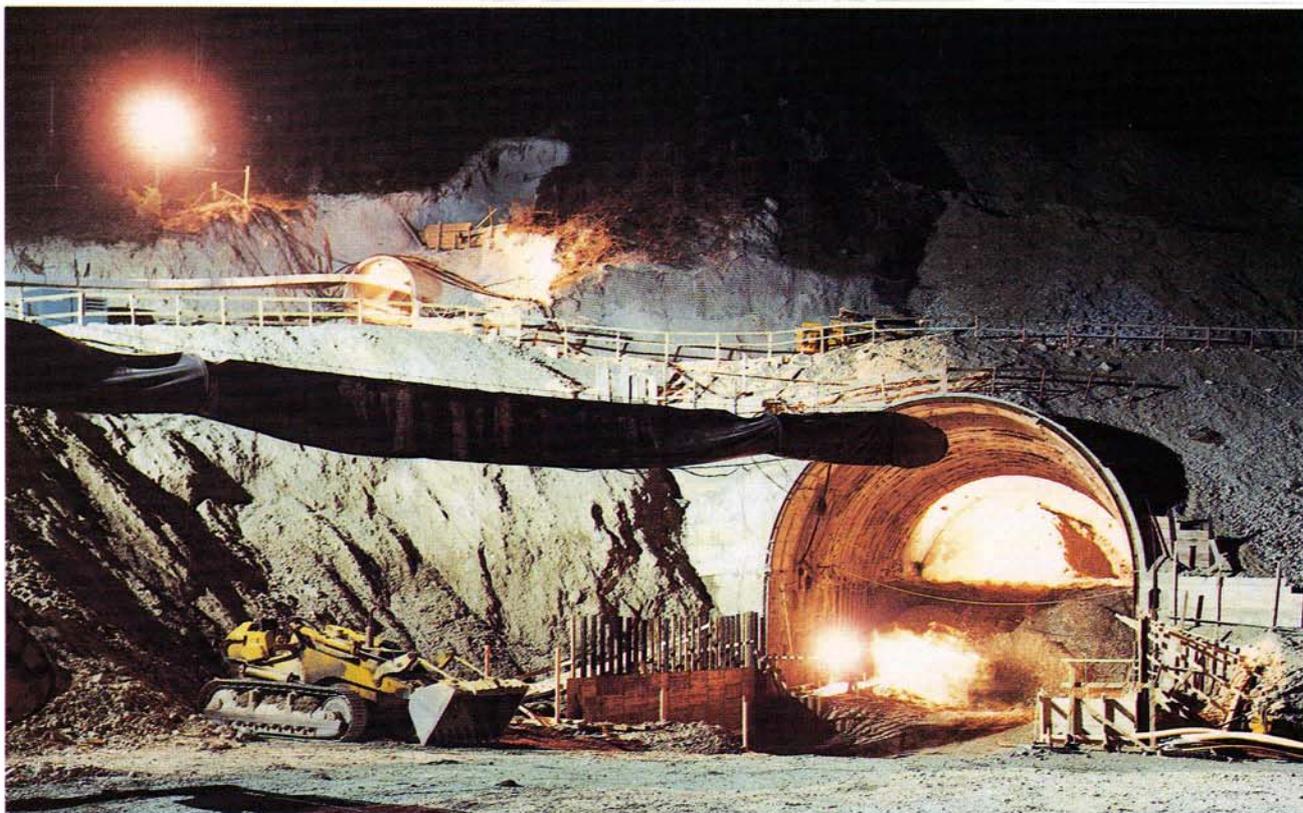


Foto 7 - Galleria FS Zuc del Bor (1984) - Vista dell'imbocco della galleria principale (in basso) e del cunicolo pilota utilizzato per i consolidamenti (in alto).

dava le massime garanzie di sicurezza operativa.

Foto 8 - Galleria Monte Olimpico 2 (1986) - Particolare del foro pilota collocato all'interno della sezione definitiva di scavo, nella zona di calotta.

Galleria Ferroviaria Monte Olimpino 2 Anno 1984 Lunghezza 7209 m

Per evitare tutti i disagi al movimento ferroviario, derivanti dalla vecchia sagoma della Galleria Monte Olimpino 1 e dalle forti pendenze della linea da Como verso Chiasso, è stato studiato un tracciato di variante, in cui si inserisce, con la sua lunghezza di 7,209 km, la galleria in oggetto.

Dall'imbocco lato Chiasso è stato eseguito, per un tratto di circa 4500 m, un cunicolo pilota con fresa ad attacco integrale e continuo di diametro 3,60 m (Foto 8), per risolvere due tipi di problemi: la preventiva esplorazione geologica geotecnica delle formazioni lungo il tracciato, il drenaggio in corrispondenza alla formazione calcarea (Ceppi ed altri, 1986).



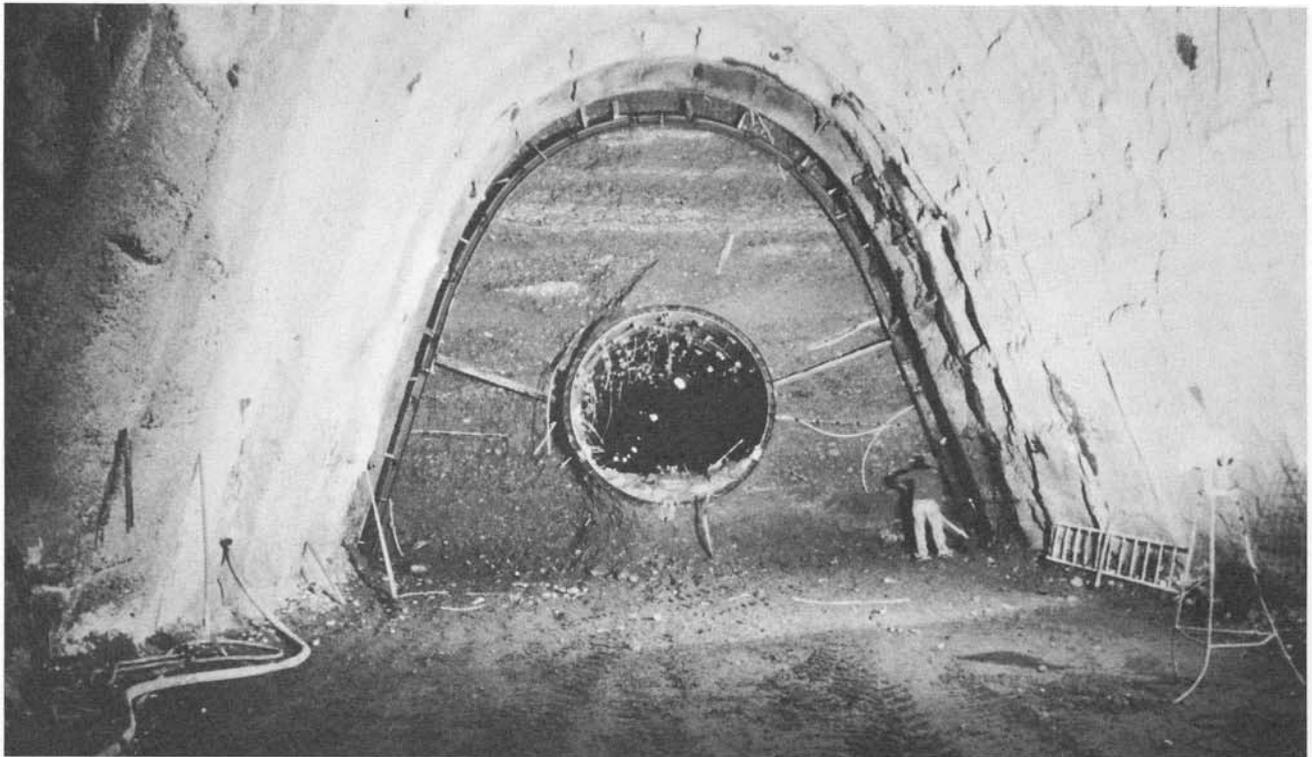


Foto 10 - Metropolitana Milanese, Linea 3 (1985) - Cunicolo scavato mediante scudo. Fase di allargo della galleria superiore.

siste nell'alternare tratte di scavo di 9 m con tratte di preconsolidamento mediante jet-grouting in avanzamento di 12 m (Foto 9)

- un sistema meccanizzato con scudo ad abbattimento continuo ed integrale, con posa in opera immediata di un rivestimento in panconcelli di legno confinati da centine metalliche, in modo da contenere subito lo scavo e non innescare decompressioni (Foto 10).

Entrambe le soluzioni hanno pienamente soddisfatto tutte le richieste della Committenza e danno ampie garanzie di sicurezza nei confronti della stabilità delle strutture di superficie.

**Galleria Ferroviaria Caponero (San Remo) Anno 1985
Lunghezza di cunicolo 3570 m**

Sottopassare con la galleria ferroviaria l'abitato di San Remo in zone particolarmente delicate per densità e vetustà di edifici, significava risolvere gli impegnativi problemi del controllo delle vibrazioni e dei cedimenti.

La soluzione è stata fornita grazie all'impiego del cunicolo pilota, posizio-

nato all'interno della sezione definitiva, nella zona di calotta, realizzato con fresa ad attacco integrale e continuo di 3,50 m di diametro.

Come descritto già in altri casi, l'eliminazione della rinora ha dato la possibilità di operare gli allarghi con minore incidenza di esplosivo, quindi con effetti ridotti dell'onda d'urto prodotta dalle volate e miglior contenimento delle vibrazioni indotte nell'A.R. e sugli edifici.

**Galleria Ferroviaria Zuc del Bor (Udine) Anno 1986
Lunghezza di cunicolo 3800 m**

Nell'ambito dei lavori per la realizzazione della galleria ferroviaria Zuc del Bor, citata già in precedenza, il cunicolo pilota ha trovato un'ulteriore applicazione.

Per limitare i notevoli ritardi accumulati a seguito di una preventiva campagna

Fig. 8 - Schema d'intervento per l'accelerazione dei tempi di esecuzione della galleria.

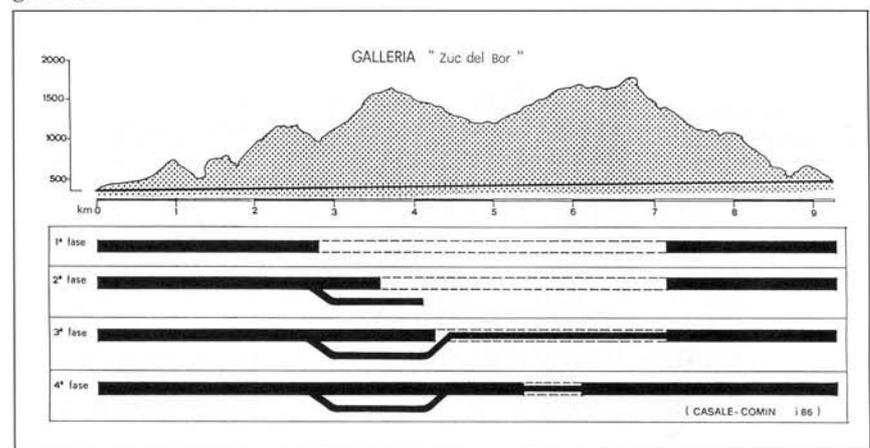




Foto 11 - Galleria FS Zuc del Bor (1986) - Sezione corrente della galleria e imbocco del cunicolo pilota, progr. 2800.

geognostica di tipo tradizionale, rivelatasi insufficiente e per ricondurre l'esecuzione della galleria nei tempi programmati, è stato realizzato un cunicolo pilota con fresa ad attacco integrale e continuo di 3,50 m di diametro che, a partire dal paramento di valle della galleria principale a progr. 2800 (Foto 11), è avanzato parallelamente alla galleria,

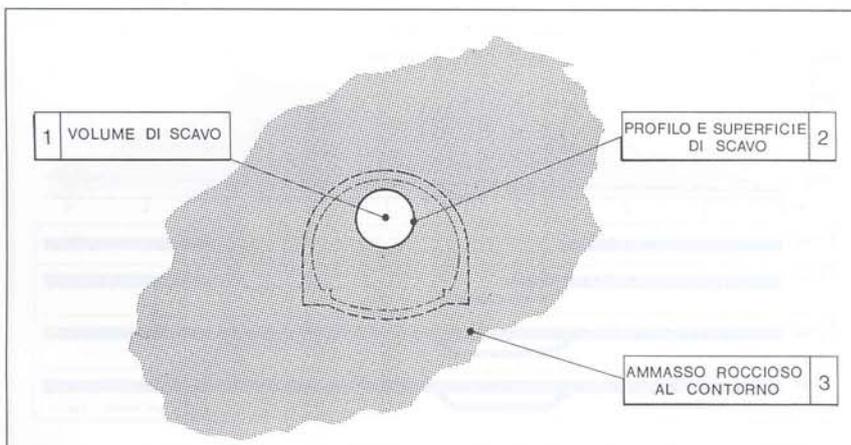
ad un interasse di circa 50 m, fino a superare, prima di rientrare in asse, il fronte di avanzamento a piena sezione di circa 1000 m; ciò avrebbe permesso di lasciare al cantiere di avanzamento a piena sezione, anche durante l'operazione di scavo del cunicolo, un polmone di lavoro di circa un anno, tempo entro il quale si stimava che il foro pilota po-

tesse essere completato fino all'imbocco Nord (Fig. 8). Questo singolare tipo di applicazione del foro pilota, ha dato risultati più che soddisfacenti, tenuto conto che la fresa ha fatto registrare produzioni medie di circa 4 volte superiori a quelle dell'avanzamento tradizionale. Dall'esame dei casi di applicazione, sopra esposti, emerge che le funzioni attribuite al cunicolo pilota nelle varie situazioni sono molteplici, drenaggio, controllo vibrazioni, preconsolidamento ecc.

È opportuno far notare che ciascun cunicolo, pur essendo stato realizzato con una funzione ben precisa, ha potuto assolvere contemporaneamente a molte altre esigenze operative; per esempio il cunicolo pilota eseguito nella Galleria Ferroviaria Zuc del Bor (1986), citato precedentemente, pur essendo stato realizzato con la specifica finalità di accelerare i lavori di costruzione della galleria in oggetto, ha assolto ad altri compiti non meno importanti quali:

- prospezione geologico-geotecnica;
- superamento di accidenti geologici tettonici a sezione ridotta;

Fig. 9 - Elementi di analisi del "Metodo RS" del foro pilota.



- abbattimento delle pressioni idrostatiche;
- possibilità di realizzare preconsolidamenti preventivi all'allargo;
- possibilità di ridurre le incidenze di esplosivo durante la fase di allargo;
- ventilazione dei cantieri in fase di scavo.

Se, parallelamente alle applicazioni già sopra citate, si prendono in esame le conclusioni a cui sono pervenuti i diversi autori delle memorie dedicate ai cunicoli pilota presentate al Congresso Internazionale su "Grandi Opere Sotterranee" tenutosi a Firenze nel giugno 1986, si ricava un quadro completo sui reali vantaggi tecnico-operativi che può offrire l'impiego del cunicolo pilota nello scavo delle gallerie. Questi sono prodotti dalla possibilità:

- 1 - di eseguire una prospezione avanzata in avanzamento di fondamentale importanza onde eliminare ogni tipo di imprevisto geologico-geotecnico, idrogeologico;
- 2 - di operare il rilevamento geologico-geotecnico continuo e sistematico lungo

il tracciato, che garantisca un quadro diretto e completo della situazione litostratigrafica geostrutturale e idrogeologica eliminando completamente le prospezioni in sondaggio eseguite dalla superficie peraltro puntuali e che il più delle volte presentano difficoltà operative al limite della fattibilità;

3 - di superare accidenti tettonici e geostrutturali a sezione ridotta, con la possibilità di contenere e regimare in sicurezza qualsiasi fenomeno di instabilità rispetto alla piena sezione;

4 - di effettuare preconsolidamenti preventivi alla realizzazione della grande sezione, agendo direttamente su quelle porzioni di ammasso che presentano difficoltà di auto-sostentamento, quindi ottimizzando gli interventi stessi;

5 - di abbattere le pressioni idrostatiche e di regimare i gradienti idraulici;

6 - di detensionare l'ammasso nel caso di presenza di forti stati latenti di tensione o di grandi carichi litostatici con la possibilità di rilevare quasi in scala reale l'evoluzione deformativa dell'ammasso roccioso;

7 - di contenere le vibrazioni conseguenti all'onda d'urto prodotta dalle volate in fase di allargo grazie all'eliminazione della rinora;

8 - di diminuire il disturbo all'ammasso roccioso al contorno dello scavo nella piena sezione grazie alla minore incidenza di esplosivo durante la fase di allargo;

9 - di poter ventilare naturalmente il cantiere d'avanzamento (caso di cunicolo pilota "passante");

10 - di ridurre i tempi di esecuzione della galleria principale, dal momento che la disponibilità del cunicolo pilota passante offre l'opportunità mediante la realizzazione di pozzi, discenderie e finestre d'accesso, di affrontare gli allarghi a piena sezione da più punti d'attacco lungo lo sviluppo della galleria in costruzione.

È chiaro come tutta questa serie di vantaggi tecnico-operativi offerti dall'adozione del cunicolo pilota comporti, nella realizzazione di una galleria, indubbi riflessi positivi sotto l'aspetto programmatico, contrattuale ed economico.

Foto 12 - Foro Pilota Galleria FS Malborghetto (1986) - Grossa discontinuità riempita con materiale plastico.



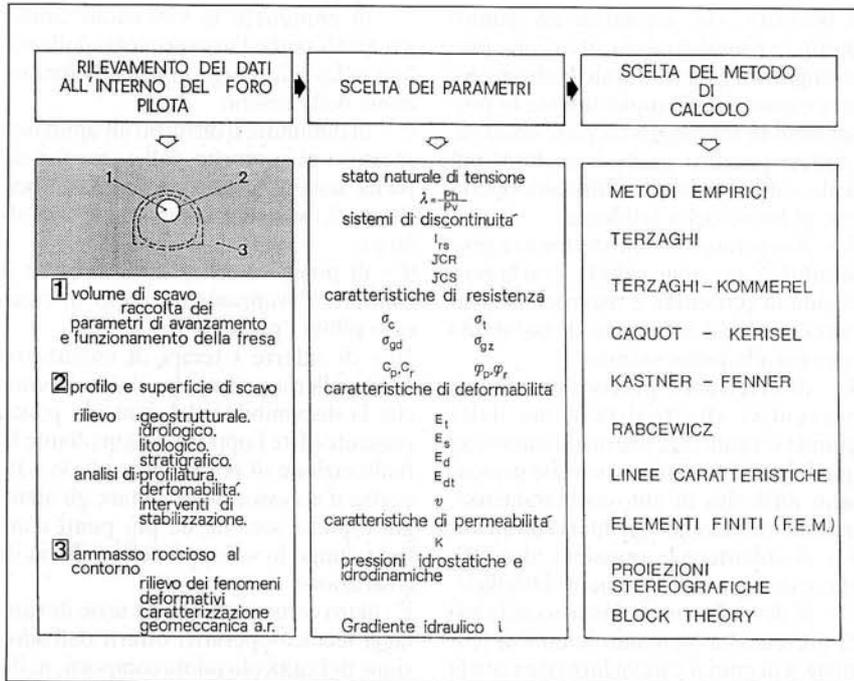


Fig. 10 - Metodo "RS": Progettazione mediante foro pilota.

Da un punto di vista *programmatico* l'esecuzione del foro pilota gioca un ruolo essenziale.

La richiesta di tempi minimi per l'impianto di cantiere e la possibilità di poter contare su produzione medie-elevate anche nel caso di superamento di accidenti tettonici, fanno sì che per gallerie di lunghezza dell'ordine di 5000-7000 m la completa realizzazione del foro pilota

possa rientrare negli usuali tempi d'impianto cantiere per l'avanzamento a piena sezione.

D'altra parte la presenza del foro pilota prima dell'inizio dei lavori di allargamento a piena sezione, permette di poter quantificare, in termini di estensione e di tempi, gli interventi che garantiranno la sicurezza operativa della fase d'allargamento, consentendo anche un programma ese-

cutivo degli allarghi stessi aderente alle reali condizioni dell'A.R.

In termini *contrattuali*, la presenza del foro pilota, potendo trattare il momento del progetto esecutivo alla stessa stregua di una qualsiasi altra opera di ingegneria, consente di eliminare, una volta per tutte ed in maniera radicale, il contenzioso che in genere si instaura fra Ente Appaltante e Impresa.

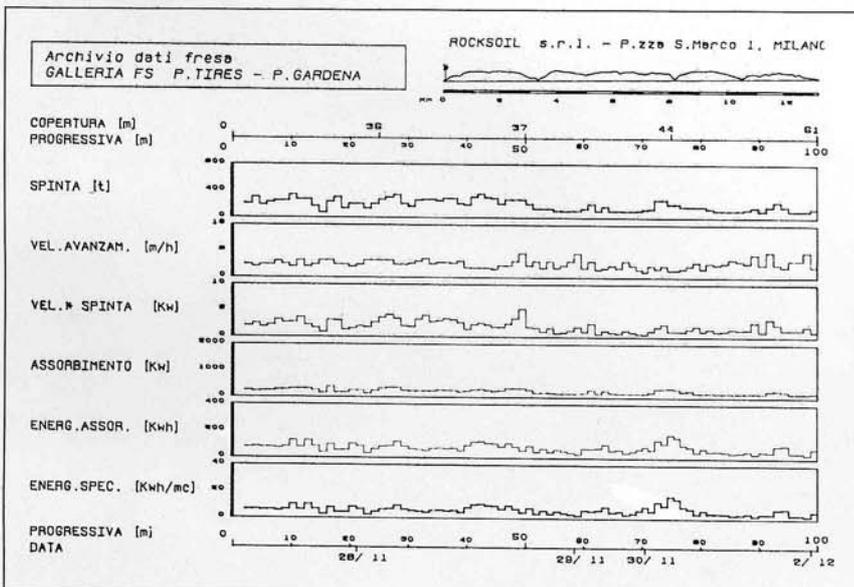
L'attuale orientamento delle Committenze è quello di scorporare l'esecuzione del foro pilota dall'appalto delle opere di allargamento, evitando in tal modo tutte le aree di rischio connesse ad un'offerta basata su di una conoscenza dell'A.R. incompleta e approssimativa.

In termini *economici*, si potranno registrare da un lato vantaggi "diretti" derivanti dal risparmio:

- sulla campagna geognostica di superficie (sondaggi verticali in asse galleria, geosismica, geoelettrica, ecc.);
- per il minore consumo di esplosivo;
- per le minori spese di ventilazione durante la costruzione;
- per l'ottimizzazione degli interventi di preconsolidamento, operati direttamente sulla zona interessata da particolari accidenti geologico-geotecnic;

dall'altro vantaggi "indiretti" dovuti al fatto di poter programmare in maniera aderente alla realtà tutte le operazioni e tutte le fasi di scavo della piena sezione con sicurezza quasi completa di rientrare, in termini di tempi tecnici e di spesa, entro i limiti previsti.

Fig. 11 - Esempio di "scheda tipo 1".



3 - CUNICOLO PILOTA COME MEZZO PER LA PROGETTAZIONE

Tra le diverse funzioni, in precedenza analizzate, alle quali può assolvere il cunicolo pilota "passante" nella realizzazione di una galleria, la funzione di gran lunga più importante e rivoluzionaria è di offrire, allora, la possibilità di progettare la galleria nel suo assetto definitivo come una qualsiasi altra opera di ingegneria e cioè in aderenza alla realtà; ciò significa che la galleria diventa un'opera programmabile con tutto ciò che ne deriva in termini contrattuali, di tempo e di costi.

Il cunicolo pilota "passante", utilizzato fino ad oggi solo come "mezzo per la costruzione" di gallerie, d'ora in poi potrà e verrà impiegato anche come

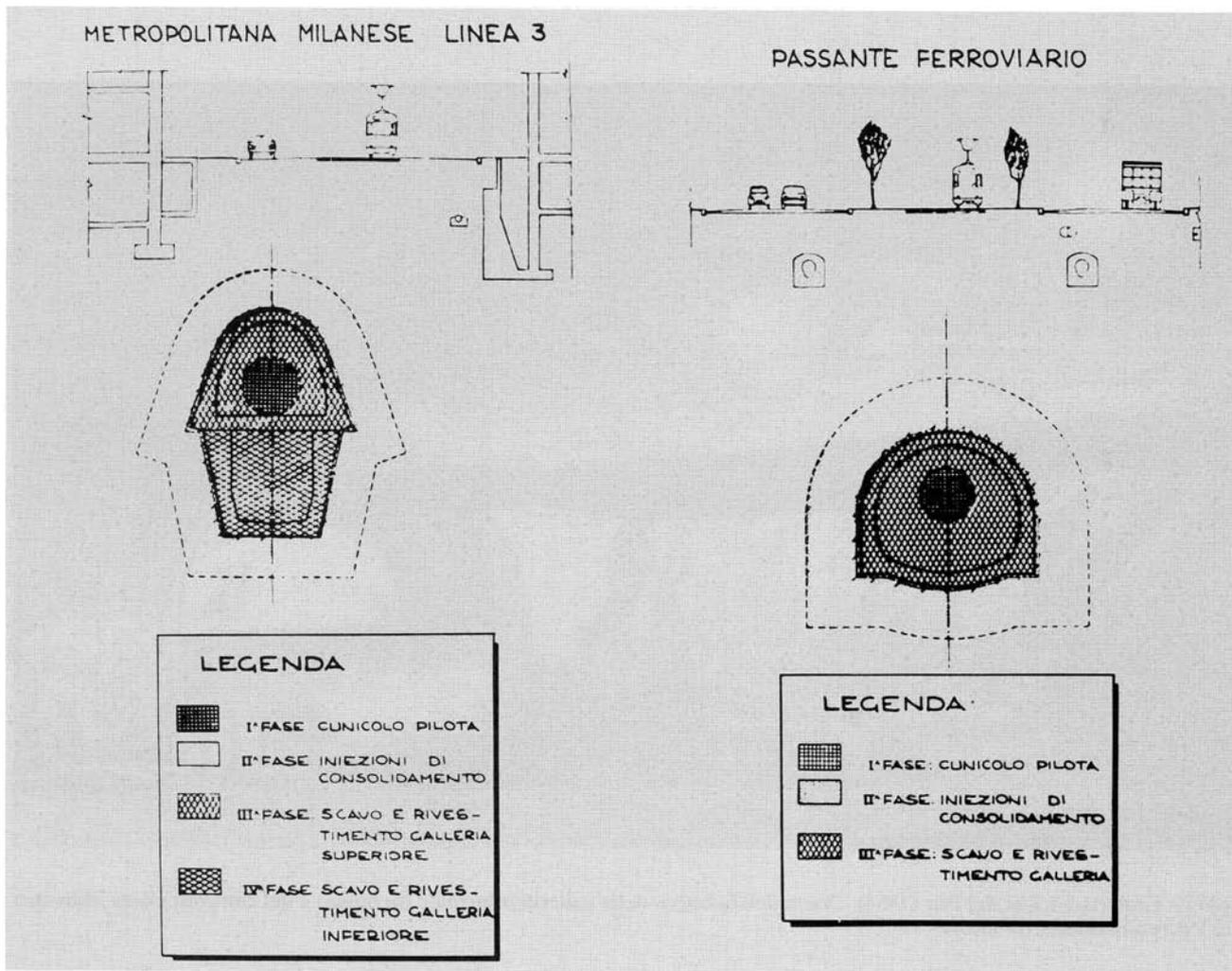


Fig. 7 - Schema delle fasi operative



Linea Metropolitana MM3 e Passante Ferroviario (Milano) Anno 1983/85

La costruzione delle gallerie di corsa della Linea 3 del Passante (date le particolari caratteristiche del terreno di Milano incapace di autosostenersi anche per brevi periodi), quando sia prevista l'esecuzione dello scavo a foro cieco, risulta di difficile realizzazione senza lo scavo di un cunicolo pilota attraverso il quale, con iniezioni, si possa consolidare preventivamente un adeguato spessore di terreno al contorno della sezione definitiva (Fig. 7).

Le tecnologie adottate per la realizzazione di questo cunicolo pilota sono essenzialmente due:

- un sistema convenzionale, che con-

◀ Foto 9 - Metropolitana Milanese, Linea 3 (1985) - Cunicolo pilota realizzato mediante consolidamento jet-grouting.

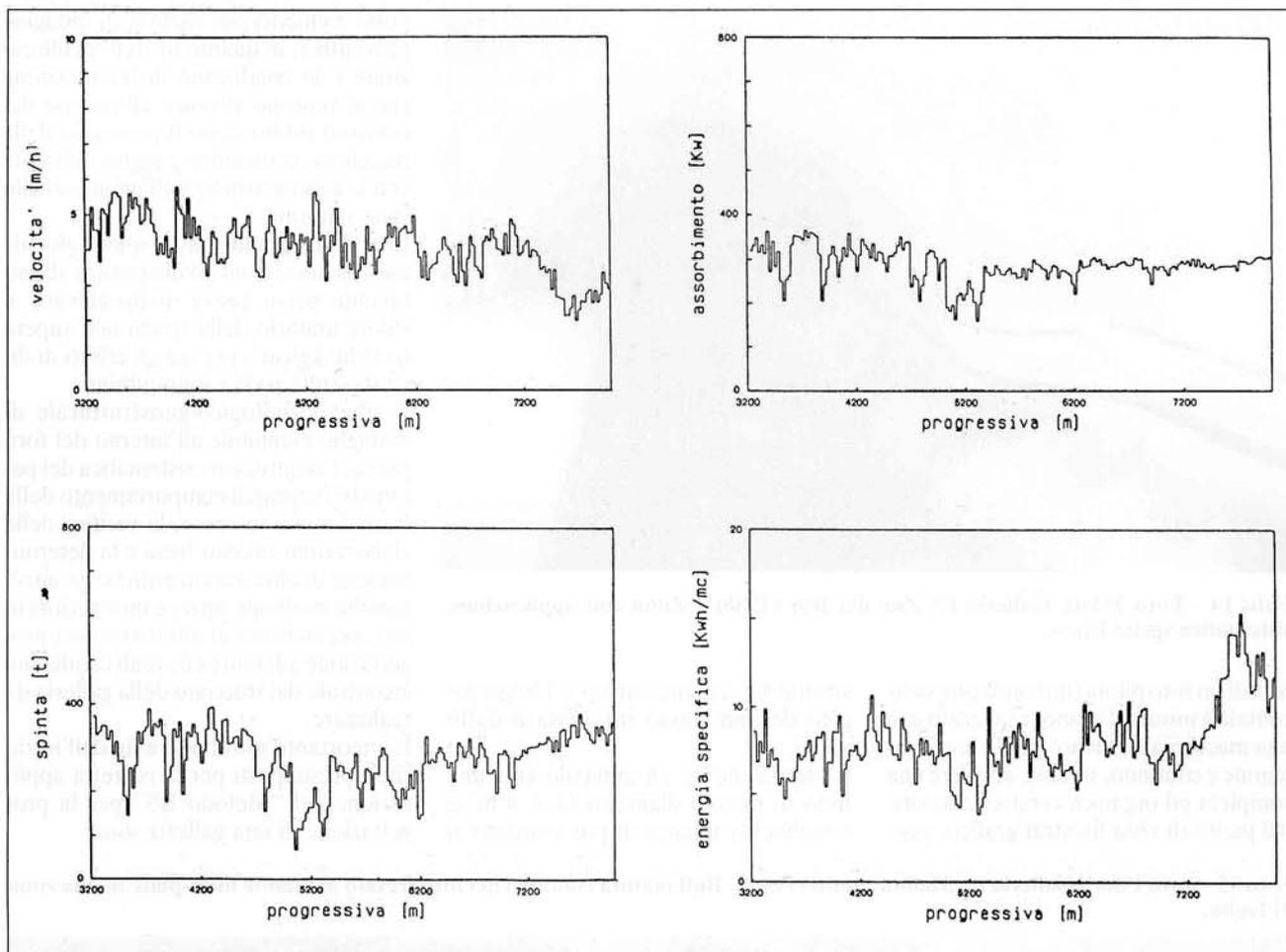
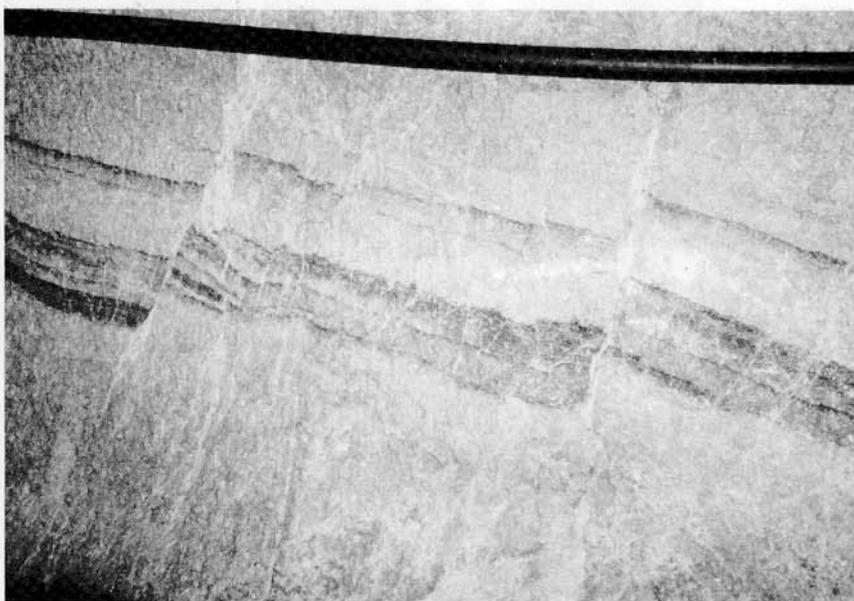


Fig. 12 - Esempio di quadro riassuntivo ottenibile dall'archivio dati-fresa.

“mezzo per la progettazione” producendo così, per le conseguenze che porterà nel campo delle grandi realizzazioni in sotterraneo, una svolta che, senza mezzi termini, è possibile definire storica. Si può allora parlare di nuova metodologia o di progettazione di una galleria con il “metodo del foro pilota”. Le basi del metodo sono state gettate da alcuni autori in occasione del Congresso sulle Grandi Opere Sotterranee 1986 e sono riprese in questa sede al fine di offrirne, alla luce anche di recenti esperienze, un inquadramento più organico. Il “Metodo RS” del foro pilota (Becchi-Calistri-Lunardi-Orsi, 1986) rappresenta, nel suo insieme di procedure, il primo tentativo di inquadramento del problema e si propone come una vera alternativa ai tradizionali metodi d'indagine finalizzati alla progettazione delle gallerie.

Mediante la raccolta e la successiva elaborazione dei dati ricavabili dall'aper-

Foto 13 - Foro Pilota Galleria Malborghetto (1986) - Segmentazione di strati, particolare dei rigetti.



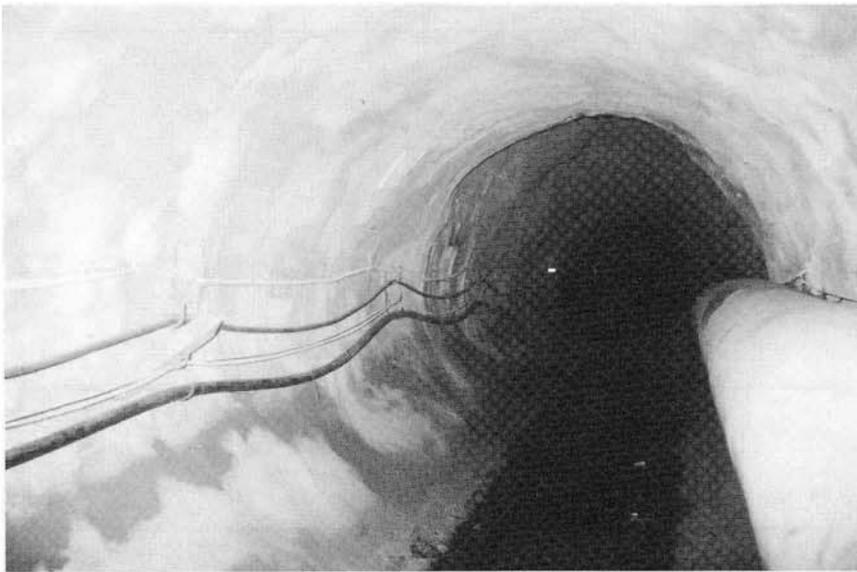


Foto 14 - Foro Pilota Galleria FS Zuc del Bor (1986) - Zona con applicazione sistematica spritz-beton.

tura di un foro pilota (un sondaggio orizzontale a misura d'uomo) realizzato con una macchina fresatrice per lo scavo integrale e continuo, si riesce ad avere una completa ed organica caratterizzazione dal punto di vista litostratigrafico, geo-

strutturale, geomeccanico e idrogeologico dell'ammasso interessato dallo scavo.

L'esecuzione di un cunicolo con una fresa di piccolo diametro (3 ÷ 4 m) è attualmente quanto di più avanzato si

possa richiedere ai metodi di indagine preventiva, in quanto lo stato di alterazione e la condizione di fratturazione che si possono rilevare all'interno del cunicolo subito dopo il passaggio della macchina, coincidono ragionevolmente con le caratteristiche dell'ammasso allo stato naturale.

Infatti, malgrado che la spinta globale esercitata sul fronte dalla testa di abbattimento possa essere molto elevata, il valore unitario della spinta non supera qualche kg/cm^2 , per cui gli effetti di disturbo sulla roccia sono minimi.

Il rilievo geologico-geostrutturale di dettaglio eseguibile all'interno del foro pilota, l'acquisizione sistematica dei parametri inerenti il comportamento della fresa durante lo scavo, la verifica delle elaborazioni sui dati fresa e la determinazione di altre caratteristiche geomeccaniche mediante prove e misurazioni in sito, permettono di effettuare una progettazione aderente alle reali condizioni incontrate dal tracciato della galleria da realizzare.

È importante sottolineare fin dall'inizio che i presupposti per la corretta applicazione del "Metodo RS" per la progettazione di una galleria sono:

Foto 15 - Foro Pilota Galleria FS Malborghetto (1986) - Bullonatura continua del foro fresato mediante liner-plate in una zona di faglia.



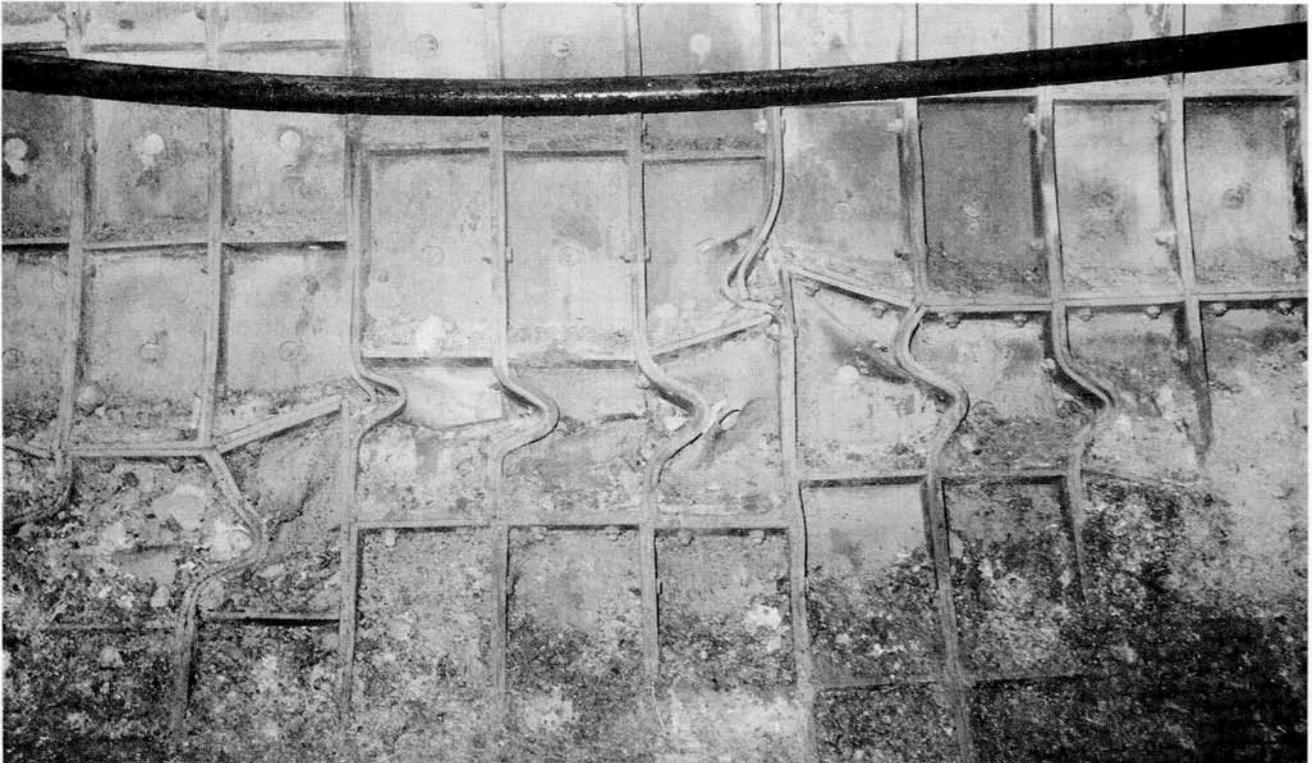


Foto 16 - Foro Pilota Galleria Fs Malborghetto (1986) - Forti deformazioni della blindatura per spinte elevate.

- l'impiego di una fresa ad abbattimento integrale e continuo opportunamente strumentata;
- terreni le cui caratteristiche geomeccaniche possono garantire, in termini di spazio e di tempo, un minimo di stabilità del foro fresato e velocità di avanzamento della macchina da medie ad elevate;
- la presenza del foro pilota lungo tutto lo sviluppo della galleria (cunicolo "passante").

L'apertura del foro pilota, dati i mezzi e le modalità di esecuzione, dà la possibilità di avere a disposizione una serie di metodologie di caratterizzazione che, considerate nel loro insieme, danno un quadro globale esauriente di tutti gli elementi necessari ad una progettazione esecutiva.

Nell'impostazione di tale tipo di progettazione i possibili elementi d'analisi sono tre (Fig. 9):

- 1 - il volume di scavo del foro pilota;
- 2 - la superficie ed il profilo di scavo del foro;
- 3 - l'ammasso roccioso al contorno.

Sulla base dei dati forniti dall'analisi di questi elementi e dall'osservazione diretta sul comportamento dell'A.R., sia

all'atto dello scavo, che per i periodi di tempo successivi durante i quali avviene l'evoluzione delle pareti perimetrali del foro per alterazione dovuta al contatto con l'atmosfera ed all'insorgere delle sovratensioni indotte dall'apertura del cavo, potranno poi essere individuati i sistemi di calcolo più adeguati per la verifica della stabilità della galleria in fase di allargamento e per il dimensionamento degli interventi di stabilizzazione e di contenimento delle pareti di scavo a breve e lungo termine (Fig. 10).

3.1 - Il volume di scavo

Il cunicolo pilota realizzato con una fresa ad attacco integrale è, a grande scala, l'equivalente di un sondaggio orizzontale eseguito a distruzione di nucleo.

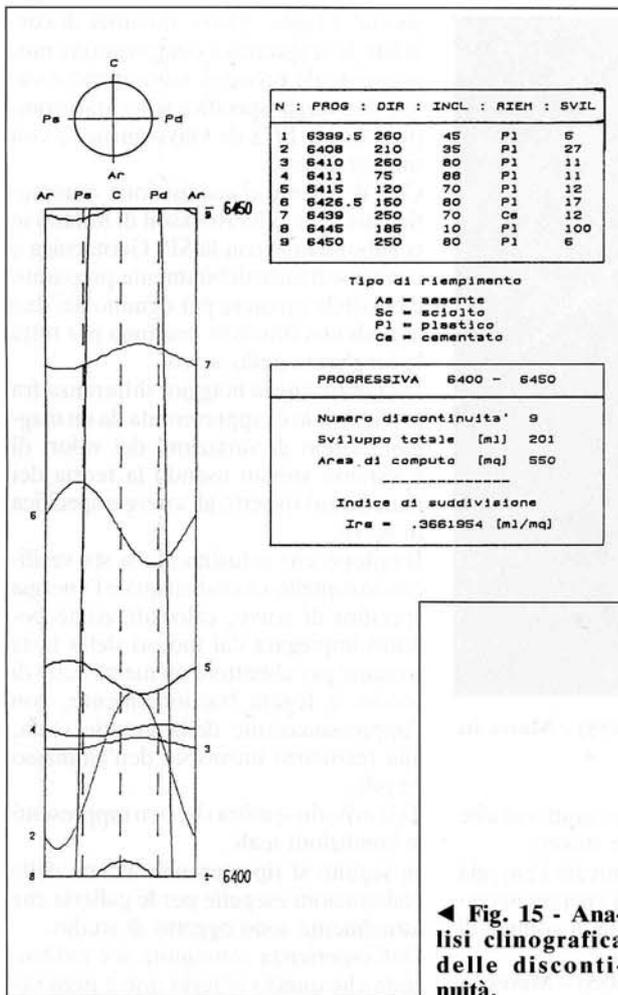
Dal momento che l'esame del materiale di risulta della fresatura può fornire solo scarse indicazioni, l'attenzione del progettista deve rivolgersi ad un aspetto ben più significativo: al lavoro compiuto dalla macchina sia per distruggere il nucleo di terreno competente sia per avanzare nel "mezzo" ammasso roccioso. Seguendo questa strada, si nota come la caratterizzazione geomeccanica della

roccia sottoposta all'azione di abbattimento dalla macchina fresatrice ad attacco integrale e continuo sia possibile tramite l'analisi dei parametri di avanzamento e di funzionamento della macchina stessa.

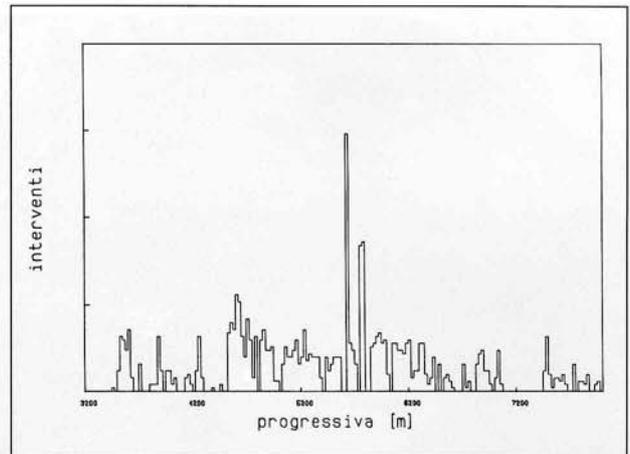
Gli studi fino ad ora compiuti sull'interazione roccia-fresa si sono rivolti per lo più alla qualificazione geomeccanica dell'A.R. mediante prove di laboratorio ed in sito, con il preciso scopo di definire la fresabilità di un terreno in riferimento ad un tipo o ad un altro di macchina.

Inizialmente i ricercatori hanno tentato la strada dell'analisi comparativa con la perforazione rotary, cercando di trasferire al campo dello scavo con fresa tutta l'esperienza ed i risultati ottenuti nel campo delle perforazioni. Nello sviluppo storico delle macchine ad abbattimento integrale e continuo il primo tentativo di correlare le prestazioni dei tunnel con qualche caratteristica della roccia, ha preso in esame essenzialmente prove di laboratorio quali la resistenza a rottura sotto compressione semplice e il contenuto in quarzo come indice di "abrasività" (Innaurato, Pelizza, 1968).

I parametri dedotti esclusivamente da prove di laboratorio non si sono rivelati

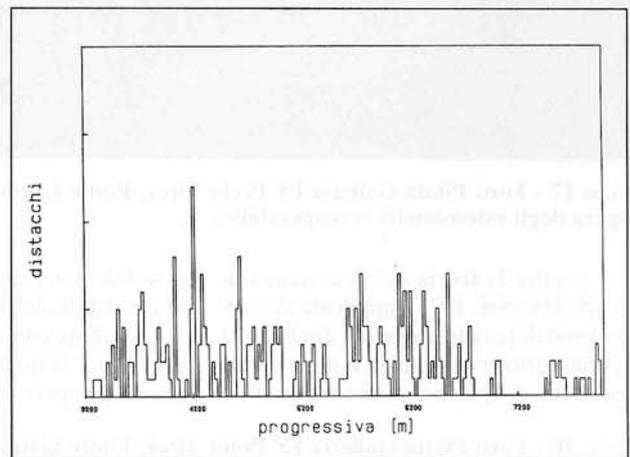


◀ Fig. 15 - Analisi clinografica delle discontinuità.



▲ Fig. 16

▼ Fig. 17



sabilità”, e si dà per certa, vista l’elasticità e l’adattabilità raggiunta dalle macchine ai vari tipi di terreno, la fattibilità dello scavo meccanizzato ed un suo sicuro rendimento.

Da qui deriva una diversa impostazione del problema dell’interazione roccia-fresa: fino ad ora si ricercava un indice di abbattibilità della roccia, partendo dalla conoscenza delle caratteristiche meccaniche di quest’ultima, oggi l’obiettivo può essere quello di sfruttare le prestazioni stesse della macchina, unitamente ad altre informazioni, allo scopo di caratterizzare l’ammasso roccioso per la progettazione esecutiva della futura galleria: l’impostazione del problema nel “Metodo RS” viene così praticamente ribaltata.

Partendo dal dato di fatto che, grazie al progresso tecnologico, le frese hanno subito una profonda evoluzione, potendo oggi affrontare sia le rocce più dure sia, con le dovute cautele, anche formazioni che non sempre garanti-

scono la stabilità del cavo, si è ipotizzato di poter utilizzare la fresa stessa come “elemento sensibile” atto a differenziare le zone a diversa resistenza geomeccanica, pur nei limiti e con le precisioni proprie della grande scala dell’ammasso.

Attraverso l’analisi e l’elaborazione delle registrazioni continue dei parametri di funzionamento e di avanzamento della fresa è possibile avere una documentazione precisa e oggettiva di ciò che la macchina incontra durante le sue fasi di scavo; variazioni di comportamento della macchina denunciano mutamenti nella situazione geostrutturale e geomeccanica (a meno di variazioni dovute a problemi tecnici propri della macchina stessa che sono facilmente rilevabili e identificabili).

In Fig. 11 si vede un’esempio di output grafico dell’archivio dati fresa (“scheda tipo 1”), in cui sono riportati tutti i valori puntuali dei parametri propri del funzionamento della macchina (memoriz-

zati direttamente in cantiere con un sistema di acquisizione automatico) oltre ad alcune elaborazioni.

In Fig. 12 invece è riportato un quadro da cui si può notare come l’archivio automatizzato permette anche di avere una visione completa sul comportamento della fresa per tratte più o meno lunghe o su tutta la lunghezza della galleria; oltre alle velocità d’avanzamento istantanea, all’assorbimento e alla spinta alla testa è riportato anche l’andamento dell’energia specifica, parametro la cui utilità verrà chiarita di seguito. L’ipotesi d’uso della fresa nel “Metodo RS” è quindi quello di riuscire a stimare in modo continuo la resistenza dell’ammasso in funzione dei parametri d’avanzamento e di funzionamento della fresa stessa. Da un’attenta analisi degli studi effettuati fino ad oggi, ed in considerazione della nostra esperienza, si è ritenuto possibile per la determinazione della resistenza d’ammasso percorrere due strade distinte:

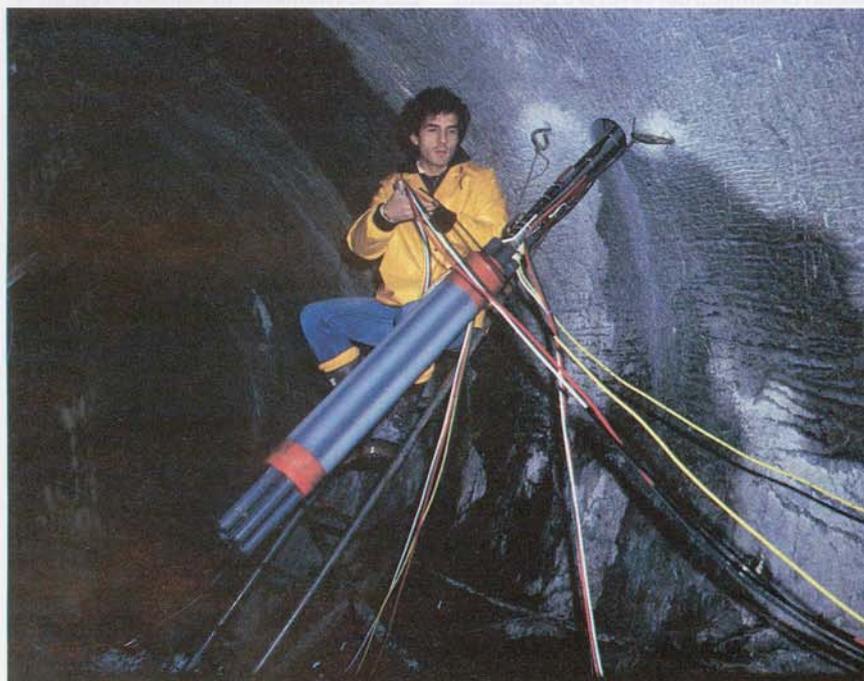


Foto 17 - Foro Pilota Galleria FS Prato Tires, Ponte Gardena (1985) - Messa in opera degli estensimetri «recuperabili».

1 - seguire la teoria dei penetratori lineari (Mancini, 1975), applicata al meccanismo di penetrazione dei dischi nella roccia attraverso la quale note le caratteristiche di spinta e di avanzamento è

possibile determinare le caratteristiche di resistenza della roccia stessa;
2 - adottare come riferimento l'energia specifica: "la quantità di energia necessaria a rompere una unità di volume di

Foto 18 - Foro Pilota Galleria FS Prato Tires, Ponte Gardena (1985) - Messa in opera degli estensimetri «recuperabili».



roccia" (Teale, 1965); tentativi di correlare la resistenza a compressione monoassiale da prove di laboratorio e valori di energia specifica sono stati compiuti fin da 1972 da Gaye anche se con finalità diverse.

Con il sistema d'acquisizione automatica studiato della Rocksoil di Milano in collaborazione con la SIS Geotecnica e con un software debitamente preparato è possibile ottenere per ognuno dei due metodi una funzione continua per tutta la lunghezza dello scavo.

Da notare che la maggior differenza fra le due strade è rappresentata da un maggior campo di variazioni dei valori di resistenza stimati usando la teoria dei penetratori rispetto all'energia specifica di scavo.

Il criterio che attualmente si sta verificando è quello secondo il quale l'energia specifica di scavo, calcolata come potenza impiegata dai motori della testa fresante per abbattere un metro cubo di roccia, è legata funzionalmente, con l'approssimazione della grande scala, alla resistenza intrinseca dell'ammasso (σ_{gd}).

Tale criterio sembra che ben rappresenti le condizioni reali.

In seguito si riporteranno alcune delle elaborazioni eseguite per le gallerie che attualmente sono oggetto di studio.

Dall'esperienza conseguita si è evidenziato che questo criterio non è però verificato in terreni caratterizzati da forte alterazione o fratturazione quali paleofrane, paleovalvei o zone di faglia nelle quali la testa fresante impiega la quasi totalità della sua potenza non tanto nell'azione di scavo ma in operazioni quali il brandaggio del fronte, la raccolta e l'allontanamento del materiale di risulta o nel superamento di situazioni molto particolari.

3.2 - Superficie e profilo di scavo del foro pilota

La superficie perimetrale del foro pilota, per il ridotto disturbo prodotto dall'azione della fresa, può considerarsi un libro aperto a scala naturale, su cui si possono leggere le vicende stratigrafiche, litologiche, strutturali, tettoniche ed idrogeologiche dell'ammasso roccioso (Foto 12, 13).

Il metodo del foro pilota prevede una raccolta ed una archiviazione automatica di tutti i dati connessi con:

- indice di fratturazione;

- giacitura dei piani di discontinuità;
- geometria delle fessure;
- caratteristiche del materiale di riempimento;
- scabrezza e resistenza delle superfici a contatto;
- rilasci di roccia;
- interventi di consolidamento;
- venute d'acqua;
- caratteristiche fisico-meccaniche della matrice rocciosa;
- tipo litologico;
- carico litostatico.

Per l'archiviazione si è messo a punto una scheda di rilievo dati nella quale è possibile sintetizzare ogni elemento di spicco e che rende praticamente immediato il trasferimento dei dati stessi sull'elaboratore (Fig. 13). Con il software, che crea per ogni galleria l'archivio dei dati geologici avendo in memoria anche tutte le caratteristiche geometriche del tracciato, è possibile avere in output delle schede su cui in modo chiaro e sintetico sono riportati tutti i dati del rilievo. Un esempio di tale uscita grafica ("scheda tipo 2") e la legenda dei dati che attualmente è possibile archiviare è riportato in Fig. 14.

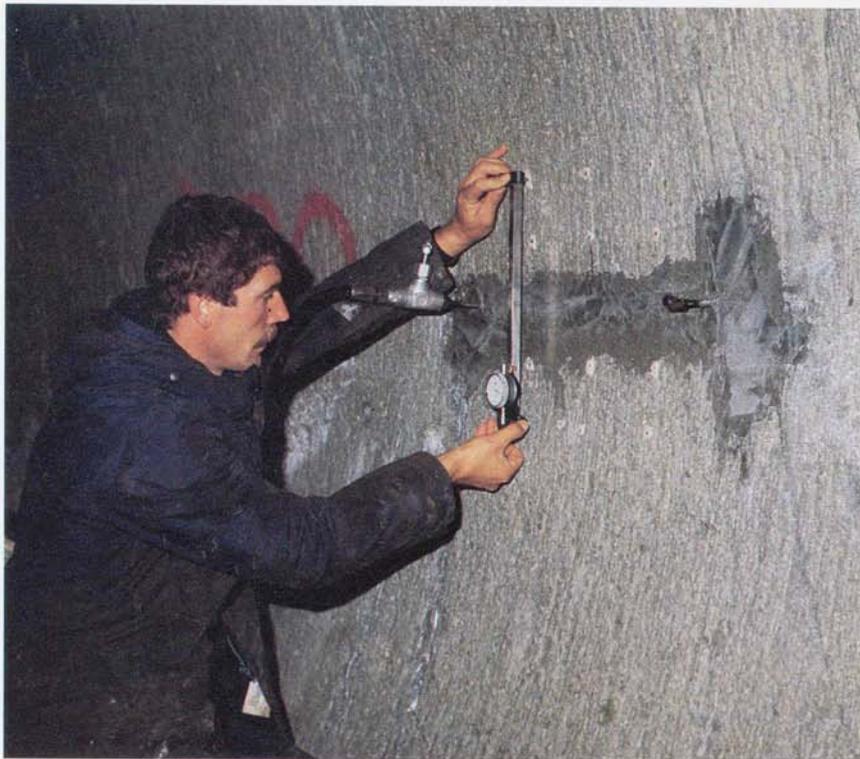
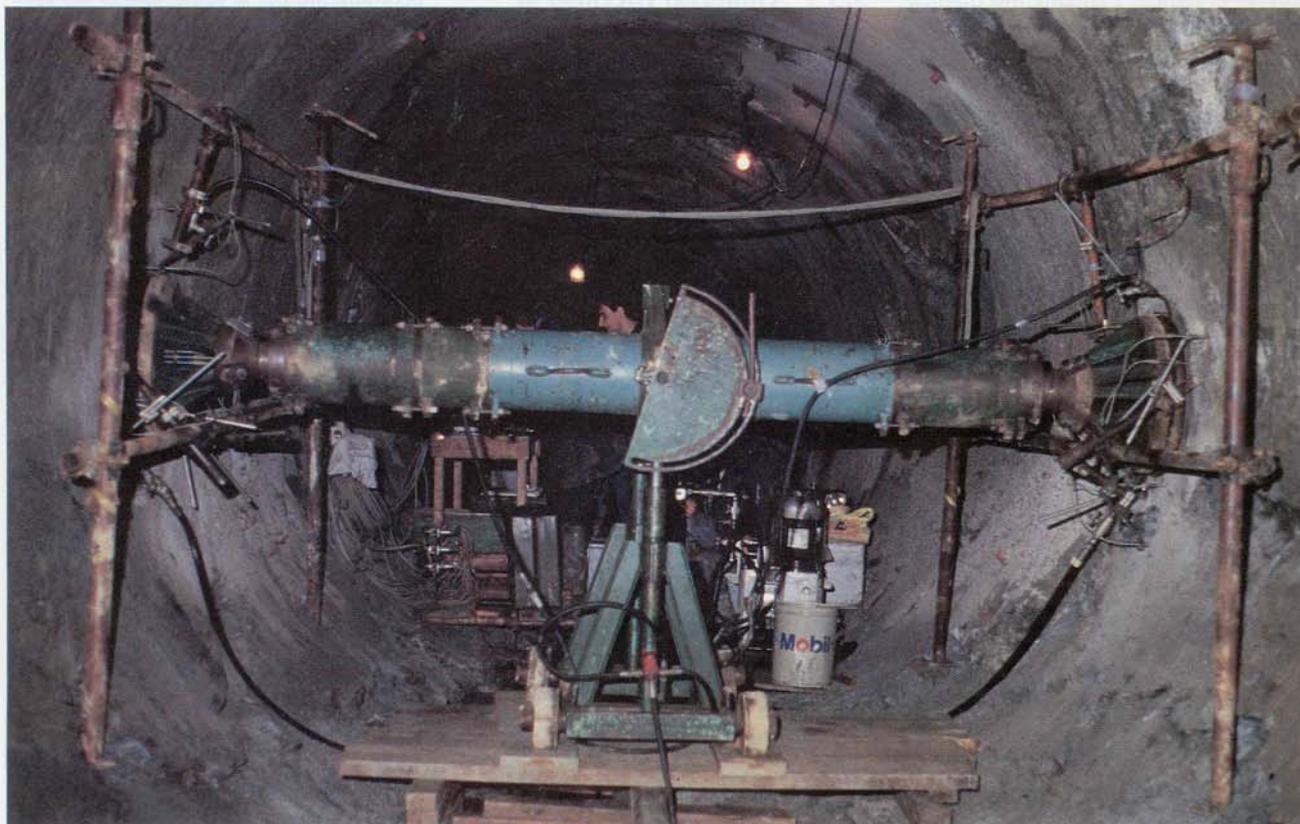


Foto 19 - Foro Pilota Galleria FS Prato Tires, Ponte Gardena (1985) - Prove in sito.

Foto 20 - Foro Pilota Galleria FS Prato Tires, Ponte Gardena (1985) - Prove in sito.



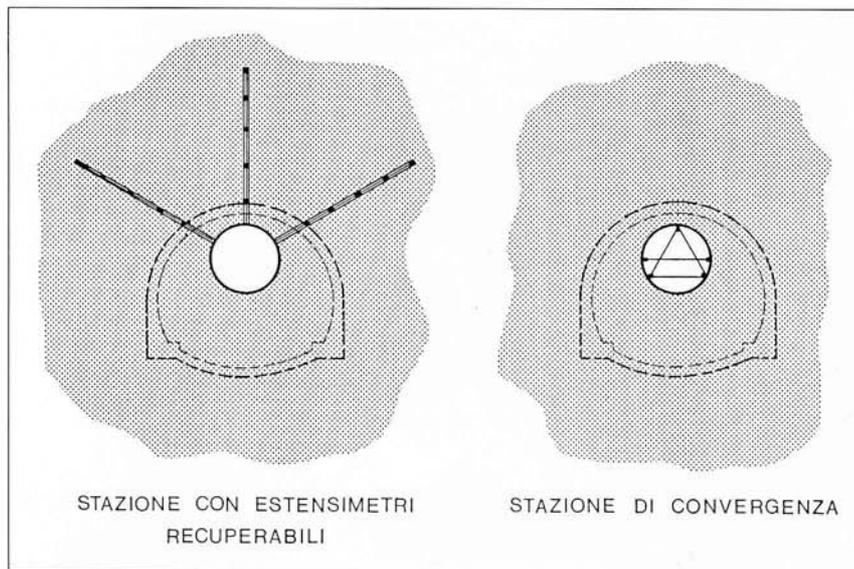


Fig. 18 - Rilievo dei fenomeni deformativi profondi e superficiali.

L'archivio automatizzato consente di avere la piena disponibilità e gestibilità dei dati rilevati in galleria; è possibile eseguire automaticamente il calcolo dell'indice di suddivisione $Irs [ml/m^2]$ su una tratta di cunicolo qualunque (vedi Fig. 15) oltre a poter disporre di schede su cui vengono riassunti, per tratti di galleria in esame, l'andamento qualitativo di tutti i parametri di rilievo, ad esempio in Figg. 16 e 17 sono riportati il tipo di andamento dei distacchi e degli interventi.

La conoscenza dei tipi di interventi di stabilizzazione (Foto 14 e 15), la localizzazione sul contorno del cavo del fuorisagoma e dei fenomeni di instabilità (Foto 16) permette poi di formulare, per ogni tratta di galleria, attendibili ipotesi progettuali.

3.3 - Ammasso roccioso al contorno del foro pilota

Lo studio del comportamento allo scavo dell'A.R. al contorno del foro pilota,

condotto sia in fase di avanzamento della fresa sia una volta ultimato il traforo, permette di integrare il quadro geologico-geomeccanico fornito dai rilevamenti descritti ai punti 3.1 e 3.2 relativi da un lato all'abbattimento meccanizzato del nucleo (δdg) dall'altro alla profilatura del cavo, agli interventi di stabilizzazione, alla situazione geostutturale, ecc.

La possibilità di accedere attraverso il cunicolo pilota a qualsiasi punto del tracciato, agendo su porzioni di ammasso praticamente indisturbate grazie al tipo di abbattimento adottato, offre l'opportunità di cogliere con estrema chiarezza la risposta dell'A.R., in termini di deformabilità, alla mutata situazione dello stato tensionale al contorno del cavo (Fig. 18).

Le deformazioni superficiali del profilo di scavo sono rilevabili, durante la loro evoluzione nel tempo e nello spazio, attraverso le letture di convergenza tra i riferimenti fissati alle pareti di scavo.

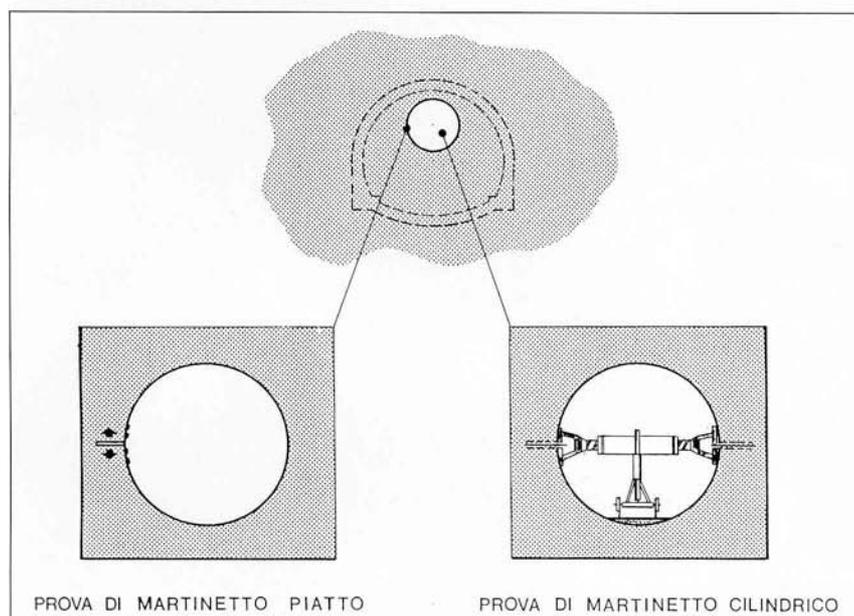
Le deformazioni profonde, all'interno dell'A.R., sono invece rilevabili attraverso il posizionamento in sondaggi radiali a partire dal cunicolo di "estensimetri recuperabili" (Foto 17 e 18). Con questo tipo di strumento, studiato appositamente per le applicazioni del foro pilota, è possibile seguire l'evoluzione dei fenomeni deformativi interni all'ammasso, dal momento dell'apertura del cunicolo, all'apertura degli allarghi fino al getto dei rivestimenti definitivi.

La caratterizzazione geomeccanica dei diversi tipi litologici, ben identificabili lungo le superfici di scavo, viene poi completata attraverso l'esecuzione di prove di laboratorio, eseguite su campioni prelevati in sondaggi radiali e da prove in sito di tipo tradizionale, quali (Fig. 19):

- prove di martinetto piatto in parete per l'identificazione e la lettura degli stati di coazione al contorno del cavo (Foto 19);
- martinetto cilindrico per la determinazione dei moduli di deformazione totale e di elasticità d'ammasso (Foto 20).

A ciò si accompagna l'osservazione diretta e il rilevamento dei fenomeni di rottura immediata o differita al contorno di scavo (colpi di tensione, flambage, estrusione di materiale d'interstrato ecc.).

Fig. 19 - Caratterizzazione geomeccanica dell'ammasso roccioso.



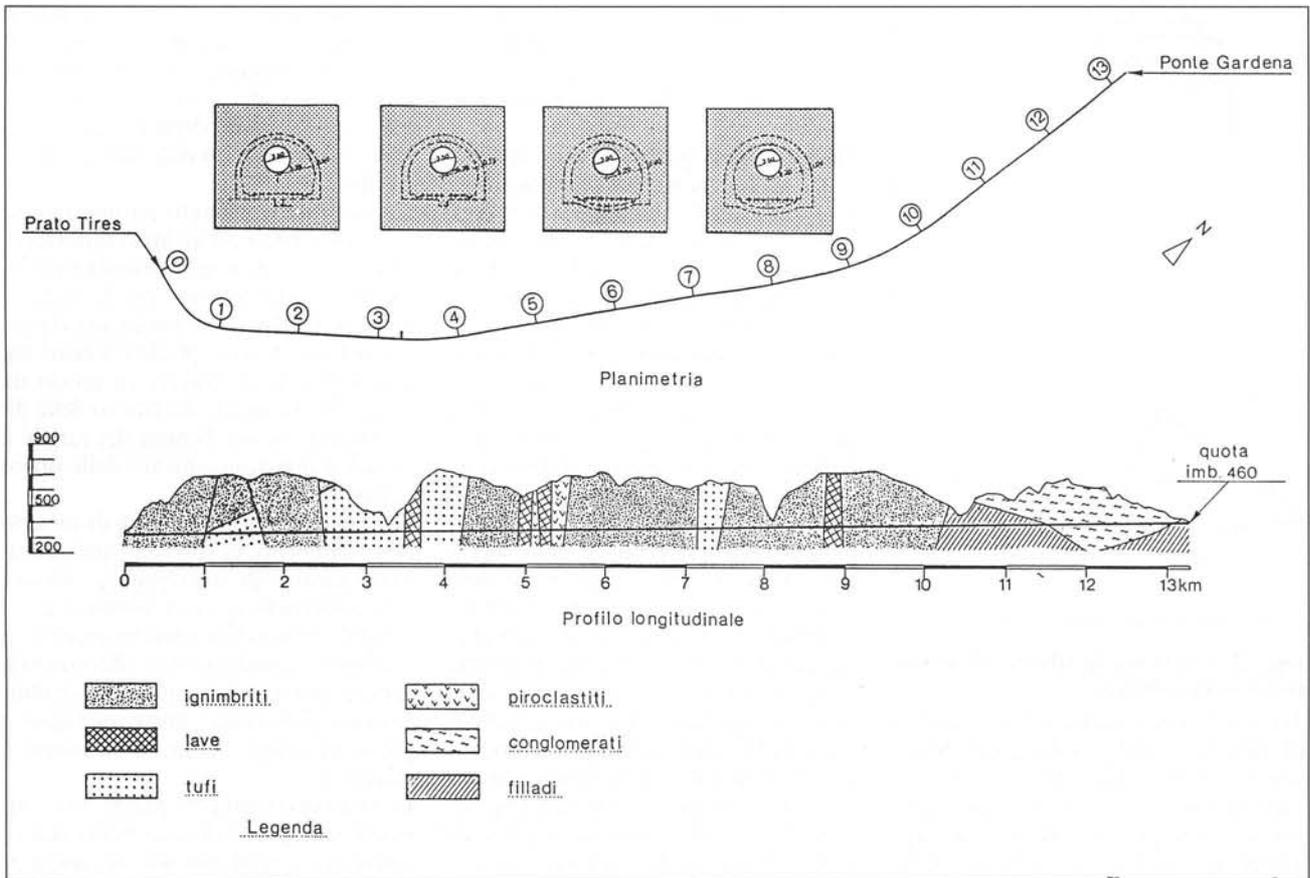


Fig. 20 - Linea FS Verona - Brennero - Variante Prato Tires - Ponte Gardena.

3.4 - Aspetti progettuali

Abbiamo visto come la raccolta sistematica dei parametri di funzionamento della fresa in fase di scavo possa permettere la produzione di "schede tipo 1" (Fig. 11), dalle quali, mediante opportune elaborazioni, sembra possibile ricostruire l'andamento della resistenza d'ammasso (σ_{gd}) dei diversi litotipi interessati dal tracciato del cunicolo pilota. D'altra parte si è constatato come il rilevamento di dettaglio e continuo del profilo e della superficie di scavo in termini litostratigrafici, strutturali, di tipologie, di instabilità e di interventi di stabilizzazione porti alla compilazione di "schede tipo 2" (Fig. 14), dalle quali, attraverso elaborazioni, si possono ricavare diagrammi di classificazione dell'ammasso roccioso in categorie di comportamento ("schede tipo 3") che, sulla base di recenti esperienze (Becchi, Calistri, Lunardi, Orsi 1986), risulta essere molto simile a quello della resistenza d'ammasso σ_{gd} fornita dalle "schede tipo 1".

La caratterizzazione geomeccanica, ottenuta attraverso prove in sito all'interno del foro pilota, e le prove di laboratorio completano poi il quadro generale, permettendo di attribuire alle diverse categorie di comportamento individuate attraverso le "schede tipo 2" quei parametri geotecnici (σ_{gd} , σ_f , σ_t , E_t , E_d , ecc.) necessari per operare in fase di progettazione la diagnosi dei carichi, la previsione dei fenomeni deformativi, la definizione degli interventi di contenimento del cavo a breve e a lungo termine in piena aderenza alla realtà.

4 - IL CUNICOLO PILOTA COME MEZZO DI PROGETTAZIONE E COSTRUZIONE: APPLICAZIONI

Bisogna risalire agli ultimi mesi del 1984 per trovare la prima applicazione, prevista direttamente nel contratto nell'ambito delle Prestazioni Integrate, di foro pilota finalizzato alla progettazione esecutiva di una galleria: si tratta della Gal-

leria Ferroviaria di variante fra Prato Isarco e Ponte Gardena (13.200 m) sulla linea Verona-Brennero.

Da quel momento si è avuta una proliferazione di casi di applicazioni analoghe in tutta Italia.

Per meglio documentare quanto esposto nei paragrafi precedenti, in merito al cunicolo pilota come mezzo di progettazione, si ritiene utile esporre alcune esperienze riportate durante la realizzazione delle gallerie ferroviarie Prato Tires-Ponte Gardena, Malborghetto e Caponero.

4.1 - Galleria Prato Tires-Ponte Gardena

Quest'opera, la cui impostazione costruttiva e progettuale del tutto innovativa è stata, su proposta del Consorzio Comer, sostenuta e portata avanti con molta lungimiranza dall'allora Direttore della 2ª Unità Speciale ing. Carlo Focacci in collaborazione con l'ing. Luigi Montanari, rappresenta la variante dell'attuale tracciato della linea Verona-Brennero fra le stazioni di Prato

OPERE IN SOTTERRANEO

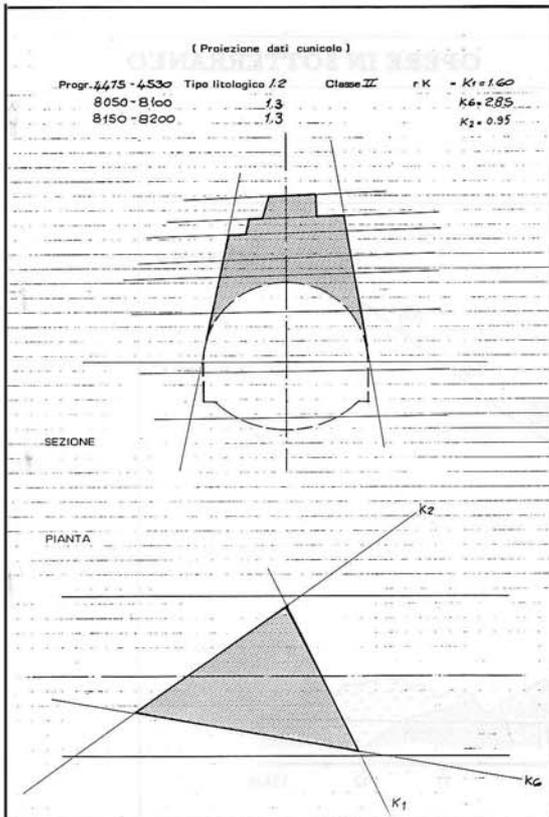


Fig. 21 - Schema di rilascio di masse rocciose in galleria.

Tires e Ponte Gardena (l'andamento planimetrico ed il profilo longitudinale sono riportati in Fig. 20).

I lavori di scavo del foro pilota, passante per uno sviluppo complessivo di circa 13.200 m, iniziati nel mese di novembre

del 1984, sono terminati nel giugno 1986. La costruzione è affidata al Consorzio Comer e la progettazione definitiva ed esecutiva alla Società Rocksoil di Milano.

Lungo il tracciato si sono alternate, per tratte più o meno estese, ignimbriti, lave, tufi, conglomerati e filladi in tutte le loro varie facies proprie del substrato roccioso, che caratterizza il versante sinistro dell'Isarco, interessato dal tracciato della galleria in variante.

Durante lo scavo del foro pilota non sono state riscontrate particolari difficoltà; la produzione media rispetto ai giorni effettivi di scavo, considerando l'intero corso dei lavori, è stata di circa 40 m/g con una produzione massima di 76 m.

L'analisi poi del "profilo e della superficie di scavo" del foro pilota ha dato informazioni molto utili ai fini della determinazione degli schemi progettuali. A causa delle caratteristiche intrinseche di resistenza dei materiali, a fronte di modeste coperture, i fenomeni di instabilità ricorrenti in cunicolo sono riconducibili solo a distacchi di tipo gravitativo, prodotti per lo più dall'intersezione di piani di discontinuità, presenti in più sistemi, con la superficie di scavo.

permesso molteplici verifiche e controlli in tempi estremamente contenuti. In Fig. 21 sono riportati esempi di schemi di proiezione per i solidi di carico gravanti sulla sezione definitiva della galleria estrapolati dai dati rilevati in cunicolo.

È stato messo a punto un programma che, riferendosi all'archivio automatizzato dei dati geologici (scheda tipo 2), individua direttamente, per le tratte di galleria desiderate, la tipologia e il peso dei solidi di carico predeterminati dai sistemi di discontinuità in modo da avere, direttamente dal rilievo delle discontinuità stesse, l'entità dei carichi e quindi il dimensionamento delle opere definitive di sostegno.

Nell'ambito del programma di misurazioni e di prove in sito sono state effettuate misure di convergenza, misure estensimetriche con estensimetri recuperabili, prove di martinetto piatto e di martinetto cilindrico oltre alla normale serie di prove di laboratorio di identificazione geotecnica: prove di taglio e prove di compressione monoassiale e triassiale.

Lo stato di coazione in parete foro, misurato con prove di martinetto piatto, denuncia, con riferimento ai carichi litostatici in gioco, per l'A.R. una decisa condizione di elasticità.

Le misure di convergenza hanno fatto registrare generalmente spostamenti massimi dell'ordine di alcuni decimi di millimetro, confermando il fatto che l'ammasso al contorno dello scavo risulta essere in campo elastico. Solo in alcuni punti, ed in modo particolare attorno alla progr. 5000, dove sono presenti piroclastiti molto alterate, si sono registrate convergenze dell'ordine di 5 cm.

Nella Fig. 22 è riportato l'andamento delle resistenze a compressione d'ammasso calcolata attraverso i parametri fresa; come si può osservare i valori in generale sono compresi tra i 150 ed i 300 kg/cm², escludendo il tratto di ignimbriti grigio-verdi granulari tra le progr. 7400 ÷ 8700, in cui si ha un aumento non indifferente della resistenza d'ammasso con un valore medio di circa 400 kg/cm² e picchi massimi di 600 ÷ 700 kg/cm². La zona a minor resistenza media (circa 200 kg/cm²) è quella che va da progressiva 10000 circa fino a progressiva 13200, una tratta caratterizzata da litotipi filladici e conglomeratici.

Un interessante confronto, che conferma l'attendibilità delle ipotesi di base

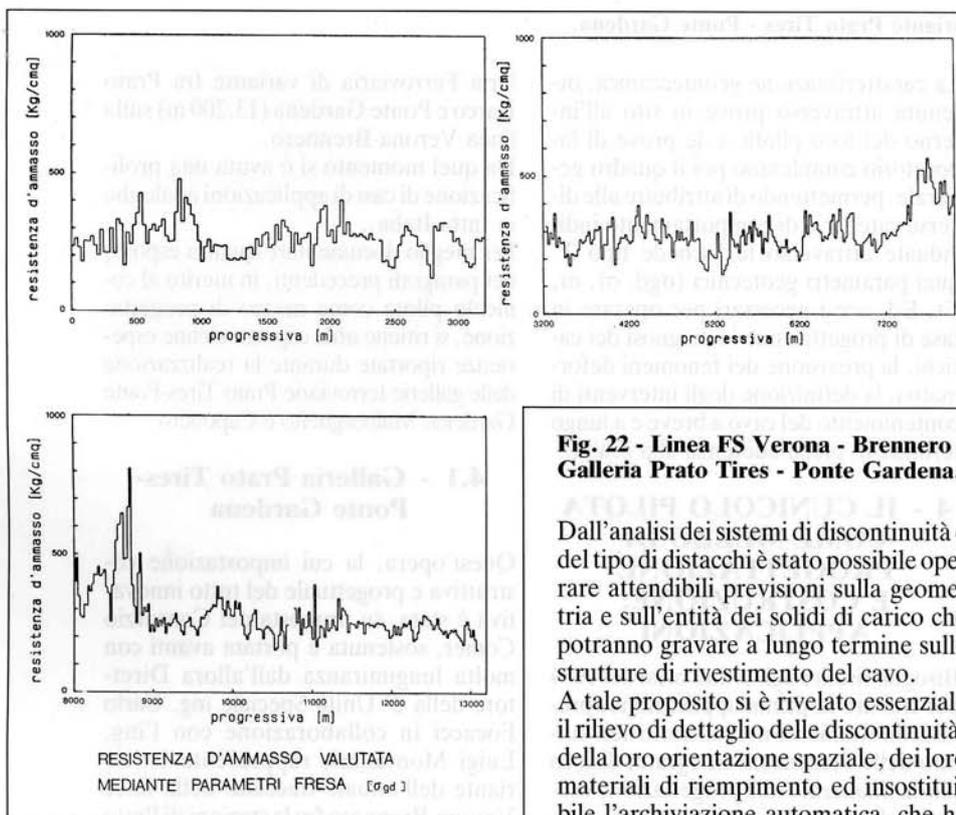


Fig. 22 - Linea FS Verona - Brennero - Galleria Prato Tires - Ponte Gardena.

Dall'analisi dei sistemi di discontinuità e del tipo di distacchi è stato possibile operare attendibili previsioni sulla geometria e sull'entità dei solidi di carico che potranno gravare a lungo termine sulle strutture di rivestimento del cavo.

A tale proposito si è rivelato essenziale il rilievo di dettaglio delle discontinuità, della loro orientazione spaziale, dei loro materiali di riempimento ed insostituibile l'archiviazione automatica, che ha

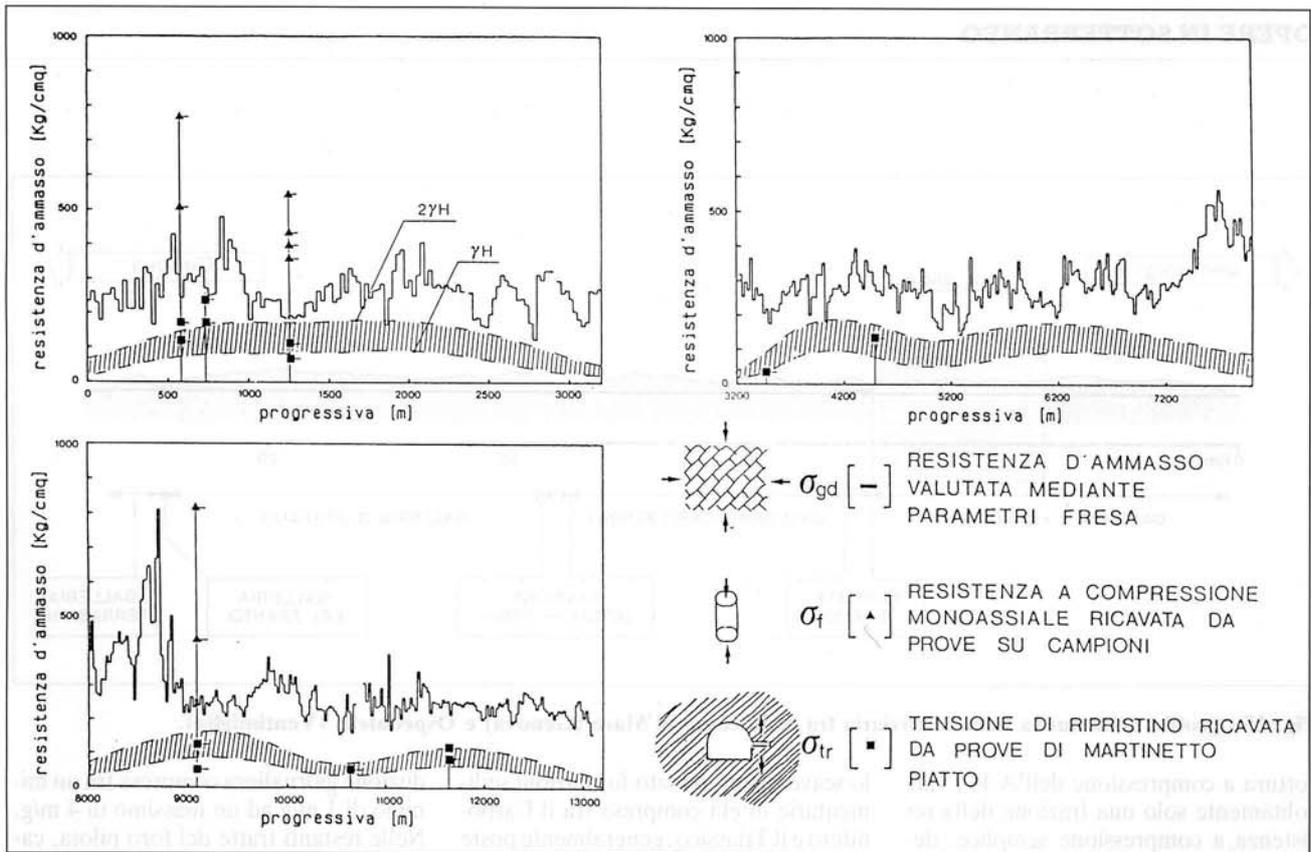


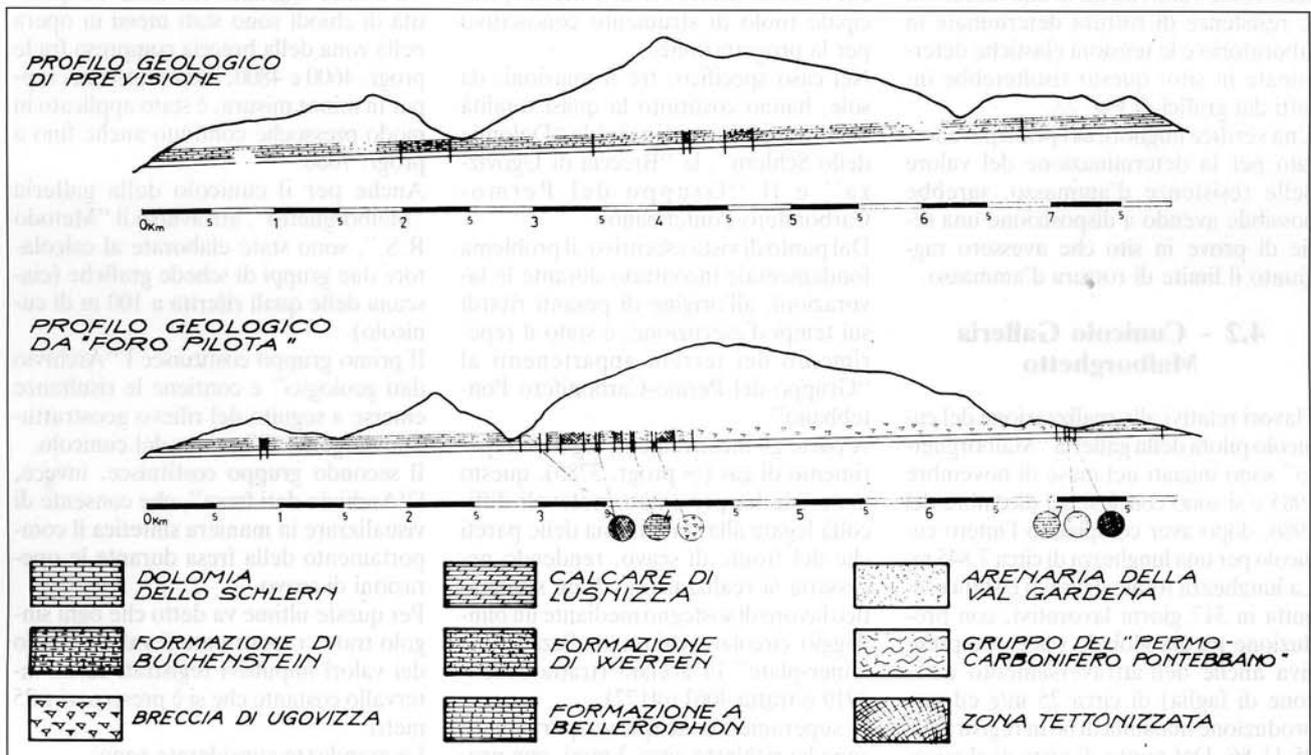
Fig. 23 - Linea FS Verona - Brennero - Galleria Prato Tires - Ponte Gardena.

del "Metodo RS" del foro pilota, è rappresentato nella Fig. 23, in cui sono riportati, sui grafici continui della resistenza d'ammasso calcolata con i para-

metri della fresa (σ_{gd}), i valori di resistenza determinati su campioni in laboratorio e le tensioni di ripristino determinate durante le prove di martinetto

piatto all'interno del foro pilota. Come noto la resistenza d'ammasso σ_{gd} sempre un parametro di difficile determinazione, che rappresenta il limite di

Fig. 24 - Galleria Malborghetto: raffronto fra il profilo geologico di previsione e quello reale da "foro pilota".



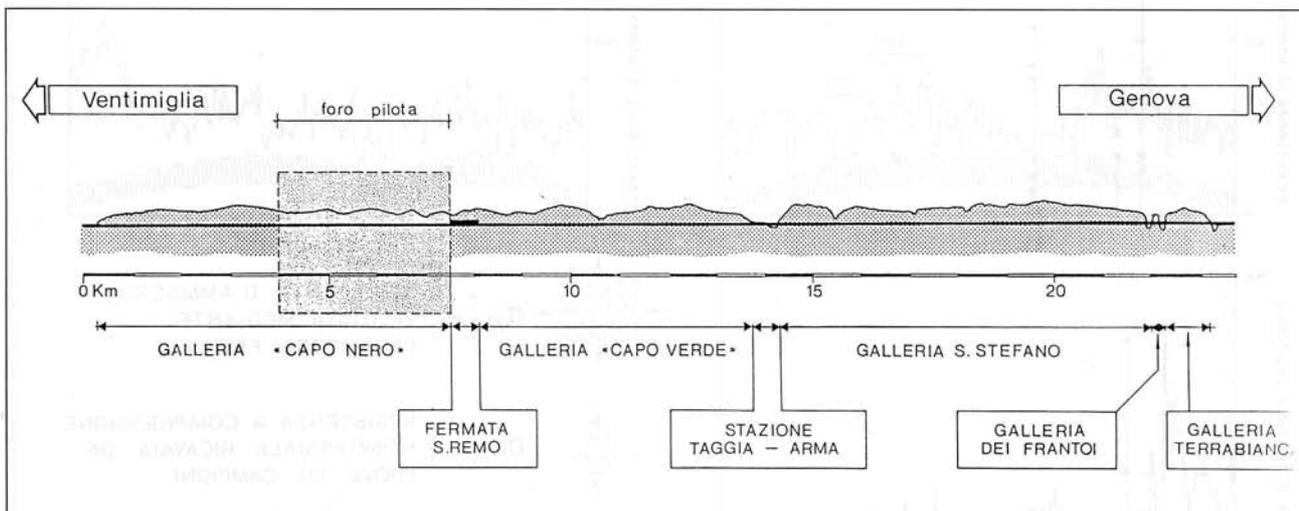


Fig. 25 - profilo della nuova linea ferroviaria fra S. Lorenzo al Mare (Genova) e Ospedaletti (Ventimiglia).

rottura a compressione dell'A.R., vale solitamente solo una frazione della resistenza a compressione semplice, determinata in laboratorio su campioni appartenenti allo stesso litotipo.

Le tensioni di ripristino sono invece contenute in campo elastico non avendo mai portato, con il martinetto, la roccia al contorno della zona di prova oltre il limite di rottura.

Ne consegue che la σ_{gd} , determinata con il "Metodo RS", dovrebbe collocarsi come valori ad un livello medio fra le resistenze di rottura determinate in laboratorio e le tensioni elastiche determinate in sito: questo risulterebbe infatti dai grafici di Fig. 23.

Una verifica migliore del principio adottato per la determinazione del valore delle resistenze d'ammasso, sarebbe possibile avendo a disposizione una serie di prove in sito che avessero raggiunto il limite di rottura d'ammasso.

4.2 - Cunicolo Galleria Malborghetto

I lavori relativi alla realizzazione del cunicolo pilota della galleria "Malborghetto" sono iniziati nel mese di novembre 1985 e si sono conclusi nel dicembre del 1986, dopo aver completato l'intero cunicolo per una lunghezza di circa 7.845 m. La lunghezza totale di scavo è stata eseguita in 317 giorni lavorativi, con produzione media globale (cioè comprensiva anche dell'attraversamento delle zone di faglia) di circa 25 m/g ed una produzione massima di 66 m registrata il 05.11.86. Dal punto di vista geologico,

lo scavo ha interessato formazioni sedimentarie di età compresa fra il Carbonifero e il Triassico, generalmente poste a contatto fra loro secondo confini tettonici.

Va sottolineato come, in questo caso, il cunicolo pilota abbia messo in luce la presenza, alla quota di scavo, di un contesto geologico assai difforme da quello preventivato preliminarmente alle operazioni di scavo (Fig. 24), confermando, in tal modo, l'importanza fondamentale che lo stesso preforo riveste nel suo principale ruolo di strumento conoscitivo per la progettazione.

Nel caso specifico, tre formazioni, da sole, hanno costituito la quasi totalità dei terreni incontrati e cioè la "Dolomia dello Schlern", la "Breccia di Ugovizza" e il "Gruppo del Permo-Carbonifero Pontebbano".

Dal punto di vista esecutivo, il problema fondamentale incontrato durante le lavorazioni, all'origine di pesanti ritardi sui tempi d'esecuzione, è stato il reperimento dei terreni appartenenti al "Gruppo del Permo-Carbonifero Pontebbano".

A parte gli inconvenienti legati al reperimento di gas (\approx progr. 3785), questo materiale ha presentato notevoli difficoltà legate alla stabilità sia delle pareti che del fronte di scavo, rendendo necessaria la realizzazione di un sistematico lavoro di sostegno mediante un blindaggio circolare chiuso realizzato con "liner-plate" in acciaio (tratta 3775 ÷ 3919 e tratta 4061 ÷ 4172).

Il superamento di questa particolare zona ha richiesto circa 3 mesi, con pro-

duzione giornaliera compresa fra un minimo di 1 m/g ad un massimo di 4 m/g. Nelle restanti tratte del foro pilota, caratterizzate principalmente dai due litotipi "Dolomia dello Schlern" e "Breccia di Ugovizza" non si sono riscontrate particolari difficoltà di esecuzione. Valori medi rappresentativi delle produzioni giornaliere in questi due litotipi possono essere considerati, a consuntivo, 40-50 m per la dolomia e 30-40 m per la breccia.

Va inoltre aggiunto che notevoli quantità di chiodi sono stati messi in opera nella zona della breccia compresa fra le progr. 4600 e 4800, intervento che, seppur in minor misura, è stato applicato in modo pressoché continuo anche fino a progr. 7000.

Anche per il cunicolo della galleria "Malborghetto", attraverso il "Metodo R.S.", sono state elaborate al calcolatore due gruppi di schede grafiche (ciascuna delle quali riferita a 100 m di cunicolo).

Il primo gruppo costituisce l'"Archivio dati geologici" e contiene le risultanze emerse a seguito del rilievo geostrutturale eseguito all'interno del cunicolo.

Il secondo gruppo costituisce, invece, l'"Archivio dati fresa", che consente di visualizzare in maniera sintetica il comportamento della fresa durante le operazioni di scavo.

Per queste ultime va detto che ogni singolo tratto rappresenta il valore medio dei valori impulsivi registrati su un intervallo costante che si è preso pari a 25 metri.

Le grandezze considerate sono:

- la velocità d'avanzamento istantaneo;
- la spinta alla testa fresante;
- l'assorbimento della testa fresante;
- l'energia specifica di scavo.

Da quest'ultimo dato, in particolare, è possibile risalire a un'attendibile stima della resistenza d'ammasso dei materiali intercettati.

Valori medi orientativi della σ_{gd} possono essere considerati di 250-350 kg/cm² per la "Dolomia dello Schlern" e 450-650 kg/cm² per la "Breccia di Ugovizza".

Va peraltro fatto notare che non è possibile, in questo modo, ottenere valori attendibili di resistenza d'ammasso per le formazioni più scadenti, poiché in loro corrispondenza la fresa viene usata in modo improprio.

Va inoltre aggiunto che la sistematica messa in opera, in cunicolo, di stazioni di convergenza a tre chiodi ha permesso un controllo continuo ed un rilievo diretto delle deformazioni reali degli ammassi rocciosi intercettati.

Dall'analisi di queste misure risulta che, se si escludono i terreni del "Gruppo del

Permo-Carbonifero Pontebbano", gli spostamenti misurati si sono mantenuti nell'ordine dei decimi di millimetro, denunciando così un'assoluta stabilità del cavo ed una condizione di elasticità dell'ammasso sotto gli stati tensionali esistenti.

Diversamente, nella formazione del "Permo-Carbonifero Pontebbano", nonostante la messa in opera di pesanti interventi di stabilizzazione, si sono avuti notevoli fenomeni deformativi, che hanno denunciato una spiccata tendenza del materiale alla plasticizzazione.

Per questa formazione infatti, i valori di convergenza diametrale misurati in cunicolo sono stati mediamente dell'ordine di 80-100 cm per le tratte ove sono stati messi in opera solo "spritz-beton" e chiodi, mentre sono stati di 10-15 cm nelle zone in cui il sostegno è stato realizzato con il blindaggio chiuso e continuo del cunicolo.

Va inoltre aggiunto che le celle pressiometriche installate all'interno di questo materiale hanno misurato valori di pressione via via crescenti fino a stabilizzarsi

ad una pressione radiale, grossomodo uniforme, di circa 80 t/m². Pressioni di tale entità hanno peraltro portato, in più punti, a forti deformazioni dei pannelli di blindaggio e, in alcuni casi, addirittura alla loro rottura.

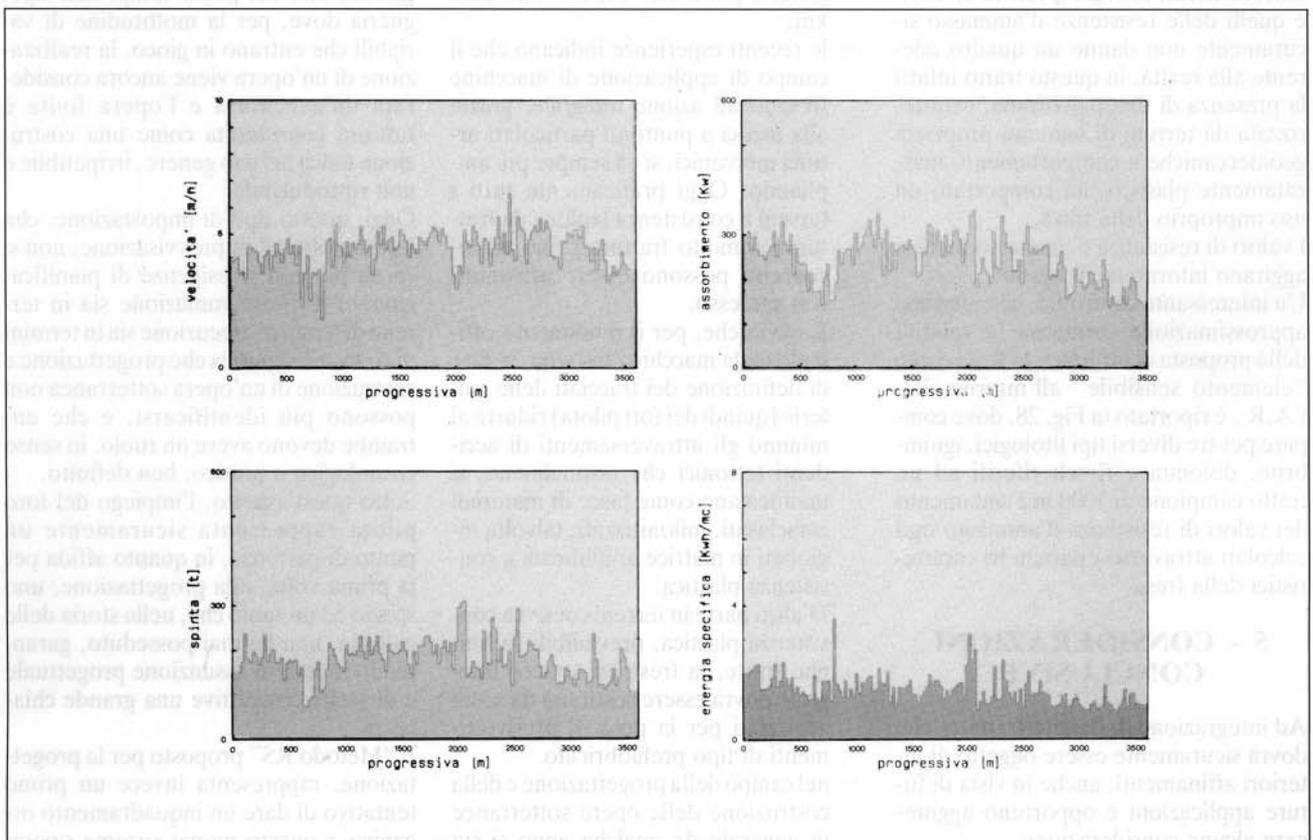
Va sottolineato come tali dati abbiano messo in luce l'assoluta opportunità di realizzare il successivo scavo di allargo all'interno di questa formazione solo posteriormente alla realizzazione, dall'interno del cunicolo, di preventivi interventi di consolidamento del materiale.

4.3 - Galleria Caponero Linea FS Genova-Ventimiglia

Il foro pilota, realizzato all'interno della sezione definitiva della galleria, non è stato finalizzato alla progettazione esecutiva, ma è stato eseguito per il controllo delle vibrazioni prodotte dallo sparo delle volate.

Il profilo longitudinale della nuova linea ferroviaria fra S. Lorenzo al Mare (Genova) e Ospedaletti (Ventimiglia), di cui fa parte la galleria in oggetto, è riportato in Fig. 25.

Fig. 26 - Galleria e Caponero - Foro pilota - Progr. 0-3.500 - Parametri di avanzamento e funzionamento della fresa.



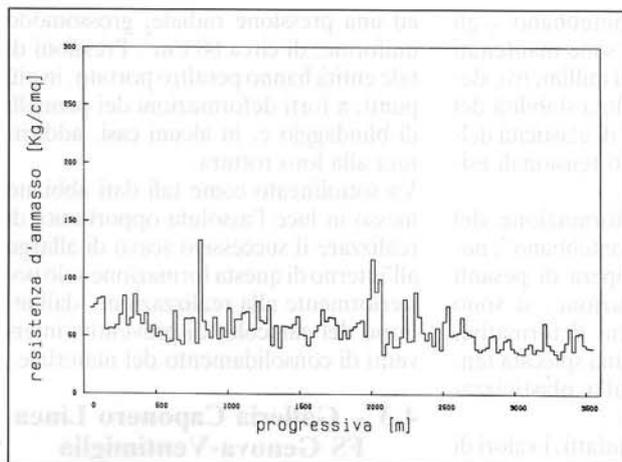


Fig. 27 - Galleria Caponero - Foro pilota.

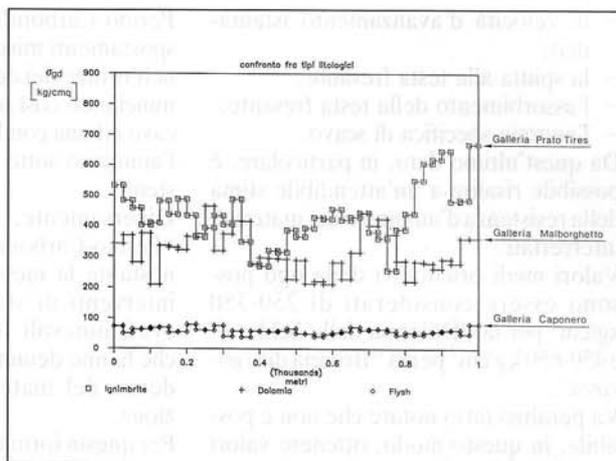


Fig. 28 - Resistenza d'ammasso.

Nei 3570 m di scavo la fresa ha attraversato la formazione del Flysch ad Helmitoidi propria dell'area di San Remo, una formazione caratterizzata da un'alternanza continua di arenaria, marna, calcare marnoso e argilloscisti.

Il quadro riassuntivo dell'archivio dati fresa è riportato in Fig. 26, mentre la Fig. 27 riporta la resistenza d'ammasso calcolata.

Dalla progr. 600 alla progr. 800 circa i dati relativi all'energia specifica di scavo e quelli delle resistenze d'ammasso sicuramente non danno un quadro aderente alla realtà; in questo tratto infatti la presenza di una paleofrana, caratterizzata da terreni di scadenti proprietà geomeccaniche a comportamento marcatamente plastico, ha comportato un uso improprio della fresa.

I valori di resistenza d'ammasso medi si aggirano intorno ai 70 kg/cm².

Un interessante confronto, che in prima approssimazione conferma la validità della proposta di utilizzare la fresa come "elemento sensibile" all'interno dell'A.R., è riportato in Fig. 28, dove compare per tre diversi tipi litologici, ignimbrite, dolomia e flysch riferiti ad un tratto campione di 1000 m l'andamento dei valori di resistenza d'ammasso σ_{gd} calcolati attraverso i parametri caratteristici della fresa.

5 - CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Ad integrazione di quanto trattato, che dovrà sicuramente essere oggetto di ulteriori affinamenti, anche in vista di future applicazioni è opportuno aggiungere alcune considerazioni:

- anche se fino ad oggi le esperienze in fatto di cunicoli pilota si riferiscono a galleria di lunghezza non inferiore a 4 km circa, non è da escludere che, per il futuro, grazie alla sempre più ridotta incidenza dei tempi di montaggio e smontaggio di cantiere delle apparecchiature fresanti, l'impiego del cunicolo pilota possa essere esteso con beneficio tecnico ed economico anche nella costruzione di gallerie più corte: almeno fino ad 1 km;

- le recenti esperienze indicano che il campo di applicazione di macchine fresanti ad azione integrale, grazie alla messa a punto di particolari artifici meccanici, si va sempre più ampliando. Oggi praticamente tutti i terreni a consistenza lapidea da fratturati a molto fratturati fino ad incoerenti possono essere affrontati con successo.

È ovvio che, per il rendimento ottimale della macchina bisogna, in fase di definizione dei tracciati delle gallerie (quindi dei fori pilota) ridurre al minimo gli attraversamenti di accidenti tettonici che normalmente si manifestano come fasce di materiali cataclasati, milonitizzati, talvolta inglobati in matrice argillificata a consistenza plastica.

D'altra parte in terreni coesivi a consistenza plastica, prevedibili su lunghe tratte, la fresa ad attacco integrale dovrà essere sostituita da scudi attrezzati per la posa di prerivestimenti di tipo prefabbricato.

- nel campo della progettazione e della costruzione delle opere sotterranee in generale da qualche anno si sta

verificando un profondo processo evolutivo, che si può spiegare solo come un adeguamento ai progressi compiuti dall'uomo negli ultimi decenni in campo sociale economico, scientifico e tecnologico.

Progettare e costruire gallerie è sempre stata considerata un'arte e in passato, progettazione e costruzione, nella pratica, si sono spesso identificate. È sempre stato, e in parte lo è anche oggi, uno dei pochi campi dell'ingegneria dove, per la moltitudine di variabili che entrano in gioco, la realizzazione di un'opera viene ancora considerata un'avventura e l'opera finita è tutt'ora considerata come una costruzione unica nel suo genere, irripetibile e non riproducibile.

Oggi, questo tipo di impostazione, che lascia molto all'improvvisazione, non si sposa più con le esigenze di pianificazione e di programmazione sia in termini di tempi di esecuzione sia in termini di costi; ciò significa che progettazione e costruzione di un'opera sotterranea non possono più identificarsi, e che entrambe devono avere un ruolo, in senso cronologico e pratico, ben definito.

Sotto quest'aspetto, l'impiego del foro pilota rappresenta sicuramente un punto di partenza, in quanto affida per la prima volta, alla progettazione, uno spazio ed un ruolo che, nella storia delle gallerie, non ha mai posseduto, garantendo in fase di assunzione progettuale e di scelte costruttive una grande chiarezza.

Il "Metodo RS" proposto per la progettazione, rappresenta invece un primo tentativo di dare un inquadramento organico a questo nuovo sistema opera-

tivo, un primo approccio ad un tema solo di recente oggetto di attenzione da parte degli addetti ai lavori, per il quale rimane molto da fare sia sotto il profilo tecnico, sia sotto il profilo sperimentale.

Pietro Lunardi

(Università degli Studi di Parma)

Ringraziamenti

L'autore ringrazia gli ingg. Sirio Orsi e Enrico Calistri per la collaborazione prestata alla preparazione dell'elaborato e le Società Cogefar, Consorzio Carnia, Consorzio Comer, Ismes, Rocksoil, Rodio, Sam, SIS Geotecnica, Torno, per la messa a disposizione della documentazione fotografica.

BIBLIOGRAFIA

- BECCHI I., CALISTRI E., LUNARDI P., ORSI S. "Nuovi orientamenti nella progettazione delle gallerie mediante foro pilota" I86 Firenze 8-11 Giugno 1986, Vol. 2, Sessione F.
- BLADEGO G.B., (1906) "I grandi trafori alpini Fréjus, San Gottardo, Sempione" Ed. Hoepli.
- CALISTRI E., ORSI S., (1985) "Nuovi orientamenti nella progettazione delle gallerie mediante foro pilota" Tesi di Laurea, Facoltà di Ingegneria Università degli Studi di Firenze.
- CASALE R., COMIN C., "Evoluzione di alcuni aspetti progettuali relativi ad infrastrutture ferroviarie sviluppantisi prevalentemente in sotterraneo" I86 Firenze 8-11 Giugno 1986, Vol. 1, Sessione A.
- CEPPI G., LOTTI A., DE PAOLI B., PEDEMONTE S., "Galleria di Monte Olimpino 2 scavo con tecniche speciali" I86 Firenze 8-11 Giugno 1986, Vol. 1, Sessione A.
- COMIN C., MONTANARI L.F., NICOLINI A., PIZZAROTTI E.M., "Il cunicolo pilota realizzato con fresa: i suoi riflessi nella progettazione ed esecuzione di gallerie ferroviarie" I86 Firenze 8-11 Giugno 1986, Vol. 1, Sessione A.
- FOCACCI C., "La galleria quale soluzione tecnica indispensabile nel potenziamento della rete ferroviaria italiana Nord-Orientale" I86 Firenze 8-11 Giugno 1986, Vol. 1, Sessione A.
- IANNIELLO C., LEONARDI C., LUNARDI P., PELIZZA S., ZANALDA M., "Problemi tecnici di costruzione in sotterraneo del nuovo tratto di linea ferroviaria in Liguria fra San Lorenzo al mare e Ospedaletti" I86 Firenze 8-11 Giugno 1986, Vol. 1, Sessione A.
- INNAURATO N., MANCINI R., SAMPAOLO A., (1980) "Studio della interazione roccia-fresa: galleria di derivazione dell'impianto idroelettrico del Taloro" Bollettino AMS, Anno XVII, n. 2.
- LUNARDI P. (1979) "Application de la mécanique des roches aux tunnels autoroutiers, exemple des tunnels du Fréjus (coté Italie) et du Gran Sasso" Revue Française de Géotechnique n° 12.
- MANCINI R., (1975) "Appunti per una teoria generale dello scavo delle rocce con tunnel a piena sezione" Atti della giornata di studio su «Scavo di gallerie in roccia con frese a piena sezione».
- OLIVA L., BONASSO R., BEOMONTE M., "La galleria di valico di forca canapine" I86 Firenze 8-11 Giugno 1986, Vol. 1, Sessione B.
- TEALE R., (1965) "Concept of specific energy in rock drilling" Inst Rock Mech. Min. Sci, March 1965.