

NUOVI ORIENTAMENTI NELLA PROGETTAZIONE DELLE GALLERIE MEDIANTE FORO PILOTA

Ignazio BECCHI - Università di Firenze
 Enrico CALISTRI - Rocksoil S.r.l. Milano
 Pietro LUNARDI - Università di Firenze
 Sirio ORSI - Rocksoil S.r.l. Milano

1. PREMESSA

La corretta progettazione di una galleria richiederebbe la conoscenza a priori della situazione litologica, strutturale, stratigrafica e idrogeologica delle formazioni interessate dallo scavo e delle caratteristiche geomeccaniche dei diversi litotipi.

Fino a qualche anno fa lo studio di fattibilità di una galleria, nelle condizioni più favorevoli, poteva fondarsi su conoscenze desunte per lo più da osservazioni geologiche condotte in superficie, da indagini geognostiche in sondaggio operate localmente lungo il tracciato dell'opera e dall'esame dei campioni di roccia prelevati alla quota della galleria stessa.

Più di un tunnel, stradale ferroviario o idraulico, soprattutto se interessato, su notevoli sviluppi, da importanti coperture, è stato affrontato con scarse conoscenze geologiche e geomeccaniche, affidando all'improvvisazione degli esecutori il compito di risolvere in corso d'opera tutte le difficoltà (imprevisti geologici od idrogeologici) che una campagna geognostica preventiva di tipo tradizionale non avrebbe mai potuto evidenziare.

Oggi, il progresso tecnologico, l'affinamento e la maggior confidenza con le tecniche di scavo meccanizzato in terreni con caratteristiche di resistenza e deformabilità anche variabili permettono di affrontare il tema dello studio di fattibilità delle gallerie e della loro progettazione secondo un'ottica completamente nuova.

L'opportunità di poter scavare un cunicolo di prospezione o "foro pilota" in asse alla futura galleria e quindi di poter disporre di questo "sondaggio orizzontale a misura d'uomo" in cui operare i rilievi geologico-geotecnici necessari per lo studio del comportamento dell'ammasso roccioso e per la scelta degli interventi di stabilizzazione e di contenimento definitivo in scala reale, apre, senza dubbio, un nuovo capitolo nella storia delle gallerie che comporterà grandi mutamenti sul piano progettuale, operativo ed economico.

In questa memoria si analizzano solo alcuni aspetti del problema e delle nuove tematiche che, in campo geomeccanico e quindi progettuale, vengono proposte dall'utilizzazione del foro pilota.

Viene proposta, in particolare, una nuova metodologia per la caratterizzazione del comportamento degli ammassi rocciosi, che si avvale dell'acquisizione e successiva elaborazione dei dati ottenibili dall'apertura di un foro pilota (fig. 1) effettuato con l'ausilio di una macchina fresante per lo scavo integrale e continuo.

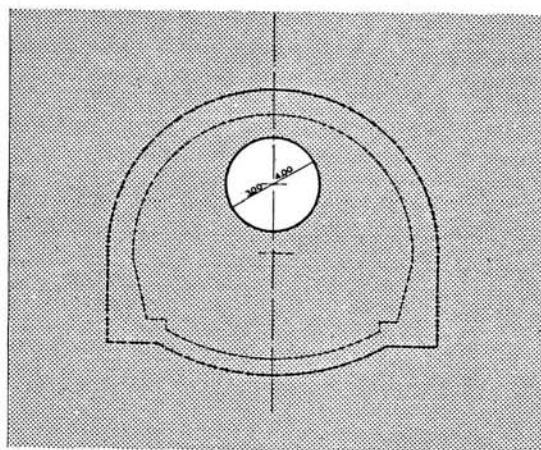


Fig. 1

Dall'analisi del meccanismo d'interazione tra la fresa, utilizzata come "sonda penetrometrica", e la roccia, unitamente allo studio geologico di dettaglio effettuabile all'interno del foro pilota, è stato possibile trarre una prima serie di conclusioni su di un nuovo criterio per la classificazione degli ammassi rocciosi e per la determinazione quantitativa di quei parametri geomeccanici di resistenza d'ammasso fino ad oggi di così difficile acquisizione e tuttavia molto utili per una corretta progettazione.

2. L'IMPIEGO DEL CUNICOLO ESPLORATIVO PER LA PROGETTAZIONE DI GALLERIE

Nella costruzione delle gallerie, la meccanizzazione del cantiere e l'elaborazione di programmi di lavoro hanno una validità solo a condizione che l'esecutore sia posto nella condizione di conoscere, preliminarmente e con sufficiente attendibilità, la risposta allo scavo delle formazioni da attraversare.

Allo stesso tempo una razionale progettazione deve comprendere una completa determinazione delle caratteristiche geologiche e geomeccaniche delle formazioni interessate dal tracciato della galleria, determinazione che può essere effettuata solo attraverso l'esecuzione di sondaggi sufficientemente frequenti onde avere la possibilità di redigere un attendibile profilo geognostico.

Purtroppo, la semplice prospezione geologica esterna non è sufficiente a precisare, con la necessaria approssimazione, in fase di progetto esecutivo, le caratteristiche delle rocce interessate dall'apertura della galleria ed il presumibile comportamento allo scavo dell'ammasso roccioso, specialmente quando questa si sviluppa a notevole profondità.

D'altra parte, perforazioni di sondaggio spinte alle profondità necessarie nel caso di potenti coperture, si presentano spesso di difficile realizzazione e di costo notevolmente elevato.

Risulta quindi evidente come la completa conoscenza delle rocce da attraversare, può soltanto essere ottenuta con la preventiva apertura di un cunicolo esplorativo che consenta, in un primo tempo, al progettista, la possibilità di prevedere adeguati interventi di stabilizzazione e di contenimento, in un secondo tempo, all'esecutore, di predisporre razionali sistemi di scavo.

L'esecuzione di un cunicolo con una fresa di piccolo diametro ($3 \div 4$ 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 che l'ammasso aveva prima dello scavo, cioè allo stato naturale.

Infatti, malgrado che la spinta globale esercitata sul fronte della testa di abbattimento possa essere molto elevata (il suo valore può raggiungere e superare le 500 t), il valore unitario della spinta non supera qualche kg/cm², per cui gli effetti di disturbo sulla roccia sono minimi.

Può essere allora effettuata, ponendosi così nelle condizioni più favorevoli di rilevamento, una descrizione molto accurata e dettagliata, sia delle

condizioni lito - stratigrafiche delle varie formazioni geologiche attraversate, sia dei sistemi di discontinuità che interessano l'ammasso, avendo la possibilità di osservarli da vicino quasi allo stato naturale e potendone seguire nel tempo l'evoluzione per l'alterazione ad opera degli agenti atmosferici e per effetto dell'insorgere delle sovratensioni indotte dall'apertura del cavo.

La presenza di un cunicolo pilota offre poi l'opportunità di poter raccogliere una notevole quantità di dati sulle caratteristiche meccaniche dell'ammasso roccioso attraversato, ricavabili da prove geomeccaniche in situ, dall'analisi dei parametri legati all'avanzamento della macchina fresante e dal rilevamento dei fenomeni deformativi del cavo (convergenze superficiali e profonde).

3. LA MECCANIZZAZIONE PER LO SCAVO INTEGRALE E CONTINUO DELLE GALLERIE

Dando per scontati gli elementi costruttivi ed i principi di funzionamento di una macchina per lo scavo integrale e continuo, si ricorda che la prima galleria nella quale venne applicata con successo una macchina del genere fu quella della Oahe Dam nel South Dakota (USA), ove una attrezzatura della casa Robbins entrò in funzione nel 1953 e perforò il tunnel ad una velocità media di 3 m/h.

Il concreto sviluppo delle macchine per lo scavo continuo ed integrale ha inizio, quindi, solo nel 1953. Da allora, o per lavori di tipo sperimentale o per effettivo scavo di gallerie, con maggiore o minore successo, i casi di impiego sono rapidamente aumentati.

In Italia la fresa ha trovato una delle sue prime applicazioni agli inizi degli anni '70 quando l'ENEL la adottò per la realizzazione della galleria di derivazione dell'impianto idroelettrico del Brasimone. Successivamente si sono avute, sempre in Italia, numerose altre applicazioni di questa tecnica di scavo, sia per gallerie di derivazione (Taloro, Sila, Ridracoli, ecc.), sia per la realizzazione di pozzi di ventilazione (Frejus).

Recentemente sono stati realizzati, in asse a gallerie di tipo autostradale e ferroviario a due vie, cunicoli pilota di piccolo diametro ($3 \div 4$ m), o con lo scopo di eliminare gli imprevisti geologici ed idrogeologici come per la galleria di valico ANAS presso Forca Canapine, o per risolvere problemi di ventilazione, o per ridurre anche fino al 40% le incidenze di esplosivo in fase di allargo e limitare le vibrazioni indotte dall'esplosione delle volate nel caso di gallerie poste in vicinanza di centri abitati (galleria

F.S. "Caponero" a San Remo, galleria ANAS "S. Martino" a Lecco).

Tuttavia, soltanto di recente si è pensato alla realizzazione di un cunicolo esplorativo mediante fresa con il principale obiettivo di effettuare, sulla base dei dati raccolti, una corretta ed ottimizzata progettazione dei rivestimenti e dei sistemi di drenaggio, e di predisporre un'adeguata organizzazione del cantiere per la successiva fase di allargo (galleria F.S. "Prato Tires" a Bolzano, gallerie F.S. "S. Leopoldo", "Malborghetto", "Camporosso" presso Udine).

Un'ulteriore e originale applicazione del foro pilota, proposta da uno degli scriventi per la galleria F.S. "Zuc del Bor" sulla linea Udine - Tarvisio, è stata sviluppata dai tecnici delle Ferrovie dello Stato ed è attualmente in fase di realizzazione.

Si tratta di un intervento atto a limitare i notevoli ritardi accumulati a seguito di una preventiva campagna geognostica di tipo tradizionale, rivelatasi insufficiente.

L'esecuzione del foro pilota secondo lo schema riportato in fig. 2 consente di raggiungere una completa conoscenza dell'ammasso roccioso senza peraltro intralciare i programmi di scavo già esistenti e permette, a foro completato, di sfruttare tutti i vantaggi operativi che esso comporta (per maggiori dettagli si rimanda alla memoria "Evoluzione di alcuni aspetti progettuali relativi ad infrastrutture ferroviarie sviluppatesi prevalentemente in sotterraneo" di R. Casale e C. Comin presentata in questo stesso Congresso).

La realizzazione di by-pass eseguiti con fresa può essere considerata, nel caso di gallerie molto lunghe, con coperture elevate e difficili accessi laterali, una valida alternativa a finestre e pozzi d'accesso.

4. STUDIO DELL'INTERAZIONE ROCCIA-FRESA STATO DELL'ARTE E PROSPETTIVE

L'idea di aprire preventivamente un foro pilota con una fresa in asse alla galleria definitiva con lo scopo di utilizzare i risultati per la progettazione degli interventi di stabilizzazione e dei rivestimenti, pone il problema dell'interazione tra la roccia e la macchina in termini sostanzialmente diversi nei confronti degli studi effettuati in proposito fino ad oggi.

Gli studi fino ad ora compiuti sull'argomento, infatti, erano rivolti per lo più alla qualificazione geomeccanica dell'ammasso roccioso, mediante prove in laboratorio e in situ, con il preciso scopo di definirne la « fresabilità » in riferimento ad un tipo o ad un altro di macchina.

L'analisi teorica del funzionamento delle macchine e dell'azione degli utensili nel lavoro di disaggregazione della roccia, l'esame delle sue proprietà più atte a spiegarne il comportamento nei confronti degli utensili di abbattimento, lo studio a posteriori di vari casi pratici d'impiego, hanno effettivamente permesso di raggiungere alcuni degli obiettivi desiderati ed hanno contribuito all'affinamento tecnologico delle macchine e all'ottimizzazione dell'uso dei taglienti.

D'altra parte la fattibilità di un cunicolo pilota da realizzare con fresa può essere garantita, con sufficiente approssimazione, dalle informazioni ricavabili dal rilievo geologico di superficie e dalle prove di laboratorio effettuate su campioni prelevati in sondaggio, senza peraltro ricorrere ad indagini più approfondite e senza la necessità di conoscere con completezza le caratteristiche dell'ammasso roccioso in situ (anche perchè di ben difficile valutazione preventiva). Ciò grazie anche ai notevoli progressi tecnologici che hanno reso tali macchine più versatili nei riguardi della tipologia del terreno rispetto al passato.

Nell'ottica del foro pilota, in definitiva, ci si preoccupa meno di studiare a fondo il problema della fresabilità, dando quasi 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 tra la roccia e la macchina: fino ad ora si

SCHEMA INTERVENTO CON FORO PILOTA
PER LA GALLERIA ZUC DEL BOR (UD)

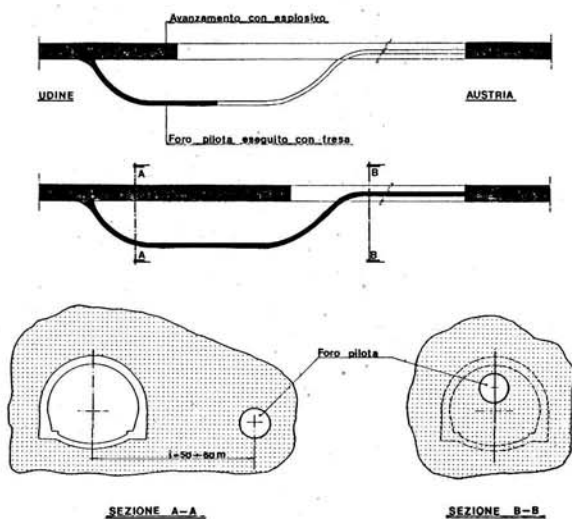


Fig. 2

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 e quindi di determinare i dati di progetto per la futura galleria: l'impostazione del problema viene così praticamente ribaltata.

5. METODO DEL FORO PILOTA

5.1 Descrizione

Alla luce di quanto premesso la caratterizzazione degli ammassi rocciosi, sia dal punto di vista geostrutturale che dal punto di vista geomeccanico, può essere effettuata, in alternativa ai tradizionali metodi d'indagine, mediante la raccolta e la successiva elaborazione dei dati ricavabili dall'apertura di un foro pilota realizzato mediante fresa (vedi fig. 3).

discontinuità che caratterizzano l'ammasso roccioso, è possibile osservare il comportamento della fresa nella sua azione di scavo raccogliendo sistematicamente i dati inerenti il suo avanzamento ed il suo funzionamento quali, tra gli altri, la spinta alla testa, la velocità di avanzamento, la potenza assorbita dai motori.

I dati così ottenuti, gestiti con l'ausilio di un computer, costituiscono la base di una serie di elaborazioni aventi lo scopo, sia di classificare l'ammasso roccioso evidenziandone, sulla base di un'analisi statistica, zone con analogo comportamento geomeccanico, sia di determinare quantitativamente la sua resistenza a compressione dallo studio dell'interazione tra la macchina e la roccia.

La progettazione delle gallerie può essere quindi effettuata, sulla base degli elementi ottenuti, in modo molto più aderente alle reali condizioni incontrate dal tracciato, permettendo una corretta e ottimizzata scelta degli interventi di stabilizzazione e degli spessori dei rivestimenti definitivi.

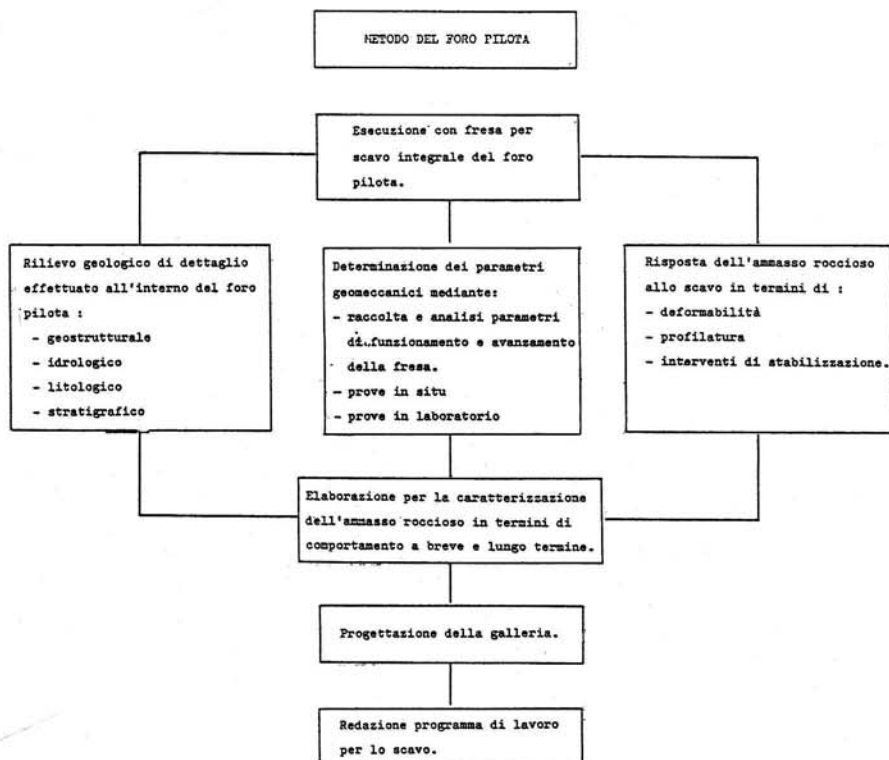
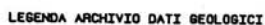


Fig. 3

In tal modo oltre a poter eseguire un rilievo dettagliato all'interno del cunicolo, consistente nell'identificazione delle varie formazioni sotto il profilo litologico - stratigrafico e nell'individuazione dei sistemi di

5.2 Rilievo geologico di dettaglio nel foro pilota

Un ammasso roccioso può essere visto come un complesso sistema strutturale

Fig. 4

relazioni fra i vari gruppi.

Per effettuare un'analisi di questo tipo si rende necessaria la standardizzazione degli elementi delle matrici in modo che ogni colonna (insieme X_i con $i = 1, \dots, M$ di misure di uno stesso parametro sui vari campioni) abbia media nulla e varianza unitaria.

Così essendo :

$$X_m = \sum_{i=1}^N X_i$$

$$S_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - X_m)^2}{N-1}}$$

$$X'_i = \frac{X_i - X_m}{S_d}$$

si ha che : $X'_m = 0$ $S'_d = 1$

dove : X_m = media delle misure originarie;

S_d = deviazione standard delle misure originarie;

X'_i = valore standardizzato della misura originaria X_i ;

X'_m = media delle misure standardizzate;

S'_d = deviazione standard delle misure standardizzate.

Questa procedura assicura che ogni variabile abbia lo stesso peso e permette di considerare parametri con unità di misura ed entità completamente diverse ed altrimenti non confrontabili.

Il criterio che si usa per la determinazione della similarità tra i vari campioni è quello della distanza euclidea espressa da :

$$D_{ij} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^M (X_{ik} - X_{jk})^2}{M}}$$

dove : X_{ik} = misura della variabile k -ma sul campione i -mo;

X_{jk} = misura delle variabili k -ma sul campione j -mo;

D_{ij} = « distanza » fra il campione i ed il campione j .

Si costruisce così una matrice $N \times N$ simmetrica in cui ogni elemento D_{ij} rappresenta la similarità fra i campioni i e j .

I raggruppamenti si effettuano in base ad una tecnica nota come "weight pair-group method" con medie aritmetiche : si individuano gli elementi massimi della matrice di similarità ed in base ad essi si formano le coppie a più elevata affinità, dopodiché è possibile aggiungere ulteriori elementi ai centri di clusters, così individuati, selezionando semplicemente tra i campioni residui quelli che risultano avere, ad un secondo livello, maggiore affinità con le medie dei clusters già formati.

E' evidente che ad ogni aumento del livello di raggruppamento diminuisce il livello di similarità tra gli elementi del singolo cluster producendone quindi una gerarchizzazione.

Un modo grafico utile per rappresentare la gerarchizzazione ora descritta è quello dei diagrammi ad albero o dendrogrammi.

Un' ulteriore analisi, basata sempre sulle informazioni ottenute dallo scavo del foro pilota consiste nella valutazione della resistenza a compressione dell'ammasso roccioso (vrgd).

In considerazione del fatto che la fresa nella sua azione di abbattimento non coinvolge soltanto le proprietà della roccia rilevabili su piccola scala ma anche e soprattutto quelle su media e su grande scala, si può affermare che la sua azione disgregatrice costituisce una vera e propria prova distruttiva che investe l'ammasso roccioso con tutte le discontinuità e disomogeneità che lo interessano, e per questo essa può essere sfruttata per la determinazione delle caratteristiche limiti di resistenza dell'ammasso stesso.

Il meccanismo di penetrazione adottato nello studio dell'interazione tra la macchina e la roccia assume che l'utensile penetrante non sia tanto la lama metallica, ma la somma di questa e di una sottostante porzione di roccia completamente polverizzata e compressa quasi idrostaticamente.

Questa polverizzazione ha luogo solo se il rapporto tra la forza agente sulla roccia penetrata e la superficie di contatto supera il carico di rottura della roccia stessa.

La roccia polverizzata trasmette idrostaticamente a quella circostante una pressione corrispondente al carico di rottura che determina, lateralmente al punto premuto, il distacco di scaglie di roccia per sforzi di taglio (fig. 8).

Sulla base di questo meccanismo di penetrazione, considerando le caratteristiche geometriche della fresa e i suoi parametri di avanzamento e di funzionamento si ricava:

$$\sigma_{gd} = F(D, r, N, S, V_r, V_a)$$

dove : σ_{gd} = resistenza a compressione dell'ammasso;

D = diametro di scavo;

r = raggio dei dischi;

N = numero dei dischi;

S = spinta dei martinetti alla testa;

V_r = velocità di rotazione della testa;

V_a = velocità d'avanzamento istantanea.

La resistenza a compressione così calcolata costituisce un parametro geomeccanico di notevole importanza ai fini della progettazione dell'opera da realizzare e rappresenta un indice di qualità dell'ammasso roccioso.

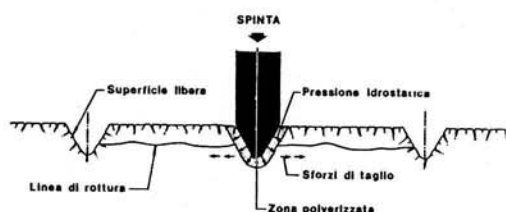


Fig. 8

6. APPLICAZIONI

6.1 Il foro pilota di Prato Isarco

Il tentativo di caratterizzare, ai fini della progettazione, l'ammasso roccioso sulla base dei dati ottenuti dall'apertura di un foro pilota, è stato per la prima effettuato per la galleria ferroviaria tra Prato Tires e Ponte Gardena sulla linea di variante Verona - Brennero attualmente in fase di esecuzione ad opera del Consorzio COMER con la consulenza geotecnica dello studio ROCKSOIL di Milano.

L'opera in esame si inserisce nel recente piano di ammodernamento della rete ferroviaria nazionale e costituisce una variante della linea preesistente. Il nuovo tracciato si sviluppa interamente in galleria per circa 13 Km interessando il versante sinistro della Valle del fiume Isarco, con coperture variabili tra i 50 e i 400 m.

La metodologia di scavo adottata consiste, appunto, nella preventiva realizzazione di un cunicolo esplorativo eseguito con una fresa di 3.5 m di diametro e successivo allargo mediante esplosivo.

Lungo il tracciato della galleria, da Sud verso Nord, i litotipi che si incontrano sono costituiti per la maggior parte da ignimbriti e tufi appartenenti al Complesso Vulcanico Atesino (molto diffuso e caratterizzante estese aree del Trentino Alto Adige) e soltanto nel tratto finale si hanno delle rocce filladiche costituenti il basamento cristallino.

L'esecuzione del cunicolo esplorativo è iniziata alla fine del 1984 ad opera dell'impresa ILBAU (Austria) incaricata dei lavori. A tutt'oggi sono stati scavati circa 12 Km.

Per maggiori informazioni sull'andamento dei lavori e sui problemi affrontati si rimanda alla memoria "Il cunicolo pilota realizzato con fresa: i suoi riflessi nella progettazione ed esecuzione di gallerie ferroviarie" di L. F. Montanari, C. Comin, A. Nicolini, E. Pizzarotti.

6.2 Analisi ed elaborazioni

Sulla scorta dei dati ricavati dal rilievo geologico di dettaglio effettuato dall'interno del cunicolo e utilizzando le registrazioni dei parametri di scavo della fresa è stata condotta un'analisi su un tratto di 1000 m compreso tra le progressive 1160 m e 2160 m.

Nel tratto esaminato, pur rilevando la costanza del tipo litologico, è stata riscontrata la presenza sia di zone caratterizzate da intensa fratturazione e alterazione, con rilasci di roccia e numerosi interventi di consolidamento, sia di zone sane e omogenee.

I 1000 m di cunicolo considerati sono stati suddivisi in tratte della stessa lunghezza adottando un passo di campionamento pari a 10 m. Sono risultati 100 campioni per ognuno dei quali sono stati ricavati i valori medi dei parametri già citati nel paragrafo 5.4. La matrice così ottenuta è stata utilizzata per applicare la cluster analysis e per calcolare la resistenza a compressione dell'ammasso roccioso.

I risultati ottenuti con la cluster analysis sono rappresentati in fig. 9: il diagramma, riportando in funzione della posizione del campione il suo gruppo di appartenenza, rappresenta la suddivisione in categorie di comportamento geomeccanico del tratto esaminato.

In fig. 10 è riportato, invece, il diagramma della resistenza a compressione dell'ammasso roccioso: si osserva come essa, nei 1000 analizzati, varia da un minimo di circa 150 kg/cm²

Galleria FS P.Tires - P.Gardena

Categorie di
comportamento dell'ammasso
roccioso

 Buono
 Medio
 Scadente

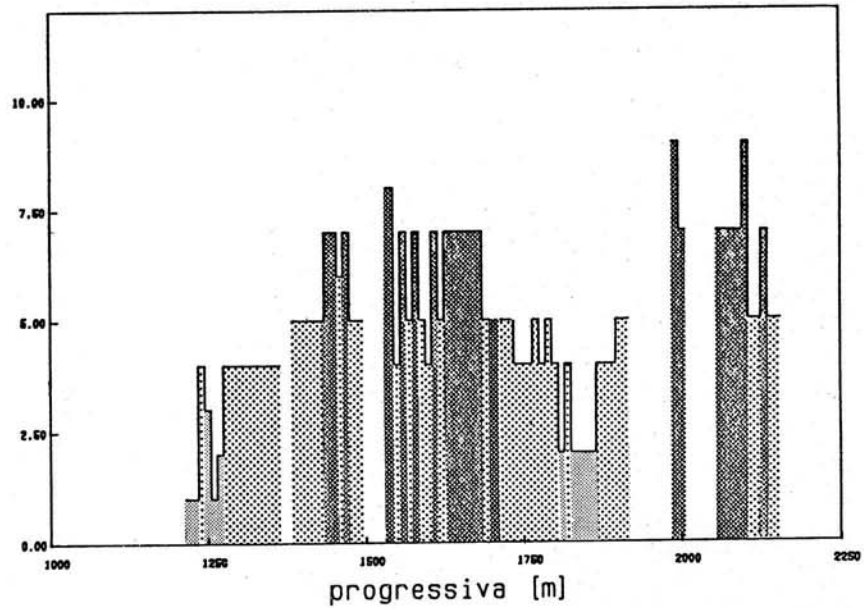
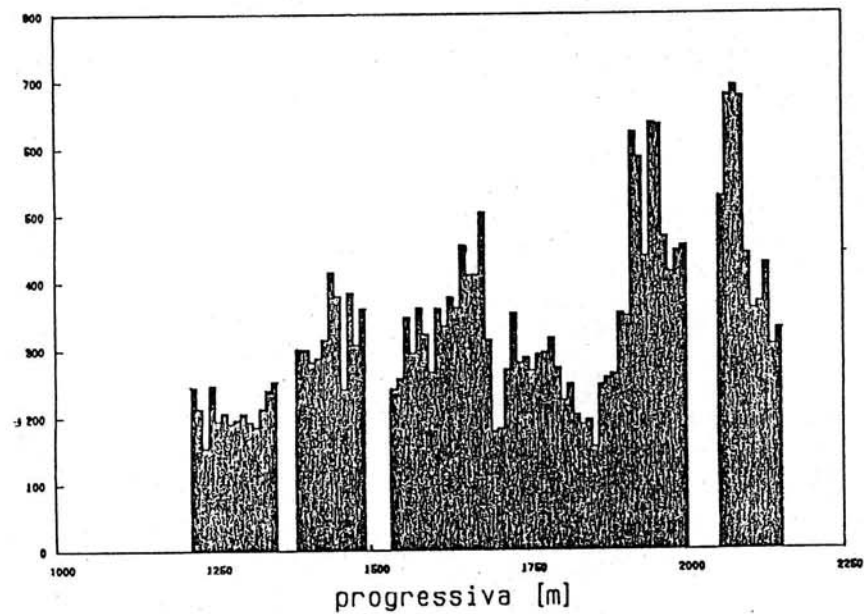


Fig. 9

Galleria FS P.Tires - P.Gardena

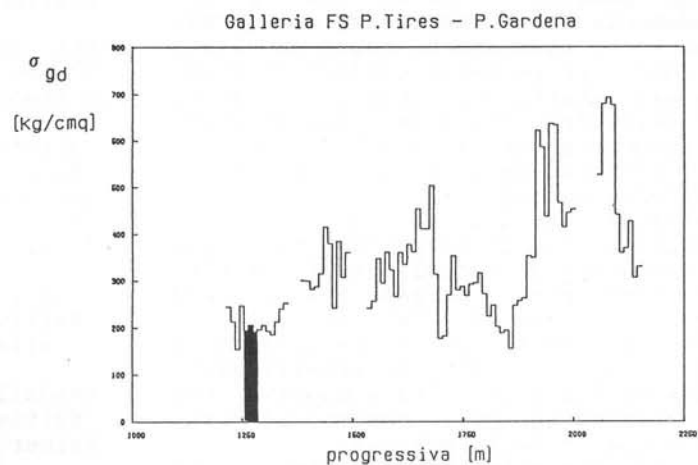
σ_{gd}
[kg/cm²]



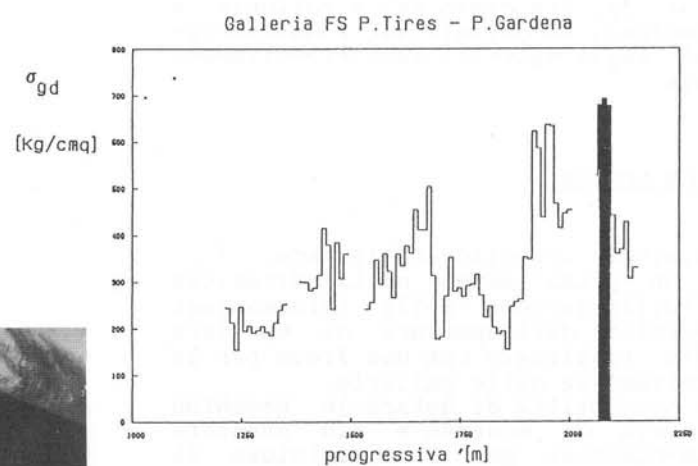
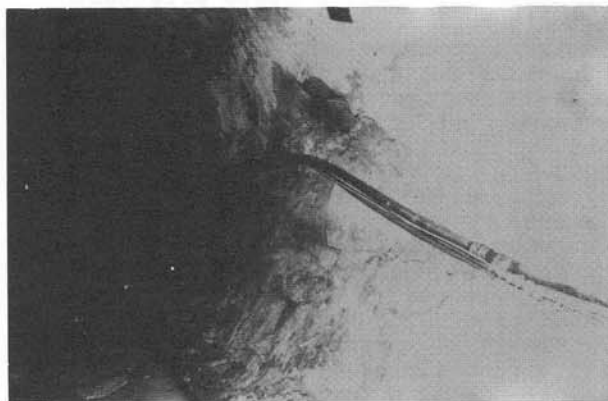
σ_{gd} = resistenza a compressione dell'ammasso roccioso

Fig. 10

Fig. 11

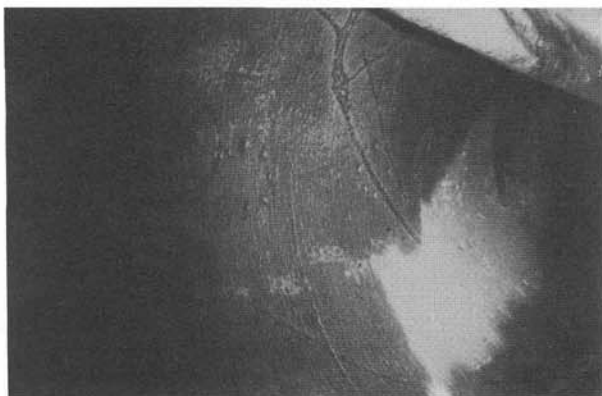


σ_{gd} = resistenza a compressione dell'ammasso roccioso



σ_{gd} = resistenza a compressione dell'ammasso roccioso

Fig. 12



ad un massimo circa di 700 kg/cm². L'andamento della resistenza a compressione così ricavata ha avuto un pieno riscontro con le reali condizioni rilevate all'interno del cunicolo. Come si vede dalla fig. 11, alla zona, ad esempio, presso progressiva m 1260, per cui sono stati ricavati bassi valori della resistenza a compressione, corrisponde effettivamente una roccia densamente frantumata con distacchi di materiale ed interventi di consolidamento, mentre alla zona presso progressiva m 2080 (fig. 12), ove è stato ricavato il valore più alto della resistenza a compressione, corrisponde effettivamente una roccia molto sana e massiva ove il comportamento dell'ammasso si avvicina a quello della matrice.

Si fa presente che le interruzioni riscontrabili nei diagrammi precedenti sono dovute all'incompletezza dei dati sulla base dei quali è stato effettuato lo studio.

Un'altra conferma dei risultati ottenuti si ha dal confronto tra la resistenza a compressione (fig. 10) e il diagramma che rappresenta la suddivisione in categorie di comportamento (fig. 9). Si nota infatti come i due diagrammi siano assai simili nel loro andamento, e cioè a zone caratterizzate da un'elevata resistenza a compressione corrispondono effettivamente zone caratterizzate da un buon comportamento geomeccanico e viceversa.

I risultati ottenuti permettono di effettuare una progettazione basata su elementi certi e comprovati e non più su pure e semplici previsioni, con maggiore aderenza, quindi, alle reali condizioni dell'ammasso roccioso interessato dal tracciato della galleria e consentono, in definitiva, l'ottimizzazione degli spessori del rivestimento finale.

7. CONCLUSIONI

Lo studio condotto costituisce, forse, un primo passo nella direzione dell'utilizzazione delle informazioni ricavabili dall'apertura di un foro pilota realizzato con una fresa per la progettazione delle gallerie.

La possibilità di dotare le macchine di scavo di moderne e più avanzate strumentazioni per l'acquisizione di elementi geomeccanici sempre più completi apre un orizzonte nuovo alla caratterizzazione degli ammassi rocciosi e consente di rinnovare e adeguare ai tempi la progettazione stessa delle gallerie.

BIBLIOGRAFIA

Atti della Giornata di Studio
"Scavo di gallerie in roccia con fresa a piena sezione" Torino, 12 aprile 1978

Calistri E. - Orsi S.
"Nuovi orientamenti nella progettazione delle gallerie mediante foro pilota"
Tesi di laurea. Università degli Studi di Firenze - Facoltà di Ingegneria.

Cooley W. - Lohnes P.
"Multivariate data analysis"
J. Wiley & Sons, New York 1971.

Kendall M.
"Multivariate analysis"
Hafner Press, New York 1975.