



L'avvento della legge Merloni (l.109/94 e successivi aggiornamenti l.216/95) con la sua lunga gestazione, peraltro non ancora conclusa a causa dell'atteso Regolamento di Attuazione, ha aperto la strada ad un rinnovamento ed aggiornamento delle normative tecniche di vari settori

IL RUOLO DELLA PROGETTAZIONE NELLE OPERE IN SOTTERRANEO

di P.Lumardi*

L'incoraggiamento a sviluppare questo processo di aggiornamento delle normative tecniche è venuto anche dalla constatazione che la nuova legge quadro sui LL PP ha posto l'accento sulla centralità e l'importanza della progettazione e sulla netta separazione tra fase progettuale e fase realizzativa. Ne consegue, dunque, la necessità di avere riferimenti più precisi ed attuali per la redazione di progetti approfonditi ed esaurienti. Nell'ottica dell'aggiornamento, nel campo delle opere in sotterraneo, sono sorte diverse iniziative aventi l'obiettivo di creare un valido strumento di supporto per la loro progettazione e costruzione. Prima di tali iniziative è stata il Progetto Nazionale per una Normativa delle Opere in Sotterraneo, promosso da ben sette associazioni operanti nel settore dell'ingegneria del sottosuolo. Esso ha prodotto un documento dal titolo "Linee guida per la progettazione, l'appalto e la costruzione delle opere in sotterraneo", recentemente pubblicato dalle riviste del settore. Un'altra importante iniziativa, attualmente in corso presso il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, è la Commissione di aggiornamento della normativa geotecnica, contenuta nel DM 11.03.88. I testi della commissione sono ancora riservati, tuttavia posso anticiparvi che anche in questa sede si è rilevata l'importanza del progetto e della sua strutturazione secondo precise fasi

concettuali. L'ANAS, che come altre Amministrazioni da tempo avvertiva l'esigenza di adattare i propri capitolati tecnici alle nuove tecnologie e ad una più moderna procedura progettuale, ha, in un certo senso, anticipato la tendenza al rinnovamento messa in atto dalla legge Merloni avendo istituito, già nel 1992, una commissione di studio che nel '93 produceva un nuovo capitolato tecnico basato sull'impostazione secondo l'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli. In esso l'iter progettuale e costruttivo viene sviluppato secondo un filo logico-consequenziale applicabile in qualsiasi contesto geologico e in qualunque situazione tenso-deformativa. Inoltre, vengono introdotte le tecnologie più avanzate entrate a far parte della pratica costruttiva delle opere in sotterraneo.

Stato dell'arte e nuovi indirizzi nella progettazione delle opere in sotterraneo

La pratica progettuale delle opere in sotterraneo negli ultimi decenni si è spesso esplicitata per la maggior parte a stretto contatto con i fronti di scavo. Le previsioni del progettista venivano infatti verificate ed adeguate a situazioni reali che, per ipotesi, si accettava potessero

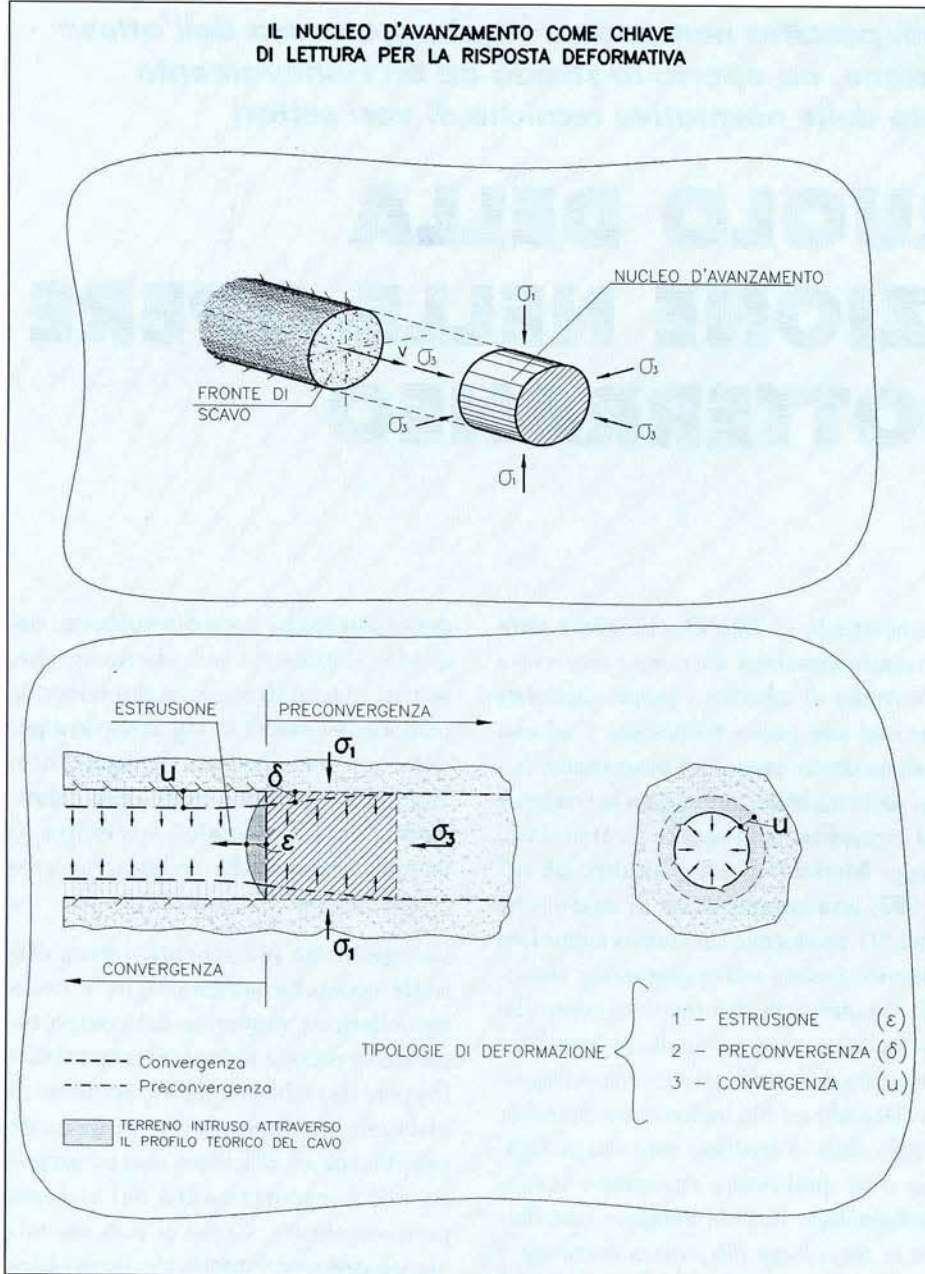
discostarsi anche considerevolmente dal quadro iniziale. Si può affermare che, avviati i lavori di scavo, si attendesse la reazione del mezzo in cui si scavava per elaborare una strategia di intervento. Tale situazione rende conto della definizione "osservazionale" attribuita ai metodi, spesso anche codificati in procedure, adottati in questa ottica.

Le esperienze più recenti, i progressi nelle tecniche geognostiche e nella modellazione numerica del comportamento di rocce e terreni interagenti con le opere da realizzare, hanno permesso di elaborare un'impostazione progettuale più efficace ed efficiente tesa ad anticipare il comportamento del sistema mezzo-struttura. Come si può agevolmente dedurre, l'approccio osservazionale reca un'intrinseca debolezza nella formulazione di previsioni attendibili in termini di tempi e di costi di costruzione.

Quasi tutti i progettisti di opere in sotterraneo, infatti, hanno potuto sperimentare notevoli scostamenti rispetto ai tempi e ai costi contrattuali delle opere, spesso causa di perplessità da parte della pubblica opinione sull'attendibilità del progetto.

Oggi, l'adeguamento a standard più avanzati nel settore delle opere pubbliche non consente di affrontare la realizzazione di un'infrastruttura senza un'attendibile programmazione delle risorse.

Fig. 1



Questa richiesta, che ha origine da precise istanze socio-politiche, richiede una svolta che deve iniziare proprio dalla progettazione. E' quindi nel campo della progettazione che vanno individuati e rimossi quei presupposti errati che impediscono di soddisfare le esigenze di programmabilità.

Per entrare nello specifico della tecnologia progettuale di maggiore diffusione, si può evidenziare come i metodi legati a descrizioni semplificate del sistema mezzo-struttura, quali ad es. NATM e classificazioni geomeccaniche, possono essere sostituiti da un approccio più ade-

rente alla realtà.

I metodi come il NATM, il metodo "Convergenza-Confinamento" e similari:

- identificano la risposta deformativa con la sola convergenza della cavità
- indicano per il controllo e la regimazione della convergenza l'adozione di interventi solo di tipo radiale (centine, bulloni, priverestimenti e rivestimenti più o meno rigidi, ecc.).

Da tali presupposti, ne consegue che:

- 1) il problema di una galleria in avanzamento viene trattato come problema piano;

- 2) si prendono in considerazione solo i fenomeni deformativi che si manifestano a valle del fronte di avanzamento senza preoccuparsi di ciò che avviene a monte;

- 3) si pretende di regimare i fenomeni deformativi della cavità intervenendo ad un certo punto della loro evoluzione ignorandone l'origine;

- 4) si progettano le sezioni tipo sulla base di fuorvianti classificazioni geomeccaniche che niente hanno a che vedere con il reale comportamento tenso-deformativo dell'ammasso (fig. 4).

Questo modo di procedere, decisamente limitativo, ha permesso di affrontare e risolvere i problemi statici di gallerie realizzate in terreni di buona consistenza e interessati da campi di tensioni di modesta entità (per le quali è possibile ottenere discreti successi anche in mancanza di idee chiare in fatto di comportamento tenso-deformativo dell'ammasso in seguito allo scavo), ma ha creato grossi problemi in casi più complessi, alimentando il contenzioso che si instaura tra Direzione Lavori ed Impresa.

A fronte di questa tradizionale impostazione, la ricerca sperimentale condotta negli ultimi decenni ha posto in evidenza che:

- il problema statico di una galleria in fase di avanzamento è prettamente tridimensionale e assolutamente non schematizzabile entro un semplice caso piano;

- nell'ambito della risposta deformativa dell'ammasso all'azione dello scavo la convergenza è solo l'ultimo stadio di un processo tenso-deformativo assai complesso, che nasce e si sviluppa a monte del fronte di scavo e che costituisce la vera causa dei fenomeni che ivi si producono e dei quali essa è solo uno degli effetti.

In un processo causa-effetto in cui per causa si intenda l'azione dello scavo all'interno di un terreno sottoposto ad



un certo campo di tensioni e per effetto la risposta deformativa del sistema fronte di avanzamento-cavità, se si desidera contenere quest'ultimo entro certi limiti, è indispensabile risalire alla causa che lo ha prodotto ed agire su di essa. Si tratta in definitiva di intervenire sulle cause per garantire gli effetti, al contrario di quanto proposto fino ad oggi dagli approcci progettuali e costruttivi osservazionali più in uso, che, ignorando le prime, si limitano ad intervenire sui secondi (le convergenze) quando ormai si è costretti a subirne le conseguenze, soprattutto nei casi in cui diventano incontrollabili (elevate deformazioni e collasso della cavità).

Nella realtà, se si osservano i problemi legati alla stabilità degli scavi nella fase di avanzamento di una galleria, e se si considera il modello di riferimento non più come piano ma come tridimensionale, introducendo il concetto di nucleo di avanzamento (fig. 1) definito come quella porzione di terreno che sta a monte del fronte stesso, di forma pressoché cilindrica e avente dimensioni trasversale e longitudinale dell'ordine del diametro del tunnel, si può osservare che:

- la risposta deformativa, come reazione

all'azione dello scavo nasce a monte del fronte di scavo in termini di estrusione del nucleo e preconvergenza del cavo ed evolve poi a valle in termini di convergenza;

- la risposta deformativa dipende dalla resistenza e dalla deformabilità del nucleo d'avanzamento che ne diviene la "vera causa";

- il nucleo di avanzamento è quindi la "nuova chiave di lettura", in questo processo di causa-effetto, che permette di risalire agevolmente allo studio delle cause per avere la possibilità di controllarne e regimarne gli effetti.

A questi presupposti si ispira l'approccio progettuale dell'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli (ADECO-RS), che per la prima volta permette di progettare e programmare un'opera in termini di tempi e costi di costruzione.

Nel paragrafo seguente, si riporta una descrizione più completa dell'approccio progettuale basato sui concetti sopra sintetizzati, allo scopo di offrire un quadro dei margini di miglioramento che possono essere apportati alle tecniche progettuali che sino ad oggi sono state di impiego corrente.

L'approccio progettuale mediante l'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli.

Generalità

L'Analisi delle DEformazioni CONtrollate nelle Rocce e nei Suoli (acronimo ADECO-RS) si contraddistingue, da quelli che sono stati sino ad oggi seguiti, per diverse importanti caratteristiche:

- 1) il progetto e la costruzione di una galleria non si identificano più come in passato, ma rappresentano due momenti ben distinti e con una fisionomia ben definita in termini cronologici e pratici;
- 2) il metodo si basa sulla previsione, il controllo e l'interpretazione della risposta deformativa dell'ammasso allo scavo, che diventa l'unico parametro a cui riferirsi per via teorica, come oggetto di previsione e regimazione, e poi per via sperimentale, come oggetto di lettura ed interpretazione per la messa a punto del progetto in corso d'opera;
- 3) esso introduce il concetto di precontenimento del cavo (fig. 2), che completa il già noto concetto di contenimento, attraverso il quale è possibile

Fig. 2

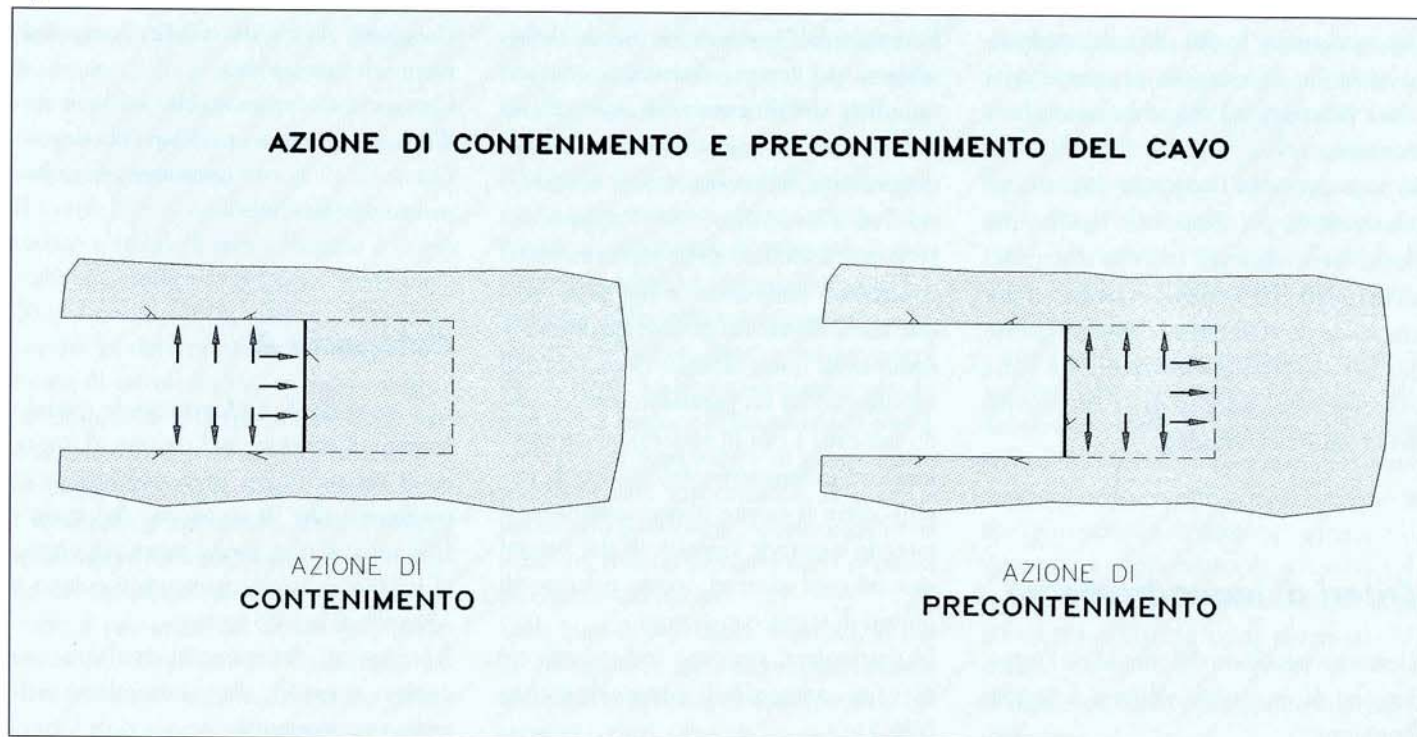
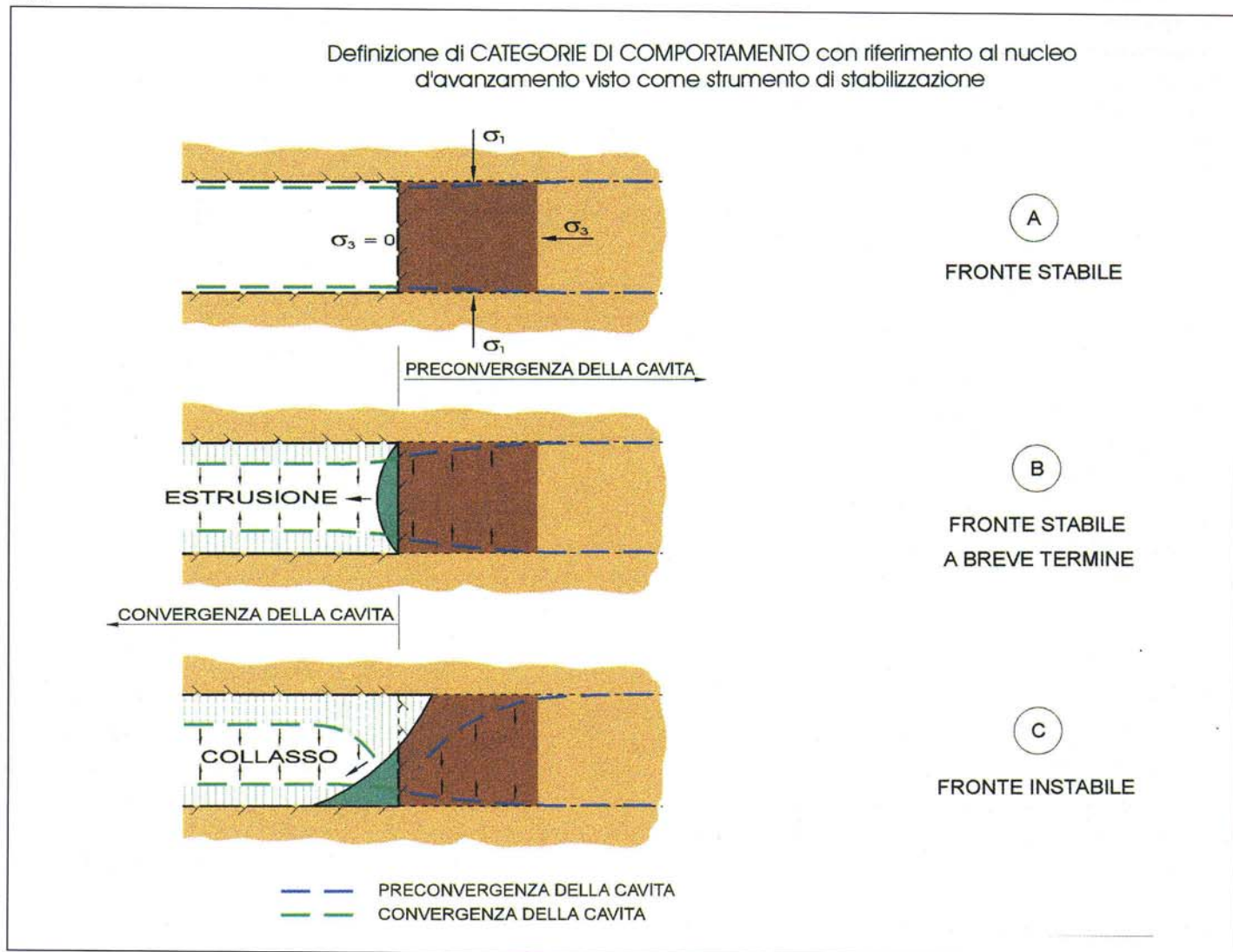


Fig. 3



superare anche le più difficili condizioni statiche in maniera programmata, senza ricorrere ad improvvisazioni costruttive;

4) esso prevede l'impiego dei sistemi conservativi, per mantenere quanto più possibile inalterate le caratteristiche strutturali del terreno, inteso come materiale da costruzione, quando queste giocano un ruolo fondamentale sulla velocità e la cadenza di avanzamento dei lavori in sotterraneo.

Criteri di inquadramento

Elemento peculiare del metodo è l'introduzione di un nuovo sistema di inquadramento.

Partendo dall'osservazione che le deformazioni del terreno durante lo scavo e quindi la stabilità stessa di una galleria sono legate al comportamento tenso-deformativo del sistema fronte di scavo - nucleo d'avanzamento, l'approccio secondo l'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli assume, come elemento di classificazione, la stabilità di quest'ultimo. Così, facendo riferimento ad un parametro unico valido per tutti i tipi di terreno (il comportamento deformativo del nucleo di terreno oltre il fronte d'avanzamento), il metodo supera le limitazioni dei sistemi sino ad oggi adottati, specie nel caso di terreni di scarsa consistenza.

In particolare, vengono individuate tre diverse categorie di comportamento (fig. 3):

Categoria A: fronte stabile, comportamento di tipo lapideo;
 Categoria B: fronte stabile a breve termine, comportamento di tipo coesivo;
 Categoria C: fronte instabile, comportamento di tipo sciolto.

Categoria A

La Categoria A è identificabile quando lo stato di coazione nel terreno al fronte ed al contorno del cavo non supera le caratteristiche di resistenza del mezzo. L'effetto arco" si forma tanto più vicino al profilo di scavo quanto più questo è aderente al profilo teorico.

I fenomeni deformativi evolvono in campo elastico, sono immediati e di ordine centimetrico.



Il fronte di scavo è globalmente stabile. Si possono verificare solo instabilità locali riconducibili al distacco gravitativo di blocchi isolati da uno sfavorevole assetto strutturale dell'ammasso roccioso; in questo contesto, infatti, giuoca un ruolo fondamentale l'anisotropia tensionale e deformativa del terreno.

L'eventuale presenza di acqua, anche in regime idrodinamico, non influenza la stabilità della galleria, a meno che non si tratti di terreni alterabili o che gradienti idraulici troppo intensi non provochino un dilavamento tale da abbattere la resistenza al taglio lungo i piani di discontinuità.

Gli interventi di stabilizzazione sono per lo più volti ad impedire la sfioritura del terreno ed al mantenimento del profilo di scavo.

Categoria B

La Categoria B è identificabile quando lo stato di coazione nel terreno al fronte ed al contorno del cavo, durante l'avanzamento, è tale da superare la capacità di resistenza in campo elastico del mezzo.

L'effetto arco non si realizza immediatamente al contorno del cavo, bensì ad una distanza che dipende dalla potenza della fascia dove il terreno subisce il fenomeno della plasticizzazione.

I fenomeni deformativi evolvono in campo elastoplastico, sono differiti e di ordine decimetrico.

Il fronte alle normali cadenze di avanzamento è stabile a breve termine e la sua stabilità migliora o peggiora aumentando o diminuendo la velocità di avanzamento. Le deformazioni del nucleo sotto forma di estrusioni non condizionano la stabilità della galleria, perché il terreno è ancora in grado di mobilitare una sufficiente resistenza residua.

I fenomeni d'instabilità, sotto forma di splaccaggi diffusi sul fronte ed al contorno del cavo lasciano il tempo di operare dopo il passaggio del fronte con interventi di stabilizzazione tradizionali di contenimento radiale. In talune circostanze può essere necessario ricorrere

anche ad azioni di precontenimento del cavo, bilanciando gli interventi di stabilizzazione tra il fronte ed il cavo in modo da contenere i fenomeni deformativi in limiti accettabili. La presenza di acqua, specie se in regime idrodinamico, riducendo la capacità di resistenza al taglio del terreno, favorisce l'estendersi della plasticizzazione ed accresce quindi l'importanza dei fenomeni d'instabilità. E' necessario perciò prevenirla soprattutto nella zona del fronte, deviandone i percorsi all'esterno del nucleo.

Categoria C

La Categoria C è identificabile quando lo stato di coazione nel terreno supera sensibilmente la capacità di resistenza dello stesso anche nella zona del fronte d'avanzamento. L'effetto arco non può formarsi né al fronte né al contorno del cavo poiché il terreno non possiede sufficiente resistenza residua. I fenomeni deformativi sono inaccettabili perché evolvono immediatamente in campo di rottura dando luogo a gravi manifestazioni d'instabilità, quali il crollo del fronte ed il collasso della cavità, senza lasciare il tempo di operare con interventi di contenimento radiale: occorrono interventi di preconsolidamento lanciati a monte del fronte di avanzamento che sviluppino un'azione di precontenimento capace di creare effetti arco artificiali.

La presenza di acqua in regime idrostatico, se non tenuta in debito conto, riducendo ulteriormente la capacità di resistenza al taglio del terreno, favorisce l'estendersi della plasticizzazione ed accresce, in definitiva, l'entità dei fenomeni deformativi. La stessa, in regime idrodinamico, si traduce in fenomeni di trasciamento di materiale e di sifonamento assolutamente inaccettabili. E' dunque necessario prevenirla, soprattutto nella zona del fronte, deviandone i percorsi all'esterno del nucleo.

Sulla base di esperienze maturate in più di venticinque anni di progettazione e costruzione di opere in sotterraneo si osserva che tutti i casi di opere già realiz-

zate ricadono in queste tre categorie di comportamento.

Fasi di sviluppo dell'approccio basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli.

Nello sviluppo logico del progetto e della costruzione di una galleria, l'approccio basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli suggerisce di procedere secondo precise fasi.

Il momento della progettazione si sviluppa in:

- una fase conoscitiva: durante la quale avviene l'acquisizione, in relazione ai terreni interessati dalla galleria, delle conoscenze su morfologia, litologia, stratigrafia, struttura, tettonica, idrologia, geotecnica, geomeccanica indispensabili al progettista per compiere l'analisi degli equilibri naturali preesistenti e per poter operare correttamente nella successiva fase di diagnosi;

- una fase di diagnosi: durante la quale, sulla base degli elementi raccolti in fase conoscitiva, il progettista è chiamato a fare previsioni attendibili riguardo al comportamento della futura galleria durante lo scavo. Esse devono essere fatte in termini di genesi, localizzazione, evoluzione ed entità dei probabili fenomeni deformativi che si innescano al fronte d'avanzamento e di conseguenza nella fascia di terreno al contorno del cavo. Da queste previsioni dipende la scelta degli strumenti di stabilizzazione, quindi la riuscita dell'opera.

- una fase di terapia: durante la quale, a seguito delle previsioni su tipo, localizzazione ed entità dei fenomeni deformativi al fronte ed al contorno del cavo previsti in fase di diagnosi, si operano le scelte in termini di sistemi, cadenze, fasi di scavo e soprattutto di strumenti di stabilizzazione e di bilanciamento degli stessi tra il fronte ed il perimetro di scavo.

Il momento della costruzione comprende invece:



- una **fase operativa** (in cui si realizza lo scavo della galleria con le modalità previste dal progetto);

- una **fase di verifica**: nella quale, durante la costruzione della galleria, si verifica, attraverso un'adeguata campagna di misure di convergenza superficiali e profonde, la correttezza delle previsioni fatte in fase di diagnosi per la messa a punto del progetto in fase operativa. In fase di esercizio della galleria si esegue un monitoraggio sistematico per controllarne la sicurezza in tutto l'arco della sua vita.

Progettare correttamente un'opera in sotterraneo significherà allora saper prevedere, sulla base della conoscenza degli equilibri iniziali preesistenti, il comportamento che il terreno avrà durante lo scavo in termini di innesco ed evoluzione dei fenomeni deformativi, al fine di definire conseguentemente le tipologie d'intervento atte a contenerne l'effetto entro limiti accettabili, stabilendone i tempi e le cadenze di applicazione in funzione dell'avanzamento e della posizione del fronte di scavo.

Costruire correttamente un'opera in sotterraneo significherà, d'altra parte, operare nel rispetto delle scelte progettuali: in primo luogo leggendo accuratamente le risposte del terreno all'azione dell'avanzamento degli scavi e degli interventi di stabilizzazione, in termini di estrusione del fronte, convergenze superficiali e profonde del fronte e delle pareti di scavo; in secondo luogo bilanciando, una volta interpretati i risultati delle letture, sfondi, velocità e cadenza di avanzamento, intensità, collocazione e tempi di applicazione degli interventi di stabilizzazione tra il fronte ed il perimetro di scavo.

Fase conoscitiva

Aprire uno scavo in sotterraneo implica turbare gli equilibri preesistenti. Progettare questo scavo riducendo al minimo il disturbo al mezzo in cui si deve operare, quindi riducendo al minimo la risposta deformativa, significa allora la conoscenza preventiva ed il più

possibile completa dello stato degli equilibri naturali presenti nel terreno prima dell'intervento.

Da ciò discende la necessità di far precedere il momento della progettazione vera e propria e il momento della costruzione di una galleria da una fase conoscitiva durante la quale avviene l'acquisizione, in relazione ai terreni interessati dalle opere, di elementi litologici, strutturali, stratigrafici, morfologici, tettonici, idrologici, geotecnici, geomeccanici e tensionali, indispensabili al progettista per compiere l'analisi degli equilibri naturali preesistenti e per potere operare correttamente nella fase successiva di "diagnosi".

Lo studio in fase conoscitiva dovrà procedere in due tempi successivi.

In un primo tempo viene redatto il profilo geologico di tentativo in asse tracciato, sviluppato sulla base della Carta Geologica d'Italia 1:100.000, della letteratura esistente e dei rilievi aerofotogrammetrici, il tutto integrato dai rilievi di superficie, comprendenti:

- il rilievo litologico, con individuazione delle principali unità;
- il rilievo geomorfologico, con particolare riguardo alle condizioni di stabilità dei versanti;
- il rilievo geostrutturale, con l'individuazione delle principali linee di discontinuità;
- il rilievo idrogeologico, con la determinazione della rete idrologica principale ed il rilievo delle sorgenti. Di queste ultime sarà valutata la portata la cui evoluzione dovrà essere seguita in corso d'opera per stabilire l'influenza su esse dell'effetto drenante del cavo.

Il profilo di tentativo sarà accompagnato da una serie di schede litologiche dei litotipi incontrati in affioramento lungo il tracciato riportanti la sintesi dei rilievi eseguiti.

Qualora lo studio di prima fase deponga per la fattibilità di un cunicolo pilota, la progettazione (esecutiva) dovrà avvalersi dei rilievi geologici e geomeccanici in cunicolo, nonché delle prove in situ progettate per la valutazione delle caratteristiche di resistenza e deformabilità dell'ammasso roccioso.

In un secondo tempo, sulla scorta dei risultati dello studio di prima fase, dovrà essere elaborato il progetto delle indagini geognostiche, comprendente la definizione delle indagini geofisiche indirette, delle prove in situ e dei sondaggi, prevalentemente a carotaggio continuo, di taratura, con recupero di campioni indisturbati nella porzione d'ammasso interessata dallo scavo.

Il prelievo dei campioni indisturbati sarà eseguito con attrezzature idonee a recare il minor disturbo possibile all'ammasso.

I campioni prelevati verranno utilizzati per la valutazione delle proprietà fisico-chimiche dell'ammasso roccioso in relazione alla loro evoluzione nel tempo, e per la valutazione dei parametri geotecnici e geomeccanici.

Verranno così determinati:

- curva intrinseca della matrice;
- parametri di deformabilità della matrice, modulo elastico iniziale e modulo di deformazione totale valutato per livelli di sollecitazione paragonabili a quelli che si instaureranno in seguito alla costruzione dell'opera.

Ove possibile dovranno essere determinate le caratteristiche di resistenza e deformabilità delle eventuali discontinuità strutturali da cui derivare le curve intrinseche ed i parametri di deformabilità d'ammasso sulla base di considerazioni di dettaglio.

Lo studio di seconda fase sarà completato dalla stima dello stato tensionale naturale, sulla base delle coperture in gioco e delle strutture tettoniche principali.

A seconda della rilevanza dell'opera in progetto e della complessità delle strutture tettoniche interessate, può essere opportuno eseguire prove di misurazione del tensore naturale degli sforzi alla profondità del cavo.

Fase di diagnosi

In fase di diagnosi il progettista, sulla base degli elementi raccolti in fase conoscitiva, procede ad una suddivisione del tracciato in tratte a comportamento deformativo omogeneo, nell'am-



Fig. 4

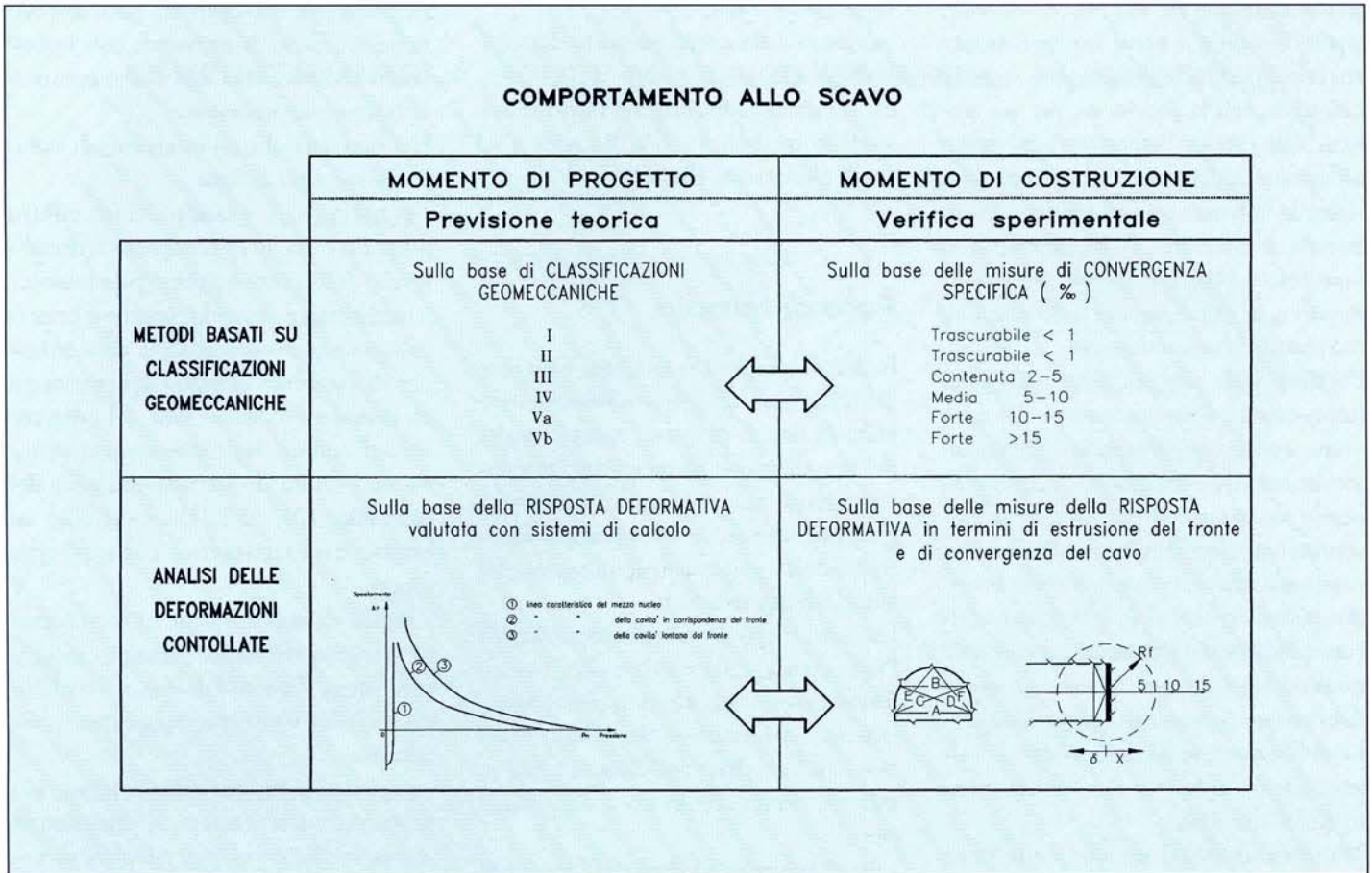
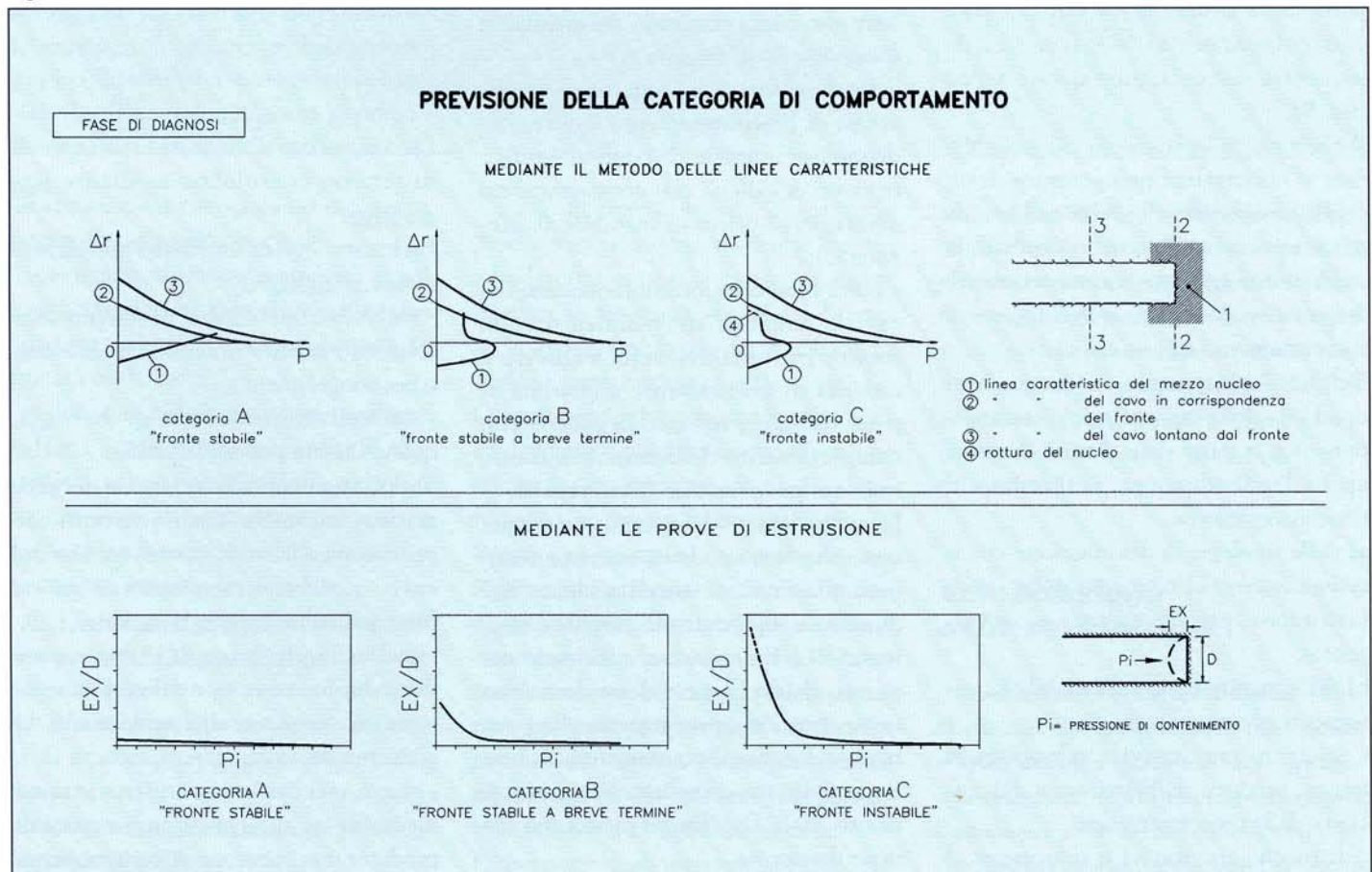


Fig. 5





bito delle tre categorie di comportamento fondamentali A, B, C (fronte stabile, fronte instabile a breve termine, fronte instabile). Onde perseguire questo obiettivo, egli fa previsioni, per via teorica, sulla risposta deformativa del mezzo all'azione dello scavo, con particolare riguardo ai fenomeni deformativi che, in assenza di interventi di stabilizzazione, si manifesterebbero al fronte di avanzamento e, di conseguenza, nella fascia di terreno al contorno del cavo.

L'analisi della risposta deformativa del fronte-nucleo d'avanzamento e del cavo viene condotta, in termini di genesi, localizzazione, evoluzione ed entità, facendo ricorso a metodi sperimentali e strumenti matematici quali le linee caratteristiche, gli elementi finiti bi-tridimensionali, ecc, che, in funzione dell'attendibilità dei parametri geotecnici e geomeccanici d'ingresso, siano in grado di orientare il progettista nella definizione dell'appartenenza delle tratte di galleria alle tre categorie di comportamento A,B,C già citate.

Tra quest'ultimi, il metodo delle linee caratteristiche, utilizzabile nella maggior parte delle situazioni correnti, appare particolarmente utile e semplice da impiegare per perseguire questo scopo (fig. 5).

Il risultato dello studio di diagnosi alla fine si concretizza nella stesura di un profilo longitudinale della galleria da progettare, sul quale sarà evidenziata la suddivisione in tratte a comportamento deformativo omogeneo e le categorie di comportamento ad esse associate.

Definita l'appartenenza di ciascuna tratta ad una delle tre categorie di comportamento, fa parte della fase di diagnosi anche l'individuazione, nell'ambito di ciascuna categoria:

a) delle tipologie di deformazione che si svilupperanno al contorno dello scavo (estrusione, preconvergenza e convergenza);

b) delle manifestazioni d'instabilità conseguenti ed attese, quali:

- distacchi gravitativi e splaccaggi al fronte, prodotti dall'estrusione del nucleo e dalla preconvergenza;

- distacchi gravitativi e splaccaggi al

contorno del cavo prodotti dalla convergenza del cavo;

- collasso della cavità prodotto dal crollo del fronte.

c) dei carichi mobilitati dallo scavo secondo modelli a solidi di carico e ad anelli plasticizzati (fig. 6).

Fase di terapia

In fase di terapia il progettista, sulla base delle categorie di comportamento attribuite in fase di diagnosi, opera la scelta del tipo di azione da esercitare (precontenimento, contenimento, o presostegno) per ottenere la completa stabilizzazione della galleria (regimazione dei fenomeni deformativi).

Da quanto esposto in precedenza, circa l'importanza della rigidità del nucleo d'avanzamento nei riguardi del comportamento deformativo del fronte e del cavo, quindi della stabilità di tutta la galleria, risulta che in linea di massima egli:

- potrà limitarsi ad esercitare azioni di semplice contenimento, nel caso di gallerie con comportamento deformativo a fronte stabile (Categoria A);

- dovrà orientarsi a produrre energiche azioni di precontenimento - oltre, ovviamente, a quelle di contenimento - nel caso di gallerie con comportamento deformativo a fronte instabile (Categoria C);

- potrà optare tra precontenimento del cavo o semplice contenimento dello stesso, in funzione della velocità e cadenza di avanzamento che stima di poter realizzare, nel caso di gallerie con comportamento deformativo a fronte stabile a breve termine (Categoria B).

La scelta del tipo di azione da esercitare, una volta operata, dovrà essere perfezionata in termini di sistemi, cadenze, fasi di scavo e soprattutto interventi e strumenti di stabilizzazione, stabilendo per questi ultimi come e dove dovranno essere messi in opera rispetto alla posizione del fronte d'avanzamento, in funzione delle tre categorie di comportamento A, B, C, affinché producano l'azione desiderata.

Per ottenere nella pratica il tipo di azione prescelto, il progettista ha a disposizione una serie di strumenti con i quali può realizzare tutti i tipi di interventi di stabilizzazione necessari.

Nel ricordare che gli interventi di stabilizzazione sono di tipo:

- conservativo, quando il loro effetto primario è quello di contenere il decadimento della tensione principale minore;

- migliorativo, quando agiscono principalmente incrementando le caratteristiche di resistenza al taglio del mezzo; tra gli strumenti a disposizione del progettista nell'ambito degli interventi che producono azioni di precontenimento del cavo (fig. 10), quelli che esercitano un effetto essenzialmente conservativo sono:

- tegoli di spritz-beton fibrorinforzato realizzati mediante pretaglio meccanico lungo il profilo di scavo, con l'impiego dello stesso pretaglio come cassaforma;

- preconsolidamento del nucleo, per profondità non inferiori al diametro di scavo, mediante chiodi tubolari di vetroresina fissati al terreno con malta cementizia, con intensità da definire in funzione dell'incremento di resistenza al taglio che si intende conferire allo stesso;

- ombrelli tronco-conici, costituiti dall'accostamento di colonne suborizzontali di terreno consolidato mediante jet-grouting.

Esercitano invece un effetto prevalentemente migliorativo:

- ombrelli tronco-conici di terreno consolidato mediante iniezioni tradizionali o per congelamento;

- ombrelli tronco-conici di drenaggi, quando si è in presenza di falda.

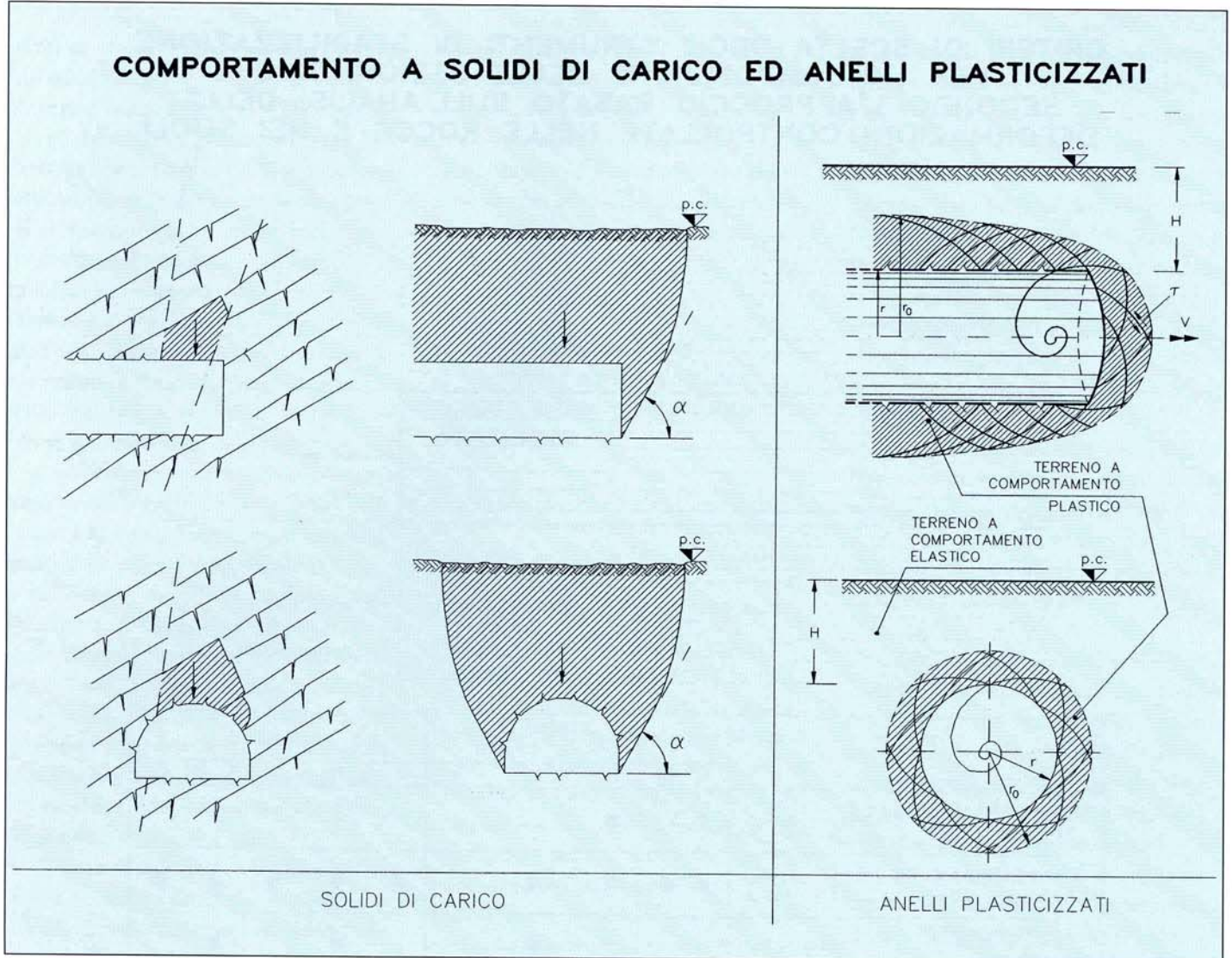
Tra gli strumenti a disposizione del progettista nell'ambito degli interventi che producono azioni di contenimento del cavo, quelli che esercitano un'azione principalmente conservativa sono:

- guscio di spritz-beton di 1° fase, capace di produrre, in funzione del proprio spessore, una pressione di contenimento al contorno del cavo;

- scavo meccanizzato a piena sezione mediante scudi a pressione, capaci di produrre una pressione di contenimento



Fig. 6



sul fronte e sul cavo (anello di rivestimento di conchi prefabbricati);

- scavo meccanizzato mediante scudi aperti o lance, che forniscono un contenimento radiale al terreno durante le operazioni di scavo;

- bullonatura radiale realizzata mediante bulloni ad ancoraggio puntuale che applica, sul paramento della galleria, una pressione di contenimento "attiva", di entità predeterminata dalla pretensione con cui vengono tesi i bulloni;

- arco rovescio, che crea una struttura di rivestimento chiusa, moltiplicando la capacità del guscio di rivestimento di 1° e di 2° fase di sviluppare elevate pressioni di contenimento al contorno del cavo.

Esercita invece un effetto prevalentemente migliorativo:

- anello di terreno armato al contorno della cavità, realizzato mediante bulloni ad aderenza continua capaci di incrementare la resistenza al taglio del terreno trattato producendo un innalzamento della curva intrinseca della stessa.

Gli strumenti, che non ricadono in questi due ambiti poiché non producono né azioni di precontenimento né di contenimento, si dicono interventi di presostegno o di sostegno, a seconda che agiscano o non agiscano a monte del fronte d'avanzamento. Essi non hanno alcuna influenza sulla formazione dell'"effetto arco", non essendo in grado né di contenere in maniera apprezzabile il decadimento della tensione principale minore né di migliorare in maniera determinante la resistenza al taglio del terreno.

Fanno parte degli interventi di presoste-

gno, ad esempio, gli infilaggi, eredi dei marciavanti, che sebbene costituiti da elementi strutturali appoggiati su centine messe in opera dopo lo scavo e disposti lungo una generatrice circolare, non sono in grado di produrre effetti arco in avanzamento per carenza di reciproca collaborazione in senso trasversale.

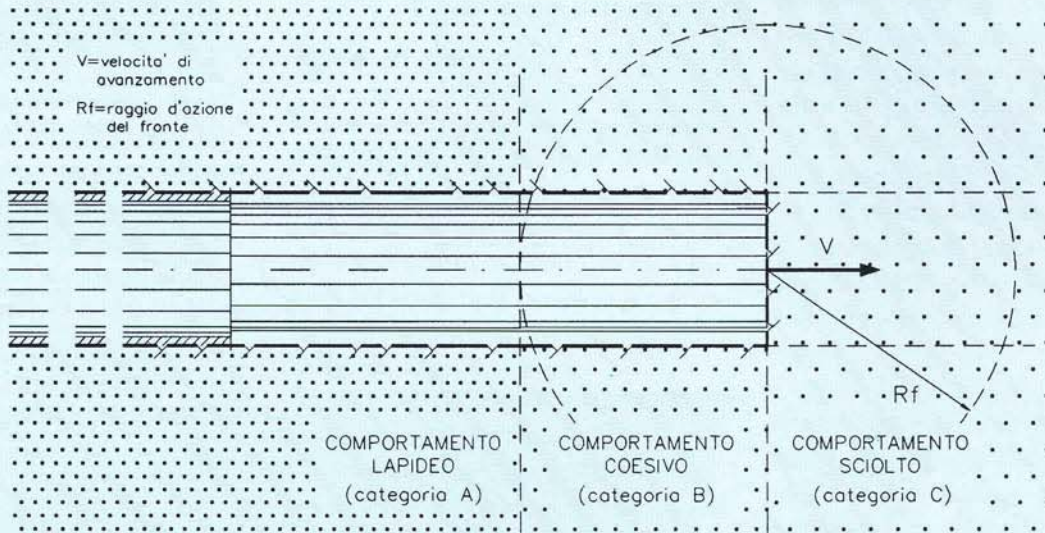
Composizione delle sezioni tipo

Nei paragrafi precedenti abbiamo visto che la stabilità del sistema fronte-nucleo d'avanzamento gioca un ruolo fondamentale sulla risposta deformativa dell'ammasso all'apertura della cavità in sotterraneo e quindi sulla stabilità stessa



Fig. 7

CRITERI DI SCELTA DEGLI STRUMENTI DI STABILIZZAZIONE PER LA COMPOSIZIONE DELLE SEZIONI TIPO SECONDO L'APPROCCIO BASATO SULL'ANALISI DELLE DEFORMAZIONI CONTROLLATE NELLE ROCCE E NEI SUOLI



FRONTE		STABILE		STABILE A BREVE TERMINE			INSTABILE						
		A ₁	A ₂	B ₁	B ₂	B ₃	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅		
STRUMENTI DI STABILIZZAZIONE	BULLONI RADIALI			●		●							
	SPRITZ-BETON ARMATO (*)			●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	CONSOLIDAMENTO DEL NUCLEO MEDIANTE TUBI IN VTR					●		●			●		
	CONSOLIDAMENTO DEL CONTORNO DEL CAVO MEDIANTE TUBI IN VTR										●		
	ARCO ROVESCIO				●	●	●	●	●	●	●	●	●
	PRETAGLIO O PRETUNNEL						●		●				
	CONSOLIDAMENTI RADIALI DA CUNICOLO PILOTA										●		
	JET-GROUTING SUBORIZZONTALE							●					
	INIEZIONI IN AVANZAMENTO E CONGELAMENTO												●
	DRENAGGI			●	●	●	●	●	●		●		
	INFILAGGI			●									
FENOMENI DEFORMATIVI		CENTI-METRICI		DECIMETRICI			INACCETTABILI						

(*) ARMATURA COSTITUITA DA : CENTINE E/O RETE ELETTRISALDATA E/O FIBRE D'ACCIAIO



della galleria a breve ed a lungo termine. Abbiamo visto anche che le condizioni di stabilità di detto sistema sono riconducibili a tre categorie di comportamento fondamentali, che caratterizzano ed inquadrano, quindi, il tipo di galleria da scavare per la tratta in esame ed alle quali è del tutto conseguente riferirsi al momento della scelta degli interventi di stabilizzazione cui affidare la stabilità e la sicurezza dell'opera.

Tenuto conto di ciò (fig. 7), nell'ambito dell'inquadramento proposto, è schematicamente indicato il campo di applicabilità dei singoli strumenti di stabilizzazione a disposizione del progettista, dal cui assemblaggio scaturiscono le sezioni tipo idonee a garantire la fattibilità dello scavo e la stabilità a breve e a lungo termine della galleria. In particolare:

- nelle tratte di galleria a fronte stabile (categoria di comportamento A, sollecitazioni: in campo elastico, manifestazioni d'instabilità tipiche: distacchi gravitativi), gli interventi di stabilizzazione proposti hanno funzione soprattutto protettiva e sono determinati dall'assetto geostrutturale dell'ammasso e dall'eventuale presenza di acqua.

- nelle tratte di galleria a fronte stabile a breve termine (categoria di comportamento B, sollecitazioni: in campo elastoplastico, manifestazioni d'instabilità tipiche: splaccaggi per estrusione del nucleo, preconvergenza e convergenza del cavo) gli interventi di stabilizzazione devono garantire la formazione dell'effetto arco il più possibile vicino al profilo di scavo. Vengono quindi proposti strumenti capaci d'impedire il decadimento delle caratteristiche di resistenza e deformabilità del terreno con particolare riferimento al sistema fronte-nucleo d'avanzamento, sviluppando azioni di contenimento o precontenimento adeguate a contrastare l'insorgere di fenomeni di plasticizzazione dell'ammasso, o per lo meno a limitarne l'estensione.

- Nelle tratte di galleria a fronte instabile (categoria di comportamento C, sollecitazioni: in campo di rottura, manifestazioni d'instabilità tipiche: crollo del fronte, collasso della cavità) gli interventi di stabilizzazione devono garantire

la formazione di un effetto arco artificiale in anticipo sul fronte d'avanzamento. Vengono quindi proposti strumenti di precontenimento del cavo che, assicurando la stabilità del sistema fronte-nucleo d'avanzamento, impediscano di fatto, quando i fenomeni deformativi sono ancora controllabili, alla tensione principale minore s_3 di annullarsi (fig. 7).

Dimensionamento e verifica delle sezioni tipo. Sintesi della fase di terapia

Scelto il tipo di azione da esercitare, progettati gli interventi per realizzarla e composte le sezioni tipo, al progettista rimane ancora da dimensionare e verificare queste ultime con i metodi di calcolo già impiegati in fase di diagnosi. Di particolare rilievo al riguardo è la verifica del corretto bilanciamento degli interventi tra il fronte ed il perimetro di scavo e la valutazione del loro grado di efficacia in base all'accettabilità del comportamento tenso-deformativo previsto per la galleria una volta che sarà stato eseguito l'intervento.

Naturalmente il calcolo, a seconda della particolare situazione tenso-deformativa supposta, può essere condotto ricorrendo a semplici modelli di "convergenza-contenimento" o, al contrario, a più complessi modelli di estrusione-contenimento o estrusione-precontenimento.

Il risultato dello studio di terapia viene quindi sintetizzato sul profilo geometrico della galleria riportando, per ogni tratta a comportamento deformativo omogeneo, la sezione tipo da adottare.

Fase di verifica

Una volta superato il momento della progettazione, l'avvio dei lavori di scavo deve coincidere con quello delle operazioni di controllo dei fenomeni deformativi, che potranno prodursi in superficie, lungo il tracciato della galleria, e all'interno della cavità, in corrispondenza al

fronte ed alle pareti di scavo: con speciali estensimetri a nastro vengono controllate le convergenze perimetrali; mentre con estensimetri longitudinali e radiali multibase ad asta si controllano le estrusioni e le convergenze superficiali e profonde all'interno dell'ammasso a distanze variabili dal profilo di scavo. Quando poi le coperture della galleria lo permettono è particolarmente interessante, soprattutto per la misura dei fenomeni deformativi precedenti all'arrivo del fronte, mettere in opera, in una determinata sezione, degli estensimetri verticali multibase.

Quanto più saranno sistematici ed accurati questi controlli tanto più risulteranno affidabili ed utili le informazioni per il progettista il cui compito potrà risultare più o meno semplice a seconda del campo in cui evolvono i fenomeni deformativi.

Se infatti l'avanzamento si svolge in un mezzo a comportamento di tipo lapideo o sciolto, dove i fenomeni deformativi previsti sono talmente ridotti da non destare preoccupazione (caso dei terreni litoidi sotto deboli medie-coperture) o talmente elevati da essere inaccettabili e da indurre quindi a scelte di precontenimento del cavo (caso dei terreni incoerenti sotto qualsiasi copertura, argillosi e litoidi sotto forti coperture) il compito del progettista, una volta operate le scelte di regimazione adeguate alle situazioni previste, è molto alleviato; di conseguenza è ridotto anche il peso dei controlli in considerazione del fatto che i fenomeni deformativi hanno e devono avere una evoluzione rapida nel tempo e limitata come entità.

Diverso è l'impegno del progettista e diversa è la cura che deve essere messa nel rilevare le deformazioni del fronte, le convergenze superficiali e profonde del cavo, seguendo la loro evoluzione nel tempo e nello spazio, quando l'avanzamento avviene in un mezzo a comportamento di tipo coesivo.

In questo caso, infatti, dovendo trattare con fenomeni deformativi lenti, progressivi e differiti, di entità sempre crescente, solo dalla lettura dei controlli il progettista può prendere lo spunto da un



Fig. 8

SISTEMA ADECO-RS: VERIFICA

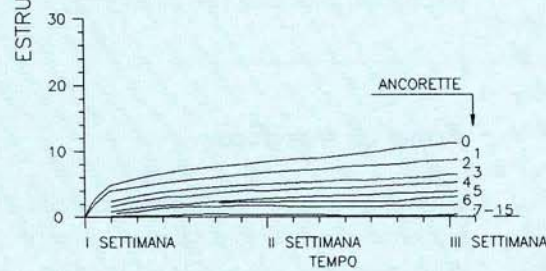
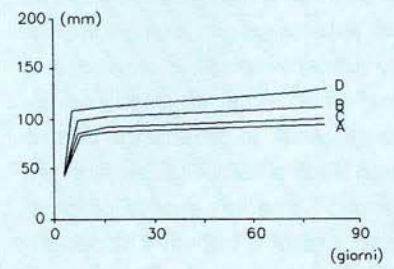
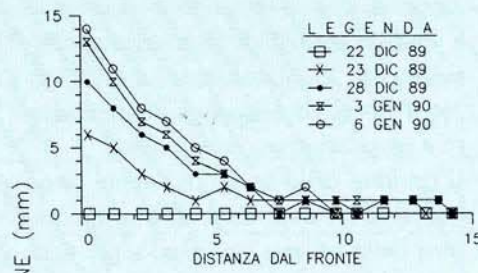
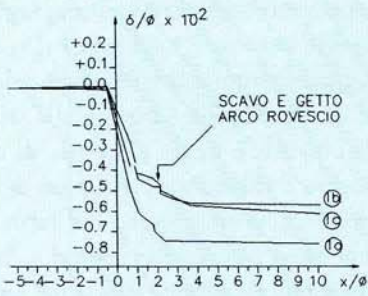
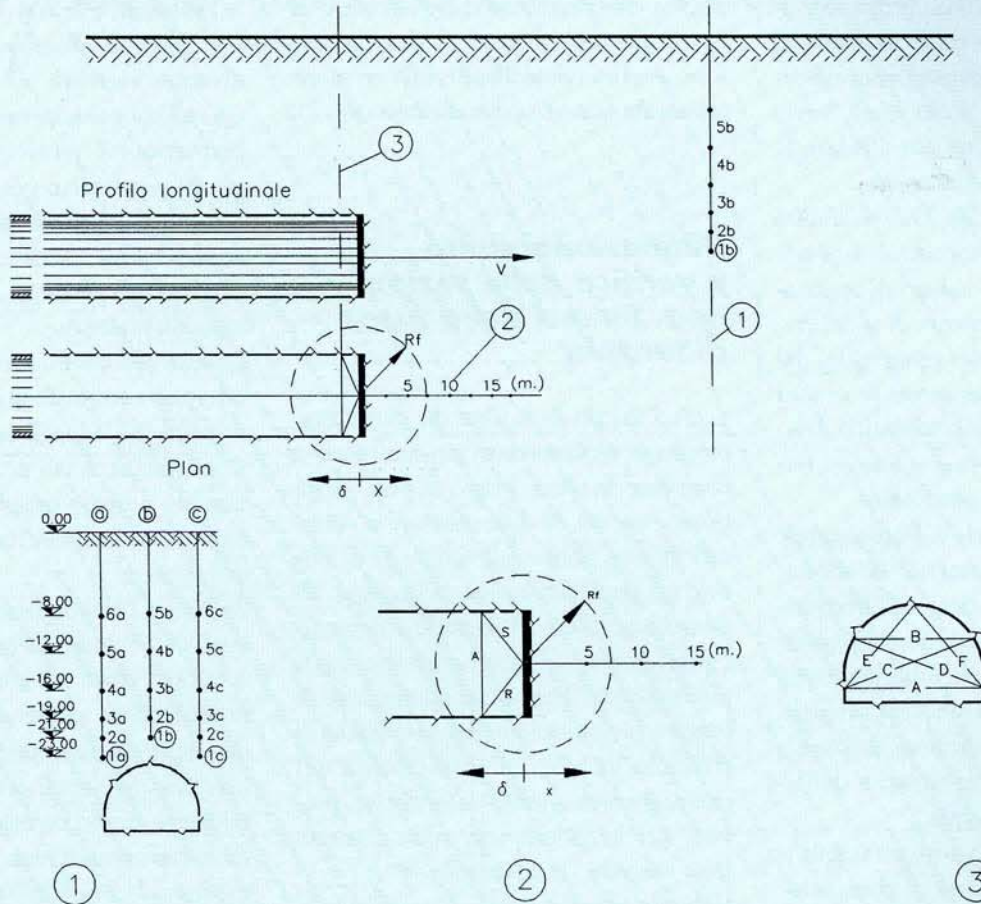
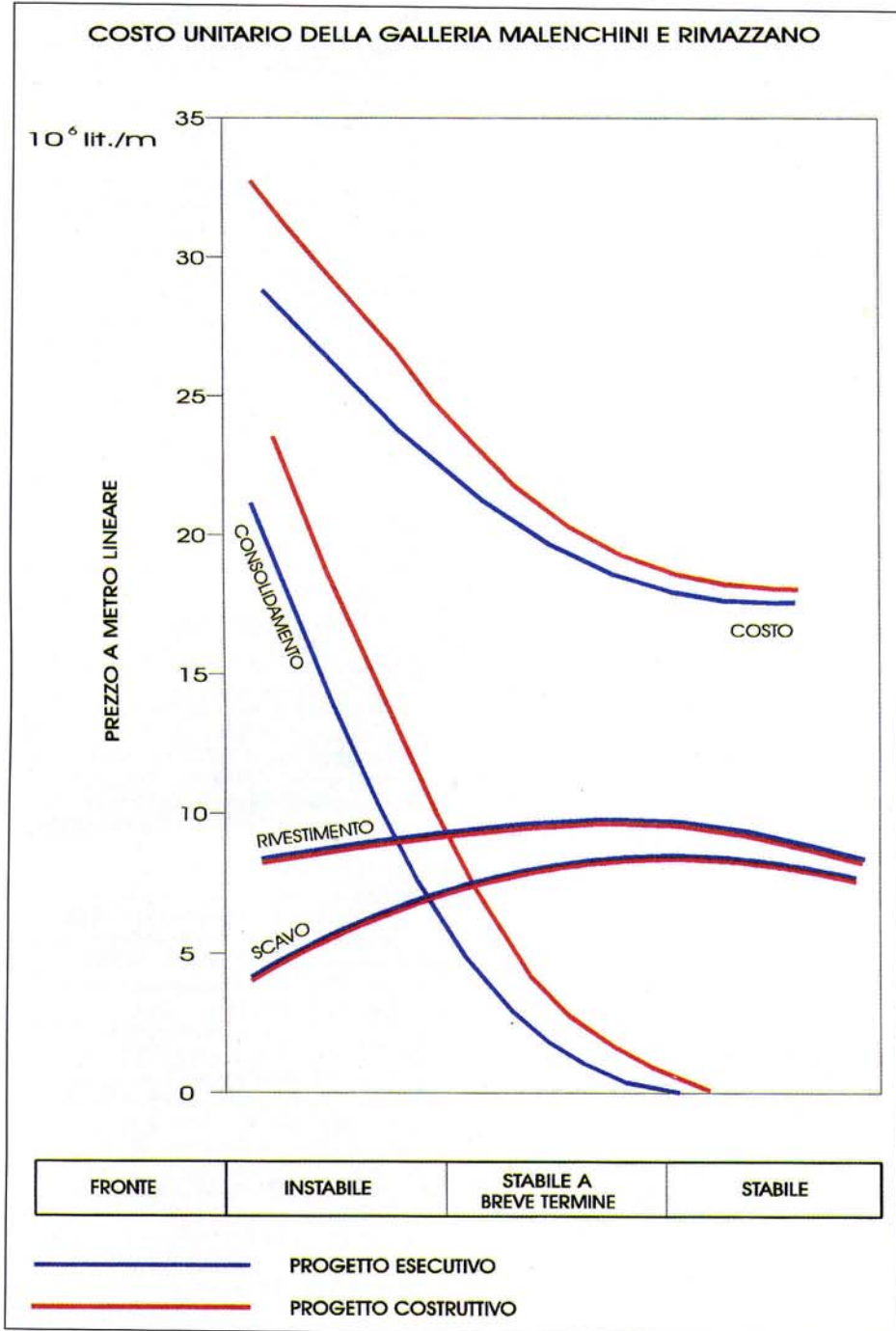




Fig. 9



lato per calibrare l'intensità, la tipologia degli interventi di stabilizzazione, il loro bilanciamento tra il fronte ed il cavo e dall'altro lato per mettere a punto le fasi, le cadenze, i sistemi di scavo.

E' inutile sottolineare quanto sia importante in questa fase sapere interpretare correttamente i risultati forniti dai controlli, perchè è proprio da una corretta interpretazione che deriva la messa a punto del progetto in corso d'opera.

La fase di verifica proseguirà poi ad opera finita con un monitoraggio siste-

matico volto a controllarne la sicurezza in tutto l'arco della sua vita d'esercizio.

Considerazioni conclusive

L'approccio secondo l'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli è un metodo di progettazione e costruzione di gallerie valido per qualsiasi tipo di terreno, che mettendo a frutto le conoscenze, i mezzi di calcolo,

le tecnologie di attacco più recenti (fig. 8), offre ai progettisti una semplice guida per classificare un'opera in sotterraneo in tratte a comportamento deformativo omogeneo sulla base dei prevedibili fenomeni deformativi, assumendo come riferimento la stabilità del terreno al fronte d'avanzamento. A ciascuna tratta, in seguito ad uno studio tenso-deformativo condotto con i più moderni mezzi di calcolo, vengono associate sezioni tipo che prevedono sistemi di attacco ed interventi di stabilizzazione "strutturali" (regimazione dei fenomeni deformativi) di cui sono definiti costi (a metro lineare di galleria) e tempi esecutivi.

Così operando, si valorizza l'importanza degli interventi di stabilizzazione come strumenti indispensabili per regimare i fenomeni deformativi, quindi come "elementi strutturali" ai fini della stabilità finale del cavo (le gallerie sono classificate e pagate in proporzione a quanto si deformano). In particolare, si fa notare che, nel bilancio economico della realizzazione di un'opera in sotterraneo, gli interventi di stabilizzazione e consolidamento del terreno risultano l'unica variabile significativa rispetto alle voci "scavo" e "rivestimento" che, sempre di più, si tende ad assimilare come costanti per tutti i tipi di terreno (fig. 9); si induce il costruttore, sulla base di un progetto completo ed affidabile, ad industrializzare le operazioni di avanzamento in ogni tipo di terreno, anche i più difficili; si evita, con la possibilità di pianificare interventi, tempi e costi di costruzione, il contenzioso che normalmente, sino ad oggi, si instaura tra Direzione dei Lavori ed Impresa costruttrice; si supera, assumendo come riferimento un solo parametro comune a tutti i tipi di terreno (il comportamento tenso-deformativo del fronte d'avanzamento) facilmente ed oggettivamente rilevabile durante l'avanzamento dei lavori, il limite più evidente dei sistemi di classificazione precedenti (confrontare classi geomeccaniche con deformazioni) che sino ad oggi ha alimentato il suddetto contenzioso.

In virtù di queste importanti caratteri-



stiche, l'approccio mediante l'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli consente di soddisfare le esigenze dettate dalla pianificazione in termini di chiarezza e efficienza senza tuttavia condizionare l'autonomia del progettista.

CONCLUSIONE

Nella presente memoria, si è cercato di evidenziare, anche con dettagli tecnici, come il mondo della progettazione possa dare un contributo significativo alla pressante richiesta di maggiore certezza in termini di tempi e costi realizzativi nel campo delle opere in sotterraneo. Si può affermare che proprio dalla progettazione deve trarre origine l'atteso miglioramento nella qualità e nella certezza della programmazione di questo tipo di opere. Oggi, finalmente, la progettazione ha un ruolo, riconosciuto non solo da un punto vista formale ma anche da un punto di vista operativo,

caratterizzato da precisi compiti e responsabilità: è dunque quanto mai doverosa una costante ricerca di miglioramento nel perseguimento degli obiettivi proposti. (Convegno a cura dell'Ente ANAS Roma, 30 giugno 1997)

*Prof. Ing. P. Lunardi
Studio di Progettazione Lunardi - Milano

ROCKSOIL S.p.a.
Tel. 02/6554323
Fax 02/6597021

Bibliografia

- LUNARDI P., "Lo scavo delle gallerie mediante cunicolo pilota", Primo ciclo di conferenze di meccanica e ingegneria delle rocce, - Torino, 25-28 Novembre 1986.
- LUNARDI P./BINDI R./FOCARACCI A., "Nouvelles orientations pour le project et la construction des tunnels dans des terrains meubles. Etudes et experiences sur le preconfinement de la cavite et la preconsolidation du noyau au front". Colloque International "Tunnels et micro-tunnels en terrain meuble", Parigi, 7-10 Febbraio 1989
- LUNARDI P., "Aspetti progettuali e costruttivi nella realizzazione di gallerie in situazioni difficili: interventi di precontenimento del cavo", Convegno Internazionale su "Il consolidamento del suolo e delle rocce nelle realizzazioni in sotterraneo", Milano, 18-20 Marzo 1991
- LUNARDI P./FOCARACCI A./GIORGI P./PAPACELLA A., "Tunnel face reinforcement in soft ground design and controls during excavation", Convegno Internazionale "Towards New Worlds in Tunnelling", Acapulco, 16-20 Maggio 1992
- AUTOSTRADE S.p.A., "Norme Tecniche d'Appalto", 1992
- ITALFERR SIS T.A.V. S.p.A., "Capitolato di Costruzione Opere Civili", 1992
- A.N.A.S., "Capitolato Speciale d'Appalto, Parte II: Norme Tecniche", 1993
- LUNARDI P./BINDI R./FOCARACCI A., "Technical and financial planning of underground works: the "ADECO-RS" method", VI Forum Europeo di Ingegneria Economica, Università Bocconi, Milano, 13-14 Maggio 1993
- LUNARDI P., "Evolution des technologies d'excavation en souterrain dans des terrains meubles", Comité Marocain des Grands Barrages - Rabat, 30 Settembre 1993
- LUNARDI P., "Fibre-glass tubes to stabilize the face of tunnels in difficult cohesive soils", SAIE : Seminar on "The application of fiber Reinforced Plastics (FRP) in civil structural engineering" - Bologna, 22 Ottobre 1993
- LUNARDI P., "La stabilite du front de taille dans les ouvrages souterraines en terrain meuble: etudes et experiences sur le renforcement du noyau d'avancement", Symposium international "Renforcement des sols: experimentations en vraie grandeur des annes 80", Parigi, 18 novembre 1993
- LUNARDI P., "Progetto e costruzione di gallerie secondo il metodo basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli - Parte prima: Prestoestegno e precontenimento" Quarry and Construction, marzo '94
- LUNARDI P., "Progetto e costruzione di gallerie secondo il metodo basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli - Parte seconda: Ruolo e risultati delle ricerca sperimentale" Quarry and Construction, marzo '95
- LUNARDI P., "Progetto e costruzione di gallerie secondo il metodo basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli - Parte terza: Proposta del nuovo approccio" Quarry and Construction, aprile '96
- LUNARDI P., "Avanza la galleria meccanica" Le Strade maggio '96
- LUNARDI P., "L'importanza del precontenimento del cavo in relazione ai nuovi orientamenti in tema di progetto e costruzione di gallerie" Gallerie e grandi opere sotterranee n. 45 anno 1995
- LUNARDI P., "L'influenza della rigidità del nucleo d'avanzamento sulla sicurezza degli scavi in galleria", Gallerie e grandi opere sotterranee - n.52 anno 1997

EFFETTI DEGLI INTERVENTI PER AZIONE DI CONTENIMENTO E PRECONTENIMENTO

AZIONE SUL CAVO	STRUMENTI DI STABILIZZAZIONE	INTERVENTI AGENZI SU	H ₂ O IN PRESS
		c, f, σ ₃	
 AZIONE DI PRECONTENIMENTO	PRECONSOLIDAMENTI INIEZIONI TRADIZIONALI (*) CONGELAMENTO JET-GROUTING (*) SUBORIZZONTALE PRETAGLIO O PRETUNNEL (*) DRENAGGI (*)		* * * * *
	CONSOLIDAMENTO (*) DEL CONTORNO DEL CAVO E DEL NUCLEO MEDIANTE TUBI IN VE.TRONESMA		*
	SPRITZ-BETON (*) SCUDO A PRESS. MECCANICA SCUDO A PRESS. FLUIDO		* * *
	CONS. RADIALE BULLONATURA ADERENZA CONT. (*) BULLONATURA ANC. PUNTUALE (*) ARCO ROVESCIO (*) SCUDI APERTI		* * * *
PRESOSTEGNO	INFLAGGI		*

LEGENDA

- (*) = INTERVENTI STRUTTURALI
- σ₃ = PRESSIONE DI CONTENIMENTO
- c = COESIONE DEL TERRENO
- φ = ANGOLO D'ATTRITO DEL TERRENO