

Pietro Lunardi

L'importanza del precontenimento del cavo in relazione ai nuovi orientamenti in tema di progetto e costruzione di gallerie

Le procedure progettuali e costruttive sino ad oggi adottate, basandosi su criteri di classificazione esclusivamente geologico-geomeccanici ed ignorando praticamente le nuove tecnologie oggi disponibili, non si sono dimostrate, di fatto, adeguate per soddisfare alle esigenze, cui sono chiamate.

L'autore illustra sinteticamente i concetti informativi di un nuovo approccio progettuale e costruttivo, basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli.

Les procédures de projet et de construction que l'on a adopté jusqu'ici, en se basant sur des critères de classification uniquement géologiques et géomécaniques et en ignorant pratiquement les nouvelles technologies dont l'on dispose aujourd'hui, ne se sont pas révélées appropriées, de fait, pour satisfaire aux exigences auxquelles elles doivent répondre. L'auteur explique brièvement les principes directeurs d'une nouvelle approche des projets et des constructions, basée sur l'analyse des déformations contrôlées dans la roche et dans le sol.

In questo lavoro il lettore ritroverà i contenuti di due articoli pubblicati in tempi diversi nel corso degli ultimi dodici mesi. L'autore ha infatti ritenuto indispensabile, per una miglior comprensione del nuovo approccio proposto in tema di Progetto e Costruzione di Opere in Sotterraneo, far precedere la sua presentazione da alcune considerazioni introduttive, anche se già pubblicate in altri contesti. Questo allo scopo di evidenziare l'importanza di considerare ed utilizzare il nucleo d'avanzamento di una galleria come strumento di precontenimento, quindi di regimazione della risposta deformativa della cavità.

1. Considerazioni introduttive

La realizzazione di un'opera in sotterraneo comporta sempre un'alterazione degli equilibri naturali preesistenti nel terreno e la sua buona riuscita dipende dalla capacità della natura, eventualmente coadiuvata dall'uomo, di ristabilire una situazione di equilibrio stabile anche a lungo termine.

Per capire meglio il ruolo che l'uomo, ed in particolare l'ingegnere progettista, può giocare in questo processo ed a quali principi debba ispirare la propria azione per conseguire la massima efficacia, è necessario concentrare un momento la nostra attenzione sui meccanismi con cui opera la natura. In termini di sollecitazioni, la situazione iniziale è quella di un terreno soggetto ad un campo di tensioni uniformemente crescenti con l'aumentare della profondità. La modificazione di questo campo di tensioni indotta dall'apertura di una cavità non può che risolversi nella canalizzazione delle stesse verso l'esterno del cavo con il conseguente sviluppo di sovrassollecitazioni in corrispondenza alle pareti dello stesso.

La canalizzazione delle tensioni deviate dallo scavo al contorno della cavità si definisce "effetto arco". Senza "effetto arco" non sarebbe possibile l'esistenza di cavità nel sottosuolo, né, di conseguenza, realizzarne alcuna.

Esso può esser descritto come il tentativo operato dalla natura per cicatrizzare la ferita arrecata dall'azione di scavo, ristabilendo, se possibile, una nuova configurazione di equilibrio stabile. Il tentativo, a seconda degli stati tensionali in gioco e delle caratteristiche di resistenza e deformabilità del terreno, potrà fallire o essere coronato da successo.

In particolare, l'"effetto arco" si potrà innescare (fig. 1):

- 1) in prossimità del profilo di scavo;
- 2) lontano dal profilo di scavo;
- 3) per niente.

Il primo caso si verifica quando il terreno al contorno del cavo ben sopporta il flusso delle tensioni deviate, rispondendo elasticamente in termini di resistenza e di deformabilità.

Il secondo caso si verifica quando il terreno al contorno del cavo, non essendo in grado di sopportare il flusso di tensioni deviate, risponde anelasticamente, plasticizzandosi e deformandosi proporzionalmente al volume di terreno coinvolto dal fenomeno di plasticizzazione; quest'ultimo, che provoca peraltro aumenti di volume del terreno interessato, propagandosi radialmente, fa deviare la canalizzazione delle tensioni verso l'interno dell'ammasso, finché lo stato tensionale di tipo triassiale risulta compatibile con le caratteristiche di resistenza del terreno. In questa situazione, l'"effetto arco" si forma lontano dal profilo di scavo ed il terreno al contorno, ormai alterato, potrà collaborare alla statica finale del cavo solo con la propria resistenza residua e darà luogo a fenomeni deformativi di notevole entità (convergenze, ecc.)

Il terzo caso si verifica quando il terreno al contorno del cavo, non essendo assolutamente in grado di sopportare il flusso di tensioni deviate, risponde in campo di rottura producendo il crollo della cavità. Dall'analisi di queste tre situazioni si può osservare che:

- l'"effetto arco per via naturale" si produce solo nel primo caso;
- nel secondo caso, l'"effetto arco per via naturale" si produce solamente se il terreno viene "aiutato" con interventi di stabilizzazione;
- nel terzo caso l'"effetto arco", non potendosi produrre per via naturale, va prodotto per via artificiale, intervenendo adeguatamente sul terreno stesso prima di scavarlo;

Il progettista di gallerie, il cui primo e più importante obiettivo deve essere quello di studiare se e come l'"effetto arco" potrà innescarsi all'atto dello scavo della galleria, una volta appurato che aiutando il terreno possiede gli strumenti per ricondurre il secondo ed il terzo caso al primo, dovrà chiarirsi definitivamente ed in maniera inequivocabile se vorrà affrontare la progettazione (che in fondo non è altro che la definizione dell'aiuto che egli intende dare al terreno per il controllo dell'"effetto arco") secondo la "filosofia del sostenere" o secondo la "filosofia del contenere" la cavità.

Se analizziamo che cosa s'intende per sostenere, e quindi anche per presostegno, e che cosa per contenere, e quindi anche per precontenimento, balzerà evidente quale debba essere l'approccio progettuale più adeguato per un progettista di gallerie.

Se egli deciderà di affrontare lo scavo con interventi di sostegno dovrà essere consapevole che:

- sostenendo il terreno compie un'azione passiva;
- sostenendo il terreno accetta il detensionamento dell'ammasso e che la risposta deformativa dello stesso evolva praticamente in maniera incontrollata, lasciando che l'effetto arco si allontani senza rimedio dal profilo di scavo;
- così operando risolve il problema della stabilità della cavità che intende ricavare nel sottosuolo con criteri ereditati dall'ingegneria mineraria che, avendo obiettivi diversi rispetto all'ingegneria dei tunnels, ovviamente non si preoccupa di impedire il detensionamento dell'ammasso al contorno, di ridurre al minimo la risposta deformativa per il rispetto del profilo teorico di scavo, di salvaguardare l'integrità geomeccanica del terreno e di garantire la tenuta nel tempo della cavità progettata.

Se il progettista deciderà, invece, di affrontare lo scavo con "interventi di contenimento" dovrà sapere che:

- contenendo il terreno produce un'azione attiva;
- contenendo il terreno controlla il detensionamento dell'ammasso e la conseguente risposta deformativa;
- conservando e migliorando le caratteristiche del terreno, lo stesso può efficacemente collaborare alla statica finale del cavo; si valorizza così il terreno quale materiale da costruzione e si assicura la formazione dell'effetto arco non troppo lontano dal profilo di scavo;
- potrà ricorrere ad "interventi di sostegno" solo in caso di emergenza per limitare i danni conseguenti ad un errore progettuale o costruttivo.

Da queste considerazioni discende che il progettista di gallerie, in definitiva, se vorrà progettare e realizzare in maniera corretta la propria opera in sottoterraneo, dovendo prendere in considerazione solo ed esclusivamente quegli "aiuti" al terreno (interventi di consolidamento, ecc.) che producono effetti arco, non avrà altra scelta se non quella della "filosofia del contenere" cancellando dal proprio vocabolario la parola "sostenere" con i suoi derivati quali "sostegno" e "presostegno". Infatti, anche il termine "presostegno" con il quale ci si riferisce ad azioni prodotte a monte del fronte di avanzamento, per distinguerle dai "sostegni" operati a valle dello stesso, è un'eredità della tradizione mineraria e non è altro che la traduzione dei "marciavanti", che nella versione moderna vengono chiamati "infilaggi"; questi, come noto, anche se 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.

In tema di progetto e costruzione di gallerie, si dovrà allora parlare di *contenimento*, termine che meglio richiama il concetto di azione attiva capace di produrre e controllare gli effetti arco al contorno del cavo, come quella teorizzata da Kastner [1] negli anni '50 e realizzata da Rabcewicz [2] negli anni '60 con l'introduzione di tecnologie nuove, quali lo spritz-beton, le centine ed i bulloni.

Conseguentemente, si dovrà parlare di *precontenimenti* per riferirsi a quelle azioni attive che producono effetti arco per via naturale e per via artificiale a monte del fronte di avanzamento.

A questo proposito, proprio in questi ultimi anni hanno fatto la loro apparizione, sulla scena del tunneling, nuove tecnologie di avanzamento capaci di sviluppare azioni di precontenimento, che superando le carenze di quelle tradizionali (iniezioni, congelamento, ecc.) consentono finalmente, da un lato, di realizzare opere in sottoterraneo in qualsiasi tipo di terreno con la stessa sicurezza con cui si affronta la costruzione delle altre opere di ingegneria civile, dall'altro lato, di assicurare il rispetto delle cadenze di avanzamento anche nei terreni più difficili, quindi di industrializzarne lo scavo.

La possibilità da parte del progettista di disporre del "nuovo strumento del precontenimento", oltre a quello tradizionale del "contenimento", apre una nuova pagina nella storia del tunneling perché permette di affrontare il problema del progetto e della costruzione di una galleria con le stesse possibilità di successo indipendentemente dalla natura dei terreni, offrendo la possibilità di mettere a punto un

metodo di progettazione, classificazione e costruzione applicabile ed attendibile in qualsiasi situazione geologico-geomeccanica e tensionale: un metodo che permetta finalmente di pianificare in termini di tempi e costi una galleria analogamente alle altre opere di ingegneria.

2. Il nucleo d'avanzamento quale strumento di precontenimento e di stabilizzazione della galleria

Chi si accinge a progettare e costruire un'opera in sottoterraneo, si trova a dover affrontare e risolvere un tema d'ingegneria civile particolarmente complesso, essendo una tal opera, rispetto ad una in superficie, assai meno predeterminabile nei suoi dati essenziali per la progettazione.

La costruzione di un'opera in sottoterraneo, infatti, avviene per asportazione di materiale da un *mezzo* le cui caratteristiche sono di non facile valutazione, già sottoposto in natura a stati tensionali che le *azioni* di scavo e di costruzione modificano irreversibilmente, innescando delle *reazioni* dal cui controllo dipende la stabilità dell'opera.

Allora, chi si accinge a progettare e costruire un'opera in sottoterraneo non può prescindere dalla conoscenza (fig. 2):

- del *mezzo* all'interno del quale opera;
- dell'*azione* che compie per operare lo scavo;
- della *reazione* attesa a seguito dello scavo.

Il *mezzo*, che è in pratica il materiale da costruzione del progettista di gallerie, è un materiale assai anomalo se confrontato con quelli tradizionali dell'ingegneria civile: discontinuo, disomogeneo, anisotropo. Esso presenta, *in superficie*, caratteristiche

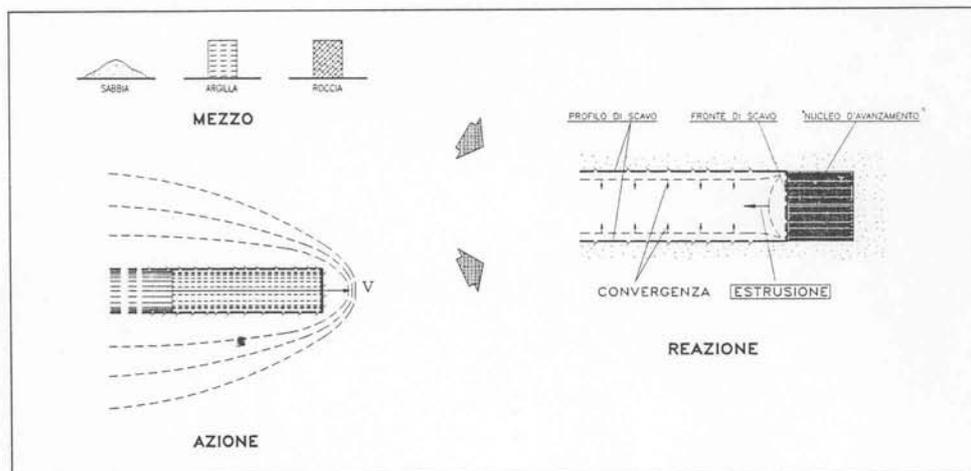


Fig. 2 - Fattori principali che intervengono nella progettazione e nella costruzione di un'opera in sottoterraneo
Main factors involved in tunnel design.

(Key: mezzo = medium; azione = action; reazione = reaction; convergenza = convergence; estrusione = extrusion)

assai varie, dipendenti però esclusivamente dalla propria natura intrinseca (consistenza naturale), che condiziona la morfologia della crosta terrestre, mentre, *in profondità*, presenta caratteristiche mutevoli anche in funzione dell'entità degli stati tensionali che lo sollecitano (consistenza acquisita), condizionandone il comportamento allo scavo.

L'azione si esprime nell'avanzamento del fronte all'interno del mezzo. E' quindi un fenomeno prettamente dinamico: possiamo immaginare l'avanzamento di una galleria come un disco (il fronte) che procede con una certa velocità V all'interno dell'ammasso, lasciandosi dietro il vuoto. Esso produce una perturbazione nel mezzo, sia in senso longitudinale che trasversale, che ne altera lo stato tensionale originario.

All'interno della zona perturbata, il campo di tensioni preesistente, che possiamo rappresentare come un reticolo di linee di flusso, viene deviato dalla presenza dello scavo (fig. 1) e si concentra in prossimità di esso producendo delle sovratensioni. L'entità di queste sovrasollecitazioni determina, per ogni mezzo, l'ampiezza della zona perturbata, (all'interno della quale il terreno subisce una caduta di caratteristiche geomeccaniche con un conseguente aumento di volume) e quindi, in relazione alla resistenza d'ammasso σ_{gd} , il comportamento del cavo. L'ampiezza della zona perturbata in prossimità del fronte è definita dal raggio d'influenza del fronte d'avanzamento R_p , che individua lo spazio sul quale il progettista deve puntare la propria attenzione ed all'interno del quale avviene l'evoluzione da uno stato tensionale triassiale ad uno piano (zona del fronte d'avanzamento o di transizione). E' sulla base di questa considerazione che egli, per il corretto studio della galleria, dovrà utilizzare metodi di calcolo tridimensionali e non solo piani.

La reazione è la risposta deformativa del mezzo all'azione dello scavo. Essa si genera a monte del fronte nell'ambito della zona perturbata in seguito alle sovratensioni generate nel mezzo al contorno del cavo e dipende dal mezzo (consistenza) e dalle modalità con cui viene realizzato l'avanzamento del fronte (azione).

La risposta deformativa del fronte e della cavità si evidenzia sotto forma di (fig. 3):

- a) estrusione del fronte;
- b) preconvergenza (intesa come convergenza del profilo teorico a monte del fronte di avanzamento);
- c) convergenza;

che a loro volta possono dar luogo ad alcune manifestazioni d'instabilità (si parla di instabilità ogniqualvolta si produce l'intrusione di materiale in gal-

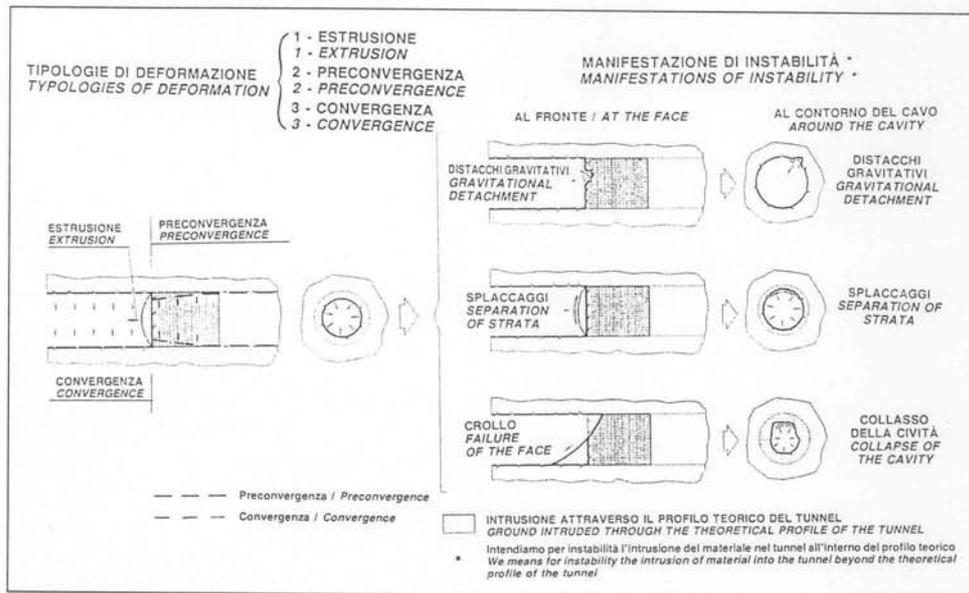


Fig. 3 - Tipologie di deformazione e conseguenti manifestazioni d'instabilità in corrispondenza del fronte d'avanzamento e lungo il cavo - Typologies of deformation and consequent manifestations of instability at the face and at along the cavity

leria oltre il profilò teorico di scavo):

- a) distacchi gravitativi, splaccaggi e crollo del fronte, in corrispondenza del fronte-nucleo d'avanzamento;
 - b) distacchi gravitativi, splaccaggi e collasso della cavità, in corrispondenza del contorno del cavo.
- Definito *nucleo d'avanzamento* il prisma di terreno a monte del fronte le cui dimensioni trasversale e longitudinale sono dell'ordine di grandezza del diametro della galleria (fig. 4), si può affermare, sulla base delle esperienze acquisite in almeno 25 anni di ricerche condotte durante la realizzazione di oltre 250 Km di gallerie, che tutte le suddette manifestazioni d'instabilità dipendono direttamente o indirettamente dalla rigidità del nucleo.

Si possono verificare tre situazioni fondamentali (fig. 4).

Se in fase di avanzamento di una galleria, nel passare da uno stato di coazione di tipo triassiale ad uno di tipo piano, l'annullamento dello stato di coazione al fronte ($\sigma_3 = 0$) produce sul nucleo sollecitazioni in campo elastico, la parete liberata (fronte d'avanzamento) si mantiene stabile con deformazioni limitate e assolutamente trascurabili. In questo caso, la canalizzazione delle tensioni al contorno del cavo ("effetto arco") si produce per via naturale vicino al profilo di scavo.

Se, viceversa, l'annullamento dello stato di coazione al fronte ($\sigma_3 = 0$) produce sul nucleo sollecitazioni in campo elastoplastico, la reazione è più importante e la parete liberata del nucleo (fronte d'avanzamento), deformandosi elastoplasticamente verso l'interno del cavo (estrusione), dà luogo ad

una situazione di *stabilità a breve termine*. S'innescano cioè, in assenza d'interventi, un fenomeno di plasticizzazione che, propagandosi longitudinalmente e radialmente dal contorno dello scavo, produce lo spostamento dell'"effetto arco" più all'interno dell'ammasso e solo operando con interventi di contenimento e/o precontenimento adeguati si può controllarne l'allontanamento dal profilo teorico di scavo. Se, infine, l'annullamento dello stato di sollecitazione al fronte ($\sigma_3 = 0$) produce sul nucleo sollecitazioni in campo di rottura, la risposta deformativa è inaccettabile e si ha una situazione di *instabilità* del nucleo che rende impossibile la formazione dell'"effetto arco", il quale non riuscendo a formarsi per via naturale deve essere prodotto per via artificiale. Ne consegue che le caratteristiche di *resistenza e deformabilità del nucleo d'avanzamento* giocano un ruolo determinante sull'innescare e sull'evoluzione dei fenomeni deformativi del cavo, che quindi sono la diretta conseguenza dei fenomeni deformativi già innescati a monte del fronte, ovvero delle scelte progettuali e costruttive operate a monte dello stesso per regimare la risposta deformativa.

Ne deriva altresì che le tre fondamentali situazioni tenso-deformative sopra individuate, che si verificano al fronte d'avanzamento di una galleria, individuano anche tre possibili tipi di comportamento della stessa; il comportamento del fronte-nucleo d'avanzamento può allora venir assunto come riferimento per una classificazione dei tunnel, con il vantaggio di essere un parametro valido in tutti i tipi di terreno ed in tutte le situazioni statiche. Si potrà allora parlare di tre categorie di comportamento, di-

stinguendo in:

- *Categoria A: comportamento a fronte stabile;*
- *Categoria B: comportamento a fronte stabile a breve termine;*
- *Categoria C: comportamento a fronte instabile.*

In definitiva, appurato e condiviso il ruolo giocato dalla resistenza e deformabilità del fronte-nucleo d'avanzamento nei riguardi dei fenomeni deformativi che s'innesceranno al contorno del cavo, si può affermare che, per evitare i fenomeni d'instabilità del fronte e, di conseguenza, controllare la nascita della *risposta deformativa* a monte dello stesso e la sua evoluzione a valle, occorre garantire un'adeguata rigidità al nucleo.

Misure sperimentali, riferite all'evoluzione delle deformazioni nel mezzo in relazione alla posizione del fronte d'avanzamento, confermano quanto sopra e pongono in evidenza che il raggio d'influenza del fronte R_f è tanto più ridotto quanto più il nucleo si mantiene rigido ed in campo elastico.

Ma come può il progettista garantire la rigidità del nucleo d'avanzamento? Producendo azioni di "precontenimento del cavo" mirate, da un lato, a scaricare il nucleo da stati di sovratensione (azione protettiva), dall'altro a conservare o migliorare le caratteristiche di resistenza e deformabilità del terreno (azione di consolidamento). L'azione di precontenimento del cavo viene così definita per distinguerla da quella di semplice *contenimento*, che agisce al contorno dello stesso a valle del fronte d'avanzamento (fig. 5).

L'azione di precontenimento, contrastando la nascita della risposta deformativa a monte del fronte, limita la sua evoluzione a valle, facilitandone la regimazione. Pertanto, al nucleo va conferita sufficiente rigidità per mantenere, finché è possibile, il terreno all'interno del raggio d'influenza del fronte d'avanzamento in campo elastico e per produrre un effetto arco più prossimo al contorno del cavo, con conseguente contenimento dei fenomeni deformativi.

L'importanza di aver introdotto l'azione di precontenimento del cavo nella progettazione e nella costruzione delle gallerie, risiede nel fatto che si fornisce al progettista un nuovo strumento, che integra quelli normalmente impiegati - legati all'azione di semplice contenimento - e che impone un nuovo approccio di calcolo. Infatti, in quei casi in cui gli stati tensionali indotti dall'apertura del cavo, in rapporto alle caratteristiche di resistenza e deformabilità del *nucleo*, consentono di operare la scelta degli strumenti di stabilizzazione in termini di solo *contenimento del cavo*, il progettista potrà limitarsi a stu-

diare il problema in termini di "convergenza-contenimento" (fig. 6); se occorrerà operare la scelta anche in termini di contenimento del fronte, in quanto si evidenziano fenomeni di estrusione a fronte di ridotti stati tensionali, il problema sarà studiato secondo modelli di "estrusione-contenimento". Se, infine, gli stati tensionali sono così elevati da rendere influenti le azioni di contenimento del cavo e del fronte, il progettista dovrà lavorare sulla rigidità del nucleo adottando soluzioni di precontenimento del cavo ed affrontare il problema di dimensionamento e di verifica degli interventi sullo stesso facendo ricorso a nuovi modelli "estrusione-precontenimento", che in passato sono stati oggetto di studio da parte di numerosi autori e che oggi necessitano, alla luce dell'importanza che assume il nucleo d'avanzamento come strumento di stabilizzazione del cavo, di ulteriori ed aggiornati approfondimenti. Negli ultimi dieci anni sono stati ideati e messi a punto con successo nuovi sistemi di stabilizzazione capaci di esercitare azioni di precontenimento. Ad essi è stato dato il nome di *sistemi conservativi*.

La disponibilità delle tecnologie di scavo conservative, attraverso le quali è possibile esercitare un'azione di precontenimento del cavo in qualsiasi tipo di terreno ed a fronte di qualsiasi situazione tensionale, ha portato ad una vera e propria rivoluzione nel modo di affrontare gli scavi in sottoterraneo.

Tale rivoluzione deriva dal fatto che l'azione di precontenimento garantisce il rispetto di cadenze costanti di avanzamento anche nelle situazioni difficili, impedendo il detensionamento del terreno a monte del fronte d'avanzamento ed evitando, di conseguenza, il manifestarsi delle predette manifestazioni d'instabilità, anche in quei contesti in cui gli interventi di semplice "contenimento" hanno sempre fallito e continueranno a fallire.

Questo stato di cose costituisce, allora, la necessaria premessa per incominciare, da un lato, a pensare concretamente alla possibilità di industrializzare le opere in sottoterraneo e di poterle pianificare in termini di tempi e costi di costruzione *prescindendo dalla natura del mezzo e dall'importanza delle coperture in gioco*, dall'altro lato, per incominciare a mettere a punto un nuovo approccio di progettazione e costruzione di opere in sottoterraneo che, prescindendo dalla natura del mezzo e dall'importanza delle coperture in gioco, sia capace di rispondere ai *requisiti* indispensabili per poter essere considerato completo ed universalmente valido:

- 1) essere applicabile in tutti i tipi di terreno ed in tutte le situazioni statiche;
- 2) fornire gli strumenti progettuali e costruttivi ade-

guati a risolvere le diverse situazioni statiche in qualsiasi tipo di terreno;

- 3) prevedere una netta separazione tra il momento della progettazione ed il momento della costruzione dell'opera;
- 4) permettere di pianificare l'opera in sottoterraneo in termini di tempi e costi di costruzione.

A questi requisiti non hanno saputo rispondere completamente i metodi più largamente utilizzati sino ad oggi, sia quelli derivati da criteri di classificazione geomeccanica (e quindi validi solo per ammassi lapidei), sia quelli derivati da sistemi costruttivi come quello proposto da Rabcewicz.

Il Nuovo Metodo Austriaco (NATM), in particolare, che ha trovato larga diffusione negli ultimi trent'anni, ha rappresentato indubbiamente, al momento della sua introduzione, un notevole progresso rispetto al passato [2] [3].

Esso ebbe principalmente il merito di:

- considerare per la prima volta il terreno come materiale da costruzione, orientandosi verso azioni di "contenimento" e non di sostegno;
- introdurre l'utilizzazione di nuove tecnologie di semplice contenimento con azione attiva quali lo spritz-beton ed i bulloni;
- sottolineare la necessità di rilevare ed interpretare sistematicamente la risposta deformativa dell'ammasso, anche se in termini di sola convergenza del cavo.

Oggi però, alla luce dei recenti progressi in campo tecnologico e di calcolo, denuncia importanti limiti:

- rappresenta un sistema di classificazione incompleto e parziale, in quanto non applicabile in tutti i tipi di terreno ed in tutte le situazioni tenso-deformative;
- trascura le nuove tecnologie, continuando a supporre erroneamente di poter risolvere tutte le situazioni tenso-deformative mediante la sola utilizzazione di bulloni, centine e spritz-beton;
- trascura completamente l'importanza del nucleo d'avanzamento e la necessità di utilizzarlo quale strumento di stabilizzazione della galleria;
- non prevede un momento della progettazione nettamente separato dal momento della costruzione.

Per superare questi limiti, è stato recentemente proposto un approccio che si basa sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli [4] [5] [6]. Esso si propone come una nuova metodologia che, prendendo atto delle possibilità offerte dai più recenti strumenti d'indagine e di calcolo in fase di progettazione, e dalle nuove tecniche di avanzamento e stabilizzazione del cavo in fase di costru-

zione, valorizza in senso pratico i contributi scientifici ed operativi del NATM e degli altri metodi utilizzati nel passato, li interpreta in maniera innovativa e, superandone i limiti stessi, ne costituisce la naturale evoluzione, proponendo tra l'altro di:

— far riferimento ad un unico parametro, ovvero la *risposta deformativa* del mezzo allo scavo, a cui riferirsi: prima per via teorica, come oggetto di previsione e regimazione, poi per via sperimentale, come oggetto di lettura ed interpretazione per la messa a punto del progetto in corso d'opera;

— valorizzare la funzione del nucleo al fronte d'avanzamento quale strumento di stabilizzazione della cavità in fase di scavo;

— classificare le gallerie in base a categorie di comportamento riferite alle condizioni di stabilità del nucleo e del fronte d'avanzamento;

— integrare, in fase di scelta e dimensionamento degli interventi di stabilizzazione, i ben noti approcci "convergenza-contenimento" ed "estrusione-contenimento" con quello in termini di "estrusione-precontenimento";

e rendendo possibile affrontare l'approccio progettuale e costruttivo delle gallerie più difficili con gli stessi criteri di sicurezza adottati in quelle di facile realizzazione, al fine di prevedere in maniera attendibile tempi e costi di costruzione. L'obiettivo dell'industrializzazione degli scavi è dunque oggi raggiungibile e con esso quello della pianificazione delle opere in sotterraneo, che potranno essere finalmente elevate alla dignità delle altre opere di ingegneria civile.

Un approccio di progettazione e costruzione con le citate caratteristiche può essere adottato come riferimento per lo sviluppo di una nuova normativa capace di rispondere in maniera adeguata alle esigenze di chi opera in sotterraneo.

Appare quindi interessante illustrare, sebbene in forma necessariamente sintetica, i concetti informativi che caratterizzano l'approccio basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli.

3. Proposta di un approccio basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli

3.1 Generalità

L'approccio basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli si contraddistingue, da quelli che sino ad oggi sono stati presi come riferimento, per diverse importanti caratteristiche, in parte, già illustrate:

- 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) l'approccio fa riferimento ad un nuovo tipo di classificazione delle opere in sotterraneo, basata su un unico parametro comune a tutti gli scavi: il comportamento tenso-deformativo del sistema nucleo-fronte d'avanzamento;
- 3) fa riferimento alla previsione, al controllo e all'interpretazione della risposta deformativa dell'ammasso allo scavo, che diventa l'unico paramet-

tro a cui riferirsi prima per via teorica, come oggetto di previsione e regimazione, poi per via sperimentale, come oggetto di lettura ed interpretazione per la messa a punto del progetto in corso d'opera.

4) introduce il concetto di *precontenimento* del cavo, che integra il già noto concetto di contenimento, consentendo di risolvere anche condizioni statiche le più difficili in maniera programmata, senza ricorrere ad improvvisazioni costruttive;

5) prevede l'impiego dei *sistemi conservativi*, per mantenere quanto più possibile inalterate le caratteristiche geotecniche e 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.

3.2 Criteri di classificazione

Elemento peculiare dell'approccio è l'introduzione di un nuovo sistema di classificazione.

Partendo dall'osservazione che le deformazioni del mezzo durante lo scavo e quindi la stabilità stessa di una galleria sono legate al comportamento del nucleo d'avanzamento, viene assunta, come elemento di classificazione, la *stabilità del sistema nucleo-fronte d'avanzamento*. Così, facendo riferimento ad un parametro unico valido per tutti i tipi di terreno (il comportamento tenso-deformativo del nucleo di terreno a monte del fronte d'avanzamento), l'approccio supera le limitazioni dei sistemi sino ad oggi adottati, specie nel caso di terreni di scarsa consistenza.

In particolare, risultano individuate tre categorie di comportamento fondamentali (fig. 7):

Categoria A: fronte stabile o comportamento di tipo lapideo;

Categoria B: fronte stabile a breve termine o comportamento di tipo coesivo;

Categoria C: fronte instabile o comportamento di tipo sciolto.

Categoria A

Si verifica 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 alle pareti quanto più la sezione di scavo è aderente al profilo teorico. I fenomeni deformativi evolvono in campo elastico, sono immediati e di ordine centimetrico.

Si possono verificare solo instabilità locali riconducibili al distacco gravitativo di blocchi isolati da uno sfavorevole assetto strutturale dell'ammasso roccioso.

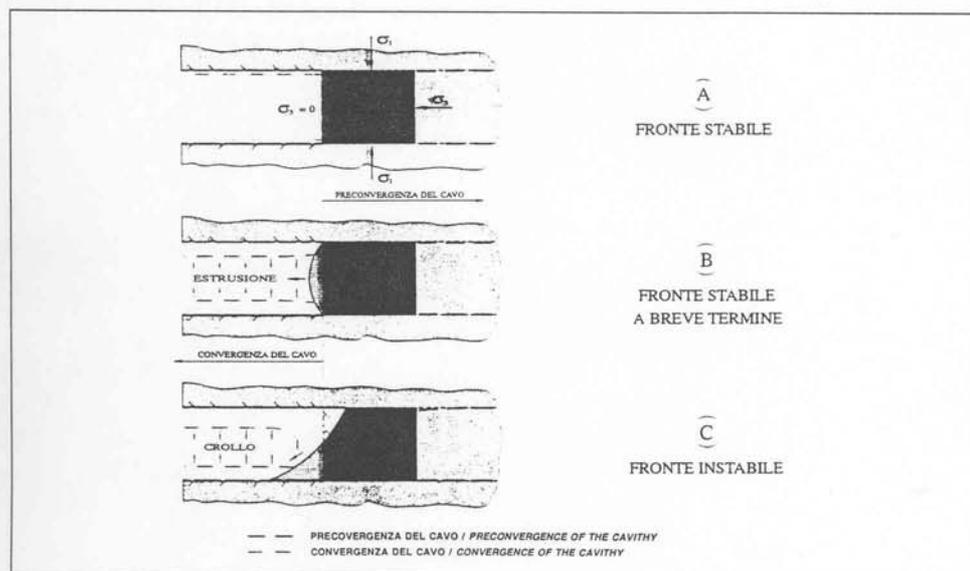


Fig. 7 - Categorie di comportamento A) fronte stabile; B) fronte stabile a breve termine; C) fronte instabile
The behaviour Categories: A) stable face; B) face stable in the short term; C) unstable face.

so; 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 consolidamento sono per lo più volti ad impedire la sfioritura del terreno ed al mantenimento del profilo di scavo.

Categoria B

Si verifica 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 plasticizza. I fenomeni deformativi avvengono in campo elasto-plastico, 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 tradizionali di contenimento radiale.

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. È necessario perciò prevenirli soprattutto nella zona del fronte, devianone i percorsi all'esterno del nucleo.

Categoria C

Si verifica 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 verso la rottura dando luogo a gravissime 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 di avanzamento che sviluppino un'azione di precontenimento capace di creare effetti arco artificiali.

La presenza di acqua in regime idrostatico, se non adeguatamente trattata, 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 trascinarsi di materiale e di sifonamento assolutamente inaccettabili. È dunque necessario prevenirla, soprattutto nella zona del fronte, devianone 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 realizzate ricadono in queste tre categorie di comportamento.

3.3 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 le fasi sintetizzate in figura 8.

Il *momento della progettazione* comprende:

— *fase conoscitiva*: durante la quale il progettista, in relazione ai terreni interessati dalla galleria, procede alla caratterizzazione del mezzo in termini di meccanica delle rocce o dei suoli, indispensabile per compiere l'analisi degli equilibri naturali preesistenti e per poter operare correttamente nella successiva fase di diagnosi;

— *fase di diagnosi*: durante la quale, sulla base degli elementi raccolti in fase conoscitiva, il progettista procede ad una suddivisione della galleria stessa in tratte a comportamento deformativo omogeneo nell'ambito delle tre categorie di comportamento A, B, C sopra descritte, definendo per ciascuna tratta i particolari dell'evoluzione deformativa ed i tipi di carichi mobilitati dallo scavo;

— *fase di terapia*: durante la quale, a seguito delle previsioni fatte in fase di diagnosi, il progettista opera la scelta del tipo di azione da esercitare (precontenimento o semplice contenimento) e degli interventi necessari, nell'ambito delle tre categorie di comportamento A, B, C, per ottenere la completa stabilizzazione della galleria. Opera quindi la composizione delle sezioni tipo longitudinali e trasversali dimensionandole e verifican-

done l'efficacia attraverso gli strumenti del calcolo matematico.

Il *momento della costruzione* comprende:

— *fase operativa*: durante la quale si realizza la messa in opera degli strumenti di stabilizzazione secondo le previsioni progettuali, adattandoli in termini di contenimento e precontenimento alla reale risposta deformativa dell'ammasso e controllandoli secondo prestabiliti piani di controllo qualità;

— *fase di verifica*: in cui, mediante la lettura e l'interpretazione dei fenomeni deformativi (che sono la risposta del mezzo all'azione d'avanzamento),

- durante la costruzione si verifica la correttezza delle previsioni fatte in fase di diagnosi e di terapia onde mettere a punto il progetto attraverso il bilanciamento degli strumenti di stabilizzazione tra il fronte e il cavo;
- durante l'esercizio si controlla la sicurezza della galleria per tutto l'arco della sua vita.

Progettare correttamente un'opera in sotterraneo significherà allora saper *prevedere*, sulla base della conoscenza degli equilibri naturali preesistenti, il comportamento che il terreno avrà durante lo scavo in termini di innesco ed evoluzione dei fenomeni deformativi, al fine di definire conseguentemente, nell'ambito delle tre categorie di comportamento fondamentali, il tipo di azioni da esercitare (contenimento o precontenimento) e le tipologie d'intervento atte a contenerli entro limiti accettabili, stabilendo tempi e 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* la risposta deformativa del terreno all'azione dell'avanzamento e degli interventi di stabilizzazione, in termini di estrusioni e convergenze superficiali e profonde del fronte e delle pareti di scavo; in secondo luogo perfezionando (una volta *interpretati* i risultati delle letture) sfondi, velocità e cadenza di avanzamento, intensità, collocazione e tempi di applicazione degli interventi di stabilizzazione bilanciandoli opportunamente tra il fronte ed il perimetro di scavo.

3.3.1 Fase conoscitiva

Aprire uno scavo in sotterraneo significa turbare gli equilibri preesistenti nel mezzo. Progettare questo scavo riducendo al minimo il disturbo al mezzo in cui si deve operare, quindi riducendo al minimo la risposta deformativa, presuppone allora la *cono-*

scienza 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 la progettazione e quindi la costruzione di una galleria da una fase conoscitiva durante la quale avviene la caratterizzazione del mezzo attraverso 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 poter operare correttamente nella fase successiva di "diagnosi".

Lo studio in fase conoscitiva procede in due tempi successivi (fig. 9).

In un primo tempo viene redatto un profilo geologico di tentativo in asse tracciato, sviluppato sulla base della Carta Geologica d'Italia 1:100000, 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 del sistema idrologico principale ed il censimento delle sorgenti. Di queste ultime è indispensabile misurare la portata seguendone l'evoluzione in corso d'opera per stabilire l'influenza dell'effetto drenante del cavo su essa.

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

Qualora lo studio di prima fase deponga per la fattibilità di un *cunicolo pilota*, la progettazione (esecutiva) può vantaggiosamente 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, viene 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 è indispensabile

che sia 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 anche in relazione alla loro evoluzione nel tempo, e per la valutazione dei parametri geotecnici e geomeccanici. Vengono così determinati:

- la curva intrinseca della matrice;
- i 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 è importante determinare 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 è 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 assai opportuno eseguire, ogni volta che è possibile, prove di misurazione del tensore naturale degli sforzi alla profondità del cavo.

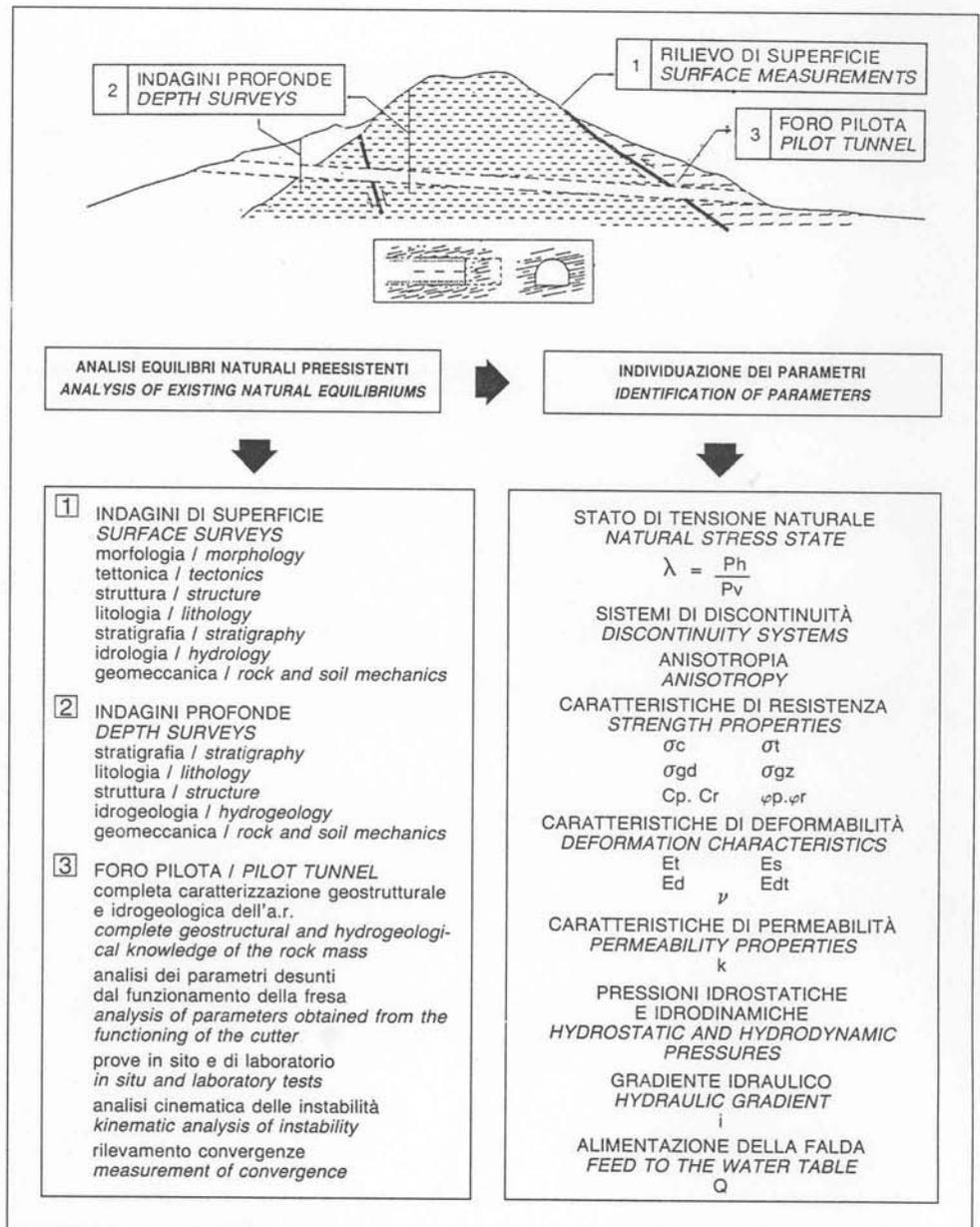


Fig. 9 - Schema fase conoscitiva
Survey phase scheme

scienza 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 la progettazione e quindi la costruzione di una galleria da una fase conoscitiva durante la quale avviene la caratterizzazione del mezzo attraverso 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 poter operare correttamente nella fase successiva di "diagnosi".

Lo studio in fase conoscitiva procede in due tempi successivi (fig. 9).

In un primo tempo viene redatto un profilo geologico di tentativo in asse tracciato, sviluppato sulla base della Carta Geologica d'Italia 1:100000, 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 del sistema idrologico principale ed il censimento delle sorgenti. Di queste ultime è indispensabile misurare la portata seguendone l'evoluzione in corso d'opera per stabilire l'influenza dell'effetto drenante del cavo su essa.

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

Qualora lo studio di prima fase deponga per la fattibilità di un cunicolo pilota, la progettazione (esecutiva) può vantaggiosamente 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, viene 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 è indispensabile

che sia 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 anche in relazione alla loro evoluzione nel tempo, e per la valutazione dei parametri geotecnici e geomeccanici. Vengono così determinati:

- la curva intrinseca della matrice;
- i 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 è importante determinare 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 è 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 assai opportuno eseguire, ogni volta che è possibile, prove di misurazione del tensore naturale degli sforzi alla profondità del cavo.

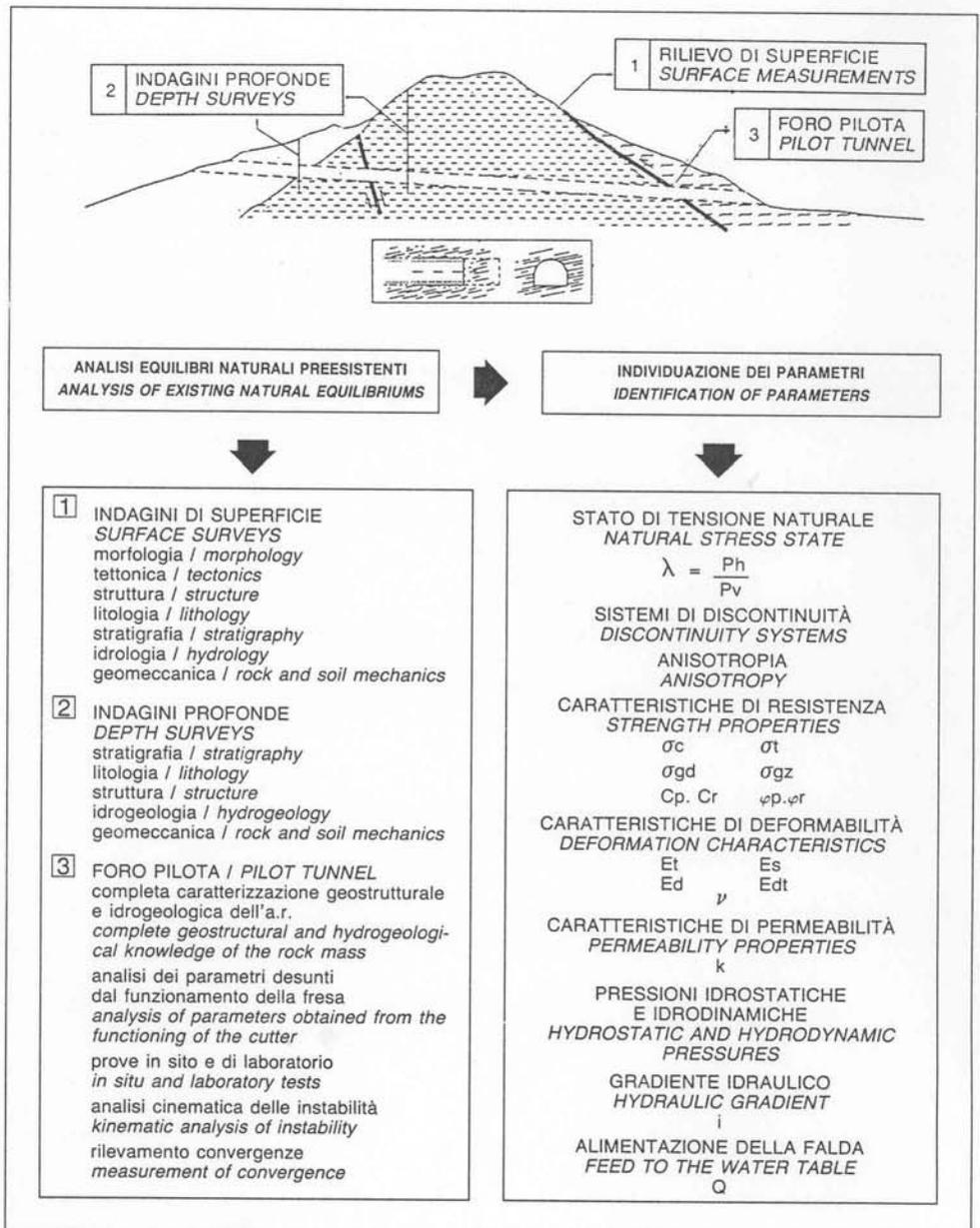


Fig. 9 - Schema fase conoscitiva
Survey phase scheme

3.3.2 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'ambito delle tre categorie di comportamento fondamentali A, B, C (fronte stabile, fronte stabile 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 d'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 strumenti matematici quali le linee caratteristiche, gli elementi finiti bidimensionali, 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 diverse tratte di galleria alle tre categorie di comportamento A, B, C già citate.

Tra questi, il metodo delle linee caratteristiche [7], utilizzabile nella maggior parte delle situazioni correnti, appare particolarmente utile e semplice da impiegare per perseguire questo scopo (fig. 10). Il risultato dell'analisi 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 (A, B, C) 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, pre-convergenza e convergenza);
- b) delle *manifestazioni d'instabilità* conseguenti ed attese, quali:
 - distacchi gravitativi e splaccaggi al fronte, prodotti dall'estrusione del nucleo e dalla pre-convergenza;
 - 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. 11).

3.3.3 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 nel paragrafo 2, 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'avanza-

mento, 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* [8] (fig. 12), 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 [10], [11];
- *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 [10] [11] [12] [14] [15];
- ombrelli tronco-conici, costituiti dall'accostamento di colonne suborizzontali di terreno consolidato mediante *jet-grouting* [10], [13].

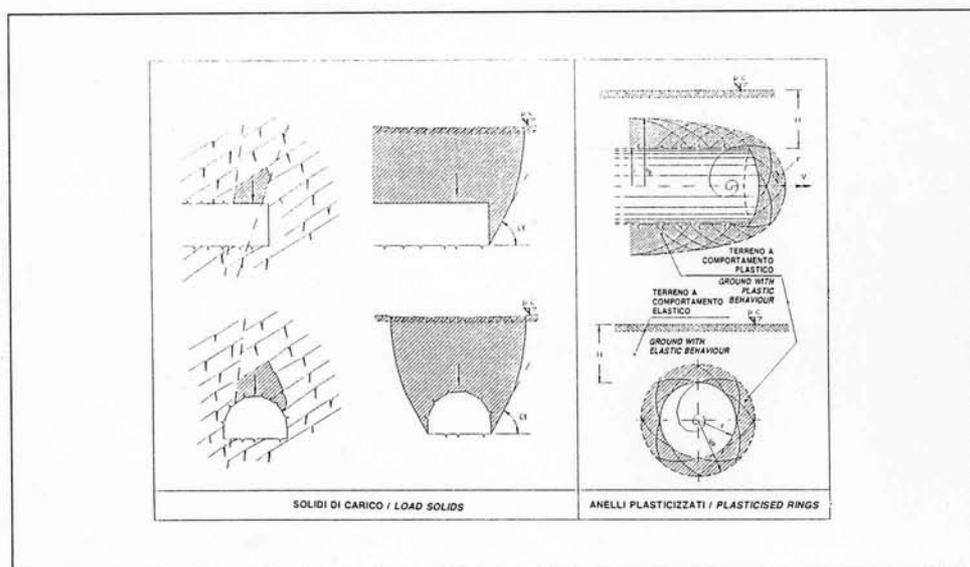


Fig. 11 - Comportamento a solidi di carico ed anelli plasticizzati
Behaviour by load solids and by plasticised rings

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 1ª 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 sul fronte;
- scavo meccanizzato mediante *scudi aperti* o *lanze*, 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 1ª e di 2ª 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 la resistenza al taglio del terreno.

Fanno parte degli interventi di presostegno, ad esempio, gli *infilaggi*, 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 sta-

bilità 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 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 e classificano, 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, in figura 13, nell'ambito della

classificazione proposta, 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.

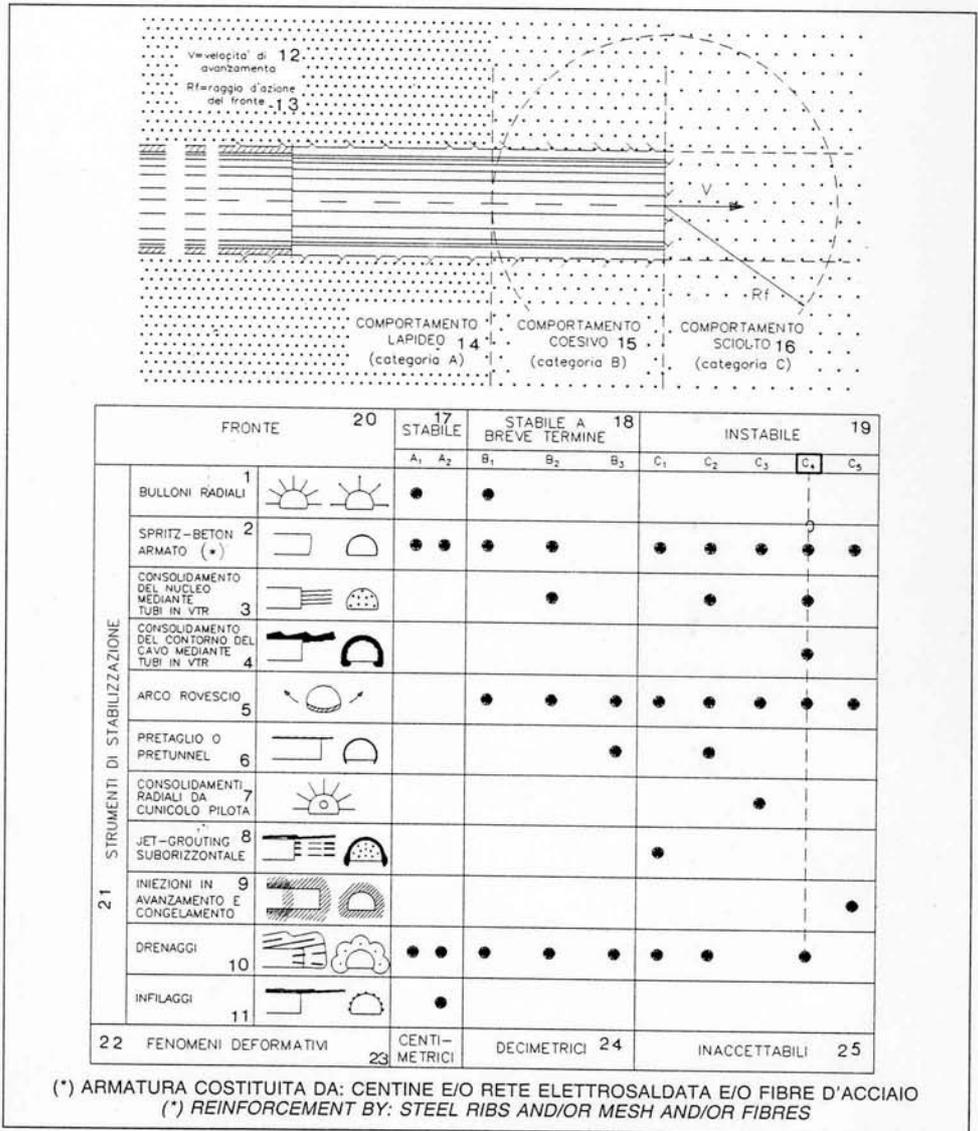


Fig. 13 - Campo di applicabilità dei singoli strumenti di stabilizzazione a disposizione dell'ingegnere progettista
 Range of applicability of the individual stabilisation instruments available to the design engineer

- 1) RADIAL ROOF BOLTS, 2) REINFORCED SHOTCRETE, 3) REINFORCEMENT OF THE CORE USING GLASS FIBRE TUBES, 4) REINFORCEMENT OF THE GROUND AROUND THE CAVITY USING GLASS FIBRE TUBES, 5) TUNNEL INVERT, 6) PRECUTTING OR PRETUNNELLING, 7) RADIAL GROUND REINFORCEMENT FROM PILOT TUNNEL, 8) NEAR-HORIZONTAL JET-GROUTING, 9) INJECTION IN ADVANCE OR FREEZING, 10) DRAINAGES, 11) INSERTS, 12) ADVANCE RATE, 13) RADIUS OF THE FACE, 14) STONY BEHAVIOUR CATEGORY, 15) COHESIVE BEHAVIOUR, 16) LOOSE BEHAVIOUR, 17) STABLE, 18) STABLE IN THE SHORT TERM, 19) UNSTABLE, 20) FACE, 21) STABILIZATION INSTRUMENTS, 22) DEFORMATION PHENOMENA, 23) CENTRIMETRIC, 24) DECIMETRIC, 25) UNACCEPTABLE

- 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.
- 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 σ_3 di annullarsi. La tabella di figura 13 può dunque venir utilizzata dal progettista quale riferimento per la definizione delle sezioni tipo sia longitudinali che trasversali. La figura 14 illustra un esempio di composizione di sezione tipo C4.

piegati 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 esser 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 geomeccanico della galleria riportando, per ogni tratta a comportamento deformativo omogeneo, la sezione tipo da adottare.

3.3.4 Fase di verifica

Una volta superato il momento della progettazione, l'avvio dei lavori di scavo (momento della costruzione) coincide con quello della *verifica* riguardo all'attendibilità delle previsioni fatte in fase di diagnosi e di terapia in termini di fenomeni deformativi. Detta verifica (che assume grande importanza avendo basato l'intera progettazione su queste previsioni) avviene attraverso la misura ed il controllo della reale "risposta" del mezzo all'azione dello scavo, risposta che si manifesta sotto forma di fenomeni deformativi:

- all'interno della cavità, in corrispondenza al fronte ed alle pareti di scavo;
- in superficie, in corrispondenza al tracciato della galleria.

In particolare, con sliding micrometre longitudinali ed estensimetri radiali multibase ad asta, si controlleranno rispettivamente le estrusioni e le convergenze superficiali e profonde all'interno dell'ammasso, a distanze variabili dal profilo di scavo, mentre con speciali estensimetri a nastro si controlleranno le convergenze perimetrali.

Quando la copertura della galleria lo permette, è particolarmente interessante e consigliabile, mettere in opera, in una determinata sezione, degli strumenti multibase verticali (fig. 15) per misurare i fenomeni deformativi radiali che precedono l'arrivo del fronte d'avanzamento (preconvergenze).

Quanto più sono sistematiche ed accurate queste misure tanto più risultano affidabili ed utili le informazioni che ne derivano al progettista, il cui compito potrà risultare più o meno complesso a seconda del campo in cui detti fenomeni evolvono.

Infatti, se l'avanzamento si svolge in un mezzo a comportamento di tipo lapideo o sciolto (rispettivamente Categoria A o C), 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 peso dei controlli è ridotto, in considerazione del fatto che i fenomeni deformativi hanno una evoluzione rapida nel tempo e limitata come entità. Di conseguenza è molto alleviato anche il lavoro del progettista, una volta operate le scelte di regimazione adeguate alla situazione reale.

Diverso è l'impegno del progettista e diversa è la cura che deve porre nell'analisi delle deformazioni del sistema fronte-nucleo d'avanzamento e delle 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 (Categoria B).

In questo caso, infatti, dovendo trattare con fenomeni deformativi lenti, progressivi e differiti, di entità sempre crescente, solo dalla continua lettura dei controlli il progettista può ottenere le informazioni necessarie da un lato per ottimizzare l'intensità ed il bilanciamento tra il fronte ed il cavo degli inter-

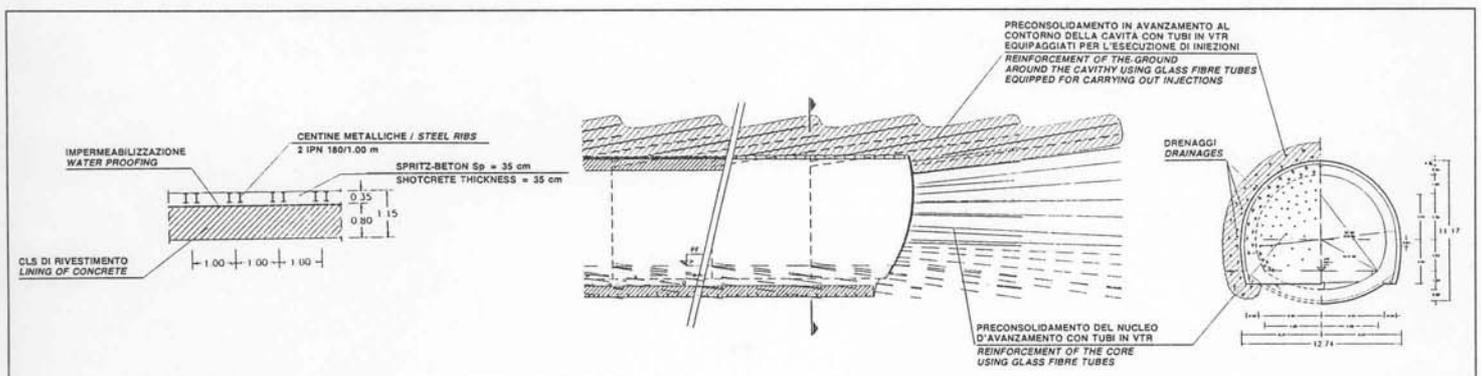


Fig. 14 - Esempio di sezione tipo C4 (fig. 13), longitudinale e trasversale
 Example of C4 (fig. 13) type, longitudinal and cross sections

venti di stabilizzazione operati e dall'altro lato per calibrare fasi, cadenze, e sistemi di scavo.

È di conseguenza inutile sottolineare quanto sia importante saper interpretare correttamente i risultati forniti dai controlli, perchè è dalla loro corretta interpretazione che dipende la buona messa a punto del progetto in corso d'opera.

È invece importante sottolineare che la fase di verifica non termina a galleria finita, al contrario essa deve proseguire attraverso un'opera di monitoraggio sistematico, volta a controllare la sicurezza del tunnel per tutto l'arco della sua vita d'esercizio.

4. Considerazioni conclusive

L'approccio basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli è un approccio di progettazione e costruzione di opere in sotterraneo valido per qualsiasi tipo di terreno, che mettendo a frutto le conoscenze, i mezzi di calcolo, le tecnologie di attacco più recenti (fig. 16), offre ai progettisti una semplice guida per classificare una galleria nell'ambito di tre categorie di comportamento fondamentali, assumendo come riferimento le condizioni di stabilità del sistema fronte-nucleo d'avanzamento

previste attraverso un'approfondito studio tenso-deformativo condotto per via teorica con gli strumenti del calcolo matematico. Per ciascuna tratta il progettista decide, in funzione del tipo di comportamento previsto, il genere di azione (preconferimento o semplice contenimento) da produrre per ottenere la regimazione dei fenomeni deformativi e, di conseguenza, sceglie gli interventi di stabilizzazione e la sezione tipo longitudinale e trasversale di volta in volta più adatta alla situazione. Sono previste sezioni tipo adeguate per ogni genere di terreno ed ogni situazione tenso-deformativa. Di esse sono automaticamente individuati i costi (a metro lineare di galleria) ed i tempi esecutivi necessari. In questo modo:

- 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);
- 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 evita, assumendo come riferimento un solo parametro comune a tutti i tipi di terreno (il comportamento tenso-deformativo del fronte d'avanzamento) facilmente ed oggettivamente misurabile durante l'avanzamento dei lavori, quella che è la più evidente pecca dei sistemi di classificazione precedenti (confrontare classi geomeccaniche con deformazioni) che sino ad oggi ha alimentato il suddetto contenzioso tra Direzione dei Lavori ed Impresa costruttrice.

Per queste importanti caratteristiche, l'approccio è stato discusso e recepito nell'ambito di una Commissione del Ministero dei Lavori Pubblici, allo scopo di farne una normativa tecnica ed un capitolato completo di elenco prezzi validi sul territorio nazionale, analogamente a quanto fatto nel rinnovare recentemente i propri capitolati da tre importanti Amministrazioni italiane [16] [17] [18].

Con le esigenze dettate dalla pianificazione, l'arte di progettare e di costruire opere in sotterraneo perde forse una parte del proprio fascino, ma sicuramente acquista, senza costringere o condizionare la fantasia del progettista, in efficienza e funzionalità.

BIBLIOGRAFIA / BIBLIOGRAPHY

- [1] KASTNER H., "Statik des Tunnel-und Stollenbaues", 1971
- [2] RABCEWICZ L.V., "The New Austrian Tunneling Method", Water Power, 1969
- [3] KOVARI K., "On the Existence of the NATM: Erroneous Concepts behind the New Austrian Tunneling Method", Tunnel, 1/1994
- [4] LUNARDI P., "Progetto e costruzione di gallerie: presentazione del metodo ADECO-RS", ISMES - Programma di istruzione permanente - Bergamo 14-16 novembre 1988
- [5] LUNARDI P., BINDI R., FOCARACCI A., "Technical and financial planning of underground works: the ADECO-RS method" VI Forum Europeo di Ingegneria Economica - Università Bicconi - Milano, 13-14 Maggio 1993
- [6] LUNARDI P., "Nuovi criteri di progetto e costruzione per una corretta pianificazione delle opere in sotterraneo", SAMOTER: Convegno su "La realizzazione delle grandi opere in sotterraneo" - Verona, 27-28 maggio 1993
- [7] LOMBARDI G., "Une méthode de calcul élastoplastique de l'état de tension et de déformation au

tour d'une cavité souterraine", International Congress ISRM, Denver, 1974

- [8] LUNARDI P., "Aspetti progettuali e costruttivi nella realizzazione di gallerie in situazioni difficili: interventi di preconferimento del cavo", Convegno Internazionale su "Il consolidamento del suolo e delle rocce nelle realizzazioni in sotterraneo" - Milano 18-20 Marzo 1991
- [9] LUNARDI P., "Un nuovo sistema costruttivo per la realizzazione di gallerie di grande luce in terreni sciolti: l'Arco Cellulare", Gallerie e grandi opere sotterranee, n. 29 anno 1989
- [10] LUNARDI P., PIZZAROTTI E.M., "Soft ground tunnelling in the Milan Metro and Milan Railway Link. Case histories", Soft Ground Tunnelling Course - Institution of Civil Engineers - Londra 10-12 Luglio 1990
- [11] LUNARDI P., BINDI R., FOCARACCI A., "Nouvelles orientations pour le projet et la construction des tunnels dans des terrains meubles. Etudes et experiences sur le preconferment de la cavite et la preconsolidation du noyau au front", Colloque International "Tunnels et micro-tunnels en terrain meuble" - Parigi 7-10 Febbraio 1989
- [12] LUNARDI P., FOCARACCI A., GIORGI P.,

PAPACELLA A., "Tunnel face reinforcement in soft ground design and controls during excavation", Convegno Internazionale su "Towards New Worlds in Tunnelling" - Acapulco 16-20 Maggio 1992

- [13] LUNARDI P., Evolution des technologies d'excavation en souterrain dans des terrains meubles, Comité Marocain des Grands Barrages - Rabat, 30 Settembre 1993
- [14] 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
- [15] LUNARDI P., "La stabilité du front de taille dans les ouvrages souterrains en terrain meuble: études et expériences sur le renforcement du noyau d'avancement", Symposium international "Renforcement des sols: expérimentations en vraie grandeur des années 80", Parigi, 18 novembre 1993
- [16] AUTOSTRADE S.p.A., "Norme Tecniche d'Appalto", 1992
- [17] ITALFERR SIS T.A.V. S.p.A., "Capitolato di Costruzione Opere Civili", 1992
- [18] A.N.A.S., "Capitolato Speciale d'Appalto, Parte II: Norme Tecniche", 1993

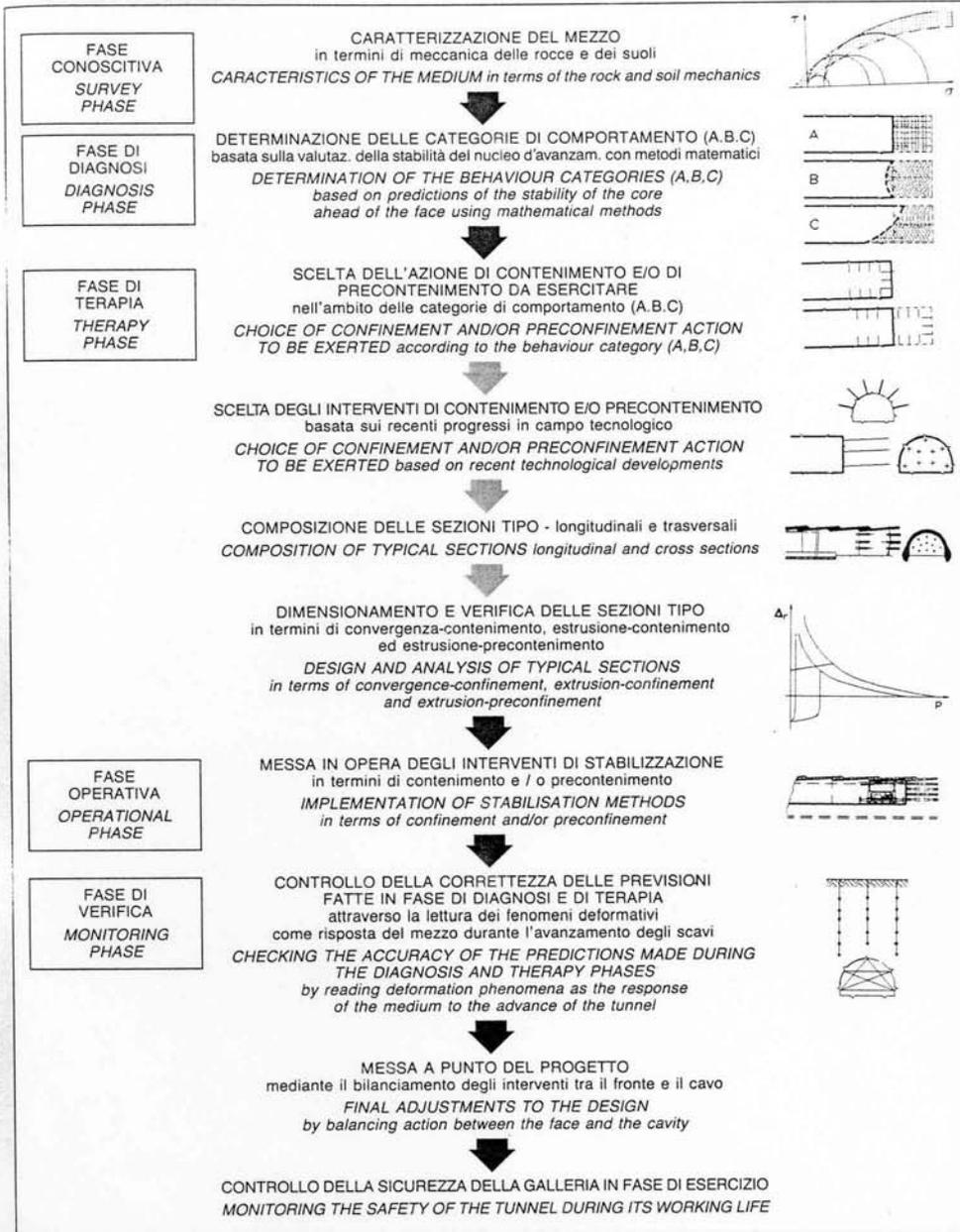


Fig. 16 - Sintesi dell'approccio basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli
Summary of the method based on the analysis of controlled deformation in rocks and soils

intensity and distribution of intervention between the face and the cavity on the one hand and calibrating excavation systems, rates and stages on the other, by continuous *interpretation* of monitoring results. Consequently, it cannot be emphasized too much just how important correct interpretation of the results of monitoring is, because *the detailed design and planning* of the excavation under construction depends on correct interpretation of these results.

It is also important to point out that the monitoring phase does not end when the tunnel is complete. It must continue with systematic monitoring aimed

at ensuring the safety of the tunnel during the whole of its service life.

4. Conclusions

The method based on an analysis of controlled deformation in rocks and soils is a design and construction method that is valid for all types of ground. It exploits the most recent knowledge, methods of calculation and advance technologies (fig. 16) and it offers design engineers a simple guide for the classification of underground works in terms of three basic behaviour categories. It assumes as its main

point of reference the stability of the the face-core system predicted by means of a detailed stress-strain study based on theory and carried out using mathematical calculating instruments.

For each section of tunnel, the design engineer decides, according to the type of behaviour that is predicted, the type of action (preconfinement or simple confinement) to be produced to be able to control deformation phenomena and as a consequence he chooses the most suitable methods of stabilisation and typical longitudinal cross sections for each situation. Typical cross sections exist that are suitable for all types of ground and all types of stress-strain situation. Costs (per linear metre of tunnel) and construction times of cross sections can be calculated automatically.

The method has the following consequences:

- it emphasizes the importance of stabilisation techniques as indispensable instruments for the control of deformation phenomena and consequently as "structural elements" contributing to the final stability of the tunnel (tunnels are classified and paid for in proportion to how they deform);
- it induces contractors, going on the basis of a complete and reliable design, to industrialise advance operations in all types of ground, even the most difficult;
- given the possibility of planning construction operations, times and costs, it avoids the disputes that, until now, normally develop between the Director of Works and the main contractor;
- given one single reference parameter common to all types of ground (the stress-strain behaviour of the face) easily and objectively measurable during construction, it overcomes the most evident failing of previous classification systems (compare geomechanical classes with deformation) which to date have fuelled the above mentioned disputes between Directors of Works and main contractors.

With these important characteristics, the method has been discussed and accepted by a commission of the Ministry of Public Works with the aim of creating technical standards and specifications complete with price lists for use in Italy. This has already been done with the recent renewal of the specifications of three important Italian civil works administrations [16] [17] [18].

With the dictates of planning, the art of designing and constructing underground works perhaps loses some of its fascination, but it definitely gains, without forcing or conditioning the creativity of the engineer, in terms of efficiency and functionality. ●●