



Prof. Ing. Pietro Lunardi

PROGETTO E COSTRUZIONE DI GALLERIE

Approccio ADECO-RS

copertina:

Galleria Tartaiguille (Francia, TGV Méditerranée, linea Marsiglia-Lione): Dettaglio del fronte (180 m² di sezione) consolidato con elementi strutturali di vetroresina. Lo scavo a mezza sezione, che si era dovuto sospendere a causa delle condizioni tenso-deformative davvero difficili, fu ripreso a piena sezione applicando i principi dell'approccio A.DE.CO.-RS e quindi terminato con quasi due mesi di anticipo sulla data prevista.

Progetto e costruzione di gallerie secondo l'approccio basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli

Prof. Ing. Pietro Lunardi, Studio di progettazione Lunardi, Milano

1. PREMessa

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

Innanzitutto non si tratta, come per le realizzazioni in superficie, di costruire una struttura attraverso l'assemblaggio progressivo di materiali (acciaio, cemento armato, ecc.) di cui sono ben note le caratteristiche di resistenza e deformabilità, la quale, sottoposta a ben precisi carichi, troverà il suo futuro equilibrio nella configurazione finale desiderata, bensì di inter-

venire su un equilibrio preesistente e di procedere in qualche modo a un "disturbo pianificato" dello stesso, in condizioni solo approssimativamente conosciute.

Un'altra particolarità delle opere in sotterraneo, ben conosciuta da progettisti e costruttori ma non sempre sufficientemente evidenziata, risiede nel fatto che, assai spesso, la fase in cui l'opera è maggiormente sollecitata non è quella finale della galleria terminata, sottoposta ai carichi esterni presunti all'atto del suo dimensionamento, bensì quella della fase costruttiva intermedia, assai più delicata in quanto gli effetti del disturbo causato dallo scavo non sono stati ancora completamente contenuti con le opere di rivestimento definitivo, allorché le tensio-

ni preesistenti nell'ammasso, deviate dall'apertura del cavo, si canalizzano al suo contorno ("effetto arco") creando delle zone di sovrasollecitazione in corrispondenza alle pareti di scavo.

Questa fase di passaggio appare particolarmente delicata se si pensa che è proprio dalla corretta canalizzazione del flusso di tensioni al contorno del cavo che dipende la tenuta e la durabilità dell'opera nel tempo. La canalizzazione, compatibilmente con l'entità degli stati tensionali in gioco, in relazione alle caratteristiche di resistenza e deformabilità del terreno, si può produrre (fig. 1):

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

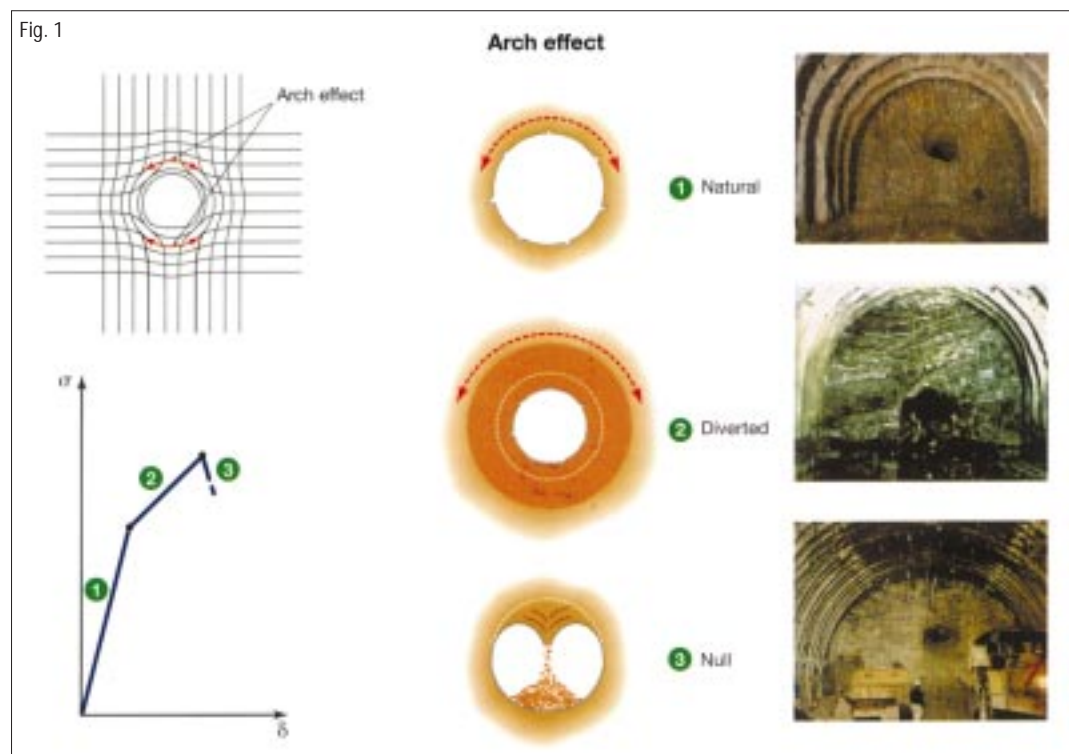
Il primo caso si verifica quando il terreno al contorno del cavo ben sopporta il flusso delle tensioni deviate, rispondendo elasticamente in termini di resistenza e di deformabilità.

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 dalle pareti di scavo e 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.

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 consegue 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 adatti 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.

Primo e più importante compito del progettista di gallerie è studiare se e come l'effetto arco potrà innescarsi all'atto dello scavo del tunnel e poi garantirne la formazione calibrando appropriatamente, in funzione delle diverse situazioni tenso-deformative, modalità di scavo e interventi di stabilizzazione.

A questo scopo egli 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, cioè il terreno, che è in pratica il "materiale da costruzione" della galleria, è un materiale assai anomalo se confrontato con quelli tradizionali dell'ingegneria civile: discontinuo, disomogeneo, anisotropo. Esso presenta, in superficie, caratteristiche 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. È 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 gli stati tensionali preesistenti.

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

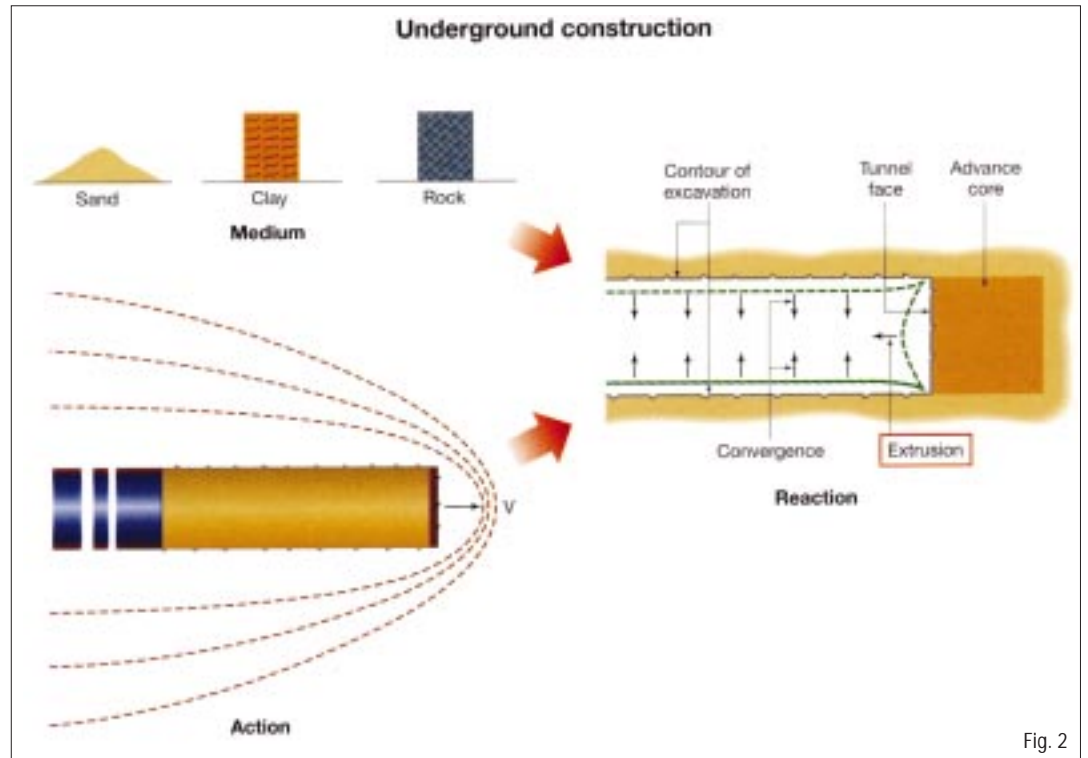


Fig. 2

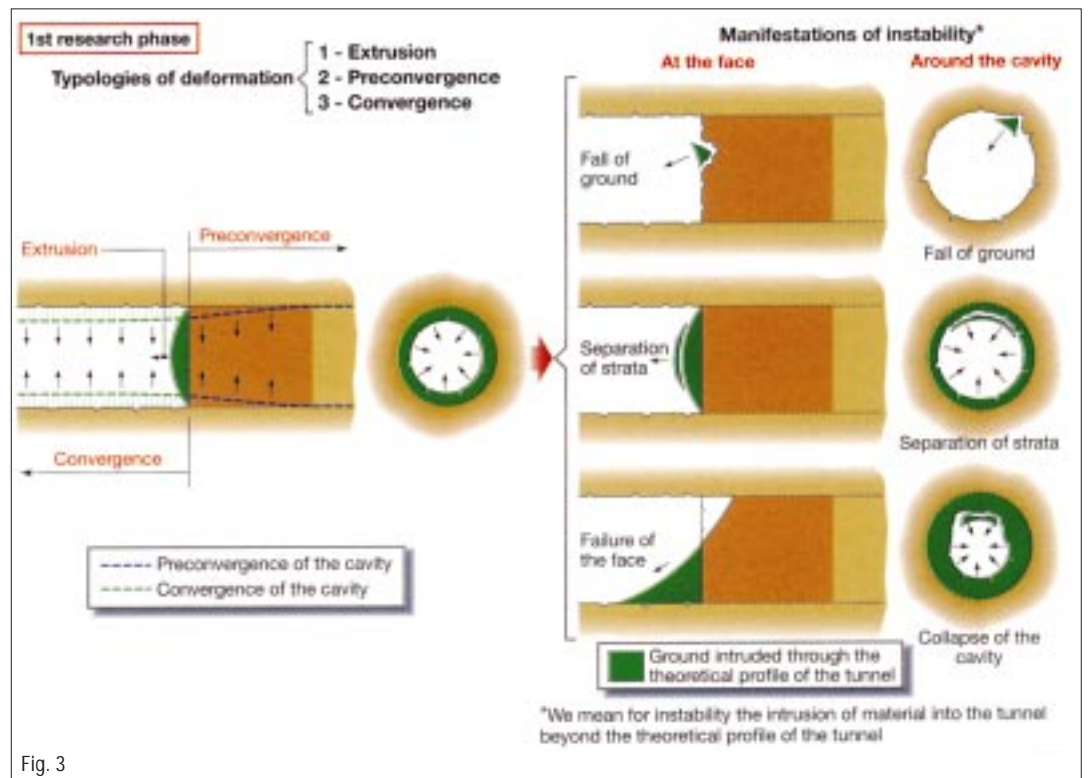


Fig. 3

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 di scavo R_f , 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 a uno piano (zona del fronte di scavo o di transizione); per il corretto studio della galleria egli dovrà allora utilizzare metodi di calco-

lo 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, dipende dal mezzo (consistenza) e dalle modalità con cui viene realizzato l'avanzamento del fronte (azione) e può determinare l'intrusione di materiale in galleria oltre il profilo teorico di scavo. L'intrusione

è sinonimo di instabilità delle pareti di scavo.

Si possono verificare tre situazioni fondamentali:

Se in fase di avanzamento della galleria, nel passare da uno stato di coazione di tipo triassiale ad uno di tipo piano, il progressivo annullamento dello stato di coazione al fronte ($\sigma_3 = 0$) produce sul terreno a monte sollecitazioni in campo elastico, la parete liberata (fronte di scavo) si mantiene stabile con deformazioni limitate e assolutamente

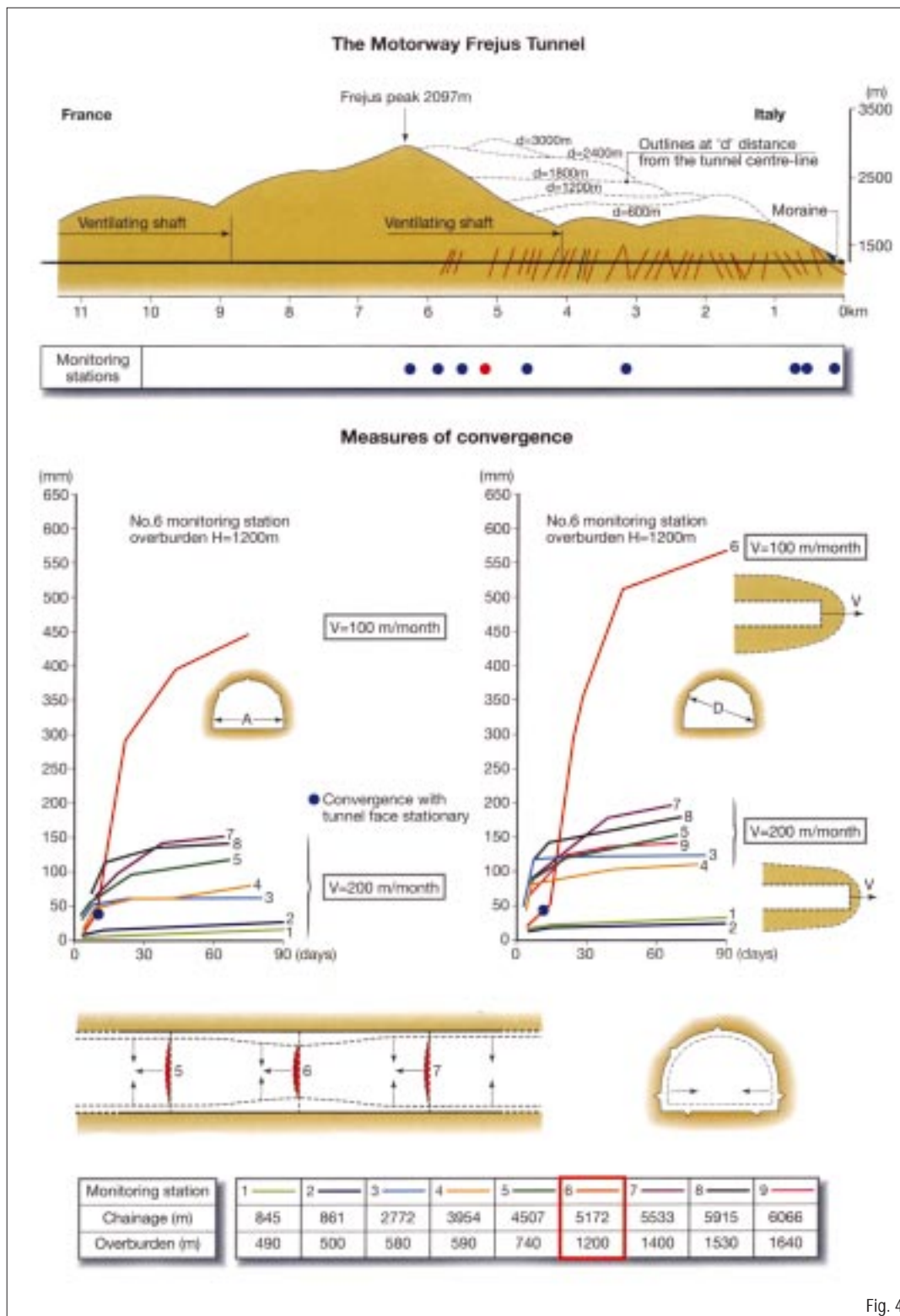


Fig. 4

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, il progressivo annullamento dello stato di coazione al fronte ($\sigma_3 = 0$) produce sul terreno a monte sollecitazioni in campo elastoplastico, anche la reazione è importante e la parete liberata del fronte di scavo, deformandosi elastoplasticamente verso l'interno del cavo, dà luogo a una situazione di sta-

bilità 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: solo operando con interventi di stabilizzazione adeguati si può controllare l'allontanamento dal profilo teorico di scavo.

Se, infine, il progressivo annullamento dello stato di sollecitazione al fronte ($\sigma_3 = 0$) pro-

duce sul terreno a monte sollecitazioni in campo di rottura, la risposta deformativa è inaccettabile e si ha una situazione di instabilità del terreno a monte del fronte che rende impossibile la formazione dell'"effetto arco": è il caso dei terreni incoerenti o sciolti entro i quali questo, non riuscendo a formarsi per via naturale, deve essere prodotto per via artificiale.

Ne consegue che la formazione dell'effetto arco e la sua posizione rispetto alla cavità (dalle

quali sappiamo dipendere la stabilità a breve e a lungo termine della galleria) sono segnalate dalla qualità e dall'entità della "risposta deformativa" del mezzo all'azione dello scavo.

Partendo da queste considerazioni, più di venticinque anni fa iniziammo ad approfondire i rapporti esistenti tra modifica dello stato tensionale nel mezzo indotta dall'avanzamento di una galleria e conseguente risposta deformativa dello stesso.

2. LA RICERCA SULLA RISPOSTA DEFORMATIVA DEL MEZZO

L'analisi della risposta deformativa dell'ammasso (effetto) si è sviluppata nel corso di una ricerca, di carattere sperimentale e teorico, iniziata più di venticinque anni fa e tuttora in corso.

In una "prima fase di ricerca" ci si è dedicati soprattutto all'osservazione sistematica del comportamento tenso-deformativo di svariate gallerie in fase di realizzazione, con particolare riguardo a quello del fronte di scavo e non della sola cavità, come comunemente praticato. Ben presto è risultata evidente la complessità della risposta deformativa (effetto), oggetto dello studio, e la conseguente necessità, per poterla definire integralmente, di individuare nuovi riferimenti (fig. 3):

- **il nucleo d'avanzamento:** identificato con il volume di terreno che sta a monte del fronte di scavo, di forma pressoché cilindrica e dimensioni trasversale e longitudinale dell'ordine del diametro della galleria;

- **l'estruzione:** identificata con la componente primaria della risposta deformativa del mezzo all'azione dello scavo, che si sviluppa in gran parte all'interno del nucleo d'avanzamento; in funzione della resistenza, della deformabilità del nucleo e del campo di tensioni originario cui è soggetto, si manifesta in corrispondenza della superficie delimitata dal fronte di scavo, in senso longitudinale all'asse della galleria, con geometrie di deformazione più o meno assialsimmetriche (spanciamento del fronte) o di ribaltamento gravitativo (rotazione del fronte);

- **la preconvergenza della cavità:** identificata con la convergenza del profilo teorico di scavo a monte del fronte, strettamente dipendente dalle caratteristiche di resistenza e deformabilità del nucleo d'avanzamento in rapporto allo stato ten-

sionale originario.

Successivamente, nella “**seconda fase di ricerca**”, sulla base di analisi approfondite - soprattutto in termini cronologici - dei fenomeni d’instabilità osservati nel corso dell’esecuzione di almeno 400 Km di gallerie nei più svariati tipi di terreno e nelle più svariate situazioni tenso-deformative, si è cercato di verificare l’esistenza di collegamenti tra il comportamento tenso-deformativo del sistema fronte di scavo-nucleo d’avanzamento (estrusione e preconvergenza) e quello della cavità (convergenza).

Una volta appurato che la risposta deformativa nel suo complesso (estrusione, preconvergenza e convergenza) è sistematicamente condizionata dalla rigidità del nucleo di terreno al fronte di scavo (che ne è quindi la vera causa), in un terzo periodo di tempo, denominato “**terza fase di ricerca**”, si è lavorato per verificare fino a che punto, agendo sulla rigidità suddetta, si potesse controllare la risposta deformativa della cavità (convergenza).

A questo scopo, il comportamento tenso-deformativo del nucleo d’avanzamento, correlato sistematicamente a quello della cavità, è stato studiato in termini di stabilità e di deformazione sia in assenza sia in presenza di interventi protettivi e di rinforzo del nucleo.

2.1 LA PRIMA FASE DI RICERCA

La prima fase di ricerca (osservazione sistematica del comportamento deformativo del sistema fronte di scavo-nucleo d’avanzamento) è stata condotta attraverso l’esecuzione di controlli sia strumentali sia visivi sul comportamento del nucleo

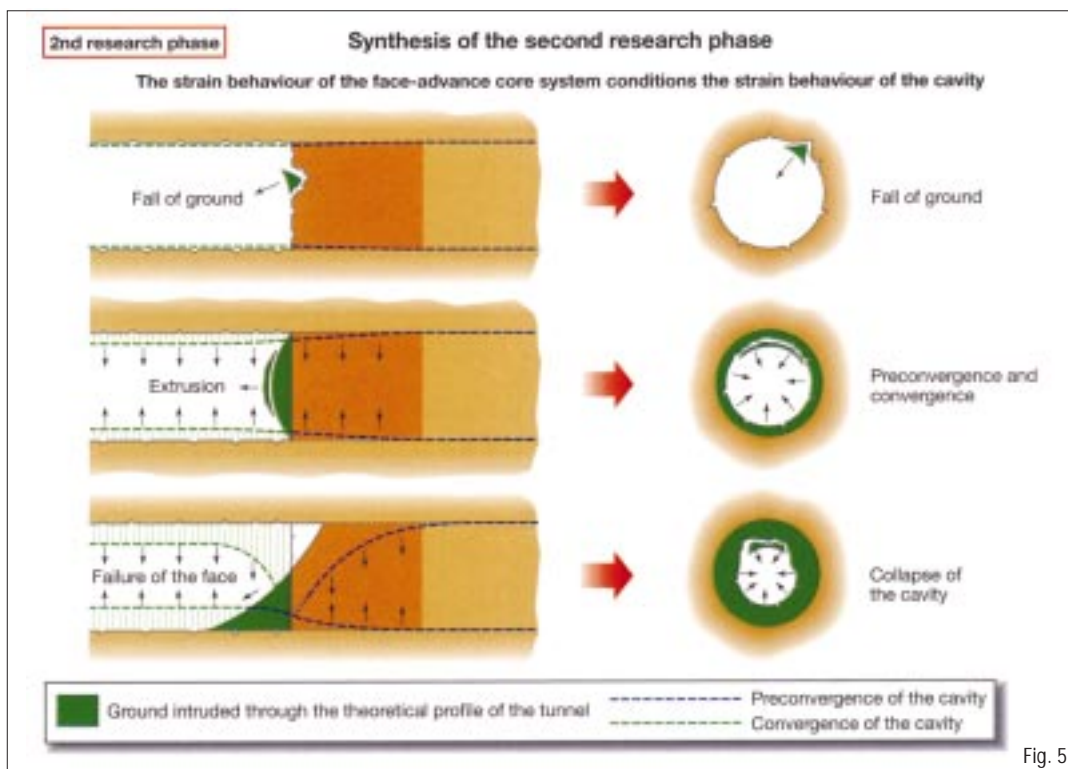


Fig. 5

d’avanzamento e delle pareti di scavo, in termini di stabilità e di deformazione, con particolare riferimento ai fenomeni di (fig. 3):

- a) estrusione del fronte;
- b) preconvergenza della cavità;
- c) convergenza della cavità (riduzione della sezione teorica di scavo a valle del fronte).

In relazione alle suddette tipologie di deformazione, le osservazioni visive condotte sistematicamente dall’interno del cavo hanno permesso di associare loro le manifestazioni d’instabilità conseguenti, localizzate sul fronte o sul contorno dello stesso (si parla di instabilità ogniqualvolta si produce l’intrusione di materiale in galleria oltre il profilo teorico di scavo):

- a) distacchi gravitativi, splaccaggi e crollo del fronte, in corrispondenza del sistema fronte di scavo-nucleo d’avanzamento;
- b) distacchi gravitativi, splaccaggi e collasso della cavità, in corrispondenza del contorno del cavo.

2.2 LA SECONDA FASE DI RICERCA

Una volta individuate le tipologie di deformazione e le manifestazioni d’instabilità che si possono verificare sul nucleo al fronte e sul contorno del cavo di una galleria, ci si è chiesti se, attraverso l’osservazione delle prime, fosse possibile in qualche modo essere orientati sul tipo e l’entità che avrebbero assunto le seconde. Si è quindi iniziata la seconda fase di ricerca [verifica dell’esistenza di eventuali collegamenti tra il comportamento deformativo del sistema fronte di scavo-nucleo d’avanzamento (—> estrusione e preconvergenza) e quello della cavità (—> convergenza)]. Essa è stata condotta attraverso lo studio, l’osservazione ed il controllo degli eventi deformativi del fronte e del cavo, con particolare riguardo alla loro entità e successione cronologica in funzione dei sistemi, delle fasi e delle cadenze di scavo che venivano di volta in volta adottati.

Prima di esporre i risultati conseguiti in questa fase sperimentale, è indispensabile illustrare brevemente, con qualche esempio significativo, le osservazioni compiute.

2.2.1 L’ESEMPIO DEL TRAFORO AUTOSTRADALE DEL FREJUS (1975)

Il Traforo autostradale del Frejus ha attraversato per il 95% del suo sviluppo (di 13 Km di lunghezza, con coperture fino a 1700 m) una formazione metamorfica di calcescisti litologicamente omogenea lungo il tracciato.

Il progetto della galleria è stato confortato da una campagna geologica e geomeccanica condotta dalla galleria ferroviaria adiacente (realizzata nel 1860) e da gallerie di servizio. Le prove di resistenza e deformabilità eseguite su campioni di calcescisto indicavano i seguenti parametri geotecnici medi:

- angolo d’attrito: 35°;
- coesione: 30 Kg/cm² (= 3 MPa);
- modulo elastico: 100.000 Kg/cm² (= 10.000 MPa).

Nell’ambito del progetto originario (1975) non erano state formulate previsioni sul comportamento deformativo della galleria, perché questo non rientrava nella prassi abituale dell’epoca.

Tenuto conto di quanto era noto dell’esperienza fatta da Sommeiller durante la realizzazione del tunnel ferroviario adiacente, avvenuta circa un secolo prima, fu scelto di avanzare a piena sezione con immediata stabilizzazione dell’anello di roccia al contorno del cavo, per uno spessore di circa 4,5 m, mediante bulloni attivi ad ancoraggio puntuale, integrati da spritz-beton. Il rivestimento definitivo di calcestruzzo, mediamente di 70



Foto 1: Galleria S. Stefano (linea ferroviaria Genova-Ventimiglia, terreno: flysch marnoso-calcareo tettonizzato e laminato, copertura: 150 m, diametro: 12 m). Collasso della cavità.

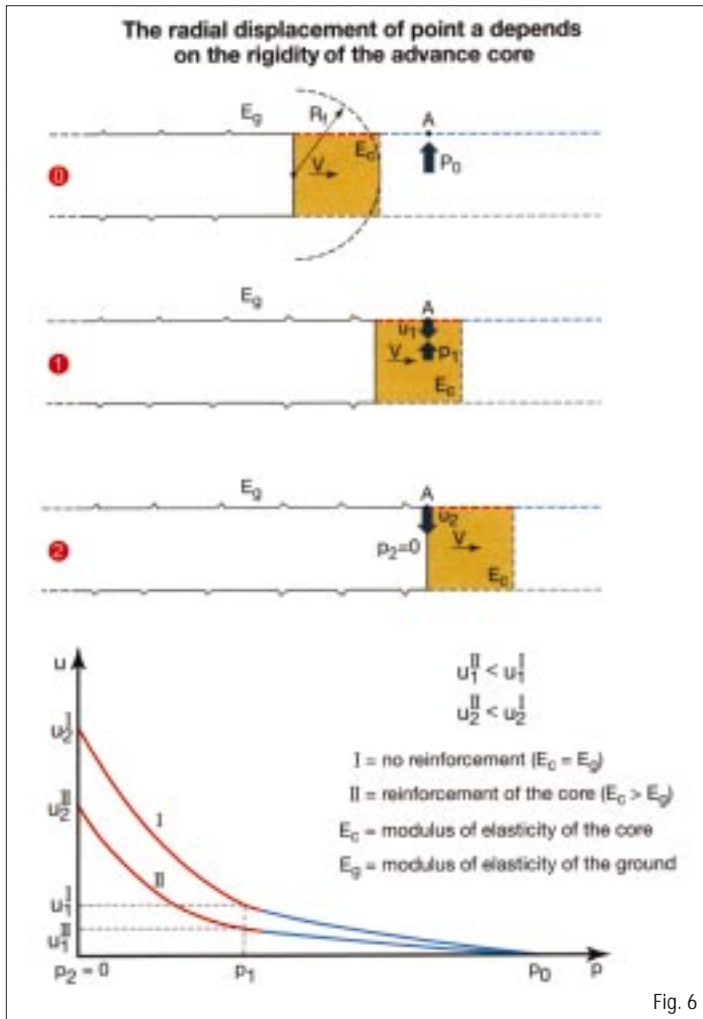


Fig. 6

cm di spessore, veniva gettato a seguire e completava l'opera.

Lo studio dei fenomeni deformativi ha costituito la parte più significativa della campagna di osservazioni e misure eseguite in corso d'opera per tenere sotto controllo la risposta dell'ammasso roccioso agli interventi di stabilizzazione operati, in considerazione del fatto eccezionale che ci si trovava per la prima volta ad affrontare una galleria da realizzarsi entro un ammasso omogeneo (calcescisto) con coperture variabili, sottoposta ad un campo di tensioni crescenti e variabili con la copertura (0 - 1.700 m).

Fino a circa 500 m di copertura, rimanendo l'ammasso sollecitato in campo elastico, la galleria mostrava un comportamento a fronte stabile, con fenomeni deformativi trascurabili e limitate manifestazioni d'instabilità sul fronte e sul cavo dovute esclusivamente a distacchi di tipo gravitativo.

All'aumentare della copertura, e con essa dello stato tensionale, l'ammasso roccioso entrava in elastoplasticità e la galleria assumeva un comportamento a fronte stabile a breve termine,

con fenomeni di convergenza al contorno del cavo di ordine decimetrico (convergenza diametrica 10-20 cm). La fascia di roccia armata collaborava efficacemente alla statica della galleria, limitando la loro entità ed evitando la comparsa delle conseguenti manifestazioni d'instabilità.

L'avanzamento, grazie anche alla buona qualità della roccia, procedeva senza problemi alla

velocità di circa 200 m/mese, finché alla progressiva 5.173 i lavori non furono temporaneamente arrestati per le ferie estive in una zona d'ammasso omogenea, in corrispondenza ad una copertura di circa 1.200 m.

La stazione di misura per le convergenze n. 6, messa subito in opera ad un metro dal fronte (progr. 5.172), presentava, dopo i 15 giorni di arresto, una deformazione massima di circa 10 cm (fig. 4).

Si trattava indubbiamente di deformazione di solo *fluage* (a carico costante), essendo il fronte, nel frattempo, rimasto completamente fermo. Ripresi gli scavi, la convergenza diametrica, nella medesima sezione, s'incrementava assai bruscamente su valori mai misurati prima, fino a raggiungere 60 cm dopo 3 mesi mentre più avanti, proseguendo l'avanzamento, essa riassumeva dopo poche decine di metri i valori normali (convergenza diametrica circa 20 cm).

Occorre precisare che, prima dell'interruzione dei lavori, la cavità era stata consolidata fino ad un metro dal fronte con più di 30 bulloni radiali a metro lineare, ma nessun intervento era stato realizzato sul nucleo. Una volta ripreso l'avanzamento, l'intervento di stabilizzazione al contorno del cavo era stato riattivato con la stessa intensità e la medesima cadenza precedenti.

Se ne dedusse che, durante il fermo del cantiere di avanzamento, il nucleo di terreno al fronte, non aiutato da interventi di consolidamento, aveva avuto il tempo di estrudere in elastoplasticità, innescando un fenomeno di detensione per *fluage* dell'ammasso al suo contorno (preconvergenza) che a sua

volta era stato la causa del vistoso incremento delle convergenze del cavo rispetto ai valori normali.

2.2.2 L'ESEMPIO DELLA GALLERIA S. STEFANO (1984)

La galleria S. Stefano fa parte del nuovo tracciato a doppio binario della linea ferroviaria Genova-Ventimiglia, nel tratto compreso tra S. Lorenzo al Mare e Ospedaletti.

L'opera attraversa la formazione di *flysch* ad *Helmintoidi* caratteristica della Liguria occidentale. Si tratta di scisti argillosi ed argilloso-arenacei con sottili banchi di arenarie e calcari marnosi ripiegati ed intensamente fratturati. La componente argillo-scistosa è fortemente laminata. Una zona di transizione assai tettonizzata segna il passaggio tra il termine H2 ed il termine H1 più calcareo-marnoso della formazione.

Le prove di resistenza su campione condotte in laboratorio fornivano valori di angolo d'attrito variabili tra 20° e 24° e coesione da 15 Kg/cm² (= 1,5 MPa) a 0.

Anche in questo caso, quando sono iniziati i lavori nel 1982, non erano state fatte previsioni sul comportamento deformativo della galleria.

Il progetto originario prevedeva l'avanzamento a piena sezione, con la messa in opera di centine e spritz-beton quale rivestimento di prima fase e di un anello di calcestruzzo di grosso spessore (fino a 110 cm) quale rivestimento definitivo.

Durante i lavori di scavo si poté constatare che, fintanto che si avanzava in condizioni di elasticità, i fenomeni deformativi del fronte e del cavo erano del

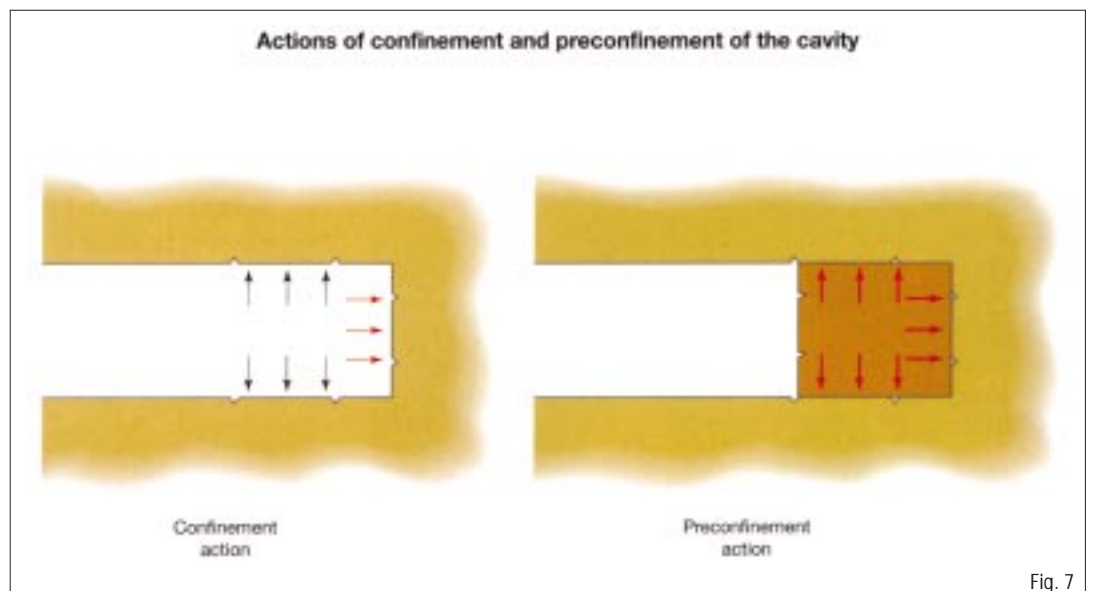


Fig. 7

tutto trascurabili e le manifestazioni d'instabilità localizzate pressoché assenti (comportamento a fronte stabile). Addentrandosi con gli scavi di avanzamento in una zona interessata da stati tensionali residui di origine tettonica e trovandosi l'ammasso in condizioni di elastoplasticità, le manifestazioni deformative cominciavano a causare qualche difficoltà, anche in relazione alla comparsa di importanti spinte dissimetriche dovute alla presenza, nel terreno, di masse rigide disperse nella matrice plastica. Contemporaneamente, al fronte di scavo si osservavano splaccaggi di materiale, segnale certo della presenza di un movimento estrusivo tipico di una situazione di fronte stabile a breve termine, mentre le convergenze assumevano valori decimetrici.

Ad un certo momento, essendosi la situazione tensionale dell'ammasso evidentemente evoluta fino al campo della rottura, si verificava il crollo dell'intero fronte di scavo (situazione di fronte instabile), cui seguiva, nel giro di qualche ora, il collasso della cavità, con convergenze diametrali di oltre 2 m, anche nella parte già stabilizzata con centine e spritz-beton, per una tratta significativa di oltre 30 m a valle del fronte stesso (foto 1).

Si fa osservare, a questo punto, che il tipo di terreno attraversato nelle tre situazioni tenso-deformative evidenziate era essenzialmente il medesimo e che l'unico fenomeno di collasso della cavità, con convergenze di ordine metrico anche se in una parte di galleria già stabilizzata, si è verificato solo quando è venuto a mancare il contributo di rigidità del nucleo al fronte di scavo.



Foto 2: Galleria Vasto (linea ferroviaria Ancona-Bari, terreno: argilla limosa, copertura: 135 m, diametro: 12,20 m). L'estrusione del terreno attraverso il fronte durante lo scavo a mezza sezione (conformemente ai principi del NATM).

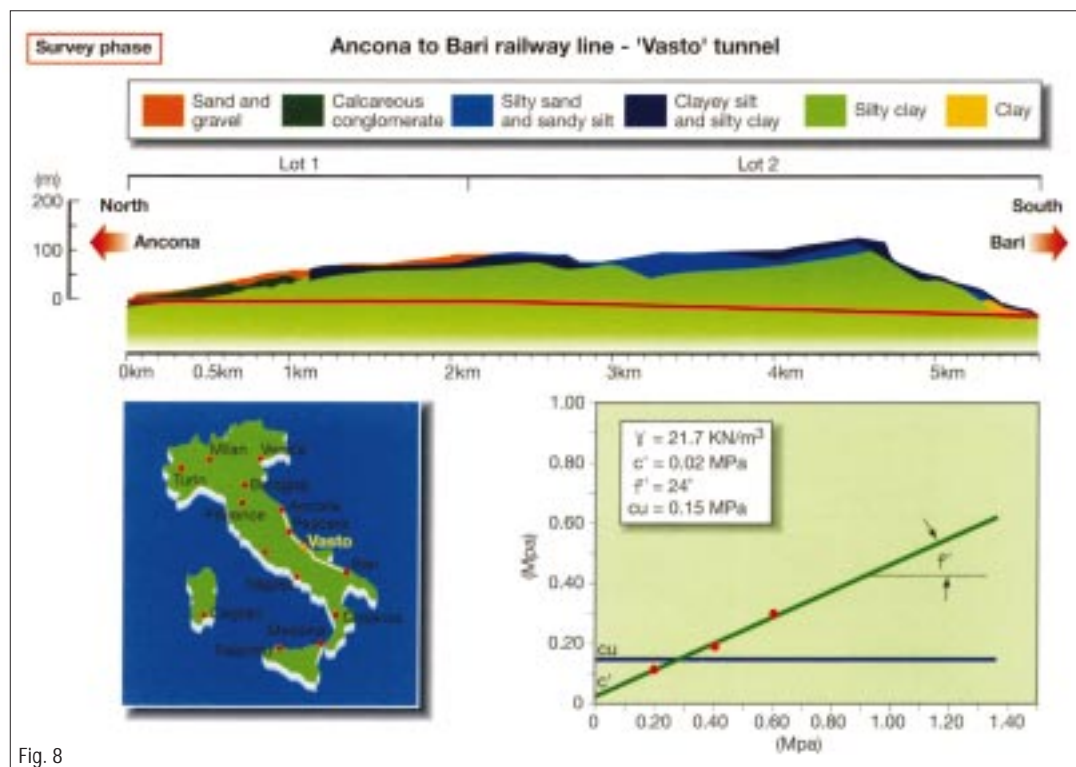


Fig. 8

2.2.3 L'ESEMPIO DELLA GALLERIA TASSO (1988)

La galleria Tasso fa parte di una serie di gallerie scavate verso la metà degli anni '80 per la realizzazione della nuova linea "Direttissima" Roma-Firenze. L'area in cui è ubicata l'opera appartiene al bacino lacustre del Valdarno Superiore, ed è costituita da sabbie limose e limi sabbiosi intercalati da livelli argillo-limosi contenenti lenti e livelli sabbiosi saturi d'acqua.

Il progetto originario prevedeva di avanzare a mezza sezione, stabilizzando le pareti dello scavo con centine e spritz-beton. Le centine venivano vincolate al piede con tiranti sub-orizzontali e fondate su micropali o su colonne di terreno consolidato mediante jet-grouting.

Inizialmente lo scavo, in condizioni di fronte stabile a breve

termine, non diede luogo ad apprezzabili fenomeni deformativi, né del fronte né del cavo.

All'aumentare delle coperture e quindi dello stato tensionale del mezzo, anche a causa delle scarse caratteristiche geomeccaniche del materiale attraversato, si passò in brevissimo tempo da una situazione di fronte stabile a breve termine ad una di fronte instabile. In seguito al crollo del fronte, nonostante si avanzasse a mezza sezione, nel corso di una sola notte si produceva il collasso della cavità con convergenze diametrali dell'ordine di 3-4 m e con il coinvolgimento di circa 30-40 m di galleria già scavata e protetta da centine e spritz-beton (fig. 26).

2.2.4 RISULTATI DELLA SECONDA FASE DI RICERCA

Dallo studio e dall'analisi dei casi illustrati e di altri analoghi, che in questa sede sarebbe troppo lungo riportare, furono tratti diversi spunti di grande interesse. In particolare, dall'esperienza del Frejus appariva chiaro che:

- avanzando in condizioni di elastoplasticità d'ammasso è molto importante mantenere sostenuta e costante la cadenza di scavo per non lasciare al nucleo il tempo di deformarsi: è così possibile evitare l'innescio dei fenomeni di estrusione e pre-convergenza, che costituiscono l'anticamera dei successivi fenomeni di convergenza del cavo.

Dalle altre esperienze citate e da altre analoghe emergeva,

d'altra parte, che:

- il crollo del nucleo ed il collasso della cavità non si verificano mai senza che l'uno sia seguito dall'altro ed, in particolare, senza che il secondo sia preceduto dal primo.

Dalla seconda fase di ricerca si evidenziava dunque (fig. 5):

- 1) l'esistenza di un legame stretto tra il fenomeno di estrusione del nucleo al fronte d'avanzamento ed i fenomeni di pre-convergenza e convergenza del cavo;
- 2) l'esistenza di stretti legami tra il crollo del nucleo d'avanzamento ed il collasso della cavità, anche se già stabilizzata;
- 3) che i fenomeni deformativi relativi al cavo sono sempre cronologicamente conseguenti e dipendenti da quelli che coinvolgono il nucleo di terreno al fronte di scavo.

Si evidenziava altresì la necessità di far sì che l'effetto arco, la cui formazione come sappiamo condiziona la stabilità della galleria, s'innesci già a monte del fronte di scavo, per continuare ad essere operativo, in una determinata sezione, anche dopo l'allontanamento del fronte dalla medesima.

2.3 LA TERZA FASE DI RICERCA

I risultati della seconda fase di ricerca rafforzavano l'impressione, già sorta in noi, che la deformabilità del nucleo d'avanzamento di una galleria fosse la vera causa di tutto il processo deformativo nel suo complesso (estrusione, pre-convergenza e

convergenza) e che, di conseguenza, la rigidità del nucleo giocasse un ruolo determinante sulla stabilità della stessa a breve e a lungo termine.

Se si considera un punto **A** ubicato sul profilo di calotta della galleria ancora da scavare, appare infatti del tutto evidente che il suo spostamento radiale u (preconvergenza) all'approssimarsi del fronte di scavo dipende dalla resistenza e dalla deformabilità del terreno che si trova all'interno del profilo del futuro scavo.

Se si descrive l'evoluzione del suo spostamento radiale su un diagramma **p-u** (dove **p** è la pressione di contenimento esercitata radialmente su **A**) si vede che (fig. 6) sin quando il fronte è ancora lontano (distanza da **A** superiore al raggio d'influenza del fronte di scavo R_f) la situazione tensionale di **A** rimane stazionaria (pressione di contenimento radiale p_0 = pressione originaria). All'approssimarsi del fronte di scavo, invece, diminuendo lo spessore di nucleo d'avanzamento compreso tra **A** e il fronte, conseguentemente diminuisce anche la pressione di contenimento radiale **p**: **A** inizierà a spostarsi radialmente verso l'interno della futura cavità. L'entità dello spostamento dipende, come abbiamo detto e come appare del tutto evidente, dalle tensioni in gioco e dalla deformabilità del nucleo che ne garantisce l'equilibrio e non solo dalle caratteristiche geomeccaniche del terreno circostante.

Dopo il passaggio del fronte, d'altra parte, lo spostamento radiale di **A** continuerà ad evolvere, in campo elastico o in campo elastoplastico, in funzione degli stati tensionali preesistenti, delle caratteristiche del terreno presente all'estradosso del tunnel e della pressione di contenimento radiale esercitata dagli interventi di stabilizzazione operati (prerivestimento, rivestimento definitivo) a cui l'equilibrio del punto **A** viene affidato.

Sul diagramma qualitativo di figura 6 sono riportati, a parità di altre condizioni, i percorsi deformativi subiti da **A** in caso di nucleo d'avanzamento deformabile (curva I) e in caso di nucleo d'avanzamento rigido (curva II): ovviamente, sino al passaggio del fronte, la deformazione radiale subita dal punto **A** al progressivo diminuire della pressione radiale di contenimento **p**, nel caso di nucleo rigido, è più ridotta della stessa in caso di nucleo

deformabile. Appare altresì probabile che anche dopo il passaggio del fronte, quindi venendo meno il contenimento esercitato dal nucleo d'avanzamento, le curve I e II permangano nettamente distinte e che lo spostamento del punto **A** sia funzione della storia tenso-deformativa subita precedentemente. Ne consegue che la deformabilità del nucleo d'avanzamento è il fattore capace di condizionare la risposta deformativa dell'ammasso allo scavo e deve essere considerato la sua vera causa.

Allora, se la deformabilità del nucleo d'avanzamento è la vera causa della risposta deformativa dell'ammasso allo scavo, appare logico ipotizzare la possibilità di utilizzare il nucleo come nuovo strumento di controllo della stessa, influenzando sulla sua rigidità con interventi appropriati.

Si è allora lavorato sulla possibilità di regolare la rigidità del nucleo d'avanzamento per verificare sino a che punto ciò ci avrebbe permesso di controllare la risposta deformativa della cavità.

Per fare questo, è stato necessario studiare e mettere a punto tecnologie nuove e nuovi tipi d'intervento, che permettessero di agire sul nucleo proteggendolo da stati di sovratensione (interventi protettivi) e/o conservandone o migliorandone le caratteristiche di resistenza e deformabilità (interventi di rinforzo). Questi particolari tipi d'intervento si sono detti "interventi conservativi" o anche "interventi di precontenimento del cavo" per distinguerli da quelli di semplice contenimento che agiscono solo al contorno dello stesso, a valle del fronte di scavo (fig. 7) [1].

Le nuove idee si sono quindi sperimentate durante la realizzazione di alcune gallerie in condizioni tenso-deformative molto difficili. Vediamo, in particolare, quanto si è sperimentato in un cantiere particolarmente impegnativo e, di conseguenza, anche molto significativo.

2.3.1 LA GALLERIA "VASTO"

Il tracciato della galleria, parte della nuova linea ferroviaria Ancona-Bari, si sviluppa per circa 6.200 m nel sottosuolo del rilievo collinare che ospita l'abitato di Vasto (Pescara).

Dal punto di vista geologico (fig. 8), detto rilievo risulta costituito, nella parte basale e mediana, da un complesso di ter-

reni a prevalente costituzione limo-argillosa, di colore grigio, stratificati, con sottili intercalazioni sabbiose e, nella parte sommitale, da un banco di conglomerati, più o meno cementati, al quale è sovrapposto un orizzonte di terreni sabbioso-limosi di colore bruno giallastro.

La galleria si sviluppa interamente entro la formazione argillosa di base ad eccezione dei tratti iniziali presso gli imbocchi. Alla profondità del cavo i terreni risultano saturi d'acqua e fortemente sensibili al rimaneggiamento.

2.3.1.1 BREVE STORIA DELLO SCAVO

I lavori, iniziati nel 1984 all'attacco Nord, si erano protratti fino all'aprile 1990 tra ripetuti e seri dissesti.

Il progetto originario prevedeva lo scavo a mezza sezione, subito protetto con un rivestimento provvisorio costituito da spritz-beton, centine e rete elettrosaldata. Il rivestimento definitivo di calcestruzzo armato, di un metro di spessore, veniva gettato a stretto ridosso del fronte d'avanzamento, sempre in presenza di nucleo. I piedritti della galleria venivano gettati succes-

sivamente per sottomurazione ed il getto dell'arco rovescio completava l'intervento.

Dopo il primo importante dissesto, si era tentato di riprendere gli avanzamenti mettendo a punto più soluzioni, che si erano però dimostrate del tutto inadeguate, fino al prodursi di un disastroso evento franoso a prog. km 38+075, sotto 38 m di copertura, che coinvolgendo il fronte (foto 2) e, quindi, una tratta di circa 40 m a valle dello stesso, produceva nel rivestimento definitivo deformazioni di enorme entità (superiori al metro), tali da rendere impossibile la prosecuzione dei lavori.

Lo scrivente, chiamato a questo punto per trovare una soluzione che consentisse di riprendere il lavoro interrotto e di proseguirlo sino alla completa realizzazione della galleria, affrontò il non semplice problema impostando per la restante parte di galleria un nuovo criterio di avanzamento, che fondava i suoi principi sulla regimazione dei fenomeni deformativi attraverso l'irrigidimento del nucleo al fronte, quindi sulla produzione di azioni di precontenimento del cavo.

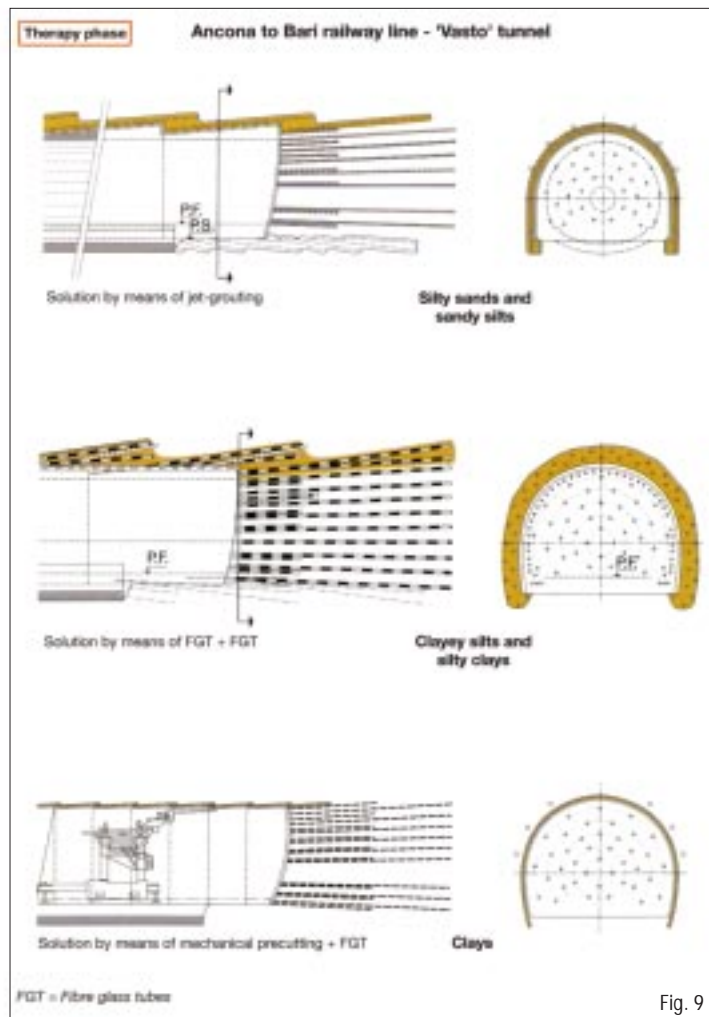


Fig. 9

2.3.1.2 FASE CONOSCITIVA PER LA GALLERIA "VASTO"

Prima di iniziare la nuova progettazione, si è giudicato opportuno procedere ad una più approfondita caratterizzazione geotecnica dei materiali interessati dagli scavi.

Questi, appartenenti alla formazione argillosa di base, risultarono classificabili come limi argillosi o argille limose da mediamente ad altamente plastici ed impermeabili, marcatamente suscettibili di rigonfiamento in seguito ad imbibizione.

Le prove di taglio diretto ed in cella triassiale, pur fornendo valori di coesione ed angolo d'attrito piuttosto dispersi, evidenziavano, comunque, valori di resistenza mediamente assai scarsi.

Con alcune prove di "estrusione in cella triassiale" si è quindi modellato in laboratorio l'avanzamento dello scavo della galleria nella situazione tensionale reale del terreno in situ. Esse, integrate con semplici modelli matematici agli elementi finiti, hanno consentito anche la taratura dei parametri geomeccanici (c, Ø, E) da utilizzare nelle successive fasi di diagnosi e di terapia. In particolare, attraverso la simulazione diretta delle prove di estrusione in cella triassiale disponibili (integrate da prove triassiali di rottura sia consolidate, che non consolidate) si è giunti alla determinazione dei seguenti campi di variabilità per i principali parametri

geomeccanici:

- c_u = coesione non drenata = $0,15 \div 0,4$ Mpa (= $1,5 \div 4$ Kg/cm²)
- c' = coesione drenata = $0 \div 0,2$ MPa (= $0 \div 2$ Kg/cm²)
- ϕ_u = angolo d'attrito non drenato = $0^\circ \div 10^\circ$
- ϕ' = angolo d'attrito drenato = $18^\circ \div 24^\circ$
- E = modulo elastico di Young = $50 \div 500$ Mpa (= $500 \div 5.000$ Kg/cm²).

2.3.1.3 FASE DI DIAGNOSI PER LA GALLERIA "VASTO"

Sulla base delle conoscenze geologiche, geotecniche, geomeccaniche e idrogeologiche tratte con metodi teorici e sperimentali dalle indagini "in situ" ed in laboratorio eseguite sull'ammasso attraversato dalla galleria si sono fatte previsioni sul comportamento tenso-deformativo del fronte di scavo e del cavo in assenza di interventi di stabilizzazione, finalizzate alla suddivisione del tracciato da realizzare in sotterraneo in tratte a comportamento deformativo omogeneo, nell'ambito delle tre situazioni tenso-deformative fondamentali che si possono verificare.

Lo studio di diagnosi è quindi proseguito con l'analisi dei meccanismi di rottura e dei cinematici d'instabilità che si sarebbero prodotti in seguito all'evolvere dei fenomeni deformativi, per concludersi con la valutazione dell'estensione delle zone instabili e dell'entità dei carichi mobilitati, che non rientrano

Foto 3: Galleria Vasto: consolidamento del fronte d'avanzamento con tubi di vetroresina durante l'avanzamento a piena sezione (conforme ai principi dell'approccio A.DE.CO.-RS).



però nella presente trattazione.

2.3.1.4 VALUTAZIONE DEL COMPORTAMENTO TENSO-DEFORMATIVO

La valutazione del comportamento tenso-deformativo lungo il tracciato è stata condotta attraverso due diverse procedure (fig. 28) entrambe valide per bassi, medi ed elevati stati tensionali: la prima, più immediata, fa riferimento alla teoria delle linee caratteristiche (calcolate a seconda della situazione con metodi analitici o per via numerica), l'altra, più laboriosa, fa riferimento alle prove di estrusione in cella triassiale, a cui si è fatto cenno nel paragrafo relativo alla fase conoscitiva. Nel caso della galleria "Vasto"

entrambe le procedure di analisi hanno segnalato, ad esclusione di brevi tratti vicino agli imbocchi, un comportamento a fronte instabile, evidenziando importanti movimenti estrusivi e, di conseguenza, anche di pre-convergenza e convergenza (oltre 100 cm radiali). Si tratta di valori tali da produrre gravi manifestazioni d'instabilità, quali il crollo del fronte e di conseguenza il collasso della cavità.

2.3.1.5 FASE DI TERAPIA PER LA GALLERIA "VASTO"

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

Per quanto riguarda il tunnel ancora da scavare (compreso l'imbocco Sud attaccato in frana), considerate le caratteristiche dei terreni da attraversare ed il risultato dello studio di diagnosi, che evidenziava un comportamento a fronte instabile per tutta la lunghezza del tracciato sotterraneo (sollecitazioni in campo di rottura, effetto arco nullo, manifestazioni d'instabilità tipiche: crollo del fronte, collasso della cavità), si sceglieva di stabilizzare la galleria con azioni di precontenimento del cavo, intervenendo in maniera decisa a monte del fronte d'avanzamento per garantire la formazione di un effetto arco artificiale in anticipo sul fronte stesso.

In particolare, si decideva di avanzare a piena sezione previa adozione di interventi conservativi misti, che realizzano l'azione di precontenimento agendo

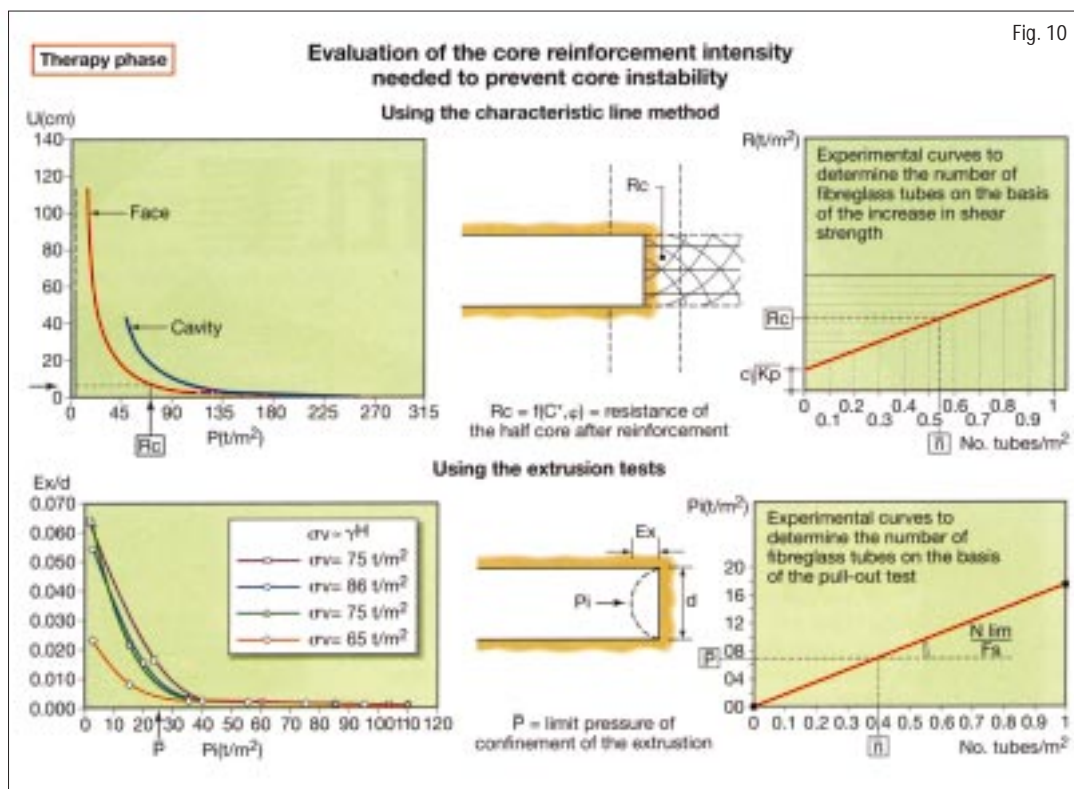


Fig. 10

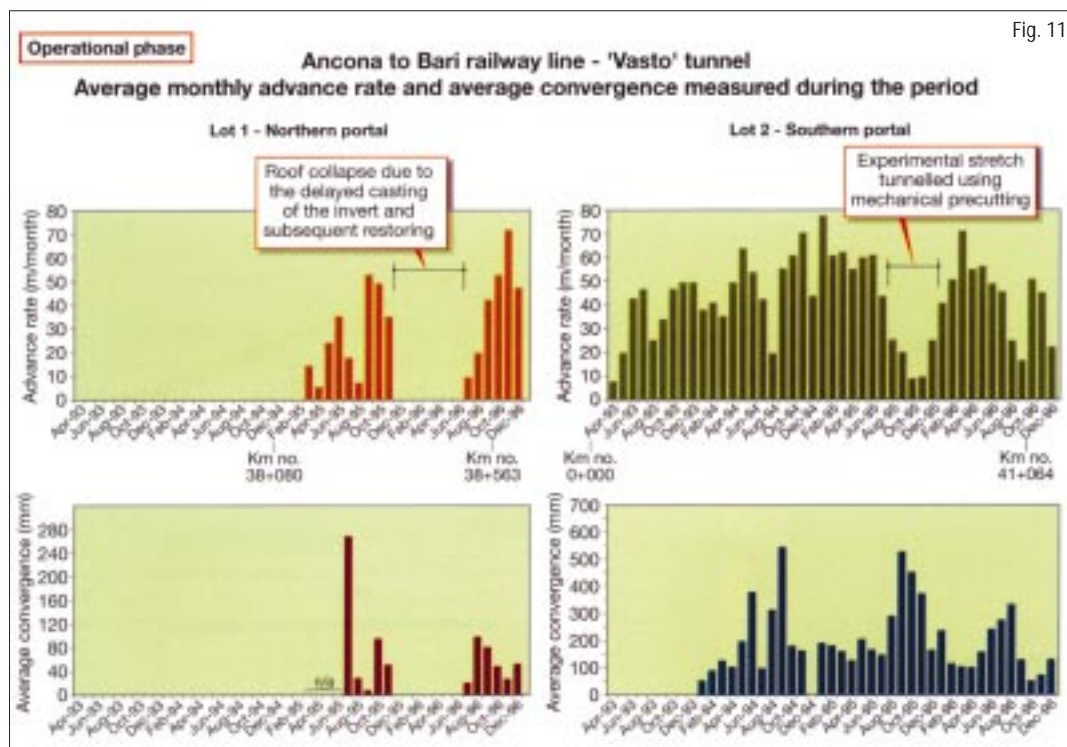


Fig. 11

sia al contorno del nucleo (azione protettiva) sia direttamente sullo stesso (azione consolidante).

Si sono quindi composte tre sezioni tipo (fig. 9), da adottare in alternativa a seconda del grado di omogeneità e di consistenza dei terreni incontrati durante i lavori di scavo.

Esse si differenziano esclusivamente per il tipo di trattamento (preconsolidamento-precontenimento) da eseguire in avanzamento al contorno del cavo, mentre è comune a tutte e tre il preconsolidamento del nucleo d'avanzamento.

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

Nei terreni granulari o poco coesivi, caratterizzati da debole resistenza al taglio, si è previsto l'impiego del sistema jet-grouting in orizzontale.

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

Nei terreni che presentano valori di resistenza al taglio e coesione non drenata tali da scongiurare l'applicazione di tale tecnologia è possibile ottenere una fascia di terreno consolidato in avanzamento al contorno del cavo e del nucleo mediante inie-

zioni di claquage realizzate attraverso tubi di vetroresina appositamente equipaggiati.

Tutte e tre le sezioni tipo prevedono, a completamento, un intervento di contenimento di prima fase a valle del fronte di scavo costituito da centine e spritz-beton, chiuso con l'arco rovescio, e, successivamente, l'esecuzione del rivestimento di seconda fase in calcestruzzo.

Individuate le sezioni tipo, si è proceduto al dimensionamento dell'intervento di preconsolidamento del nucleo d'avanzamento mediante tubi di vetroresina, che prevede la determinazione del numero di tubi da mettere in opera, della loro lunghezza e della geometria secondo cui disporli al fronte.

In analogia al tipo di approccio adottato in fase di diagnosi per la previsione del comportamento del cavo, il dimensionamento del numero di tubi di vetroresina è stato condotto con due diverse procedure (fig. 10).

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

La seconda procedura di dimensionamento dell'intervento di preconsolidamento del nucleo si basa, invece, sull'interpretazione delle curve di estrusione ricavate dalle prove in cella triassiale: individuata sulla curva la pressione di contenimento minima P_i necessaria per la sta-

bilizzazione del fronte (definita come pressione di confine tra il braccio "elastico" e quello "elastoplastico" della curva di estrusione), si valuta sui diagrammi sperimentali, del tipo di quello riportato nella stessa figura, il numero di tubi da mettere in opera per garantire, con il coefficiente di sicurezza desiderato, la stabilità del fronte.

Entrambi gli approcci (prove di estrusione e linee caratteristiche) hanno fornito risultati tra loro confrontabili, a conferma dell'analogia concettuale che li lega.

2.3.1.6 FASE OPERATIVA PER LA GALLERIA "VASTO"

La ripresa dei lavori è avvenuta, nel 1992, quasi contemporaneamente sui due imbocchi: all'imbocco Nord, per ripristinare la tratta di galleria collassata, all'imbocco Sud, per iniziare l'attacco della galleria naturale. La produzione media, lavorando 7 giorni/settimana è stata di circa 50 m/mese di galleria finita (foto 3).

In figura 11 abbiamo messo a confronto i diagrammi delle produzioni medie mensili con quelli delle convergenze misurate nel periodo. È particolarmente significativa la netta tendenza dei valori delle seconde a seguire in proporzione inversa l'andamento delle prime, a conferma del fatto che meno tempo si lascia al nucleo per deformarsi, più si limita l'innescare dei fenomeni di estrusione e preconvergenza, dai quali dipende il fenomeno di con-

vergenza che risulta, di conseguenza, più contenuta.

2.3.1.7 FASE DI VERIFICA IN CORSO D'OPERA PER LA GALLERIA "VASTO"

Contemporaneamente alla ripresa dei lavori di scavo ha avuto inizio la fase di verifica, che prevede la lettura della risposta deformativa del mezzo allo scavo ai fini di un'adeguata ottimizzazione e taratura degli interventi di stabilizzazione della galleria.

Oltre alle misure di convergenza o di pressione normalmente condotte, nella galleria "Vasto" si sono operate anche misure sistematiche e contemporanee di estrusione e convergenza, che costituiscono una novità di particolare interesse anche per i risultati che hanno sino ad oggi fornito.

I risultati di queste misurazioni sono mostrati sinteticamente nei diagrammi riportati in fig. 12, che evidenziano simultaneamente l'andamento delle estrusioni e delle convergenze all'interno di un ciclo completo di lavorazioni.

Dall'analisi dei diagrammi, si nota come, a seguito dell'avanzamento del fronte, al progressivo ridursi, cioè, della profondità del nucleo consolidato dai 15 m iniziali a soli 5 m (con conseguente riduzione anche della sua rigidezza media) si sviluppi una risposta deformativa del nucleo stesso (estrusione) e della cavità a valle del fronte (convergenza), progressivamente più spostata da un andamento di tipo elastico ad uno di tipo elastoplastico. In particolare le curve di convergenza, da un andamento iniziale tipico di una situazione che evolve rapidamente verso la stabilità (con valori massimi dell'ordine di 10 cm, che si producono in seguito a movimenti estrusivi massimi inferiori a 2,5 cm), assumono gradatamente andamenti che evidenziano una crescente difficoltà dei fenomeni deformativi ad esaurirsi. Ad esempio, quando la lunghezza del nucleo consolidato scende a soli 5 m, si sviluppano estrusioni dell'ordine di 10 cm, che danno luogo a convergenze quaduplicate rispetto a quelle rilevate all'inizio del ciclo di lavorazione.

La lettura combinata di estrusione e convergenza del cavo diventa allora, in questa ottica, un segnale importantissimo per il progettista, al fine di stabilire il momento in cui è necessario arrestare l'avanzamento per eseguire un nuovo consolidamento

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

2.3.2 RISULTATI DELLA TERZA FASE DI RICERCA

Lo studio e le sperimentazioni condotte nella galleria Vasto hanno permesso di evidenziare, da un lato, l'esistenza di uno stretto legame tra i fenomeni deformativi che avvengono all'interno del nucleo d'avanzamento della galleria (estrusioni) e quelli che si sviluppano successivamente al contorno del cavo, a valle del fronte di scavo (convergenze), dall'altro lato (fig. 13, risultato della terza fase di ricerca), che i fenomeni deformativi del cavo possono essere controllati e sensibilmente ridotti regolando artificialmente la deformabilità del nucleo d'avanzamento, quindi la sua rigidità (contenimento delle estrusioni). Questo è possibile operando adatti interventi di stabilizzazione dimensionati e distribuiti tra il nucleo al fronte ed il cavo, in funzione delle caratteristiche di resistenza e deformabilità del mezzo in rapporto alla situazione tensionale contingente.

Con riferimento a ciò, nel caso di mezzo sollecitato in campo elastoplastico:

- se lo stato tensionale rapportato alle caratteristiche del mezzo è ridotto, può darsi sia sufficiente agire soltanto sul cavo con interventi radiali evitando qualsiasi intervento di tipo longitudinale sul nucleo d'avanzamento;
- se lo stato tensionale è elevato occorrerà, al contrario, agire soprattutto su detto nucleo consolidandolo con interventi longitudinali, evitando totalmente quelli radiali a valle del fronte.

Nel caso di mezzo sollecitato in campo di rottura, diventa imperativo irrigidire il nucleo d'avanzamento con azioni di precontenimento del cavo, che potranno venir integrate con opportune azioni di contenimento a valle del fronte di scavo. Al riguardo, le esperienze fatte (e quelle descritte ai punti precedenti sono particolarmente significative) consigliano di:

- lavorare in avanzamento sulla forma e sul volume del nucleo, attraverso la realizzazione di una coronella protettiva di terreno consolidato al contorno dello stesso. In particolare, durante la realizzazione della gal-

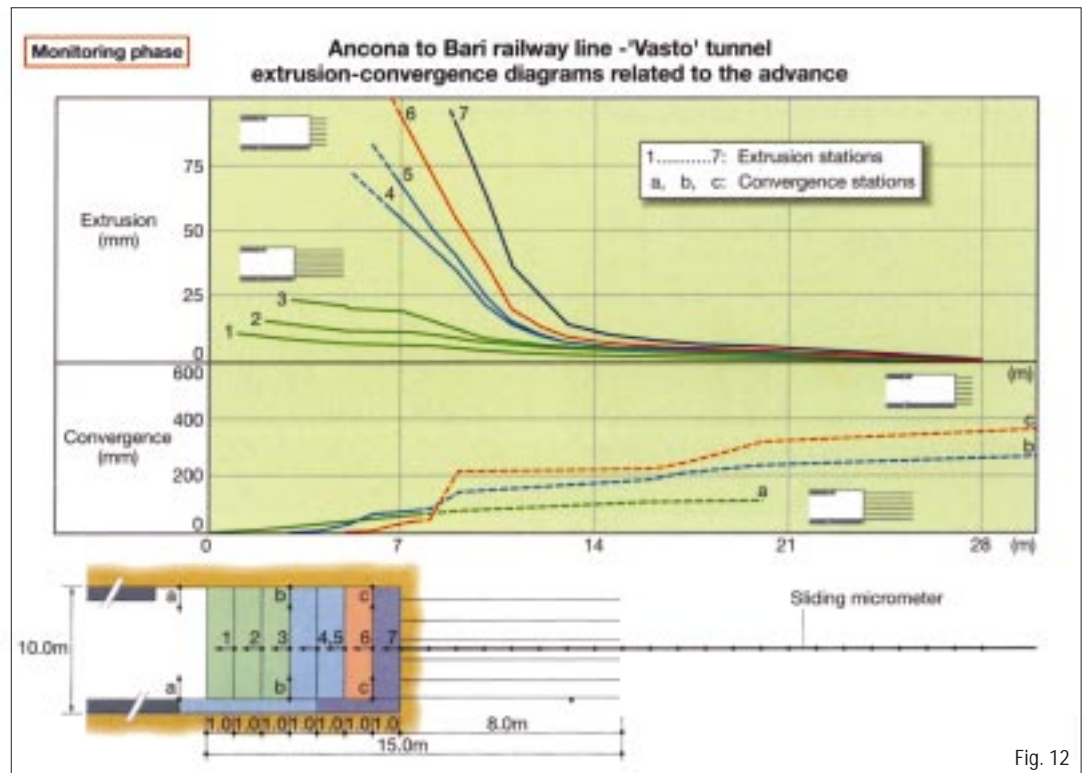


Fig. 12

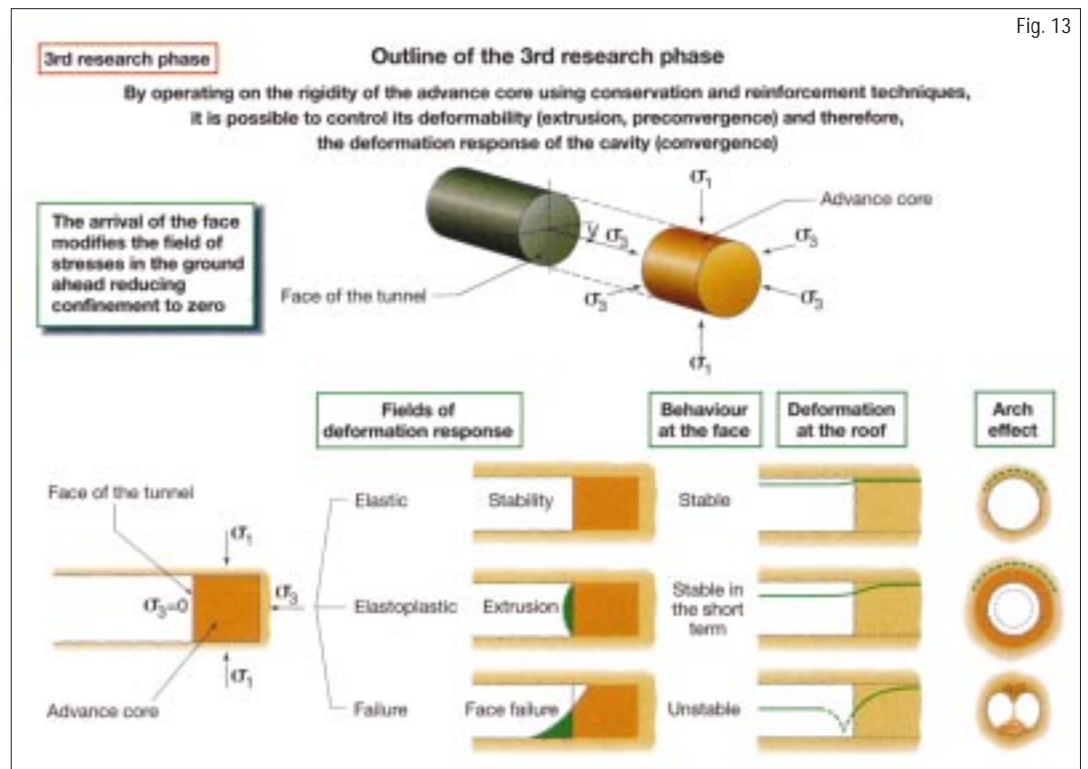


Fig. 13

leria Vasto, si è visto come, per superare tratte particolarmente difficili, sia stato efficace operare in tal senso.

Se ciò non risultasse sufficiente occorre:

- eseguire ulteriori interventi radiali di consolidamento al contorno della cavità, dimensionati per assorbire le convergenze residue che il nucleo, pur irrigidito, da solo non è in grado d'impedire.

In quest'ultimo caso, il bilanciamento degli interventi tra il

nucleo ed il cavo, stabilito in sede di progetto, potrà venir messo a punto in corso d'opera.

2.4 IL NUCLEO D'AVANZAMENTO COME STRUMENTO DI STABILIZZAZIONE

I risultati conseguenti alla ricerca, in estrema sintesi, si possono così riassumere:

- nella "prima fase di ricerca" si sono identificate tre tipologie fondamentali di deformazione (estrusione del fronte, pre-convergenza e convergenza) e le manifestazioni d'instabilità ad

esse conseguenti (distacchi gravitativi, splaccaggi, crollo del fronte e collasso della cavità);

- nella "seconda fase di ricerca" si sono ottenute le conferme sperimentali che tutti i fenomeni deformativi (estrusione del fronte, preconvergenza e convergenza) e le manifestazioni d'instabilità visibili dall'interno del cavo e ad essi conseguenti (distacchi gravitativi, splaccaggi, crollo del fronte, collasso della cavità) dipendono direttamente o indirettamente dalla rigidezza

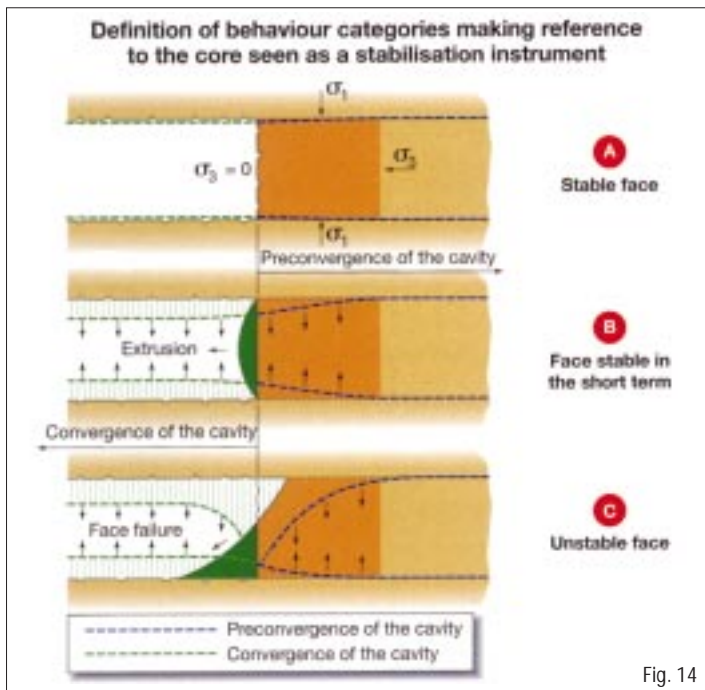


Fig. 14

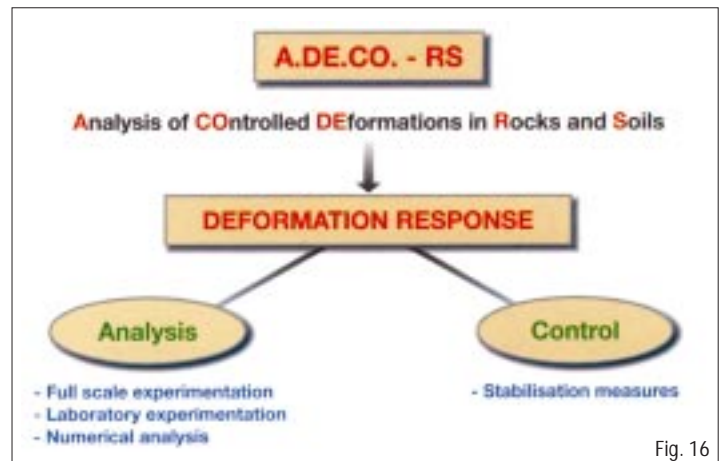


Fig. 16

del nucleo d'avanzamento;

- nella "terza fase di ricerca" si è sperimentato come sia possibile, utilizzare il nucleo al fronte come strumento di stabilizzazione, agendo artificialmente sulla rigidità del nucleo stesso, per regimare i fenomeni deformativi del cavo.

I risultati conseguiti nella ricerca, d'altra parte:

- confermano che la risposta deformativa del mezzo all'azione dello scavo deve essere il riferimento principale per il progettista di gallerie, anche perché essa

è indice dell'insnesco e della posizione dell'effetto arco rispetto al profilo di scavo, ovvero della condizione di stabilità raggiunta dalla galleria;

- evidenziano che la risposta deformativa nasce a monte del fronte in corrispondenza al nucleo d'avanzamento ed evolve a valle dello stesso lungo la cavità e che essa non è solo convergenza, ma è composta da estrusione, preconvergenza e convergenza. La convergenza è solo l'ultimo stadio di un processo tenso-deformativo assai complesso;

- indicano chiaramente l'esistenza di un legame diretto tra la risposta deformativa del sistema fronte di scavo - nucleo d'avanzamento e quella della cavità, nel senso che quest'ultima è diretta conseguenza della prima, sottolineando l'importanza di tenere sotto controllo la risposta deformativa del sistema fronte di scavo-nucleo d'avanzamento e di non limitarsi al solo controllo della cavità;
- dimostrano che operando sulla rigidità del nucleo d'avanzamento con interventi protettivi e di rinforzo è possibile controllare la sua deformabilità (estrusione, preconvergenza), controllando di conseguenza anche la risposta deformativa della cavità (convergenza).

I risultati della ricerca, in definitiva, permettono di guardare al nucleo d'avanzamento come a un nuovo strumento di stabilizzazione

a breve ed a lungo termine per la cavità: uno strumento la cui resistenza e deformabilità giocano un ruolo determinante, in quanto in grado di condizionare l'aspetto che più di tutto deve preoccupare il progettista di gallerie e cioè: **il comportamento del cavo all'arrivo del fronte d'avanzamento.**

3. IL NUCLEO D'AVANZAMENTO COME RIFERIMENTO PER UNA NORMALIZZAZIONE DELLE GALLERIE

Se il nucleo d'avanzamento è un efficace strumento di stabilizzazione a breve ed a lungo termine per la cavità, in grado di condizionare il comportamento del cavo all'arrivo del fronte di scavo, si può affermare che il progettista di gallerie, per essere in grado di approntare un progetto adeguato a garantire la stabilità a breve ed a lungo termine dell'opera, deve puntare tutta la propria attenzione sui fenomeni tenso-deformativi del sistema fronte di scavo - nucleo d'avanzamento, ovvero sulle sue condizioni di stabilità.

Ne consegue che il comportamento del sistema fronte di scavo - nucleo d'avanzamento può venir assunto come riferimento per una normalizzazione delle gallerie, con il vantaggio di essere un parametro che conserva la propria validità in tutti i tipi di terreno ed in tutte le situazioni statiche.

In questa ottica, le tre fondamentali situazioni tenso-deformative del sistema fronte di scavo - nucleo d'avanzamento, già descritte nel paragrafo 1 (si confronta anche la *fig. 13*) individuano anche i tre possibili tipi di comportamento della cavità (*fig. 14*):

- comportamento a fronte stabile (categoria di comportamento A);
- comportamento a fronte stabile a breve termine (categoria

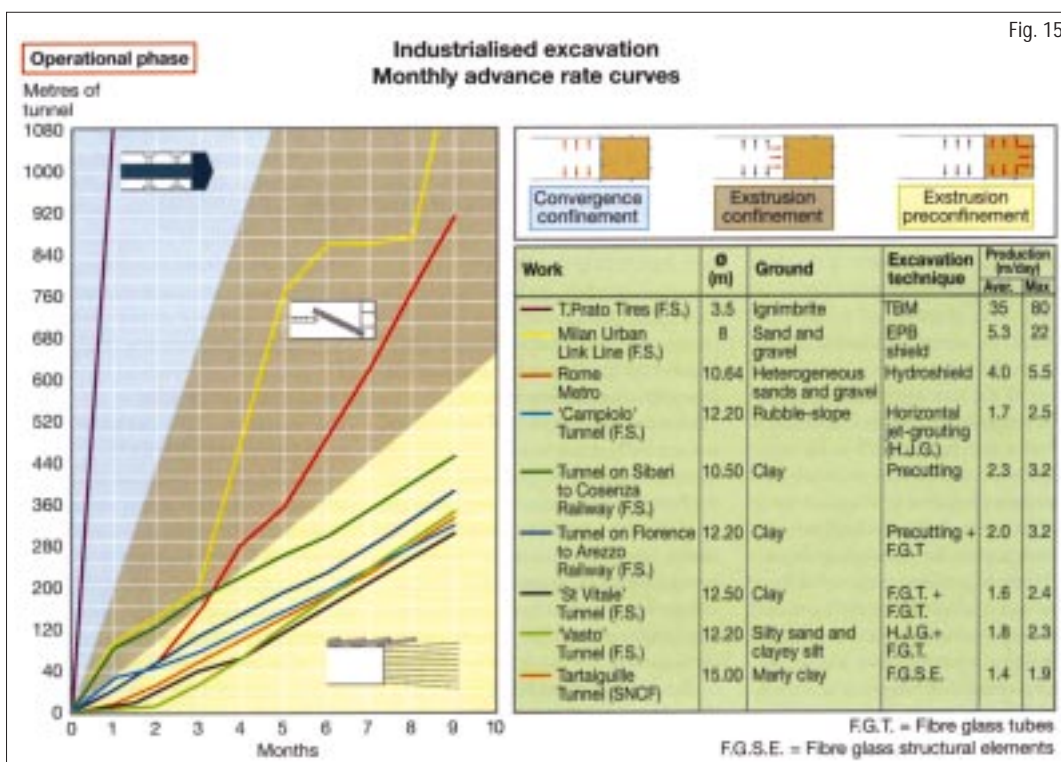


Fig. 15

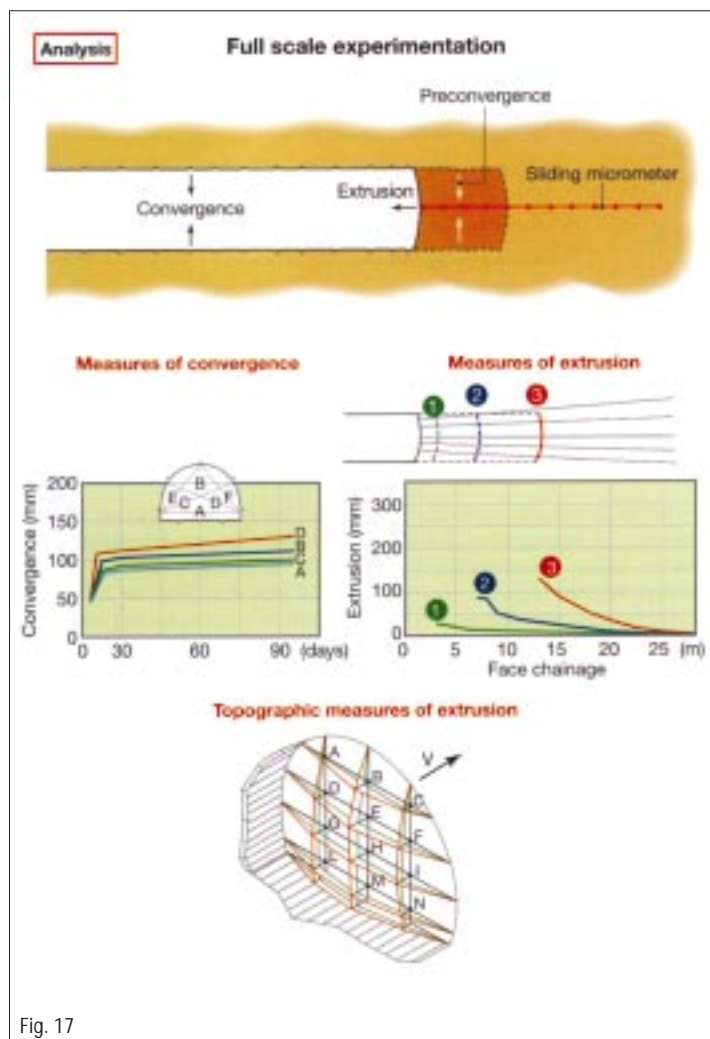


Fig. 17

di comportamento B);

- comportamento a fronte instabile (categoria di comportamento C).

Nella situazione a fronte stabile la stabilità globale della galleria è praticamente garantita anche in assenza di interventi di stabilizzazione. Nelle situazioni B) e C) i risultati della ricerca indicano che per evitare i fenomeni d'instabilità del fronte e quindi del cavo, e cercare di riportarsi verso una condizione a fronte stabile (A), occorre operare con interventi di precontenimento opportunamente bilanciati tra fronte e cavo e d'intensità adeguata alla situazione tensionale reale rapportata alle caratteristiche di resistenza e deformabilità del mezzo.

L'applicazione di questi concetti alla pratica progettuale e costruttiva ha permesso allo scrivente di cogliere numerosi significativi successi. In *fig. 15* sono riuniti i diagrammi delle produzioni ottenute durante lo scavo di gallerie progettate e realizzate in Italia e in Francia negli ultimi dieci anni, nelle più diverse situazioni geologiche e sotto i più svariati stati tensionali [2]. Ri-

salta evidente non solo l'elevata velocità media d'avanzamento mantenuta in relazione al tipo di terreni attraversati, ma soprattutto la linearità delle produzioni, indice di una costruzione di tipo industriale, avvenuta con cadenze regolari e senza intoppi.

È apparso, a questo punto, necessario e urgente portare alle estreme conseguenze le straordinarie cognizioni acquisite e sviluppare un approccio progettuale e costruttivo più aderente alla realtà, rispetto a quelli comunemente in uso.

Per raggiungere lo scopo, sul solco già tracciato dalla ricerca e a suo completamento, si è dovuto attuare un ulteriore programma di studi, sia sperimentali sia teorici, durante i quali il comportamento tenso-deformativo del nucleo d'avanzamento, correlato sistematicamente a quello della cavità, è stato studiato in termini di stabilità e di deformazione sia in assenza sia in presenza di interventi protettivi e di rinforzo.

Nell'ambito e a coronamento di questi studi è nato l'approccio A.DE.CO.-RS (acronimo di Ana-

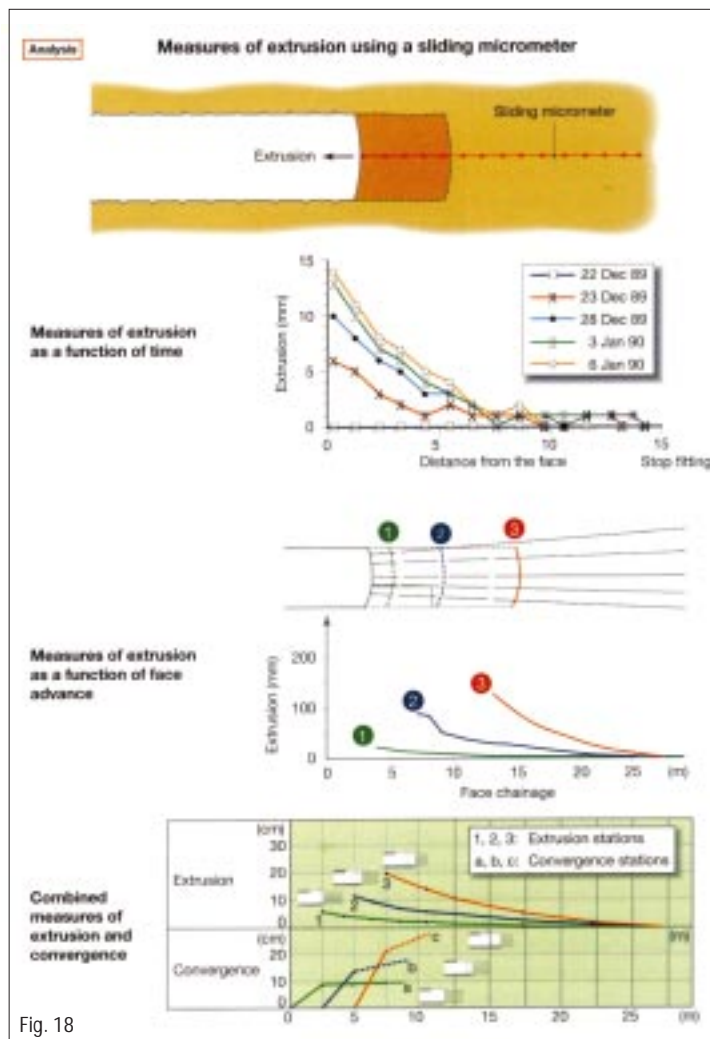


Fig. 18

lisi delle Deformazioni Controllate nelle Rocce e nei Suoli) (*fig. 16*), il quale, osservando:

- che i fenomeni che accompagnano lo scavo di una galleria possono essere ricondotti a un processo di causa-effetto (azione-reazione);
- che normalmente in questo tipo di processi per essere in grado di controllare efficacemente l'effetto occorre prima identificare completamente la causa;
- che l'identificazione completa della causa non può che passare obbligatoriamente attraverso un'analisi approfondita dell'effetto;

pone l'attenzione su quest'ultimo (risposta deformativa dell'ammasso) sia a monte sia a valle del fronte di scavo e analizzando, dapprima, la genesi e l'evoluzione attraverso una sperimentazione in grande e in piccola scala e gli strumenti del calcolo numerico focalizzata sul comportamento del nucleo d'avanzamento, ne identifica la causa nella deformabilità del terreno a monte del fronte di scavo.

Controllando poi, con adeguate strumenti di stabilizzazione, la deformabilità del terreno a mon-

te del fronte di scavo (nucleo d'avanzamento), riscontra che è possibile controllare in tal modo anche la risposta deformativa dell'ammasso, a conferma incontrovertibile che essa è la vera causa del processo in esame.

4. L'ANALISI DELLA RISPOSTA DEFORMATIVA SECONDO L'APPROCCIO L'A.DE.CO.-RS

Il comportamento tenso-deformativo del nucleo d'avanzamento, correlato sistematicamente a quello della cavità, è stato studiato in termini di stabilità e di deformazione sia in assenza sia in presenza di interventi protettivi e di rinforzo, attraverso una serie di controlli e misure sperimentali sia in situ sia in laboratorio.

4.1 LA SPERIMENTAZIONE IN SCALA REALE

Il comportamento del nucleo d'avanzamento **in termini di stabilità**, è stato analizzato seguendo un approccio di tipo osservazionale, che ha permesso di classificare più di mille fronti di scavo sintetizzandone i dati salienti in schede tipo opportunamente predisposte.

In termini di deformazione, invece, lo stesso è stato studiato attraverso la realizzazione sistematica di (fig. 17):

- misure d'estrusione, ottenute attrezzando il nucleo d'avanzamento con un estrusometro orizzontale (tipo *sliding micrometer*) di lunghezza pari a $2 \div 3$ diametri di scavo. Queste forniscono, in termini assoluti, la deformazione longitudinale subita dal terreno costituente il nucleo d'avanzamento sia in funzione del tempo (fase statica, a fronte fermo), sia in funzione dell'avanzamento (fase dinamica) (fig. 18);

- rilievi topografici degli spostamenti assoluti del fronte di scavo, a mezzo di mire ottiche, eseguiti in occasione degli arresti dell'avanzamento;

- misure di preconvergenza a partire dalla superficie, ogniqualvolta la morfologia del terreno e l'entità della copertura in gioco lo consentivano, attraverso la messa in opera di estensimetri multibase, inseriti verticalmente nel terreno in congruo anticipo sul passaggio del fronte, in corrispondenza alla chiave e alle reni della galleria in costruzione [3].

Queste misure, naturalmente, venivano sempre accompagnate da quelle di tipo tradizionale, quali: misure di convergenza e misure di tensione nei rivestimenti.

La sperimentazione in scala reale ha consentito:

- di confermare, attraverso la costruzione di speciali diagrammi estrusione-convergenza (fig. 18), l'esistenza, da un lato, di una stretta correlazione tra l'entità dell'estrusione concessa al nucleo d'avanzamento e l'entità delle convergenze che si manifestano dopo il passaggio del fronte e, dall'altro lato, come queste diminuiscano all'aumentare della rigidità del nucleo stesso;

- di stabilire che il nucleo d'avanzamento estrude, attraverso la parete del fronte (superficie d'estrusione), secondo tre tipologie deformative fondamentali (cilindrica, a calotta sferica, combinata), in funzione del materiale in gioco e dello stato tensionale che lo sollecita;

- di valutare in termini assoluti, attraverso semplici calcoli volumetrici riportabili in abachi di semplice impiego, la preconvergenza, anche quando non è possibile misurarla direttamente dalla superficie (fig. 19);

- di verificare come, all'aumentare dell'importanza dell'azione di precontenimento del cavo e alla conseguente riduzione della fascia di terreno plasticizzato al contorno della galleria, faccia seguito un proporzionale minor carico sui rivestimenti di prima fase e definitivi.

4.2 LA SPERIMENTAZIONE IN SCALA RIDOTTA

Poiché le prove di estrusione già conosciute, realizzate da

Broms e Bennermark nel 1967, studiavano detto fenomeno in soli termini di soglia tensionale d'innescò, per poterlo analizzare anche in termini di evoluzione deformativa, si sono messe a punto due prove di nuova concezione (fig. 20):

- la prova di estrusione in cella triassiale;
- la prova di estrusione in centrifuga.

Nella prova di estrusione in cella triassiale il campione di terreno viene inserito nella cella ricostituendo lo stato tensionale originario σ_0 dell'ammasso. Grazie alla pressione di un fluido, la tensione σ_0 viene riprodotta anche all'interno di un particolare volume cilindrico, denominato "camera d'estrusione", ricavato prima della prova all'interno del campione e coassiale ad esso, che simula la situazione della galleria nella zona del fronte di scavo.

Mantenendo lo stato tensionale al contorno del campione e riducendo progressivamente la pressione P_i del fluido all'interno della camera d'estrusione, si simula in maniera realistica il graduale detensionamento prodotto nel mezzo in corrispondenza di una certa sezione all'avvicinarsi del fronte di scavo e si ottiene una valutazione dell'entità del fenomeno estrusivo al fronte stesso in funzione del tempo o anche in funzione del decremento di pressione interna di contenimento P_i ottenendo delle

curve simili a quelle riportate in figura 20, immediatamente impieghi in fase di progettazione per la valutazione della pressione di precontenimento del cavo necessaria per garantire una certa rigidità del nucleo e per ottenere, di conseguenza, il controllo delle preconvergenze voluto.

Dall'analisi dei risultati forniti dalle numerose prove di estrusione condotte in cella triassiale si possono formulare alcune considerazioni:

1. date le modeste dimensioni del campione, dette prove sono riferibili principalmente alla matrice dell'ammasso, che dev'essere prevalentemente argillosa;

2. eventuali disomogeneità del terreno (scistosità, scagliosità, ecc.) sono compatibili con la prova solo se di dimensioni trascurabili in rapporto a quelle del campione;

3. i risultati della prova sono tanto più rapportabili alla scala reale quanto più le caratteristiche dell'ammasso sono omogenee.

Le prove di estrusione in centrifuga sono state messe a punto e realizzate per quei casi in cui l'effetto della gravità influisce in maniera significativa sul fenomeno estrusivo. La loro complessità e il loro costo elevato ne limitano l'impiego a pochi specifici casi.

Il campione di terreno, una volta inseriti gli opportuni marcatori e trasduttori di misura delle deformazioni e delle pressioni interstiziali, viene posto in un'apposita scatola provvista di una parete trasparente. Dopo aver ricavato in esso il vano galleria, vi s'inserisce un tubo d'acciaio che rappresenta, in prima approssimazione, il priverivestimento, il rivestimento e l'arco rovescio. La cella così ottenuta viene riempita con un fluido opportunamente mantenuto in pressione. In centrifuga viene quindi ricreata la pressione geostatica naturale, raggiunta la quale si opera la riduzione della pressione in cella per simulare l'abbattimento del terreno al fronte.

I risultati che si sono ottenuti (in figura 20 sono riportati quelli relativi a una prova di estrusione in centrifuga eseguita su un campione di terreno ricostituito) mostrano che l'estrusione del fronte si manifesta rapidamente nel transitorio di scarico, con velocità crescente al progredire del rilassamento del nucleo. Nel-

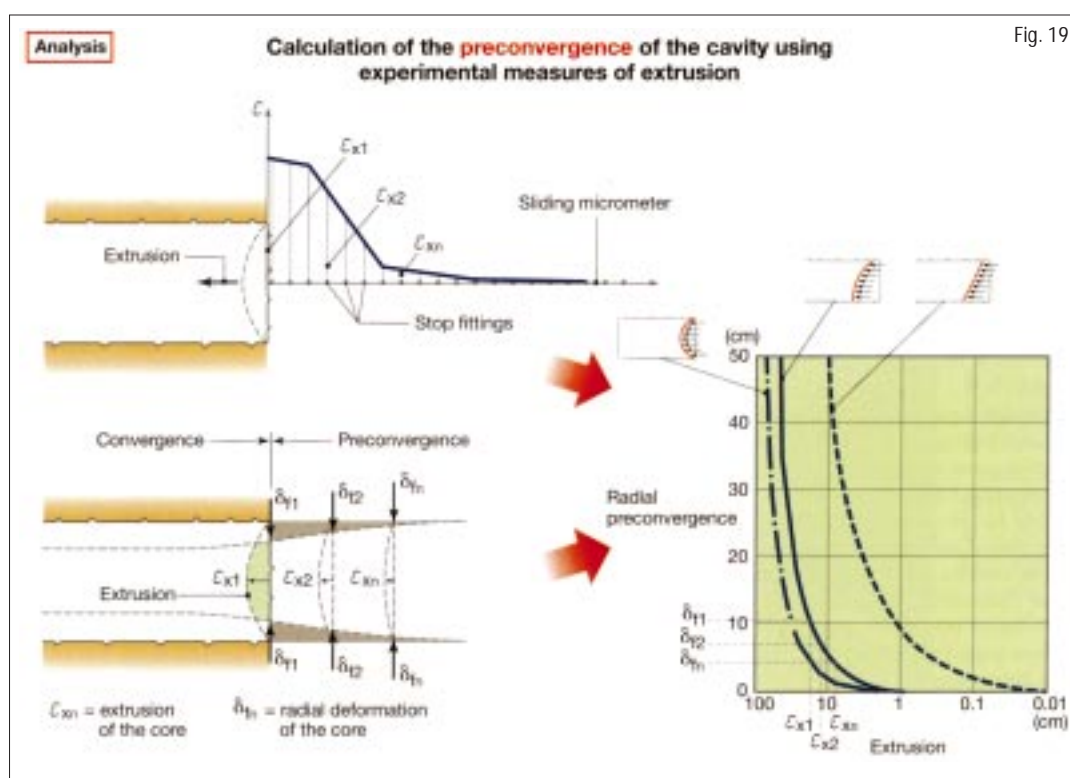


Fig. 19

la figura si sono distinte, per ciascun passo di scarico, la componente istantanea della deformazione estrusiva e quella viscosa. Si nota facilmente come quest'ultima, a fine prova, risulti essere pari al 50% dell'estrusione totale.

La sperimentazione in scala ridotta, attraverso la riproduzione in laboratorio del fenomeno estrusivo del nucleo d'avanzamento, è stata fondamentale, insieme ai risultati delle misure in scala reale, per la corretta taratura, in termini di parametri geomeccanici di resistenza e deformabilità (c , ϕ , E), dei modelli numerici utilizzati per la parte teorica dello studio sul controllo della risposta deformativa.

4.3 LE ANALISI NUMERICHE

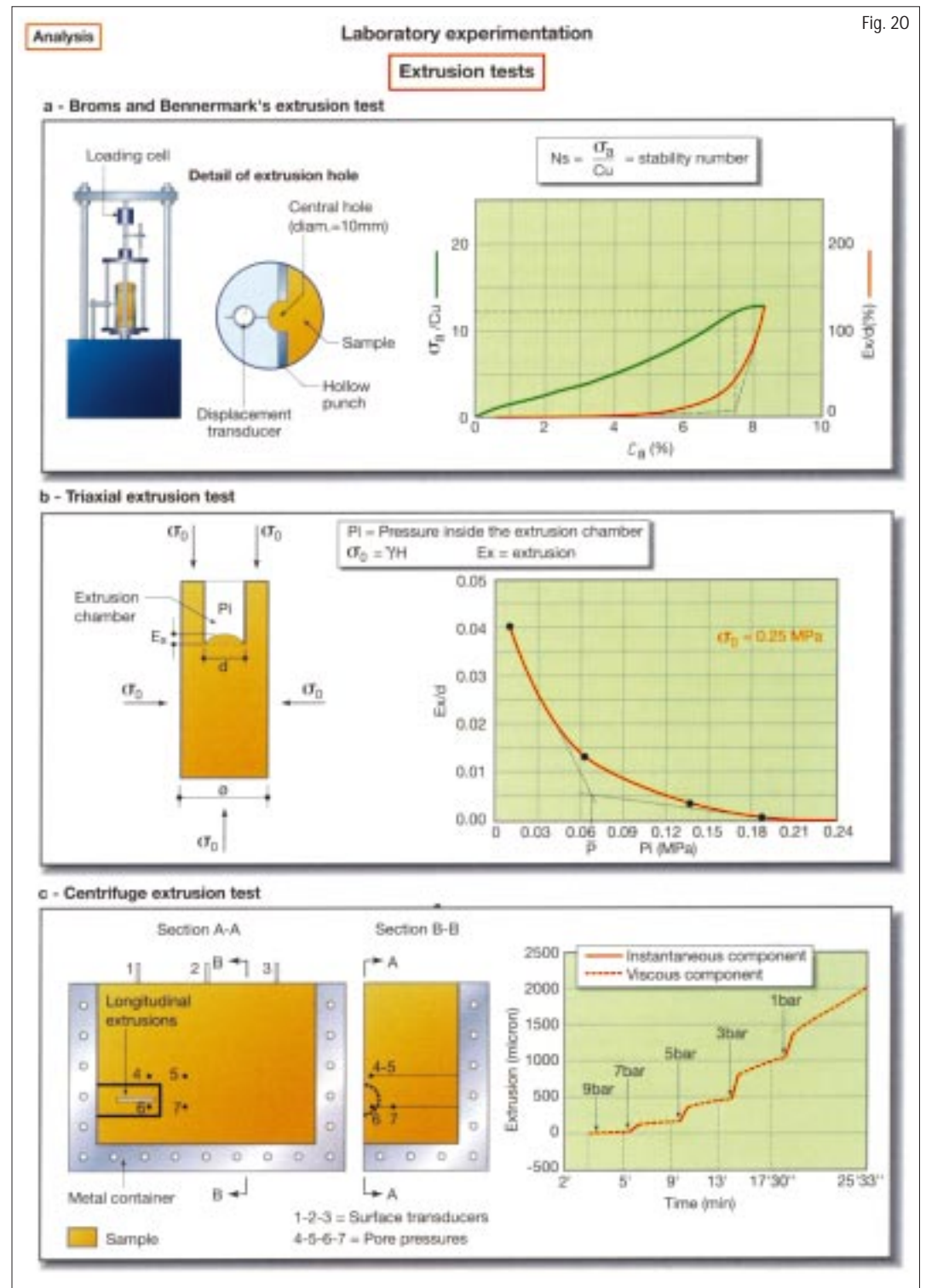
La complessità dei meccanismi che s'instaurano a monte del fronte di scavo e l'iniziale difficoltà a individuare criteri di valutazione oggettivi del comportamento tenso-deformativo del nucleo d'avanzamento comportavano la necessità, al di là dell'intuizione e dei riscontri sperimentali, di produrre uno sforzo d'interpretazione organico e unitario dei numerosi aspetti indagati, volto a dar loro un inquadramento teorico generale capace di superare i limiti delle teorie correnti.

A questo scopo, l'analisi della risposta deformativa si è proseguita per via teorica percorrendo tre diversi tipi d'approccio:

- si è cercato, inizialmente, di avvalerci delle teorie di calcolo analitico esistenti, eventualmente aggiornandole;
- quindi si è cercato di risolvere i problemi attraverso l'impiego di modelli numerici assialsimmetrici, agli elementi finiti o alle differenze finite;
- infine, si è ricorsi alla modellazione numerica tridimensionale.

4.3.1 STUDI MEDIANTE APPROCCI ANALITICI

Per cominciare, si è cercato di risolvere il problema attraverso l'aggiornamento degli approcci di calcolo analitici esistenti. In particolare, si è cercato di introdurre il concetto di nucleo e di consolidamento dello stesso in alcune delle formulazioni classiche utilizzate per il dimensionamento delle gallerie: e cioè ad esempio in quella del Metodo Convergenza-Contenimento [4] e in quella del Metodo delle Linee Caratteristiche [5], l'unica,



questa, in cui il concetto di nucleo appare esplicitamente. Entrambe le formulazioni hanno consentito di simulare gli effetti del consolidamento del nucleo e di riprodurre alcune delle osservazioni sperimentali, in particolare: la conseguente riduzione del raggio di plasticizzazione R_p e delle deformazioni nella zona del fronte di scavo. I due metodi, però, a causa del disaccoppiamento nel calcolo tra la situazione tenso-deformativa al fronte e quella lontano da esso, non possono conservar me-

morìa, nelle formulazioni valide per la zona della cavità lontano dal fronte, degli effetti di quanto operato a monte di questo; di conseguenza non sono in grado d'interpretare e rappresentare correttamente i fenomeni nel loro complesso [6]. Ci si riferisce, in particolare, al decremento del raggio di plasticizzazione R_p e alla conseguente riduzione delle deformazioni della cavità (convergenze) e dei carichi agenti sui rivestimenti di 1° fase e definitivi, fenomeni questi che non riescono

a trovare riscontro nei risultati ottenuti attraverso le due formulazioni analitiche considerate e che invece sono stati sistematicamente evidenziati dalle misure sperimentali [6]. Si è dovuto concludere, perciò, che questi approcci, pur potendo essere utilmente utilizzati in fase di diagnosi per definire il comportamento del materiale allo scavo in assenza di interventi di precontenimento del cavo, non lo sono altrettanto in fase di terapia, in presenza degli stessi, perché non consentono di preve-

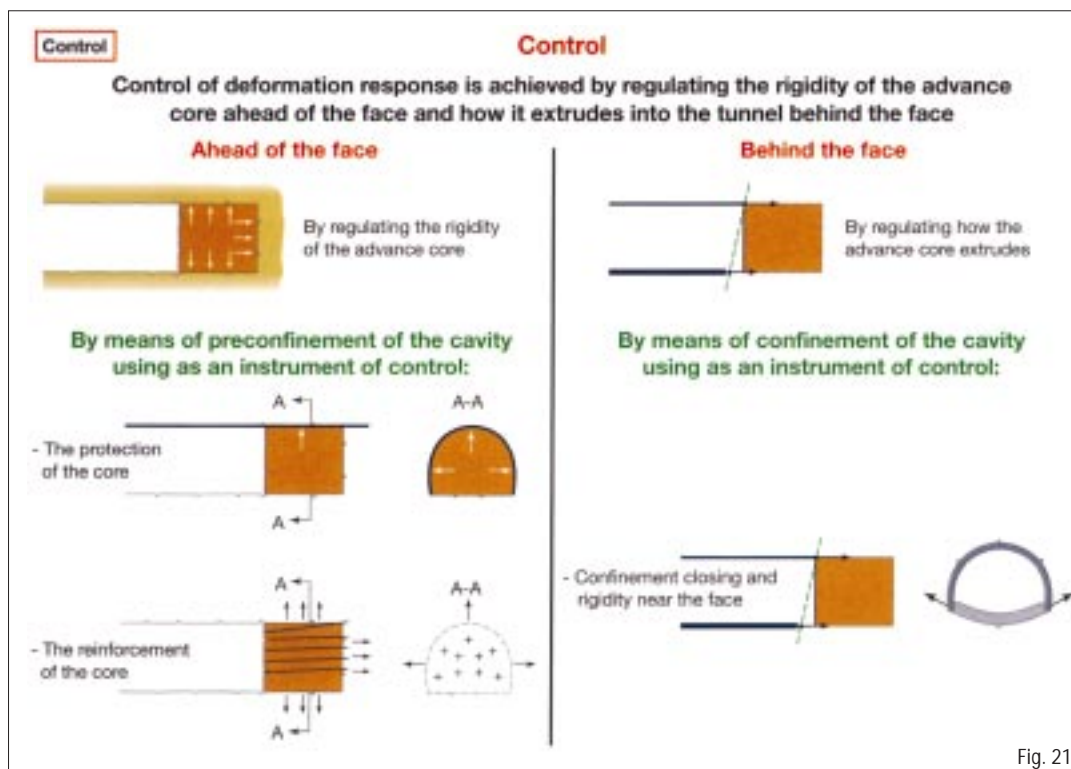


Fig. 21

dere con sufficiente precisione l'entità dei fenomeni deformativi della cavità, né di dimensionare correttamente gli interventi di rivestimento di 1° fase e definitivi.

Si è deciso pertanto di abbandonare questi tipi di approccio e di percorrere la strada dei modelli numerici (elementi finiti o differenze finite), che consentono di tener conto con continuità di tutta la storia tensionale e deformativa del mezzo al contorno dello scavo passando dalla zona a monte del fronte a quella a valle.

4.3.2 STUDI MEDIANTE APPROCCI NUMERICI SU MODELLI ASSIALSIMMETRICI

L'effetto del consolidamento del nucleo è stato indagato, quindi, attraverso modelli numerici agli elementi finiti e alle differenze finite. Si è iniziato con l'utilizzazione di modelli di tipo assialsimmetrico, di più facile gestione rispetto a quelli tridimensionali.

Benchè in questo modo non si potessero superare alcune limitazioni proprie anche dei succitati approcci analitici (cavo perfettamente circolare, condizioni di stato tensionale dell'ammasso uniformi al suo contorno, impossibilità di considerare l'applicazione di rivestimenti differenti dall'anello chiuso e quindi di simulare le reali fasi costruttive), l'utilizzazione di questi modelli ha tuttavia evidenziato come il consolidamento del nu-

cleo produca una differente distribuzione delle tensioni a monte del fronte e al contorno del cavo, permettendo finalmente di confermare anche attraverso il calcolo che, conseguentemente, si produce, sia a monte sia a valle del fronte, una riduzione dell'estensione della fascia di terreno a comportamento plastico e di tutti i fenomeni deformativi al contorno dello scavo (non solo dell'estrusione e della preconvergenza, ma anche della convergenza). Oltre a ciò, le analisi sui modelli numerici assialsimmetrici hanno evidenziato che non è possibile controllare i fenomeni di estrusione e preconvergenza limitandosi a variare la rigidità dei rivestimenti del cavo e/o la loro distanza di posa in opera dal fronte. In altre parole, hanno dimostrato che è impossibile recuperare quanto già avvenuto a monte del fronte con azioni di solo contenimento.

Alla discreta capacità mostrata dai modelli numerici assialsimmetrici di simulare gli scavi in galleria in presenza di consolidamento del nucleo d'avanzamento, fornendo risultati, in termini di sollecitazioni e di deformazioni nel terreno, in linea con le indicazioni della ricerca sperimentale, non è corrisposta però una pari capacità di previsione dei carichi agenti sui rivestimenti di 1° fase e definitivi, che, con questo tipo di modelli, sarebbero più o meno equivalenti a quelli che, a parità di altre condizioni, risultano in assenza di interven-

ti di consolidamento sul nucleo.

Questo contrasta, come già detto, con le osservazioni fatte durante la ricerca sperimentale, più volte confermate dalla pratica costruttiva, ed è riconducibile all'impossibilità di tener conto, con questo genere di modelli, degli effetti gravitativi prodotti dal terreno plasticizzato al contorno dello scavo e delle reali fasi costruttive delle opere di rivestimento di 1° fase e definitive.

4.3.3 STUDI MEDIANTE APPROCCI NUMERICI SU MODELLI 3D

Per superare le contraddizioni denunciate dai modelli numerici assialsimmetrici, è stato necessario ricorrere alla modellazione numerica tridimensionale. In questo modo, infatti, è possibile introdurre nel calcolo la reale geometria del cavo, che non è più semplicemente circolare come nel caso del Metodo Convergenza-Contenimento, delle Linee Caratteristiche e delle analisi assialsimmetriche (agli elementi finiti o alle differenze finite). È anche possibile considerare condizioni tensionali d'ammasso che non siano di tipo idrostatico e che tengano in debito conto i carichi di tipo gravitativo, e, inoltre, valutare gli effetti che le varie fasi costruttive hanno sulla statica del cavo, simulando la reale geometria delle strutture di rivestimento, la sequenza della loro messa in opera e la distanza dal fronte alla quale vengono realizzate. È

stato quindi possibile studiare attraverso il calcolo, lo vedremo in seguito, come varia la distribuzione dei movimenti estrusivi al fronte di scavo e i conseguenti diversi meccanismi di rottura, in funzione della distanza di posa dell'arco rovescio.

I risultati ottenuti attraverso i modelli 3D mostrano, in genere, un buon accordo con le osservazioni sperimentali, sia per quanto riguarda le deformazioni (estrusioni, preconvergenze e convergenze) sia per quanto riguarda le sollecitazioni sulle opere di rivestimento del cavo, che in presenza di consolidamento del nucleo d'avanzamento risultano più ridotte come evidenziato dalla ricerca sperimentale.

4.3.4 RISULTATI DELL'ANALISI SPERIMENTALE E TEORICA DELLA RISPOSTA DEFORMATIVA

L'analisi sperimentale e teorica della risposta deformativa attraverso il nucleo d'avanzamento, utilizzato come chiave di lettura per l'interpretazione dei fenomeni deformativi in galleria a breve e a lungo termine, ha permesso di individuare con certezza nella resistenza e deformabilità del nucleo d'avanzamento la vera causa di tutto il processo deformativo nel suo complesso (estrusione, preconvergenza e convergenza) e ha confermato al di là di qualsiasi ragionevole dubbio che, operando sulla rigidità del nucleo stesso con interventi protettivi e di rinforzo, è possibile controllare la sua deformabilità (estrusione, preconvergenza), controllando di conseguenza anche la risposta deformativa della cavità (convergenza) e l'entità dei carichi agenti a lungo termine sul rivestimento della galleria.

Allora, se la resistenza e la deformabilità del nucleo d'avanzamento rappresentano la vera causa della risposta deformativa dell'ammasso allo scavo, è possibile guardare al nucleo d'avanzamento come nuovo strumento di controllo della stessa: uno strumento la cui resistenza e deformabilità giocano un ruolo determinante per la stabilizzazione a breve e a lungo termine della cavità.

5. IL CONTROLLO DELLA RISPOSTA DEFORMATIVA SECONDO L'A.DE.CO.-RS

Sulla base di quanto emerso dalla ricerca sperimentale e numerica sulla risposta deformativa dell'ammasso, la vera causa dell'intero processo tenso-deformativo (estrusione, preconver-

genza e convergenza) che s'innescia all'atto dello scavo di una galleria è dunque la deformabilità del nucleo d'avanzamento. Ne consegue che per risolvere qualsiasi situazione tenso-deformativa, ma soprattutto quelle difficili, occorre agire innanzitutto sul nucleo regolandone opportunamente la rigidezza. In termini di forze ciò significa che occorre agire con azioni di precontenimento del cavo e non di solo contenimento, intendendo per precontenimento qualsiasi azione attiva che favorisca la formazione di effetti arco nel terreno a monte del fronte di scavo.

Ne consegue che il completo controllo della risposta deformativa dell'ammasso deve avvenire necessariamente (fig. 21):

1. a monte del fronte di scavo, regolando la rigidezza del nucleo d'avanzamento con adatti interventi di precontenimento del cavo;

2. a valle del fronte di scavo, regolando la maniera d'estrudere del nucleo stesso con interventi di contenimento del cavo capaci di realizzare un confinamento continuo della cavità attivo già in prossimità del fronte.

5.1 IL CONTROLLO A MONTE DEL FRONTE DI SCAVO

Per regolare la rigidezza del nucleo d'avanzamento e creare il tal modo le giuste premesse per il completo controllo della risposta deformativa dell'ammasso e quindi, in definitiva, per la completa stabilizzazione a breve e a lungo termine della galleria, l'approccio A.DE.CO.-RS, come vedremo, propone numerosi tipi d'intervento, ampiamente illustrati in numerosi articoli, alcuni dei quali riportati in bibliografia [7].

Tutti questi tipi d'intervento si possono inquadrare in due sole categorie (fig. 22):

- **interventi protettivi**, quando producono la canalizzazione delle tensioni all'esterno del nucleo d'avanzamento svolgendo appunto un'azione protettiva, che ne garantisce la conservazione delle caratteristiche naturali di resistenza e deformabilità (es.: gusci di terreno consolidato mediante jet-grouting sub-orizzontale, gusci di betoncino fibrorinforzato o calcestruzzo ottenuti in avanzamento mediante pretaglio meccanico);
- **interventi di rinforzo**, quando agiscono direttamente sulla consistenza del nucleo d'avanzamento migliorandone le caratteristiche naturali di resistenza e

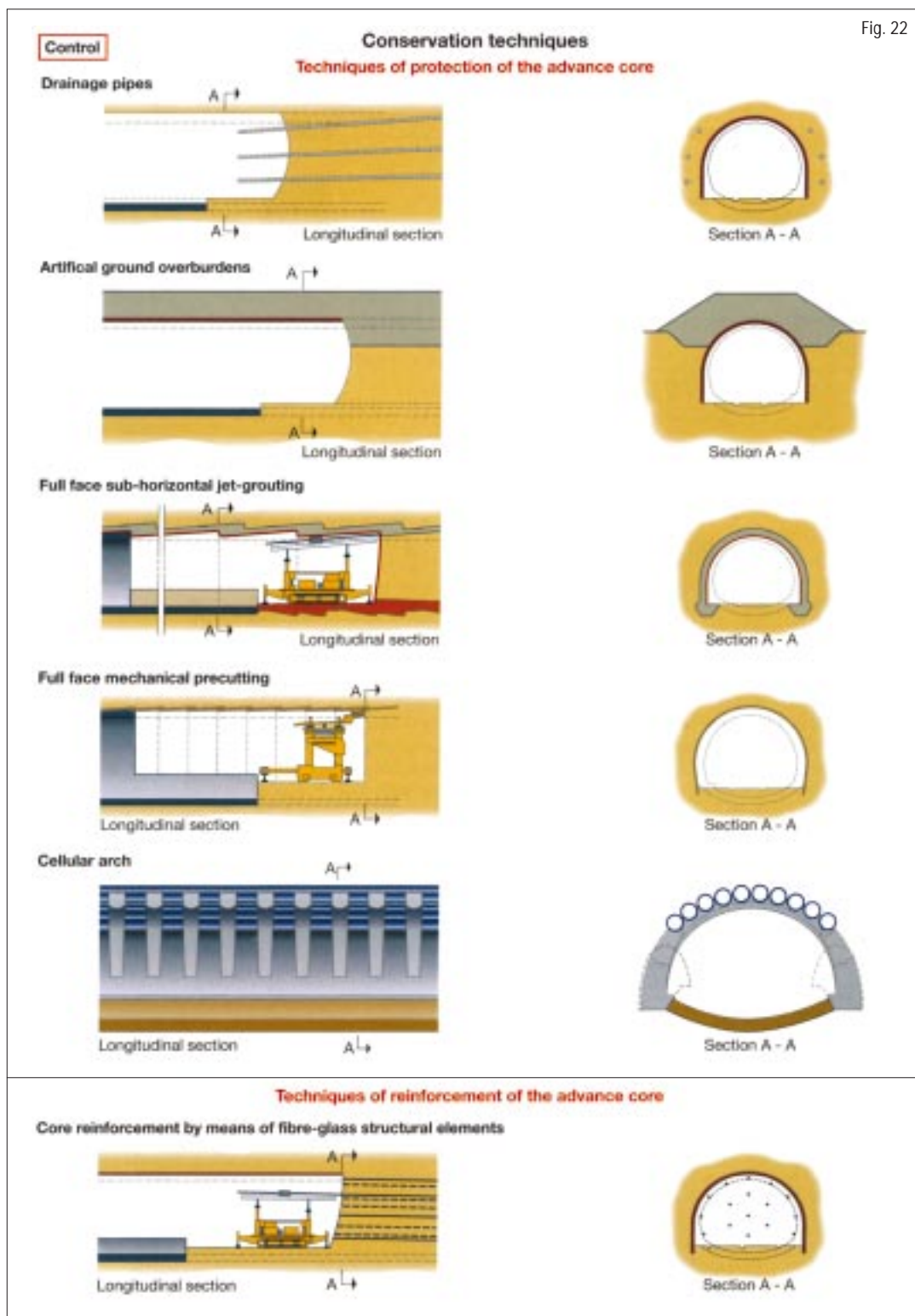


Fig. 22

deformabilità attraverso opportune tecniche di consolidamento (es.: consolidamento del nucleo mediante elementi strutturali di vetroresina).

Benché questi tipi d'intervento per il controllo della risposta deformativa a monte del fronte di scavo, qualora considerati singolarmente, abbiano campi d'applicazione piuttosto circoscritti in relazione alla natura del terreno, nel loro insieme sono in grado di garantire soluzioni per tutte le possibili situa-

zioni geotecniche. Naturalmente, nulla vieta, in condizioni tenso-deformative estreme, di utilizzare contemporaneamente più tipi d'interventi per ottenere un'azione mista: protettiva e di rinforzo (fig. 23).

5.2 IL CONTROLLO A VALLE DEL FRONTE DI SCAVO

Contrariamente a quanto insegnano i criteri d'avanzamento tradizionali, che ignorando la causa dei fenomeni deformativi in galleria lasciano che il nucleo

si deformi, e poi obbligano a mettere in opera rivestimenti flessibili per incassare i fenomeni deformativi già innescati (pratica che in condizioni tenso-deformative realmente difficili regolarmente si rivela inadeguata), l'applicazione dei nuovi concetti d'avanzamento in presenza di nucleo rigido, caratteristici dell'approccio A.DE.CO.-RS, richiede imprescindibilmente, se non si vuol perdere a valle del fronte il vantaggio ottenuto a monte rinforzando il nucleo, la messa in

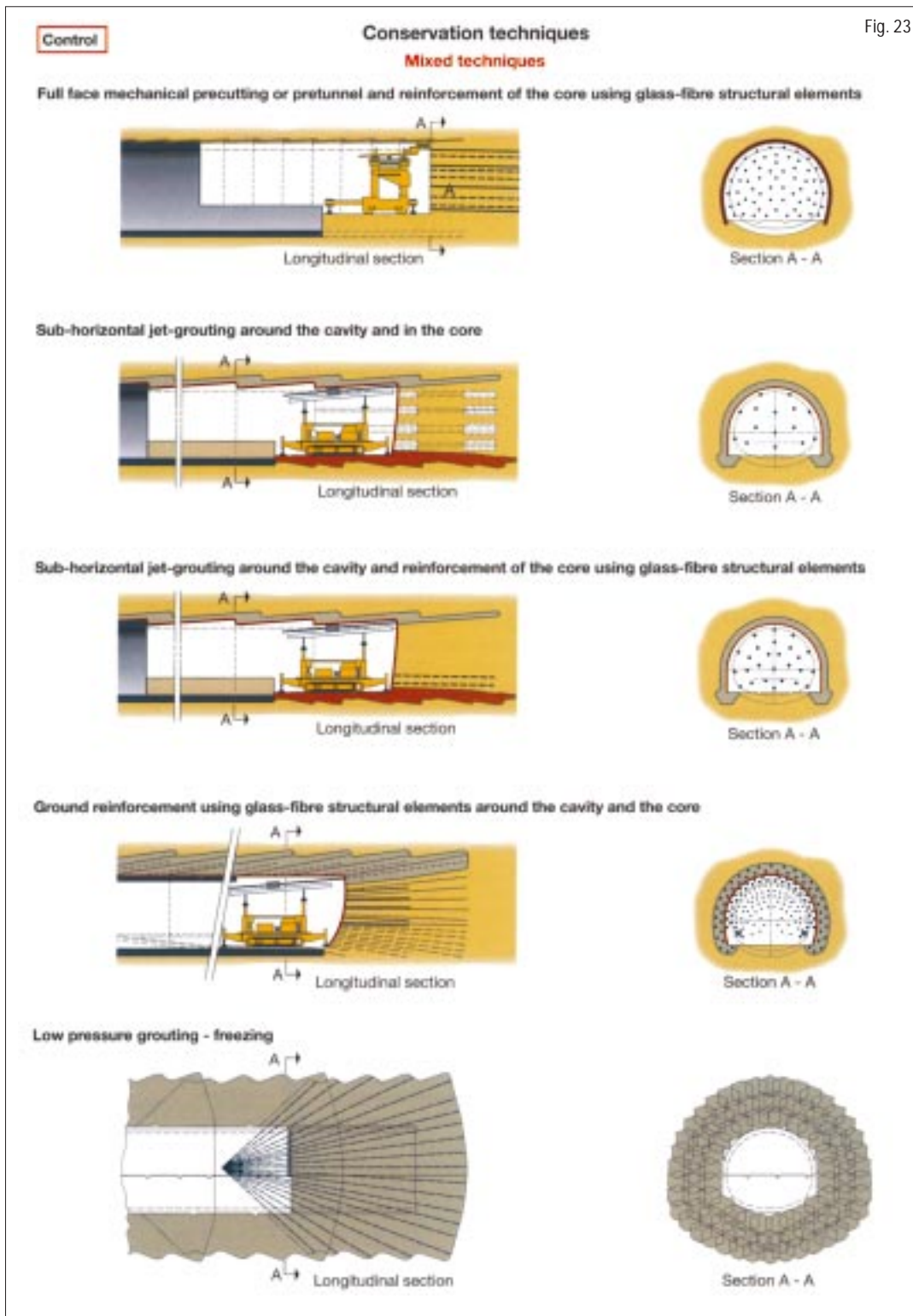


Fig. 23

l'arco rovescio lontano dal fronte di scavo è come avanzare a sezione parzializzata);

- l'avanzamento a mezza sezione produce sempre deformazioni maggiori di quello a piena sezione.

Ne consegue per il progettista la possibilità (che in condizioni tenso-deformative estreme diventa di fondamentale importanza) di dare continuità all'azione di controllo della risposta deformativa, già iniziata a monte del fronte di scavo regolando la rigidità del nucleo d'avanzamento, regolandone a valle la maniera di estrudere, attraverso l'esecuzione del getto delle murette e dell'arco rovescio il più possibile in prossimità del fronte: accettare di gettare questi ultimi lontano dal fronte di scavo, infatti, significa accettare anche una superficie d'estrusione più estesa, una maniera d'estrudere dissimetrica, un nucleo d'avanzamento di maggiori dimensioni e più difficilmente trattabile, tutte condizioni che portano all'instabilità della galleria (fig. 26).

Erano a questo punto maturi i tempi per cominciare a tradurre i principi teorizzati dall'A.DE.CO.-RS in un nuovo approccio di progettazione e costruzione di gallerie, che superasse le limitazioni degli approcci tradizionali fornendo la possibilità di progettare e costruire gallerie in qualsiasi tipo di terreni e di situazioni tenso-deformative, industrializzandone gli scavi, sino a poterne prevedere attendibilmente i tempi e i costi di costruzione come si fa usualmente per qualsiasi altra opera d'ingegneria. Prima di iniziare è stato indispensabile stabilire delle linee guida che servissero da riferimento a chi si accinge a progettare e costruire un'opera in sotterraneo.

6. PROPOSTA DEL NUOVO APPROCCIO

Ci è sembrato ragionevole affermare che per progettare e costruire in maniera appropriata un'opera in sotterraneo è fondamentale:

in fase di progettazione:

- avere una conoscenza approfondita del mezzo in cui si dovrà operare, con particolare riguardo alle sue caratteristiche di resistenza e deformabilità;

- studiare preliminarmente quale sarà il comportamento tenso-deformativo (risposta deformativa) di detto mezzo allo scavo, in assenza di interventi di

opera di rivestimenti altrettanto rigidi e di curare con la massima attenzione che la continuità d'azione dal precontenimento al contenimento del cavo avvenga nella maniera più graduale e uniforme possibile, senza mai dimenticare che la causa di tutto il processo tenso-deformativo che si vuol controllare sono la resistenza e la deformabilità del nucleo d'avanzamento.

D'altra parte, analisi numeriche eseguite con l'ausilio dell'elaboratore mostrano, con assoluta

evidenza, che:

1. il fenomeno estrusivo, quando si produce, avviene attraverso una superficie ideale, definita **superficie di estrusione**, che si estende dal punto di contatto tra il terreno e l'estremità anteriore del priverivestimento al punto di contatto tra lo stesso terreno e l'estremità anteriore dell'arco rovescio (fig. 24);

2. l'avvicinamento del getto dell'arco rovescio al fronte di scavo, riducendo progressivamente la superficie d'estrusione, produ-

ce una riduzione altrettanto progressiva del fenomeno estrusivo (che tende a svilupparsi più simmetricamente sull'altezza del fronte) e quindi anche della convergenza (fig. 25).

Le stesse mostrano, inoltre, che:

- a parità di distanza dell'arco rovescio dal fronte di scavo, le deformazioni calcolate per l'avanzamento a mezza sezione sono paragonabili a quelle ottenute per l'avanzamento a piena sezione (in altre parole: gettare

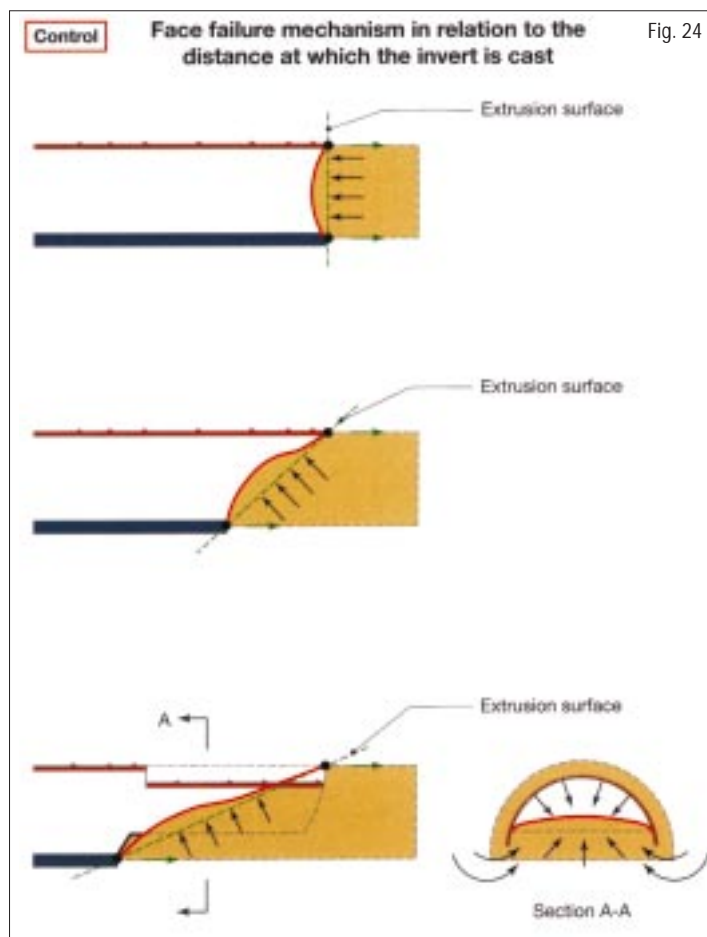


Fig. 24

stabilizzazione;

- definire il tipo di azioni di precontenimento o di contenimento necessarie per regimare e controllare la risposta deformativa del mezzo allo scavo;

- scegliere il tipo di interventi di stabilizzazione tra quelli oggi disponibili grazie alle tecnologie esistenti, sulla base delle azioni di precontenimento o di contenimento che esse sono in grado di garantire;

- compilare, in funzione del previsto comportamento del mezzo allo scavo, le sezioni tipo definendo, oltre agli interventi di stabilizzazione più adeguati al contesto in cui ci si aspetta di dover operare, fasi, cadenze e tempi di messa in opera degli stessi;

- dimensionare e verificare, attraverso il calcolo matematico, gli interventi prescelti per ottenere il comportamento del mezzo allo scavo desiderato ed il necessario coefficiente di sicurezza dell'opera;

in fase di costruzione:

- verificare, in corso d'opera, che il comportamento del mezzo allo scavo sia corrispondente a quello calcolato per via analitica in fase progettuale. Procedere quindi alla messa a punto del progetto bilanciando il peso de-

gli interventi tra il fronte ed il perimetro del cavo.

Ne è derivato che il progetto e la costruzione di un'opera in sotterraneo dovevano necessariamente articolarsi cronologicamente attraverso:

1. una **fase conoscitiva**, riferita alla conoscenza geologica, geomeccanica ed idrogeologica del mezzo;

2. una **fase di diagnosi**, riferita alla previsione, per via teorica, del comportamento del mezzo in termini di risposta deformativa in assenza di interventi di stabilizzazione;

3. una **fase di terapia**, riferita, prima, alla definizione delle modalità di scavo e stabilizzazione del mezzo al fine di regimare la risposta deformativa e poi alla valutazione, per via teorica, dell'efficacia, a questo riguardo, delle soluzioni scelte;

4. una **fase di verifica**, riferita al controllo per via sperimentale del comportamento reale del mezzo allo scavo in termini di risposta deformativa per la messa a punto dei sistemi di scavo e di stabilizzazione.

6.1 CRITERIO D'INQUADRAMENTO SECONDO L'APPROCCIO A.DE.CO.-RS

L'approccio A.DE.CO.-RS si contraddistingue, da quelli che

sino ad oggi sono stati presi come riferimento, per diverse importanti caratteristiche. In particolare, l'approccio:

- 1) prevede che il **progetto** e la **costruzione** di una galleria non si identifichino più come in passato, ma rappresentino due momenti ben distinti e con una fisionomia ben definita in termini cronologici e pratici;

- 2) fa riferimento ad un nuovo tipo di inquadramento delle opere in sotterraneo, basato su un unico parametro comune a tutti gli scavi: il comportamento tenso-deformativo del sistema fronte di scavo-nucleo d'avanzamento;

- 3) fa riferimento alla previsione, al controllo e all'interpretazione della risposta deformativa dell'ammasso allo scavo, che diventa l'unico parametro da considerare **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 le condizioni statiche 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.

Elemento peculiare dell'approccio è l'introduzione di un nuovo concetto di inquadramento delle opere in sotterraneo.

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 d'inquadramento, la **stabilità del sistema fronte di scavo-nucleo 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 di scavo), l'approccio supera le limitazioni dei sistemi sino ad oggi adottati, specie nel caso di terreni di scarsa consistenza.

In particolare, come già evi-

denziato in precedenza, risultano individuate tre categorie di comportamento fondamentali (fig. 14):

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

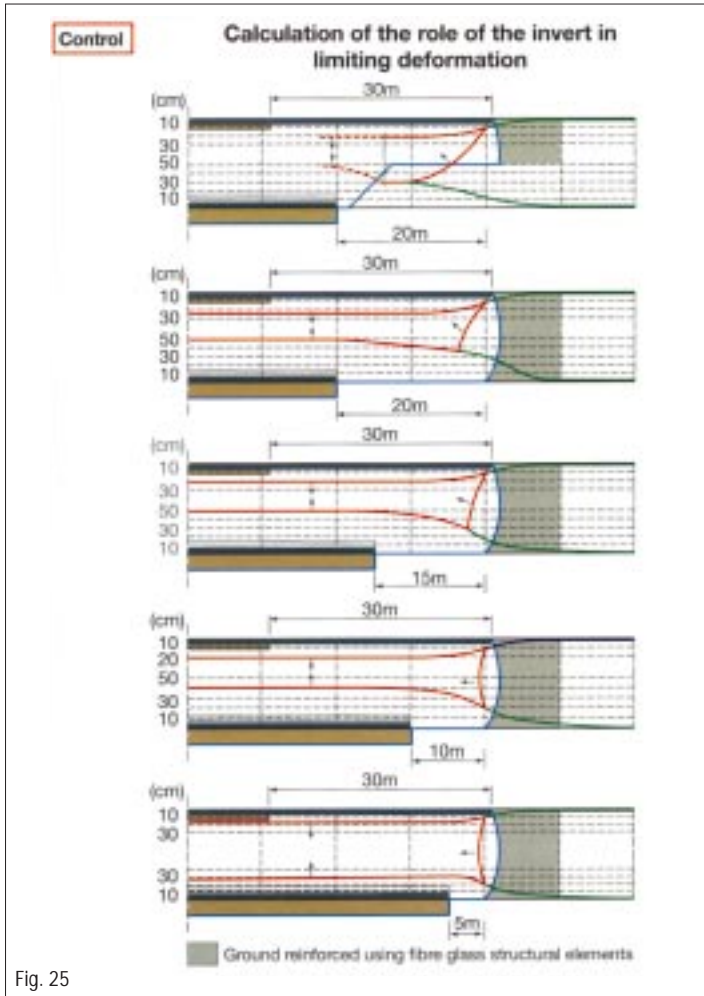
CATEGORIA B

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 mi-



Moment	Phase	Description
Design	- Survey	- Analysis of existing natural equilibriums
	- Diagnosis	- Analysis and prediction of deformation phenomena (*) in the absence of stabilisation measures
Construction	- Therapy	- Control of deformation phenomena (*) in term of stabilisation systems chosen
	- Operational	- Application of the stabilisation instruments for controlling deformation phenomena(*)
	- Monitoring	- Control and measurement of deformation phenomena(*) as the response of the rock mass during tunnel advance (measurement of extrusion at the face and of convergence at the contour of the cavity and at varying distance from it, inside the mass of the ground)
	- Final design adjustments	- Interpretation of deformation phenomena(*) - Balancing of stabilisation systems between the face and the perimeter of the cavity

(*) Deformation phenomena in terms of extrusion at the face and of convergence at varying distance from it, inside the mass of the ground

Fig. 27

gliora 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

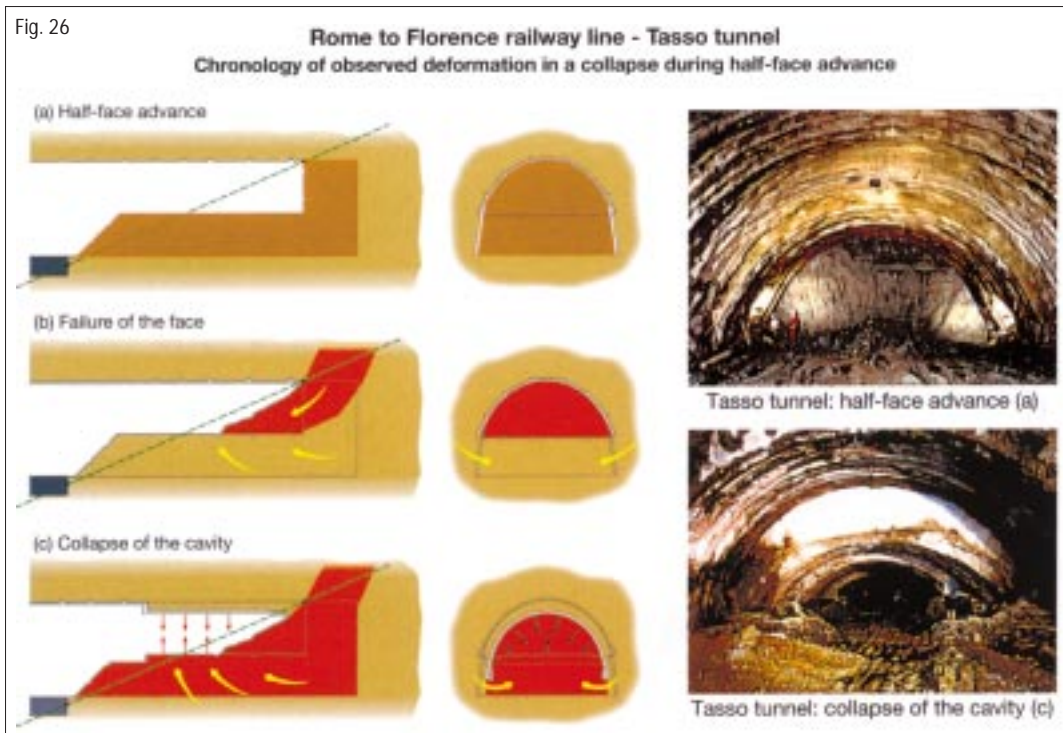
una sufficiente resistenza residua.

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 inter-

venti 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, devianone 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 realizzate ricadono in queste tre categorie di comportamento.

6.2 FASI DI SVILUPPO DELL'APPROCCIO A.DE.CO.-RS

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 nello schema riportato in *fig. 27*.

Un momento della progettazione comprendente:

- una **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;
- una **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;
- una **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 interven-

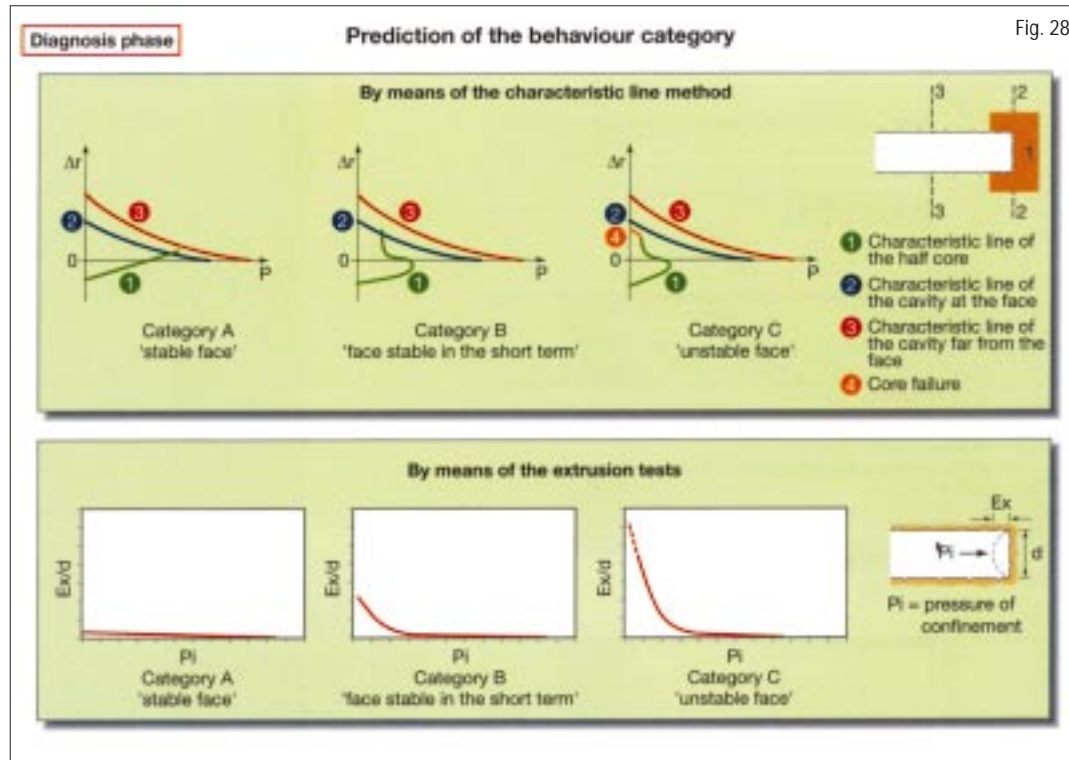


Fig. 28

ti 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 verificandone l'efficacia attraverso gli strumenti del calcolo matematico.

Un momento della costruzione comprendente:

- una **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;
- una **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 dell'opera si verifica la correttezza delle previsioni fatte in fase di diagnosi e di terapia, onde perfezionare la messa a punto del progetto attraverso il bilanciamento degli strumenti di stabilizzazione tra il fronte e il cavo. La fase di verifica non si esaurisce a galleria ultimata, ma va proseguita per tutto l'arco della sua vita allo scopo di controllarne costantemente la sicurezza d'esercizio.

Progettare correttamente un'opera in sotterraneo significherà allora saper prevedere, sulla base della conoscenza de-

gli 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 (precontenimento o contenimento) 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 interpretando correttamente (servendosi del nucleo d'avanzamento come chiave privilegiata di lettura) 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.

6.2.1 FASE CONOSCITIVA

Realizzare uno scavo in sotterraneo significa turbare gli equilibri preesistenti nel mezzo. Pro-

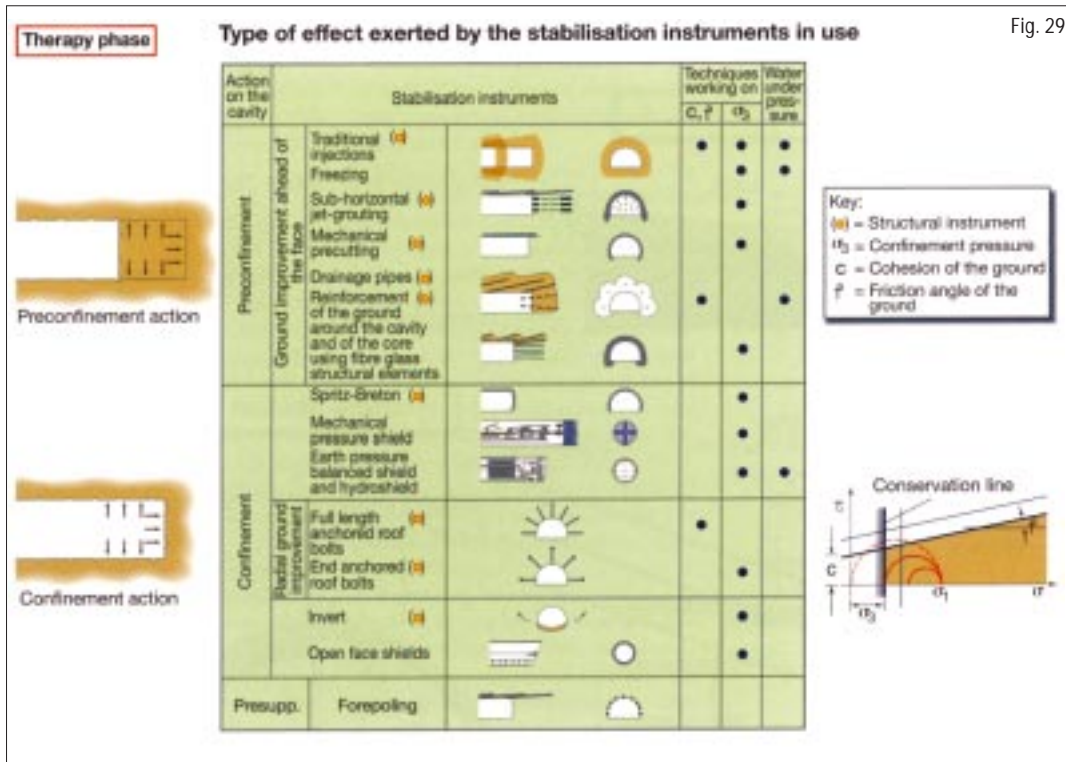
gettare questo scavo riducendo al minimo il disturbo al mezzo in cui si deve operare, quindi riducendo al minimo la risposta deformativa, presuppone allora la conoscenza preventiva ed il più possibile completa dello stato degli equilibri naturali presenti nel terreno prima dell'intervento.

Da ciò discende la necessità di far precedere 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.

In un primo tempo viene redatto un profilo geologico di tentativo in asse tracciato, sviluppato sulla base della Carta Geologica d'Italia 1:1.000.000, 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



mento 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 di scavo - 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 diverse tratte di galleria alle tre categorie di comportamento A, B, C già citate.

Tra questi ultimi, il metodo

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 [8] [9], nonchè 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 pos-

sibile 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).

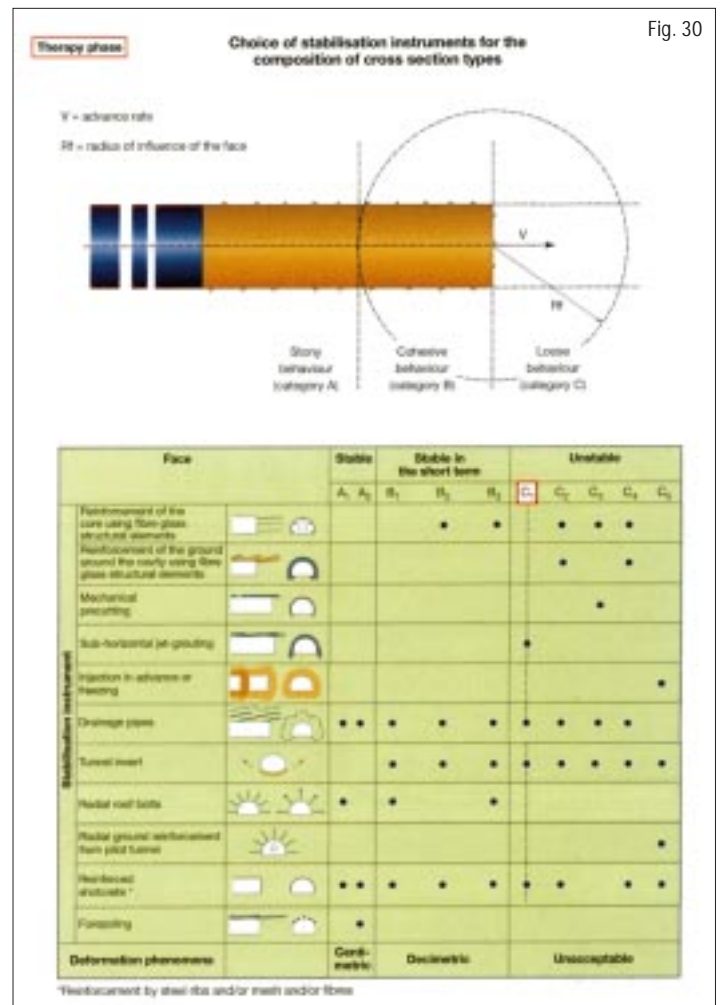
Ove possibile è importante determinare le caratteristiche di resistenza e deformabilità delle eventuali discontinuità strutturali, da cui derivare le curve intrinseche ed i parametri di deformabilità d'ammasso sulla base di considerazioni di dettaglio.

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.

6.2.2 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 comporta-



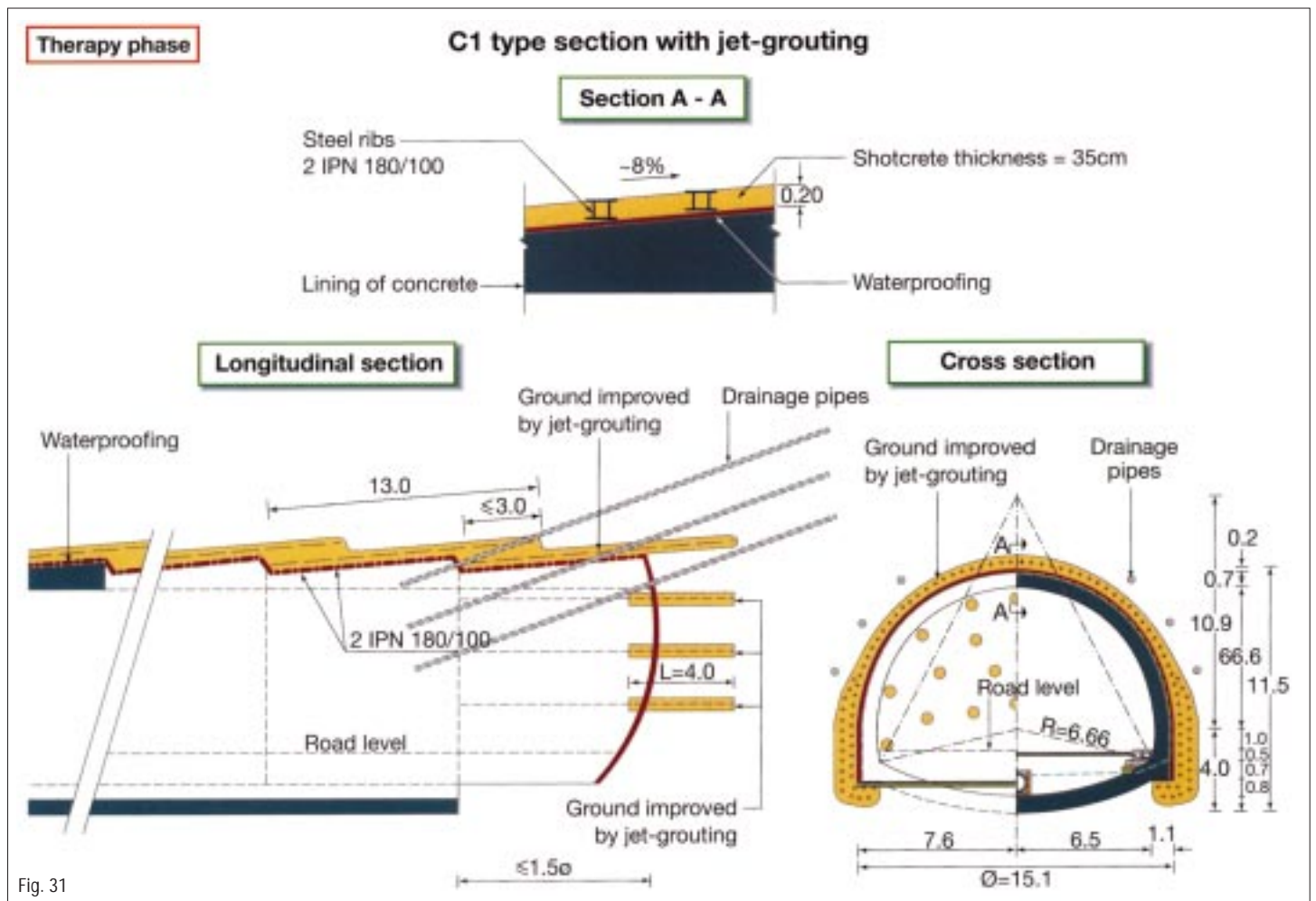


Fig. 31

delle linee caratteristiche [5], utilizzabile nella maggior parte delle situazioni correnti, appare particolarmente utile e semplice da impiegare per perseguire lo scopo (fig. 28).

Tra i metodi sperimentali, in certi tipi di terreno le prove di estrusione in cella triassiale consentono di simulare in laboratorio, su provini indisturbati di materiale prelevato in situ, l'avanzamento della galleria sotto le diverse coperture e le modifiche tensionali indotte dall'azione di scavo nel sistema fronte di scavo - nucleo d'avanzamento, evidenziandone il tipo di comportamento (fig. 28).

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 (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, 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.

6.2.3 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 in precedenza, circa l'importanza della rigidità del nucleo d'avanzamento nei riguardi del compor-

tamento 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 funzio-

ne 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 [1] (fig. 29), 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 [3] [10];

- 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 [3] [10] [11] [12] [13];

- ombrelli tronco-conici, costituiti dall'accostamento di colonne suborizzontali di terreno consolidato mediante jet-grouting [10] [14].

Esercitano invece un effetto prevalentemente migliorativo:

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

- ombrelli tronco-conici di drainaggi, 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 sul fronte e sul cavo (anello di rivestimento di concetti 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 contenimen-

to, 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 presostegno, 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.

6.2.3.1 COMPOSIZIONE DELLE SEZIONI TIPO LONGITUDINALI E TRASVERSALI

Nei paragrafi precedenti abbiamo visto che la stabilità del sistema fronte di scavo - 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 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, in figura 30, 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

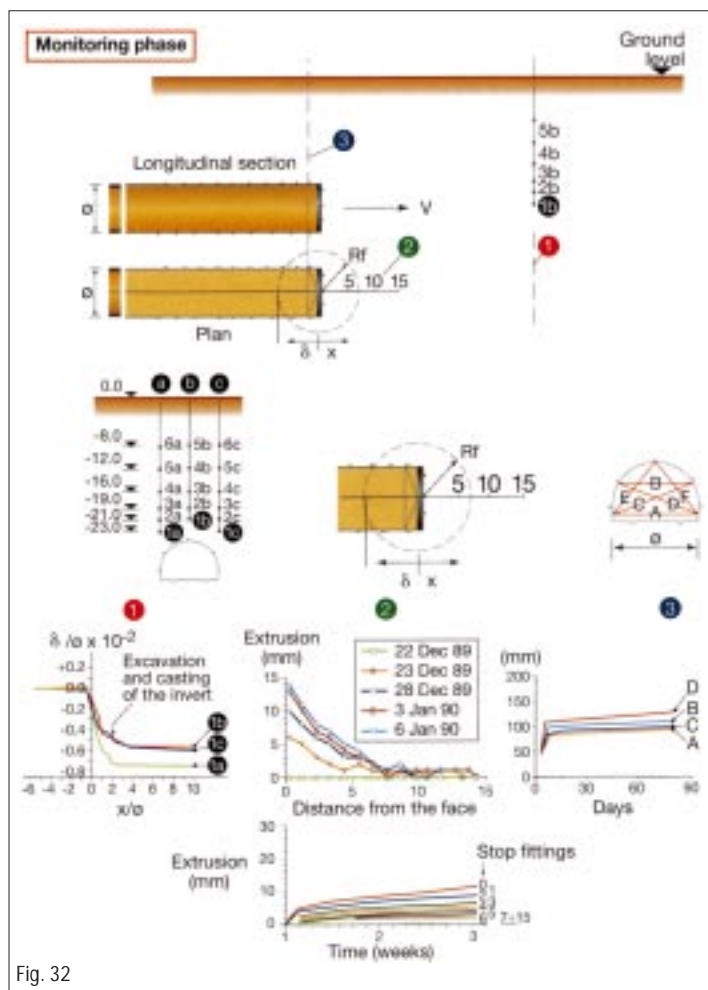


Fig. 32

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 di scavo - 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 an-

tico sul fronte d'avanzamento. Vengono quindi proposti strumenti di precontenimento del cavo che, assicurando la stabilità del sistema fronte di scavo - nucleo d'avanzamento, impediscono di fatto, quando i fenomeni deformativi sono ancora controllabili, alla tensione principale minore σ_3 di annullarsi.

La tabella di figura 30 può dunque venir utilizzata dal progettista quale riferimento per la definizione delle sezioni tipo sia longitudinali che trasversali.

La figura 31 illustra un esempio di composizione di sezione tipo C1.

6.2.3.2 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

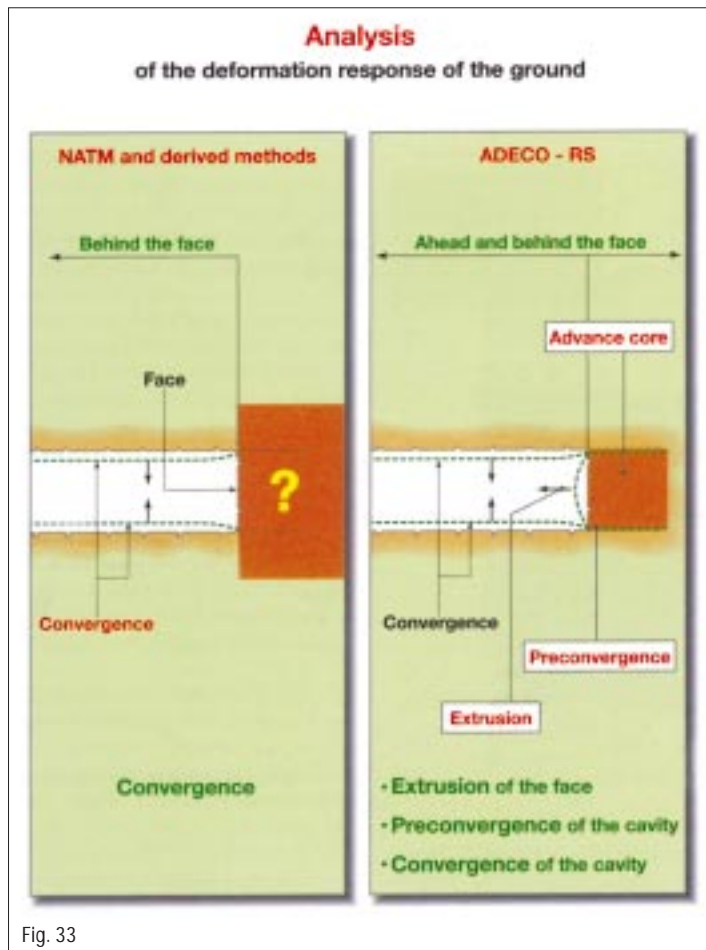


Fig. 33

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.

Oltre alle sezioni tipo principali, potranno essere progettate delle sezioni tipo "derivate" da applicare in concomitanza di situazioni statisticamente probabili, la cui ubicazione, però, non risulta prevedibile sulla base dei dati disponibili. Sezioni tipo principali e sezioni tipo "derivate" sono comunque definite in maniera univoca in quanto, per ognuna, oltre a descrivere dettagliatamente la tipologia, l'intensità, le fasi e le cadenze di messa in opera degli interventi, saranno anche individuate con chiarezza le condizioni geologico-geomeccaniche e tenso-deformative (estrusioni e convergenze) entro le quali la sezione deve essere applicata. L'introduzione nel progetto delle sezioni tipo "derivate" permetterà di costruire la galleria in regime

di Assicurazione Qualità, come prescritto dalle norme ISO 9000 [15].

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.

6.2.3.3 IL NUCLEO D'AVANZAMENTO SOTTO FALDA

Come noto, l'acqua in regime idrostatico, e ancor più in regime idrodinamico, riduce sensibilmente le caratteristiche di resistenza e deformabilità del terreno. È altresì noto che una galleria che avanza in un acquifero ha l'effetto di un grosso dren: nell'ammasso s'instaura un moto di filtrazione verso il fronte di scavo, che interessa per primo il nucleo d'avanzamento, che, di conseguenza, perde gran parte della propria rigidità. Poiché, come abbiamo visto, questa gioca un ruolo determinante per la stabilità a breve e a lungo termine della galleria, è importante che la circolazione dell'acqua all'interno del nucleo sia impedita. Questo, in funzione delle diverse situazioni (alimentazione della falda, gradienti in gioco, ecc.) si può ottenere operan-

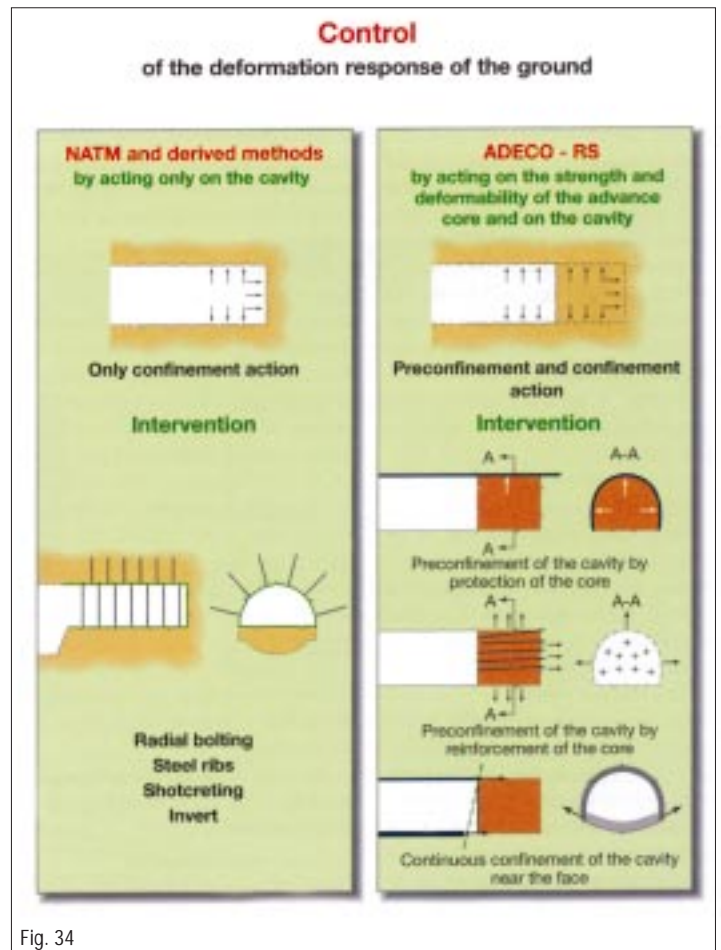


Fig. 34

do interventi sistematici d'impermeabilizzazione del nucleo e del contorno del cavo (avanzamento in regime idrostatico) o intercettando l'acqua tre o quattro diametri a monte del fronte con appositi drenaggi disposti a ombrello al contorno del futuro scavo (avanzamento in regime idrodinamico).

In quest'ultimo caso, perché non sia vanificata l'efficacia del trattamento in avanzamento con la conseguenza di ottenere effetti contrari a quelli desiderati, è quanto mai opportuno porre la massima attenzione affinché i dreni siano eseguiti a perfetta regola d'arte. In particolare, si deve assolutamente evitare d'inserirli nel terreno a partire dalla superficie del fronte di scavo. Dovranno invece essere disposti, secondo una tipologia a tronco di cono, a partire dai paramenti laterali della galleria o, al più, dalla linea perimetrale del fronte, in modo che il nucleo non ne sia mai intersecato. In caso contrario, infatti, l'acqua, da essi richiamata, imbibirebbe il terreno costituente il nucleo, con effetti disastrosi per la sua stabilità e quindi per la stabilità dell'intera galleria. Per scongiurare questo pericolo è importante curare anche che i tubi drenan-

ti siano privi di fessurazioni per un tratto di qualche metro, alla loro estremità più prossima alla galleria.

Analogamente, per la medesima ragione, occorre porre la massima attenzione alla corretta esecuzione dei trattamenti di consolidamento che prevedono l'inserimento di elementi di rinforzo nel nucleo d'avanzamento previa perforazione. È importante eseguire un foro per volta e che esso sia armato immediatamente e perfettamente sigillato con malta cementizia. Solo operando in questo modo, esso non diventerà in breve tempo una via preferenziale per l'acqua con conseguenze devastanti per il nucleo d'avanzamento che, imbibito e rammollito, non potrebbe più svolgere efficacemente la propria azione stabilizzante.

6.2.4 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 que-

ste 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.

A questo scopo è prevista la predisposizione di adeguate stazioni di misura a monte, in corrispondenza ed a valle del fronte d'avanzamento (fig. 32).

Infatti, quando si prevede che l'avanzamento del fronte avverrà in condizioni di stabilità a breve termine o di instabilità, ogni volta che la copertura della galleria lo permette è particolarmente interessante e consigliabile mettere in opera in una determinata sezione, prima dell'arrivo del fronte, degli strumenti multibase verticali adatti a misurare i fenomeni deformativi radiali che precedono il suo arrivo (preconvergenze).

In corrispondenza del sistema fronte di scavo - nucleo d'avanzamento, poi, con *sliding micrometer* 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 a valle del fronte.

Quanto più queste misure sono eseguite sistematicamente e con accuratezza 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 contenimento 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 di scavo - 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 interventi 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.

In corso d'opera, i risultati del monitoraggio guideranno il progettista e la Direzione Lavori nel decidere circa l'opportunità di adottare la sezione tipo principale prevista o eventualmente modificare alcune quantità di lavorazioni (secondo i criteri preindicati nel progetto) adottando una sezione tipo "derivata" (sempre comunque prevista dal progetto per la tratta da scavare, oppure procedere alla progettazione di una nuova sezione tipo per far fronte a situazioni particolari non individuate in fase conoscitiva e quindi non previste nel progetto.

È 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.

7. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Se i fenomeni deformativi che normalmente si osservano all'interno di una galleria in fase di avanzamento si interpretano nell'ambito di un processo causa-effetto, appare del tutto ragio-

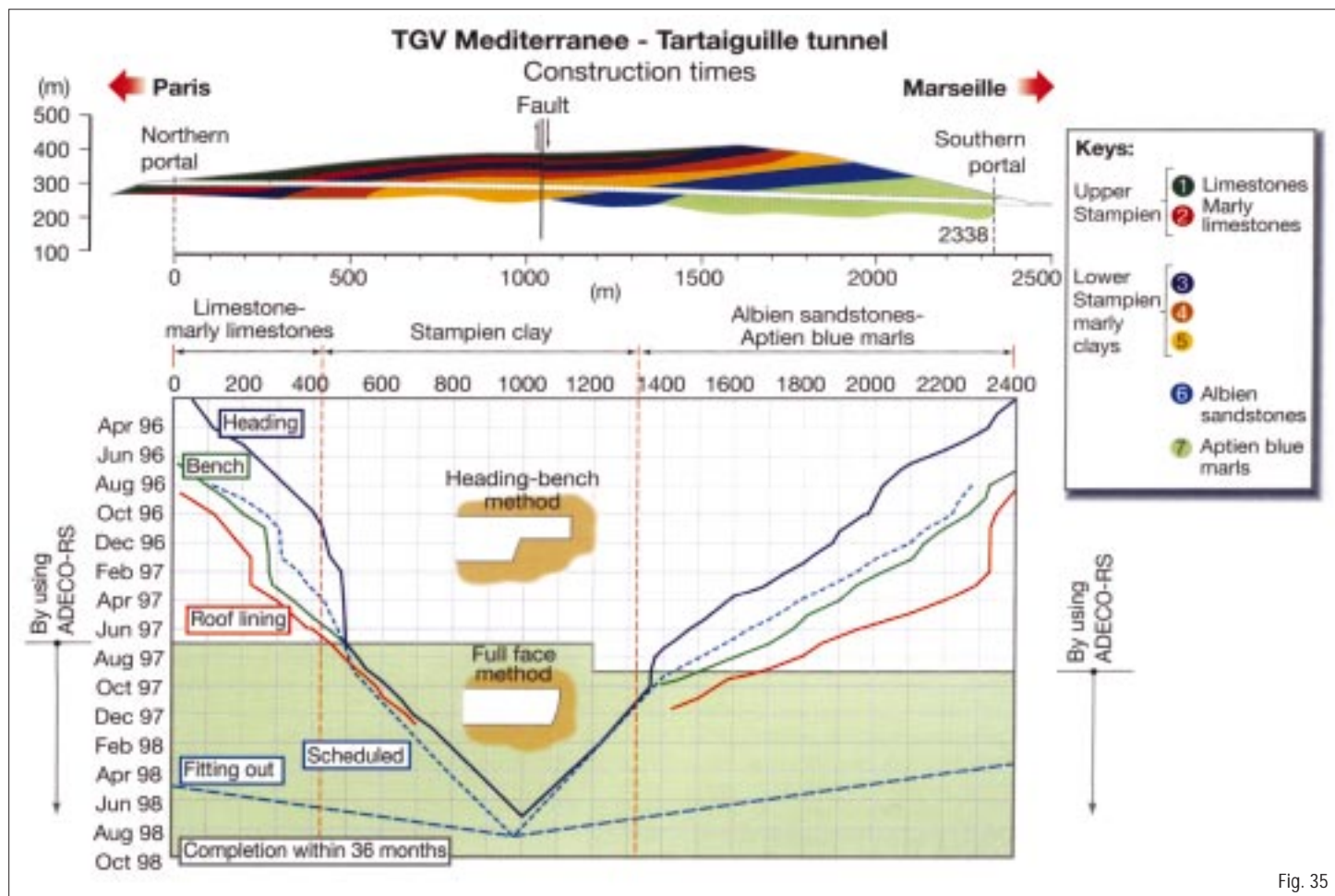


Fig. 35

nevole identificare la causa nell'azione che viene esercitata sul mezzo e l'effetto nella risposta deformativa di quest'ultimo, ad essa conseguente.

Su questo assunto, mentre la causa, sino a pochi anni fa, non è stata ritenuta meritevole di attenzione né di analisi approfondite, rimanendo così solo apparentemente determinata, l'effetto è stato immediatamente identificato nella convergenza del cavo ed è divenuto oggetto di studi (fig. 33). Sulla base di questi studi, sono stati messi a punto teorie, approcci progettuali e sistemi costruttivi che presuppongono di poter risolvere tutti i problemi connessi con lo scavo delle gallerie attraverso la messa in gioco di semplici azioni di contenimento radiale (fig. 34).

Tra le prime, assai note sono la "teoria delle linee caratteristiche" sviluppata da Lombardi e il "metodo di convergenza-confinamento" messo a punto da Panet [4], [5], che pur avendo evidenziato per la prima volta l'effetto benefico per la stabilità del cavo della presenza del nucleo d'avanzamento non hanno tuttavia fornito suggerimenti efficaci su come mettere a frutto tale effetto né su come affrontare le situazioni d'instabilità del fronte di scavo.

Tra i secondi, gli approcci come il NATM, basati sulle classificazioni geomeccaniche (spesso utilizzate per scopi diversi da quelli per cui erano state concepite), hanno rappresentato indubbiamente, al momento della loro introduzione, un notevole progresso rispetto al passato. In particolare, il NATM ebbe principalmente il merito di:

- considerare per la prima volta il terreno come materiale da costruzione;
 - introdurre l'utilizzazione di nuove tecnologie di semplice contenimento del cavo ad azione attiva, quali lo spritz-beton e i bulloni;
 - sottolineare la necessità di rilevare e interpretare sistematicamente la risposta deformativa dell'ammasso.
- Oggi però, avendo considerato il problema statico delle gallerie esclusivamente come problema piano e concentrato tutta l'attenzione sulla sola convergenza del cavo, denuncia (e con lui tutti gli approcci da esso derivati) importanti limiti:
- rappresenta un sistema di classificazione incompleto e parziale, in quanto non applicabile

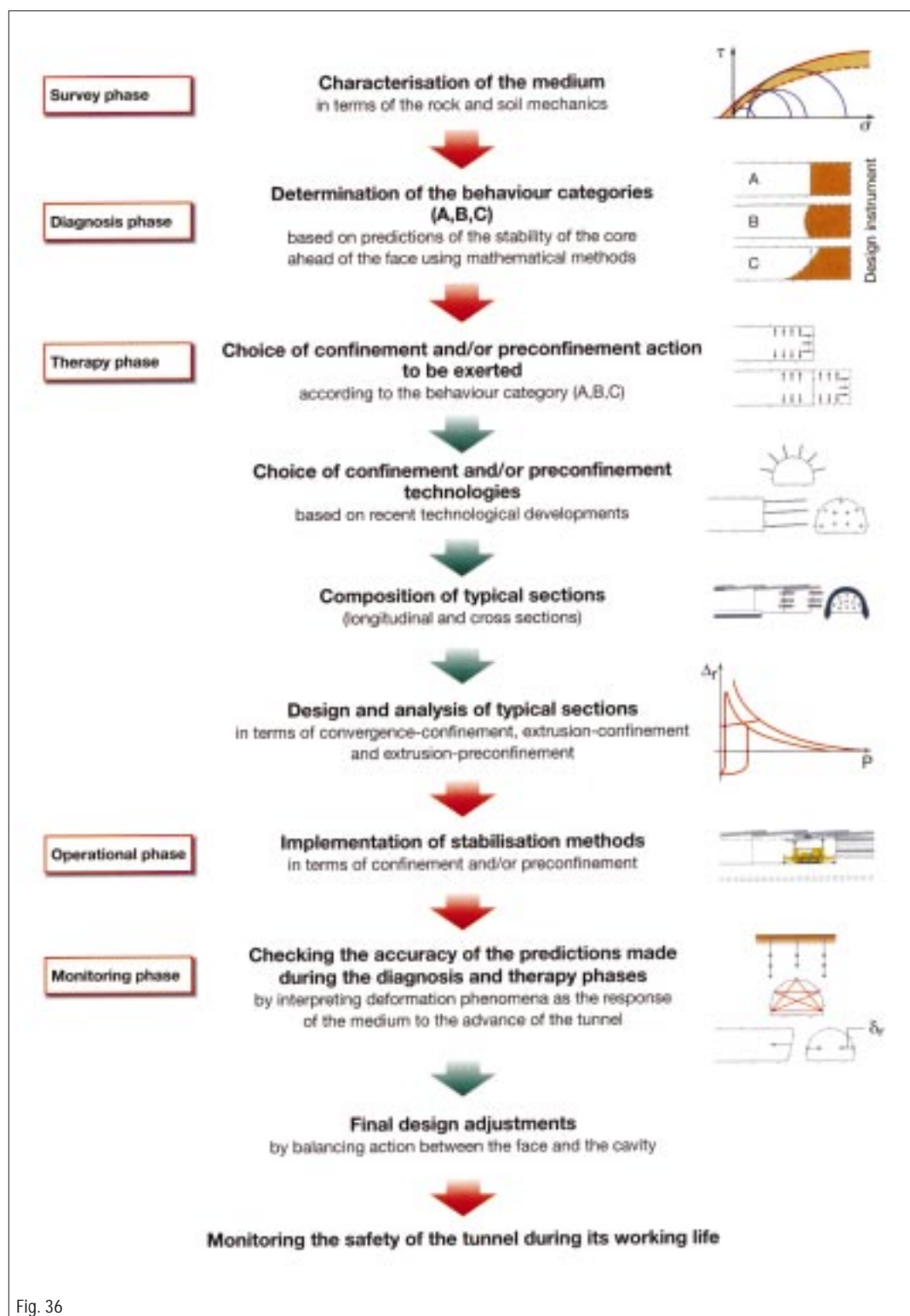


Fig. 36

in tutti i tipi di terreno e in tutte le situazioni tenso-deformative;

- trascura completamente l'importanza del nucleo d'avanzamento e la necessità di utilizzarlo quale strumento di stabilizzazione nelle situazioni tenso-deformative difficili;
- trascura le nuove tecnologie continuando a proporre per la stabilizzazione della galleria solo interventi di semplice contenimento del cavo;
- non prevede un momento

della progettazione nettamente separato da quello della costruzione;

- risolve in maniera incontestabilmente ascientifica il problema del controllo in corso d'opera dell'adeguatezza e del corretto dimensionamento delle soluzioni progettuali adottate, confrontando ineffabilmente le classi geomeccaniche con l'entità della risposta deformativa del terreno.

L'errato convincimento che l'effetto dell'azione esercitata sul

mezzo durante lo scavo di una galleria fosse identificabile nella sola convergenza del cavo ha portato fuori strada per diverse decine di anni intere generazioni in Italia ed all'estero, che, sulla base di quanto proposto dagli approcci progettuali e costruttivi in voga (NATM e metodi derivati, che ancor oggi avvalorano detto convincimento), sono state indotte a concentrarsi sulla cura degli effetti (contrasto della convergenza del cavo attraverso azioni di semplice conteni-

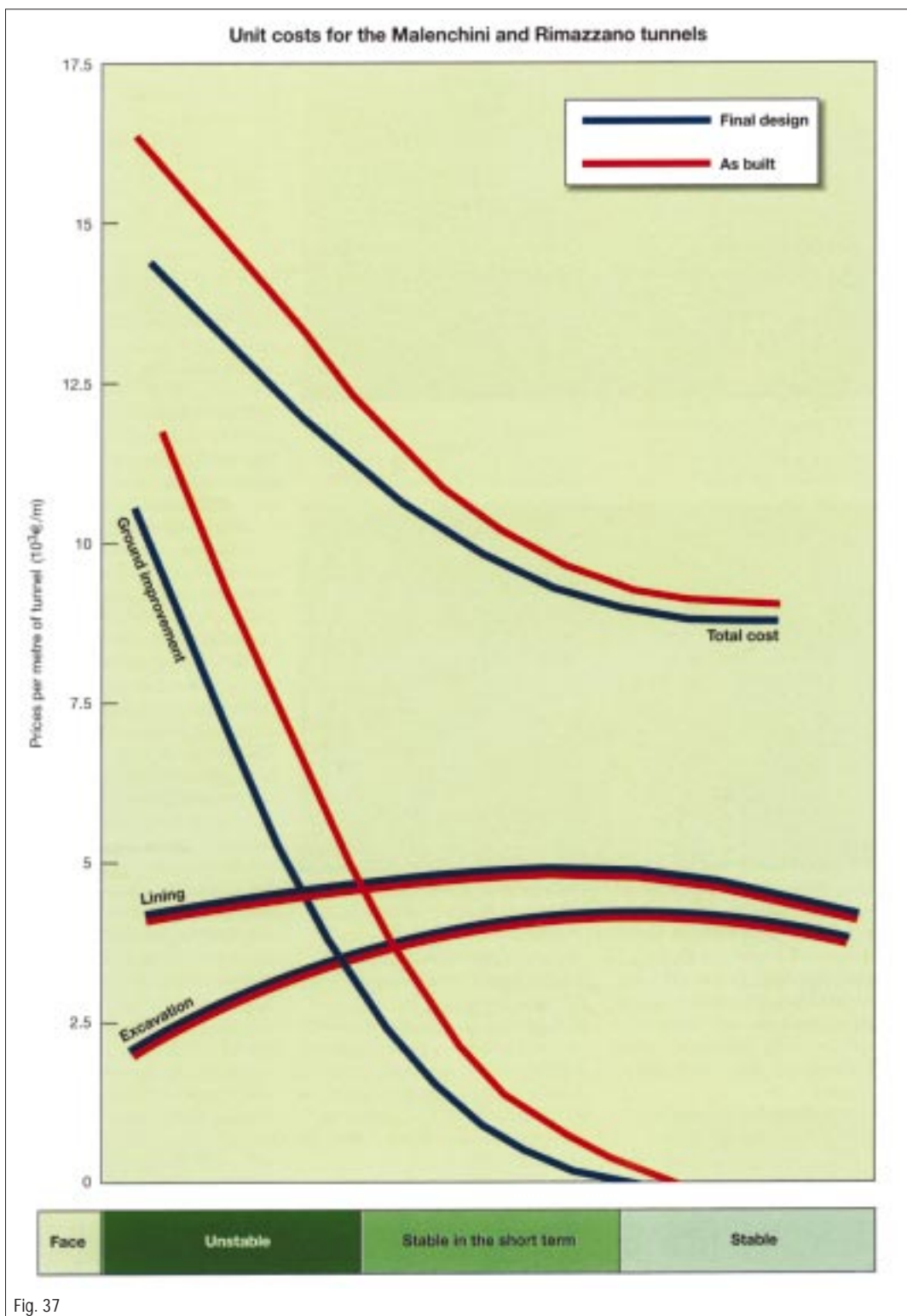


Fig. 37

mento) invece che delle cause dell'instabilità di una galleria [16], [17].

Questo modo di affrontare il problema ha permesso di risolvere con successo lo scavo di gallerie in situazioni tenso-deformative basse o medie, ha denunciato però i propri limiti a fronte di quelle alte ed estreme a causa:

1. dell'incapacità di fare previsioni attendibili sul comportamento della galleria in fase di avanzamento, quindi assenza di una fase di diagnosi nelle proce-

dure progettuali;

2. dell'improvvisazione delle misure di contenimento dei fenomeni deformativi, che non si era capaci di prevedere in anticipo;

3. della mancanza di sistemi di stabilizzazione efficaci, capaci di curare la causa dell'instabilità (deformabilità del nucleo) e non solo l'effetto (convergenza);

4. dell'incapacità di valutare preliminarmente l'opera sotto il profilo dei rischi, dei tempi e delle produzioni prevedibili.

A fronte di questa situazione,

la domanda di gallerie di tutti i tipi, comprese quelle in condizioni tenso-deformative alte ed estreme, in rapida e costante crescita, richiedeva di elaborare urgentemente teorie e procedure adeguate per controllare la risposta deformativa del mezzo in tutte le possibili situazioni tenso-deformative e non solo in quelle non difficili.

Per uscire dalla situazione di stallo creatasi si è dovuto ricondurre il problema alla realtà e trattarlo come problema tridi-

mensionale quale effettivamente è, prendendo in considerazione l'intera dinamica evolutiva dello scavo e non solo la sua parte conclusiva.

In questa ottica si è dato inizio a una ricerca teorica e sperimentale dalla quale sono scaturite le basi per un nuovo approccio, basato sull'Analisi delle DEformazioni CONTrollate nelle Rocce e nei Suoli, che applicato con successo negli ultimi 10-15 anni nei più svariati tipi di terreno e di condizioni tenso-deformative, comprese le più gravose, ha permesso di risolvere numerose situazioni di scavo particolarmente difficili (*vedasi Tabella 1*) dove l'applicazione dei vecchi concetti (NATM e metodi derivati), che in situazioni più semplici non mostrano i propri limiti o difetti intrinseci, aveva sortito risultati deludenti, se non addirittura catastrofici.

A questo proposito, è certamente significativo ricordare, per concludere, quanto verificatosi in Francia durante la realizzazione della galleria Tartai-guille per la nuova linea ferroviaria ad alta velocità "TGV Méditerranée" Marsiglia-Lione.

L'avanzamento dello scavo di 180 m² di sezione, iniziato nel febbraio 1996 ed impostato secondo i criteri del NATM, era proceduto tra alterne vicende sino alla fine di settembre dello stesso anno. Qui, al momento di attraversare la formazione delle "argile du Stampien", fortemente rigonfianti (75% di montmorillonite), si cominciarono ad incontrare crescenti difficoltà, tali da impedire praticamente la prosecuzione dei lavori. Per giungere a una soluzione che consentisse di superare il problema, la SNCF (*Société National du Chemin de Fer*), all'inizio del 1997, dava vita a un gruppo di studio ("*Comité de pilotage*") costituito dagli stessi tecnici delle Ferrovie Francesi, dal consorzio G.I.E. TARTAIGUILLE, dai consulenti delle Ferrovie COYNE ET BELLIER e CETU, dai consulenti geotecnici del consorzio TERRASOL e SIMECSOL. Detto gruppo consultava a sua volta i maggiori esperti di tunneling europei, invitandoli a predisporre una soluzione progettuale che consentisse d'attraversare la tratta argillosa in sicurezza e nel rispetto dei tempi contrattuali.

Dopo aver esaminato diverse proposte, nessuna delle quali offriva le garanzie di sicurezza e affidabilità richieste dal commit-

tente, soprattutto riguardo ai tempi esecutivi, la SNCF, confortata dagli schemi della proposta italiana avanzata dallo scrivente e dai tempi e costi costruttivi ipotizzati e garantiti dallo stesso progettista sulla base di casi analoghi felicemente risolti, nel marzo 1997 affidava alla ROCKSOIL S.p.A. la progettazione esecutiva degli 860 m di galleria ancora da realizzare.

L'avanzamento, ripreso nel luglio 1997 in seguito ad una radicale revisione del progetto basata sui principi dell'approccio A.DE.CO.-RS (con avanzamento a piena sezione, vedasi *foto 4*), è potuto finalmente continuare senza interruzioni e con crescente successo man mano che il cantiere prendeva confidenza con l'impiego delle nuove tecnologie, facendo registrare produzioni medie eccezionalmente regolari (*fig. 35*) e addirittura superiori agli 1,4 m/giorno garantiti dal progettista, permettendo di ultimare la galleria alla fine del luglio 1998, dopo un solo anno dall'avvio dei lavori col nuovo sistema a piena sezione, con un mese e mezzo d'anticipo sul programma previsto [18], [19], [20].

Alla luce delle ormai numerose esperienze maturate negli ultimi dieci anni [3], [12], [13], [20], [21], [23], [24], [25], si può tranquillamente affermare che l'approccio di progettazione e costruzione di gallerie A.DE.CO.-RS consente di conseguire produzioni pressoché lineari indipendentemente dai tipi di terreno attraversati e dalle condizioni tenso-deformative contingenti. Ne consegue che, mentre una volta era possibile parlare di meccanizzazione solo per quelle situazioni trattabili con azioni di semplice contenimento del cavo o del fronte (scudi, frese), oggi è possibile parlare di meccanizzazione anche in quelle più complesse e difficili, che necessitano la messa in opera di azioni di precontenimento: gli scavi in galleria possono, finalmente, essere affrontati in maniera indu-



Foto 4: Galleria Tartaignulle [Francia, TGV Méditerranée, linea Marsiglia-Lione, terreno: argilla rigonfiante (75% di montmorillonite), copertura: 100 m, diametro: 15 m]. Vista del fronte (180 m² di sezione) consolidato con elementi strutturali di vetroresina.



Foto 5: Galleria Pianoro (linea ferroviaria ad alta velocità Milano-Napoli, tratta Bologna-Firenze, terreno: sabbia limosa cementata, copertura: 150 m, diametro: 13.30 m). Vista del fronte consolidato con elementi strutturali di vetroresina.

striale (regolarità dell'avanzamento, previsione di tempi e costi) a prescindere dal tipo di terreno e dall'entità delle coperture in gioco.

In sintesi e per concludere, l'approccio A.DE.CO.-RS, mettendo a frutto le conoscenze, i mezzi di calcolo e le tecnologie di attacco più recenti (*fig. 36*), offre ai progettisti una semplice guida per inquadrare una galleria nell'ambito di tre categorie di comportamento fondamentali. A questo scopo assume come rife-

rimento le condizioni di stabilità del sistema fronte di scavo-nucleo d'avanzamento previste attraverso un'approfondito studio tenso-deformativo condotto per via teorica con gli strumenti del calcolo matematico. Per ciascuna tratta di galleria a comportamento deformativo omogeneo in tal modo individuata, il progettista decide, in funzione del tipo di comportamento previsto, il genere di azione (precontenimento o semplice contenimento) da produrre per ottenere la regimazio-

ne 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, utilizzando gli strumenti adatti a produrre le azioni necessarie. Sono disponibili sezioni tipo adeguate per ogni genere di terreno e di situazione tenso-deformativa. Di esse sono automaticamente individuati i costi (a metro lineare di galleria) e i tempi esecutivi necessari.

Per questa via:

- 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 inquadrate e pagate in proporzione a quanto si deformano). A questo proposito, si fa notare che, nel bilancio economico di una realizzazione in sotterraneo, gli interventi di stabilizzazione e consolidamento del terreno sono rimasti l'unica variabile significativa a fronte delle voci scavo e rivestimento che, sempre di più, si tende ad assimilare come costanti per tutti i tipi di terreno (*fig. 37*);

- si induce il costruttore, sulla base di un progetto completo ed affidabile, a industrializzare le operazioni d'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 a ieri, si instaurava 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 sistema fronte di scavo-nucleo d'avanzamento) facilmente ed oggettivamente misurabile durante l'avanzamento dei lavori, quella che è la più evidente pecca dei sistemi di

Tabella 1

L'applicazione dei criteri progettuali e costruttivi enunciati dall'approccio A.DE.CO.-RS ha consentito di cogliere significativi successi anche nel recupero e salvataggio di gallerie il cui avanzamento con altri criteri aveva dovuto essere abbandonato. Tra queste si rammentano:

GALLERIA	ANNO	Ø [m]	TERRENO	COPERTURA max [m]	PRODUZIONE [m/g] media ÷ max
"Tasso" (Linea ferroviaria Firenze - Arezzo)	1988	12,20	Limi sabbiosi	50	2,0 ÷ 3,2
"Targia" (Linea ferroviaria Bicocca-Siracusa)	1989	12,00	taloclastiti	50	2,0 ÷ 3,3
"San Vitale" (Linea ferroviaria Caserta - Foggia)	1991	12,50	Argille scagliose	100	1,6 ÷ 2,4
"Vasto" (Linea ferroviaria Ancona - Bari)	1993	12,20	Sabbia limosa e limo argilloso	135	1,6 ÷ 2,6
"Tartaignulle" (TGV Méditerranée Marsiglia - Lione)	1996	15	Argilla rigonfiante	110	1,4 ÷ 1,9
"Appia Antica" (Grande Raccordo Anulare G.R.A. di Roma)	1999	20,65	Piroclastiti sabbiose-ghiaiose	18	2,3 ÷ 3,3

classificazione precedenti (confrontare le classi geomeccaniche con la risposta deformativa del terreno) che sino ad oggi ha alimentato il suddetto contenzioso tra Direzione dei Lavori ed Impresa costruttrice.

Per queste importanti caratteristiche, l'approccio A.DE.CO.-RS ha suscitato notevole interesse affermandosi rapidamente quale vantaggiosa alternativa a quelli sino ad oggi seguiti. A questo proposito è stata particolarmente significativa la scelta di utilizzarlo per redigere il progetto base d'appalto e poi la progettazione costruttiva della nuova linea ferroviaria ad alta velocità Bologna-Firenze, che certamente costituisce, al momento, il più grande cantiere di *tunneling* del mondo: 84,5 Km circa di gallerie di linea da 140 m² di sezione su 90 Km di percorso totale, attraverso terreni notoriamente assai difficili da affrontare per la loro variabilità e spesso assai scarsa qualità geomeccanica. Nonostante il difficile contesto, l'opera da costruire è stata appaltata sulla base di un contratto "chiavi in mano" in cui il costruttore, avendo evidentemente ritenuto sufficientemente completo e affidabile il progetto, ha accettato di farsi carico di tutti i rischi, compreso quello geologico. Attualmente (aprile 2001) lo stato d'avanzamento dei lavori, iniziati nel luglio 1996, ha superato il 58% del totale e lo scavo a piena sezione delle gallerie sta proseguendo contemporaneamente su 26 fronti alla media di circa 1600 m/mese di galleria finita [21], [22], [23], [24].

Se con le esigenze dettate dalla pianificazione l'arte del progettare e del costruire opere in sotterraneo ha perso, forse, una parte del proprio fascino, sicuramente con l'introduzione dell'approccio A.DE.CO.-RS ha acquistato, senza costringere o condizionare la fantasia del progettista, in efficienza e funzionalità. ■

BIBLIOGRAFIA

[1] LUNARDI P., "Aspetti progettuali e costruttivi nella realizzazione di gallerie in situazioni difficili: interventi di precontenimento del cavo", *International Conference on "Rock and Soil Improvement in Underground Works"* - Milan, 18th - 20th March 1991

[2] LUNARDI P., "Avanza la galleria meccanica" - *Le Strade*, May 1996

[3] LUNARDI P., BINDI R., FOCARACCI A., "Nouvelles orientations pour le projet et la construction des tunnels dans des terrains meubles. Études et expériences sur le préconfinement de la cavité et la préconsolidation du noyau au front", *Colloque International "Tunnels et micro-tunnels en terrain meuble"*, Paris, 7-10 février 1989

[4] PANET M., "Le calcul des tunnels par la méthode convergence-confinement", *Ponts et chaussées*, 1995

[5] LOMBARDI G., AMBERG W.A., "Une méthode de calcul élasto-plastique de l'état de tension et de déformation autour d'une cavité souterraine", *Congresso Internazionale ISRM*, Denver, 1974

[6] LUNARDI P., "The influence of the rigidity of the advance core on the safety of tunnel excavation", *Gallerie e grandi opere sotterranee*, no. 52, 1997 (Italian and English)

[7] LUNARDI P., "Conception et exécution des tunnels d'après l'analyse des déformations contrôlées dans les roches et dans les sols", (Italian and French), *Article in three parts: Quarry and Construction*, March 1994, March 1995, April 1996 or *Revue Française de Géotechnique*, no. 80, 1997, no. 84, 1998, no. 86, 1999

[8] LUNARDI P., "Lo scavo delle gallerie mediante cunicolo pilota", *Politecnico di Torino, Primo ciclo di conferenze di meccanica e ingegneria delle rocce - Turin*, 25th-26th November 1986

[9] CAMPANA M., LUNARDI P., PAPINI M., "Dealing with

unexpected geological conditions in underground construction: the pilot tunnel technique», *Acts of 6th European Forum on «Cost Engineering» - Università Bicconi, Milan*, 13th-14th May 1993, Vol. 1

[10] LUNARDI P. et al., "Soft ground tunnelling in the Milan Metro and Milan Railway Link. Case histories", *Soft Ground Tunnelling Course - Institution of Civil Engineers* - London, 10th-12th July 1990

[11] LUNARDI P. et al., "Tunnel face reinforcement in soft ground design and controls during excavation", *Convegno Internazionale su "Towards New Worlds in Tunnelling"* - Acapulco 16-20 Maggio 1992

[12] 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

[13] LUNARDI P., "La stabilità del fronte di taglio nei lavori sotterranei in terreni meubles: 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

[14] LUNARDI P., *Evolution des technologies d'excavation en souterrain dans des terrains meubles*, *Comité Marocain des Grands Barrages - Rabat*, 30 Settembre 1993

[15] LUNARDI P., FOCARACCI A., "Quality Assurance in the Design and Construction of Underground Works", *International Congress on "Underground Construction in Modern Infrastructure"*, Stockholm, 7th-9th June 1998

[16] KOVARI K., "On the Existence of NATM, Erroneous Concepts behind NATM", *Tunnel*, no. 1, Year 1994 (English and German), or *Gallerie e Grandi Opere Sotterranee*, n. 46, 1995 (Italian and English).

[17] LUNARDI P., "Convergence-confinement ou extrusion-préconfinement?", *Colloque "Mécanique et Géotechnique"*, *Laboratoire de Mécanique des Solides - École Polytechnique, Paris* 19 mai 1998

[18] ANDRE D., DARDARD B., BOUVARD A., CARMES J., "La traversée des argiles du tunnel de Tartaiguille", *Tunnels et ouvrages souterrains*, no. 153, May-June 1999

[19] LUNARDI P., "The "Tartaiguille" tunnel, or the use of the A.DE.CO.-RS approach in the construction of an "impossible" tunnel", *Gallerie e grandi opere sotterranee*, no. 58, August 1999 (Italian and English)

[20] MARTEL J., ROUJON M., MICHEL D., "TGV Méditerranée - Tunnel de Tartaiguille: méthode pleine section", *Proceedings of the International Conference on "Underground works: ambitions and realities"*, Paris, 25th - 28th October 1999

[21] LUNARDI P., "The Bologna to Florence high speed rail connection. Design and construction aspects of the underground works", *Gallerie e grandi opere in sotterraneo*, no. 54, 1998 (Italian and English)

[22] "Florence to Bologna at high speed", *Tunnels and Tunnelling International*, April 1999

[23] "Progress report on the underground works on the Bologna to Florence high-speed railway line", *Tunnel*, n. 8, 2000

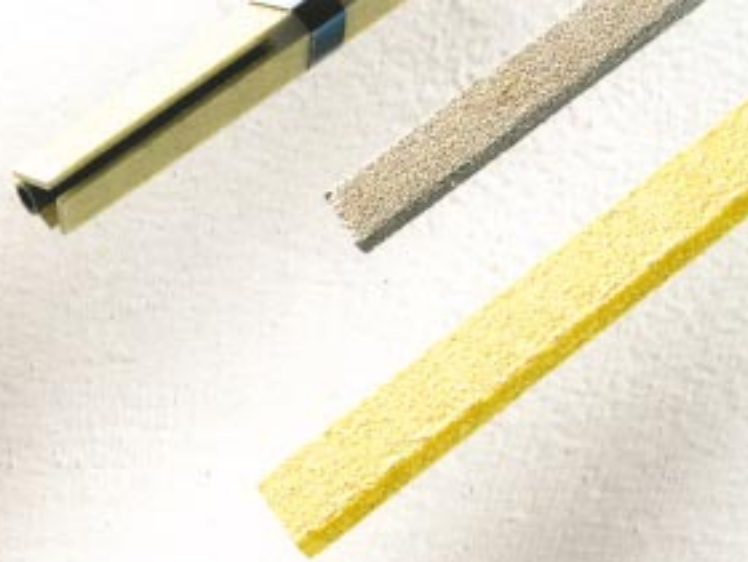
[24] LUNARDI P., "Tunneling under the Mugello motor racing circuit incorporating the ADECO-RS approach", *Tunnel*, n. 8, 2000

[25] LUNARDI P., "Tunneling under the Via Appia Antica in Rome", *Tunnels & Tunnelling International*, April 2000

ROCKSOIL Spa
Piazza San Marco 1
20121 Milano
Tel. +39 02.65.54.323
Fax +39 02.65.97.021
www.rocksoil.com



ATP COMPOSITES



ATP TUNNELLING DIVISION GRP ANCHORING SYSTEMS



ATP srl Via Casa Pagano, 31 - 84012 Angri (SA) - Italy
tel. +39 081 947777 fax +39 081 947740 - atp.pre@tin.it