

Pietro Lunardi

## L'influenza della rigidità del nucleo d'avanzamento sulla sicurezza degli scavi in galleria

L'influence de la rigidité du noyau d'avancement sur la sécurité des excavations dans les tunnels

*Nell'articolo si dimostra, sulla base di evidenze teorico-sperimentali raccolte in più di venticinque anni di ricerca condotta su oltre mille fronti di scavo, che, nell'ambito della risposta deformativa dell'ammasso all'azione dello scavo, la convergenza è solo l'ultimo stadio di un processo tenso-deformativo assai complesso, che nasce e si sviluppa a monte del fronte d'avanzamento e che costituisce la vera causa dei fenomeni che ivi si producono e dei quali essa è solo uno degli effetti. Nel lavoro si illustrano gli ultimi risultati e le tendenze della ricerca, tuttora in corso.*

*Sur la base de données technico-expérimentales acquises en plus de vingt-cinq années de recherche sur plus de mille fronts de percement, l'article montre que, dans le cadre de la réponse de déformation de l'amas à l'action du percement, la convergence ne représente que le dernier stade d'un processus de tension-déformation très complexe, qui naît et se développe en amont du front d'avancement et qui constitue la véritable cause des phénomènes qui s'y produisent et dont il n'est que l'un des effets. L'article s'achève sur la présentation des derniers résultats et des tendances de la recherche en cours.*

### 1. Generalità

Fino a non molti anni fa, realizzare una galleria o un'opera in sotterraneo era considerata un'impresa epica, dall'esito imprevedibile, e la sicurezza degli scavi si identificava nella capacità, di chi costruiva l'opera, di cautelarsi da un lato, nei riguardi dei fenomeni di distacco gravitativo, e di fronteggiare dall'altro lato, con più o meno successo, l'evoluzione delle spinte della montagna con la realizzazione di massicce opere passive di sostegno del terreno al contorno del cavo.

Negli anni sessanta e settanta si sono registrati notevoli progressi in tema di realizzazione di opere in sotterraneo. Mentre notevoli passi avanti venivano compiuti in tema di:

- modellazione matematica;
- consolidamento dei terreni e delle rocce in posto;
- strumenti e interventi di stabilizzazione;
- sistemi di controllo;

la ricerca teorica e sperimentale condotta da diversi autori poneva l'accento sull'importanza della lettura e del controllo dei fenomeni deformativi in galleria (risposta deformativa dell'ammasso allo scavo).

**Oggi, grazie ai succitati progressi, la sicurezza degli scavi si identifica con la capacità di governare la risposta deformativa dell'ammasso conseguente all'azione dello scavo.**

In tema di capacità di governare, i metodi di progettazione e costruzione più conosciuti e diffusi, quali il "Metodo di Convergenza-Confinamento" e il NATM, semplificano il problema statico di una galleria in un semplice caso piano, considerando di conseguenza la possibilità di governare la risposta deformativa **della sola cavità** (che viene identificata nel solo fenomeno di **convergenza**) mediante interventi di contenimento radiale.

Questa posizione, decisamente limitativa, ha permesso di affrontare e risolvere i problemi statici di gallerie realizzate in contesti non difficili (per le quali è possibile ottenere discreti successi anche in mancanza di idee chiare in fatto di comportamento tenso-deformativo dell'ammasso in seguito allo scavo), ma ha creato grossi problemi in casi più complessi.

Dal contributo teorico di alcuni autori e dalla ricerca sperimentale condotta dallo scrivente negli ultimi decenni è risultato evidente che in realtà:

- il problema statico di una galleria in fase di avanzamento è prettamente tridimensionale e assolutamente non schematizzabile, senza commettere gravi errori, entro un semplice caso piano;
- nell'ambito della risposta deformativa dell'am-

masso all'azione dello scavo **la convergenza è solo l'ultimo stadio di un processo tenso-deformativo assai complesso**, che nasce e si sviluppa a monte del fronte d'avanzamento e che costituisce la vera **causa** dei fenomeni che ivi si producono e dei quali essa è solo uno degli **effetti**.

È fuori di dubbio che in un processo causa-effetto, desiderando contenere quest'ultimo entro certi limiti, è indispensabile risalire alla causa che lo ha prodotto ed agire su di essa.

Si tratta, in definitiva, di intervenire sulle cause per garantire gli effetti, al contrario di quanto proposto fino ad oggi dagli approcci progettuali e costruttivi più in voga, che, ignorando le prime, si limitano ad intervenire sui secondi (le convergenze) quando ormai si è costretti a subirne le conseguenze, soprattutto nei casi in cui diventano incontrollabili (condizioni tenso-deformative difficili).

Per risalire e individuare le cause che innescano la risposta deformativa e por rimedio all'errore sin qui commesso è allora più che mai indispensabile ricondurre il problema alla realtà trattandolo come tridimensionale quale effettivamente è, introducendo nel bilancio statico della galleria in fase di avanzamento una **nuova chiave di lettura: il nucleo al fronte di scavo** inteso come quella porzione di terreno che sta a monte del fronte stesso, di forma pressoché cilindrica e avente dimensioni trasversale e longitudinale dell'ordine del diametro del tunnel.

La **deformabilità** della porzione di terreno così definita, che dipende ovviamente:

- dalle caratteristiche intrinseche d'ammasso;
  - dallo stato di coazione originario cui è sottoposto
  - dalle modalità (sistema d'avanzamento) con cui verrà prodotto l'annullamento della tensione principale minore  $\sigma_3$  all'avvicinarsi del fronte di scavo;
- può allora essere considerata la vera causa del processo tenso-deformativo che si innesca a monte dello stesso e che evolve poi a valle in corrispondenza delle pareti della cavità. La **risposta deformativa** che ne deriva e che si configura quindi come **effetto** si articola e si manifesta in tre momenti diversi in senso geometrico e cronologico (fig. 1):
- **estrusione** del nucleo in corrispondenza alla superficie delimitata dal fronte di scavo;
  - **preconvergenza** del profilo teorico di scavo a monte del fronte medesimo;
  - **convergenza** del profilo teorico di scavo a valle di quest'ultimo.

In base a questo tipo di approccio, che si avvale di supporti teorico-sperimentali raccolti in più di ven-

ticinque anni di ricerca condotta su oltre mille fronti di scavo, è dunque evidente che la convergenza rappresenta solo l'ultimo stadio della risposta deformativa del mezzo all'azione dello scavo e come, di conseguenza, gli approcci progettuali sino ad oggi utilizzati, che la considerano quale unico riferimento, debbano essere considerati limitativi e fuorvianti.

## 2. Gli studi sul comportamento del nucleo d'avanzamento

Il nucleo d'avanzamento come nuova chiave di lettura per il governo dei fenomeni deformativi in galleria è un tema relativamente nuovo nell'ambito della geomeccanica.

Negli anni settanta il Dott. Lombardi per primo ha evidenziato, nell'analisi del comportamento del cavo mediante il "Metodo delle Linee Caratteristiche" da lui stesso messo a punto, l'influenza del nucleo d'avanzamento e della sua resistenza naturale [1].

Per la prima volta il problema tenso-deformativo di una galleria in fase di avanzamento veniva affrontato in termini pseudo-tridimensionali, imprimendo una svolta importante agli studi di statica degli scavi in sotterraneo che erano sempre stati trattati esclusivamente nel piano.

In particolare, il metodo consentiva di comprendere con facilità come, aumentando la resistenza del cosiddetto "mezzo nucleo", si riducesse conseguentemente l'entità della convergenza del cavo in corrispondenza del fronte.

Questa osservazione era di grande interesse anche perché lasciava nello scrivente l'impressione che ciò dovesse avere una qualche influenza anche sul comportamento deformativo della cavità lontano dal fronte. Convinti dunque della necessità di condurre studi approfonditi su genesi ed evoluzione della risposta deformativa a monte del fronte per chiarire i rapporti tra modifica dello stato tensionale nel terreno indotta dall'avanzamento e conseguente risposta deformativa, si decise di iniziare una **ricerca** sul tema.

In particolare, si decise di dedicare un primo periodo di tempo, denominato "**prima fase di ricerca**", all'osservazione sistematica del comportamento deformativo del sistema fronte di scavo-nucleo d'avanzamento e non della sola cavità, come suggerito e proposto ancora oggi dal NATM e dai metodi da esso derivati.

In un secondo tempo, denominato "**seconda fase di ricerca**", sulla base di analisi approfondite - soprattutto in termini cronologici - dei fenomeni d'instabilità osservati nel corso dell'esecuzione di nu-

merose 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 deformativo del sistema fronte di scavo-nucleo d'avanzamento (estrusione e pre-convergenza) e quello della cavità (convergenza).

Una volta appurato che il comportamento deformativo della cavità è sistematicamente condizionato dalla rigidità del nucleo di terreno al fronte, in un terzo periodo di tempo, denominato "**terza fase di ricerca**", si è lavorato per verificare fino a che punto, agendo sulla rigidità, quindi sulla deformabilità del nucleo, si potesse regolare e controllare la risposta deformativa della cavità.

### 2.1. La prima fase di ricerca

La prima fase di ricerca, condotta come detto su almeno mille fronti di scavo, ha permesso di individuare tre tipologie di deformazione fondamentali (fig. 2):

- estrusione del fronte;**
- preconvergenza** (intesa come convergenza del profilo teorico a monte del fronte di avanzamento e strettamente dipendente dalle caratteristiche di deformabilità del nucleo in rapporto allo stato tensionale esistente);
- convergenza del cavo.**

Quindi, attraverso controlli sia strumentali sia visivi sul comportamento deformativo delle pareti di scavo è stato possibile associare ad ogni tipologia le manifestazioni d'instabilità conseguenti (si parla di instabilità ogniquale si produce intrusione di materiale in galleria oltre il profilo teorico di scavo):

- distacchi gravitativi, splaccaggi e crollo del fronte, conseguenti all'estrusione del fronte ed alla preconvergenza;
- distacchi gravitativi, splaccaggi al contorno del cavo e collasso della cavità, conseguenti ai fenomeni di convergenza del cavo.

### 2.2. La seconda fase di ricerca

La seconda fase di ricerca (verifica di eventuali collegamenti tra il comportamento deformativo del sistema fronte di scavo-nucleo d'avanzamento e quello della cavità) 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.

A questo proposito, tra numerose altre, sono apparse assai significative le esperienze e le osservazioni compiute durante gli scavi del Traforo autostradale del Frejus e delle gallerie S. Stefano, S. Elia, Tasso.

### Il Traforo autostradale del Frejus (1975)

Il Traforo autostradale del Frejus (di 13 Km di lunghezza), in considerazione del fatto eccezionale che ci si trovava per la prima volta ad affrontare una galleria da scavare entro una formazione di calcescisti litologicamente omogenea lungo il tracciato, con coperture variabili e soggetta ad un campo di tensioni crescenti e mutevoli con la profondità (0÷1700 m), è stata un'opera di particolare interesse per chi, come noi, si accingeva a studiare la genesi e lo sviluppo dei fenomeni deformativi conseguenti all'avanzamento. Tenuto conto di quanto era noto dell'esperienza fatta da Sommeiller durante la realizzazione del tunnel ferroviario adiacente, avvenuta circa un secolo prima, l'avanzamento avveniva 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 cm di spessore, veniva gettato a seguire e completava l'opera [2].

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 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 diametrale 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 5173 i lavori non furono temporaneamente arrestati per le ferie estive in una zona d'ammasso omogenea, in corrispondenza ad una copertura di circa 1200 m.

La stazione di misura per le convergenze n. 6, messa subito in opera ad un metro dal fronte (progr. 5172), presentava, dopo i 15 giorni di arresto, una deformazione massima di circa 10 cm. Si trattava indubbiamente di deformazione di solo fluage (a carico costante), essendo il fronte, nel frattempo, rimasto completamente fermo. Ripresi gli scavi, la convergenza diametrale, nella medesima sezione, s'incrementava assai bruscamente su valori mai misurati prima, fino a raggiungere 60 cm dopo 3 mesi men-

tre più avanti, proseguendo l'avanzamento, essa riassumeva dopo poche decine di metri i valori normali (convergenza diametrale 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 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 detensionamento 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.

#### La galleria "S. Stefano" (1984)

La galleria S. Stefano, che fa parte del nuovo tracciato a doppio binario della linea ferroviaria Genova-Ventimiglia, attraversa una formazione di flysch costituita da scisti argillosi ed argilloso-arenacei con sottili banchi di arenarie e calcari marnosi ripiegati ed intensamente fratturati.

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 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 cominciarono 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 d'avanzamento 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 d'avanzamento (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.

Si fa osservare 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 in una parte di galleria già stabilizzata, si è verificato solo quando è venuto a mancare il contributo di rigidezza del nucleo al fronte d'avanzamento.

#### La galleria "S. Elia" (1985)

La galleria S. Elia, che fa parte dell'autostrada Messina-Palermo, dopo aver attraversato materiale detritico piuttosto grossolano, si addentra in una serie flyschoidale di origine sedimentaria, costituita da alternanze argilloso-arenacee o marnoso-arenacee. Il passaggio avviene attraverso una breve zona di transizione costituita da roccia assai fratturata.

Il progetto prevedeva tradizionalmente l'avanzamento a mezza sezione, previa esecuzione di un trattamento di preconsolidamento mediante jet-grouting al contorno del cavo nelle zone detritiche, con messa in opera di centine e spritz-beton nella roccia più consistente. Il rivestimento definitivo di calcestruzzo, chiuso con arco rovescio, veniva realizzato a seguire. Lo scavo, attraversata senza problemi, grazie al preconsolidamento, la fascia di detrito, si addentrava nella formazione migliore apparentemente senza grossi problemi. Il fronte appariva stabile a breve termine, con contenuti fenomeni deformativi. Penetrando ulteriormente nella zona di transizione, veniva intercettata una falda d'acqua in pressione, che produceva in breve tempo l'instabilità del fronte. In seguito al crollo di quest'ultimo, poche ore dopo si verificava, a ritroso per alcune decine di metri, il collasso del perimetro della mezza sezione, già rivestita con centine e spritz-beton, con convergenze radiali superiori al metro.

#### La galleria "Tasso" (1988)

La galleria Tasso fa parte di una serie di gallerie scavate verso la fine degli anni '80 per la realizzazione della nuova linea ferroviaria ad Alta Velocità 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 suborizzontali 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.

Dallo studio e dall'analisi dei casi illustrati furono tratti numerosi 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'innescare dei fenomeni di estrusione e preconvergenza, 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 (fig. 3) usciva, dunque, rafforzata l'impressione che la rigidezza del nucleo al fronte d'avanzamento giocasse un ruolo determinante sulla stabilità della galleria a breve e a lungo termine.

#### 2.3. La terza fase di ricerca

Confortati dai risultati conseguiti, si diede inizio alla terza fase di ricerca, per verificare se veramente fosse possibile, agendo sulla rigidezza, quindi sulla deformabilità del nucleo, regolare e controllare la risposta deformativa della cavità a breve e a lungo termine. Per far ciò si dovettero studiare e mettere a punto tecnologie nuove che permettessero di agire sul nucleo per variane le caratteristiche di deformabilità, operando con consolidamenti lanciati a monte del fronte di avanzamento con sistemi protettivi (gusci di jet-grouting orizzontale, pretaglio meccanico, ecc.) e di

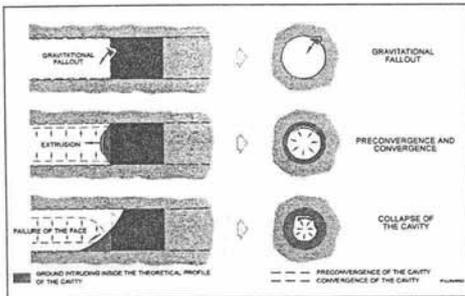


Fig. 3 - Sintesi della 2ª fase di ricerca - Il comportamento deformativo del fronte condiziona quello della cavità.  
Outline of the 2nd research phase - The deformation behavior of the "face-core" system conditions that of the cavity.

rinforzo (consolidamento del nucleo d'avanzamento mediante tubi di vetroresina, jet-grouting, oltre ai tradizionali congelamento ed iniezioni) (vedi concetto di precontenimento del cavo e nascita dei "sistemi conservativi" - messa a punto dell'approccio di progettazione e costruzione di gallerie basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli [3] [4] [5] [6]).

Vediamo, in particolare, che cosa si è fatto in un cantiere sperimentale particolarmente significativo.

**La galleria "Vasto"**

Il tracciato della galleria, parte della nuova linea ferroviaria Ancona-Bari, si sviluppa per circa 6200 m nel sottosuolo del rilievo collinare che ospita l'abitato di Vasto.

Dal punto di vista geologico, detto rilievo risulta costituito, nella parte basale e mediana, da un complesso di terreni 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.

**Breve storia dello scavo**

I lavori, iniziati nel 1984 all'attacco Nord, si sono 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 successivamente per sottomurazione ed il getto dell'arco rovescio completava l'intervento. Dopo il primo importante dissesto, si tentò di riprendere gli avanzamenti mettendo a punto più soluzioni (fig. 4), che si rivelarono però del tutto inadeguate, fino a prodursi un disastroso evento franoso a prog. km 38+075, sotto 38 m di copertura. Il dissesto coinvolse il fronte e, quindi, una tratta di circa 40 m a valle dello stesso, producendo nel rivestimento definitivo deformazioni di enorme entità (superiori al metro), tali da rendere impossibile la prosecuzione dei lavori.

La Rocksoil S.p.A. di Milano, chiamata 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 cambiando radicalmente l'impostazione progettuale sulla base dei principi dell'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli (fig. 5) [6]. Qui di seguito viene esposto come si è proceduto in fase progettuale e costruttiva.

**Fase conoscitiva per la galleria "Vasto"**

L'approccio alla progettazione basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli prevede di iniziare lo studio di qualsiasi galleria da una fase conoscitiva, durante la quale il progettista, in relazione ai terreni interessati dalla galleria stessa, procede alla caratterizzazione del mezzo in termini di meccanica delle rocce o dei suoli per compiere l'analisi degli equilibri naturali preesistenti e poter ope-

rare correttamente nella successiva fase di diagnosi. I terreni interessati dai lavori di scavo ed appartenenti alla formazione argillosa di base sono 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, hanno comunque evidenziato valori di resistenza mediamente assai scarsi.

Sono state inoltre realizzate prove di "estrusione in cella triassiale", una prova ideata e messa a punto dalla Rocksoil S.p.A. di Milano per essere utilizzata specificatamente durante la fase di diagnosi allo scopo di simulare la risposta deformativa del sistema fronte di scavo-nucleo d'avanzamento; con questa prova è possibile modellare in laboratorio l'avanzamento dello scavo di una galleria nella situazione tensionale reale del terreno in situ.

Queste prove, integrate con semplici modelli matematici agli elementi finiti, hanno consentito anche la taratura dei parametri geomeccanici (c,  $\phi$ , 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 = 20 - 40 t/m<sup>2</sup>
- $c'$  = coesione drenata = 0 - 20 t/m<sup>2</sup>
- $\phi_u$  = angolo d'attrito non drenato = 0° - 10°

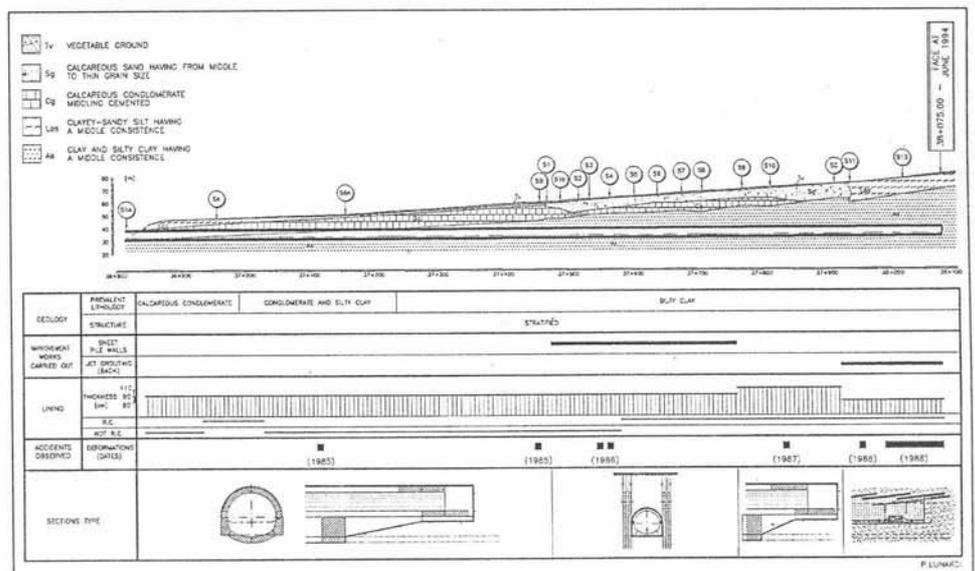


Fig. 4 - Linea ferroviaria Ancona-Bari - "Galleria di Vasto" - Interventi eseguiti e dissesti (1984-1990). Ancona to Bari railway line - "Vasto" tunnel - Northern Portal - Methods carried out and accidents that happened (1984-1990)

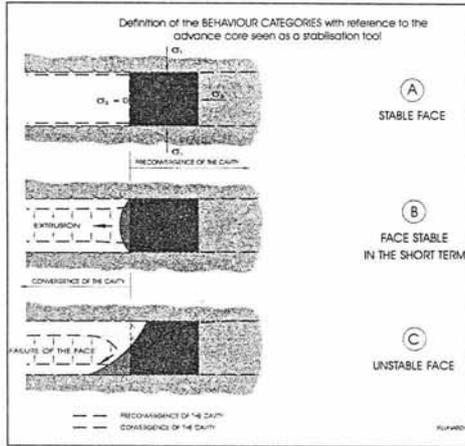


Fig. 6 - Definizione di categorie di comportamento con riferimento al nucleo d'avanzamento visto come strumento di stabilizzazione.

Definition of the behaviour categories with reference to the advance core seen as a stabilisation tool.

$\phi^*$  = angolo d'attrito drenato =  $18^\circ - 24^\circ$

E = modulo elastico di Young = 5000 - 50000 t/m<sup>2</sup>.

**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 deformativo del fronte d'avanzamento 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 categorie fondamentali A, B e C previste dall'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli (fig. 6). Lo studio di diagnosi è quindi proseguito con l'analisi dei meccanismi di rottura e dei cinematismi 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 però nella presente trattazione.

**Valutazione della categoria di comportamento**

La valutazione della categoria di comportamento lungo il tracciato è stata condotta attraverso due diverse procedure (fig. 7), 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 preconvergenza 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.

**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 (categoria C: 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 sia al contorno del nucleo (azione protettiva) sia direttamente sullo stesso (azione consolidante). Si sono quindi composte tre sezioni tipo (fig. 8), 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 pretaglio meccanico. Nei terreni che presentano valori di resistenza al taglio e coesione non drenata tali da sconsigliare l'applicazione di tale tecnologia è possibile ottenere una fascia di terreno consolidato in avanzamento al contorno del cavo e del nucleo mediante iniezioni 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-be-

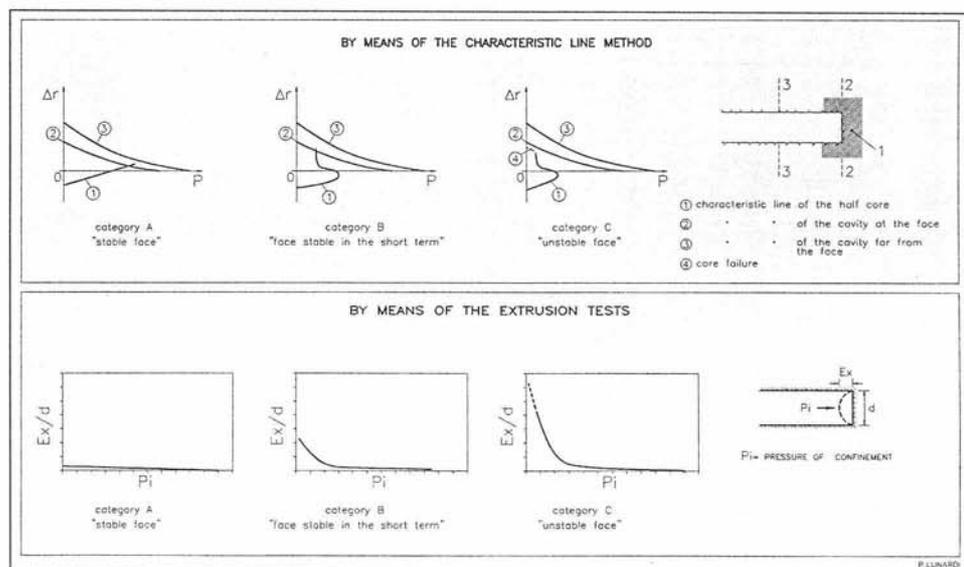


Fig. 7 - Fase di diagnosi: previsione della categoria di comportamento. Prediction of the behaviour category.

ton, 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. 9). 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  $P$ , necessaria per la stabilizzazione del fronte (definita come pressione di confine tra il braccio "elastico" e quello "elastoplastico" della curva di estrusione), si

valuta su 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.

**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. Allo stato attuale sono stati eseguiti 2100 m dall'imbocco Sud e circa 2000 m dall'imbocco Nord. La produzione media, lavorando 7 giorni/settimana è stata di circa 50 m/mese di galleria finita. In figura 10 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'innescio dei fenomeni di estrusione e preconvergenza, dai quali

dipende il fenomeno di convergenza che risulta, di conseguenza, più contenuta.

**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. 11, 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 rigidità media) si sviluppi una rispo-

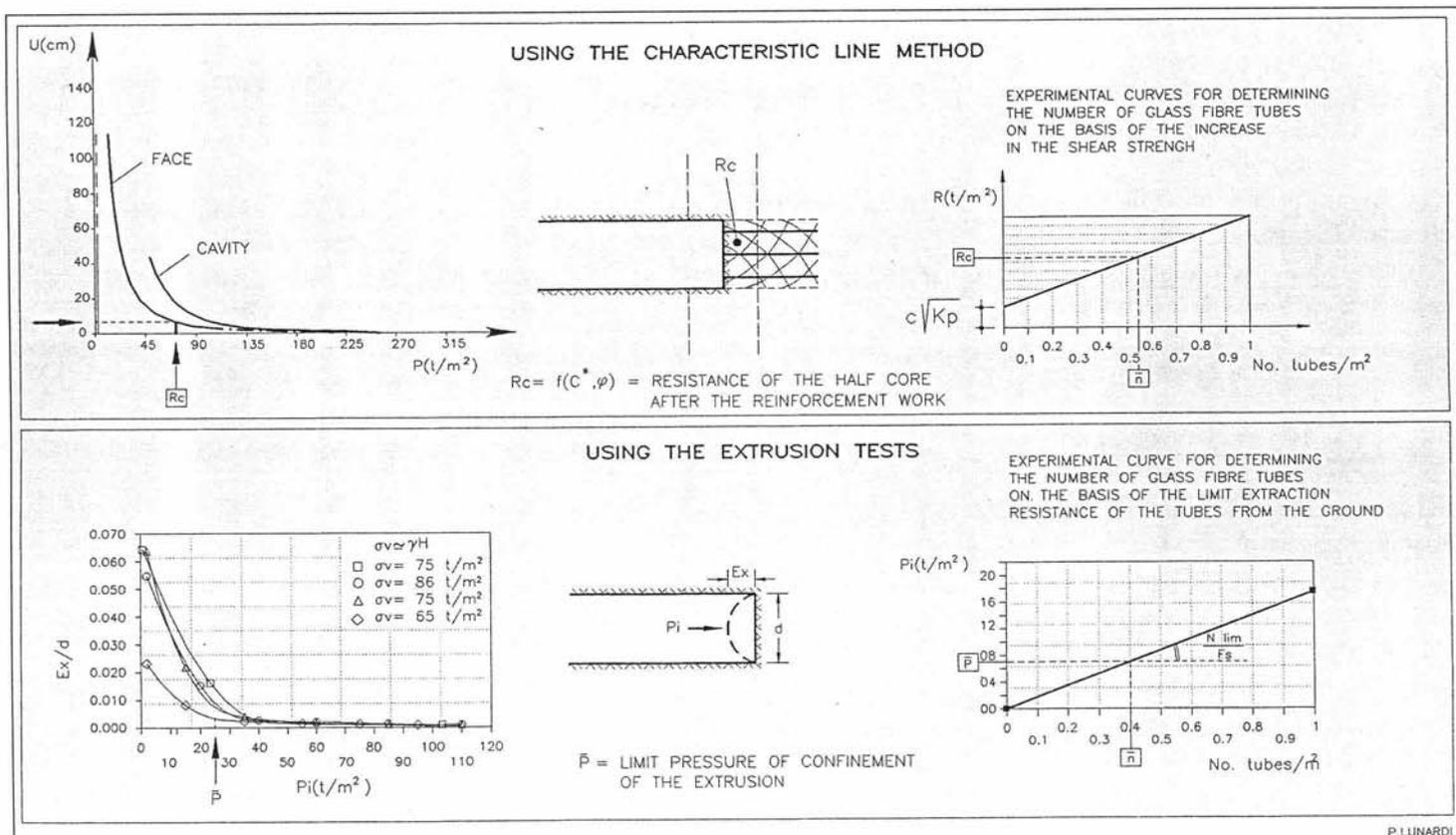


Fig. 9 - Fase di terapia: valutazione dell'intensità di consolidamento del nucleo necessaria per evitare la sua instabilità. Therapy phase: Evaluation of the core reinforcement intensity needed to prevent core instability.

sta 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 quadruplicate 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 Sintesi della terza fase di ricerca

Lo studio e le sperimentazioni condotte nella galleria "Vasto" evidenziano dunque, 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 (fig. 12, 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 attraverso l'esecuzione di 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.

### 3. Il nucleo d'avanzamento come strumento di stabilizzazione

I risultati conseguenti alla ricerca, in estrema sintesi:

- evidenziano che la risposta deformativa dell'am-

masso allo scavo non è solo convergenza, ma è composta da estrusione, preconvergenza e convergenza. La convergenza è solo una componente;

- mostrano che detta risposta deformativa nasce a monte del fronte in corrispondenza al nucleo d'avanzamento ed evolve a valle dello stesso lungo la cavità;

- indicano chiaramente l'esistenza di un legame diretto tra la risposta deformativa del sistema fronte di scavo-nucleo d'avanzamento (estrusione e preconvergenza) e quella della cavità (convergenza), 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 in quanto, come si è visto, l'entità dei carichi agenti a lungo termine sul rivestimento dipende soprattutto dalla rigidità del nucleo;

- 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

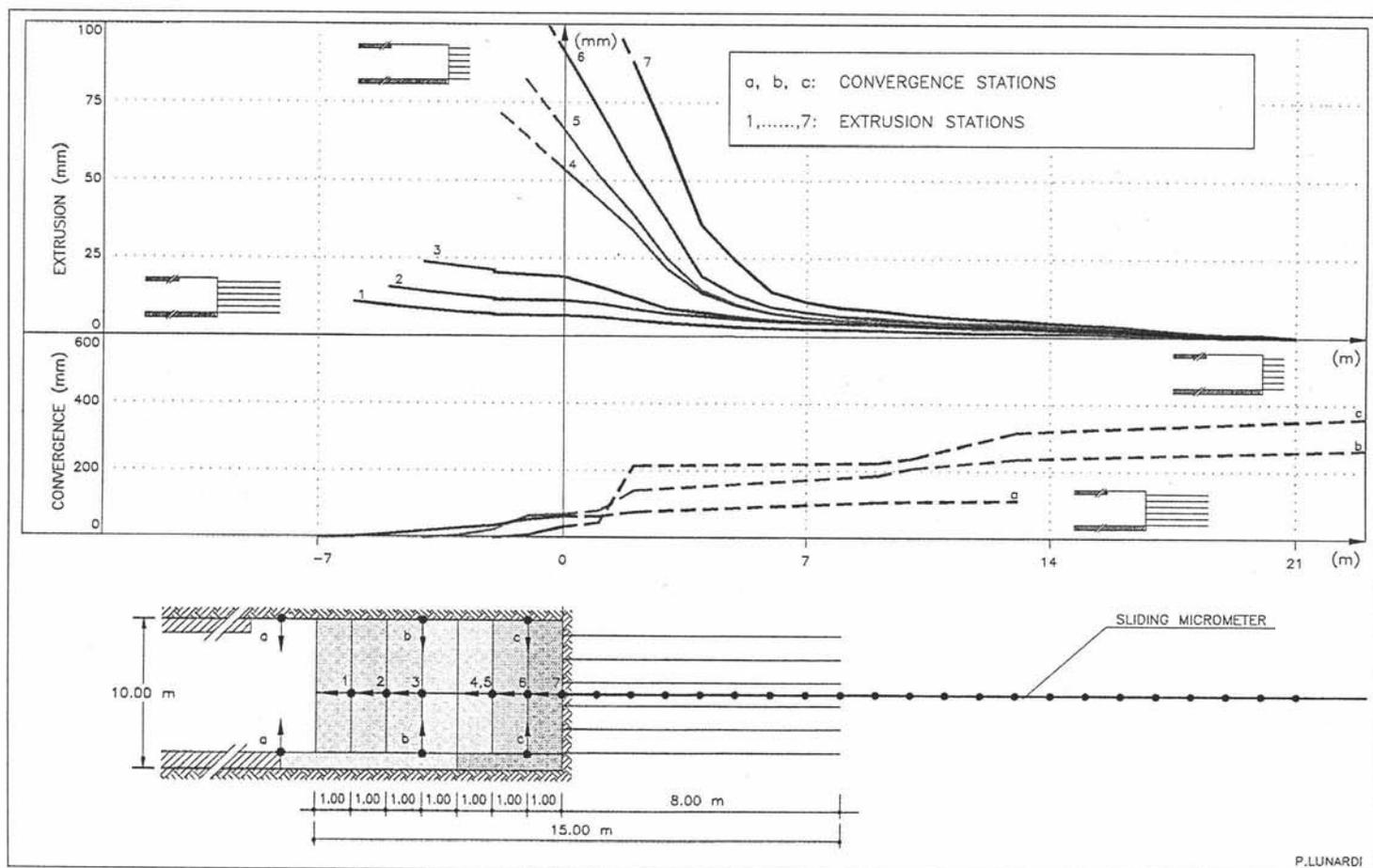


Fig. 11- Linea ferroviaria Ancona-Bari - Galleria "Vasto" - Fase di verifica: diagrammi estrusione-convergenza in funzione dell'avanzamento. Ancona to Bari railway line - "Vasto" tunnel - Monitoring phase: extrusion-convergence diagrams in relation to the advance.

conseguenza anche la risposta deformativa della cavità (convergenza).

Detti risultati, in definitiva, permettono di guardare al nucleo d'avanzamento come **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 sistema fronte di scavo - nucleo d'avanzamento**.

Le tre fondamentali situazioni tenso-deformative del sistema fronte di scavo - nucleo d'avanzamento individuano anche i tre possibili tipi di comportamento della cavità (fig. 6):

- comportamento a fronte stabile (categoria di comportamento A);
- comportamento a fronte stabile a breve termine (categoria 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 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 già permesso di cogliere numerosi significativi successi. In fig. 13 sono riuniti i diagrammi delle produzioni ottenute durante lo scavo di gallerie progettate dallo scrivente e realizzate in Italia negli ultimi dieci anni, nelle più diverse situazioni geologiche e sotto i più svariati stati tensionali [7]. Risalta evidente non solo l'elevata velocità media d'avanzamento mantenuta in relazione al tipo di terreni attraversati, ma soprattutto la linearità delle produzioni, indice sicuro di una costruzione avvenuta con cadenze regolari e priva d'intoppi. Oggi, dunque, è finalmente possibile affrontare la realizzazione delle gallerie anche più difficili con gli stessi criteri di sicurezza adottati in quelle di più facile realizzazione, prevedendone in maniera attendibile tempi e costi di realizzazione (industrializzazione degli scavi).

L'eccezionalità dei risultati ottenuti nell'affrontare situazioni di scavo assai difficili non deve tuttavia far dimenticare la complessità e la delicatezza del con-

testo in cui si opera. È facile, infatti, incorrere in inadempimenti costruttivi, nei riguardi delle prescrizioni progettuali, che vengono puntualmente pagate a caro prezzo. Per questo è utile illustrare brevemente due casi emblematici: uno verificatosi durante la realizzazione della galleria S. Egidio, sul tracciato della S.S. 318 di Valfabbrica, l'altro accaduto durante l'avanzamento della stessa galleria "Vasto" precedentemente trattata.

### Il caso della galleria "S. Egidio"

La galleria "S. Egidio", facente parte della nuova SS 318 di Valfabbrica, è lunga circa 750 m e si sviluppa, con coperture massime di circa 35 m, nei sedimenti lacustri del bacino Tiberino presso Perugia. I terreni interessati sono costituiti da stratificazioni limo-argillose cui sono intercalati livelli sabbio-limosi, acquiferi, con grado di addensamento e cementificazione molto variabili.

Il progetto d'appalto prevedeva lo scavo a piena sezione, previo preconsolidamento del nucleo e del contorno del cavo ed esecuzione del priverestimento di spritz-beton e centine, da chiudere con l'arco rovescio entro una distanza dal fronte non maggiore di un diametro di scavo. L'attacco della galleria avveniva, invece, a sezione parzializzata, preconsolidando il nucleo d'avanzamento e il contorno del cavo nella sola zona di calotta, mentre la chiusura del priverestimento avveniva solo dopo il ribasso alla piena sezione, a qualche decina di metri di distanza dal fronte.

All'aumentare delle coperture e quindi dello stato tensionale nel mezzo, anche a causa delle scarse caratteristiche del materiale interessato, si passò in brevissimo tempo da una situazione di fronte stabile a breve termine ad una di fronte instabile. A seguito del collasso del fronte si produceva il crollo della cavità, con convergenze diametrali dell'ordine di 60-70 cm per circa 20 m dal fronte, fino al punto in cui il priverestimento era chiuso dall'arco rovescio.

### Galleria "Vasto": analisi di un dissesto

L'avanzamento della galleria stava procedendo con regolarità, previo consolidamento del nucleo con tubi di vetroresina ed esecuzione di una coronella di jet-grouting al contorno del cavo. Come imposto dal progetto, l'arco rovescio con le murette veniva gettato a ridosso del fronte di scavo, al massimo entro 1,0 Ø da quest'ultimo. Le produzioni medie erano di circa 1,5 m/giorno e i fenomeni deformativi (estrazione e convergenza) assai ridotti.

In seguito ad un fermo di cantiere dovuto ad uno sciopero del personale, i lavori di scavo, per il desi-

derio di recuperare il tempo perduto (e forse anche per l'eccessiva confidenza determinata dall'apparente facilità con cui si poteva avanzare), riprendevano in maniera non correttamente coordinata: il fronte di scavo non veniva accuratamente sagomato a forma concava come prescritto, il jet-grouting non veniva operato completamente sino ad abbracciare tutto il futuro piedritto, l'arco rovescio rimaneva troppo distanziato rispetto al fronte d'avanzamento. In seguito a ciò, si produceva quasi improvvisamente un dissesto parziale del fronte, seguito, dopo breve tempo, dal collasso della cavità per alcune decine di metri a valle del fronte.

### Spunti d'osservazione

I casi su esposti evidenziano l'importanza del rispetto delle prescrizioni progettuali. Infatti, se:

1. la canalizzazione degli stati tensionali al contorno della galleria non avviene perfettamente;
  2. l'arco rovescio non viene messo in opera immediatamente a ridosso del fronte di scavo;
- la presenza di interventi anche importanti di protezione e di irrigidimento del nucleo d'avanzamento può non essere sufficiente a garantire la sicurezza degli scavi.

Avanzando in situazioni tenso-deformative difficili, è **fondamentale** curare che il passaggio tra le due situazioni:

1. terreno al contorno del profilo teorico di scavo contenuto dal nucleo più o meno rinforzato;
2. stesso terreno contenuto dalle opere di rivestimento;

avvenga gradualmente e senza scompensi tensionali e deformativi.

In particolare, è assolutamente indispensabile assicurare una continuità a 360° al contenimento della cavità anche in prossimità del fronte di scavo, gettando l'arco rovescio a distanza non superiore a 1,0 Ø. Qualora le particolari situazioni tenso-deformative lo richiedessero, è sempre possibile costruire un rivestimento capace di incassare deformazioni anche importanti mediante l'inserimento, ad esempio, di giunti di espansione.

## 4. La rigidità del nucleo di avanzamento nella pratica progettuale

La complessità dei meccanismi che si instaurano a monte del fronte di avanzamento e l'iniziale difficoltà ad individuare criteri di valutazione oggettivi del comportamento tenso-deformativo del nucleo di avanzamento, hanno comportato, al di là dell'intuizione e dei riscontri sperimentali raccolti, la neces-

sità di produrre uno sforzo di interpretazione organico ed unitario dei numerosi aspetti indagati. Quanto verrà esposto nel seguito trae spunto dalle osservazioni e dalle esperienze illustrate in precedenza, oltre che da un confronto sistematico con le analisi numeriche svolte, e può essere considerato un aggiornamento su quanto fatto e su quanto ancora si sta sviluppando riguardo alla possibilità di utilizzare oggettivamente il nucleo di avanzamento come strumento di stabilizzazione abituale nella pratica progettuale e, di conseguenza, nella pratica costruttiva.

**4.1. Approccio analitico**

La formulazione analitica classica di Lombardi delle Linee Caratteristiche precedentemente citata, pur

evidenziando l'importanza dei fenomeni deformativi che si sviluppano già a monte del fronte di avanzamento, non consente una valutazione quantitativa diretta degli effetti prodotti dagli interventi di consolidamento del nucleo e di precontenimento del cavo sul comportamento tenso-deformativo della cavità. La rielaborazione delle esperienze maturate in questi anni ha però permesso di introdurre elementi di novità, nell'utilizzo di questo metodo di calcolo, che potranno essere utili per un suo futuro auspicabile aggiornamento.

Infatti, benché oggi si possa contare sull'ausilio di sofisticati modelli numerici tridimensionali, capaci di simulare l'evoluzione dei fenomeni in gioco in maniera soddisfacente, la possibilità di studiare le diverse si-

tuazioni mediante uno strumento di calcolo grafico semplice ed immediato, come le linee caratteristiche, rimane di estrema utilità.

Nei cantieri, ad esempio, si è ripetutamente osservato che la realizzazione di interventi di consolidamento del nucleo d'avanzamento e di preconsolidamento al contorno del cavo comporta sistematicamente una sensibile riduzione dei fenomeni deformativi della cavità (estrusioni, preconvergenze e convergenze) e dei carichi a breve e a lungo termine sui rivestimenti, producendo un evidente miglioramento del comportamento tenso-deformativo del materiale, quasi fosse in campo elastico.

*Possiamo citare, tra numerosi casi, quello della galleria S. Vitale (linea ferroviaria Caserta-Foggia) il cui avanzamento, affrontato con criteri tradizionali (NATM) entro argille scagliose di pessima qualità geomeccanica in rapporto agli stati tensionali in gioco, si era dovuto arrestare registrando convergenze metriche e spinte incontenibili dalle opere di rivestimento [5]. La stessa galleria, affrontata garantendo la giusta rigidità al nucleo d'avanzamento mediante interventi di protezione e di rinforzo dello stesso, ha mostrato un comportamento tenso-deformativo completamente diverso, permettendo di raggiungere produzioni medie di oltre 50 m/mese, con convergenze di ordine decimetrico e spinte radiali medie sul rivestimento definitivo di cemento armato dell'ordine di 50 ÷ 60 t/m<sup>2</sup>. Le previsioni di calcolo, basate sulle linee caratteristiche della galleria valutate per i parametri geomeccanici dedotti dalla back-analysis della storia tenso-deformativa precedente (NATM), avevano indicato che la stabilizzazione del cavo sarebbe stata ottenuta per valori di convergenza radiale dell'ordine di 14 cm, cui avrebbe corrisposto una pressione di stabilizzazione pari a 80 t/m<sup>2</sup> valore che si è dunque rivelato sensibilmente superiore a quello effettivamente misurato.*

Si è cercato di tradurre le suddette osservazioni sperimentali nel calcolo (fig. 14), ipotizzando che gli interventi in avanzamento fossero in grado di evitare, soprattutto se accompagnati da cadenze di scavo sostenute e costanti, il decadimento dei valori di resistenza dell'ammasso dai valori di picco a quelli residui. Tale ipotesi consente infatti di ottenere convergenze della cavità minori a parità di pressione di contenimento considerata. Riguardo poi all'effetto stabilizzante prodotto dagli interventi di precontenimento del cavo lanciati in avanzamento al contorno dello stesso (jet-grouting orizzontale, iniezioni attraverso tubi di vetroresina, ecc.), si è computato nel calcolo analitico delle linee caratteristiche inserendo, nella schematizzazione matematica, la presenza al

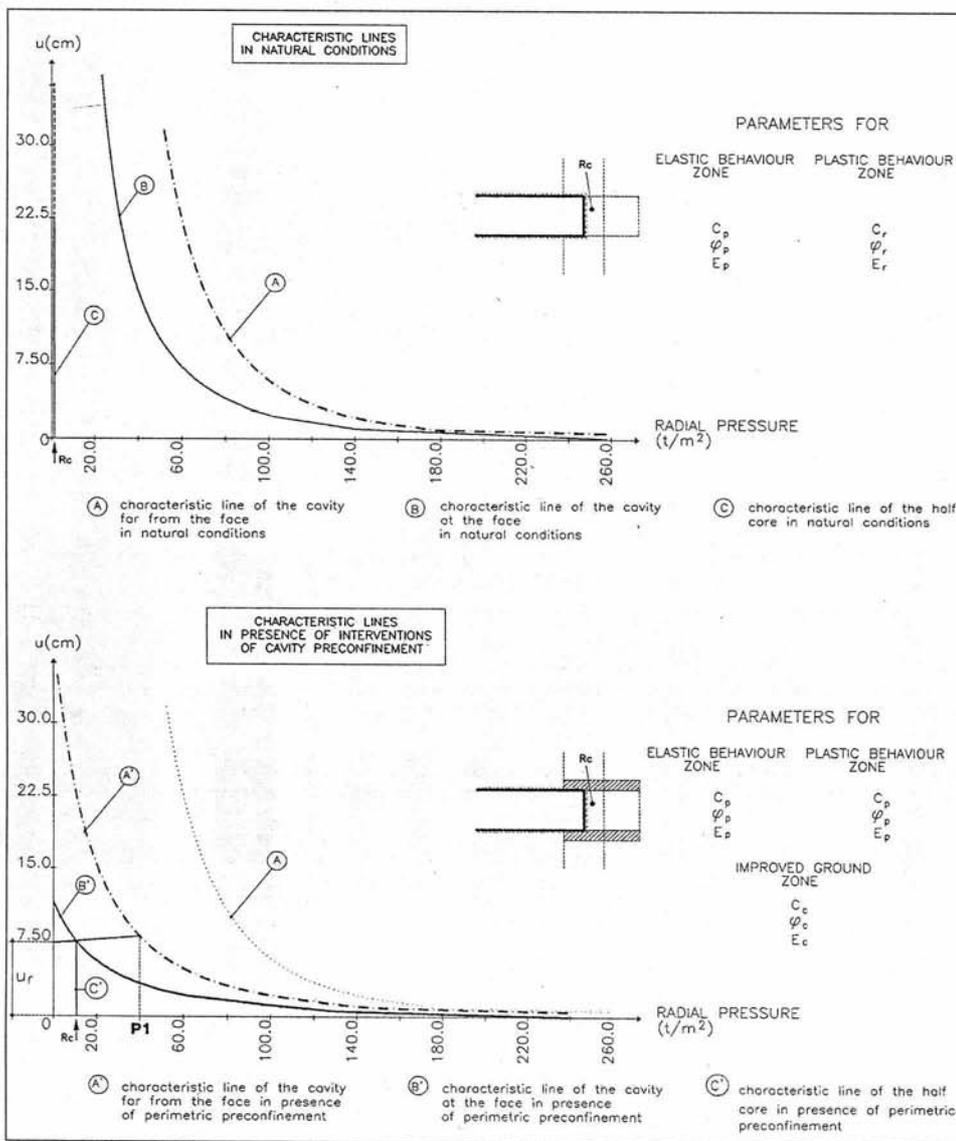


Fig. 14 - Fase di terapia: modifica delle linee caratteristiche della cavità in funzione degli interventi di consolidamento del nucleo e precontenimento del cavo. Therapy phase: Changes of the characteristic lines of a tunnel in function of the interventions of core reinforcement and cavity preconteniment.

contorno del cavo di una fascia anulare di materiale con caratteristiche meccaniche proprie. Le linee caratteristiche conseguenti mostrano un andamento assai più piatto e i valori di pressione di stabilizzazione e convergenza che si calcolano risultano assai più vicini a quelli reali.

Riguardo, invece, all'effetto stabilizzante del consolidamento del nucleo, lo si è introdotto facilmente nel calcolo modificando la linea caratteristica del cosiddetto "mezzo nucleo", per tener conto della maggior resistenza di questo. Si vede, allora, che il punto di intersezione tra le linee caratteristiche del nucleo e della cavità al fronte trasla verso il ramo elastico di quest'ultima, evidenziando un valore di convergenza nella sezione del fronte proporzionalmente più ridotto, ma con la conseguenza che a parità di rivestimento considerato la pressione di stabilizzazione finale che si determina è più elevata che se non si fosse consolidato il nucleo (fig. 15).

Ciò è in netto contrasto con le evidenze sperimentali, che, come abbiamo detto, evidenziano sistematicamente convergenze e pressioni di stabilizzazione finali inferiori a quelle determinate con le linee caratteristiche, mostrando chiaramente che la rigidità del nucleo d'avanzamento ha un'influenza significativa anche sull'andamento delle linee della cavità al fronte e lontano da esso, che appare sensibilmente più piatto (comportamento pseudo-elastico).

Per risolvere questa contraddizione, evidentemente dovuta alle semplificazioni del modello teorico utilizzato, abbiamo studiato meticolosamente, anche sotto il profilo quantitativo, i fenomeni deformativi che si verificano a monte del fronte di scavo.

## 4.2. Approccio semi-empirico

Lo studio dei fenomeni deformativi che si producono a monte del fronte di scavo è stato possibile grazie:

- alle straordinarie opportunità che le misure di estrusione del nucleo d'avanzamento mediante *sliding deformer*, di recente introduzione, hanno offerto;
- alla messa a punto di misure combinate di estrusione del nucleo e convergenza del cavo, che ha permesso di ottenere una sicura conferma del ruolo svolto dalla rigidità del primo sull'entità finale della seconda (nucleo più rigido → convergenza più ridotta e viceversa), la lettura delle quali costituisce 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.

- all'analisi dei diagrammi ottenuti dalle suddette misure di estrusione, che ha consentito, come vedremo, di risalire al valore delle preconvergenze del cavo e di mettere a punto un approccio di tipo semi-empirico all'utilizzo del nucleo d'avanzamento e della sua rigidità nella pratica progettuale.

Infatti (fig. 16), dall'elaborazione dei diagrammi delle misure di estrusione del nucleo (*sliding deformer*) eseguite in galleria, ragionando per semplici equilibri dei volumi in gioco (volume di terreno intruso attraverso il profilo teorico della cavità = volume di terreno estruso attraverso il fronte di scavo), si è trovata la strada per correlare l'estrusione stessa alla preconvergenza del cavo.

Il passaggio è stato successivamente perfezionato studiando, in diversi tipi di terreno e nelle più svariate condizioni tenso-deformative, la mappatura degli spostamenti puntuali, rilevati topograficamente, di innumerevoli fronti di scavo.

Lo studio ha permesso di stabilire che il nucleo d'avanzamento estrude, attraverso la parete del fronte, secondo tre tipologie deformative fondamentali, a seconda del tipo di materiale in gioco e dello stato tensionale cui è sottoposto:

- **tipologia cilindrica**, parallelamente all'asse della galleria (il fronte presenta un movimento di tipo traslazionale, con estrusioni di valore costante lungo tutta la sua superficie);
- **tipologia a calotta sferica** (l'estrusione massima si evidenzia in corrispondenza del piano dei centri della galleria o immediatamente al di sotto di questo);
- **tipologia combinata** cilindrica-calotta sferica (Il fronte è soggetto superficialmente ad un movimento combinazione dei due movimenti precedentemente descritti). È la tipologia che più facilmente si riscontra nella pratica.

Si è quindi messo a punto l'abaco riportato in fig. 16, che per la prima volta consente di ricostruire l'intera storia deformativa di una sezione trasversale di galleria (che, come abbiamo precedentemente visto, si compone di preconvergenza + convergenza e non della sola convergenza, l'unica che sino ad oggi poteva sempre essere misurata).

L'abaco è efficacemente utilizzabile per la taratura dei calcoli teorici, ed in particolare del metodo delle linee caratteristiche:

- in fase di terapia, nota la resistenza del "mezzo nucleo" eventualmente consolidato, potrà essere individuato sul grafico delle linee caratteristiche il valore teorico della preconvergenza al fronte di

scavo, che attraverso l'abaco in questione sarà possibile confrontare, in fase di verifica, con quello reale ricavato indirettamente dalle misure di estrusione;

- in fase di verifica, conoscendo il valore dell'estrusione e quindi - attraverso l'abaco - quello della preconvergenza al fronte di scavo, potrà essere individuato sul grafico delle linee caratteristiche, nota la resistenza del mezzo nucleo, il reale punto di equilibrio tra le linee caratteristiche del "mezzo nucleo" e della cavità al fronte. Altri punti appartenenti alla linea caratteristica reale, valida in corrispondenza del fronte di scavo, potranno essere individuati in maniera analoga, variando di volta in volta la rigidità del nucleo.

## 5. Considerazioni conclusive

Tra i diversi chiarimenti che ci sono stati richiesti in questi anni riguardo al nuovo approccio alla progettazione e costruzione di opere in sotterraneo che, in seguito ai risultati delle ricerche condotte, proponiamo ormai da qualche anno, ce ne sono tre ricorrenti:

1. È realmente possibile, utilizzando il nucleo come strumento di stabilizzazione, ottenere un rivestimento definitivo meno sollecitato?
2. Il rivestimento della cavità con la propria rigidità, eventualmente agendo anche sulla distanza della sua posa in opera rispetto al fronte, può avere un ruolo nel controllo dei fenomeni deformativi che avvengono a monte del fronte (estrusioni, preconvergenze)?

3. Quali sono i limiti del nuovo approccio?

Cerchiamo, prima di concludere, di rispondere in maniera sintetica, ma esaustiva.

1. È noto che i carichi sui rivestimenti sono dovuti:
  - alle vere e proprie spinte d'ammasso, che insorgono a seguito degli aumenti di volume ( $+\Delta V/V$ ) del mezzo al contorno del cavo;
  - al peso proprio del materiale che plasticizza al contorno del cavo;
  - ai fenomeni differiti per effetto del *fluage*.

Sappiamo, inoltre, che se si mantiene rigido il nucleo si limita fortemente qualsiasi movimento di estrusione e di preconvergenza del cavo.

D'altra parte, limitando fortemente i movimenti di estrusione e di preconvergenza del cavo e quindi lo stato di deformazione dell'ammasso interessato:

- da un lato, se ne conservano le caratteristiche di resistenza: esso, quindi, può collaborare più efficacemente alla statica della galleria, assorbendo parte del carico che altrimenti andrebbe a sollecitare le opere di rivestimento della stessa;

- dall'altro lato, si riduce fortemente la fascia di terreno a comportamento plastico che si forma al contorno delle pareti di scavo, riducendo conseguentemente sia l'importanza dei solidi di carico che andrebbero a sollecitare, per effetto gravitativo, le stesse opere di rivestimento, sia le spinte differite dovute ai fenomeni di *fluage* dell'ammasso.

2. Gli studi condotti e le esperienze acquisite, così come da noi riscontrato in opera e provato attraverso diverse metodologie di calcolo (ad esempio analisi F.E.M. 3D e assialsimmetriche), evidenziano un disaccoppiamento totale tra azione dei rivestimenti ed estrusione del nucleo.

D'altra parte stiamo parlando di processi deformativi che avvengono in campo elastoplastico e perciò per loro natura irreversibili. La regimazione delle deformazioni del terreno in corrispondenza del nucleo d'avanzamento non può essere in alcun modo ottenuta agendo sulla rigidità delle strutture di rivestimento della cavità.

**Al massimo un rivestimento rigido può bloccare il fenomeno deformativo già avvenuto, non potrà mai farlo regredire!**

La regimazione si può ottenere solo agendo opportunamente sulla rigidità del nucleo.

È vero invece che la rigidità delle strutture di rivestimento di prima e seconda fase non può prescindere dal tipo di intervento di consolidamento realizzato al fronte, poiché a questo deve adeguarsi.

È compito del progettista mantenere una visione completa dei fenomeni in studio, per cui la tridimensionalità del processo di scavo deve essere tenuta in conto fino alla fase di dimensionamento dei rivestimenti definitivi ed alla previsione del comportamento a lungo termine della cavità.

3. I limiti del sistema sono tanto più estesi nella misura in cui si riesce a conservare i parametri di picco dell'ammasso, conservando le caratteristiche geomeccaniche del terreno ed eventualmente migliorandole.

L'errore che sovente viene commesso è credere che lasciando decomprimere l'ammasso al contorno dello scavo sia possibile poi stabilizzarlo con rivestimenti di piccolo spessore. Questa convinzione, che deriva dall'osservazione dell'andamento teorico delle linee caratteristiche di una galleria, non trova riscontro nella realtà, almeno quando ci si trova a lavorare in situazioni tenso-deformative difficili, perché diventano preponderanti fattori trascurati dalla teoria, quali l'effetto della gravità, l'anisotropia e la disomogeneità del materiale, le spinte e i carichi dif-

feriti per effetto del *fluage* dell'ammasso.

Lasciare decomprimere il terreno al contorno del cavo può apportare qualche beneficio in termini di pressione finale di stabilizzazione solo se si mantiene comunque lo stato tenso-deformativo dell'ammasso entro il ramo crescente (elastico-elastoplastico) della curva  $\sigma-\delta$  che lo caratterizza.

Ma come si può agire per mantenerci entro il ramo crescente della curva  $\sigma-\delta$  dell'ammasso?

1. Occorre, evidentemente, governare la risposta deformativa dell'ammasso allo scavo. Poiché detta risposta deformativa è composta, come abbiamo visto, da estrusione, preconvergenza e convergenza, il nucleo è l'appropriato e unico strumento che ci consente di farlo veramente, agendo sulla sua rigidità.

2. A questo scopo è possibile intervenire con strumenti protettivi (che scaricando il nucleo permettono di conservare le sue caratteristiche geomeccaniche di picco e, in definitiva, la sua rigidità originaria) e/o di rinforzo (che rinforzando il nucleo permettono di migliorare le sue caratteristiche geomeccaniche e quindi di aumentare la sua rigidità originaria).

3. Per questa via si possono esercitare sull'ammasso, in anticipo sull'avanzamento, importanti azioni di precontenimento del cavo, la cui efficacia sarà tanto più evidente quanto più rapido è l'effetto moltiplicatore che si produce nel terreno rispetto all'azione del nucleo: nei terreni prevalentemente dotati di attrito, saranno sufficienti anche ridotte azioni di precontenimento, nei terreni prevalentemente coesivi occorrerà agire soprattutto con consolidamenti mirati ad elevarne le caratteristiche di coesione.

4. L'adeguatezza dei provvedimenti di protezione e/o di rinforzo del nucleo intrapresi deve essere controllata e regolata in fase operativa e di verifica attraverso il rilievo coordinato delle misure di estrusione e di convergenza, dalle quali è possibile risalire alla risposta deformativa assoluta dell'ammasso e conoscere in quale tratto del diagramma  $\sigma-\delta$  ci troviamo.

Per concludere, è evidente che il primo desiderio di un progettista è quello di avere a disposizione una formulazione matematica esauriente del fenomeno fisico che intende indagare e valutare.

Tale formulazione rende in qualche modo oggettiva la progettazione e consente una definizione deterministica di quanto occorre fare per dare una adeguata risposta al problema affrontato.

È peraltro evidente che i risultati sperimentali di cui

oggi si dispone non sono ancora tali da fornire un'interpretazione esauriente e conclusiva di un fenomeno che si è rivelato tanto complesso e che presenta più e differenti aspetti da indagare.

Pertanto, una formulazione in forma chiusa, che consenta l'utilizzo progettuale del nucleo, agendo sulla sua rigidità, non è ancora al momento disponibile, ma le osservazioni e le esperienze condotte negli ultimi anni ci hanno permesso di concludere che una risposta organica al problema della regimazione dei fenomeni deformativi innescati dai processi di scavo è senz'altro possibile e che la strada intrapresa, anche se difficoltosa, è quella corretta. ●●

#### BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- 1) LOMBARDI G., AMBERG W.A., "Une méthode de calcul élasto-plastique de l'état de tension et de déformation autour d'une cavité souterraine", ISRM International Congress, Denver, 1974
- 2) LUNARDI P., "Application de la mécanique des roches aux tunnels autoroutiers - Exemple des tunnels de Fréjus (côté Italie) et du Gran Sasso" - I.T.B.T.P., Paris, 4th October 1979
- 3) LUNARDI P., "Conception et exécution des tunnels selon l'analyse des déformations contrôlées dans les roches et dans les sols" - Première partie: Présoutènement et préconfinement", Quarry and Construction, March 1994
- 4) LUNARDI P., "Preconfinement of an excavation in relation to new orientations towards the design and construction of tunnels", Gallerie e grandi opere in sotterraneo, No. 45 Year 1995
- 5) LUNARDI P., "Conception et exécution des tunnels selon l'analyse des déformations contrôlées dans les roches et dans les sols" - Deuxième partie: Rôle et résultats de la recherche expérimentale", Quarry and Construction, March 1995
- 6) LUNARDI P., "Conception et exécution des tunnels selon l'analyse des déformations contrôlées dans les roches et dans les sols" - Troisième partie: Proposition de la nouvelle approche", Quarry and Construction, April 1996
- 7) LUNARDI P., "Avanza la galleria meccanica" - Le Strade, May 1996