

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 σ_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-

Pietro Lunardi The influence of the rigidity of the advance core on the safety of tunnel excavations

La influencia de la rigidez del núcleo de avance en la seguridad de las excavaciones en galería

The paper demonstrates, on the basis of theoretical and experimental evidence collected over more than twenty five years of research conducted on more than one thousand tunnel faces, that in the context of the deformation response of a rock or soil mass to excavation, convergence is only the last stage of a very complex stress-strain process that starts ahead on the tunnel face and constitutes the true cause of the phenomena that develop from it; convergence is only one of the effects of this process. In the work the latest results and of the trends of research still in progress are illustrated.

En función de evidencias teóricas-experimentales recogidas en más de veinticinco años de estudios realizados sobre más de mil frentes de excavación, en el estudio se demuestra que, en el ámbito de la respuesta deformativa del macizo rocoso a la acción de la excavación, la convergencia sólo es la última etapa de un proceso tenso-deformativo sumamente complejo, que nace y se desarrolla antes del frente de avance y que constituye la verdadera causa de los fenómenos que se producen allí y de los cuales ésta tan sólo es uno de los efectos. El artículo ilustra los últimos resultados y las tendencias del estudio, que aún está en fase de realización.

1. Introduction

Until not many years ago, the construction of a tunnel or an underground work was considered an epic enterprise with an unforeseeable outcome. The safety of the excavation was seen in terms of the ability of the construction engineer to take precautions against gravitational fallout and to counter the development of thrusts from the rock or soil mass by constructing massive passive support structures around the inside of the cavity.

In the sixties and seventies considerable progress was made in the construction of underground works.

While great strides ahead were taken with

- mathematical modelling,
- *in situ* ground improvement,
- stabilising techniques and instruments,
- and monitoring systems,

theoretical and experimental research conducted by various engineers placed the accent on interpreting and controlling deformation phenomena in tunnels (deformation response of the rock or soil mass to excavation).

Thanks to this progress the safety of excavations is seen today in terms of the ability to control the deformation response of the rock or soil mass to the action of excavation.

The most widespread and well-known methods of design and construction for regulating deformation, such as the "Convergence-Confinement Method" and the NATM, simplify the problem of the statics of a tunnel. They consider one plane only and as a consequence attempts are made to control the deformation response **of the cavity only** (seen in terms of convergence only) by means of radial confinement. This decidedly limiting approach has been used to tackle and solve the statics problems of tunnels constructed in conditions that are not too difficult (discreet success has been achieved even in the absence of clear ideas of the stress strain behaviour of the rock or soil mass following excavation), but has created considerable problems in more complex cases.

The theoretical contribution of some engineers and my own experimental research over the last few decades has shown that in reality:

- the statics of an advancing tunnel is a distinctly three dimensional phenomenon and absolutely cannot be described, unless serious errors are to be committed, by simple two dimensional geometry;
- **convergence is only the last phase of a very complex stress-strain process** as far as the deformation response of the rock or soil mass to excavation is concerned. This process starts and

develops ahead of the tunnel face and is in fact the true **cause** of the phenomena that are then produced; convergence is only one of the **effects**.

Obviously in a cause and effect process it is indispensable to find the original cause and act on this if the effects are to be maintained within determined limits.

It is a question of acting on the cause in order to guarantee the effects as opposed to what occurs with design and construction methods that have been most in vogue to date. These ignore the cause and merely act on the effects (the convergence) when the consequences must in any case be borne, particularly in those cases where they become uncontrollable (difficult stress-strain conditions).

In order to trace the causes that trigger a deformation response and correct the error at that point, it is absolutely indispensable, given that the problem is essentially a three dimensional problem, to describe the reality of the situation in those terms. A **new key for interpreting** the statics of tunnel advance must be introduced: **the core at the face**, understood as that portion of ground that lies ahead of the face itself, more or less cylindrical in shape, the transverse and longitudinal dimensions being similar to those of the diameter of the tunnel.

The **deformation properties** of this portion of ground obviously depend on:

- the intrinsic characteristics of the rock or soil mass;
- the original stress state to which it is subjected;
- the procedure (tunnel advance system) by which the principal minor stress σ_3 is reduced to zero as the face approaches;

and can be considered the true cause of the stress-strain process that is triggered ahead of the face and which then develops behind it on the walls of the cavity. The **deformation response** that results and

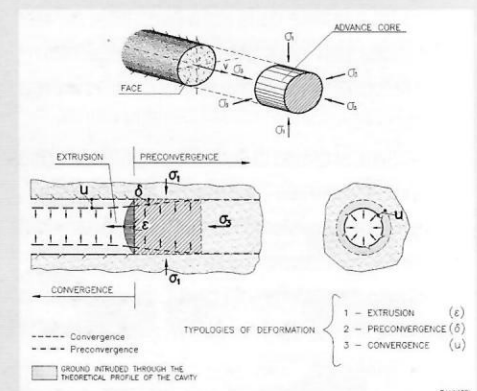


Fig. 1 - Il nucleo d'avanzamento come chiave di lettura per la risposta deformativa.

The advance core as a new key for interpreting the deformation response.

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 ogniqualvolta 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-

appears as the **effect** is divided into and manifests in three different moments both geometrically and chronologically (Fig. 1):

- **extrusion** of the core on the surface described by the face;
- **preconvergence** of the theoretical profile of the excavation ahead of the face;
- **convergence** of the theoretical profile of the tunnel behind the face.

On the basis of this type of approach, grounded on theoretical and experimental support collected over more than twenty five years of research conducted on more than thousand tunnel faces, it is clear that convergence represents only the last stage of the deformation response of the medium to excavation and that as a consequence those design approaches used until now, which take it as the only point of reference must be considered limited and misleading.

2. Studies on the behaviour of the advance core

The use of the advance core as a new interpretative key to controlling deformation in tunnels is a relatively new concept in geomechanics.

In the nineteen seventies Dr. Lombardi was the first to show the influence of the advance core and its natural strength by analysing the behaviour of a cavity using the "Characteristic Line Method" which he himself developed. [1].

For the first time the stress-strain problem of an advancing tunnel was tackled in pseudo-three dimensional terms, an important turning point in the study of the statics of underground excavations which had always been studied exclusively in two dimensions. In particular the method made it easy to understand how an increase in the strength of the so-called "half core" resulted in a decrease in the convergence of a cavity at the face.

This observation was also of great interest because it left me with the impression that it should also have some effect on the deformation behaviour of a cavity at a distance from the face. In the conviction, therefore, of the need for in-depth study of the genesis and evolution of the deformation response ahead of the face, it was decided to commence research on the subject in order to throw light on the relationships between modifications of the stress states in the ground induced by tunnel advance and the resulting deformation response.

In particular, it was decided to dedicate an initial period of time, the "**first research phase**", to systematic observation of the deformation behaviour of

the phase-advance core system, and not just the cavity as suggested and still proposed today by the NATM and methods deriving from it.

At a later stage, the "**second research phase**", attempts were made to verify the existence of connections between the deformation behaviour of the phase-advance core system (extrusion and preconvergence) and that of the cavity (convergence) on the basis of in-depth analysis - above all in terms of timing - of instability phenomena observed during the construction of numerous tunnels in widely differing types of ground.

Once it was certain that the deformation behaviour of a cavity was systematically conditioned by the rigidity of the core of ground at the face, a third stage commenced, the "**third research phase**", aimed at establishing up to what point it was possible to regulate and control the deformation response of a cavity by acting on the rigidity, and therefore the deformation characteristics, of the core.

2.1. The first research phase

As already mentioned the first research phase was conducted on more than one thousand tunnel faces. Three fundamental types of deformation phenomena were identified (Fig. 2):

- a) **face extrusion**;
- b) **preconvergence** (convergence of the theoretical profile of a tunnel ahead of the face depending strictly on the deformation properties of the core with respect to the existing stress state;
- c) **convergence of the cavity**.

Visual observation and measurements with instruments of the deformation behaviour of the walls of excavations were then used to associate the consequent manifestations of instability to each type of deformation (instability is considered to exist whenever there is intrusion of material inside the theoretical profile of the tunnel):

- a) gravitational fallout, spalling and failure of the face following extrusion of the face and preconvergence;
- b) gravitational fallout, spalling and collapse of the cavity following convergence of the cavity.

2.2. The second research phase

The second research phase (verification of possible connections between the deformation behaviour of the face-advance core system and that of the cavity) was conducted by studying, observing and monitoring deformation events at the face and in the cavity, paying particular attention to sequence and timing. In this respect some of the most important obser-

vations and findings were obtained during the excavation of the "Frejus" motorway tunnel and the "S. Stefano", "S. Elia" and "Tasso" tunnels.

The "Frejus" motorway tunnel (1975)

The Frejus motorway tunnel (13 km. in length) was an enterprise of particular interest for people like us who wished to study the genesis and development of deformation phenomena resulting from tunnel advance. It was exceptional because it was the first time we had tackled the excavation of a tunnel in a schistose crystalline limestone that was lithologically homogeneous along the route with a varying overburden and a stress field that increased and changed with depth (0÷1700 m.).

Account was taken of Sommeiller's experience obtained during construction of the adjacent rail tunnel a century before and advance was full face with immediate stabilisation of the ring of rock around the cavity for a thickness of around 4.5 m. using active end-anchored roof bolts and shotcrete. The final concrete lining, with an average thickness of 70 cm. then followed to complete the construction [2].

While the overburden was less than 500 m., the rock mass remained stressed in the elastic field and the tunnel showed **stable face** behaviour with negligible deformation and limited manifestations of instability at the face and in the cavity due exclusively to gravitational fallout.

As the overburden and therefore also the stress state increased, the rock mass entered the elastic-plastic field and the tunnel behaviour changed to **stable in the short term**, with convergence in the order of decimeters (diametric convergence of 10÷20 cm.). The band of armoured rock contributed effectively to the statics of the tunnel limiting the entity of convergence and preventing the appearance of consequent manifestations of instability.

Thanks to the good quality of the rock, advance proceeded without problems at a rate of around 200 m./month until work halted temporarily for the sum-

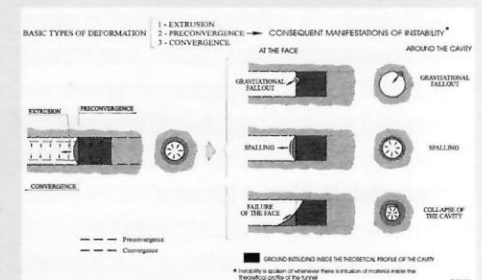


Fig. 2 - Sintesi della 1ª fase di ricerca. Outline of the 1st research phase.

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 flyschoidi 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

mer vacation at meter 5,173 in a zone of homogeneous rock with an overburden of around 1,200 m. Convergence measuring station No. 6 was set up immediately at a distance of one metre from the face (metre No. 5,172) and after 15 days of no advance gave a maximum convergence reading of 10 cm. This was undoubtedly only creep deformation (under a constant load), since in the meantime the face had not moved at all. When excavation resumed, diametric convergence on this same cross section increased very brusquely to values never before measured reaching 60 cm. after three months, while further ahead, when the tunnel advanced, it returned to normal values (diametric convergence of around 20 cm.) after less than 50 m.

It must be pointed out that before work stopped the ground around the cavity had been reinforced with more than 30 roof bolts per linear metre of tunnel up to a distance of one metre from the face, but there had been no intervention on the core. Once tunnel advance resumed, stabilisation work around the cavity started again at the same intensity and rate as before.

One concludes that while tunnel advance was halted, the core of ground at the face had had time, without the assistance of ground reinforcement, to extrude in the elastic plastic field, triggering creep relaxation phenomena of the rock around the core (pre-convergence) which was in turn the cause of the considerable increase in convergence of the cavity with respect to normal values.

The "S. Stefano" tunnel (1984)

The S. Stefano tunnel is on the new twin track Genoa to Ventimiglia railway line. It runs through a flysch formation consisting of clayey and clayey-sandy schists with thin banks of folded and intensely fractured sandstones and marly limestones.

The original design involved full face advance with steel ribs and shotcrete for the primary lining and a thick ring of concrete (up to 110 cm.) for the final lining. During excavation it was found that as long as the ground remained elastic, deformation at the face and in the tunnel was negligible and there were practically no manifestations of localised instability (**stable face** behaviour). When the tunnel entered a zone affected by residual stress states of tectonic origin, where the stress state was in the elastic-plastic field, deformation phenomena began to cause some difficulty, also due to the appearance of sizeable asymmetrical thrusts caused by rigid masses dispersed in the plastic matrix. As this occurred, layers of material were seen to break off at the face, a

sure sign of the presence of extrusive movement typical of a **face stable in the short term** situation; convergence reached decimetric values.

At a certain moment the stress state of the rock mass had obviously developed into the failure range and the entire face collapsed (**unstable face** situation), followed within a few hours by the collapse of the cavity with diametric convergence of over 2 m. for a considerable stretch of more than 30 m. of tunnel behind the face, even in the part where ribs and shotcrete had been placed.

It should be noted that the type of ground encountered in the three stress-strain situations mentioned was essentially the same and that the failure phenomenon (collapse of the cavity) with convergence measurable in metres, even in a part of the tunnel with the primary lining already placed, only occurred when the core at the face was no longer rigid and able to contribute to the statics of the tunnel

The "S. Elia" tunnel (1985)

The S. Elia tunnel on the Messina to Palermo motorway passes first through rather coarse detritus material and then enters a series of flysch formations of sedimentary origin consisting of alternating clayey sandy and marly sandy strata. The boundary between the two constitutes a brief transition zone of heavily fractured rock.

The design involved traditional half face advance after first improving the ground around the tunnel in the detritus sections with jet grouting and the placing of ribs and shotcreting in the more substantial rock. The final lining in concrete, closed with a tunnel invert, then followed.

The tunnel passed through the detritus ground without any problems thanks to the ground improvement and then entered the better formation apparently without any huge problems. The face appeared to be stable in the short term with limited deformation phenomena. As the transition zone was penetrated further, a water table under pressure was intercepted and this quickly made the face unstable. The face collapsed and a few hours later the walls of the half cross section of the tunnel already lined with ribs and shotcrete also collapsed for twenty to thirty metres behind the face with radial convergence of over one metre.

The "Tasso" tunnel (1988)

The Tasso tunnel is one of a series of tunnels excavated towards the end of the 1980's for the new "High Speed" Rome to Florence railway line. The area in which the tunnel is located lies in the lake basin of

the Valdarno Superiore and consists of silty sands and sandy silts with interbedding of levels of silty clays containing sandy lentils and levels saturated with water. The original design involved **half face** advance, stabilising the walls with ribs and shotcrete. The ribs were anchored at the feet with sub-horizontal tie bars and given a foundation of micro piles or columns of ground improved by jet-grouting.

Initially excavation proceeded under **face stable in the short term** conditions with no appreciable deformation phenomena either at the face or in the tunnel.

As the overburden increased, the stress state of the medium also increased and given also the poor geo-mechanical characteristics of the ground, conditions of face stable in the short term rapidly changed to those of an **unstable face**. Following the failure of the face, approximately 30-40 m. of tunnel already excavated and protected with ribs and shotcrete also failed during the course of one single night with convergence in the order of 3-4 m.

Numerous facts of great interest emerged from the study and analysis of the cases described. It appeared clear from the Frejus experience that:

- when advancing in elastic-plastic conditions, it is very important to maintain fast and constant rates of advance that do not give the core time to deform: thus preventing extrusion and pre-convergence which constitute the antechamber of subsequent convergence of the cavity.

On the other hand it also emerged from many other cases, including those cited, that:

- collapse of the core and collapse of the cavity never occurred without one being followed by the other and in particular without collapse of the cavity being preceded by that of the core.

Our impression that the rigidity of the core at the face played a determining role in the short and long term stability of a tunnel emerged more strongly from the second research phase (Fig. 3).

2.3. The third research phase

Comforted by the results we had obtained, we started the third phase of the research to verify whether it was really possible to regulate and control the short and long term deformation response of a tunnel by acting on the rigidity, and therefore the deformation properties, of the core.

To do this new technologies had to be studied and developed that would act on the core and change its deformation properties by using ground improvement, protective (shells of horizontal jet-grouting, me-

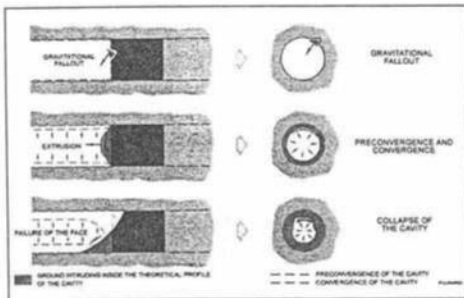


Fig. 3 - Sintesi della 2ª fase di ricerca - Il comportamento deformativo del fronte condiziona quello della cavità. Outline of the 2nd research phase - The deformation behavior of the "face-core" system conditions that of the cavity.

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, ϕ , 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/m²
- c' = coesione drenata = 0 - 20 t/m²
- ϕ_u = angolo d'attrito non drenato = 0° - 10°

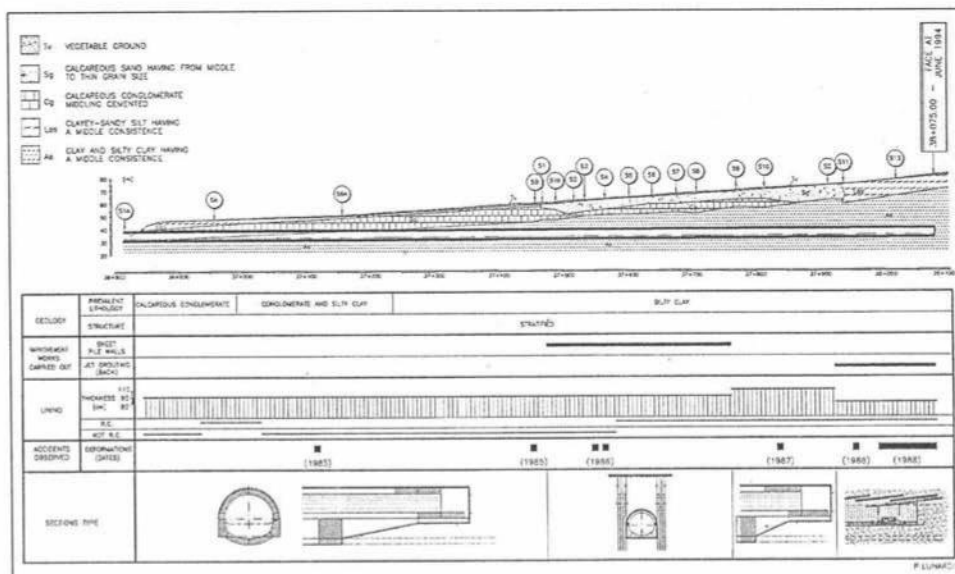


Fig. 4 - Linea ferroviaria Ancona-Bari - "Galleria di Vasto" - Interventi eseguiti e dissesti (1984-1990). Ancona to Bari railway line - "Vasto" tunnel - Northern Portal - Methods carried out and accidents that happened (1984-1990)

chanical precutting, etc.) and reinforcement (ground reinforcement of the advance core with glass fibre tubes, jet-grouting and also traditional freezing and injections) systems launched ahead of the face (see the concept of preconfinement of a cavity and the birth of "conservation systems" - development of the tunnel design and construction approach based on the analysis of controlled deformation in rocks and soils [3] [4] [5] [6]).

An account of a particularly significant experimental construction site is given below.

The "Vasto" tunnel

The tunnel forms part of the route of the new Ancona to Bari railway line. It has a length of 6,200 m. and lies under the hilly upland in which the settlement of Vasto lies.

Geologically, the bottom and middle part of this upland consists of a complex of predominantly stratified, grey coloured, clayey silt ground with thin sandy interbedding and the upper part of a bank of conglomerates, cemented to a greater or lesser extent, overlaid by a horizon of sandy silty yellowish brown coloured ground.

The tunnel passes entirely through the base clay formation except for the initial sections at the portals. At the depth of the tunnel, the ground is saturated in water and extremely sensitive to dislocation.

A brief history

Work began on the Northern heading in 1984 and continued on with repeated and serious problems until April 1990.

The original design involved half face excavation with the immediate placing of a temporary lining consisting of shotcrete, ribs and electrically welded wire mesh. The final lining in reinforced concrete, one metre thick, was always placed in the presence of a sloping face. The walls of the tunnel were then cast by underpinning and casting of the tunnel invert completed the construction. After the first sizeable cave-in, attempts were made to resume advance employing various methods (Fig. 4), which all turned out to be inadequate, until a disastrous cave-in occurred at kilometre No. 38+075 under an overburden of 38 m.

The cave-in involved the face and then a 40 m. section of tunnel behind it. The deformation in the final lining was enormous (greater than one metre) making it impossible to continue the works.

Rocksoil S.p.A. of Milan was called in at this point to find a solution that would allow work to resume and to continue until the tunnel was complete. The

far from simple problem was tackled by radically changing the design approach on the basis of the analysis of the controlled deformation in rocks and soils (Fig. 5) [6]. An account of the design and construction phases is given below.

Survey phase for the "Vasto" tunnel

With the approach to design based on the analysis of controlled deformation in rocks and soils, the study of all tunnels begins with a survey phase during which the design engineer proceeds to characterise the medium, the ground through which the tunnel will pass, in terms of rock and soil mechanics in order to be able to analyse the existing natural equilibrium and to be able to make accurate decisions in the subsequent diagnosis phase.

The ground affected by excavation belonged to the base

clay formation and was classified as clayey silts or silty clays, medium to highly plastic and impermeable, markedly susceptible to swelling when soaked.

Direct shear and tri-axial cell tests showed poor mechanical strength on average, although values for cohesion and angle of friction were rather scattered.

"Tri-axial cell extrusion" tests were also performed. These tests were researched and developed by Rocksoil S.p.A. specifically for use during the diagnosis phase to simulate the deformation response of a face-advance core system; the advance of a tunnel with the *in situ* stress state of the ground can be modelled in the laboratory using this test.

These tests, integrated with simple finite element mathematical models were also used to weight the geomechanical parameters (c, ϕ, E) for use in the subsequent diagnosis and therapy phases. In par-

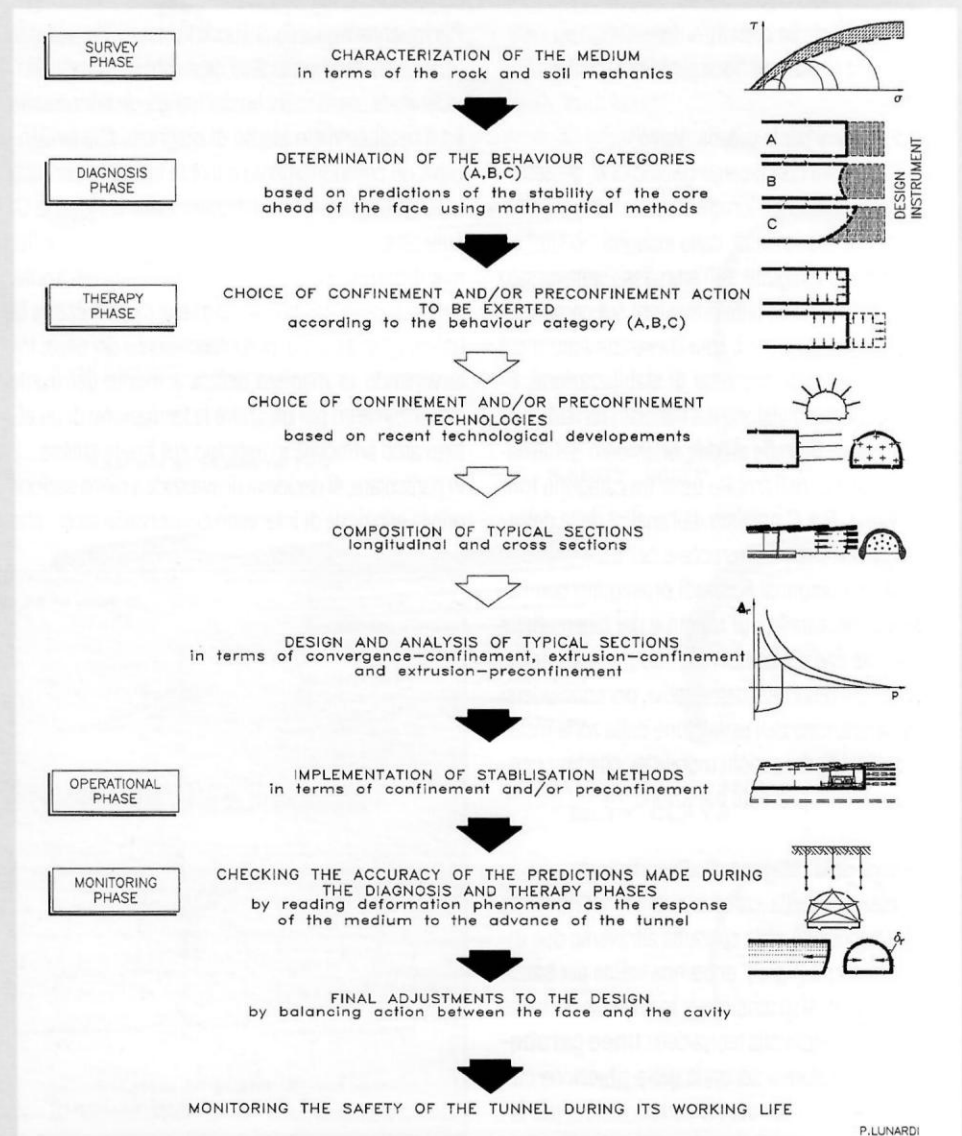


Fig. 5 - Sintesi dell'approccio basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli. Summary of the method based on the analysis of controlled deformation in rocks and soils.

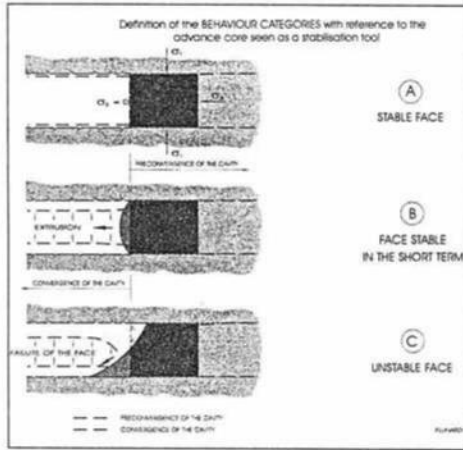


Fig. 6 - Definizione di categorie di comportamento con riferimento al nucleo d'avanzamento visto come strumento di stabilizzazione.

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/m².

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-

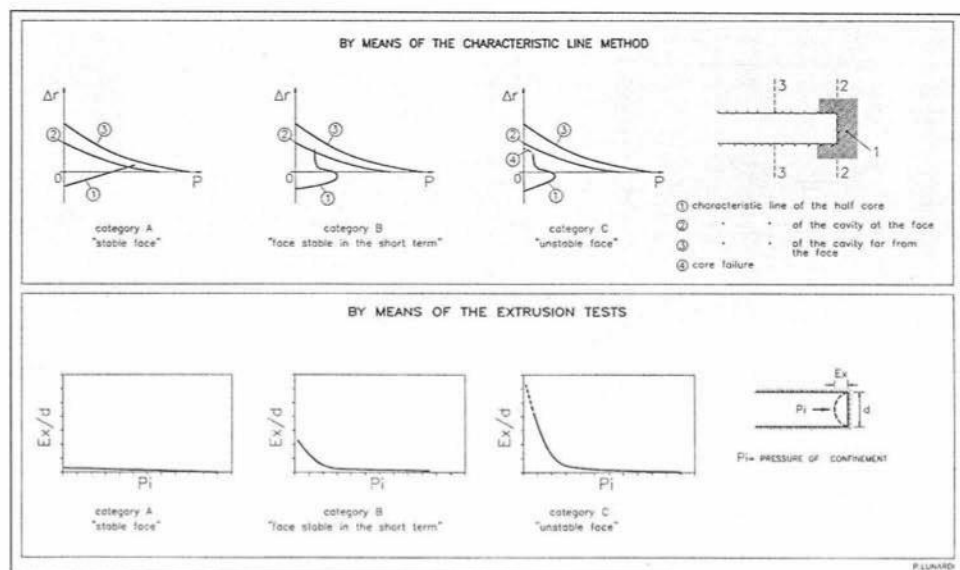


Fig. 7 - Fase di diagnosi: previsione della categoria di comportamento. Prediction of the behaviour category.

particular, direct simulation of extrusion tests available in tri-axial cells (integrated with tri-axial shear tests on both reinforced and non-reinforced samples) were used to determine the following ranges for the main geomechanical parameters:

- c_u = undrained cohesion = 0.2 - 0.4 MPa
- c' = drained cohesion = 0 - 0.2 MPa
- ϕ_u = undrained angle of friction = 0° - 10°
- ϕ' = drained angle of friction = 18° - 24°
- E = Young's modulus = 50 - 500 MPa.

The diagnosis phase for the "Vasto" tunnel

Forecasts were made of the deformation behaviour of the face and the cavity in the absence of stabilisation intervention. They were based on the geological, geotechnical, geomechanical and hydrogeological knowledge obtained from *in situ* and laboratory investigation using theoretical and experimental methods of the ground through which the tunnel passes. The aim was to divide the route of the tunnel into sections with uniform deformation behaviour or in other words as belonging to one of three basic categories, A, B or C as provided for by the analysis of controlled deformation in rocks and soils (Fig. 6).

The diagnosis study then continued with an analysis of the failure mechanisms and instability kinematics that would be produced following the development of deformation phenomena and concluded with an assessment of unstable zones and the entity of loads set in motion, which, however, do not fall within the scope of this paper.

Assessment of behaviour categories

Assessment of behaviour categories along the route was conducted using two different procedures (Fig. 8), both valid for low, medium and high stress states: the first, more immediate, is based on the theory of **characteristic lines** (calculated using either analytical or numerical methods according to the situation) while the second, more labourious, is based on triaxial cell **extrusion tests**, mentioned in the paragraph on the survey phase.

In the case of the Vasto tunnel, both procedures signalled unstable face behaviour except for short sections of tunnel close to the portals. Sizeable extrusion was forecast and as a consequence also pre-convergence and convergence (greater than 100 cm. radial). The values were such as to produce serious instability and consequent collapse of the cavity.

Therapy phase for the "Vasto" tunnel

The type of action to be exerted (preconfinement or

ordinary confinement) and the related method required for complete stabilisation of the tunnel was then decided according to the behaviour category envisaged on the basis of the forecasts made in the diagnosis phase.

As far as the tunnel yet to be excavated was concerned (including opening the Southern portal in ground subject to landslide), the characteristics of the ground to be tunnelled and the results of the diagnosis phase were considered. The latter predicted unstable face behaviour for the whole of the length of the tunnel (Category C: stress in the failure range, no arch effect, typical manifestations of instability: failure of the face, collapse of the cavity). It was decided to stabilise the tunnel by means of preconfinement of the cavity acting decisively ahead of the face to form an artificial arch effect in the ground ahead of the face itself.

Full face excavation was decided after first adopting mixed conservation techniques to create preconfinement action both around the core (protective) and

actually in the core (reinforcement).

Three types of tunnel cross section were employed (Fig. 8) to be selected according to the degree of homogeneity and consistency of the ground encountered during tunnel advance.

The only difference between the three types lay in the type of treatment (preconfinement and pre-reinforcement) to be applied ahead of the face around the excavation, while the treatment applied in the advance core itself was the same for all three.

The choice of technique was strictly connected with the nature and acquired consistency of the ground to be tunnelled. Horizontal jet-grouting was employed for granular ground with poor cohesion, characterised by little shear strength.

The by now well-known system of mechanical pre-cutting was employed in compact and uniform, cohesive ground as the most suitable technology for the creation of strong protective shells around the advance core capable of guaranteeing the formation of an "arch effect".

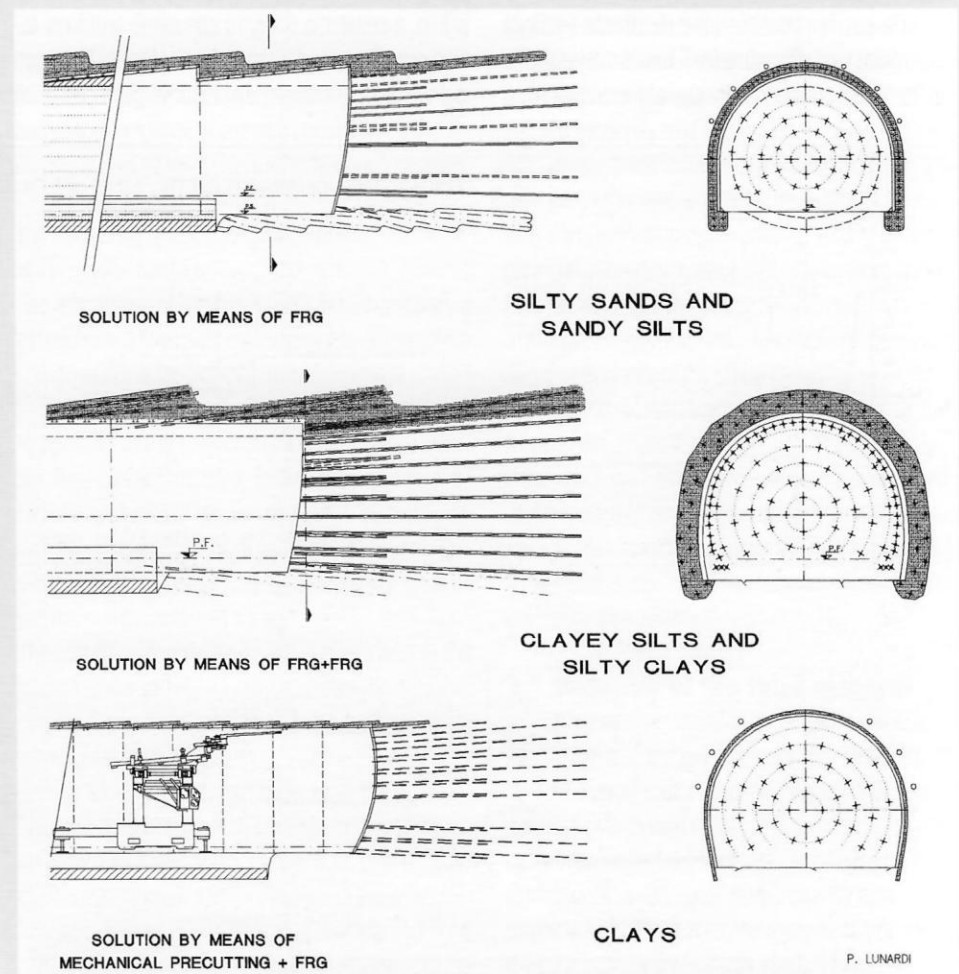


Fig. 8 - Linea ferroviaria Ancona-Bari - Galleria "Vasto" - Fase di terapia. Ancona to Bari railway line - "Vasto" tunnel - Therapy phase.

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_c 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-

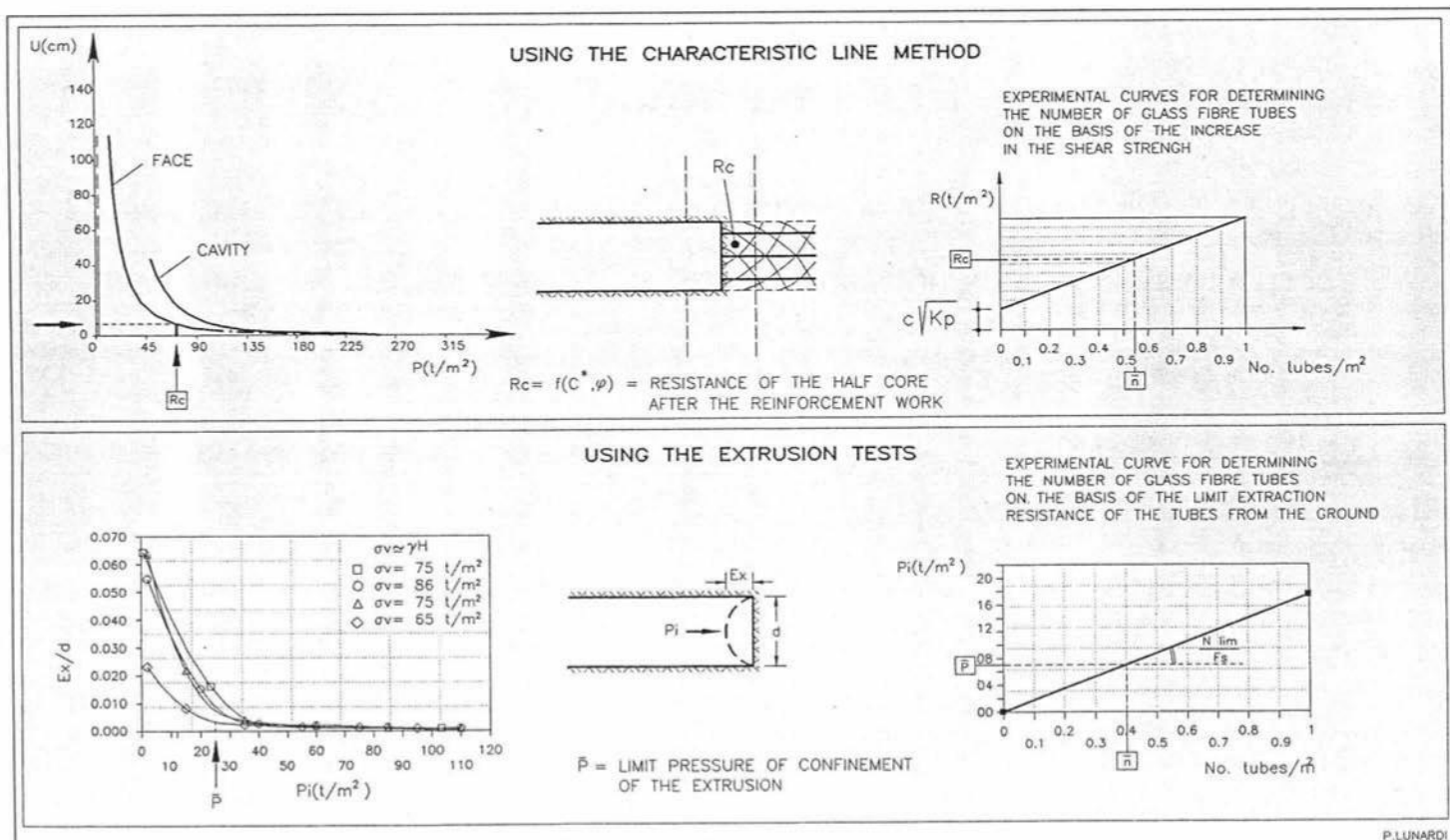


Fig. 9 - Fase di terapia: valutazione dell'intensità di consolidamento del nucleo necessaria per evitare la sua instabilità. Therapy phase: Evaluation of the core reinforcement intensity needed to prevent core instability.

In ground where the shear strength and undrained cohesion makes the use of this technology inadvisable a band of reinforced ground around the cavity ahead of the face and in the advance core can be obtained by claquage grouting using specially fitted glass fibre tubes.

Stabilisation was completed for all three types of cross section with a primary lining for confinement behind the face consisting of steel ribs closed with an invert and subsequently the final secondary lining in concrete. Having decided on the types of cross section to adopt the dimensions of the prereinforcement of the advance core were studied to decide the number, length and geometrical configuration of the glass fibre tubes to be inserted into the face.

As with the approach adopted in the diagnosis phase for forecasting the behaviour of the excavation, here again two different procedures were adopted (Fig. 9) for deciding the number and dimensions of the glass fibre tubes.

The first was based on the characteristic line method taking account, in a simplified manner, of the effect of prereinforcement of the core when calculating the corresponding characteristic lines.

The second procedure for calculating the dimensions of prereinforcement of the core was based on an interpretation of extrusion curves obtained from tri-axial cell tests: first the minimum confinement pressure P_1 required to stabilise the face (defined as the borderline pressure between the "elastic" and the "elastic-plastic" arms of the extrusion curve) was identified on the curve, then the number of tubes needed to guarantee face stability with the desired safety coefficient was decided using experimental diagrams of the type shown in Figure 9.

Both approaches (extrusion tests and characteristic lines) provided comparable results which was to be expected since they are both based on the same assumption.

The operational phase for the "Vasto" tunnel

Work was resumed in 1992 almost simultaneously from both portals: from the North portal to restore the collapsed section of tunnel and from the Southern portal to start underground tunnel excavation. At the time of writing, 2,100 m. have been driven from the Southern portal and approximately 2,000 m. from the Northern portal. Average advance rates working seven days per week are approximately 50 m./month of finished tunnel.

Figure 10 gives a comparison of average monthly advance rate curves with those for convergence mea-

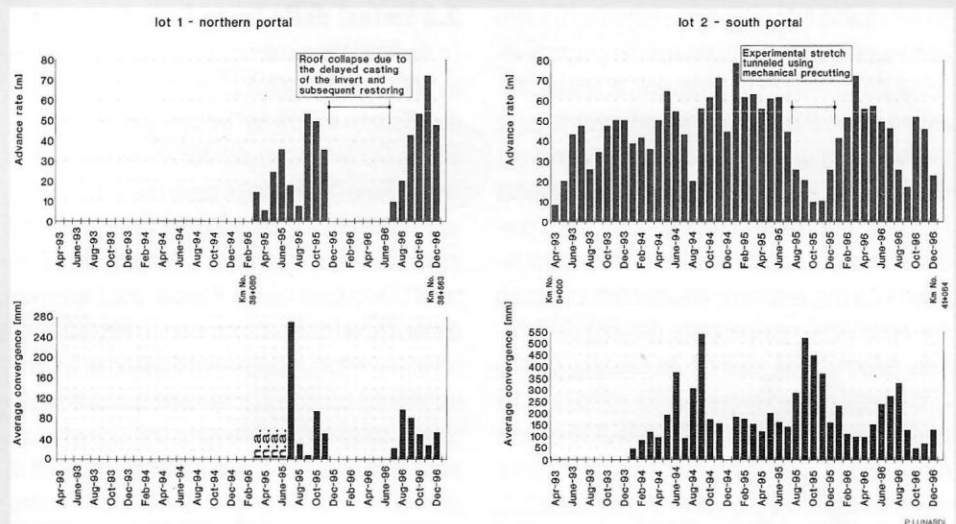


Fig. 10 - Linea ferroviaria Ancona-Bari - Galleria "Vasto" - Fase operativa: produzioni mensili e convergenze medie misurate.

Ancona to Bari railway line - "Vasto" tunnel - Operational phase: average monthly advance rate and average convergence measured during the period.

sured during the period. The marked tendency of convergence to develop as an indirect function of advance rate is particularly significant: it confirms the hypothesis that the less time the core is given to deform the more limited the triggering of extrusion and pre-convergence is and as a consequence the resulting convergence in the tunnel is core contained.

The monitoring phase during construction of the "Vasto" tunnel

The monitoring phase began with the resumption of excavation. It involved measuring the deformation response of the medium to excavation and was used to optimise and calibrate tunnel stabilisation work. In addition to the convergence and pressure measurements normally taken in the Vasto tunnel, systematic and simultaneous measures of extrusion and convergence were also taken. This new approach is of particular interest, especially considering the results obtained so far.

The results of the readings are summarised in the graphs given in Fig. 11 which shows the simultaneous progress of extrusion and convergence within a complete work cycle.

Examination of the graphs shows that the progressive decrease in the depth of reinforcement into the core from an initial 15 m. to only 5 m. (with consequent reduction also in the rigidity of the core) following advance of the face is accompanied by a progressive shift of the deformation response of the core (extrusion) and of the cavity behind the face (convergence) from an elastic to an elastic-plastic ten-

density. The convergence curves in particular, after an initial tendency typical of a situation that develops rapidly towards stability (with maximum values in the order of 10 cm. which are produced following maximum extrusion values of 2.5 cm.), gradually assume a tendency that shows the growing difficulty with which deformation is able to settle down. For example, when the length of the reinforced core is only 5 m., extrusion in the order of 10 cm. develops giving rise to convergence that is four times greater than at the beginning of the cycle.

In this situation combined interpretation of extrusion and convergence of the cavity therefore becomes an extremely important signal for the design engineer. It tells him at what point in time tunnel advance must cease and a new cycle of core reinforcement recommence to restore the minimum depth of reinforced core needed to maintain the rock or soil mass, if not in the elastic range, at least as far from the failure range as possible.

2.3 Summary of the third research phase

The study and the experiments conducted on the "Vasto" tunnel underlined the existence of a close connection between deformation that occurs in the core of ground ahead of the face (extrusion) and deformation that develops subsequently around the cavity behind the face (convergence). It also shows (Fig. 12, results of the third research phase) that deformation of the cavity can be controlled and considerably reduced by artificially regulating the de-

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 pre-convergenza) 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

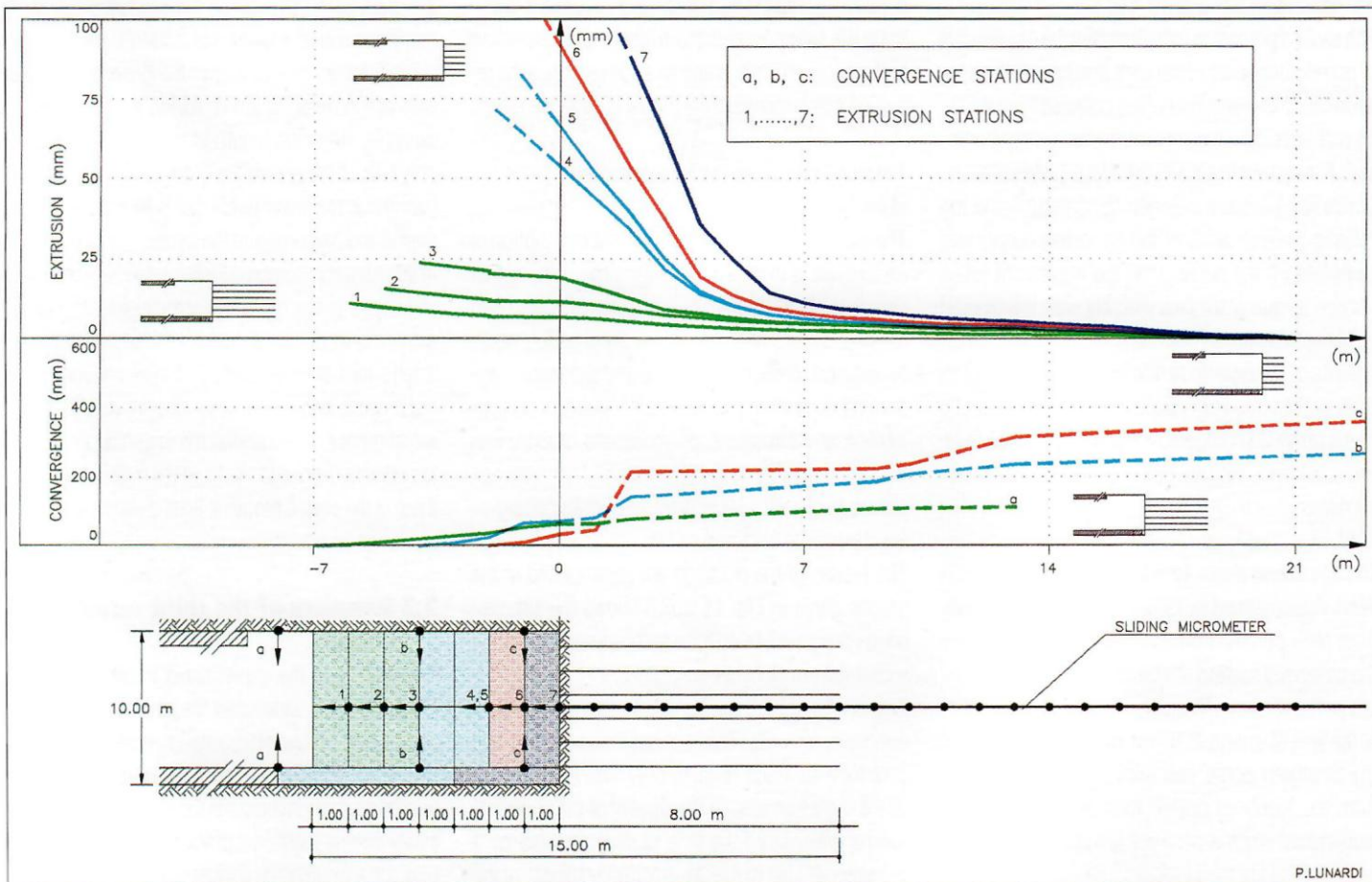
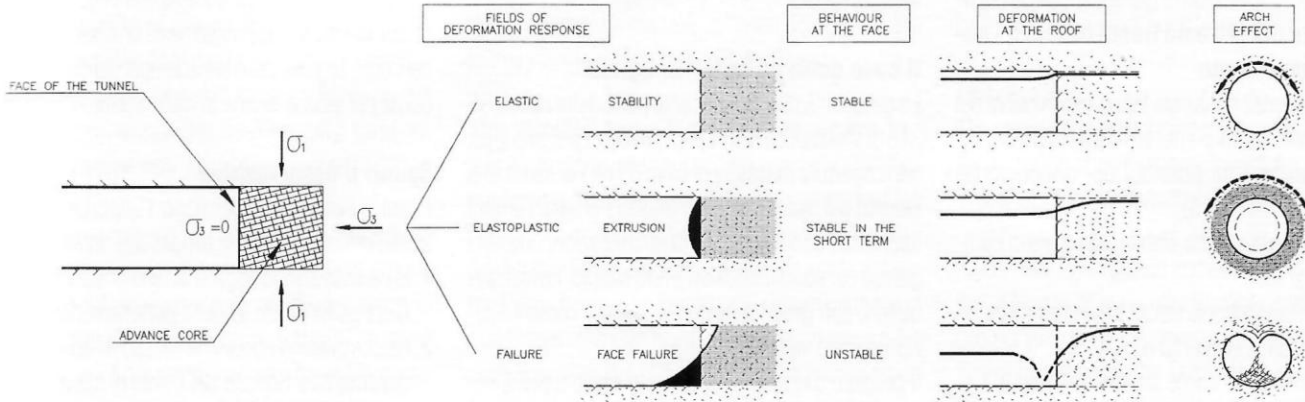
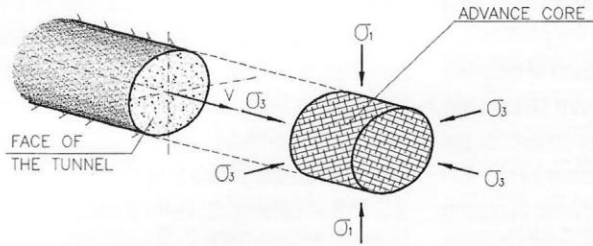


Fig. 11- Linea ferroviaria Ancona-Bari - Galleria "Vasto" - Fase di verifica: diagrammi estrusione-convergenza in funzione dell'avanzamento. Ancona to Bari railway line - "Vasto" tunnel - Monitoring phase: extrusion-convergence diagrams in relation to the advance.

THE ARRIVING OF THE FACE MODIFIES THE FIELD OF STRESSES ON THE CORE ANNULING CONFINEMENT INSIDE THE TUNNEL



P. LUNARDI

Fig. 12 - Sintesi della 3^a fase di ricerca: operando sulla rigidità del nucleo d'avanzamento mediante interventi di protezione e di consolidamento, è possibile controllare la sua deformabilità (estrusione, preconvergenza) e, di conseguenza, la risposta deformativa della cavità (convergenza).
 Outline of the 3rd research phase: by operating on the rigidity of the advance core using conservation and reinforcement techniques, it is possible to control its deformability (extrusion, preconvergence) and therefore, the deformation response of the cavity (convergence).

formation properties of the advance core and therefore its rigidity (containment of extrusion). This is done by stabilisation techniques distributed between the core and the face and designed as a function of the strength and deformation properties of the medium in relation to the existing stress situation.

3. The advance core as a stabilisation tool

Very briefly, the results of the research:

- make it clear that the deformation response of the rock or soil mass to excavation is not only convergence, but consists of extrusion, preconvergence and convergence. Convergence is just one component;
- show that this deformation response starts ahead of the face in the advance core and develops backwards along the core and then into the cavity;
- clearly points to the existence of a direct link between the deformation response of the face-advance core system (extrusion and preconvergence) and that of the cavity (convergence), in the sense that the latter is a direct consequence of the former. This underlines the importance of controlling the deformation response of the face-advance core system and not merely controlling that of cavity because, as has been seen, the entity of the loads that act on the lining in the long term depend above all on the core rigidity;

- demonstrate that by regulating the rigidity of the advance core using protective and reinforcement techniques it is possible to control deformation (extrusion, preconvergence) and thereby also control the deformation response of the cavity (convergence). In the final analysis these results allow us to view the advance core as a **new stabilisation tool** for short and long term stabilisation of a cavity and the strength and deformation properties of this tool play a determining role because they are able to condition that aspect which should more than any other worry the designer of a tunnel: the **behaviour of the face-advance core system**.

The three possible basic stress-strain conditions of the face-advance core system also identify three possible types of cavity behaviour (Fig. 6):

- stable face behaviour (behaviour category A);
- short term stable face behaviour (behaviour category B);
- unstable face behaviour (behaviour category C).

Where there is stable face behaviour, the overall stability of the tunnel is practically guaranteed even in the absence of stabilisation intervention. In situations B) and C) the results of the research indicate that in order to prevent instability of the face, and therefore of the cavity, and to achieve stable face conditions (A), intervention must be balanced between the face

and the cavity and the intensity of this intervention must be appropriate to the real stress conditions as related to the strength and deformation properties of the medium.

The application of these concepts in practice to design and construction has already led to numerous significant successes. Fig. 13 contains a collection of graphs of advance rates achieved during the excavation of tunnels designed by the author and constructed under very varied geological conditions and stress states in Italy over the last ten years [7]. Not only are the high average advance rates maintained relative to the type of ground clearly evident, but above all the advance rates are linear, a clear indicator of construction performed with regular work cycles and without hitches. Today, therefore, it is finally possible to tackle the construction of even the most difficult tunnels with the same safety standard adopted for those that are easier to construct and also with reliable forecasting of construction times and costs (industrialisation of excavation).

The exceptional results achieved in tackling very difficult situations must not, however, allow us to forget the complexity and delicacy of the context in which a tunnel is built. It is in fact easy to take shortcuts with regard to design specifications and a high price is always paid for these. In this respect it is perhaps

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 priverivestimento 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 priverivestimento 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 priverivestimento 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-

worth illustrating two emblematic cases: one occurred during the construction of the S. Egidio tunnel on the route of the Valfabbrica state road 318 and the other during the advance of the "Vasto" tunnel already discussed.

The case of the "S. Egidio" tunnel

The S. Egidio tunnel on the new Valfabbrica state road 318 is approximately 750 m. long with a maximum overburden of around 35 m. It runs through lacustrine sediments of the Tiberino basin near Perugia. The ground tunneled consists of clayey silt stratifications with water bearing silty sand interbedding with a very varied degree of density and cementation.

The design according to the contract involved full face excavation following preinforcement around and in the advance core with a primary lining of shotcrete and steel ribs to be closed with an invert at a distance of not more than one tunnel diameter from the face. Construction did in fact take place, however, with heading and bench excavation and preinforcement in and around the advance core for the top heading only, while the tunnel wasn't closed

with an invert until the lower bench was excavated twenty to thirty metres from the face.

As the overburden and therefore the stress state increased and also due to the poor quality of the ground concerned, the passage was very quickly made from a situation of face stable in the short term to that of an unstable face. Failure of the face was followed by collapse of the cavity with diametric convergence in the order of 60 - 70 cm. for a distance of approximately 20 m from the face up to the point where the primary lining was closed with the invert.

The "Vasto" tunnel: analysis of a cave-in

Tunnel advance was proceeding regularly after first reinforcing the core with glass fibre tubes and the placing of a crown of jet-grouting around it. As specified in the design, the invert and walls were cast immediately behind the face at a maximum distance of one tunnel diameter from it. Average advance rates were approximately 1.5 m. per day and deformation (extrusion and convergence) was very limited.

Tunnel advance came to a halt due to a strike by the construction workers. When work resumed, excavation work was not properly performed due to a de-

sire to make up for lost time (and perhaps also due to excessive confidence determined by the apparent ease with which the tunnel advance had been made). The face was not carefully shaped to make it concave as specified, jet-grouting did not cover the entire surface of the tunnel walls and the invert was placed too far from the face. The result was partial failure of the face, almost without any warning, followed shortly afterwards by the collapse of the cavity for several metres back from the face.

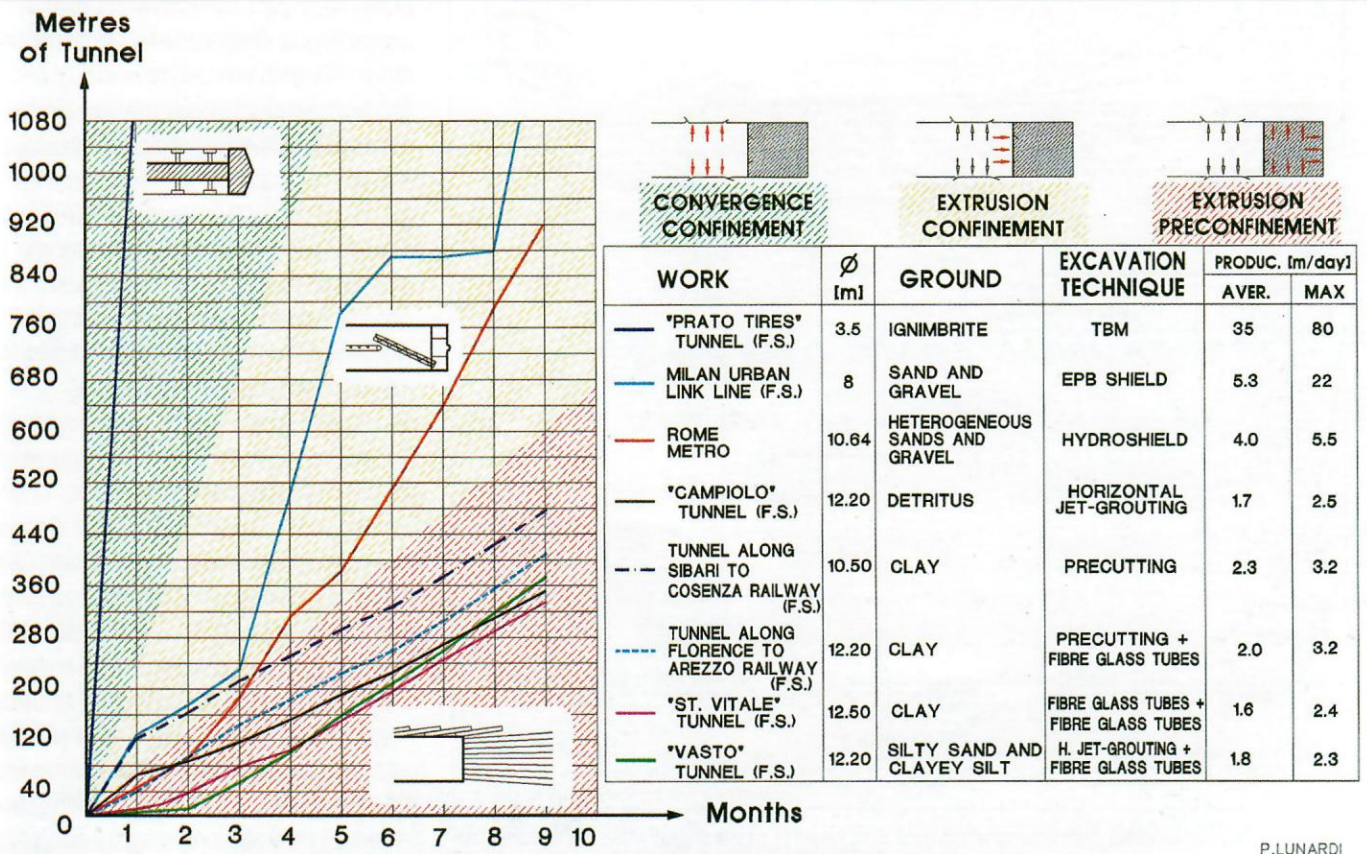
Observations

The cases described show how important it is to observe design specifications. In fact if:

1. stresses are not channeled perfectly around the tunnel;
2. the invert is not placed immediately behind the face; the presence of even considerable interventions to protect and stiffen the advance core may not be sufficient to guarantee the safety of a tunnel.

When advancing in difficult stress-strain situations it is **fundamental** to pay particular attention to the passage between the following two situations:

1. ground around the theoretical profile of the tun-



P.LUNARDI

Fig. 13 - Scavo meccanizzato - Diagrammi delle produzioni mensili. Mechanized excavation monthly production curves.

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 $50 \pm 60 \text{ t/m}^2$. 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^2 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

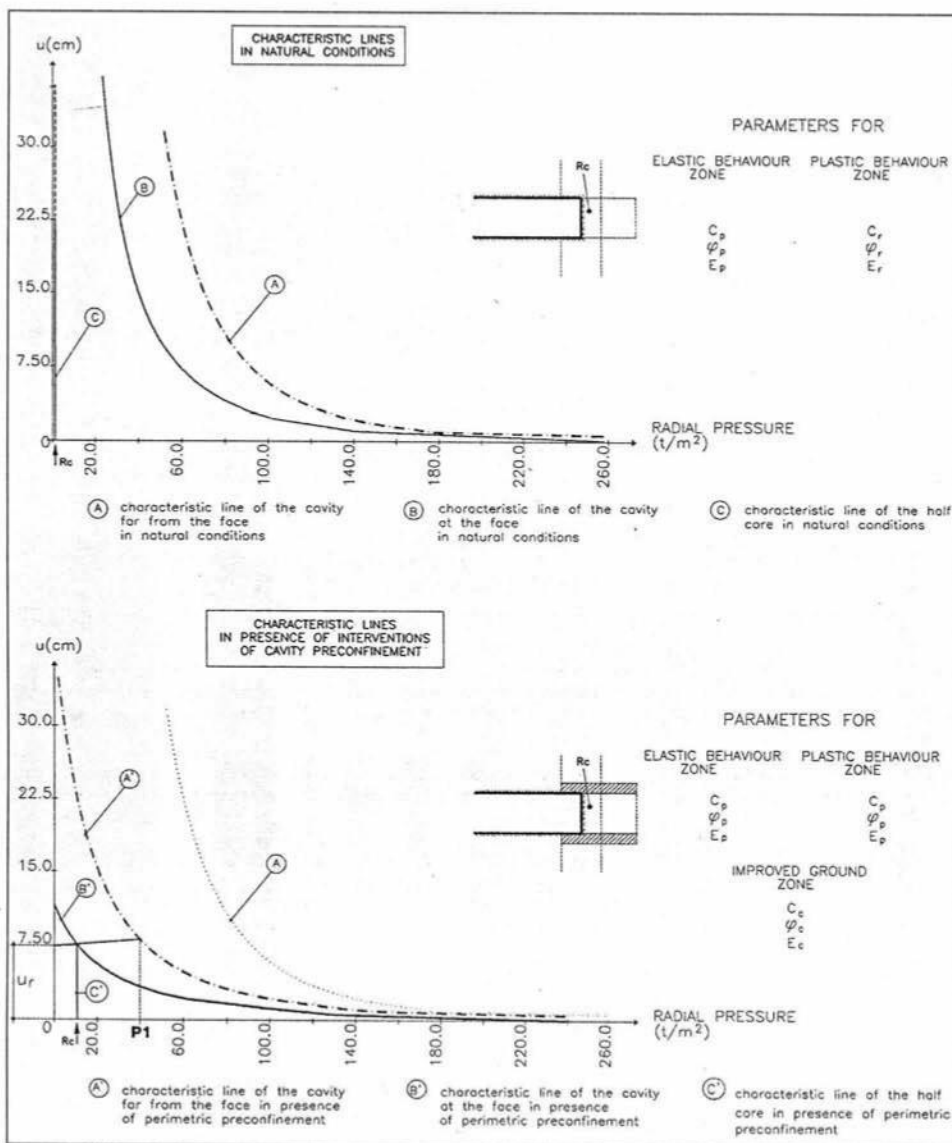


Fig. 14 - Fase di terapia: modifica delle linee caratteristiche della cavità in funzione degli interventi di consolidamento del nucleo e precontenimento del cavo. Therapy phase: Changes of the characteristic lines of a tunnel in function of the interventions of core reinforcement and cavity preconteniment.

nel confined by the core reinforced to a greater or lesser extent;

2. the same ground confined by the tunnel lining; seeing that it occurs steadily without disturbing stress and deformation processes.

In particular, it is absolutely indispensable to ensure 360° continuity to cavity confinement even close to the face by placing the invert at a distance of not more than one tunnel diameter from it. Should particular stress-strain situations require it, it is always possible to construct a lining capable of absorbing even formidable deformation by for example inserting expansion joints.

4. The rigidity of the advance core in design practice

The complexity of the mechanisms set in motion ahead of the face and the initial difficulty in identifying objective criteria to assess the stress-strain behaviour of the advance core mean that an organic and unitary effort at interpretation of the numerous aspects investigated must be made that goes beyond intuition and experimental verification.

What follows not only draws on the observations and experiences already illustrated but also on a systematic comparison of the numerical analyses that have been performed. It can be considered as an updating of the work done and that still being done with regard to the possibility of objectively and habitually employing the advance core as a stabilisation tool as part of design and therefore also of construction practice.

4.1. The analytic approach

Although the classic analytic formulation, previously cited, by Lombardi of Characteristic Lines emphasises the importance of deformation that develops in advance ahead of the face, it does not allow direct quantitative assessment of the effects produced by reinforcement of the core and preconfinement of the excavation on the stress-strain behaviour of the cavity.

Re-examination of experience acquired over the last few years has, however, allowed some new elements to be introduced in the use of this calculation method which may be useful for a hoped for future improvement of the method.

Indeed, although today one can count on the assistance of sophisticated three dimensional mathematical models capable of satisfactorily simulating the development of the phenomena in play, the possibility of studying different situations using a simple and immediate graph calculation tool, such as

characteristic lines, remains extremely useful. It has been repeatedly observed on sites that reinforcement of the advance core and preconfinement of the cavity systematically leads to an appreciable reduction in deformation of the cavity (extrusion, pre-convergence and convergence) and short and long term loads on the lining producing a clear improvement in the stress-strain behaviour of the ground almost as if it were in the elastic range. One of the numerous cases we can cite is that of the S. Vitale tunnel (Caserta to Foggia railway line). When advance was tackled using traditional criteria (NATM) in scaly clays of very poor geomechanical quality with respect to the stresses in play, work was forced to halt due to convergence measured in metres and thrusts

that could not be contained by the lining [5]. When the same tunnel was tackled by guaranteeing the correct rigidity of the advance core by protecting and reinforcing it, it displayed completely different stress-strain behaviour to the extent that average advance rates of more than 50 m. per day were achieved with convergence measured in decimeters and average radial loads on the final lining in reinforced concrete of 0.5 - 0.6 MPa. Mathematical forecasts based on the characteristic lines of the tunnel deduced from a back analysis of the previous (NATM) stress-strain history had indicated that stabilisation of the tunnel would have been achieved for radial convergence of around 14 cm. corresponding to a stabilisation pressure of 0.8

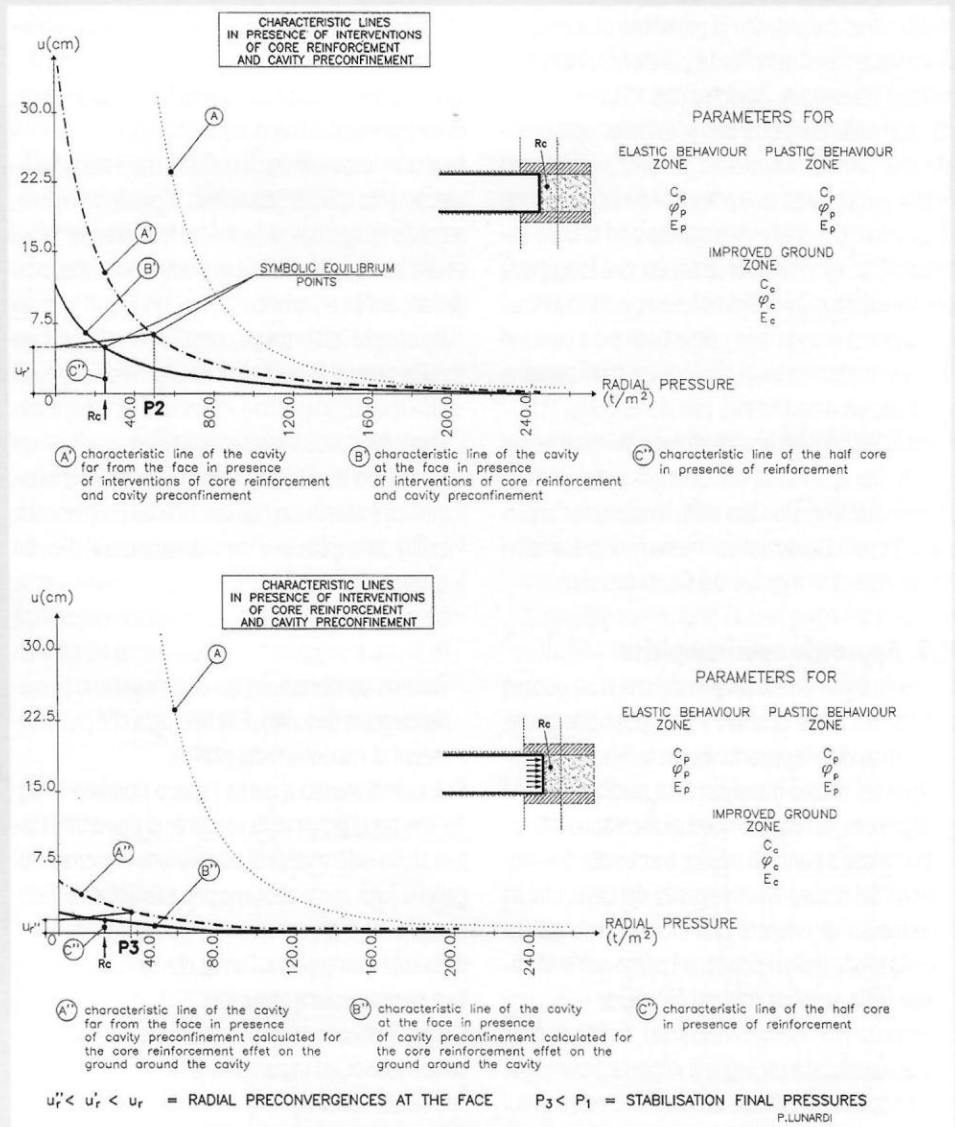


Fig. 15: Fase di terapia: modifica delle linee caratteristiche della cavità in funzione degli interventi di consolidamento del nucleo e di precontenimento del cavo. Therapy phase: Changes of the characteristic lines of a tunnel in function of the interventions of core reinforcement and cavity preconfinement.

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;

MPa, a value that turned out to be considerably greater than that actually measured.

An attempt was made to translate the above experimental observations into the calculation (Fig. 14) by hypothesising that the intervention ahead of the face was able to prevent the decay of the strength of the rock or soil mass from peak to residual values, especially if it were accompanied by sustained and constant advance cycles. These hypotheses did in fact allow less convergence of the cavity to be obtained for a given confinement pressure. As regards the stabilising effect produced by preconfinement launched ahead of the face around the excavation (horizontal jet-grouting, injections using glass fibre tubing, etc.) the characteristic lines were calculated analytically by inserting the presence of a ring of ground around the excavation with its own mechanical properties in the mathematical model. The resulting characteristic lines were much flatter and the values for stabilisation pressures and convergence calculated were much closer to the real values.

As far as the stabilising effect of the core reinforcement was concerned, this was easily introduced into the calculation by modifying the characteristic line or the so-called "half core" to take account of its greater strength. It could then be seen that the point of intersection between the characteristic line of the core and that of the cavity at the face shifted towards the elastic part of the latter showing a more reduced value for convergence in the face section, but with the consequence that given the same lining, the final stabilisation pressure that was determined was higher than it would have been if the core had not been reinforced (Fig. 15).

This is in distinct contrast with the experimental evidence, which, as has been said, shows final convergence and stabilisation pressures that are systematically less than those predicted by characteristic lines which clearly demonstrates that the rigidity of the advance core also has a significant effect on the lines of the cavity both at the face and at a distance behind it making them considerably flatter (pseudo-elastic behaviour).

In order to solve this problem, obviously due to simplifications inherent in the theoretical model used, we meticulously studied the deformation phenomena that occur ahead of the face paying attention also to quantitative aspects.

4.2. Semi-empirical approach

The study of deformation phenomena produced ahead of the face was made possible thanks to:

- the extraordinary opportunities recently offered by extrusion measurements obtained using a *sliding deformer*;
- the refinement of combined measurements of core extrusion and cavity convergence which provided definite confirmation of the role played by the rigidity of the former on the extent of the latter (increased rigidity \rightarrow diminished convergence and vice versa). These readings provide the design engineer with an extremely important signal for deciding the point in time when face advance must halt and new core reinforcement commence again in order to restore the minimum depth of reinforcement into the face needed to maintain the rock or soil mass, if not actually in the elastic range, at least as far from the failure range as possible.
- analyses of graphs obtained from the above mentioned extrusion measurements which made it possible, as we shall see, to deduce the pre-convergence of the advance core and to develop a semi-empirical approach to the use of the advance core and its rigidity in design practice.

In fact (fig. 16) from an analysis of the graphs for the core extrusion measurements (*sliding deformer*) taken in the tunnel, a method was found to correlate extrusion itself with pre-convergence of the excavation by reasoning in simple terms of the equilibrium of the volumes concerned (volume of ground that intrudes through the theoretical profile of the cavity = volume of ground that extrudes out at the face).

The method was subsequently perfected in different types of ground and on a wide range of different stress-strain conditions by studying the mapping of point to point shifts measured topographically on innumerable tunnel faces.

The study made it possible to establish that the advance core extrudes through the surface of the face according to three fundamental types of deformation depending on the type of material concerned and the stress to which it is subject:

- **cylindrical-spherical deformation**, parallel to the axis of the tunnel (the face shows translational movement, with the value for extrusion being constant throughout the whole face surface);
- **spherical crown deformation** (maximum extrusion occurs at the level of the centre line of the tunnel or immediately below this);
- **combined type deformation** cylindrical-crown spherical (the surface of the face is subject to a combination of the two types of movement described above). In practice, it is that which is most commonly encountered.

The graph shown in Fig. 16 was then compiled. It reconstructs, for the first time, the entire deformation history of a cross section of tunnel (which, as already seen, consists of pre-convergence + convergence and not just convergence; before now only the latter could be measured).

The graph can be used effectively for calibrating theoretical calculations and for the characteristic line method in particular:

- during the therapy phase, given the strength of the "half core", which may be reinforced, the theoretical value of pre-convergence at the face can be identified on the diagram of the characteristic line. This can be compared with real values obtained indirectly from extrusion measurements during the monitoring phase by using the graph mentioned above;
- during the monitoring phase, given the value for extrusion and therefore - by using the graph (Fig.

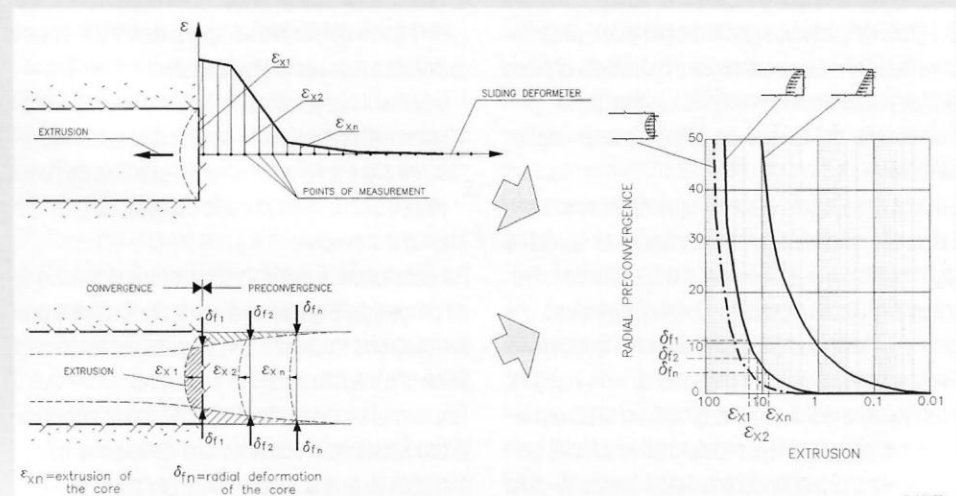


Fig. 16: Valutazione analitica della pre-convergenza del cavo in funzione delle misure sperimentali di estrusione. Analytic evaluation of the cavity pre-convergence using the experimental extrusion measurements.

- 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 dissaccoppiamento 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

16) - the preconvergence at the face, the real point of equilibrium between the characteristic lines of the "half core" and the cavity at the face can be identified on the characteristic lines diagram, if the strength of the core is known. Other points on the characteristic line valid at the face can be identified in a similar manner by varying the rigidity of the core for each point.

5. Conclusions

We have been asked many questions over the years with regard to this new approach to the design and construction of underground works which we have been advocating for some years now, following the results of our research. Three of these tend to recur:

1. Is it really possible to use the core as a stabilisation tool to obtain a final lining that is subject to less stress?
2. Can the lining of the cavity with its own rigidity, and perhaps by varying the distance from the face with which it is placed, play a role in controlling deformation phenomena that occur ahead of the face (extrusion, preconvergence)?
3. What are the limits of the new approach?

Before concluding, let us first try and briefly but thoroughly answer these questions.

1. It is known that loads on the lining are due to:
 - genuine thrusts of the rock or soil mass that arise following increases in the volume ($+\Delta V/V$) of the medium around the excavation;
 - the weight itself of the material that plasticises around the excavation;
 - deferred phenomenon resulting from creep.

We also know that all extrusion and preconvergence movement of the excavation is powerfully contained by keeping the core rigid.

On the other hand, by limiting extrusion and preconvergence movement and therefore the state of deformation of the rock or soil mass concerned to a minimum:

- on the one hand its strength characteristics are conserved: it is therefore able to contribute more effectively to the statics of the tunnel by absorbing part of the load which would otherwise act as a stress on the tunnel lining;
- on the other hand, the band of ground in the plastic range that forms around the walls of the excavation is heavily reduced and as a consequence both the extent of the load of the material that as a result of gravitational force would act to stress lining support and thrusts due to creep of the rock or soil mass are considerably reduced.

2. The studies we have conducted and the experience we have acquired with on site findings and proofs using various methods of calculation (e.g. 3D and axial symmetric F.E.M. analysis) show a total lack of connection between the lining action and core extrusion.

On the other hand we are speaking of deformation processes that occur in the elastic-plastic range which by their very nature are irreversible. Control of ground deformation at the face cannot in any way be obtained by acting on the rigidity of the lining of the cavity.

At the most, a rigid lining may halt the deformation phenomenon that has already occurred, but it can never reverse it!

Control can be obtained by acting appropriately on the rigidity of the core.

It is, however true, that the rigidity of the primary and secondary lining structures must depend on the type of reinforcement carried out at the face, since they must be appropriate to it.

It is the task of the tunnel designer to maintain an overall view of the phenomena under study and therefore account must be taken of the three dimensional nature of the excavation process right up until deciding the entity of the final lining and forecast of the long term behaviour of the cavity.

3. The limits of the method are defined by the extent to which the peak parameters of the rock or soil mass can be conserved, by conserving the geomechanical properties of the ground and if necessary improving them.

The mistake most often made is to think that by allowing the ground around the excavation to relax it is possible to then stabilise it with modest linings. This belief, which derives from observation of the course of the characteristic lines of a tunnel, is in reality unfounded, at least when working in difficult stress-strain situations because factors overlooked by the theory, such as the effect of gravity, anisotropy and the heterogeneity of the material, thrusts and deferred loads due to creep, become predominant.

Allowing the ground around the excavation to relax may bring some benefits in terms of final stabilisation pressure but only if the stress-strain state of the rock or soil mass is in any case maintained within the increasing branch (elastic-plastic) of the $\sigma-\delta$ curve that characterises it.

But how can one keep within the increasing branch of the $\sigma-\delta$ curve for the rock or soil mass?

1. Obviously one must control the deformation response of the rock or soil mass to excavation. Since

this deformation response consists, as we have seen, of extrusion, preconvergence and convergence, the core is the most appropriate and only instrument which really allows us to do this; it is done by acting on its rigidity.

2. This can be done by using protective techniques (by taking the load off the core, it is possible to conserve its peak geomechanical properties and, in the final analysis, its original rigidity) and/or reinforcement technique (which by reinforcing the core, improve its geomechanical properties and therefore increase its original rigidity).
3. By acting in this manner, considerable pre-confinement action can be exerted on the rock or soil mass ahead of the face. The faster the multiplier effect produced in the ground with respect to the action of the core, the more effective these methods will be: in grounds with prevalent internal friction, limited pre-confinement action will be necessary, while in predominantly cohesive ground action must be taken above all to increase the level of cohesion.
4. The adequacy of core protection and/or reinforcement measures taken must be monitored and regulated during the operational and monitoring phase by co-ordinated measurement of extrusion and convergence from which it is possible to deduce the absolute deformation response of the rock or soil mass and know in which section of the $\sigma-\delta$ one is working.

To conclude, obviously the first desire of a tunnel designer is to have a mathematical formula that provides a complete description of the physical phenomena that he wishes to investigate and assess. Such a formula makes design objective to a certain extent and allows a deterministic definition of what is happening, enabling an appropriate answer to be given to the problem tackled.

It is also obvious that the experimental findings available today are not yet sufficient to provide an exhaustive interpretation of a phenomenon that was found to be very complex and which presents many and different aspects to be investigated.

Therefore a complete formula for using the core in design by acting on its rigidity is not at this point in time available, but the observations and experience acquired in recent years allow us to conclude that an organic answer to the problem of controlling deformation phenomena triggered by excavation processes is undoubtedly possible and that the path taken, although difficult, is nevertheless the correct path. ●●