

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

**Pietro LUNARDI**  
Presidente SIG dal 1997

## 1. Generalità

Durante la costruzione di una galleria, specialmente quando le caratteristiche di resistenza e deformabilità del terreno in gioco sono ridotte in rapporto agli stati tensionali indotti dallo scavo, normalmente si osserva, a valle del fronte d'avanzamento, una progressiva contrazione del profilo di scavo. Se questo fenomeno lo si interpreta nell'ambito di un processo di causa-effetto, appare del tutto ragionevole identificare la causa nell'azione (lo scavo) che viene esercitata sul mezzo (il terreno) e l'effetto nella risposta deformativa di quest'ultimo, ad essa conseguente (fig. 1).

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

Questo modo di affrontare il problema (regolando l'entità della pressione radiale di contenimento del cavo in funzione della

convergenza che si decide di accettare) ha permesso di risolvere con successo lo scavo di gallerie in situazioni tenso-deformative basse o medie, ha denunciato però i propri limiti a fronte di quelle alte ed estreme.

A fronte di questa situazione, la domanda di gallerie di tutti i tipi, comprese quelle in condizioni tenso-deformative alte ed estreme, in rapida e costante crescita, ha obbligato progettisti e costruttori a mettersi al passo, elaborando teorie e procedure adeguate per controllare la risposta deformativa del mezzo in tutte le possibili situazioni tenso-deformative e non solo in quelle non difficili.

È nell'ambito di questo sforzo di adeguamento degli strumenti progettuali e delle tecniche costruttive che nasce l'approccio ADECO-RS (acronimo di Analisi delle DEformazioni Controllate nelle Rocce e nei Suoli) (fig. 2), il quale, ispirandosi a un processo di causa-effetto e analizzando quest'ultimo (risposta deformativa dell'ammasso) sia monte sia a valle del fronte di scavo attraverso una sperimentazione in grande e in piccola scala, scopre che il fenomeno è strettamente legato alla deformabilità del nucleo d'avanzamento e che questo può essere considerato la sua chiave di lettura [1]. Controllando poi, con adeguati strumenti di stabilizzazione, la resistenza e la deformabilità del nucleo, scopre che è possibile controllare anche la risposta deformativa dell'ammasso, individuando in maniera incontrovertibile in esse



- a fronte di una certa situazione tenso-deformativa - la vera causa del processo in esame.

Allora, se nel processo di causa-effetto che regola la realizzazione di ogni galleria la causa è da ricercarsi nella rigidità del nucleo d'avanzamento (resistenza e deformabilità), risulta immediatamente evidente che l'effetto (risposta deformativa) non può consistere solo nel fenomeno della convergenza, come generalmente considerato, ma dev'essere qualcosa di più complesso e meritevole d'approfondimenti.

## 2. L'analisi della risposta deformativa secondo l'ADECO-RS

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

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

- **il nucleo d'avanzamento:** identificato

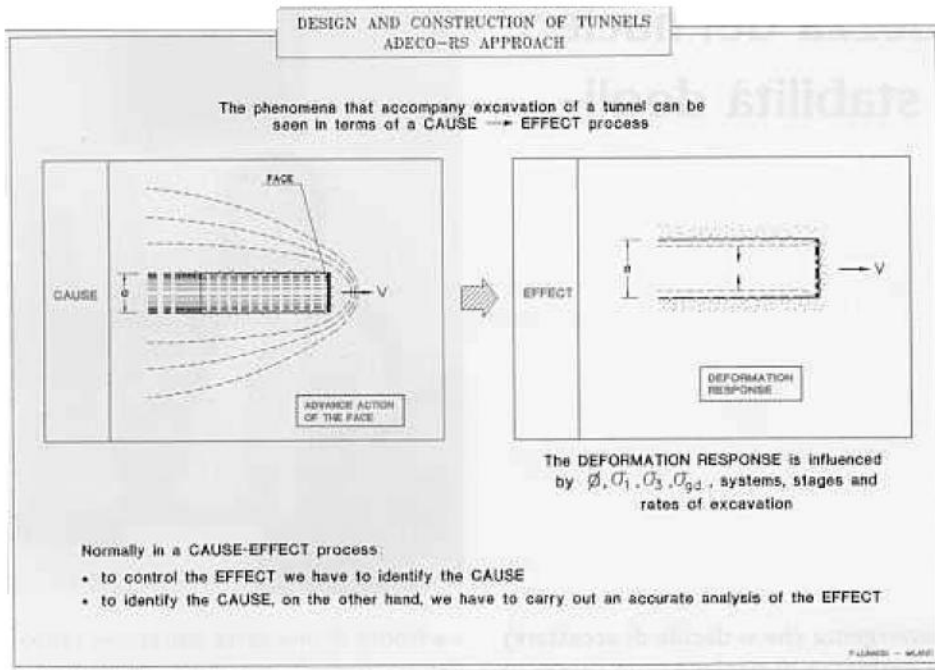


Fig. 1 - Normalmente, in un processo di causa-effetto:

- per controllare l'effetto si deve individuare la causa;
- per individuare la causa, d'altra parte, occorre studiare l'effetto in maniera approfondita.

Fig. 1 - Normally, in a cause-effect process:

- to control the effect we have to identify the cause;
- to identify the cause, on the other hand, we have to carry out an accurate analysis of the effect.

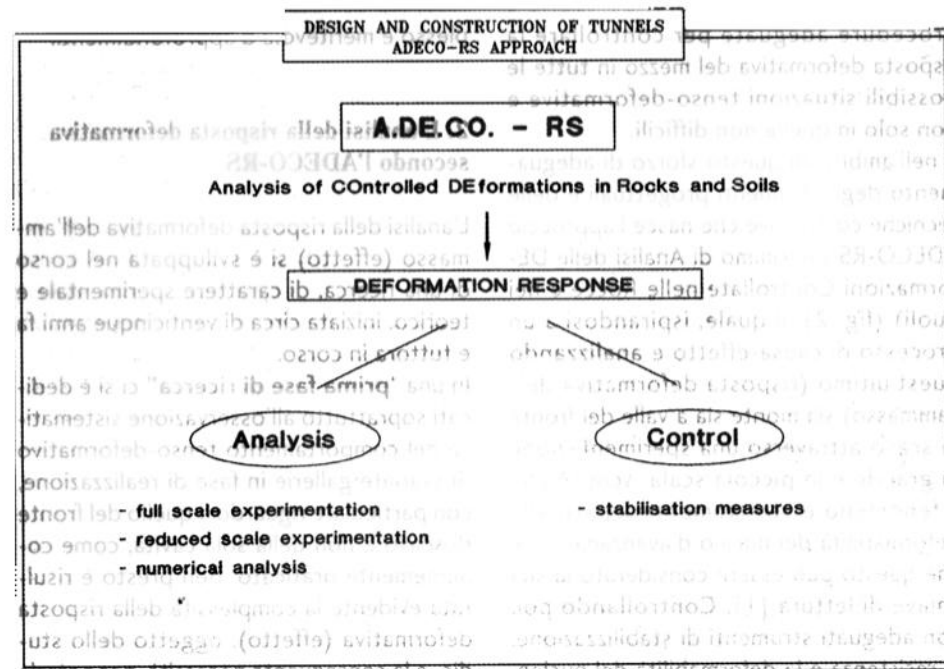


Fig. 2 - La centralità della risposta deformativa nell'ADECO-RS.

Fig. 2 - The centrality of the deformation response in the ADECO-RS approach.

con il volume di terreno che sta a monte del fronte di scavo, di forma pressoché cilindrica e dimensioni trasversale e longitudinale dell'ordine del diametro della galleria;

- **l'estrusione:** identificata con la componente primaria della risposta deformativa del mezzo all'azione dello scavo, che si sviluppa in gran parte all'interno del nucleo d'avanzamento; in funzione della resistenza, della deformabilità del nucleo e del campo di tensioni originario cui è soggetto, si manifesta in corrispondenza della superficie delimitata dal fronte di scavo, in senso longitudinale all'asse della galleria, con geometrie di deformazione più o meno assialsimmetriche (spanciamento del fronte) o di ribaltamento gravitativo (rotazione del fronte);
- **la preconvergenza della cavità:** identificata con la convergenza del profilo teorico di scavo a monte del fronte, strettamente dipendente dalle caratteristiche di resistenza e deformabilità del nucleo d'avanzamento in rapporto allo stato tensionale originario.

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

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

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



in presenza di interventi protettivi e di rinforzo.

## 2.1 Analisi sperimentali

### 2.1.1 La sperimentazione in scala reale

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

In termini di deformazione, invece, è stato studiato attraverso la realizzazione sistematica di (fig. 4):

- misure d'estrusione, ottenute attrezzando il nucleo d'avanzamento con un estrusometro orizzontale (tipo *sliding*

*micrometer*) di lunghezza pari a 2+3 diametri di scavo. Queste forniscono, in termini assoluti, la deformazione longitudinale subita dal terreno costituente il nucleo d'avanzamento sia in funzione del tempo (fase statica, a fronte fermo), sia in funzione dell'avanzamento (fase dinamica) (fig. 5);

- rilievi topografici degli spostamenti assoluti del fronte di scavo, a mezzo di mire ottiche, eseguiti in occasione degli arresti dell'avanzamento;
- misure di preconvergenza, ogniquale la morfologia del terreno e l'entità della copertura in gioco lo consentivano, a partire dalla superficie attraverso la messa in opera di estensimetri multibase, inseriti verticalmente nel terreno in corrispondenza alla chiave e alle reni della galleria in costruzione,

in congruo anticipo sul passaggio del fronte [2].

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

La sperimentazione in scala reale ha consentito [3]:

- di confermare al di là di ogni dubbio, attraverso la costruzione di speciali diagrammi estrusione-convergenza (fig. 6), l'esistenza, da un lato, di una stretta correlazione tra l'entità dell'estrusione concessa al nucleo d'avanzamento e l'entità delle convergenze che si manifestano dopo il passaggio del fronte e, dall'altro lato, che queste diminuiscono all'aumentare della rigidità del nucleo stesso;
- di stabilire che il nucleo d'avanzamento

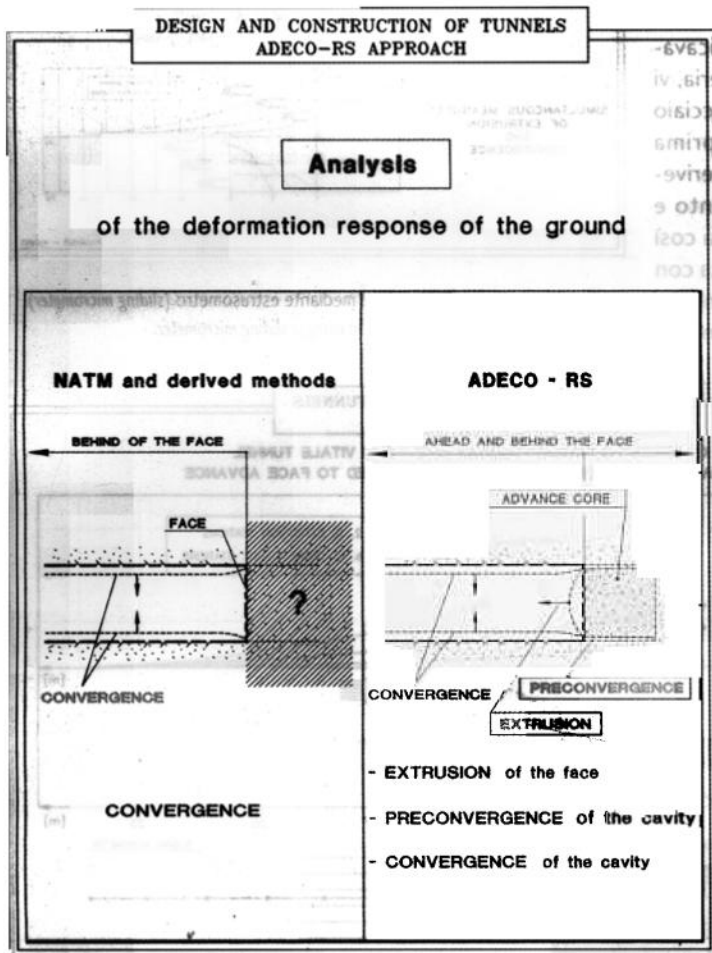


Fig. 3 - L'ADECO-RS studia la risposta deformativa del terreno anche a monte del fronte di scavo e non solo a valle, utilizzando come chiave di lettura il nucleo d'avanzamento.

Fig. 3 - ADECO-RS analyses the deformation response of the ground ahead of the face too and not just behind the face. It uses the advance core as a natural key to interpreting it.

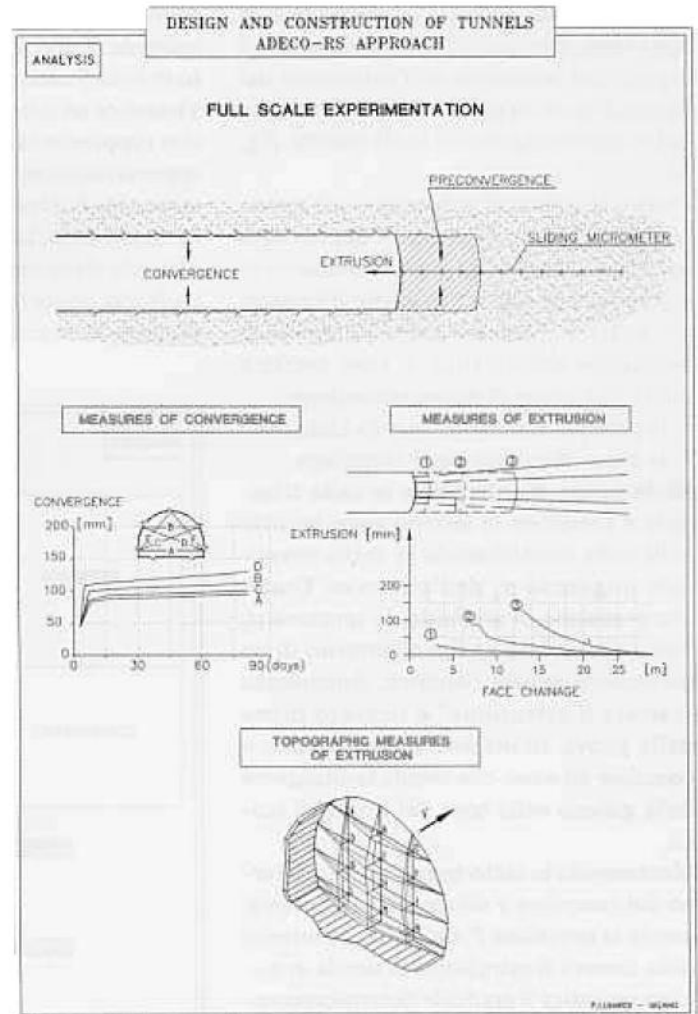


Fig. 4 - La sperimentazione in scala reale

Fig. 4 - Full scale experimentation.

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

- di valutare in termini assoluti, attraverso semplici calcoli volumetrici riportabili in abachi di semplice impiego, la pre-convergenza, anche quando non è possibile misurarla direttamente dalla superficie (fig. 7);
- di verificare come, all'aumentare dell'importanza dell'azione di precontenimento del cavo e alla conseguente riduzione della fascia di terreno plasticizzato al contorno della galleria, faccia seguito un proporzionale minor carico sui rivestimenti di prima fase e definitivi.

### 2.1.2 La sperimentazione in scala ridotta

Parallelamente agli studi sperimentali in scala reale, per analizzare a fondo tutti gli aspetti del fenomeno dell'estrusione del fronte di scavo in galleria, si sono condotte delle sperimentazioni in scala ridotta (fig. 8).

Poiché le prove di estrusione già conosciute, realizzate da Broms e Bennermark nel 1967, studiavano detto fenomeno in soli termini di soglia tensionale d'innescò, per poterlo analizzare anche in termini di evoluzione deformativa, si sono messe a punto due prove di nuova concezione:

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

**Nella prova di estrusione in cella triassiale** il campione di terreno viene inserito nella cella ricostituendo lo stato tensionale originario  $\sigma_0$  dell'ammasso. Grazie alla pressione di un fluido, la tensione  $\sigma_0$  viene riprodotta anche all'interno di un particolare volume cilindrico, denominato "camera d'estrusione" e ricavato prima della prova all'interno del campione e coassiale ad esso, che simula la situazione della galleria nella zona del fronte di scavo.

Mantenendo lo stato tensionale al contorno del campione e riducendo progressivamente la pressione  $P_i$  del fluido all'interno della camera d'estrusione, si simula in maniera realistica il graduale detensionamento prodotto nel mezzo in corrispondenza di una certa sezione all'avvicinarsi del fronte e si ottiene una valutazione dell'en-

tità del fenomeno estrusivo al fronte stesso in funzione del tempo o anche in funzione del decremento di pressione interna di contenimento  $P_i$ , ottenendo delle curve simili a quelle riportate in figura.

**Le prove di estrusione in centrifuga** sono state messe a punto e realizzate per quei casi in cui l'effetto della gravità influisce in maniera significativa sul fenomeno estrusivo. Il campione di terreno, una volta inseriti gli opportuni marcatori e trasduttori di misura delle deformazioni e delle pressioni interstiziali, viene posto in un'apposita scatola provvista di una parete trasparente. Dopo aver ricavato in esso il vano galleria, vi s'inserisce un tubo d'acciaio che rappresenta, in prima approssimazione, il priverivestimento, il rivestimento e l'arco rovescio. La cella così ottenuta viene riempita con un fluido opportunamente mantenuto in pressione. In

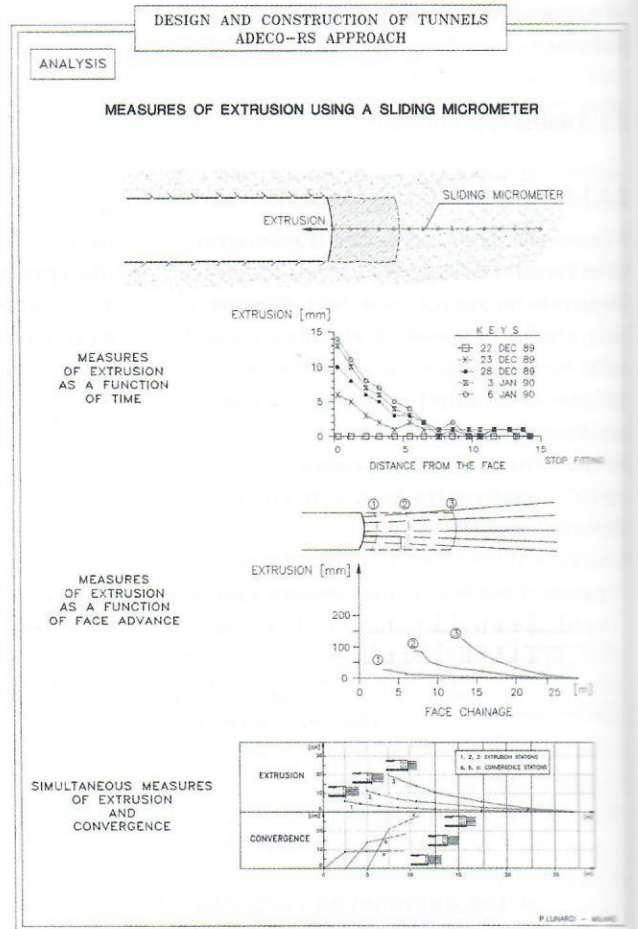


Fig. 5 - Tipi di misure di estrusione mediante estrusometro (sliding micrometer).  
Fig. 5 - Types of measures of extrusion using a sliding micrometer.

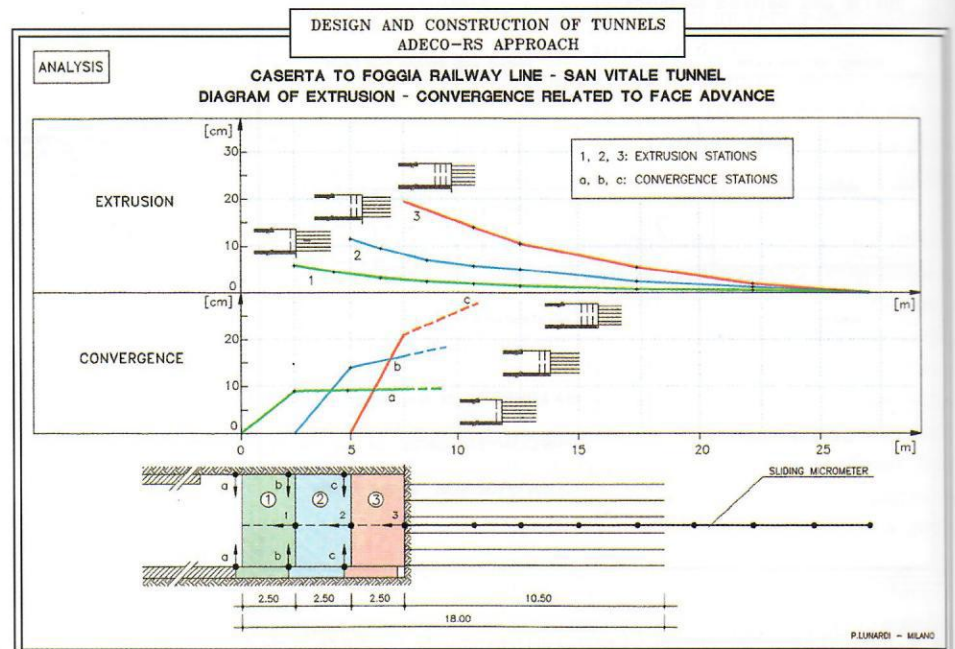
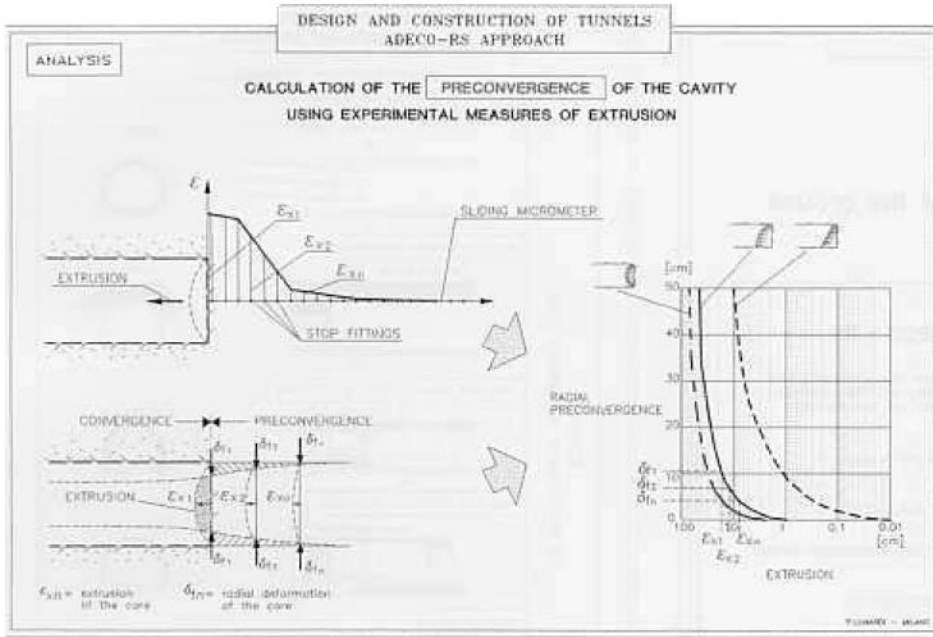


Fig. 6 - Misure combinate di estrusione-convergenza in funzione dell'avanzamento del fronte.  
Fig. 6 - Combined measures of extrusion and convergence as a function of face advance.





centrifuga viene quindi ricreata la pressione geostatica naturale, raggiunta la quale si opera la riduzione della pressione in cella per simulare l'abbattimento del terreno al fronte.

In fig. 8 sono riportati i risultati relativi a una prova eseguita su un campione di terreno ricostituito: da essi si evince come l'estrusione del fronte si manifesti rapidamente nel transitorio di scarico, con velocità crescente al progredire del rilassamento del nucleo.

Le prove di estrusione sia triassiali che in centrifuga, consentendo di riprodurre in laboratorio il fenomeno estrusivo del

Fig. 7 - Valutazione della pre-convergenza attraverso misure sperimentali d'estrusione.

Fig. 7 - Calculation of the pre-convergence of the cavity using experimental measures of extrusion

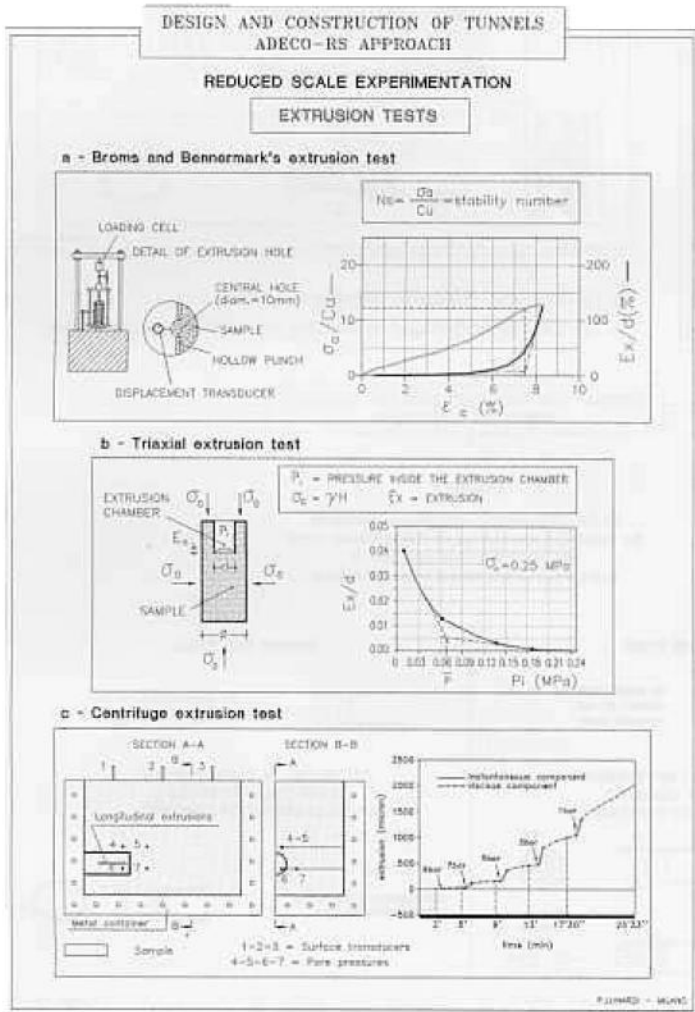


Fig. 8 - La sperimentazione in scala ridotta.

Fig. 8 - Reduced scale experimentation.

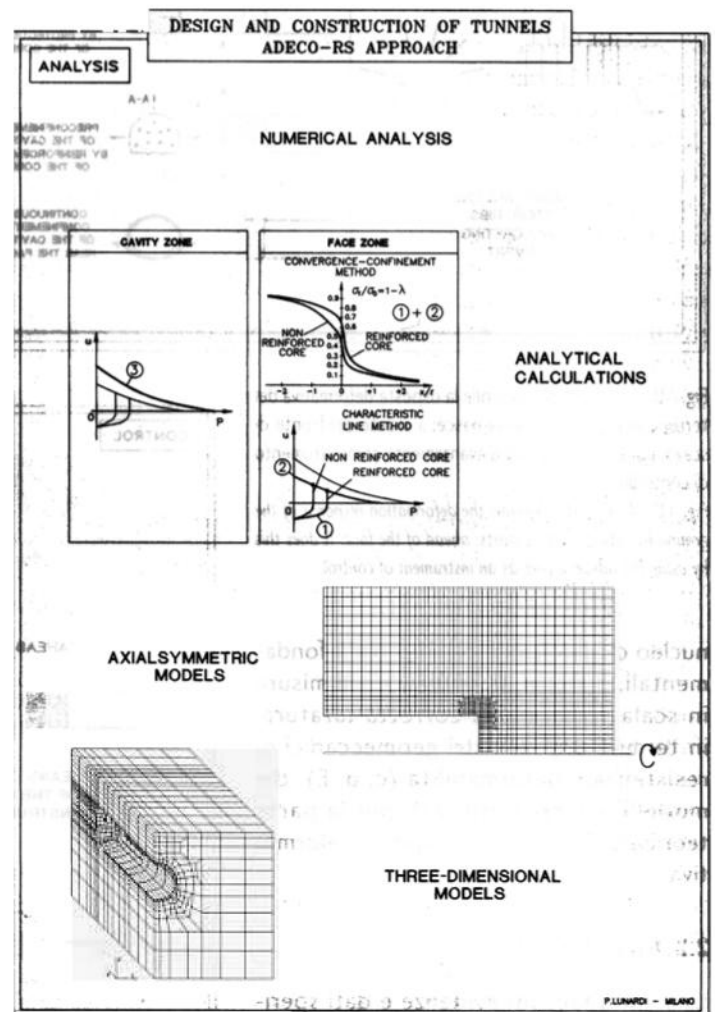


Fig. 9 - Analisi teoriche.

Fig. 9 - Theoretical analysis.

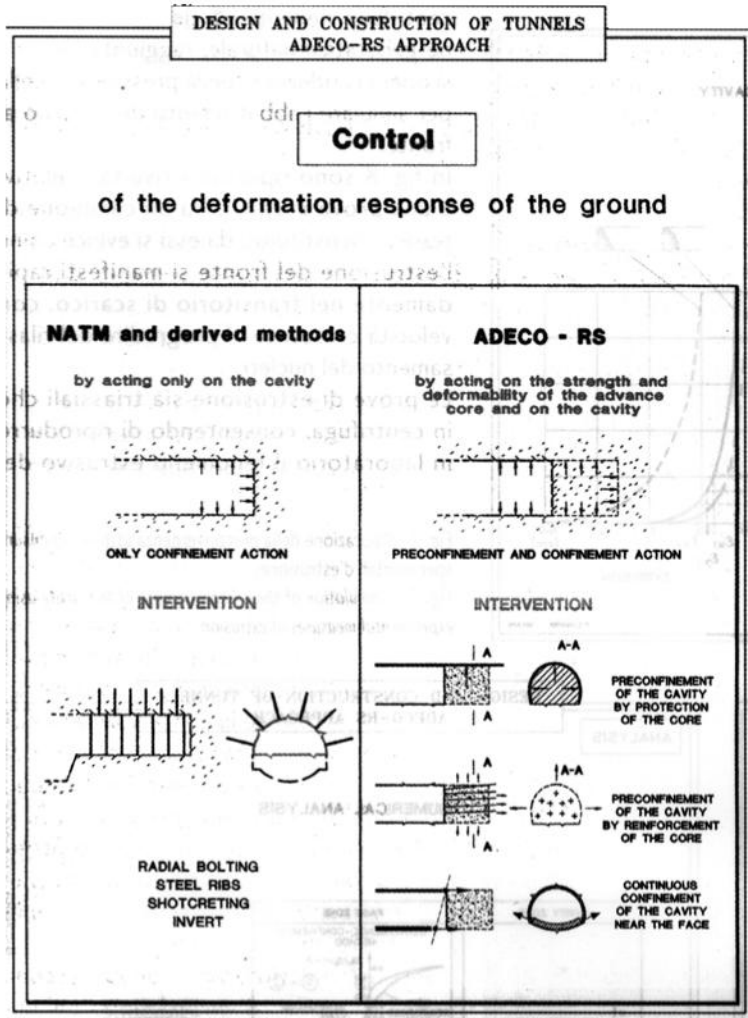


Fig. 10 - L'ADECO-RS controlla la risposta deformativa del terreno agendo là dov'essa nasce: a monte del fronte di scavo, utilizzando il nucleo d'avanzamento come strumento di controllo.

Fig. 10 - ADECO-RS controls the deformation response of the ground by acting where it starts: ahead of the face. It does this by using the advance core as an instrument of control.

nucleo d'avanzamento, sono state fondamentali, insieme ai risultati delle misure in scala reale, per la corretta taratura, in termini di parametri geomeccanici di resistenza e deformabilità ( $c$ ,  $\phi$ ,  $E$ ), dei modelli numerici utilizzati per la parte teorica dell'analisi della risposta deformativa.

## 2.2 Analisi teoriche

Una volta raccolti evidenze e dati sperimentali a sufficienza, per dare una corretta interpretazione ai fenomeni che governano il legame individuato tra rigidità del

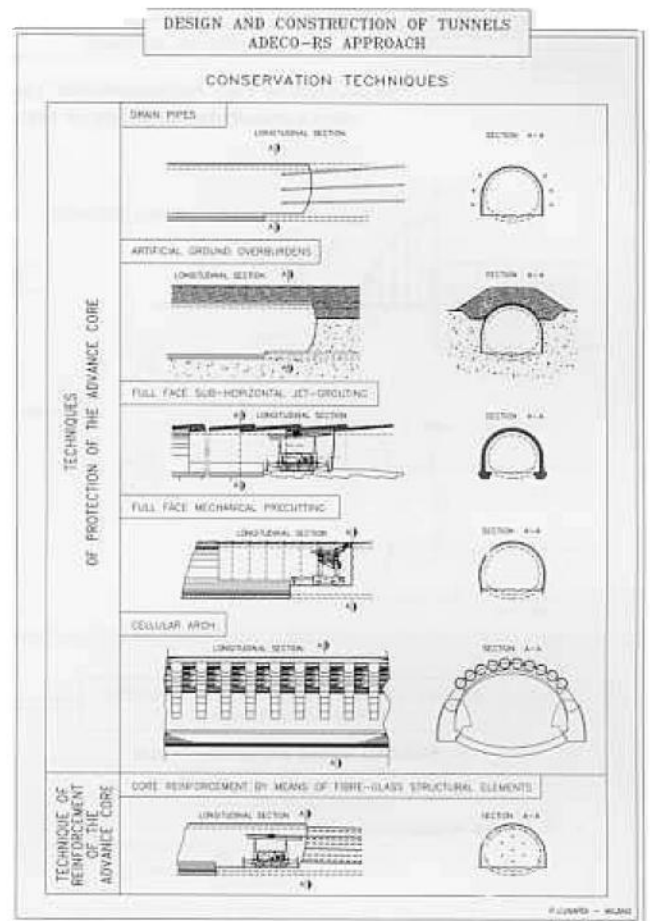


Fig. 12 - Interventi conservativi: protettivi e di rinforzo.

Fig. 12 - Conservation techniques for protecting and reinforcing the advance core.

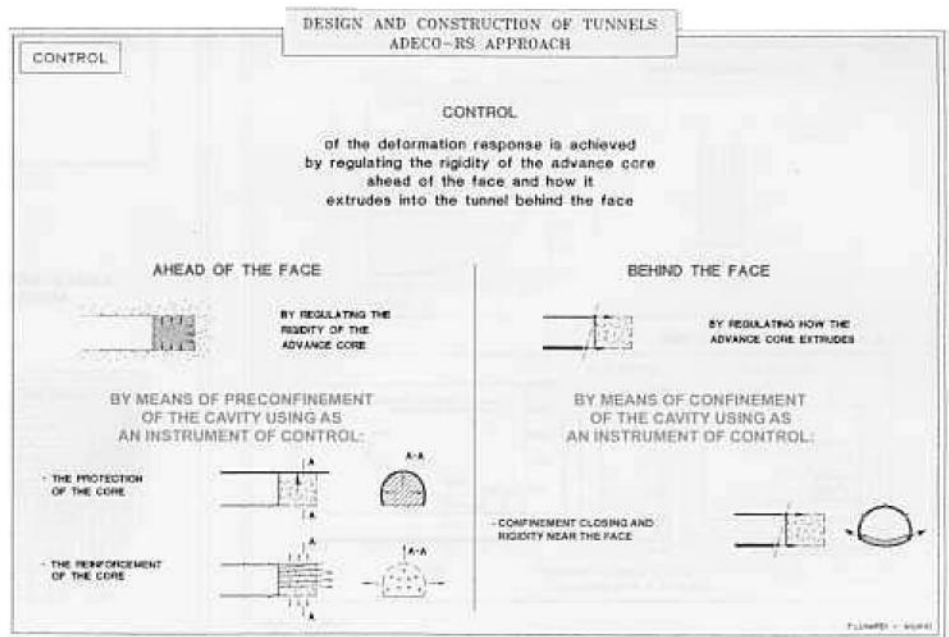


Fig. 11 - Il controllo della risposta deformativa a monte e a valle del fronte di scavo.

Fig. 11 - The control of the deformation response ahead of and behind the face.

sistema fronte di scavo-nucleo d'avanzamento da un lato e risposta deformativa dell'ammasso identificata nei tre termini di estrusione, preconvergenza e convergenza dall'altro lato, il problema era dar loro un inquadramento teorico generale, che superasse i limiti delle teorie correnti.

A questo scopo, l'analisi della risposta deformativa è proseguita per via teorica percorrendo tre diversi tipi d'approccio (fig. 9):

- cercando, inizialmente, di avvalersi delle teorie di calcolo analitico esistenti, eventualmente aggiornandole;
- quindi attraverso l'impiego di modelli numerici assialsimmetrici, agli elementi finiti o alle differenze finite;
- infine, ricorrendo alla modellazione numerica tridimensionale.

### 2.3 Risultati dell'analisi sperimentale e teorica della risposta deformativa

L'analisi della risposta deformativa attraverso la ricerca sperimentale e teorica sul nucleo d'avanzamento, considerato come chiave di lettura per l'interpretazione dei fenomeni deformativi in galleria a breve e a lungo termine, ha portato a risultati di grande interesse.

In estrema sintesi, essi:

- hanno evidenziato che la risposta deformativa dell'ammasso allo scavo non è solo convergenza, ma è composta da estrusione, preconvergenza e convergenza. La convergenza è solo l'ultimo stadio di un processo tenso-deformativo assai complesso;
- hanno mostrato che detta risposta deformativa nasce a monte del fronte in corrispondenza al nucleo d'avanzamento ed evolve a valle dello stesso, lungo la cavità;
- hanno indicato chiaramente l'esistenza di un legame diretto tra la risposta deformativa del sistema fronte di scavo-nucleo d'avanzamento (estrusione e preconvergenza) e quella della cavità (convergenza), nel senso che quest'ultima è diretta conseguenza della prima, sottolineando l'importanza di tenere sotto controllo la risposta deformativa del sistema fronte di scavo-nucleo d'avanzamento e di non limitarsi al solo controllo della cavità;
- hanno individuato nella deformabilità

del nucleo d'avanzamento la vera causa di tutto il processo deformativo nel suo complesso (estrusione, preconvergenza e convergenza) e dimostrato che, operando sulla rigidità del nucleo stesso con interventi protettivi e di rinforzo, è possibile controllare la sua deformabilità (estrusione, preconvergenza), controllando di conseguenza anche la risposta deformativa della cavità (convergenza) e l'entità dei carichi agenti a lungo termine sul rivestimento della galleria.

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

### 3. Il controllo della risposta deformativa secondo l'ADECO-RS

Sulla base di quanto emerso dall'analisi della risposta deformativa dell'ammasso, per risolvere le situazioni tenso-deformative difficili e non solo quelle facili occorre agire innanzitutto sulla deformabilità del nucleo d'avanzamento - vera causa dell'intero processo tenso-deformativo (estrusione, preconvergenza e convergenza) che s'innescano all'atto dello scavo di una galleria - e non solo sulla cavità come insegnano ancor oggi il NATM e i metodi derivati (fig. 10). In termini di forze ciò significa che occorre agire con azioni di precontenimento del cavo e non di solo contenimento, intendendo per precontenimento qualsiasi azione attiva che favorisca la formazione di effetti arco nel terreno a monte del fronte di scavo.

Ne consegue che il completo controllo della risposta deformativa dell'ammasso deve avvenire necessariamente (fig. 11):

1. a monte del fronte di scavo, regolando la rigidità del nucleo d'avanzamento con adatti interventi di precontenimento del cavo;
2. a valle del fronte stesso, regolando la maniera d'estrudere del nucleo d'avanzamento con interventi di contenimento del cavo capaci di realizzare un con-

finamento continuo della cavità, attivo già in prossimità del fronte.

#### 3.1 Il controllo a monte del fronte di scavo

Per regolare la rigidità del nucleo d'avanzamento e creare in tal modo le giuste premesse per il completo controllo della risposta deformativa dell'ammasso e quindi, in definitiva, per la completa stabilizzazione a breve e a lungo termine della galleria, l'A.DE.CO.-RS propone numerosi tipi d'intervento, ampiamente illustrati in numerosi articoli, alcuni dei quali riportati in bibliografia [1].

Tutti questi tipi d'intervento si possono inquadrare in due sole categorie (fig. 12):

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

Benché questi tipi d'intervento per il controllo della risposta deformativa a monte del fronte di scavo, qualora considerati singolarmente, abbiano campi d'applicazione piuttosto circoscritti in relazione alla natura del terreno (fig. 13), nel loro insieme sono in grado di garantire soluzioni per tutte le possibili situazioni geotecniche. Naturalmente, nulla vieta, in condizioni tenso-deformative estreme, di utilizzare contemporaneamente più tipi d'interventi per ottenere un'azione mista: protettiva e di rinforzo (fig. 14).

#### 3.2 Il controllo a valle del fronte di scavo

Contrariamente a quanto insegnano i criteri d'avanzamento tradizionali, che in-



Fig. 13 - Campo d'applicazione degli interventi che sviluppano nel terreno "effetti arco" artificiali.  
Fig. 13 - Fields of application for techniques which develop artificial arch effect in the ground.

rando la causa dei fenomeni deformativi in galleria lasciano che il nucleo si deformi, e poi obbligano a mettere in opera rivestimenti flessibili per incassare i fenomeni deformativi già innescatisi (pratica che in condizioni tenso-deformative realmente difficili regolarmente si rivela inadeguata), l'applicazione dei nuovi concetti d'avanzamento in presenza di nucleo rigido, proposti dall'A.DE.CO.-RS, richiede imprescindibilmente, se non si vuol perdere a valle del fronte il vantaggio ottenuto a monte rinforzando il nucleo, la messa in opera di rivestimenti altrettanto rigidi e di curare con la massima attenzione che la continuità dell'azione dal precontenimento al

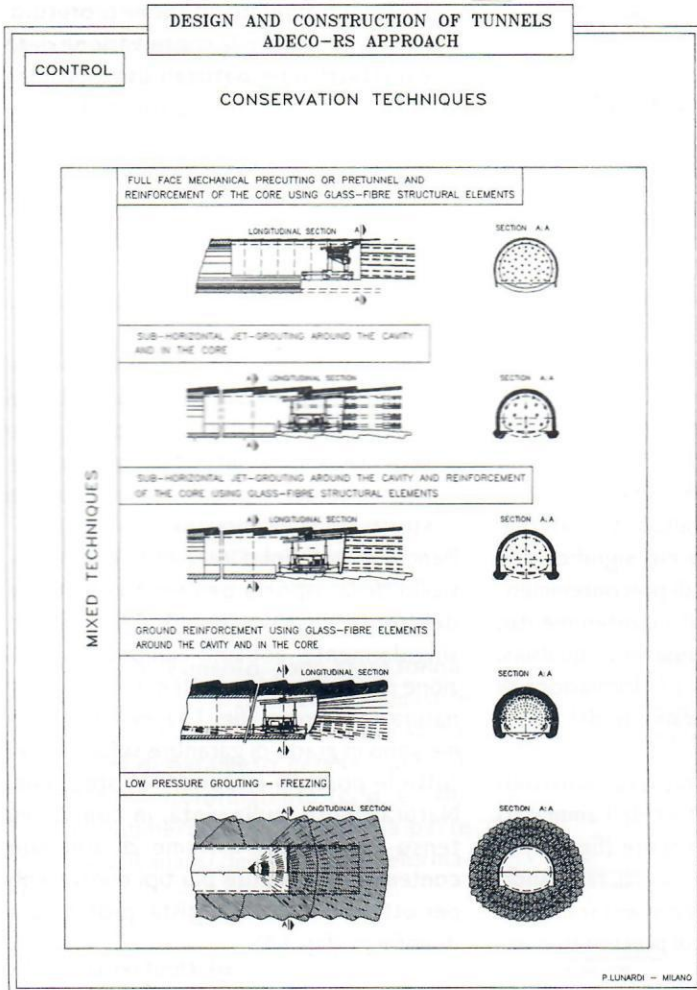
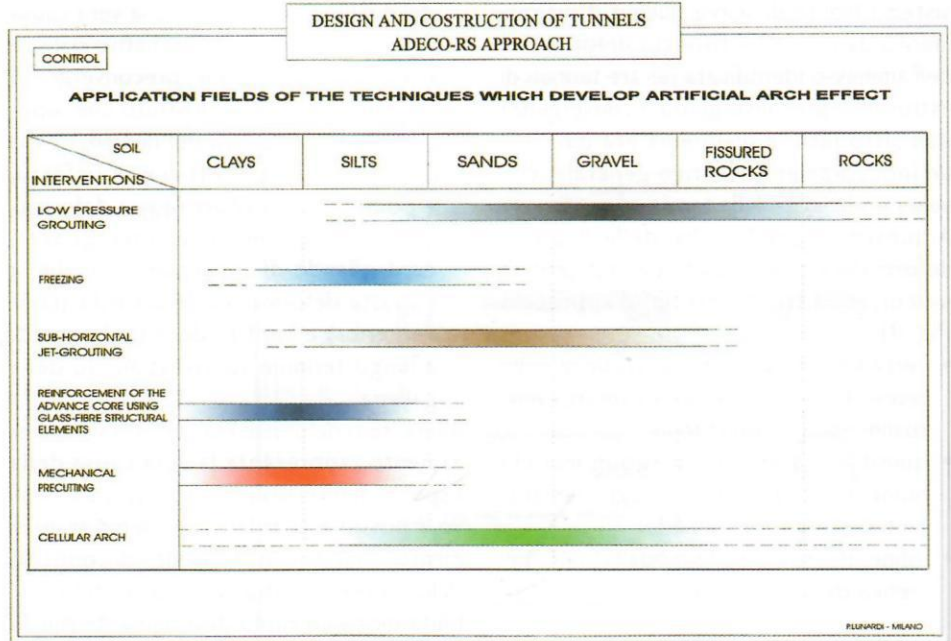


Fig. 14 - Interventi conservativi misti.  
Fig. 14 - Mixed conservation techniques.

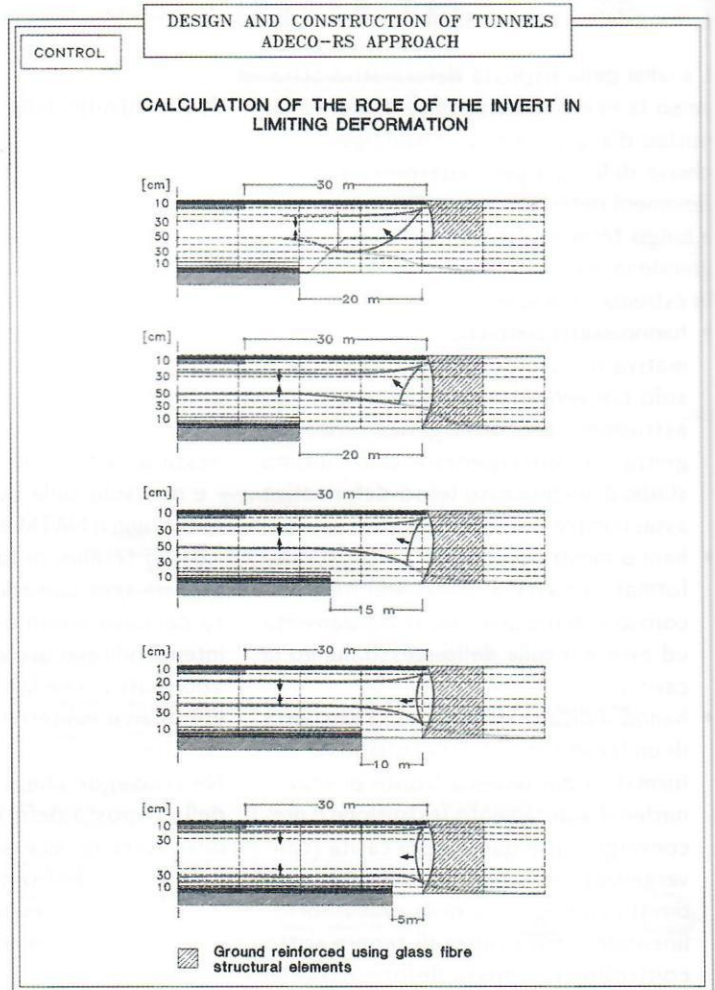


Fig. 15 - Risultati delle analisi numeriche 3D sul ruolo svolto dall'arco rovescio nella limitazione delle deformazioni.  
Fig. 15 - Results of 3D numerical analysis on the role of the invert in limiting deformation



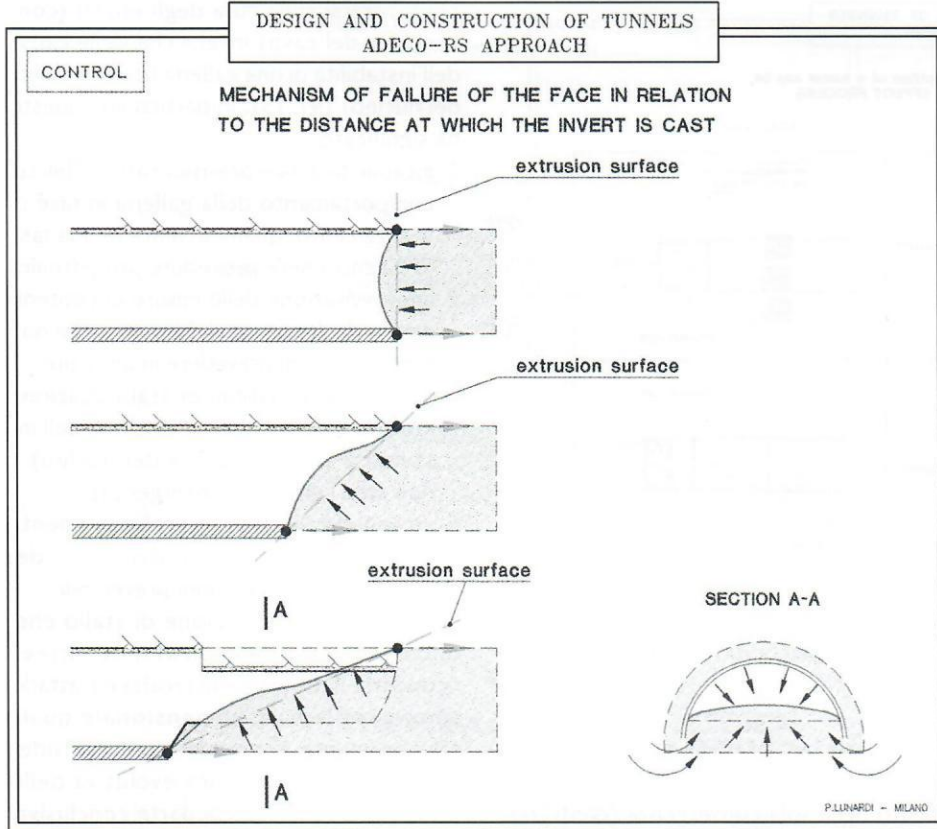


Fig. 16 - Meccanismo di rottura del fronte in funzione della distanza di posa dell'arco rovescio.

Fig. 16 - Face failure mechanism in relation to the distance at which the invert is cast.

contenimento del cavo avvenga nella maniera più graduale e uniforme possibile, senza mai dimenticare che la causa di tutto il processo tenso-deformativo che si vuol controllare è la deformabilità del nucleo d'avanzamento.

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

1. il fenomeno estrusivo, quando si produce, avviene attraverso una superficie ideale, definita superficie di estrusione, che si estende dal punto di contatto tra il terreno e l'estremità anteriore del priverivestimento al punto di contatto tra lo stesso terreno e l'estremità anteriore dell'arco rovescio (fig. 15);
2. l'avvicinamento del getto dell'arco rovescio al fronte di scavo, riducendo progressivamente la superficie d'estrusione, produce una riduzione altrettanto progressiva del fenomeno estrusivo (che tende a svilupparsi più simmetricamente sull'altezza del fronte) e quindi anche della convergenza (fig. 16).

Le stesse mostrano, inoltre, che:

- a parità di distanza dell'arco rovescio dal fronte di scavo, le deformazioni calcolate per l'avanzamento a mezza sezione

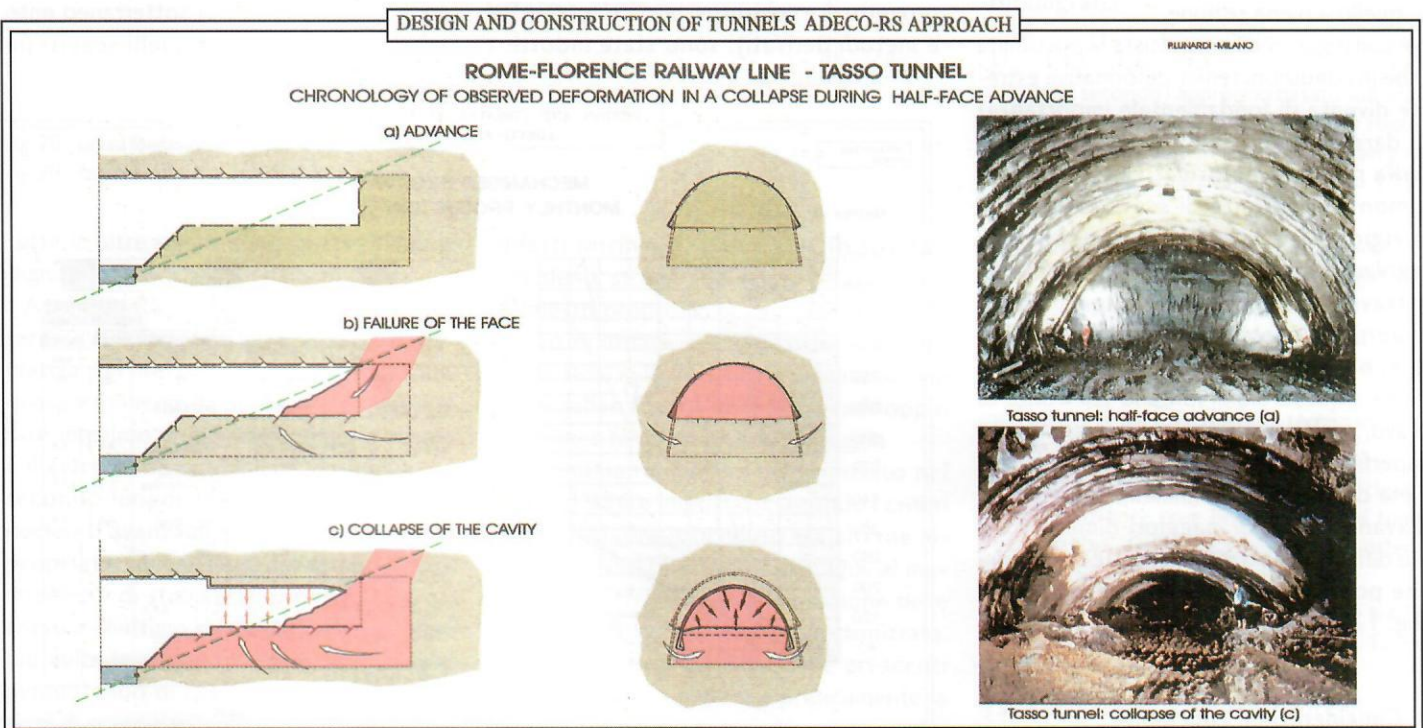


Fig. 17 - Fasi di sviluppo di un collasso durante l'avanzamento a mezza sezione.

Fig. 17 - Development stages of tunnel collapse during half-face advance.



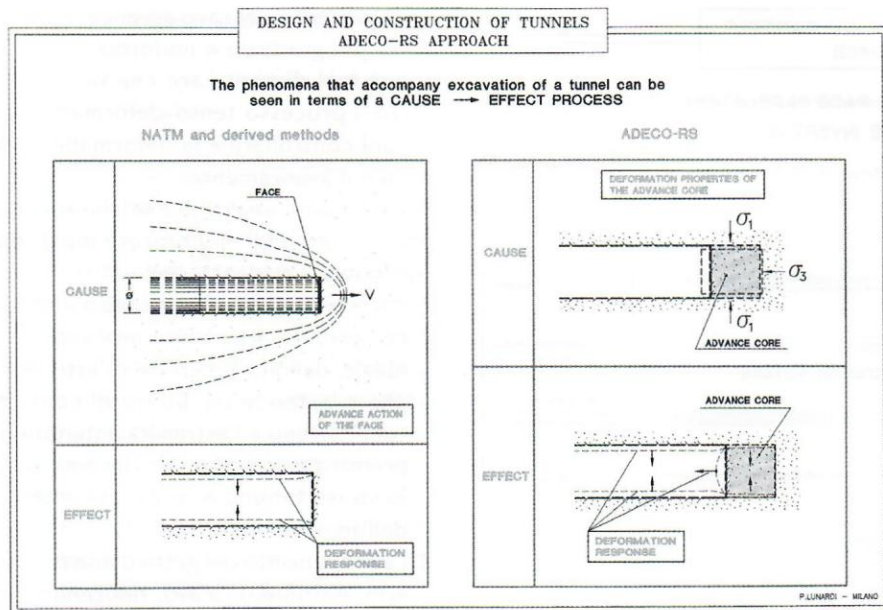


Fig. 18 - L'ADECO-RS individua la causa della risposta deformativa nella deformabilità del nucleo d'avanzamento.  
 Fig. 18 - ADECO-RS identifies the cause of the deformation response in the deformation properties of the advance core.

sono paragonabili a quelle ottenute per l'avanzamento a piena sezione (in altre parole: gettare l'arco rovescio lontano dal fronte di scavo è come avanzare a sezione parzializzata;

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

Ne consegue per il progettista la possibilità (che in condizioni tenso-deformative estreme diventa di fondamentale importanza) di dare continuità all'azione di controllo della risposta deformativa, già iniziata a monte del fronte di scavo regolando la rigidità del nucleo d'avanzamento, regolandone a valle la maniera di estrudere, attraverso l'esecuzione del getto delle murette e dell'arco rovescio il più possibile in prossimità del fronte: accettare di gettare questi ultimi lontano dal fronte di scavo, infatti, significa accettare anche una superficie d'estrusione più estesa, una maniera d'estrudere dissimetrica, un nucleo d'avanzamento di maggiori dimensioni e più difficilmente trattabile, tutte condizioni che portano all'instabilità della galleria (fig. 17).

#### 4. Considerazioni conclusive

L'errata convinzione che nel processo di causa-effetto che regola la realizzazione di

una galleria la causa risiedesse nell'azione dello scavo e l'effetto potesse essere identificato nella sola convergenza (contrazione del profilo di scavo), ha portato fuori strada per diverse decine di anni intere generazioni in Italia e all'estero, che, sulla base di quanto proposto dagli approcci progettuali e costruttivi più in voga (NATM e metodi derivati), sono state indotte a

concentrarsi sulla cura degli effetti (convergenza del cavo) invece che delle cause dell'instabilità di una galleria (deformabilità del nucleo) [4], [5]. In particolare, questo ha significato:

1. incapacità di fare previsioni attendibili sul comportamento della galleria in fase di avanzamento, quindi assenza di una fase di diagnosi nelle procedure progettuali;
2. improvvisazione delle misure di contenimento dei fenomeni deformativi, che non si era capaci di prevedere in anticipo;
3. mancanza di sistemi di stabilizzazione efficaci, capaci di curare la causa dell'instabilità (deformabilità del nucleo) e non solo l'effetto (convergenza);
4. incapacità di valutare preliminarmente l'opera sotto il profilo dei rischi, dei tempi e delle produzioni prevedibili.

Per uscire dalla situazione di stallo che, di conseguenza, si è creata, occorre ricondurre il problema alla realtà e trattarlo come problema tridimensionale quale effettivamente è, prendendo in considerazione l'intera dinamica evolutiva dello scavo e non solo la sua parte conclusiva. Solo per questa via è possibile, infatti, pur con le inevitabili indeterminanze dovute alla complessità dei modelli da analizzare, ricondurre la progettazione e costruzione di opere in sotterraneo entro schemi paragonabili a quelli seguiti per

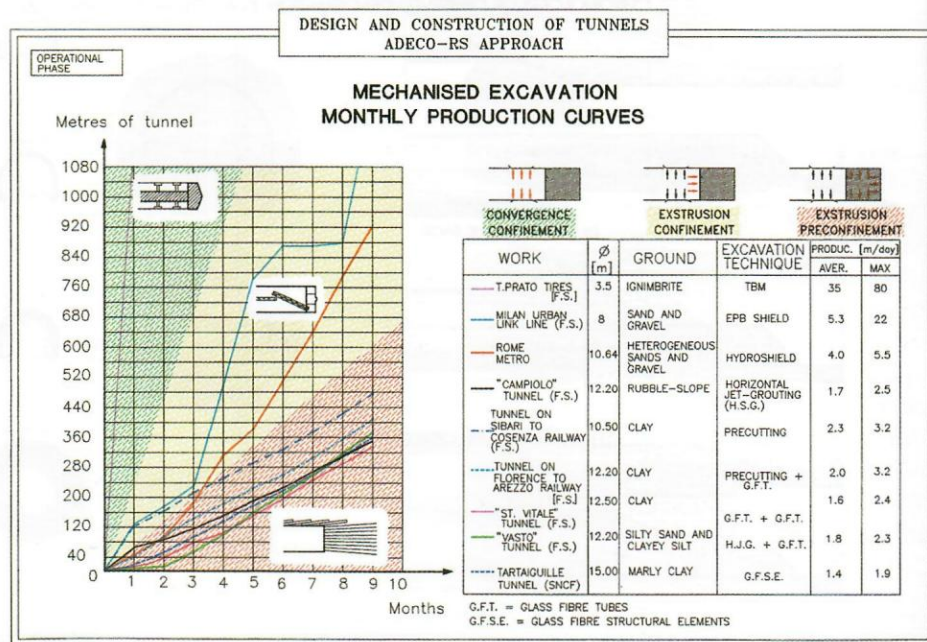


Fig. 19 - Scavo meccanizzato in condizioni tenso-deformative difficili: produzioni mensili ottenute e loro linearità.  
 Fig. 19 - Mechanised excavation in difficult stress-strain conditions: monthly advance rates achieved and their linearity.



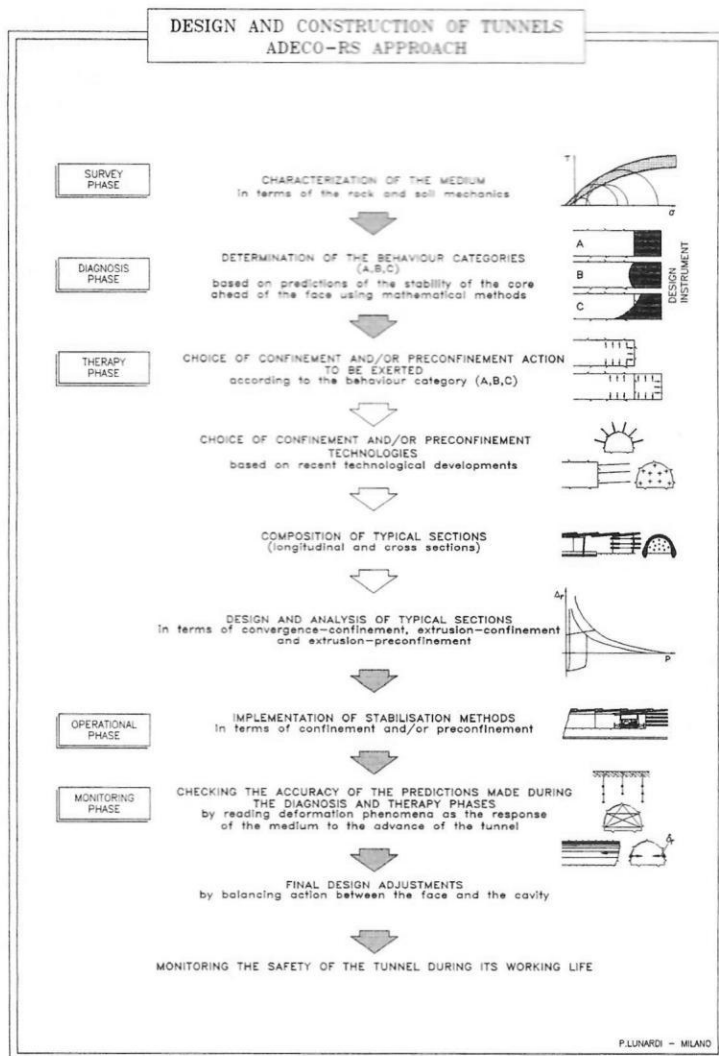


Fig. 20 - Le fasi fondamentali dell'ADECO-RS.

Fig. 20 - Fundamental phases of ADECO-RS approach.

tutte le altre opere d'ingegneria, ridando dignità a questa branca della disciplina. L'A.DE.CO.-RS, ponendo al centro dell'interesse del progettista la risposta deformativa del mezzo all'azione dello scavo, quale fenomeno da analizzare e interpretare in primo luogo, attraverso la misura e il calcolo, da controllare e regimare in secondo luogo, attraverso l'utilizzo del nucleo d'avanzamento, regolandone appropriatamente la rigidità con adatti interventi di stabilizzazione (Fig. 18), nel corso dell'ultimo decennio ha dimostrato più volte la propria validità concettuale, permettendo di risolvere numerose situazioni di scavo particolarmente difficili dove l'applicazione dei vecchi concetti (NATM e metodi derivati), che in situazioni più semplici non mostrano i propri limiti o

difetti intrinseci, aveva sortito risultati deludenti, se non addirittura catastrofici. A questo proposito, è certamente significativo ricordare, per concludere, quanto verificatosi in Italia durante la realizzazione della galleria San Vitale per il raddoppio della linea ferroviaria Caserta-Foggia. L'avanzamento dello scavo, iniziato nel marzo 1986 e impostato secondo i criteri del NATM, era proceduto tra alterne vicende sino alla fine del 1988. Qui, al momento di attraversare la formazione delle argille varicolori, fortemente tettonizzata, si cominciarono ad incontrare crescenti difficoltà, tali da impedire praticamente la prosecuzione dei lavori. L'avanzamento, ripreso dopo circa un anno in seguito ad una radicale revisione del progetto basata sui principi dell'ADECO-RS, è potuto fi-

nalmente continuare senza interruzioni e con crescente successo man mano che il cantiere prendeva confidenza con l'impiego delle nuove tecnologie, facendo registrare produzioni medie anche superiori a 50 m/mese contro i circa 2 m/mese precedenti [1].

Alla luce delle esperienze maturate negli ultimi dieci anni si può tranquillamente affermare che l'approccio di progettazione e costruzione di gallerie A.DE.CO.-RS consente di conseguire produzioni pressoché lineari indipendentemente dai tipi di terreno attraversati e dalle condizioni tenso-deformative contingenti (fig. 19). Ne consegue che, mentre una volta era possibile parlare di meccanizzazione solo quelle situazioni trattabili con azioni di semplice contenimento del cavo o del fronte, oggi è possibile parlare di meccanizzazione anche in quelle più complesse e difficili, che necessitano la messa in opera di azioni di preconfinamento.

Gli scavi in galleria, dunque, possono finalmente essere affrontati in maniera industriale (regolarità dell'avanzamento, previsione di tempi e costi) in qualsiasi tipo di terreno e di copertura.

## Bibliografia

- [1] LUNARDI P. "Progetto e costruzione di gallerie secondo l'approccio basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli" (articolo in tre parti), Quarry and Construction, marzo 1994, marzo 1995, aprile 1996
- [2] LUNARDI P., BINDI R., FOCARACCI A., "Nouvelles orientation pour le projet et la construction des tunnels dans des terrains meubles. Études et expériences sur le préconfinement de la cavité et la préconsolidation du noyau au front", Colloque International "Tunnels et micro-tunnels en terrain meuble", Paris, 7-10 février 1989
- [3] LUNARDI P., "L'influence of the rigidity of the advance core on the safety of tunnel excavation", Gallerie e grandi opere sotterranee, n. 52, 1997
- [4] KOVARI K., "On the Existence of NATM, Erroneous Concepts behind NATM", Tunnel, No. 1 Year 1994
- [5] LUNARDI P., "Convergence-confinement ou extrusion-préconfinement?", Colloque "Mécanique et Géotechnique", Laboratoire de Mécanique des Solides - École Polytechnique, Paris 19 mai 1998

# The influence of the rigidity of the advance core on the stability of tunnel excavations

P. LUNARDI  
SIG President since 1997

## 1. Introduction

During the construction of a tunnel, and especially when the strength of the ground concerned is low and the tendency to deform high in relation to the stress states induced by excavation, normally a progressive contraction of the profile of the excavation is observed in the tunnel behind the face. If this phenomenon is interpreted in terms of a cause and effect process, it would seem totally reasonable to identify the action (the excavation) that is exerted on the medium (the ground) as the cause and the deformation response of the medium that results as the effect (fig. 1).

While until only a few years ago the cause was not felt worthy of attention nor of any detailed analysis, thus remaining only apparently determined, the "effect" was immediately identified as the convergence of the cavity (corresponding to the contraction of the excavation, mentioned above) and was subject to study. On the basis of these studies, theories, design approaches and construction systems were developed which assumed that all the problems connected with tunnel excavation could be solved if the effect (convergence) was controlled by the use of simple radial confinement action.

This way of tackling the problem was successful for driving tunnels under low to medium difficulty stress-strain conditions but showed its limitations when faced with very or extremely difficult conditions.

Given this situation, the rapid and constantly growing demand for tunnels of all types, including those under high and extreme stress-strain conditions has forced design and construction engineers to meet this pressing need and to formulate theories and procedures capable of controlling the deformation response of the medium under all possible stress-strain conditions and not just under "not difficult" conditions.

It was in the context of this effort to improve design instruments and construction techniques that the ADECO-RS (acronym for the Analysis of Controlled DEformation in Rocks and Soils) approach (fig. 2) was developed. It is based on the concept of a cause and effect process and by analysing the latter (the deformation response of the ground) both ahead of the face and back from it in the tunnel, employing both full scale and laboratory experimentation, it was discovered that the phenomenon is closely tied to the strength and deformation properties of the advance core and that this can be considered the key to interpreting it [1]. If the susceptibility to deformation of advance core is then controlled using appropriate stabilisation techniques, it is found that it is possible to control the deformation response of the ground too. This incontrovertibly identifies the deformation properties of the advance core - given certain stress-strain conditions - as the true cause of the process under examination.

Now if the cause in the cause and effect process that governs the construction of all tunnels is to be sought in the rigidity of the advance core (deformation properties), then it is immediately obvious that the effect (the deformation response) cannot consist of convergence only, as is generally considered, but must be something more complex and worthy of examination.

## 2. Analysis of the deformation response according to the ADECO-RS approach

The analysis of the deformation response of the rock mass (effect) has developed during the course of research, both experimental and theoretical, that began more than twenty five years ago and is still continuing.

The "first research stage" was dedicated above all to systematic study of the stress-strain behaviour of a wide range of tunnels during construction. Particular attention was paid to the behaviour of the face and not just that of the cavity as is normally done. The complexity of what we were studying, the deformation response (effect) became clear very soon and we needed to identify new terms of reference in order to define it fully (fig. 3):

- **the advance core:** the volume of ground that lies ahead of the face, virtually cylindrical in shape with the height and diameter of the cylinder being approximately the same size as the diameter of the tunnel;
- **extrusion:** the primary component of the deformation response of the medium to the action of excavation that develops largely inside the advance core; extrusion depends on the strength and deformation properties of the core and on the original stress field to which it was subject; it manifests on the surface of the face in the direction of the longitudinal axis of the tunnel and its geometry is either more or less axial-symmetric (bellying of the face) or of gravitational fall-in (rotation of the face);
- **preconvergence of the cavity:** convergence of the theoretical profile of the tunnel ahead of the face, strictly dependent on the relationship between the strength and deformations proper-



ties of the advance core and its original stress state.

Subsequently, during the "second research stage", detailed analysis - above all in terms of timing - was performed on instability phenomena observed during the construction of at least 400 km of tunnel in an extremely wide range of ground types and stress strain conditions. The aim was to seek a connection between the behaviour of the face-advance core system (extrusion and preconvergence) and that of the cavity (convergence).

Once we had established that the deformation response as a whole (extrusion, preconvergence and convergence) is systematically conditioned by the rigidity of the core of ground at the face (which is therefore the real cause of it), at a third stage, "the third research stage", we worked to discover to what extent the deformation response of the cavity (convergence) could be controlled by acting on that core. To do this the stress strain behaviour of the advance core, systematically compared to that of the cavity, was studied both in the absence and the presence of intervention to protect and to reinforce the core.

## 2.1 Experimental Analysis

### 2.1.1 Full scale experimentation

The behaviour of the advance core in terms of stability was analysed using an observational approach. More than 1,000 tunnel faces were classified and the data for them summarised on special cards.

In deformation terms, on the other hand, the advance core was studied by systematic measurement of (fig. 4):

- extrusion, obtained by equipping the advance core with a horizontal extrusion meters (sliding micrometer type) of a length equal to 2 - 3 times the diameter of the excavation. These furnish longitudinal deformation in absolute terms of the ground that makes up the advance core, both as a function of time (static phase, face halted) and as a function of face advance (dynamic phase) (fig. 5);
- topographical movements in absolute terms of the face, by means of optical targets, taken with the face at a halt;
- preconvergence taken from the surface,

whenever the morphology of the terrain and the size of the overburden in question allowed, by setting up multibase extensometers, inserted vertically into the ground before the arrival of the face above the crown and sides of the tunnel being driven [2].

These measurements were naturally always accompanied by traditional measurements such as measures of convergence and of stress on linings.

Full scale experimentation allowed the following to be achieved:

- confirmation beyond any reasonable doubt, by the construction of special extrusion-convergence diagrams (fig. 6) of the existence of a close correlation between the entity of extrusion in the advance core and that of convergence that manifests after the passage of the face and also how these both decrease as the rigidity of the core is increased;
- establishing that the advance core extrudes through the wall of the face (surface extrusion) with three different basic types of deformation (cylindrical, with the crown spherical, combined) as a function of the material involved and the stress state it is subject to;
- calculation in absolute terms of preconvergence, using simple volumetric calculations that can be easily performed using tables, even when it is not possible to measure it directly from the surface (fig. 7);
- verification that as preconfinement action of the cavity increases and the band of plasticised ground around the tunnel decreases as a consequence, there is subsequently a proportionally smaller load on the preliminary and final linings [3].

### 2.1.2 Laboratory experimentation

Reduced scale laboratory experiments (fig. 8) were conducted in parallel to full scale experimentation in order to thoroughly analyse all aspects of face extrusion in tunnels.

Since the already existing extrusion tests, invented by Broms and Bennemark in 1967 studied the phenomenon only in terms of trigger thresholds, two new types of tests were developed in order to analyse the course of the phenomenon:

- the triaxial extrusion test.

- the centrifugal extrusion test.

In the triaxial cell extrusion test, the sample of ground is inserted into a cell and the original stress state  $\sigma_0$  of the rock mass is recreated. The pressure of the fluid is then used to also reproduce the stress state inside a special cylindrical volume termed an "extrusion chamber" and cut out of the inside of the test sample before the test. The chamber is coaxial to the sample and simulates the situation of a tunnel around the face.

By maintaining the stress state around the sample constant and gradually reducing the pressure  $P_i$  of the fluid inside the extrusion chamber, a realistic simulation is obtained of the gradual decrease in stress produced in the medium for a given section of tunnel as the face approaches. A forecast of extrusion at the face as a function of time or as a function of the decrease in internal confinement pressure  $P_i$  is obtained with curves similar to those in the figure.

Centrifuge extrusion tests were developed and performed for those cases in which gravity has a significant influence on extrusion. Special markers and transducers for measuring deformation and interstitial pressure are inserted in the sample of ground, which is then placed in a special box with a transparent wall. After having cut out the opening of the tunnel in this, a steel tube is inserted representing a first approximation of the preliminary lining, the lining and the tunnel invert. The cell thus obtained is filled with a fluid kept under pressure. The natural geostatic pressure is then recreated in the centrifuge and once this is reached the pressure in the cell is reduced to simulate the excavation of ground at the face

Figure 7 gives the results for a centrifuge extrusion test performed on a reconstituted sample of ground: they show that extrusion at the face manifests rapidly at the moment in which the pressure is released and develops with increasing speed as relaxation of the core progresses.

The triaxial cell and centrifuge extrusion tests, by reproducing the phenomenon of extrusion of the advance core in the laboratory together with the results of full scale measurements were fundamental for the correct weighting of the geomechanical strength and deformation parameters

( $c$ ,  $\phi$ ,  $E$ ) in the mathematical models used in the theoretical part of the analysis of the deformation response.

## 2.2 Theoretical analysis

Once sufficient evidence and experimental data had been collected for a correct interpretation of the phenomena that govern the connection identified between on the one hand the rigidity of the face-advance core system and on the other the deformation response of the ground consisting of three types, extrusion, preconvergence and convergence, the problem was then how to place them within a general theoretical framework which overcame the limitations of current theories.

To do this, our analysis of the deformation response continued using theoretical tools. Three different approaches were employed (fig. 9):

- initially we tried to make use of existing calculation theories updating them where necessary;
- we then sought to solve the problems using finite element and finite differences axial-symmetric mathematical models;
- finally we resorted to three dimensional numerical modelling.

## 2.3 Results of experimental and theoretical analysis of the deformation response

Our analysis of the deformation response by conducting theoretical and experimental research on the advance core taken as the key to interpreting long and short deformation in tunnels produced some very interesting results.

Very briefly they:

- showed that the deformation response of the ground to excavation is not only convergence, but consists of extrusion, preconvergence and convergence. Convergence is only the last stage of a very complex stress-strain process;
- showed that the deformation response begins ahead of the face in the advance core and develops backwards from it along the cavity;
- clearly indicated the existence of a direct connection 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 underlining the importance of monitoring the deformation response of the face-advance core system and not just the cavity;

- identified the deformation properties of the advance core as the true cause of the whole deformation process (extrusion, preconvergence and convergence) and showed that it is possible to control deformation of the advance core (extrusion, preconvergence) by stiffening it with protective and reinforcement techniques and as a consequence also control the deformation response of the cavity (convergence) and the size of the long and short term loads on the tunnel lining.

Consequently, if the deformation properties of the advance core constitute the true cause of the deformation response of the ground to excavation, it is possible to consider it as a new tool for controlling that response: an instrument whose deformation properties play a determining role in the long and short term stability of the cavity.

## 3. Control of the deformation response according to the ADECO-RS approach

The results of our analysis of the deformation response of the ground showed that in order to solve the problems of difficult and not just easy stress-strain conditions, one has to intervene above all on deformation properties of the advance core - the true cause of the entire stress-strain process (extrusion, preconvergence and convergence) that is triggered when a tunnel is excavated - and not just on the cavity as is still taught today by the NATM and derived methods (fig. 10). In terms of forces this means employing preconfinement and not just confinement action where preconfinement is defined as any active action which favours the formation of an arch effect in the ground ahead of the face.

It follows that complete control of the deformation response in the ground must necessarily be achieved (fig. 11):

1. ahead of the face, by regulating the

rigidity of the advance core using appropriate preconfinement techniques;

2. down from the face in the cavity, by regulating the manner in which the core itself extrudes using confinement techniques in the tunnel capable of providing continuous active confinement of the cavity close to the face.

### 3.1 Control ahead of the face

In order to regulate the rigidity of the advance core and to thereby create the right conditions for complete control of the deformation response of the ground and therefore, in the final analysis, for complete stabilisation of the tunnel in the long and short term, the A.DE.CO.-RS approach proposes, as will be seen, numerous types of intervention that have been fully illustrated in numerous articles, some of which are listed in the bibliography [1].

All these types of intervention can be divided into two single categories (fig. 12):

**R protective intervention**, when the intervention channels stresses around the advance core performing a protective function that ensures that the natural strength and deformation properties of the core are conserved (e.g. shells of improved ground by means of sub-horizontal jet-grouting, shells of fibre reinforced cement or concrete placed in advance of the face by mechanical precutting);

- **reinforcement intervention**, when the intervention acts directly on the consistency of the advance core to improve its natural strength and deformation properties by means of appropriate ground improvement techniques (e.g. ground reinforcement of the core using fibre glass structural elements);

Although these types of intervention for controlling the deformation response ahead of the face have a rather circumscribed field of application in relation to the nature of the ground when considered individually (fig. 13), considered as a whole, they are able to guarantee solutions for all possible geotechnical conditions. Naturally, in extreme stress-strain conditions, there is no reason why two or more types of intervention cannot be used simultaneously to obtain a mixed action of protection and reinforcement (fig. 14).



### 3.2 Control down from the face

As opposed to the teachings of traditional tunnel advance principles, which ignore the cause of deformation, allow the core to deform and then require the installation of flexible linings to absorb deformation which has already been triggered (a practice which in really difficult stress-strain conditions frequently turns out to be inadequate), the application of these new concepts in tunnel advance, in the presence of a rigid core characteristic of the A.DE.CO.-RS approach, requires the use of equally rigid linings as an absolutely essential condition, if the advantage obtained by reinforcing the core ahead of the face is not to be lost behind it. It is also just as important that maximum care and attention be paid to ensure that the continuity of action in the passage from preconfinement to confinement occurs as gradually and as uniformly as possible, never forgetting that the cause of the whole deformation process that must be controlled lies in the deformation properties of the advance core.

On the other hand, mathematical analyses performed on computers shows extremely clearly that:

1. when extrusion is produced, it occurs through an ideal surface termed the **extrusion surface**, which extends from the point of contact between the ground and the leading edge of the preliminary lining and the point of contact between the same ground and the leading edge of the tunnel invert (fig. 15);
2. casting the tunnel invert closer to the face progressively reduces the extrusion surface and thereby produces an equally progressive decrease in extrusion (which tends to occur more symmetrically over the height of the face) and therefore of convergence also (fig. 16).

The same mathematical analyses also show that:

- with the tunnel invert cast at the same distance from the face, the deformation calculated for half-face advance is comparable to that obtained for full-face advance (in other words, casting the tunnel invert a long way from the face is like advancing in stages with headings);

- half-face advance always produces greater deformation than full-face advance; It follows that the tunnel design engineer has the chance (which becomes of fundamental importance in extreme stress-strain conditions) to make the action which controls the deformation response, already begun ahead of the face by regulating the rigidity of the advance core, a continuous process by casting the footings and the tunnel invert as close as possible to the face. Not taking this chance and casting the latter far from the face means accepting a greater extrusion surface, non symmetrical extrusion and an advance core of greater dimensions that is more difficult to deal with, conditions which all lead to tunnel instability (fig. 17).

### 4. Conclusions

The mistaken conviction that the cause in the cause and effect process that governs the construction of tunnels lay in the action of excavation and that the effect could be identified as convergence (contraction of the profile of the excavation) alone has led entire generations of engineers in Italy and abroad along the wrong path for decades. Following the principles of the more fashionable design and construction approaches (NATM and derived methods) they were persuaded to concentrate on curing the symptoms or effects (convergence of the cavity) instead of on the causes of instability in tunnels (deformation properties of the core) [4], [5]. This resulted in the following:

1. inability to make reliable forecasts of tunnel behaviour during advance and therefore the absence of a diagnosis phase in the design procedure;
  2. measures to confine deformation that was not forecast beforehand were improvised;
  3. lack of effective stabilisation systems, capable of dealing with the cause of instability (deformation of the core) and not just the effect (convergence);
  4. inability to make a preliminary assessment of a project in terms of forecasting risks, time schedules and advance rates.
- In order to get out of this stalled situation it was necessary to bring the problem back to reality and treat it as a **three**

**dimensional problem**, which in effect it is, and to consider the entire dynamics of the tunnel advance process and not just the last phase of the process. This is in fact the only way, though with inevitable indeterminable factors due to the complexity of the model to be analyse, that the design and construction of underground works can be brought within a framework comparable to those of all other types of civil engineering to restore dignity to this branch of the discipline.

The A.DE.CO.-RS approach places the deformation response of the medium to the action of excavation at the centre of the design engineers attention, as a phenomenon first to be analysed and interpreted by measurement and calculation and then to be controlled and regulated, by using the advance core appropriately regulating its rigidity with stabilisation techniques. By doing this, it has demonstrated the conceptual validity of the approach several times over the last decade solving numerous cases of tunnelling under particularly difficult conditions where the application of old concepts (NATM and derived methods), which do not show their limitations under easy conditions, had produced disappointing if not actually catastrophic results.

In this respect, it is perhaps important to consider, in the conclusion, the events that occurred in Italy during the construction of the S. Vitale tunnel for the doubling of the Caserta to Foggia railway line.

Tunnel advance commenced in March 1986 and proceeded with varying success until the end of 1988. At this point, growing difficulties were encountered when they started to cross the heavily tectonised Argille Varicolori formation and tunnel advance was practically brought to a halt. Advance resumed approximately a year later following radical changes to the design on the basis of ADECO-RS principles and was able to continue without interruption and with growing success as site engineers gradually gained confidence in the use of the new technologies and average advance rates of over 50 m. per month were recorded compared to the 2 m. per month previously (fig. 18) [1].

In the light of the considerable experience acquired over the last ten years, it can therefore be confidently stated that the



A.DE.CO.-RS approach to the design and construction of tunnels can be used to produce virtually linear advance rates independently of the type of ground tunnelled and the contingent stress-strain conditions (fig. 19). It follows that while it was once only possible to talk of mechanisation under conditions that could be dealt with by simple confinement of the cavity or of the face, today mechanisation can be spoken of even under more complex and difficult conditions which require pre-confinement action. Tunnel excavation can finally be industrialised (constant advance rates, forecasting of times and costs) independently of the

type of ground and the size of the overburden involved.

References

- [1] LUNARDI P. "Progetto e costruzione di gallerie secondo l'approccio basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli" (articolo in tre parti), Quarry and Construction, marzo 1994, marzo 1995, aprile 1996, (Italian and French).
- [2] LUNARDI P., BINDI R., FOCARACCI A., "Nouvelles orientation pour le projet et la construction des tunnels dans des terrains meubles. Études et expériences sur le préconfinement de la cavité et la préconsolidation du noyau au front", Colloque International "Tunnels et micro-tunnels en terrain meuble", Paris, 7-10 février 1989.
- [3] LUNARDI P., "L'influence of the rigidity of the advance core on the safety of tunnel excavation", Gallerie e grandi opere sotterranee, n. 52, 1997, (Italian and English).
- [4] KOVARI K., "On the Existence of NATM, Erroneous Concepts behind NATM", Tunnel, No. 1 Year 1994, (English and German), or Gallerie e Grandi Opere Sotterranee, n. 46, 1995 (Italian and English).
- [5] LUNARDI P., "Convergence-confinement ou extrusion-préconfinement?", Colloque "Mécanique et Géotechnique", Laboratoire de Mécanique des Solides - École Polytechnique, Paris 19 mai 1998.



TECNOLOGIE • ENGINEERING • DESIGN



ELEMENTI STRUTTURALI IN VETRORESINA PER IL CONSOLIDAMENTO DEL FRONTE DI SCAVO



Q.L.S.  
Quick Link System  
Patented by TED GmbH

DISTRIBUTORE ITALIA : ELAS Via Prima Strada , 9 20090 Segrate (MI)

Telefono ++39 - 02 - 75.33.252 fax ++39 - 02 - 75.32.991