

# 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

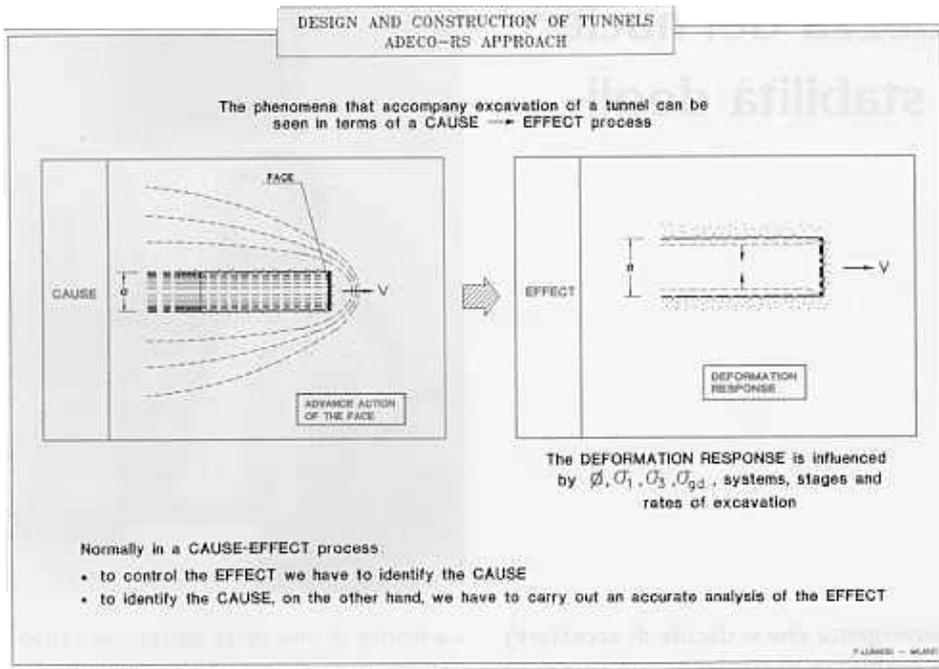


Fig. 1 - Normalmente, in un processo di causa-effetto:

- 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.

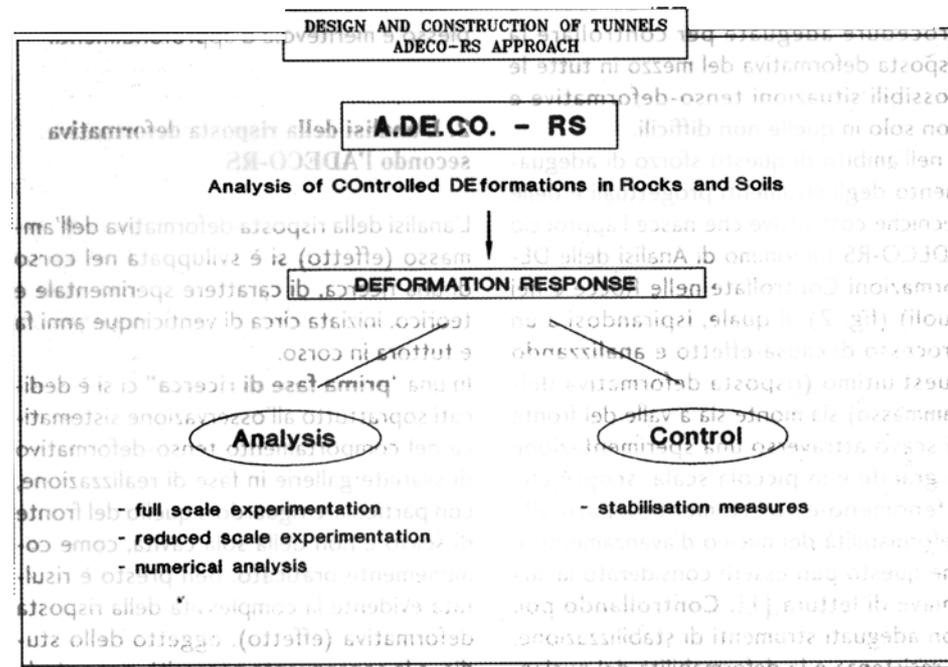


Fig. 2 - La centralità della risposta deformativa nell'ADECO-RS.

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 preconvergenza) e quello della cavità (convergenza).

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

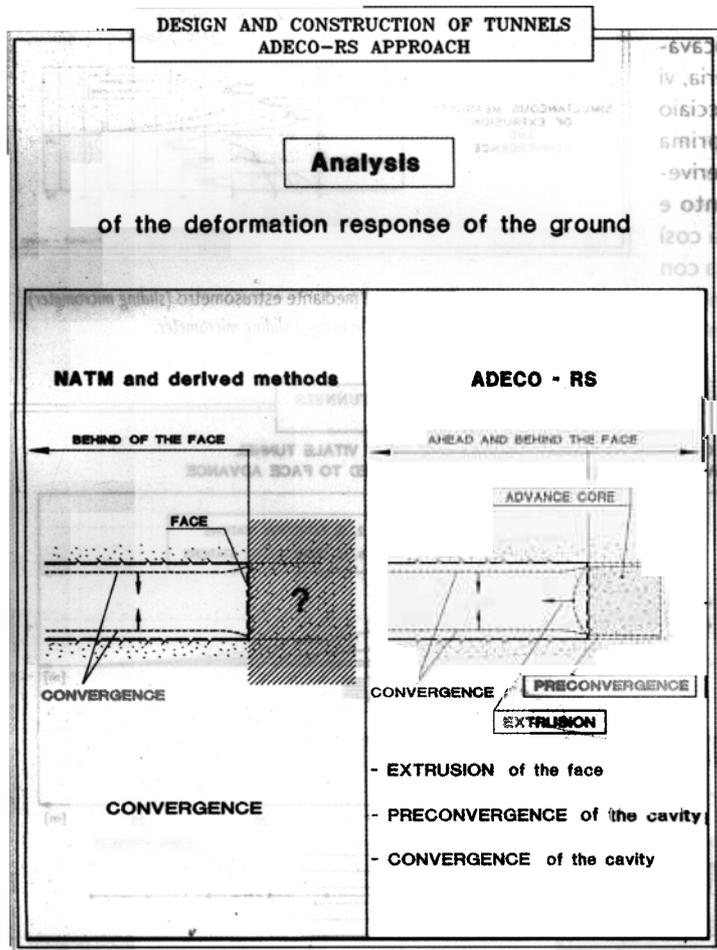


Fig. 3 - L'ADECO-RS studia la risposta deformativa del terreno anche a monte del fronte di scavo e non solo a valle, utilizzando come chiave di lettura il nucleo d'avanzamento.

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.

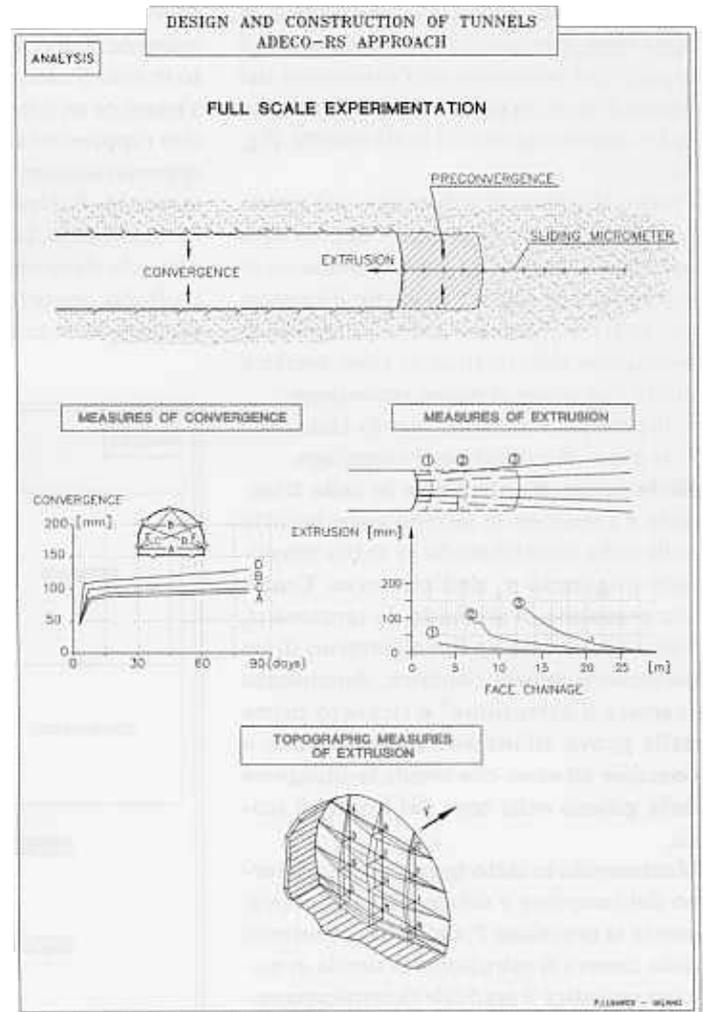
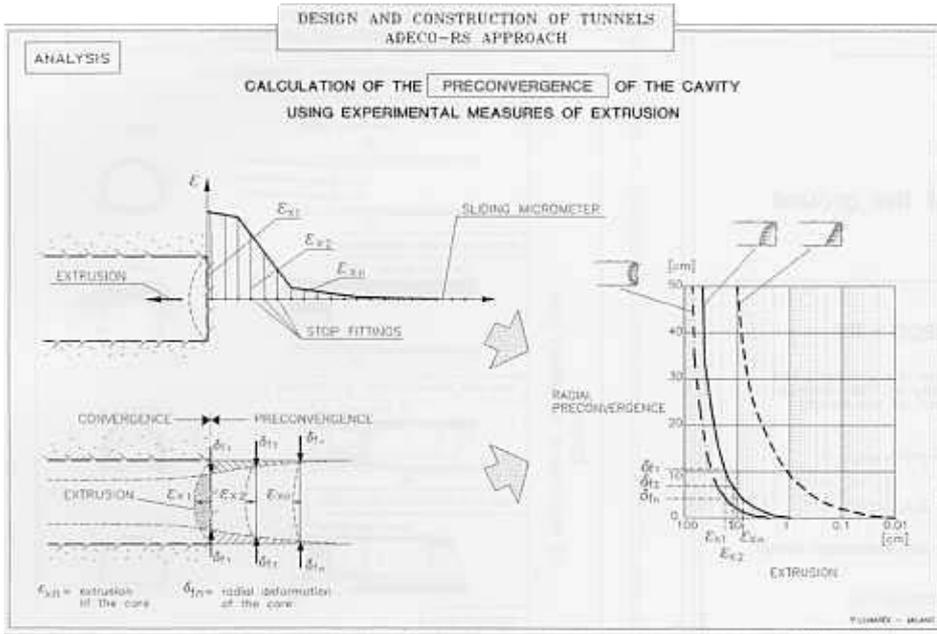


Fig. 4 - La sperimentazione in scala reale

Fig. 4 - Full scale experimentation.



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 preconvergenza attraverso misure sperimentali d'estrusione.

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

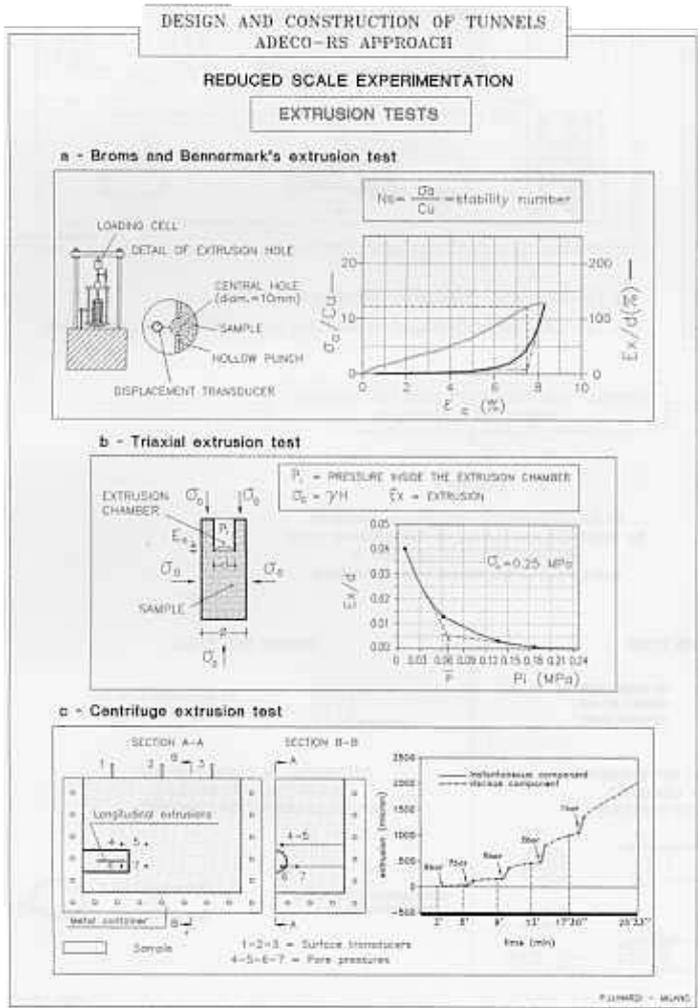


Fig. 8 - La sperimentazione in scala ridotta.

Fig. 8 - Reduced scale experimentation.

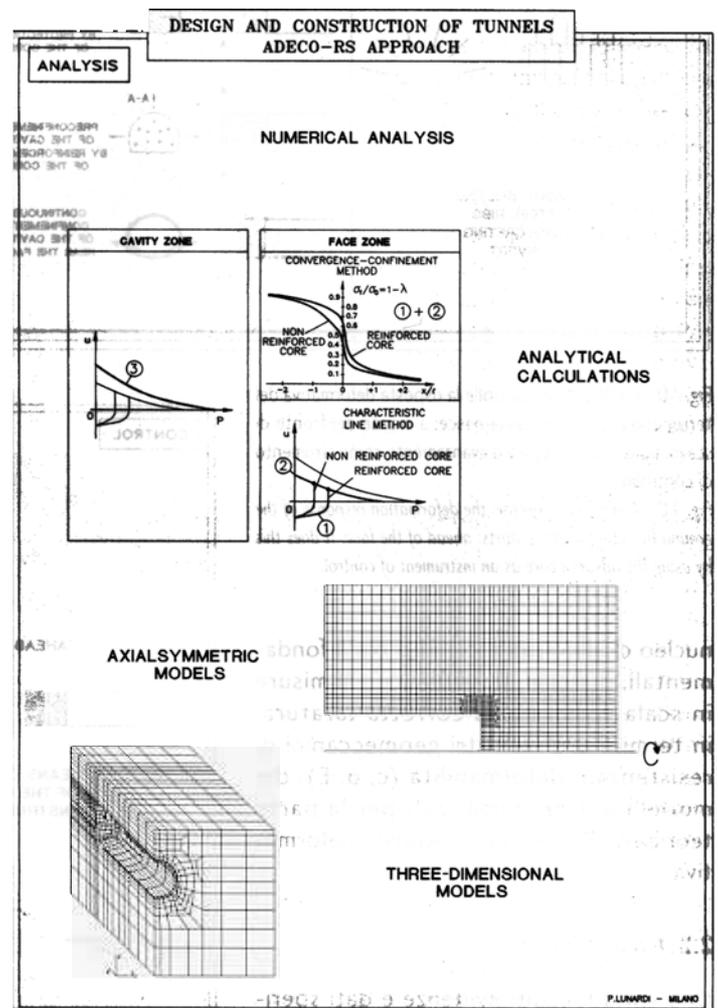


Fig. 9 - Analisi teoriche.

Fig. 9 - Theoretical analysis.

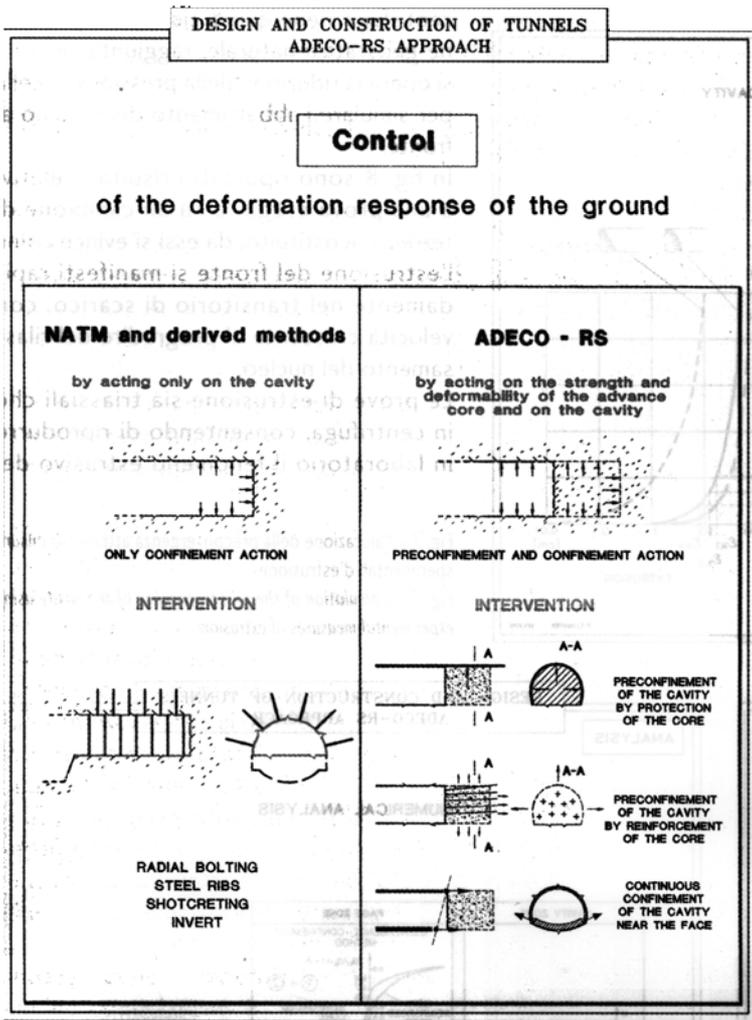


Fig. 10 - L'ADECO-RS controlla la risposta deformativa del terreno agendo là dov'essa nasce: a monte del fronte di scavo, utilizzando il nucleo d'avanzamento come strumento di controllo.

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

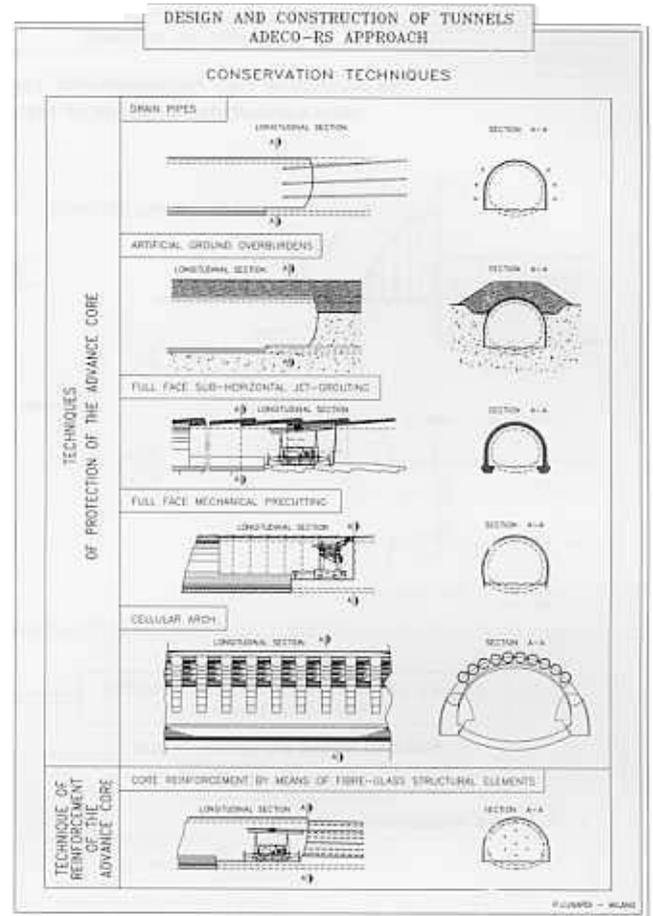


Fig. 12 - Interventi conservativi: protettivi e di rinforzo.

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

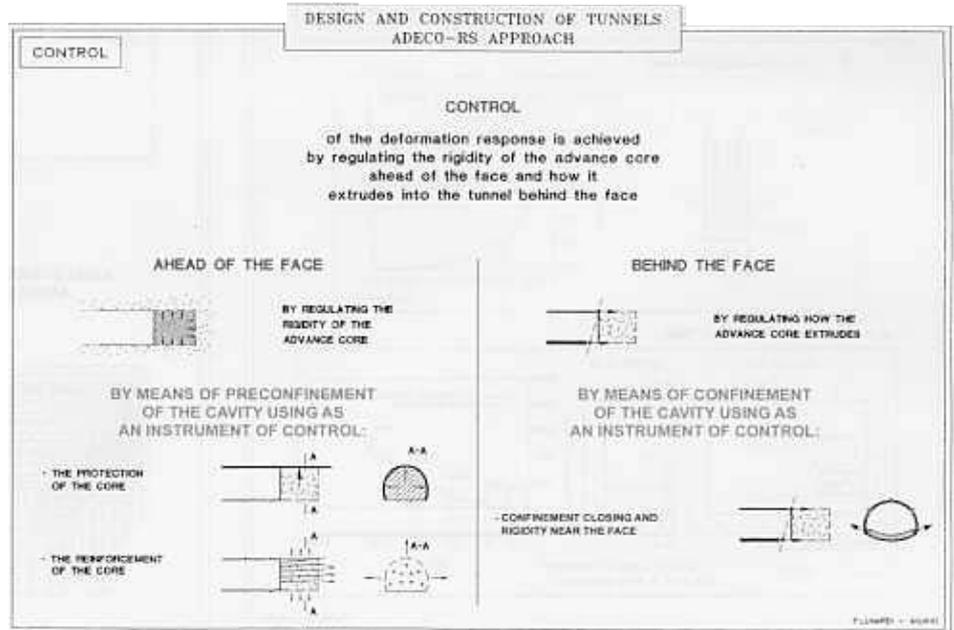


Fig. 11 - Il controllo della risposta deformativa a monte e a valle del fronte di scavo.

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'innesca 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 igno-

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

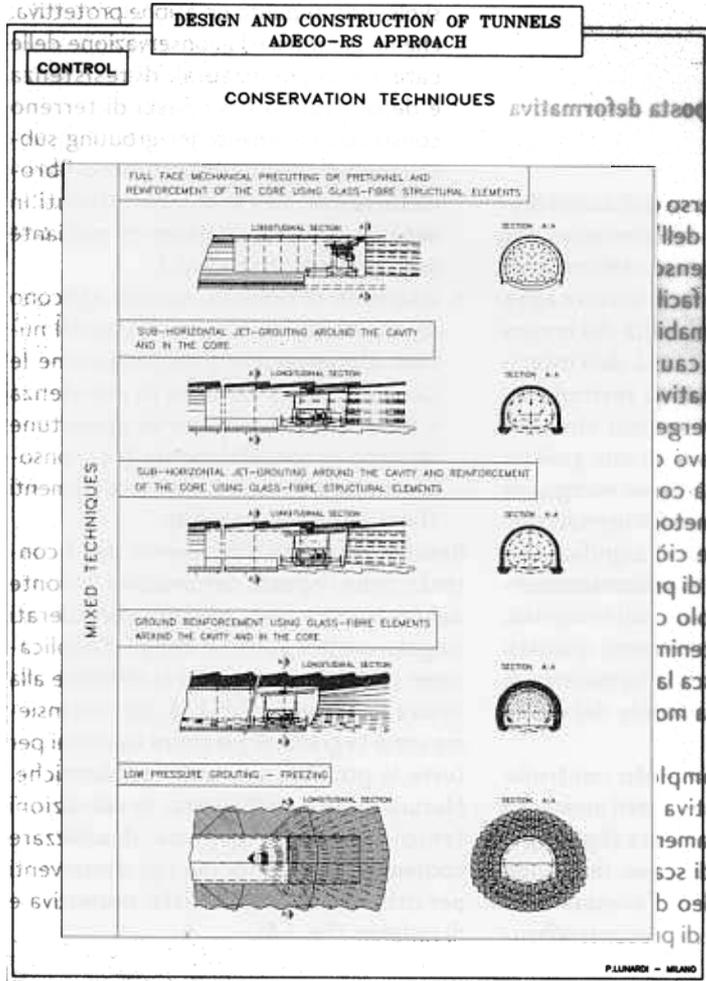
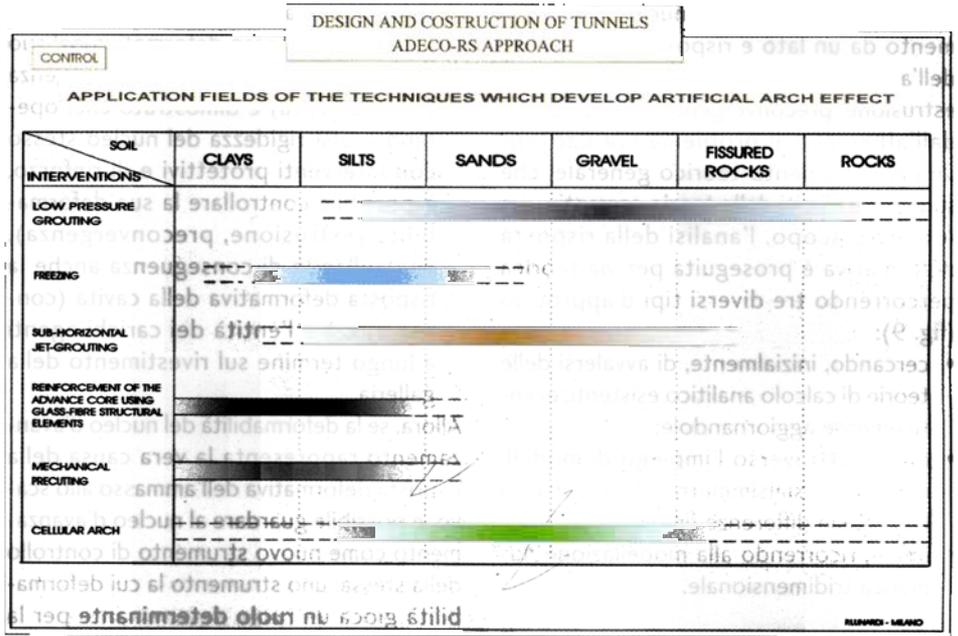


Fig. 14 - Interventi conservativi misti.  
Fig. 14 - Mixed conservation techniques.

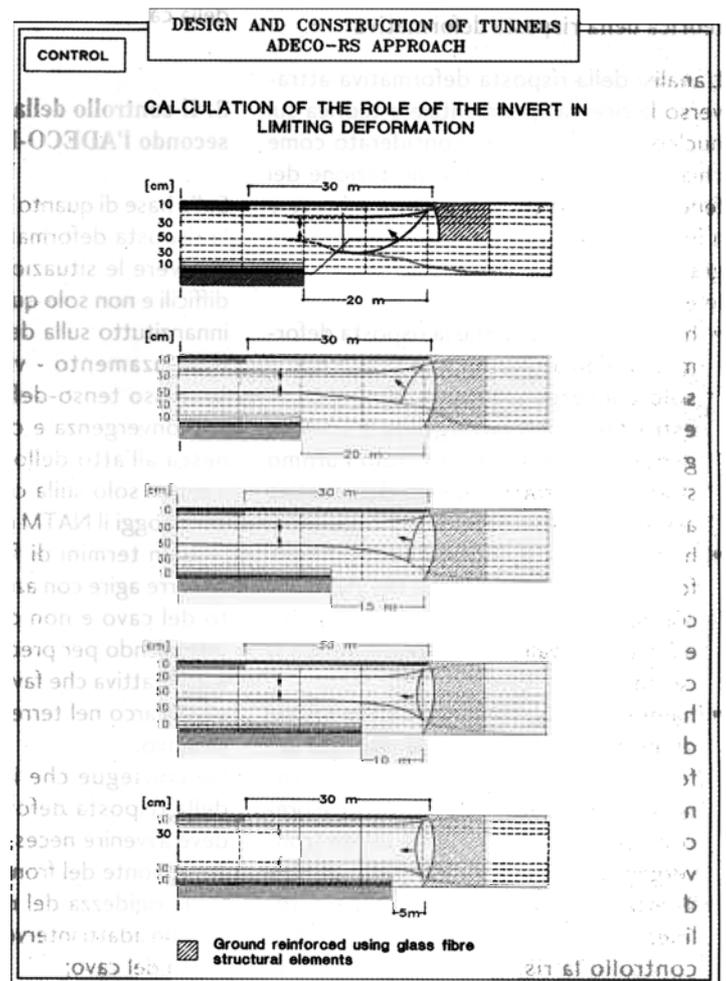


Fig. 15 - Risultati delle analisi numeriche 3D sul ruolo svolto dall'arco rovescio nella limitazione delle deformazioni.

Fig. 15 - Results of 3D numerical analysis on the role of the invert in limiting deformation

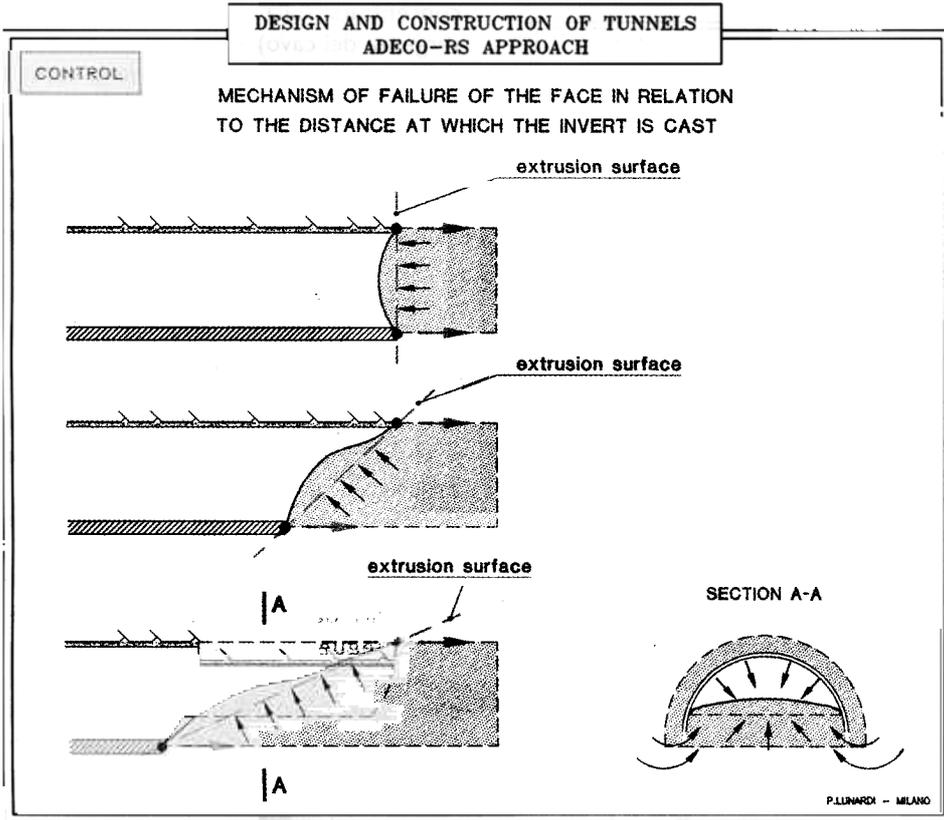


Fig. 16 - Meccanismo di rottura del fronte in funzione della distanza di posa dell'arco rovescio.

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 priverestimento 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

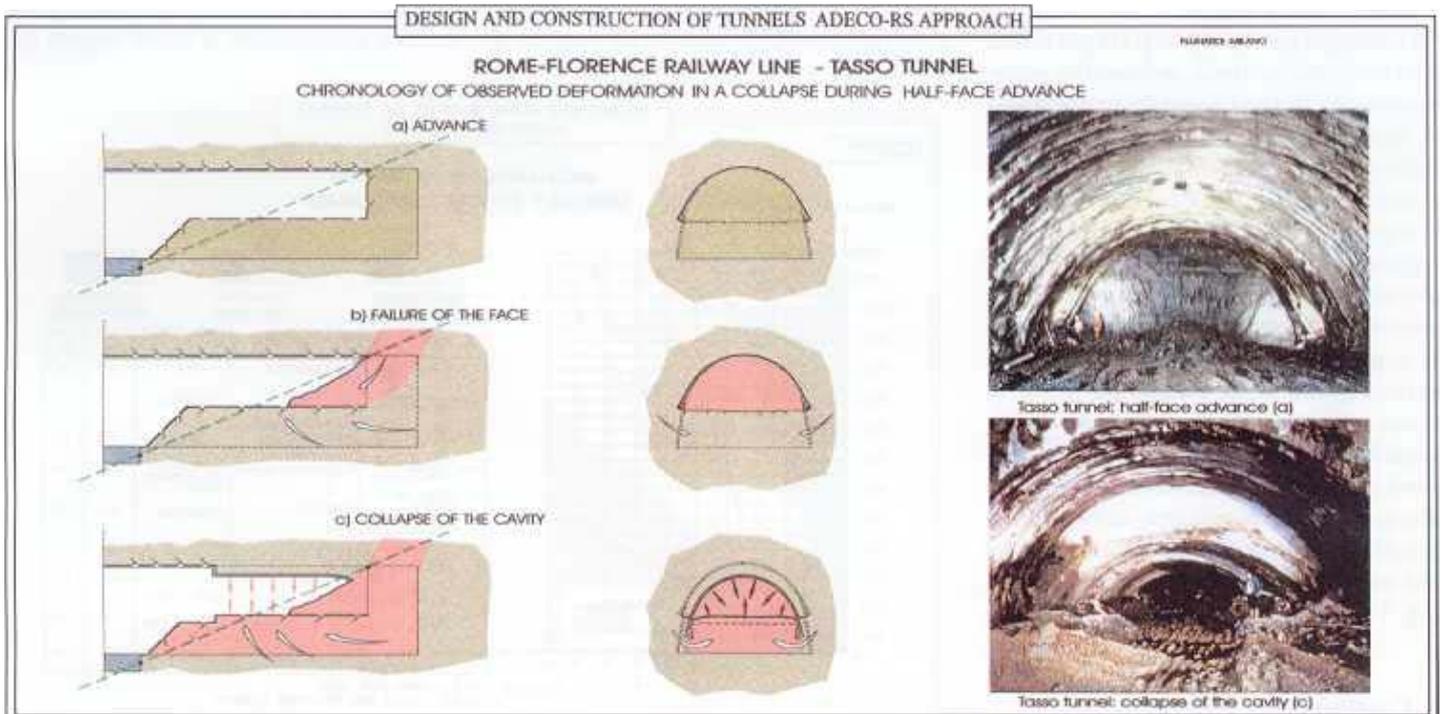


Fig. 17 - Fasi di sviluppo di un collasso durante l'avanzamento a mezza sezione.

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

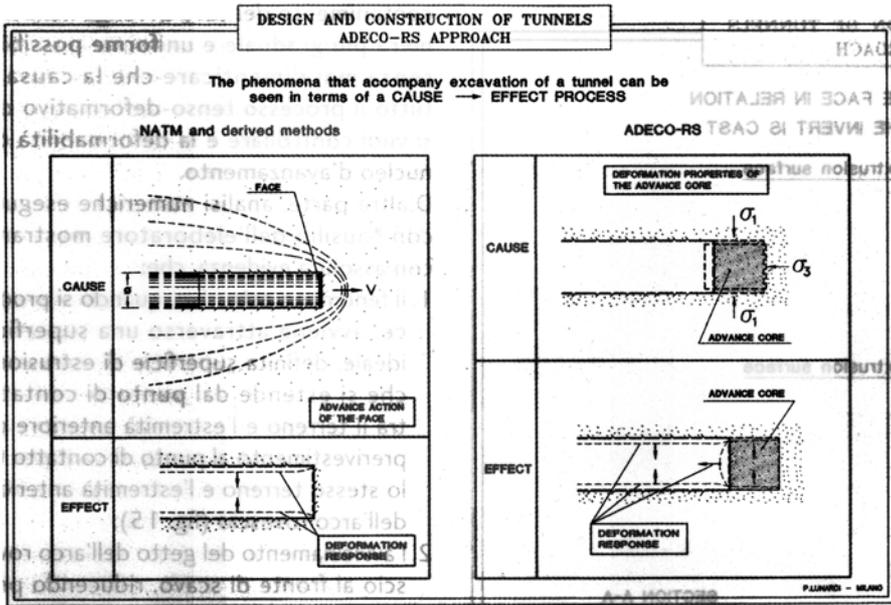


Fig. 18 - L'ADECO-RS individua la causa della risposta deformativa nella deformabilità del nucleo d'avanzamento.  
 Fig. 18 - ADECO-RS identifies the cause of the deformation response in the deformation properties of the advance core.

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 dissimmetrica, 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 indeterminatezze dovute alla complessità dei modelli da analizzare, ricondurre la progettazione e costruzione di opere in sotterraneo entro schemi paragonabili a quelli seguiti per

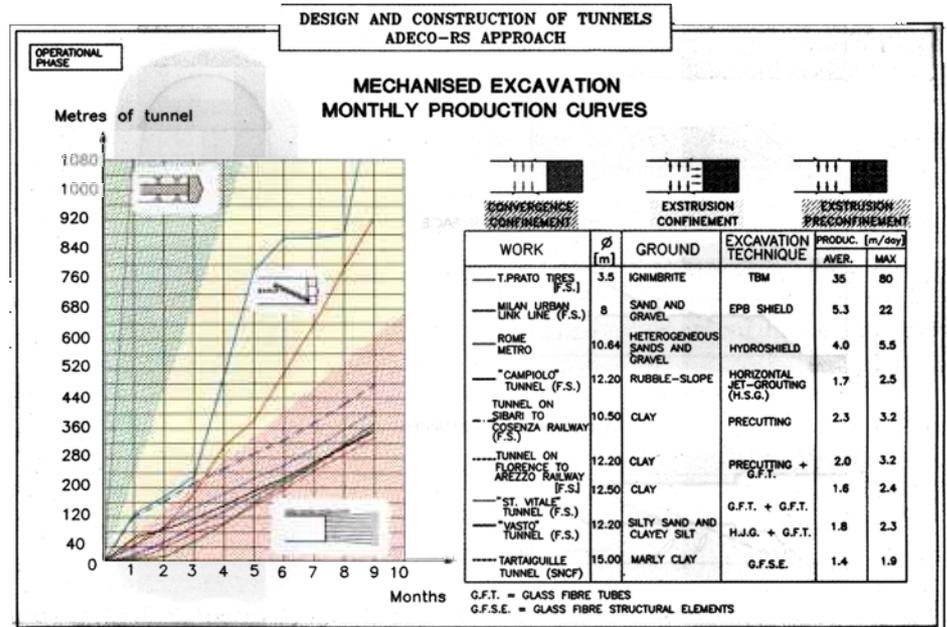


Fig. 19 - Scavo meccanizzato in condizioni tenso-deformative difficili: produzioni mensili ottenute e loro linearità.  
 Fig. 19 - Mechanised excavation in difficult stress-strain conditions: monthly advance rates achieved and their linearity.

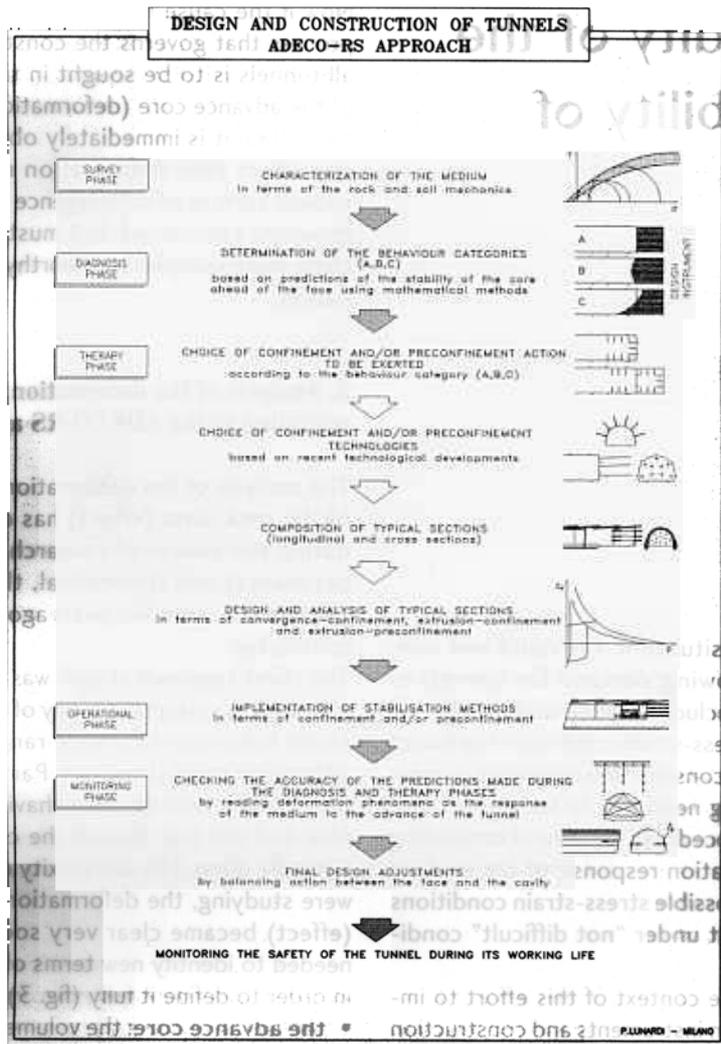


Fig. 20 - Le fasi fondamentali dell'ADECO-RS.

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 precontenimento.

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