

# L'ADECO-RS QUALE GARANZIA DI RISPETTO DI TEMPI E COSTI NELLA REALIZZAZIONE DI OPERE IN SOTTERRANEO

Pietro Lunardi<sup>1</sup>

L'Italia, che è la nazione al mondo che insieme al Giappone vanta di gran lunga il maggior numero di Km di gallerie realizzate, da molti anni ha totalmente abbandonato il NATM in favore dell'ADECO-RS. Adottando questo innovativo e universale approccio di progettazione e costruzione, si sono realizzate gallerie per centinaia di chilometri, spesso portando a termine con successo lavori che con il NATM erano stati da tempo abbandonati perché apparentemente irrealizzabili. La memoria illustra le evidenze scientifiche che hanno portato alla definizione dell'ADECO-RS e i risultati molto significativi che ad oggi si sono ottenuti in termini di industrializzazione, produzione e sicurezza degli scavi.

Keywords: ADECO-RS, NATM, industrializzazione

## GENERALITÀ

L'ADECO-RS è un approccio universale alla progettazione e costruzione di opere in sotterraneo che si contraddistingue da tutti i precedenti per essersi posto sin da principio, come obiettivo da conseguire, il rispetto dei tempi e dei costi di realizzazione delle opere, indipendentemente dal sistema di scavo, meccanizzato o tradizionale, utilizzato per realizzarle.

Il rispetto dei tempi e dei costi di realizzazione delle opere, d'altra parte, è interesse comune di Committenti e Costruttori ed è possibile conseguirlo solo attraverso l'industrializzazione degli avanzamenti

Prima dell'avvento dell'ADECO-RS, le problematiche dell'industrializzazione potevano considerarsi risolte solo per lo scavo meccanizzato. Da diversi anni sono infatti disponibili diverse tipologie di TBM, adatte ad affrontare sia materiali prettamente lapidei, sia materiali decisamente soffici, sopra o sotto falda.

In Italia, per esempio, operano o hanno operato recentemente, in contesti geomeccanici alquanto differenti, una decina di TBM impegnate nella realizzazione di gallerie per linee metropolitane, ferroviarie e autostradali, tra cui si ricorda, nel difficile contesto geologico-geomeccanico dell'Appennino, tra Bologna e Firenze, la TBM EPB "Martina", attualmente la più grande TBM EPB del mondo con i suoi 15,62 m di diametro (fig. 1), che sta scavando la galleria autostradale "Sparvo". L'avanzamento di tutti questi lavori, perfettamente in linea con le previsioni, conferma la grande affidabilità oggi raggiunta dallo scavo meccanizzato.

Diverso e più complesso è il discorso per lo scavo tradizionale: tutti noi conosciamo le difficoltà e i rischi che spesso Committenti, Costruttori, Progettisti e Maestranze sono costretti ad affrontare quando i terreni, gli stati tensionali in gioco, la geometria stessa delle opere impongono di scavarle con sistemi tradizionali.

Ancor oggi capita di frequente veder affrontare situazioni alquanto delicate, quali ad esempio scavi in terreni soffici in area urbana, parzializzando la sezione con gli stessi criteri codificati nel NATM oltre 50 anni fa. Protraendosi questa situazione, che non posso non definire di grave arretratezza, non può meravigliare che continuino ad accadere con una certa regolarità disastri come quello successo a Pinheiros nel 2007.

Per garantire l'industrializzazione degli scavi in galleria anche quando si è costretti ad optare per lo scavo tradizionale, una trentina d'anni fa in Italia si dette inizio ad una ricerca teorica e sperimentale sul comportamento tenso-deformativo di una galleria in fase di scavo.

Contemporaneamente, sulla base delle evidenze che emergevano dalla ricerca, si mettevano a punto innovative tecnologie costruttive (jet-grouting in orizzontale, pretaglio meccanico a piena sezione, rinforzo del nucleo-fronte con armature di vetroresina, ecc.) e severamente le si sperimentavano sul campo. Una di queste, il jet grouting in orizzontale per l'avanzamento di scavi in terreni incoerenti, fu sperimentata con successo dallo scrivente anche a Campinas nel 1987, per la realizzazione del sottopasso stradale allo scalo ferroviario (fig. 2).



Figura 1. TBM EPB "Martina",  $\varnothing = 15,62$  m

<sup>1</sup>Studio di geingegneria Lunardi, Milano (Italia)  
e-mail: [pietro.lunardi@gmail.com](mailto:pietro.lunardi@gmail.com)

Dopo aver verificato, durante la costruzione di alcune gallerie campione, i nuovi principi derivati dai risultati della ricerca, spesso in palese contrasto con quelli insegnati ancor oggi dal NATM, si sono inquadrati in un nuovo approccio progettuale e costruttivo, detto ADECO-RS, che dopo aver dimostrato sul campo di poter effettivamente garantire la realizzazione delle opere, anche nelle situazioni più difficili, in sicurezza e nel pieno rispetto dei tempi e dei costi preventivati, è stato prontamente adottato dai capitolati di tutte le maggiori Amministrazioni italiane. L'Italia, vale la pena ricordare, è la nazione al mondo che insieme al Giappone vanta di gran lunga il maggior numero di Km di gallerie realizzate e rispetto al Giappone ha certamente una maggior esperienza di gallerie scavate in terreni difficili con i sistemi tradizionali. Negli ultimi dodici anni in Italia, utilizzando l'ADECO-RS, si sono realizzate gallerie per centinaia di chilometri, spesso portando a termine con successo lavori che con il NATM erano stati da tempo abbandonati perché apparentemente irrealizzabili. I successi conseguiti hanno sollevato molto interesse anche all'estero dove applicando l'ADECO-RS si sono risolte in breve tempo e con grande efficacia situazioni che sembravano senza via d'uscita (vedasi galleria di Tartaignille in Francia in fig. 3). Adottare l'ADECO-RS significa cambiare mentalità, abbandonando tabù e teorie mai dimostrate scientificamente, e modificare di conseguenza i propri capitolati, come fu fatto in Italia negli anni 1990. È uno sforzo che ogni Paese prima o poi dovrà fare e che già molti (soprattutto quelli orientali attualmente molto attenti alle problematiche dell'industrializzazione) si stanno accingendo a fare se è vero che il libro sul sistema ADECO-RS uscito in edizione italiana nel 2006 è stato già tradotto e pubblicato, oltre che in inglese, in cinese e in coreano, mentre sono in corso le traduzioni in russo, tedesco e spagnolo.



Figura 2. Protezione del nucleo-fronte con jet-grouting orizzontale a piena sezione - Sottopasso stradale dello scalo ferroviario di Campinas ( $\varnothing = 14,9$  m, Terreno: sabbia, Copertura  $2 \div 4$  m)

### L'ADECO-RS

L'ADECO-RS (Analisi delle Deformazioni Controllate nelle Rocce e nei Suoli) è una filosofia progettuale che, a differenza degli approcci del passato, mette al centro della progettazione di un'opera in sotterraneo le deformazioni che si manifestano nel mezzo in cui procede lo scavo, analizzandole approfonditamente per poi individuare i sistemi più efficaci per controllarle.

### Le deformazioni secondo l'ADECO-RS

Le deformazioni non sono altro che la Risposta Deformativa che si produce nel mezzo a seguito dello scavo, se questa fosse nulla il progettista di gallerie non avrebbe alcun lavoro da svolgere!

L'ADECO-RS dunque focalizza l'attenzione sullo studio della Risposta Deformativa e per capirne le caratteristiche, in termini di nascita ed evoluzione, considera (fig. 4):

- il mezzo all'interno del quale si opera;
- l'azione che si compie per operare lo scavo;
- la reazione (o Risposta Deformativa) che si produce nel mezzo a seguito dello scavo.

Il mezzo è il terreno, cioè il materiale da costruzione della galleria. In profondità esso è soggetto a stati tensionali di tipo triassiale, dipendenti dai carichi litostatici legati alle coperture in gioco e dalla presenza di agenti naturali. Dal punto di vista geologico la sua



Figura 3. Galleria "Tartaignille" (Francia), ( $\varnothing = 15,30$  m, Terreno: argille rigonfianti, Copertura max: 150 m.

Alcuni commenti della stampa tecnica francese:

*"Lorsqu'elle en prend les moyens, l'Italie peut réaliser des travaux à faire pâlir les entreprises françaises ....."* (Le Moniteur, 20 février 1998);

*"Le creusement du tunnel de Tartaignille a été très difficile, en raison notamment de convergences inattendues du terrain, qui ont nécessité un changement de méthode en cours de chantier: le professeur italien Pietro Lunardi a convaincu la SNCF de travailler à la pelle en pleine section dans les argiles, en boulonnant le front sur 24 m ....."* (Le Moniteur, 7 août 1998).

<sup>1</sup>Studio di geingegneria Lunardi, Milano (Italia)  
e-mail: [pietro.lunardi@gmail.com](mailto:pietro.lunardi@gmail.com)

consistenza naturale (sabbiosa, argillosa o lapidea) muta in profondità in funzione degli stati tensionali. Dal punto di vista geomeccanico, se ne caratterizza il comportamento soprattutto attraverso prove di compressione semplice, prove di taglio diretto e prove in cella triassiale.

L'azione, che è prodotta dall'avanzamento del fronte di scavo che si muove nel mezzo ad una certa velocità  $V$ , provoca una perturbazione tensionale nel terreno circostante sia in senso trasversale sia in senso longitudinale (quindi nelle tre dimensioni) alterando gli stati tensionali preesistenti.

Dal punto di vista del comportamento della galleria all'avanzamento del fronte, è importante considerare il nucleo d'avanzamento (fig. 5), definito come 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: con l'arrivo del fronte di scavo il nucleo d'avanzamento passa da uno stato tensionale triassiale ad uno biassiale o monoassiale e a seguito di questa perturbazione tensionale potrà manifestare un comportamento stabile, stabile a breve termine o instabile a seconda dell'entità dei carichi litostatici e dei campi tensionali in gioco, ma anche della velocità d'avanzamento  $V$ , strettamente legata al sistema di scavo utilizzato (meccanizzato o convenzionale, a mezza sezione o a piena sezione): velocità d'avanzamento elevate riducono la propagazione della perturbazione, influenzando significativamente sul comportamento del nucleo d'avanzamento, ovvero sulla Risposta Deformativa. Si vede allora che la scelta del sistema di scavo condiziona direttamente la Risposta Deformativa del terreno all'azione dello scavo, quindi il successo dell'opera d'ingegneria in termini di tempi e costi di costruzione.

La reazione, infine, è la Risposta Deformativa del terreno all'avanzamento del fronte di scavo: secondo l'ADECO-RS il progettista, deve concentrare tutta la propria attenzione sul suo studio (previsione per via teorica in sede progettuale e verifica sperimentale in corso d'opera) in termini di Analisi e Controllo.

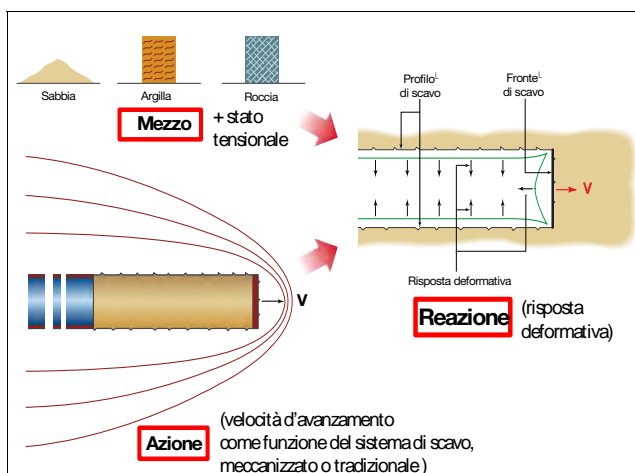


Figura 4

### L'Analisi della Risposta Deformativa secondo l'ADECO-RS

Contrariamente al NATM che identifica la Risposta Deformativa del mezzo allo scavo nella sola convergenza, l'ADECO-RS, sulla base delle evidenze emerse dalla ricerca scientifica, riconosce ben tre diverse componenti della Risposta Deformativa (fig. 6):

- l'estrusione, identificata come sua componente primaria, si sviluppa in gran parte all'interno del nucleo d'avanzamento e si manifesta, in corrispondenza della superficie delimitata dal fronte di scavo, in senso longitudinale all'asse della galleria; si misura sperimentalmente mediante appositi strumenti inseriti longitudinalmente nel nucleo d'avanzamento (sliding micrometer);
- la preconvergenza, identificata, quale componente secondaria della Risposta Deformativa, nella convergenza del profilo teorico di scavo a monte del fronte; si valuta analiticamente attraverso l'abaco di preconvergenza;
- la convergenza, identificata, quale terza componente della Risposta Deformativa, nella convergenza del profilo teorico di scavo a valle del fronte di scavo; si misura sperimentalmente mediante distometri a

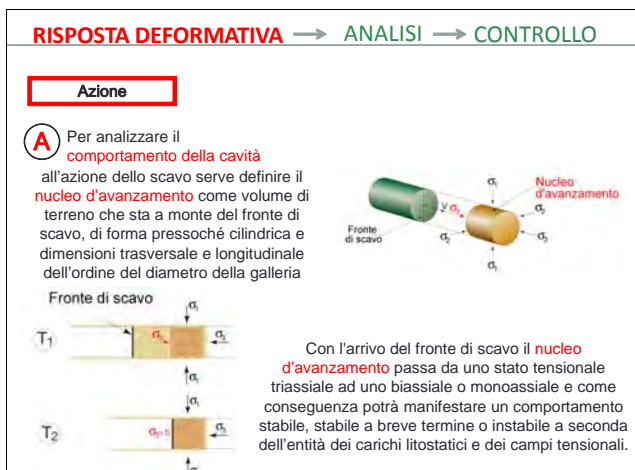


Figura 5

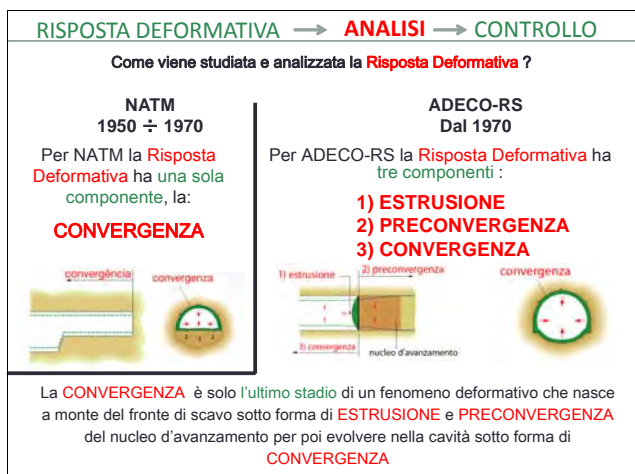


Figura 6

<sup>1</sup>Studio di geingegneria Lunardi, Milano (Italia)  
e-mail: [pietro.lunardi@gmail.com](mailto:pietro.lunardi@gmail.com)

nastro o battute topografiche su mire ottiche applicate al perimetro della cavità.

Secondo l'ADECO-RS la convergenza, quindi, è solo l'ultimo stadio di un fenomeno deformativo assai complesso, che si origina a monte del fronte di scavo sotto forma di estrusione e preconvergenza del nucleo d'avanzamento per poi evolvere a valle dello stesso sotto forma di convergenza della cavità.

### Il Controllo della Risposta Deformativa secondo l'ADECO-RS

Contrariamente al NATM, che erroneamente ritiene di poter risolvere qualsiasi difficoltà parzializzando la sezione e cercando di stabilizzare lo scavo con bulloni, centine, spritz-beton e archi rovesci più o meno provvisori, operando solo a valle del fronte di scavo, all'interno della cavità, l'ADECO-RS prevede di avanzare sempre a piena sezione e stabilizza lo scavo intervenendo innanzitutto sul terreno a monte del fronte di scavo (fig. 7). A questo scopo l'ADECO-RS utilizza, quale principale "strumento di controllo" a monte, il nucleo d'avanzamento, opportunamente rinforzato e/o protetto se necessario, e, quale strumento di controllo a valle, la chiusura immediata del priverivestimento con l'arco rovescio che a questo scopo dev'essere gettato a ridosso del fronte.

Operando sulla rigidità del nucleo d'avanzamento con opportuni interventi di protezione e di rinforzo, si evita infatti che all'arrivo del fronte di scavo si annulli la sollecitazione principale minore  $\sigma_3$  e che di conseguenza il nucleo d'avanzamento passi da uno stato tensionale triassiale ad uno biassiale o monoassiale (fig. 8); in questo modo è possibile controllare la deformabilità del nucleo d'avanzamento e quindi la nascita e lo sviluppo della Risposta Deformativa a monte del fronte di scavo (estrusione, preconvergenza) e, di conseguenza, anche la sua evoluzione a valle dello stesso (convergenza della cavità).

È interessante notare come lo stesso Rabcewicz, padre del NATM, in numerosi suoi scritti [Rabcewicz 1964 e 1965] abbia più volte espresso la convinzione che tutte le gallerie, specialmente se difficili, si sarebbero dovute affrontare a piena sezione se solo fossero esistite le tecnologie adatte per farlo. A quasi un secolo di distanza, non si può non constatare come, pur disponendo oggi delle tecnologie che Rabcewicz auspicava, i suoi nostalgici allievi e seguaci, più impegnati nel marketing che nel progresso della ricerca, non abbiano affatto progredito sulla strada indicata dal maestro, e limitandosi a replicare le soluzioni da lui proposte più di 50 anni fa hanno trasformato il NATM in un approccio autoreferenziale e senza futuro.

Credere, come ancor oggi insegna il NATM, di stabilizzare una galleria in condizioni tenso-deformative difficili parzializzando la sezione e concentrando tutti gli sforzi sul contrasto della sola convergenza, cioè di quella parte della Risposta Deformativa che si manifesta a valle del fronte di scavo, è una pura illusione. Per questa via, infatti, non si è mai riusciti ad evitare situazioni di collasso non risultando possibile tenere la Risposta Deformativa sotto controllo, che, al contrario, si è costretti a subire. La convergenza, quale "ultimo stadio" di un processo deformativo assai complesso che nasce a monte del fronte di scavo, è infatti un fenomeno incontrollabile, legato alla plasticizzazione del terreno al contorno del cavo che, come noto, non è possibile far regredire una volta che la si è lasciata sviluppare significativamente. L'ADECO-RS, avendo compreso la vera genesi ed evoluzione della Risposta Deformativa, concentra tutti gli sforzi sul controllo dell'estrusione (nucleo d'avanzamento come nuovo strumento di stabilizzazione) la quale, essendo lo "stadio iniziale" e la sorgente del processo deformativo, se mantenuta opportunamente in campo elastico, evolve verso fenomeni di preconvergenza e convergenza anch'essi in campo elastico, permettendo così di ridurre al minimo le spinte sui rivestimenti a breve e a lungo termine.



Figura 7

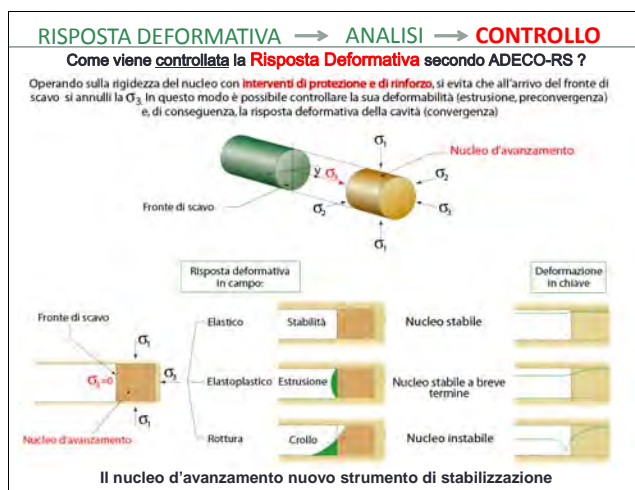


Figura 8

<sup>1</sup>Studio di geingegneria Lunardi, Milano (Italia)  
e-mail: [pietro.lunardi@gmail.com](mailto:pietro.lunardi@gmail.com)

Per fornire al progettista di gallerie adeguati strumenti di controllo della Risposta Deformativa, l'ADECO-RS, dopo aver analizzato la stabilità del nucleo-fronte della galleria con modelli sperimentali e matematici, fa riferimento al nucleo d'avanzamento visto come principale strumento di stabilizzazione dello scavo, individuando tre categorie di comportamento tenso-deformativo fondamentali (fig. 9):

- categoria A o comportamento a nucleo-fronte stabile
- categoria B o comportamento a nucleo-fronte stabile a breve termine
- categoria C o comportamento a nucleo-fronte instabile.

È allora evidente che per stabilizzare a breve e a lungo termine una galleria in fase di scavo occorre riportare alla categoria A i comportamenti tipo B e C, intervenendo, innanzitutto, sulla rigidezza del nucleo d'avanzamento. Questo è il compito principale del progettista che potrà svolgerlo con successo operando sul nucleo d'avanzamento con opportuni interventi conservativi di precontenimento del cavo, di rinforzo o protettivi, e successivamente, per non perdere il risultato ottenuto a monte, regolando, a valle del fronte di scavo, la maniera d'estrudere del nucleo-fronte, mediante interventi conservativi di contenimento del cavo, quali la chiusura e l'irrigidimento del rivestimento di prima fase, a ridosso del fronte, con l'arco rovescio (fig. 10).

### Tecnologie di controllo della Risposta Deformativa a monte del fronte di scavo secondo l'ADECO-RS

Premesso che gli interventi si dicono:

- di **rinforzo**, quando agiscono direttamente sulla consistenza del nucleo d'avanzamento, migliorandone le caratteristiche naturali di resistenza e deformabilità attraverso opportune tecniche di consolidamento;
- **protettivi**, quando producono la canalizzazione delle tensioni all'esterno del nucleo d'avanzamento svolgendo, appunto, un'azione protettiva, che garantisce la conservazione delle sue caratteristiche naturali di resistenza e deformabilità;

tra le tecnologie conservative di **rinforzo** del nucleo-fronte capaci di svolgere un'efficace azione di controllo della Risposta Deformativa a monte del fronte di scavo, si ricorda:

- il rinforzo del nucleo-fronte mediante elementi strutturali di vetroresina, ideata dall'autore e sperimentata in Italia per la prima volta nella pratica del tunnelling nel 1985, durante la realizzazione di una breve galleria idraulica di 5 m di diametro per lo scolmatore del torrente Citronia a Salsomaggiore Terme (Italia) e da allora impiegata con eccezionale successo per lo scavo a piena sezione in terreni soffici di gallerie anche di oltre 20 m di diametro di scavo (galleria "Appia Antica", GRA – Roma in fig. 11).

Tra le tecnologie conservative di **protezione** del nucleo-fronte capaci di svolgere un'efficace azione di controllo della Risposta Deformativa a monte del fronte di scavo, un cenno particolare lo merita:

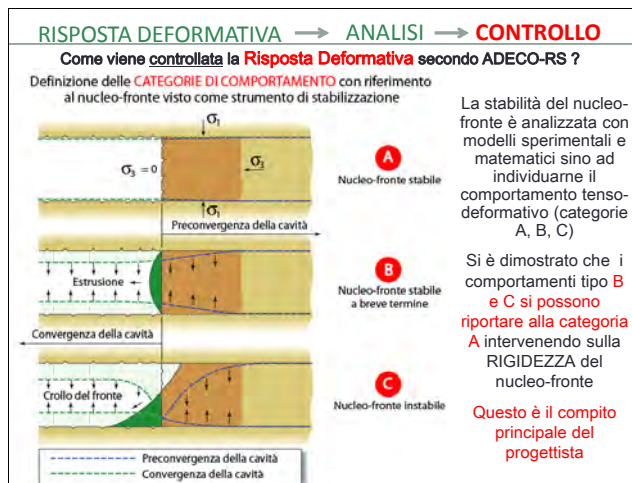


Figura 9

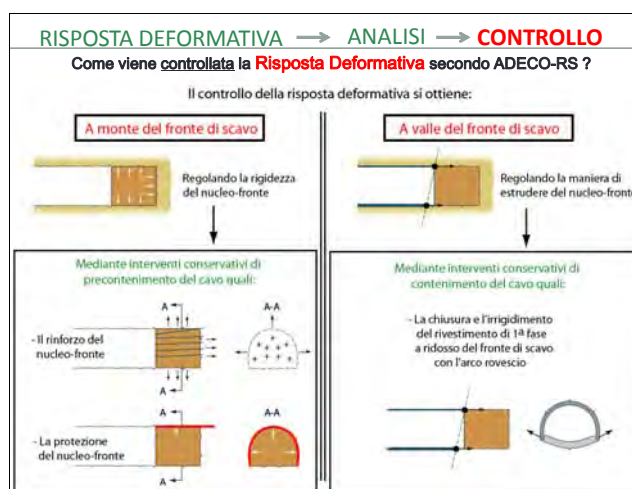


Figura 10

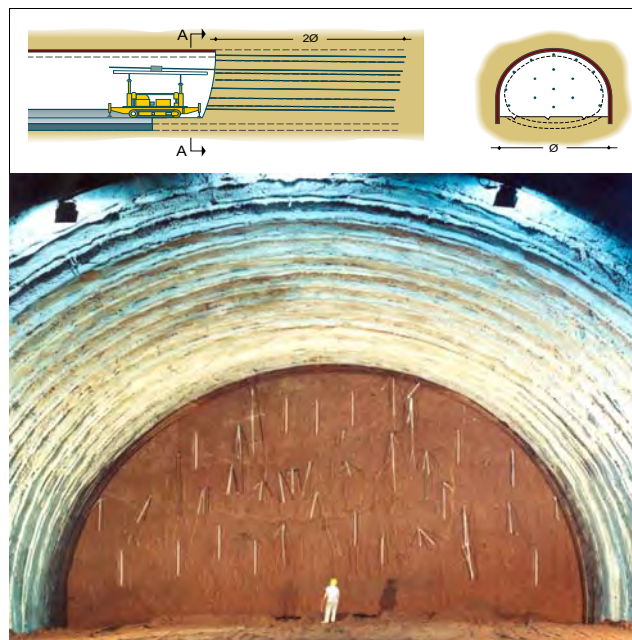


Figura 11. Rinforzo del nucleo-fronte con armature di vetroresina – Galleria Appia Antica - ( $\varnothing = 20,65$  m, Terreno: piroclastiti, Copertura:  $4 \div 18$  m)

<sup>1</sup>Studio di geingegneria Lunardi, Milano (Italia)  
e-mail: [pietro.lunardi@gmail.com](mailto:pietro.lunardi@gmail.com)

- il pretaglio meccanico a piena sezione, ideata dall'autore e sperimentata per la prima volta al mondo nel 1985 in Italia durante la realizzazione in argilla molto soffice di una galleria per la linea ferroviaria Sibari-Cosenza, tra le stazioni di S. Marco Roggiano e Mongrassano-Cervicati. La tecnologia è stata applicata con successo anche per lo scavo in terreni coesivi soffici di gallerie metropolitane di stazione (Stazione Baldo degli Ubaldi della linea A della metropolitana di Roma in fig. 12, terreno: argille, diametro di scavo: 21,5 m, copertura: 15-18 m).

Tra le tecnologie conservative di protezione/rinforzo del nucleo-fronte capaci di svolgere un'efficace azione di controllo della Risposta Deformativa a monte del fronte di scavo, si ricorda infine:

- il jet-grouting in orizzontale a piena sezione, ideata dall'autore e sperimentata per la prima volta al mondo in Italia nel 1983, durante la realizzazione della galleria "Campiolo", per la linea ferroviaria a doppio binario Udine-Tarvisio, entro detriti di falda e sotto coperture variabili da 0 a 70 m. La stessa tecnologia, come accennato in premessa, fu impiegata nel 1987 anche a Campinas (fig. 2), per la realizzazione del sottopasso stradale a due canne del rilevato dell'esistente scalo ferroviario (terreno: sabbie eterogenee, diametro di scavo: 14,9 m, copertura variabile tra 2 e 6 m).

In tema di controllo della Risposta Deformativa a monte del fronte di scavo, è infine importante evidenziare come l'ADECO-RS, nell'ottica di favorire sempre la formazione nel terreno di effetti arco longitudinali, consideri fondamentale durante l'avanzamento mantenere costantemente la superficie esposta del fronte di scavo sagomata con andamento concavo (fig. 13).

### Tecnologie di controllo della Risposta Deformativa a valle del fronte di scavo secondo l'ADECO-RS

In tema di controllo della Risposta Deformativa a valle del fronte di scavo l'ADECO-RS insiste sulla necessità che il progettista curi con la massima attenzione il passaggio tra l'azione di precontenimento del cavo operata a monte del fronte di scavo e quella di contenimento del cavo operata a valle dello stesso che deve avvenire con coerenza e continuità.

Ciò significa che, contrariamente alla pratica insegnata dal NATM, che ignorando la vera natura della Risposta Deformativa, lascia che questa si sviluppi a monte del fronte di scavo obbligando poi a mettere in opera rivestimenti flessibili per incassare i fenomeni deformativi già innescati (pratica, in condizioni tenso-deformative davvero difficili, portatrice solo di disastri), l'ADECO-RS richiede imprescindibilmente, avanzando in presenza di nucleo irrigidito, la messa in opera di rivestimenti proporzionalmente rigidi.

A questo scopo è fondamentale che a valle del fronte di scavo la chiusura del rivestimento con l'arco rovescio sia realizzata tanto più vicino al fronte quanto più importante è l'intervento di irrigidimento che si è operato sul nucleo d'avanzamento (fig. 10).

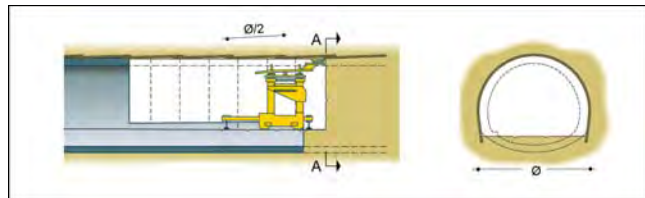


Figura 12. Pretaglio meccanico – Galleria di stazione Baldo degli Ubaldi - ( $\varnothing = 21,5$  m, Terreno: argille, Copertura: 15 ÷ 18 m)



Figura 13. Fronte di scavo sagomato con andamento concavo – Galleria di stazione Baldo degli Ubaldi - ( $\varnothing = 21,5$  m, Terreno: argille, Copertura: 15 ÷ 18 m)

<sup>1</sup>Studio di geingegneria Lunardi, Milano (Italia)  
e-mail: [pietro.lunardi@gmail.com](mailto:pietro.lunardi@gmail.com)

Questa necessità, che spesso è difficile far comprendere ai costruttori perché richiede una diversa organizzazione del cantiere rispetto alle cattive abitudini acquisite in passato, è una precisa evidenza emersa dall'osservazione attenta e dall'interpretazione anche per via numerica degli eventi di crollo avvenuti in passato e delle modalità di sviluppo della Risposta Deformativa li avevano preceduti. In particolare si è visto che 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 superiore del priverivestimento, al punto di contatto tra lo stesso terreno e l'estremità anteriore dell'arco rovescio (fig. 14). Il sollevamento del fondo dello scavo, che si verifica in condizioni difficili scavando a mezza sezione, non è deformazione di convergenza come in genere si ritiene, bensì il risultato di una Risposta Deformativa non correttamente regimata nella sua componente estrusiva. L'avvicinamento del getto dell'arco rovescio al fronte di scavo, riducendo progressivamente la superficie di estrusione, produce una riduzione altrettanto progressiva del fenomeno estrusivo (che tende a svilupparsi più simmetricamente sull'altezza del fronte) e quindi anche della preconvergenza e convergenza.

Dall'osservazione della figura 14, che illustra graficamente quanto sopra illustrato, risulta assolutamente evidente anche che gettare l'arco rovescio lontano dal fronte di scavo significa accrescere l'ampiezza della superficie di estrusione, con conseguenze simili all'avanzamento a mezza sezione.

Come mostrato dalle fotografie in fig. 15, gettare l'arco rovescio a ridosso del fronte di scavo è possibile e, con un'opportuna organizzazione del cantiere, non pregiudica affatto la produzione, assicurando invece un importante incremento della sicurezza.

### Progettazione e costruzione di una galleria secondo l'ADECO-RS

Si è visto come l'ADECO-RS (Analisi delle DEformazioni COntrollate nelle Rocce e nei Suoli) focalizzi l'attenzione del progettista sull'analisi e il controllo della Risposta Deformativa, intesa come reazione del mezzo all'azione di scavo, e come la rigidità del nucleo d'avanzamento sia lo strumento naturale di controllo dell'estrusione e quindi della preconvergenza e della convergenza della cavità, componenti della Risposta Deformativa stessa, la quale, com'è noto, condiziona l'industrializzazione dello scavo e di conseguenza il rispetto dei tempi e dei costi di costruzione.

In questa ottica, l'analisi e il controllo della Risposta Deformativa, giocano un ruolo fondamentale quali passaggi indispensabili per progettare e costruire correttamente un'opera in sotterraneo:

- l'analisi, volta alla previsione dei fenomeni deformativi che avverranno in seguito allo scavo, deve avvenire per via teorica, utilizzando gli strumenti del calcolo analitico o numerico, al "momento della progettazione", durante il quale, sulla base delle previsioni fatte, il progettista compie

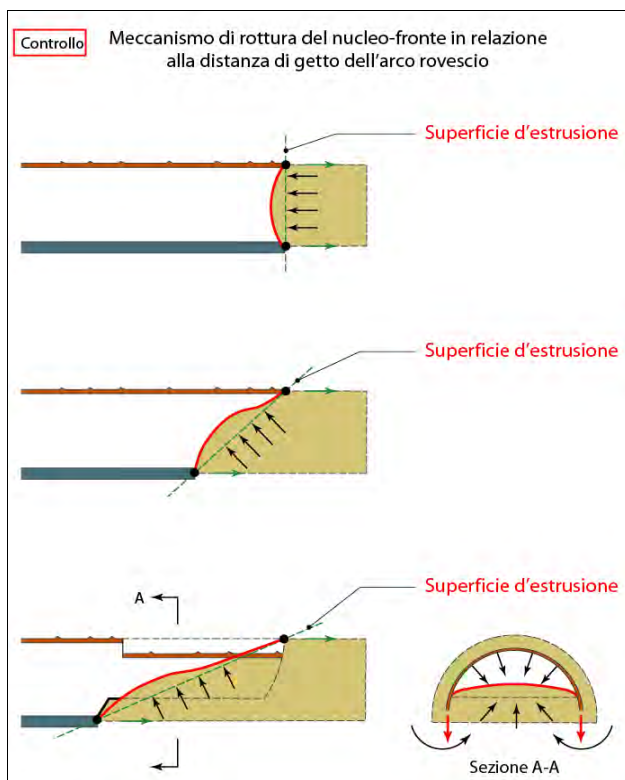


Figura 14. Allontanare il getto dell'arco rovescio dal fronte di scavo significa aumentare la superficie di estrusione



Figura 15. Arco rovescio gettato a ridosso del fronte di scavo - Galleria Raticosa ( $\varnothing = 13,90$  m, Terreno: argille scagliose, Copertura: 500 m) e galleria Tartaguille ( $\varnothing = 15,30$  m, Terreno: argille rigonfianti, Copertura max: 150 m.

anche le scelte operative necessarie, in termini di sistemi, fasi, cadenze di scavo, strumenti di consolidamento e di stabilizzazione;

- il controllo della Risposta Deformativa, invece, avviene al “momento della costruzione”, quando, procedendo lo scavo, le scelte progettuali sono operate e verificate attraverso la misura della Risposta Deformativa del mezzo alle azioni messe in atto.

Ne consegue che per progettare e costruire correttamente un'opera in sotterraneo è fondamentale:

- in fase di progettazione:
  - avere una conoscenza approfondita del mezzo in cui si dovrà operare sotto il profilo geologico e geomeccanico, con particolare riguardo alle sue caratteristiche di resistenza e deformabilità;
  - studiare preliminarmente quale sarà il comportamento tenso-deformativo (Risposta Deformativa) di detto mezzo allo scavo, nell'ipotesi di assenza d'interventi di stabilizzazione;
  - definire il tipo di azioni di precontenimento o di contenimento necessarie per regimare e controllare la Risposta Deformativa del mezzo allo scavo;
  - scegliere il tipo di intervento di stabilizzazione tra quelli oggi disponibili grazie alle tecnologie esistenti, sulla base delle azioni di precontenimento o di contenimento che ciascuna è in grado di garantire;
- in fase di costruzione:
  - verificare, in corso d'opera, che il comportamento della galleria durante lo scavo sia corrispondente a quello previsto per via analitica in fase progettuale. Procedere quindi alla messa a punto del progetto bilanciando il peso degli interventi tra il nucleo-fronte e il perimetro del cavo.

Allora, per inquadrare il progetto e la costruzione di un'opera in sotterraneo in maniera corretta e universalmente valida, l'approccio ADECO-RS prevede che essi si articolino in due momenti cronologicamente distinti (fig. 16):

- un momento della progettazione comprendente:
  - una fase conoscitiva, riferita alla conoscenza geologica, geomeccanica ed idrogeologica del mezzo e all'analisi degli equilibri naturali preesistenti;
  - una fase di diagnosi, riferita all'analisi e alla previsione, per via teorica, del comportamento del mezzo in termini di Risposta Deformativa, nell'ipotesi di assenza d'interventi di stabilizzazione, in funzione delle condizioni di stabilità del nucleo-fronte (categorie A, B e C);
  - una fase di terapia, riferita, prima, alla definizione delle modalità di scavo e stabilizzazione del mezzo al fine di regimare, in accordo con le categorie di comportamento A, B e C, la Risposta Deformativa e poi alla valutazione, per via teorica, dell'efficacia, a questo riguardo, delle soluzioni scelte; in questa fase sono composte le sezioni tipo prevenendo l'applicazione e le possibili variabilità in funzione

Momento	Fase	Descrizione
Progettazione	- Conoscitiva	- Analisi degli equilibri naturali preesistenti
	- Diagnosi	- Analisi e previsione dei fenomeni deformativi (*) in assenza di opere di stabilizzazione
	- Terapia	- Controllo dei fenomeni deformativi (*) in termini di scelta dei sistemi di stabilizzazione
Costruzione	- Operativa	- Applicazione degli strumenti di stabilizzazione per controllare i fenomeni deformativi (*)
	- Verifica	- Controllo e lettura dei fenomeni deformativi (*) come risposta dell'ammasso durante l'avanzamento degli scavi (rilevamento estrusione del nucleo-fronte e convergenze superficiali e profonde del cavo)
	- Messa a punto del progetto	- Interpretazione dei fenomeni deformativi (*) - Bilanciamento dei sistemi di stabilizzazione tra il nucleo-fronte e il perimetro di scavo

(\*) Fenomeni deformativi in termini di estrusione del nucleo-fronte e di convergenze superficiali e profonde del cavo

Figura 16.

VERIFICA IN CORSO D'OPERA																						
MOMENTO DELLA PROGETTAZIONE	MOMENTO DELLA COSTRUZIONE																					
Analisi teorica	Verifica sperimentale																					
Basata sulle CLASSIFICAZIONI GEOMECCANICHE	Basata sulla RISPOSTA DEFORMATIVA																					
<table border="1"> <tr> <th>Convergenza / base (%)</th> <th>Classe</th> <th>Trascorabile</th> </tr> <tr> <td>&lt;1</td> <td>I</td> <td>Bassa</td> </tr> <tr> <td>2-5</td> <td>II</td> <td>Media</td> </tr> <tr> <td>5-10</td> <td>III</td> <td>Alta</td> </tr> <tr> <td>10-15</td> <td>IV</td> <td>Molto alta</td> </tr> <tr> <td>&gt;15</td> <td>Va</td> <td>*</td> </tr> <tr> <td>*</td> <td>Vb</td> <td>*</td> </tr> </table>	Convergenza / base (%)	Classe	Trascorabile	<1	I	Bassa	2-5	II	Media	5-10	III	Alta	10-15	IV	Molto alta	>15	Va	*	*	Vb	*	misurata in termini di sola convergenza della cavità
Convergenza / base (%)	Classe	Trascorabile																				
<1	I	Bassa																				
2-5	II	Media																				
5-10	III	Alta																				
10-15	IV	Molto alta																				
>15	Va	*																				
*	Vb	*																				
Basata sulla RISPOSTA DEFORMATIVA del nucleo-fronte valutata mediante metodi matematici 	Basata sulla RISPOSTA DEFORMATIVA misurata in termini di estrusione del nucleo-fronte e convergenza della cavità 																					
ANALISI DELLE DEFORMAZIONI CONTROLLATE NELLE ROCCE E NEI SUOLI (ADECO-RS)																						

Figura 17

<sup>1</sup>Studio di geingegneria Lunardi, Milano (Italia)  
e-mail: [pietro.lunardi@gmail.com](mailto:pietro.lunardi@gmail.com)



del reale comportamento deformativo della galleria in fase di scavo che sarà misurato in fase operativa;

- un momento della costruzione comprendente:
  - una fase operativa, riferita alla costruzione effettiva della galleria, in cui è operata l'applicazione degli strumenti di stabilizzazione per il controllo della Risposta Deformativa;
  - una fase di verifica e messa a punto del progetto in corso d'opera, riferita alla misura e all'interpretazione per via sperimentale del comportamento reale del mezzo allo scavo in termini di Risposta Deformativa, per la messa a punto e il bilanciamento tra il nucleo-fronte e il perimetro di scavo dei sistemi di stabilizzazione operati e per la verifica delle soluzioni prescelte attraverso il confronto delle deformazioni reali con quelle previste.

Al contrario del NATM, il progetto è quindi verificato e tarato in corso d'opera paragonando tra loro parametri omogenei (risposta deformativa prevista col calcolo con risposta deformativa misurata in corso d'opera). Sono evitati così errori, per non dire orrori, come quello di confrontare durante la costruzione di una galleria le convergenze misurate in fase d'avanzamento con intervalli di convergenze correlati arbitrariamente a classi geomeccaniche (fig. 17).

### 100 KM DI GALLERIE ATTRAVERSO L'APPENNINO

Gli oltre 100 Km di gallerie scavate tra il 1996 e il 2005 nella tratta Bologna - Firenze della nuova linea ferroviaria A.V. Milano-Roma-Napoli sono un grande esempio di applicazione dell'approccio ADECO-RS e della sua capacità di conseguire la piena industrializzazione degli scavi anche in terreni molto difficili per natura e per campi tensionali in gioco (fig. 18).

La lunghezza complessiva del tracciato è di oltre 78,5 Km di cui 70,6 (il 90 % circa della lunghezza totale) in galleria naturale a doppio binario.

Il progetto della tratta comprendeva la costruzione di:

- n. 9 gallerie di linea di circa 140 m<sup>2</sup> di sezione e lunghezza variabile da 528 m a 16.775 m;
- n. 14 finestre d'accesso per complessivi 9.255 m;
- n. 1 galleria di servizio per complessivi 10.647 m;
- n. 2 gallerie d'interconnessione + by-pass per complessivi 2.160 m.



Figura 18.

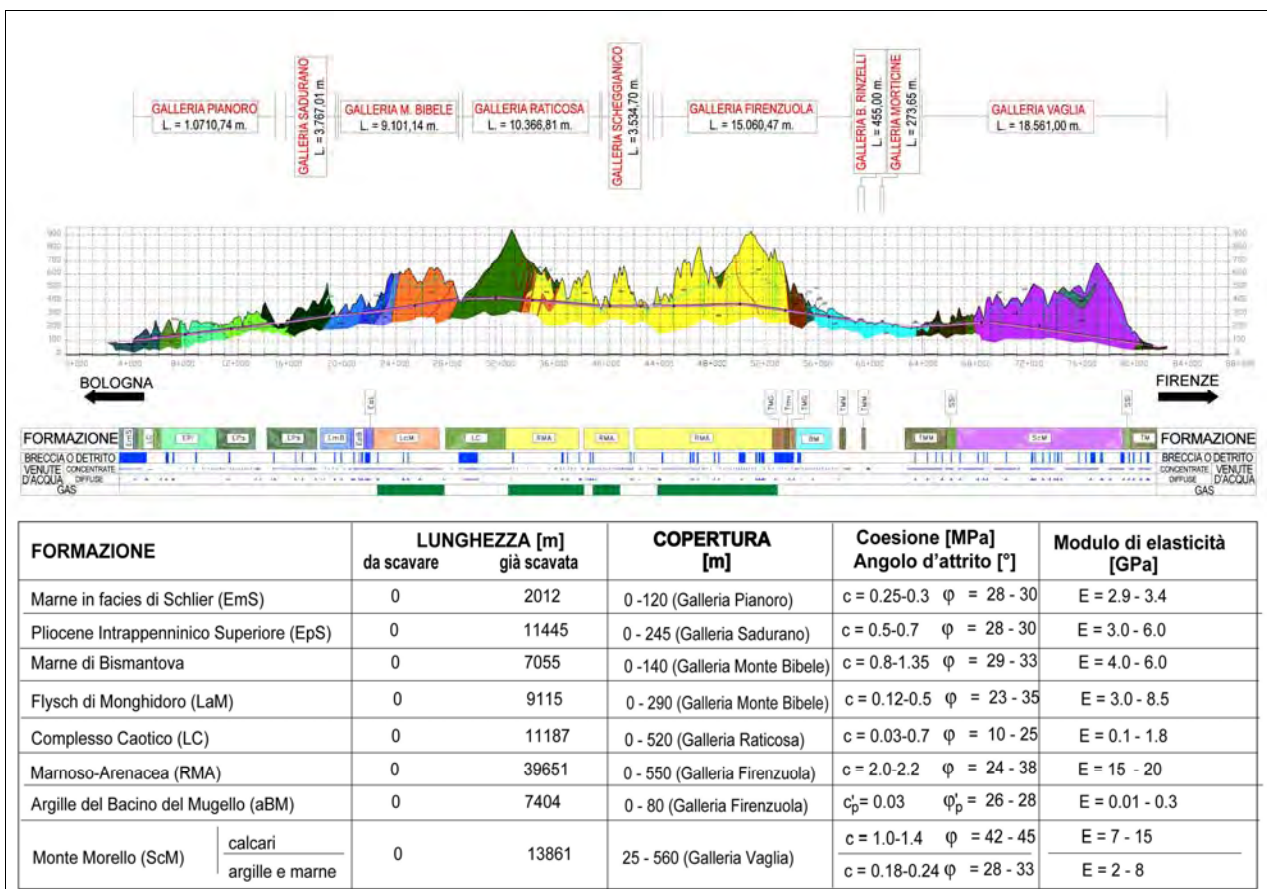


Figura 19.

<sup>1</sup>Studio di geingegneria Lunardi, Milano (Italia)  
e-mail: [pietro.lunardi@gmail.com](mailto:pietro.lunardi@gmail.com)

per un totale di circa 104 Km di tunnel da scavare.

La progettazione esecutiva e costruttiva di tutte queste opere è avvenuta sulla base dell'approccio ADECO-RS. Il progetto e la costruzione si sono quindi sviluppati in due momenti assolutamente distinti dal punto di vista cronologico, e più precisamente attraverso:

- una fase conoscitiva, una fase di diagnosi e una fase di terapia, al momento della progettazione;
- una fase operativa e una fase di verifica in corso d'opera, al momento della costruzione.

## Progettazione dell'opera

### *Inquadramento geologico-geotecnico (fase conoscitiva)*

Essendo ben nota la notevole complessità dei terreni in gioco, che furono già affrontati tra eccezionali difficoltà per realizzare la linea ferroviaria "Direttissima", inaugurata nel 1934, per le campagne geognostiche da espletare ai fini della progettazione esecutiva della nuova linea AV/AC fu deciso d'investire una somma pari a circa 84 milioni di euro, il 2% dell'importo globale dell'opera. Questo ha permesso di ottenere una caratterizzazione geologico-geomeccanica dei terreni che sarebbero stati interessati dallo scavo delle gallerie sufficientemente dettagliata e, soprattutto, realistica.

Come mostra la fig. 19, si tratta soprattutto di formazioni flyshioidi, argille, argilliti e terreni sciolti, talvolta sede d'importanti orizzonti acquiferi, che hanno interessato più del 70 % del tracciato sotterraneo, con coperture variabili tra 0 e 600 m. Alcune formazioni presentano anche il problema della presenza di gas, sempre insidioso da affrontare. Sulla base delle conoscenze acquisite, in fase conoscitiva il tracciato si è suddiviso in tratte aventi caratteristiche geologico-geomeccaniche simili, cui si sono attribuiti i parametri di resistenza e deformabilità da assumere nelle successive analisi di diagnosi e terapia.

### *Previsione del comportamento tenso-deformativo dell'ammasso allo scavo (fase di diagnosi)*

Sulla base delle conoscenze geologiche, geotecniche, geomeccaniche e idrogeologiche raccolte e dei risultati dei calcoli di stabilità eseguiti con metodi analitici e/o numerici, in fase di diagnosi il tracciato sotterraneo si è suddiviso in tratte a comportamento tenso-deformativo omogeneo, in funzione della prevista stabilità del nucleo-fronte in assenza d'interventi di stabilizzazione:

- nucleo-fronte stabile (categoria di comportamento A; fenomeni deformativi in campo elastico, manifestazioni d'instabilità prevalenti: distacchi gravitativi sul fronte e al contorno del cavo);
- nucleo-fronte stabile a breve termine (categoria di comportamento B; fenomeni deformativi in campo elastoplastico; manifestazioni d'instabilità prevalenti: splaccaggi al fronte e al contorno del cavo);
- nucleo-fronte instabile (categoria di comportamento C; fenomeni deformativi in campo di rottura; manifestazioni d'instabilità conseguenti: crollo del fronte e collasso della cavità).

Da questa analisi è risultato che il 17% del tracciato si sarebbe sviluppato entro ammassi che, all'atto dello scavo, avrebbero manifestato un comportamento di categoria A, il 57% sarebbe stato prevedibilmente interessato da fenomeni deformativi in campo elastoplastico riconducibili alla categoria di comportamento B, circa il 26%, infine, sarebbe stato caratterizzato, in assenza di appropriati interventi, da gravi fenomeni d'instabilità del nucleo-fronte tipici della categoria di comportamento C.

### *Definizione di sistemi di scavo e interventi di stabilizzazione (fase di terapia)*

Dopo aver formulato previsioni attendibili riguardo al comportamento tenso-deformativo dell'ammasso in seguito allo scavo, si sono individuate, per ogni tratta di galleria a comportamento tenso-deformativo omogeneo, le azioni (di precontenimento e/o di semplice contenimento) necessarie per garantire, in ciascuna situazione ipotizzata, la formazione di un effetto arco il più possibile prossimo al profilo dello scavo. Conseguentemente, si sono progettate le metodologie

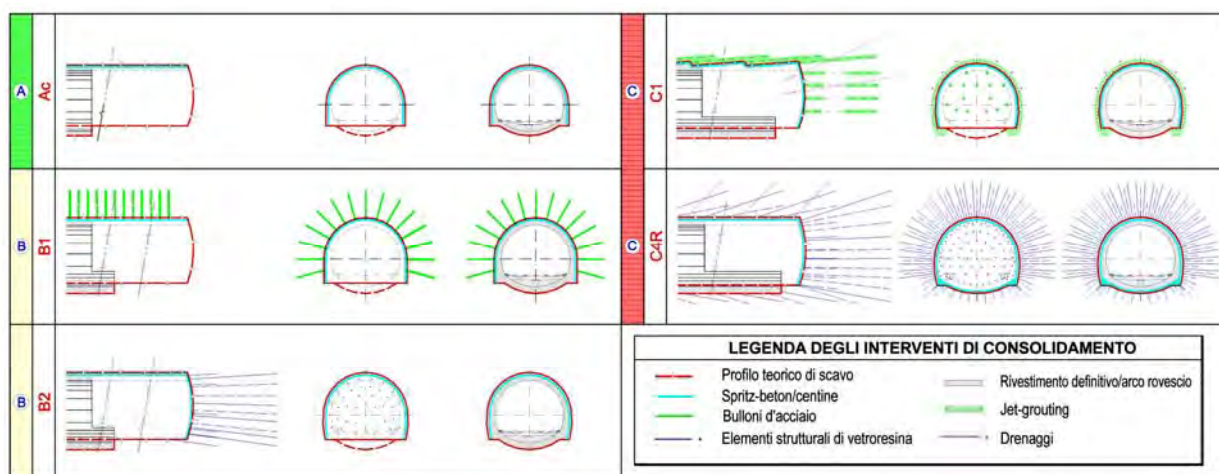


Figura 20. Le sezioni tipo principali.

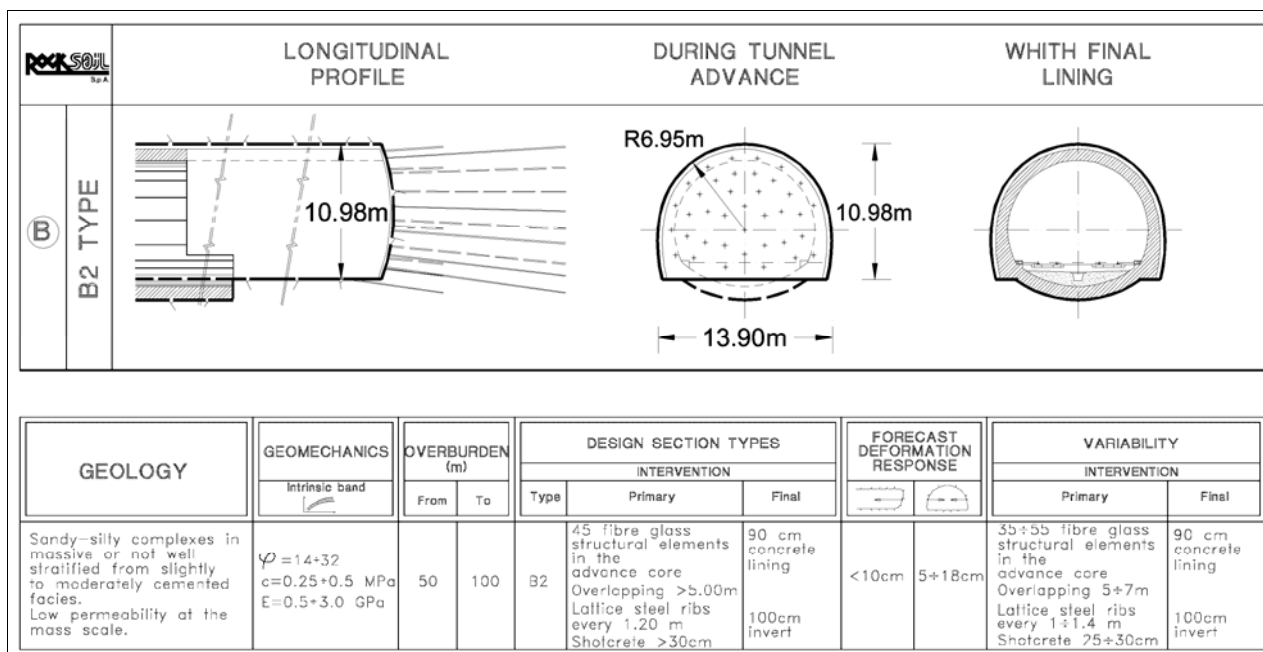


Figura 21. Esempio delle variabilità progettate in funzione del reale comportamento dell'ammasso allo scavo.

d'avanzamento (sistema d'abbattimento, profondità degli sfondi) e gli interventi più idonei per produrre tali azioni e garantire, di conseguenza, la stabilità e la sicurezza degli scavi a breve e a lungo termine.

Poiché la variabilità dei terreni, più o meno marcata in tutte le gallerie, sconsigliava di adottare tecnologie di scavo totalmente meccanizzate, ad eccezione della galleria di servizio della galleria Vaglia, i principi informativi sui quali si è basata la progettazione delle sezioni tipo per le gallerie di linea sono stati i seguenti:

- avanzamento sempre a piena sezione, soprattutto in condizioni tenso-deformative difficili: grazie ai vantaggi statici che gli sono propri e alla meccanizzazione spinta che è possibile realizzare nei grandi spazi di lavoro disponibili, l'impiego dello scavo a piena sezione previo preconsolidamento del nucleo-fronte, quando necessario, permette infatti di avanzare in condizioni di sicurezza conseguendo produzioni ottime, e soprattutto regolari, anche nelle situazioni più complesse;
- contenimento, ove necessario, dell'alterazione e della decompressione del terreno causate dallo scavo, mediante l'applicazione immediata di efficaci interventi di rinforzo e/o protezione del nucleo d'avanzamento;
- realizzazione di un rivestimento definitivo di calcestruzzo, eventualmente armato, completo di arco rovescio gettato, laddove si riconosceva la necessità di bloccare tempestivamente i fenomeni deformativi, a ridosso del fronte, per campioni di lunghezza ridotta.

Si sono quindi individuate le sezioni tipo longitudinali e trasversali (in totale 14) più adeguate per affrontare le diverse condizioni d'ammasso, definendo con chiarezza, per ciascuna, le condizioni geologiche-geomeccaniche e tenso-deformative (estrusioni e convergenze) entro le quali ciascuna avrebbe dovuto essere applicata, nonché la posizione rispetto al fronte di scavo, l'intensità, le fasi e le cadenze di messa in opera dei differenti interventi previsti (preconsolidamento, priverstimento, arco rovescio, ecc.), ipotizzando, con riferimento a precedenti esperienze oramai sufficientemente numerose, un ciclo temporale d'esecuzione assai attendibile, onde prevedere con sufficiente precisione le possibili produzioni giornaliere (figura 20). Per ogni sezione tipo si sono progettate le variabilità da applicare in concomitanza di situazioni statisticamente probabili, la cui ubicazione lungo il tracciato, però, non era prevedibile sulla base dei dati disponibili (vedasi esempio in fig. 21).

L'individuazione preventiva, per ciascuna sezione tipo, delle variabilità ammesse in funzione del reale comportamento manifestato dall'ammasso allo scavo, sempre e comunque entro i campi di deformazione previsti, è un'operazione fondamentale prevista dall'approccio ADECO-RS, che consente di conseguire un elevato livello di definizione del progetto e, contemporaneamente, la flessibilità necessaria per poter adottare vantaggiosamente, in fase di costruzione, senza svilirne i principi fondamentali, un Sistema di Assicurazione Qualità conforme alle norme ISO 9001. In tal modo, infatti, si evita che, ad ogni variazione delle condizioni incontrate tale da implicare cambiamenti anche minori al progetto, insorgano delle Non Conformità (cioè diversità tra il costruito e il progettato) che obblighino a una parziale riprogettazione.

Ciascuna sezione tipo è stata verificata in funzione dei carichi mobilitati dallo scavo individuati in fase di diagnosi, sia per quanto concerne le diverse fasi costruttive, sia per la fase finale di esercizio, mediante una serie di calcoli su modelli agli elementi finiti tridimensionali e piani in campo elastoplastico.

Si sono formulate, infine, precise indicazioni per l'attuazione di un programma di monitoraggio adeguato, che in funzione delle differenti caratteristiche dei terreni attraversati, fosse in grado, da un lato, di garantire la sicurezza degli

<sup>1</sup>Studio di geingegneria Lunardi, Milano (Italia)  
e-mail: [pietro.lunardi@gmail.com](mailto:pietro.lunardi@gmail.com)

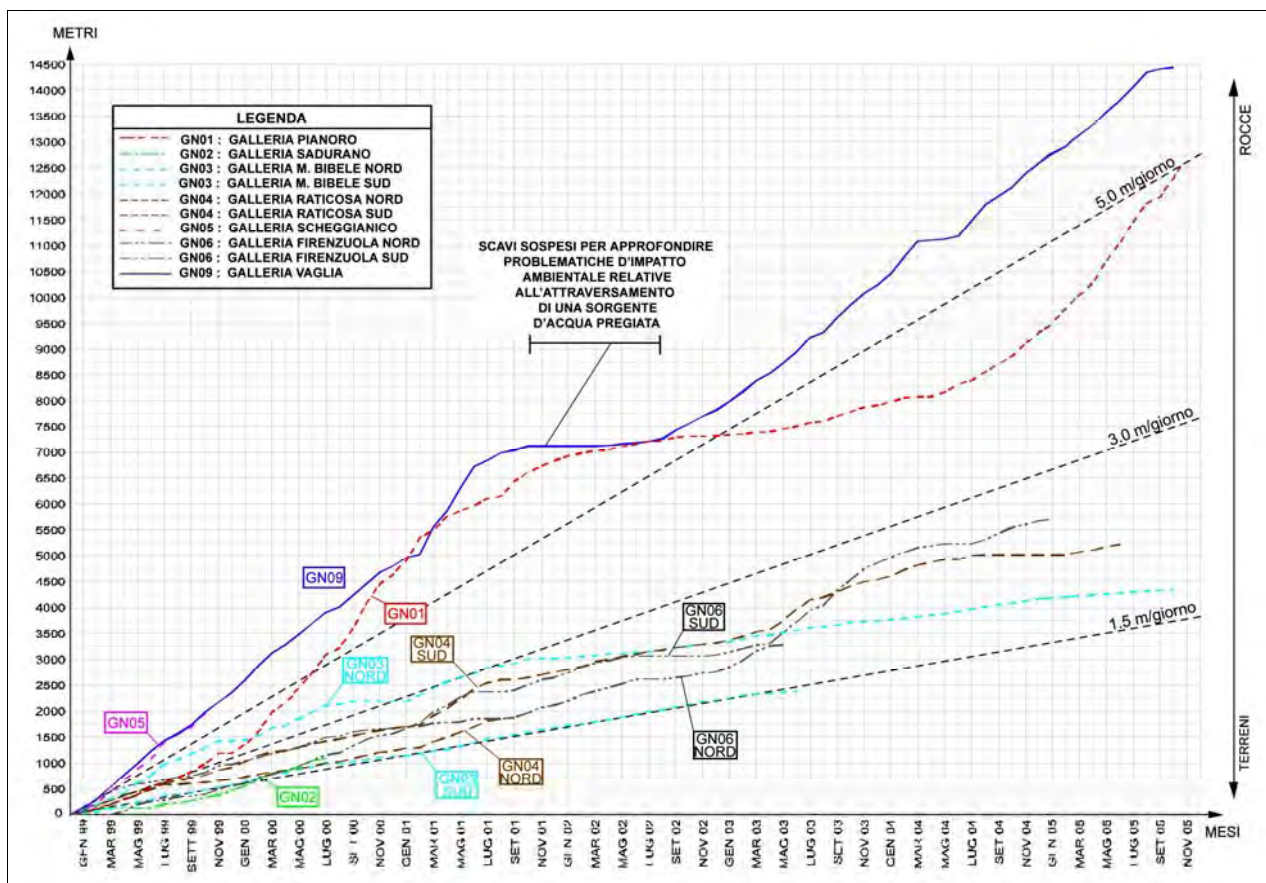


Figura 22. Andamento delle produzioni ottenute nelle differenti condizioni tenso-deformative incontrate.

scavi, dall'altro lato, di controllare l'adeguatezza del progetto e la sua ottimizzazione in rapporto alle condizioni realmente incontrate.

## Costruzione dell'opera

### Caratteristiche dell'appalto

Le opere dell'intera tratta ferroviaria tra Bologna e Firenze, sono state appaltate con un contratto rigorosamente forfetario (importo 4,209 miliardi di euro) da FIAT S.p.A., in qualità di General Contractor, che, sulla base del progetto esecutivo redatto come dianzi illustrato, ha accettato di farsi carico di qualsiasi imprevisto, compreso quello geologico, delegando al Consorzio CAVET tutte le attività (espropri, progettazione, costruzione, collaudo, ecc.).

### Fase operativa

Subito dopo l'aggiudicazione dell'appalto, contemporaneamente ai lavori di scavo (luglio 1996) ha avuto inizio la progettazione costruttiva delle opere.

A fronte degli ulteriori elementi conoscitivi a disposizione e dei riscontri diretti sul campo, la validità del progetto esecutivo è risultata sostanzialmente confermata e in sede di progettazione costruttiva sono stati operati solo affinamenti minori:

- per affrontare specificatamente situazioni particolarmente delicate dal punto di vista tenso-deformativo si è introdotto, nell'ambito delle variabilità delle sezioni tipo B2, e C4, l'impiego di un puntone d'acciaio in arco rovescio per ottenere un'efficace azione di contenimento dei fenomeni deformativi in tempi sensibilmente più brevi. La sezione tipo B2, così modificata, si è dimostrata assai versatile ed adeguata anche per molte situazioni di nucleo-fronte instabile, permettendo di limitare l'utilizzazione delle più pesanti sezioni tipo C alle situazioni tenso-deformative più estreme.
- l'efficacia del consolidamento del nucleo-fronte mediante elementi strutturali di vetroresina è stata incrementata notevolmente introducendo, per la cementazione delle chiodature, l'impiego di miscele cementizie espansive;
- conseguentemente alla positiva esperienza maturata durante la costruzione di alcune gallerie della tratta Roma-Napoli della stessa linea ferroviaria (Lunardi e altri, 1997), si è progettata la sezione tipo B2pr per lo scavo in naturale delle gallerie Sadurano, Borgo Rinzelli e Morticine, originariamente previsto in galleria artificiale;
- si è infine deciso di sostituire le sezioni B3 e C3, che prevedevano l'impiego del pretaglio meccanico con la sezione C2 (consolidamento del nucleo-fronte e del suo contorno con elementi strutturali di vetroresina) più adatta ai terreni da affrontare.

<sup>1</sup>Studio di geingegneria Lunardi, Milano (Italia)  
e-mail: [pietro.lunardi@gmail.com](mailto:pietro.lunardi@gmail.com)

Alla fine, la progettazione costruttiva ha portato a definire le seguenti percentuali d'applicazione delle sezioni tipo: sezioni tipo A: 20,5 %; sezioni tipo B: 57,5 %; sezioni tipo C: 22,1 %.

Sono stati realizzati e rivestiti circa 70,6 Km di gallerie di linea. La produzione media mensile è stata dell'ordine di 1000 m di galleria finita con una punta massima di 2000 m, raggiunta nel marzo 2001 lavorando su 30 fronti contemporaneamente.

I grafici di produzione riportati in fig. 22 evidenziano la marcata linearità delle produzioni che hanno raggiunto

valori in assoluto molto elevati in rapporto ai terreni attraversati. Anche per la galleria Raticosa, scavata in condizioni tenso-deformative assai difficili entro il Complesso Caotico costituito dalle assai temute argille scagliose, le produzioni non sono mai scese sotto 1,5 m/giorno. La Tabella I mette a confronto, per alcune sezioni tipo, gli avanzamenti giornalieri previsti in sede di progettazione esecutiva e i valori effettivamente realizzati.

La Tabella II mette a sua volta a confronto le differenze di distribuzione delle sezioni tipo tra il progetto esecutivo e l'“as built”, mostrando una significativa riduzione di applicazione delle sezioni tipo più costose a favore di quelle più economiche. Questo risultato è in gran parte dovuto all'eccezionale efficacia dimostrata dagli interventi di precontenimento del cavo anche in condizioni di elevata copertura. Era la prima volta ch'essi si applicavano con coperture superiori ai 500 m. L'avanzamento previo irrigidimento del nucleo-fronte, da taluni ritenuto controproducente sotto le coperture più elevate, se correttamente operato, assicurando la continuità dell'azione da monte a valle del fronte di scavo con l'impiego del puntone d'acciaio in arco rovescio, si è dimostrato invece assai efficace anche in tali situazioni, richiedendo di adottare le sezioni tipo più pesanti solo nelle condizioni più estreme. Un'altra ragione che ha portato a un maggior utilizzo della sezione tipo A rispetto a quanto previsto in sede di progettazione esecutiva è che essa differiva dalle sezioni tipo B0 solo per lo spessore del rivestimento definitivo e la posizione di getto dell'arco rovescio un po' più distante dal fronte di scavo. Di conseguenza, la sezione tipo A si è adottata al posto delle sezioni tipo B0 o B0V su importanti tratti della galleria Vaglia, dove la presenza della contigua galleria di servizio, già costruita, rendeva la situazione assai chiara dal punto di vista geologico-geomeccanico riducendo il rischio insito in tale alleggerimento di sezione). Le differenze rilevate tra il progetto esecutivo e quanto si è effettivamente costruito non hanno comunque comportato clamorosi scostamenti né di costo globale dell'opera, che è risultato di poco inferiore (~ - 5%) rispetto a quello previsto dal progetto esecutivo, né di tempi costruttivi. Mentre della riduzione del costo ha parzialmente beneficiato il costruttore, che ha visto premiato il maggior rischio corso accettando di firmare un contratto rigorosamente forfetario, del rispetto dei tempi hanno beneficiato il Committente e i cittadini, che hanno potuto disporre della nuova infrastruttura senza intollerabili ritardi.

Tabella I

Sezioni tipo	Avanzamenti previsti [m/giorno di galleria finita]	Avanzamenti realizzati [m/giorno di galleria finita]
A	5,40	5 - 6
B0	4,30	5 - 5,5
B2	2,25	2,1 - 2,2
C1	1,40	1,4
C2	1,25	0,85
C4V	1,25	1,63

#### Fase di verifica

La particolarità e l'importanza del progetto hanno imposto l'esecuzione di un accurato programma di monitoraggio sia in corso d'opera che in fase di esercizio.

In corso d'opera si sono monitorati:

- i fronti di scavo delle gallerie, attraverso accurati rilievi geomeccanici condotti secondo gli standard dell'ISRM. Tali rilievi sono molto utili per avere un primo riferimento sulle caratteristiche dell'ammasso da confrontare con quelle previste in sede di progetto;
- il comportamento deformativo del nucleo-fronte, attraverso misure d'estrusione superficiali e profonde.

Tabella II

HIGH SPEED/CAPACITY TRAIN - Milan to Naples Line - SECTION TYPES DISTRIBUTION																													
TUNNEL	FINAL DESIGN															AS BUILT (up to 31 <sup>st</sup> March 2004)													
	Length [m]	SECTION TYPES DISTRIBUTION [m]														Length [m]	Tunnelled length		SECTION TYPES DISTRIBUTION [m]										
		A	B0	B0V	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4	C4V	C5	[%]		[m]	A	B0	B0V	B2	B2pr	B2V	C1	C2	C4	C4V	C6	
Pianoro	10293,4		951,8			3886,4	3036		62,0	948,8	1083	310		15,5	10710	97	10438,0		8167,0		682,5		63,0	3,5				1522,0	
Sadurano	3778,0	64,0	2580,8			875,0			68,0	190,3					3767,0	100,0	3767,0	2213,1	1408,0		85	53				8			
M. Bibele	9118,5	978,2	1094,6		4529,1	1212,2			76,0	1112,8		115,6			9101,0	95,0	8643,1	2935,5	2015,7		3507,9		97,9	41	45				
Raticosa	10381,0	3043,0			972,2	758,4			40,0	786,7		4465,1		315,67	10367,0	98,1	10165,2	3578,2	686,0		857		25	85		1468	673,4	2792,6	
Scheggiano	3530,6	2089,9			1404,7					36,0					3535,0	100,0	3535,0	3517,0	18,0										
Frenzuola	14311,5	3528,7			5950,4	716	412,2		227,5	511,9	2226,8	738,1			15211,0	92,9	14128,0	6833,1	3194,3		3081,8		263,5	577,1	9		125,83	43,5	
B. Rinzelli	455,0								160		295				528,5	100,0	528,5					303,5				225,1			
Morticine	273,7								80	193,7					565,5	100,0	565,5					537,0				28,5			
Vaglia	16757,0	2017,2	3104,3	1129,8	5629,0				1151,2	692	708,5				16757,0	80,3	13449,7	5287,60	5892,20		96,60	1547,0				296,70	128,25	101,4	
TOTAL LENGTH [m]	68898,6	11721,0	7731,5	1129,8	18485,2	7447,9	3448,2	1151,2	1405,4	4488,6	3604,8	5628,8	2325,2	331,2	70542,3	92,5	65220,0	24364,5	21481,2		96,6	9761,2	893,5	746,1	834,8	417,0	1468,0	2321,2	2836,1
SECTION TYPES DISTRIBUTION [%]		A	B0	B0V	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4	C4V	C5			A	B0	B0V	B2	B2pr	B2V	C1	C2	C4	C4V	C6		
		17,0	11,2	1,6	26,8	10,8	5,0	1,7	2,0	6,5	5,2	8,2	3,4	0,5			37,4	32,9	0,1	15,0	1,4	1,1	1,3	0,6	2,3	3,6	4,3		



Figura 23. Galleria Monte Bibele, il nucleo-fronte rinforzato con armature di vetroresina (terreno: flysh di Monghidoro).



Figura 24. Galleria Firenzeuola, il nucleo fronte consolidato con micro-jet-grouting armato (terreno: sabbie argillose con intercalazioni ghiaiose).

L'esecuzione sistematica di questo tipo di misure è cruciale soprattutto quando le condizioni tenso-deformative sono difficili perché forniscono indicazioni precise e molto attendibili sull'evoluzione che potrebbero avere i fenomeni deformativi, permettendo di decidere e operare con provvidenziale tempestività e moltiplicata efficienza tutte le contromisure eventualmente necessarie;

- il comportamento deformativo del cavo attraverso misure sistematiche di convergenza;
- il comportamento tensionale dell'insieme ammasso-rivestimento, attraverso celle di pressione da collocare al contatto terreno-rivestimento e all'interno del rivestimento stesso, di prima fase o definitivo.

In corso d'opera i risultati del monitoraggio hanno guidato progettista e Direzione Lavori sull'opportunità di proseguire con la sezione prevista o eventualmente modificarla, secondo i criteri preindicati nel progetto, adottando le variabilità già specificate nello stesso. Questa impostazione ha consentito di gestire con soddisfazione l'aleatorietà connessa alle opere in sotterraneo, pur con un contratto come quello tra CAVET e TAV rigorosamente forfetario.

## CONCLUSIONI

L'esperienza maturata con la realizzazione, avvenuta nel sostanziale rispetto dei tempi e dei costi preventivati e con una percentuale di infortuni al fronte di scavo quasi nulla, di un'opera eccezionale per vastità, eterogeneità e difficoltà di situazioni affrontate, qual è l'attraversamento appenninico della nuova linea ferroviaria ad alta velocità/capacità tra Bologna e Firenze, dimostra che l'approccio ADECO-RS è effettivamente in grado di affrontare con successo qualsiasi tipo di terreno e condizione tenso-deformativa garantendo il rispetto dei tempi e dei costi di costruzione. Gli ampi spazi disponibili al fronte di scavo grazie all'avanzamento a piena sezione consentono l'impiego di macchinari potenti e quindi di raggiungere produzioni industriali particolarmente elevate in rapporto alle condizioni geologiche e tenso-deformative affrontate. L'ambiente di lavoro al fronte gradevole e la necessità di un ridottissimo numero di minatori assicurano livelli di sicurezza elevatissimi e mai sfiorati nemmeno lontanamente da altri sistemi.

L'apparente maggior costo di una galleria realizzata con l'ADECO-RS rispetto ad una analoga realizzata col NATM è ampiamente superato dall'assai più elevato standard di sicurezza garantito presso il fronte di scavo (rispetto della vita umana) senza contare i notevoli risparmi finanziari conseguenti alla marcata industrializzazione (rispetto di tempi e costi di costruzione).

## BIBLIOGRAFIA

- Rabcewicz L. (1964). The New Austrian Tunnelling Method, Part one, Water Power, November 1964, 453-457, Parte 2, Water Power, dicembre 1964, 511-515
- Rabcewicz L. (1965). The New Austrian Tunnelling Method, Parte 3, Water Power, January 1965, 19-24.
- Lunardi P., Bindi R., and others (1993). Technical and financial planning of underground works: the ADECO-RS method. VI European Forum of Engineering Economics – Università Bocconi - Milano, 13-14 maggio 1993
- Kovári K., "On the Existence of NATM, Erroneous Concepts behind NATM", Tunnel, No. 1, 1994 (inglese e tedesco), o Gallerie e Grandi Opere Sotterranee, No. 44, dicembre 1994 (Italiano e Inglese).
- Lunardi P. e altri (1997) - Una soluzione innovativa per la realizzazione di gallerie naturali senza copertura, Quarry and Construction, maggio 1997.
- Martel J., Roujon M., Michel D. (1999). TGV Méditerranée – Tunnel Tartaiguille : méthode pleine section. Proceedings of the International Conference on "Underground works: ambitions and realities" Parigi, 25-28 ottobre 1999

<sup>1</sup>Studio di geingegneria Lunardi, Milano (Italia)  
e-mail: [pietro.lunardi@gmail.com](mailto:pietro.lunardi@gmail.com)

- Lunardi P. (2000). Design & constructing tunnels – ADECO-RS approach. Tunnels & Tunnelling International, Supplemento Speciale, maggio 2000
- Lunardi P. (2001). The ADECO-RS approach in the design and construction of the underground works of Rome to Naples High Speed Railway Line: a comparison between final design specifications, construction design and “as built”. AITES-ITA World Tunnel Congress su “Progress in tunnelling after 2000”, Milano, 10-13 giugno 2001, Vol. 3, 329-340
- Lunardi P. 2008. Design and construction of tunnels – Analysis of controlled deformation in rocks and soils. SPRINGER, Berlin Heidelberg. Disponibile anche in italiano (Ed. HOEPLI) e cinese (CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE)