

**Pietro Lunardi
Renzo Bindi
Alessandro Focaracci**

**Pianificazione tecnico-economica
delle opere in sotterraneo
mediante l'approccio basato
sull'analisi delle deformazioni
controllate nelle rocce e nei suoli**

**ESTRATTO DA
"COSTRUZIONI"
Anno XLIII - Settembre 1994**

Pianificazione tecnico-economica delle opere in sotterraneo mediante l'approccio basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli

Fino a qualche anno fa, la progettazione e la costruzione di opere in sotterraneo non poteva essere affrontata allo stesso modo di altre opere civili di pari importanza. Questo dipendeva, sostanzialmente, dalla mancanza di adeguati strumenti conoscitivi, progettuali e realizzativi. Da un lato l'insidia dell'imprevisto geologico, dall'altro la carenza di strumenti di calcolo adeguati e l'oggettiva difficoltà di affrontare, con le tecniche di scavo disponibili, i terreni cosiddetti "difficili" hanno da sempre collocato le opere in sotterraneo in posizione subordinata rispetto alle analoghe opere in superficie: a esse si è ricorsi solo quando quest'ultime apparivano impraticabili. Negli ultimi anni, i progressi fatti in campo geognostico, la disponibilità di più potenti mezzi di calcolo e l'introduzione di tecnologie di scavo innovative hanno creato, però, la premessa per un decisivo salto di qualità. Oggi, l'approccio basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli ha raccolto in sé tutte queste importanti innovazioni, integrandole tra loro in un sistema di progettazione e di costruzione di nuova concezione che, al contrario dei sistemi fino a oggi vigenti che offrono soluzioni solo parziali al problema, permette, per la prima volta, di affrontare in maniera omogenea il progetto e la costruzione di gallerie in qualsiasi tipo di terreno, elaborandone il progetto completo prima di iniziarne l'esecuzione. In particolare, minimizzando gli imprevisti ed eliminando le difficoltà di avanzamento che si incontravano in particolari tipi di terreno, esso consente di definire con un elevato grado di precisione, proporzionale alle conoscenze geognostiche acquisite in fase conoscitiva, i tempi e i costi esecutivi; di conseguenza consente di valutare a preventivo, in maniera attendibile, il rapporto costo/beneficio dell'opera in sotterraneo, parametro fondamentale per orientare il processo decisionale di selezione tra differenti alternative progettuali; a consuntivo poi, il maggior grado di conoscenza garantito dall'approccio basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli permette una precisa definizione dei contenuti dei costi, attraverso specifici momenti di controllo eseguiti sistematicamente durante l'esecuzione dell'opera. Questo significativo risultato, traslato in sede di pianificazione territoriale, pone finalmente le opere in sotterraneo sullo stesso piano di quelle più tradizionali in superficie.

1- GENERALITA'

Oggi, in tutto il mondo industrializzato e soprattutto nelle aree a intensa urbanizzazione, siamo di fronte all'affermazione di due esigenze contrastanti: a una pressante domanda di nuove infrastrutture, strutture e spazi vitali da utilizzare per le funzioni della vita associata, si contrappone una crescente presa di coscienza di come la loro elevata concentrazione in superficie determini un inevitabile degrado dell'ambiente naturale e della qualità della vita.

Architetti e urbanisti già da tempo hanno individuato nell'utilizzo del sottosuolo, inteso come preziosa risorsa di nuovi spazi, l'unica via percorribile per dare una soluzione definitiva a questo problema.

Tuttavia, essi si scontrano sovente nella diffidenza diffusa tra politici e amministratori verso le realizzazioni in sotterraneo, tutt'oggi ritenute vere e proprie opere d'arte, la cui realizzazione è frutto di improvvisazione, di cui non è possibile prevedere tempi e costi esecutivi.

Questa diffidenza è un retaggio del passato, quando la mancanza di adeguati strumenti d'indagine sul terreno, l'inesistenza di sistemi di consolidamento efficaci e quindi di sistemi d'attacco adatti per ogni tipo di roccia o di suolo, la rudimentale meccanizzazione degli scavi, l'impossibilità di eseguire calcolazioni complesse, oltre a rendere difficili e pericolosi i lavori di scavo imponevano praticamente di progettare l'opera sotterranea durante la sua costruzione.

Progettare una tale opera allora significava solo individuarne la collocazione plano-altimetrica e alcune sezioni tipo, mentre mezzi di scavo, interventi di

stabilizzazione e rivestimenti venivano decisi in corso d'opera, durante l'avanzamento del fronte.

Da qui scaturiva l'impossibilità di fare qualsiasi previsione su tempi e costi di realizzazione, che giustificava il timore con cui veniva considerato qualsiasi lavoro di costruzione in sotterraneo.

Al riguardo, basti pensare al caso del Traforo del Gran Sasso, la cui costruzione, iniziata poco più di vent'anni fa sulla base di un progetto che oggi chiameremmo "di fattibilità", ha richiesto 15 anni di lavoro tra difficoltà e imprevisti estremamente rilevanti, con costi che sono lievitati dagli iniziali 26 a 220 miliardi di lire circa.

Oggi, però, si può affermare che detto timore non è più giustificato e questo è ciò che ci si propone di dimostrare ricorrendo anche a qualche esempio concreto.

2 - IL PROBLEMA DELLA PIANIFICAZIONE DELLE OPERE IN SOTTERRANEO NELLE DIVERSE SITUAZIONI MORFOLOGICHE E IN QUALSIASI TIPO DI TERRENO

Nella realizzazione di opere in sotterraneo, la difficoltà di prevedere in maniera attendibile le caratteristiche geologiche e geomeccaniche dei terreni da attraversare e la mancanza di strumenti e tecniche di attacco validi per affrontare anche i terreni più difficili hanno, da sempre, rappresentato dei veri e propri punti di debolezza ai fini di una pianificazione delle opere stesse sia in termini di tempi sia in termini di costi.

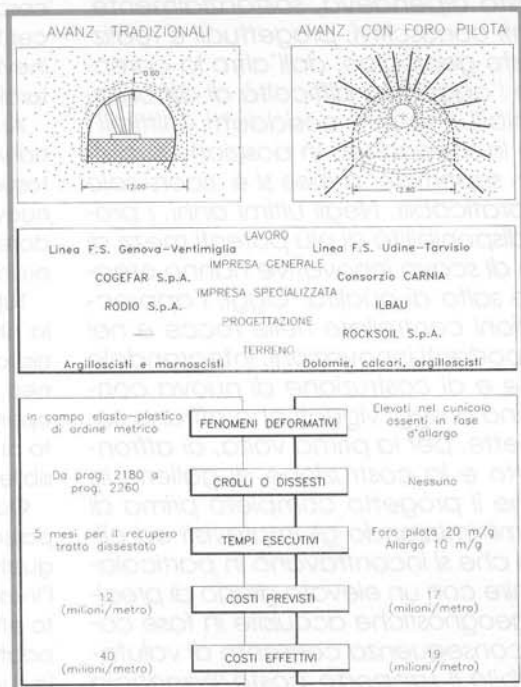
Negli ultimi dieci anni, in particolare nel nostro Paese, si sono fatti progressi importanti in fatto di tecniche geognostiche e in fatto di sistemi d'attacco e stabilizzazione validi per qualsiasi tipo di terreno, e ciò rappresenta una premessa indispensabile per elevare le costruzioni in sotterraneo al rango di una qualsiasi altra opera di ingegneria civile.

Nel campo delle nuove tecniche geognostiche, il "cunicolo pilota" - realizzato preventivamente allo scavo di piena sezione, quale sondaggio esteso lungo tutto lo sviluppo della galleria da realizzare - è stato eseguito in Italia sin dal 1984 e ha di fatto eliminato l'imprevisto geologico, permettendo di conseguire importanti vantaggi dal punto di vista programmatico, contrattuale ed economico. Il rilievo geologico-geostrutturale di dettaglio eseguibile dal suo interno, l'acquisizione sistematica

dei parametri inerenti al comportamento della fresa durante lo scavo ("Metodo RS" (1)), la verifica delle elaborazioni sui dati-fresa e la determinazione di altre caratteristiche geomeccaniche mediante prove e misurazioni in sito, permettono di effettuare una progettazione aderente alle reali condizioni incontrate dal tracciato della galleria da realizzare.

Questo modo nuovo di utilizzare il cunicolo pilota è stato impiegato largamente in questi ultimi anni in numerosi lavori di gallerie, per uno sviluppo superiore ai 100 Km. Vogliamo qui ricordare, tra le altre, la galleria "Prato Tires" sulla variante della linea ferroviaria Verona-Brennero, dove il preforo fu eseguito lungo tutti i 13 Km di lunghezza del tunnel, e la galleria "Malborghetto" sulla linea ferroviaria Udine-Tarvisio, dove, nonostante i difficili tratti attraversati, che hanno richiesto il blindaggio completo del cunicolo pilota onde evitarne la chiusura, si sono potuti rispettare in maniera soddisfacente i tempi e i costi previsti in sede di progettazione (Fig. 1).

Fig. 1 - Foro Pilota.



Nel campo delle tecniche costruttive, i "sistemi conservativi" (2) sono sistemi speciali d'attacco che, producendo azioni di precontenimento del cavo, consentono di avanzare in terreni di cattiva qualità geomeccanica e di ottenere le stesse produzioni e la stessa sicurezza con cui si avanza in terreni di

buona consistenza quali le rocce (industrializzazione degli scavi).

Ricordiamo, in particolare (Fig. 2):

- il sistema del *jet-grouting* in orizzontale, ideato per lo scavo di gallerie in terreni incoerenti o poco coerenti (prima realizzazione al mondo nel 1983 per la galleria "Campiolo" della linea ferroviaria Pontebba-Tarvisio (3));

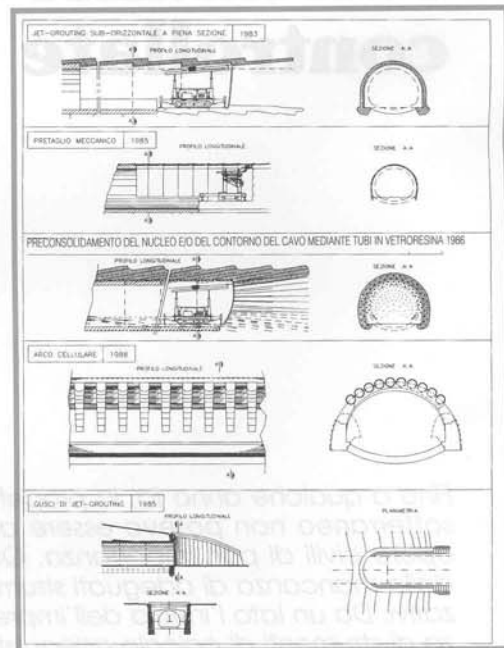


Fig. 2 - Interventi conservativi (ideati e perfezionati negli ultimi 10 anni).

- il sistema del pre-taglio meccanico a piena sezione, per l'attacco programmato di terreni coesivi o semicoesivi anche sotto falda (prima realizzazione in Italia nel 1985 su alcune gallerie della linea ferroviaria Sibari-Cosenza (4) (5));
- il sistema del pre-consolidamento del nucleo al fronte d'avanzamento e/o del contorno del cavo mediante tubi di vetroresina, per lo scavo di terreni suscettibili di estrusione (prima realizzazione al mondo nel 1988 per le gallerie ferroviarie "Talleto" e "Caprenne" nel tratto d'interconnessione tra la nuova linea "Direttissima" Roma-Firenze e quella vecchia all'altezza di Monteverchi (6) (7));
- il sistema dell'"Arco Cellulare", per la realizzazione di grandi cavità corticali in area urbana entro terreni incoerenti o poco coerenti e sotto falda praticamente senza causare cedimenti in superficie (prima realizzazione al mondo nel 1988 per la stazione "Venezia" del Passante ferroviario di Milano (8));
- il sistema del *jet-grouting* in verticale, per la realizzazione di opere d'imbocco

in versanti detritici senza pregiudicarne la stabilità (prima realizzazione al mondo nel 1985 per l'imbocco lato Pontebba della galleria "San Leopoldo" della linea ferroviaria Pontebba-Tarvisio (9)).

Sarebbe eccessivamente lungo descrivere nel dettaglio questi metodi. La Fig. 3, elaborata su dati di consuntivo, riporta uno dei tanti esempi di applicazione di sistemi conservativi raffrontato

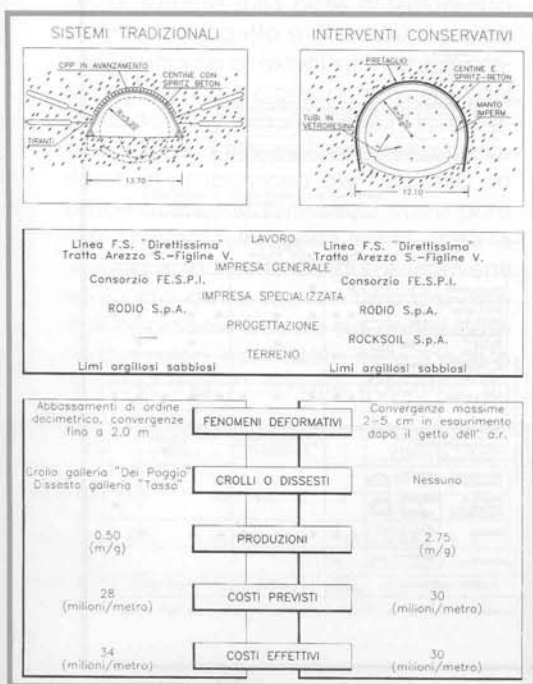


Fig. 3 - Pretaglio meccanico e preconsolidato del nucleo mediante tubi in vetroresina.

all'impiego, nella stessa galleria e in condizioni geomeccaniche equivalenti, di sistemi di tipo tradizionale.

Già qualche anno fa si disponeva, quindi, di tutti gli strumenti necessari sia per avere una adeguata conoscenza dei terreni prima di iniziare i lavori di scavo, sia per affrontare con successo qualsiasi tipo d'ammasso.

Sarebbe stato possibile fin da allora, dunque, separare il momento della progettazione da quello della costruzione, premessa indispensabile per la pianificazione delle opere in sotterraneo e l'industrializzazione degli scavi.

Nonostante ciò, queste continuavano a essere ritenute "diverse" dalle altre costruzioni civili: estremamente difficili da costruire e impossibili da progettare compiutamente prima di iniziare lo scavo.

Questa convinzione, non più giustificata, si perpetua perché Committenze e

Costruttori, spesso mal consigliati dai propri consulenti e mal guidati da normative e capitolati ormai non adeguati, non applicano correttamente le nuove tecnologie.

Carenze comuni a dette normative e detti capitolati sono:

- il riferimento a sistemi di classificazione geomeccanica incompleti e parziali (Rabcewicz, Barton, Bieniawski), validi, al più, solo per ammassi rocciosi di buone caratteristiche geomeccaniche (10);
- mancanza di precise linee guida sul corretto impiego delle moderne metodologie di diagnosi e di terapia nella progettazione di opere in sotterraneo, per cui non è possibile fornire le necessarie garanzie sotto il profilo tecnico;
- carenza di indicazioni, ovvero di prescrizioni precise sulle modalità di applicazione ed esecuzione delle opere;
- la più completa inesistenza di sistemi di controllo di qualità dei lavori eseguiti.

Tutto ciò si traduce in ampi margini di discrezionalità per l'adeguamento del progetto in corso d'opera (previsti necessariamente dagli stessi capitolati d'appalto per supplire alle suddette inevitabili carenze), con conseguenti frequenti contenziosi tra Amministrazione e Impresa costruttrice per la notevole lievitazione dei costi che le modifiche progettuali e gli aggiustamenti costruttivi comportano.

La difficoltà di gestione tecnica dell'appalto per i motivi già detti, si ripercuote in maniera evidente anche sugli aspetti economici.

Come si evince dalla Fig. 4, costruita sulla base di numerosi dati di consuntivo riguardanti in particolare l'applicazione della classificazione di Rabcewicz, le carenze insite in detto sistema di classificazione conducono alla concentrazione di oltre il 90% della lunghezza delle gallerie scavate in sole tre classi di roccia, a cui corrispondono costi a metro lineare molto diversi (il compenso per una sezione in classe V^a è anche tre volte superiore a quello per una sezione in classe III). Il che determina una curva dei costi unitari assai ripida, a fronte della quale l'Impresa costruttrice, profittando delle vaghe indicazioni fornite da Rabcewicz, ha buon gioco, nel contenzioso con l'Amministrazione, ad attribuire allo scavo classi più scadenti, rispetto a quelle preventivate.

Sono questi risultati negativi, che vanificando i progressi tecnici ottenuti in fatto

di tecnologie d'indagine e sistemi d'attacco, hanno perpetuato sino a oggi, tra gli addetti ai lavori, la convinzione errata circa l'impossibilità di costruire in sotterraneo con gli stessi standard di qualità e di sicurezza delle altre opere civili.

Si impone quindi una completa revisione della tradizionale impostazione contrattuale e ciò presuppone la messa a punto di un metodo progettuale e costruttivo più adeguato, applicabile a tutti i tipi di terreno, che affronti le problematiche delle opere in sotterraneo in chiave moderna, capace cioè di considerare e di valorizzare in tutta la propria potenzialità ogni tecnologia, attuale e futura.

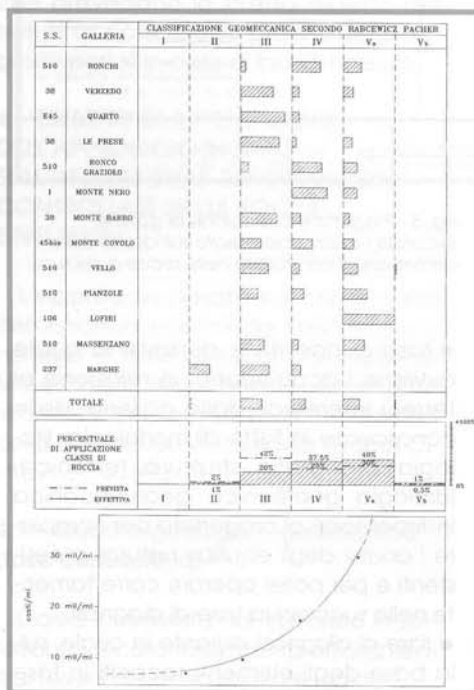
Per rispondere a questa esigenza è stato concepito l'approccio basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli (11).

3 - L'APPROCCIO BASATO SULL'ANALISI DELLE DEFORMAZIONI CONTROLLATE NELLE ROCCE E NEI SUOLI

Tra le caratteristiche peculiari dell'approccio basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli sono di particolare importanza:

- il riferimento a un nuovo tipo di classificazione delle opere in sotterraneo che, facendo riferimento a un unico parametro comune a tutti gli scavi,

Fig. 4 - Classificazione secondo Rabcewicz - Pacher.



quale il comportamento tenso-deformativo del nucleo-fronte d'avanzamento, è in grado, con l'introduzione del concetto di precontenimento del cavo e dei "sistemi conservativi", di dare una risposta a tutte le situazioni geologico-geomeccaniche esistenti;

- la distinzione netta tra momento della progettazione e momento della costruzione di un'opera in sotterraneo, fondamentale per programmare tempi e costi esecutivi, in quanto conduce a una corretta impostazione del manuale di progettazione, del capitolato di costruzione, del manuale di controllo qualità.

Il momento della progettazione si articola in (Fig. 5):

MOMENTO	FASE	ARGOMENTO
DELLA PROGETTAZIONE	- CONOSCITIVA	- analisi degli equilibri naturali preesistenti;
	- DIAGNOSI	- studio e previsione dei fenomeni deformativi(*)
	- TERAPIA	- regimazione dei fenomeni deformativi(*) in termini di scelte dei sistemi di stabilizzazione;
DELLA COSTRUZIONE	- OPERATIVA	- applicazione degli strumenti di stabilizzazione per la regimazione dei fenomeni deformativi(*)
	- VERIFICA IN CORSO D'OPERA	- controllo e lettura dei fenomeni deformativi(*) come risposta dell'A.R. durante l'avanzamento degli scavi (rilevamento estrusione del fronte e convergenze superficiali e profonde del cavo)
	- MESSA A PUNTO DEL PROGETTO	- interpretazione dei fenomeni deformativi(*) - bilanciamento dei sistemi di stabilizzazione tra il fronte ed il perimetro di scavo

(*) Fenomeni deformativi in termini di estrusione del fronte e convergenze superficiali e profonde della cavità

Fig. 5 - Progetto e costruzione di gallerie secondo l'approccio basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli.

- **fase conoscitiva:** durante la quale avviene l'acquisizione, in relazione ai terreni interessati dalla galleria, delle conoscenze in fatto di morfologia, litologia, stratigrafia, struttura, tettonica, idrologia, geotecnica, geomeccanica indispensabili al progettista per compiere l'analisi degli equilibri naturali preesistenti e per poter operare correttamente nella successiva fase di diagnosi;
- **fase di diagnosi:** durante la quale, sulla base degli elementi raccolti in fase

conoscitiva, il progettista è chiamato a fare, per via teorica, previsioni attendibili riguardo alla risposta deformativa del mezzo all'azione dello scavo. Esse sono intese in termini di genesi, localizzazione, evoluzione ed entità dei probabili fenomeni deformativi che, in assenza di interventi di stabilizzazione, si innescherebbero al fronte d'avanzamento e di conseguenza nella fascia di terreno al contorno del cavo. Dall'analisi della risposta deformativa del nucleo-fronte d'avanzamento e del cavo egli deduce quale sarà il comportamento della futura galleria, per giungere, infine, a una suddivisione della stessa in tratte a comportamento deformativo omogeneo nell'ambito di tre categorie di comportamento fondamentali (Categoria A: galleria a fronte stabile, Categoria B: galleria a fronte stabile a breve termine, Categoria C: galleria a fronte instabile);

- **fase di terapia:** durante la quale, a seguito delle previsioni fatte in fase di diagnosi, il progettista opera la scelta del tipo di azione da esercitare (precontenimento o semplice contenimento) per ottenere la completa stabilizzazione della galleria e la perfezione in termini di sistemi, cadenze, fasi di scavo e soprattutto di strumenti di stabilizzazione e di bilanciamento degli stessi tra il fronte ed il perimetro della stessa (composizione delle sezioni tipo).

Il momento della costruzione prevede:

- **fase operativa:** durante la quale si realizza la messa in opera degli strumenti di stabilizzazione secondo le previsioni progettuali, adattati alla reale risposta dell'ammasso e controllati secondo prestabiliti piani di controllo qualità;
 - **fase di verifica:** nella quale, durante la costruzione della galleria, si verifica, attraverso un'adeguata campagna di misure di estrusione e convergenza superficiali e profonde, la correttezza delle previsioni fatte in fase di diagnosi, per la messa a punto del progetto in fase operativa. In fase di esercizio della galleria si esegue un monitoraggio sistematico per controllarne la sicurezza in tutto l'arco della sua vita.
- Seguendo questa impostazione concettuale e operativa, l'approccio basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli, mettendo a frutto le evidenze di uno studio approfondito della dinamica evolutiva dello scavo, offre in pratica ai progettisti

una semplice guida per classificare l'opera in sotterraneo nell'ambito di tre categorie di comportamento fondamentali e giungere a una suddivisione della stessa in tratte a comportamento deformativo omogeneo. A ciascuna di queste tratte vengono poi associate sezioni tipo che prevedono sistemi di attacco e opere di stabilizzazione di prima e di seconda fase di cui sono definiti i costi e i tempi esecutivi (Fig. 6).

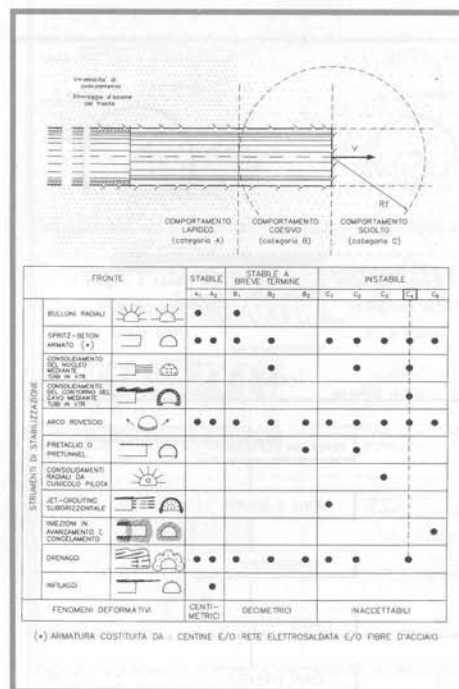


Fig. 6 - Criteri di scelta degli strumenti di stabilizzazione per la composizione delle sezioni tipo secondo l'approccio basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli.

L'introduzione dell'approccio basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli nei manuali e nei capitolati presenta allora, come immediata e intuitiva conseguenza, due aspetti principali:

- la **valorizzazione del momento progettuale**, in quanto il progettista è in grado di fornire le soluzioni tecniche adeguate prima dell'affidamento dei lavori, che è anche uno strumento di controllo efficace e di grande aiuto nella gestione dell'appalto in corso d'opera e del successivo controllo di qualità;
- la **programmazione economica delle opere in sotterraneo**, che risulta assai più aderente alla realtà e affetta da percentuali d'errore molto modeste.

Si rende così per la prima volta possibile una attendibile programmazione dei tempi e dei costi esecutivi.

È d'altra parte giusto che un'opera ben progettata, correttamente costruita e seriamente controllata sia equamente pagata.

In tema di elenco prezzi, tra le diverse ipotesi di lavoro quella più percorribile per semplicità di gestione dell'appalto, può essere la seguente: compenso unitario per metro lineare di galleria completa, sempre sulla base di sezioni-tipo definite in progetto e di analisi di prezzo reali, e stralcio di alcuni interventi di preconsolidamento e precontenimento del cavo da compensare a misura con i relativi prezzi d'elenco opportunamente ridotti in proporzione alle quantità in esubero, fino ad arrivare al costo puro dell'intervento. In questo modo, data la non elevata incidenza di tali interventi sul costo delle sezioni tipo previste dall'approccio basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli (Fig. 7), rimane garantito, sin

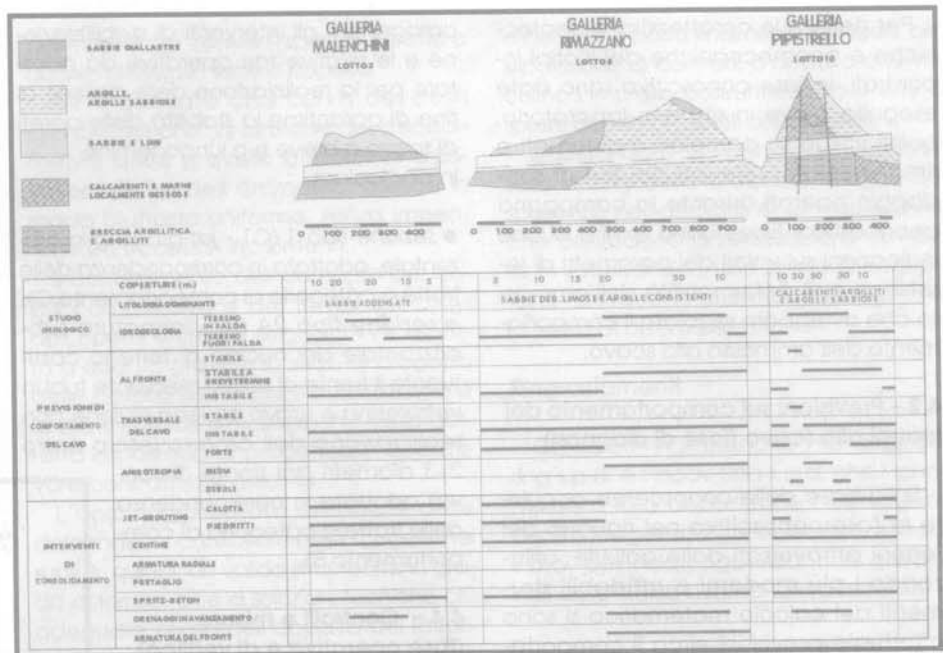


Fig. 8 - Applicazione dell'approccio basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli alle gallerie dell'Autostrada Livorno - Civitavecchia nella tratta Livorno - Cecina.

Va infine osservato che se eleviamo a valore le sezioni tipo previste dall'approccio basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli con i prezzi commerciali, si ricava una curva dei costi unitari piuttosto distesa. Questo è una conseguenza dell'applicabilità di detto approccio in qualsiasi tipo di terreno e del fatto che in esso sono contemplate tutte le tecnologie operative sino a oggi impiegate. In Fig. 7 è riportata detta curva, valutata su circa 100 Km di gallerie scavate nelle più svariate condizioni d'ammasso.

L'uniforme pendenza della curva rappresentativa dei costi, equiparando dal punto di vista remunerativo le diverse categorie di comportamento, limita, di fatto, la convenienza per l'Impresa ad adottare le sezioni tipo di costo unitario maggiore. Di conseguenza, si perviene a una ripartizione percentuale delle sezioni tipo effettivamente impiegate molto più estesa di quella normalmente ottenuta con l'impiego delle normative tradizionali, basate sulle classificazioni di Rabcewicz, Barton, Bieniawski, ecc.

L'introduzione di:

- una normativa per la progettazione e la costruzione delle opere in sotterraneo universalmente valida, che valorizzi il momento progettuale, prepedentico alla costruzione, e la sua prerogativa di fare previsioni attendibili sui tempi e costi di costruzione;

- un capitolato d'appalto che comprenda tutte le più moderne tecnologie costruttive e sia facilmente aggiornabile per le future;
- un sistema di controllo di qualità di tutti gli interventi strutturali previsti in progetto e realizzati;
- un elenco prezzi che compensi il giusto valore delle opere secondo parametri reali;

renderà finalmente possibile e auspicabile la stesura di contratti d'appalto che prevedano lo stretto rispetto dei tempi di costruzione previsti ed adeguate penali in caso di inadempienze.

4 - ESEMPIO DI APPLICAZIONE DELL'APPROCCIO BASATO SULL'ANALISI DELLE DEFORMAZIONI CONTROLLATE NELLE ROCCE E NEI SUOLI

L'approccio basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli è stato applicato alle gallerie Malenchini e Rimazzano, recentemente realizzate per la tratta Livorno-Cecina della costruenda Autostrada Livorno-Civitavecchia (Fig. 8).

4.1 - Quadro geologico-geotecnico (fase conoscitiva)

L'area interessata dal tracciato in sotterraneo è caratterizzata da affioramenti di terreni di natura sciolta e lapidea.

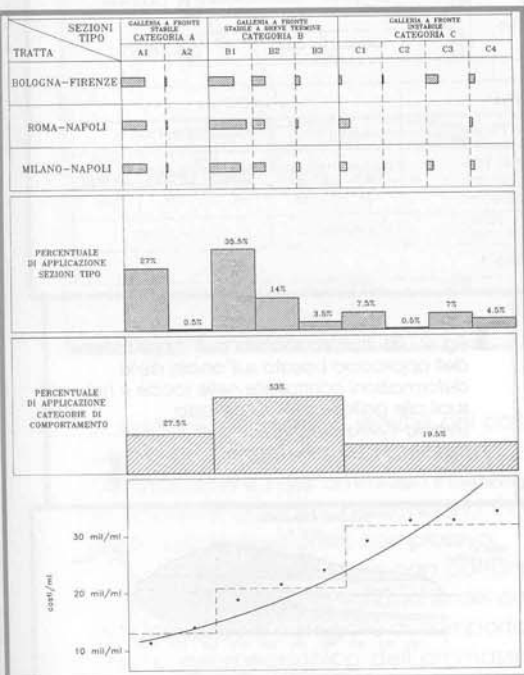


Fig. 7 - Applicazione dell'approccio basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli, (es. progetto linee ferroviarie ad alta velocità).

dal momento dell'appalto, il rispetto di gran parte degli importi previsti, riducendo di fatto gli esuberanti, relativi ai soli preconsolidamenti e precontenimenti del cavo, che possono incidere solo per pochi punti di percentuale sull'importo globale dell'opera.

Per definire le caratteristiche geotecniche e geomeccaniche dei litotipi incontrati, in fase conoscitiva sono state eseguite prove in situ e in laboratorio, quest'ultime su campioni indisturbati e rimaneggiati prelevati dai fori di sondaggio operati durante la campagna geognostica. Esse hanno fornito buone indicazioni sui valori dei parametri di resistenza e di deformabilità dell'ammasso che avrebbero regolato il comportamento dell'ammasso allo scavo.

4.2 - Previsioni sul comportamento dei terreni allo scavo (fase di diagnosi)

Sulla base delle conoscenze acquisite in fase conoscitiva nei riguardi dei terreni attraversati dalle gallerie, utilizzando i più moderni e affidabili strumenti del calcolo matematico si sono effettuate previsioni circa il comportamento dell'ammasso allo scavo e, in rapporto a queste, si sono definiti adatti interventi di stabilizzazione e precisi schemi di avanzamento.

Le previsioni, strettamente connesse allo studio tenso-deformativo instauratosi nell'ammasso al contorno della galleria in seguito alle operazioni di scavo, hanno portato alla seguente suddivisione del tracciato sotterraneo in tratte a comportamento geomeccanico omogeneo:

- a) tratte corticali e a medie coperture (max 20-25 m) in presenza di materiale incoerente o debolmente coerente, per le quali erano previsti importanti fenomeni di instabilità del fronte d'avanzamento (comportamento della galleria a fronte instabile, categoria C);
- b) tratte corticali e a medie coperture (max 25-35 m) in presenza di materiale coesivo di natura argillosa, dove i fenomeni di instabilità del nucleo di terreno al fronte d'avanzamento erano riconducibili al comportamento elasto-plastico del materiale per effetto della decompressione subita e per effetto del rigonfiamento per alterazione chimico-fisica dello stesso (comportamento della galleria a fronte stabile a breve termine, categoria B).

4.3 - Interventi di stabilizzazione (fase di terapia)

Sulla scorta delle precedenti considerazioni si sono definiti, per ciascuna tratta a comportamento geomeccanico

omogeneo, gli interventi di stabilizzazione e le relative fasi operative da adottare per la realizzazione delle gallerie al fine di garantirne la stabilità delle pareti di scavo a breve e a lungo termine. In particolare:

- *sezione tipo 1 (C1 - jet-grouting in orizzontale, adottata in corrispondenza delle tratte a categoria di comportamento C);*
- *sezione tipo 2A (B2 - armatura suborizzontale del nucleo di terreno costituente il fronte di scavo mediante tubi in vetroresina e scavo a piena sezione con realizzazione dell'arco rovescio entro 2+3 diametri dal fronte di scavo) adottata in corrispondenza delle tratte a categoria di comportamento B).*

4.4 - Controlli e misure (fase operativa e di verifica)

Durante la costruzione di entrambe le gallerie, tutte le operazioni di scavo e avanzamento sono state attentamente controllate. In particolare sono state eseguite misure sistematiche di convergenza e rilievi topografici per il controllo degli spostamenti del rivestimento di prima fase. Per la galleria Rimazzano sono state eseguite anche misure estensimetriche dalla superficie, al fine di valutare le deformazioni del terreno all'avvicinarsi e al passaggio del fronte d'avanzamento.

I risultati delle misure, letti in tempo reale, sono serviti inizialmente per tarare gli schemi progettuali e, successivamente, per confermare la validità delle scelte tecniche adottate.

La Direzione Lavori ha sempre controllato accuratamente tutte le lavorazioni, se non con criteri tipici dei sistemi di controllo qualità, con metodi però molto simili a questi.

4.5 - Analisi economica

Dati di preventivo

A conclusione della progettazione condotta nelle fasi precedenti è stata effettuata una pianificazione economica ed esecutiva dell'opera.

In particolare, sono stati ipotizzati tempi di realizzazione pari a 14 mesi e a 20 mesi con co-

sti complessivi pari a 23.530.000.000 lire ed a 39.952.081.070 lire, rispettivamente per le gallerie Malenchini e Rimazzano.

Considerazioni di consuntivo

Le suddette previsioni, confrontate al termine dei lavori con i costi e i tempi esecutivi di consuntivo, mostrano una sottostima di pochi punti in percentuale. In particolare, per quanto riguarda i costi di costruzione, nella Fig. 9 sono posti a confronto i costi complessivi di ciascuna galleria.

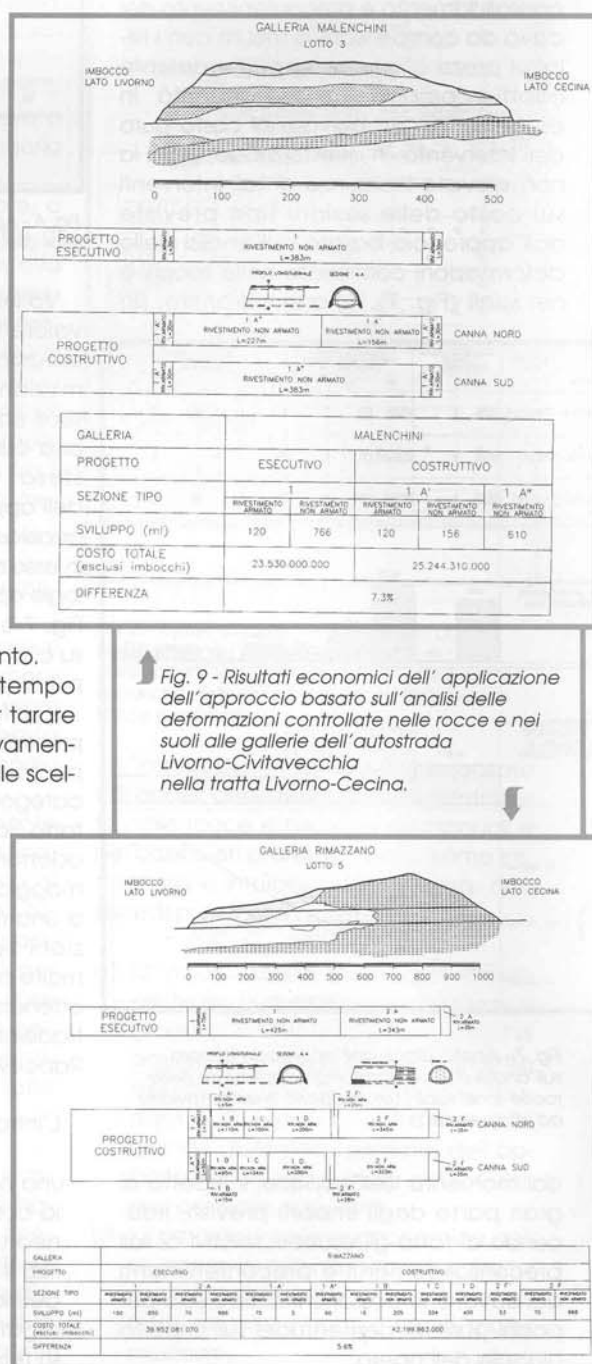


Fig. 9 - Risultati economici dell'applicazione dell'approccio basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli alle gallerie dell'autostrada Livorno-Civitavecchia nella tratta Livorno-Cecina.

L'incremento del costo complessivo dell'opera rispetto a quello preventivo, è stato pari a ~7.3% nel caso della galleria Malenchini e pari a ~5.6% nel caso della galleria Rimazzano.

Analogo aumento (5 + 7%) è stato rilevato per quanto concerne i tempi di realizzazione, a dimostrazione che i due parametri sono strettamente legati l'uno all'altro.

Dall'analisi delle tabelle economiche riassuntive e dal diagramma dei costi unitari in Fig. 10, risulta evidente che questi incrementi sono da imputare totalmente ai lavori di consolidamento.

Le operazioni di scavo e di rivestimento, infatti, non portano, rispetto alla fase

costi relativi agli interventi speciali, rispetto a quanto previsto in sede d'appalto.

Ne è derivata una curva dei costi complessivi che, in funzione del decadimento delle previste condizioni geomeccaniche dell'ammasso, cresce in modo piuttosto uniforme, senza impennate ed eccessivi incrementi.

Il contenimento dell'aumento del costo complessivo e dei tempi esecutivi dell'opera entro un esiguo 5 + 7% rispetto a quanto previsto in sede di progetto delle gallerie Malenchini e Rimazzano è la più evidente dimostrazione della corretta impostazione progettuale, operativa e contrattuale assunta.

L'approccio basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli è, quindi, un valido strumento, in grado di fornire, oltre a soluzioni tecniche più adeguate prima dell'appalto dei lavori, anche una programmazione dei costi unitari assai aderente alla realtà ed affetta da percentuali d'errore molto modeste.

5 - CONCLUSIONI

Il buon risultato ottenuto con l'applicazione dell'approccio basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli nella realizzazione di tunnel in terreni scadenti come quelli attraversati dalle gallerie Malenchini e Rimazzano dimostra come oggi, contrariamente a qualche anno fa, si abbia la possibilità, se realmente lo si desidera, di fornire progetti "chiavi in mano" anche nel caso di opere legate alla morfologia del terreno, alla sua geologia e alle condizioni idrogeologiche, come quelle in sotterraneo.

Questo ha indotto recentemente Anas, Autostrade s.p.a. e Italferr s.p.a. a rivedere le proprie normative, i propri capitolati e gli elenchi prezzi per la progettazione e la costruzione delle opere in sotterraneo e a sostituirli con altri nuovi e più adeguati.

In questa ottica, l'approccio basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli: valorizzando la figura del progettista; introducendo nei capitolati le nuove tecnologie; inducendo all'adozione di elenchi prezzi congrui, che compensino il giusto valore delle opere secondo parametri reali; garantendo alle Amministrazioni gli strumenti necessari per programmare e controllare efficacemente lo svolgimento dei lavori con sistemi di controllo qualità, si propone come riferimento. Dall'attuazione dei principi introdotti per la prima volta dall'approccio basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce

e nei suoli si potrà finalmente giungere alla stipulazione di contratti d'appalto che vincolino l'Impresa costruttrice allo stretto rispetto dei tempi previsti dal progetto.

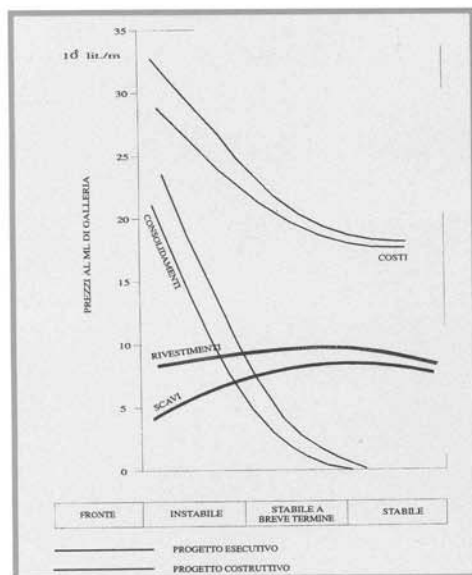
Questo darà un contributo decisivo sulla strada della chiarezza e della trasparenza nell'appalto di tutti quei lavori che prevedono la realizzazione di opere in sotterraneo, nello spirito e negli intenti dei recenti orientamenti legislativi in tema di opere pubbliche.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano la Fiat Engineering s.p.a. e l'Iricav Uno s.p.a. che hanno messo a loro disposizione i dati riguardanti il Progetto "Alta Velocità" e la Sat s.p.a. per i dati riguardanti le gallerie dell'autostrada Livorno-Civitavecchia.

Pietro Lunardi-Renzo Bindi
Alessandro Focaracci

Fig. 10 - Costi unitari delle gallerie malenchini e rimazzano



progettuale, incrementi sensibili dei costi unitari e, al variare della categoria di comportamento dell'ammasso interessato dai lavori di scavo, determinano modeste variazioni sul costo complessivo.

Se le fasi di rivestimento non portano praticamente alcuna variazione dei costi per le diverse categorie di comportamento geomeccanico dell'ammasso, le operazioni di scavo comportano costi unitari decrescenti quanto più i terreni sono scadenti (e quindi più facili da scavare), mentre aumentano le difficoltà di realizzazione dell'opera.

In queste condizioni è preponderante l'onere degli interventi speciali di contenimento e di precontenimento del cavo, i cui costi incidono largamente sul costo complessivo dell'opera. Ciò nonostante, la corretta progettazione esecutiva ha reso possibile contenere in maniera sensibile l'errore in percentuale dei

BIBLIOGRAFIA

- (1) LUNARDI P. - *Lo scavo delle gallerie mediante cunicolo pilota. Atti del primo ciclo di conferenze di meccanica e ingegneria delle rocce*, Politecnico di Torino - Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Torino, IV, 1.47, 1986.
- (2) FOCARACCI A. - *Interventi conservativi: aspetti riguardanti l'impresa specializzata. Convegno Internazionale su "Il consolidamento del suolo e delle rocce nelle realizzazioni in sotterraneo"*, Milano, II, 531, 545, 1991.
- (3) LUNARDI P. - *Il consolidamento del terreno mediante jet-grouting. Quarry and Construction*, Parma, 3, 1992.
- (4) LUNARDI P., BINDI R., FOCARACCI A. - *Nouvelles orientations pour le project et la construction des tunnels dans des terrains meubles. Etudes et experiences sur le preconfinement de la cavité et la preconsolidation du noyau au front. Colloquio Internazionale "Tunnels et micro-tunnels en terrain meuble"*, Parigi, 1989.
- (5) ARSENA F.P. - FOCARACCI A., LUNARDI P., VOLPE A. - *La prima applicazione in Italia del pretaglio meccanico. Convegno Internazionale su "Il consolidamento del suolo e delle rocce nelle realizzazioni in sotterraneo"*, Milano, II, 549, 556, 1991.
- (6) LUNARDI P. - *Aspetti progettuali e costruttivi nella realizzazione di gallerie in situazioni difficili: interventi di precontenimento del cavo. Convegno Internazionale su "Il consolidamento del suolo e delle rocce nelle realizzazioni in sotterraneo"*, Milano, II, 567, 580, 1991.
- (7) LUNARDI P., FOCARACCI A., GIORGI P., PAPACELLA A. - *Tunnel face reinforcement in soft ground design and controls during excavation. Convegno Internazionale su "Towards New Worlds in Tunnelling"*, Acapulco, II, 897, 908, 1992.
- (8) LUNARDI P. - *Un nouveau systeme constructif pour la realisation de tunnel de grande portee dans terrains non coherents: l'"Arc Cellulaire". Colloquio Internazionale "Les fondations des grands ouvrages"*, Parigi, I, 227, 237, 1990.
- (9) LUNARDI P. - *L'impiego del jet-grouting per l'attacco di gallerie in terreni soffici. Convegno Internazionale su "Il consolidamento del suolo e delle rocce nelle realizzazioni in sotterraneo"*, Milano, II, 227, 234, 1991.
- (10) BIENIAWSKI Z.T. - *Rock mass classification as a design aid in tunnelling. Tunnels & Tunnelling*, 7, 1988.
- (11) LUNARDI P. - *Prestagio e precontenimento. Quarry and Construction*, Parma, 3, 1994.