

IL PROGETTO DELLO SCAVO NELLA REALIZZAZIONE DI OPERE IN SOTTERRANEO

Prof. Ing. Pietro Lunardi (Studio di progettazione Lunardi, Milano)
Dott. Ing. Alessandro Focaracci (Rocksoil S.p.A., Milano)

1. Generalità

È noto che mentre la costruzione di un'opera in superficie s'identifica nell'assemblaggio dei materiali (mattoni, cemento, inerti, acciaio, ecc.) che ne costituiranno la struttura in elevazione, la costruzione di un'opera in sotterraneo s'identifica nell'asportazione del terreno, operazione che producendo l'avanzamento del fronte genera la cavità. Essa avviene durante la fase detta di scavo o abbattimento del terreno e turba inevitabilmente gli equilibri naturali preesistenti nell'ammasso, producendo al suo interno mutamenti di carattere tensionale, geomeccanico e idrogeologico (impatto dello scavo sul mezzo).

Dal punto di vista tensionale, il campo originario di tensioni, uniformemente distribuite nel volume di terreno interessato, viene deviato all'esterno della cavità in avanzamento (canalizzazione delle tensioni), con la conseguente formazione di zone di sovrasollecitazione in corrispondenza delle sue pareti.

Dal punto di vista geomeccanico, se il materiale, in funzione delle proprie caratteristiche di resistenza e deformabilità, viene sovrasollecitato in campo elastico, si produce un fenomeno di “serraggio” delle sue fratture e discontinuità, che si traduce in un incremento di resistenza al taglio. La canalizzazione delle tensioni, allora, può instaurarsi vicino al profilo di scavo, assicurando eccellenti condizioni di stabilità sia breve sia a lungo termine. Se, invece, lo stesso materiale viene sovrasollecitato in campo elasto-plastico, il terreno al contorno del profilo di scavo subisce un fenomeno di plasticizzazione, che, com'è noto, dà luogo ad una significativa perdita di resistenza. Il fenomeno, diffondendosi progressivamente verso l'interno dell'ammasso, determina l'allontanamento della canalizzazione delle tensioni (“effetto arco”) dal contorno dello scavo. Le condizioni di stabilità della galleria varieranno di conseguenza, nel senso che queste saranno tanto più precarie quanto più il fenomeno di plasticizzazione è esteso.

Dal punto di vista idrogeologico, sotto falda la piezometrica viene drasticamente abbattuta, con il conseguente innesco di moti di filtrazione verso la galleria in costruzione, che se non opportunamente regimati possono dar luogo a fenomeni di trascinarsi di materiale o sifonamento assai pericolosi per l'esistenza stessa della cavità.



Foto. 1: Galleria Tasso (linea ferroviaria A.V. tra Firenze e Arezzo): vista del fronte durante lo scavo a mezza sezione.



Foto. 2: Galleria Tasso (linea ferroviaria A.V. tra Firenze e Arezzo): collasso della cavità a seguito del crollo del fronte avvenuto durante lo scavo a mezza sezione.



Foto. 3: Galleria Tasso (linea ferroviaria A.V. tra Firenze e Arezzo): vista del fronte durante lo scavo a piena sezione, nelle stesse condizioni tenso-deformative delle foto 1 e 2, previo consolidamento del nucleo d'avanzamento con chiodi tubolari di vetroresina (approccio A.DE.CO.-RS). Adottando una corretta progettazione dello scavo si ottenne una produzione regolare media di circa 2 m/g.

L'importanza dei mutamenti provocati dallo scavo d'avanzamento sugli equilibri naturali preesistenti costituisce il disturbo (impatto) prodotto dallo scavo nel terreno e, per quanto visto, determina la stabilità nel tempo dell'effetto arco che vi s'instaura. L'importanza dei mutamenti e quindi l'impatto dello scavo sul mezzo dipendono, è evidente, dalle modalità con cui viene compiuta l'operazione di asportazione o abbattimento del terreno e in particolare dalla maggiore o minore gradualità di passaggio, dai vecchi ai nuovi equilibri, che si riesce a conseguire.

Il modo di condurre lo scavo di una galleria determina dunque la buona salute, a breve e a lungo termine, della stessa e delle eventuali preesistenze limitrofe.

Poiché, d'altra parte, la stabilità della galleria e delle preesistenze è il principale obiettivo del progettista di opere in sotterraneo, ne consegue che è suo compito rendere minimo l'impatto dello scavo, sia in termini tensionali, sia in termini geomeccanici e idrologici.

Secondo importante obiettivo del progettista, dopo la stabilità, è la produzione, cioè la velocità con cui si produce l'avanzamento del fronte. Essa risulterà tanto più soddisfacente quanto più egli saprà assicurare:

- eccellenti condizioni di sicurezza al cantiere, soprattutto in prossimità del fronte;
- ampi spazi di manovra ai macchinari e alle maestranze;
- operazioni d'avanzamento industrializzate.

Si tratta, com'è evidente, di cose che si possono garantire solo attraverso una preventiva, accurata progettazione del ciclo d'avanzamento, cioè delle modalità con cui si produrrà l'avanzamento del fronte.

A questo proposito si può tranquillamente affermare che per ogni galleria esiste una produzione massima idealmente ottenibile, funzione della sua geometria, della situazione geologica, geoidrologica, tensionale, ecc. in cui è inserita e delle tecnologie disponibili al momento dello scavo. Affrontare

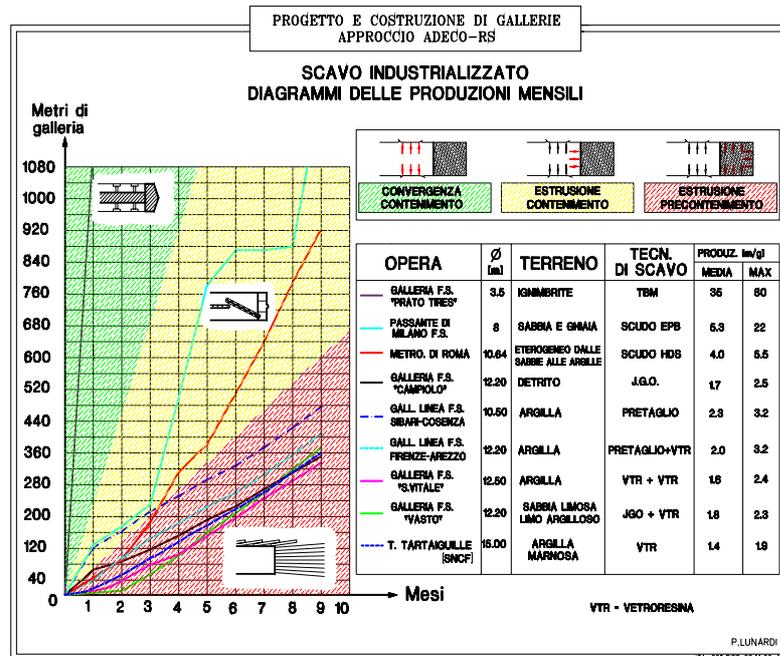


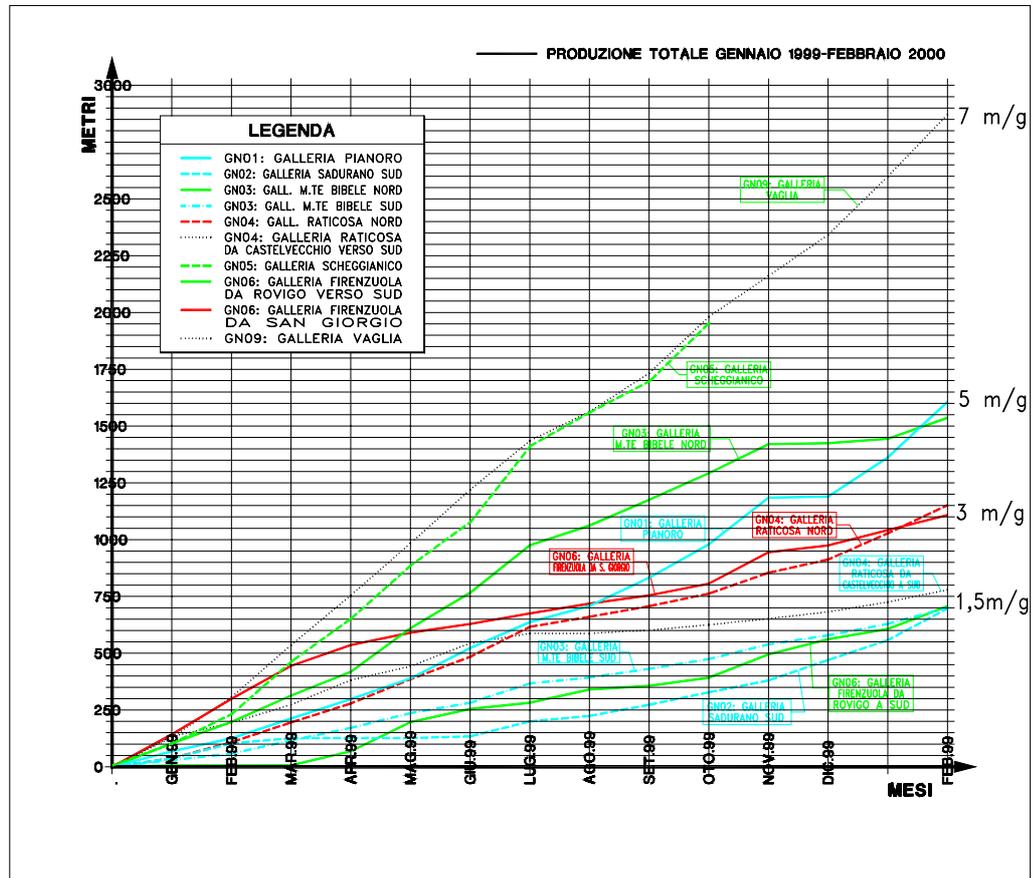
Fig. 1: Produzioni mensili ottenute nello scavo di gallerie adottando i criteri di progettazione e costruzione dell'approccio A.DE.CO.-RS.

quest'ultimo correttamente significa conseguire produzioni vicine a quella ideale massima possibile; affrontarlo scorrettamente, magari pensando di poter addomesticare ogni situazione ai mezzi posseduti dall'Impresa e non viceversa, significa quasi sempre lavorare in antieconomia, e nei casi peggiori il crollo dello scavo e il fallimento del cantiere (foto 1, 2 e 3). Vale la pena ricordare che negli ultimi quindici anni in Italia si sono fatti grandi progressi in fatto di sicurezza e industrializzazione degli scavi. La fig. 1, che riunisce i diagrammi delle produzioni ottenute durante lo scavo di gallerie progettate e realizzate in Italia utilizzando, nelle più diverse situazioni geologiche e tensionali, l'innovativo approccio A.DE.CO.-RS [4], evidenzia non solo l'elevata velocità media d'avanzamento raggiunta in relazione al tipo di terreni di volta in volta attraversati, ma soprattutto un'esemplare linearità di produzioni, indice di una costruzione di tipo industriale, avvenuta con cadenze regolari e senza intoppi. Analoghi risultati, utilizzando il medesimo approccio, si stanno ottenendo nello scavo delle gallerie per la nuova linea ferroviaria ad alta velocità tra Bologna e Firenze (fig. 2).

Allora, se è vero che il modo di condurre lo scavo di una galleria determina non solo le condizioni di stabilità a breve e a lungo termine della stessa e delle eventuali preesistenze limitrofe, ma anche il valore e la linearità delle produzioni ottenibili, entrambi importanti obiettivi del progettista di opere in sotterraneo, ne consegue che lo scavo e le modalità con cui questo viene condotto sono elementi primari di progettazione e devono far parte integrante del progetto di qualsiasi galleria.

SISTEMA ALTA VELOCITA' • LINEA MILANO-NAPOLI • TRATTA BOLOGNA-FIRENZE

SCHEMA PRODUZIONE TOTALE GEN 1999-FEB 2000



| | | GEN | FEB | MAR | APR | MAG | GIU | LUG | AGO | SET | OTT | NOV | DIC | GEN | FEB |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| GN01: GALLERIA PIANORO | B0 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 81% | 87% | 100% | 85% | 91% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| | B2 | - | - | - | - | - | 19% | 13% | - | 15% | 9% | - | - | - | - |
| GN02: GALLERIA SADURANO SUD | Ap | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 100% | 100% |
| | B0 | 100% | 100% | 100% | - | - | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | - | - | - |
| GN03: GALLERIA M.TE BIBELE NORD | Ab | - | - | - | 23% | 100% | 74% | 65% | 100% | - | - | - | - | - | - |
| | Ac | 100% | 100% | 100% | 77% | - | 26% | 35% | - | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| GN03: GALLERIA M.TE BIBELE SUD | B0 | 45% | - | 73% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 77% | 100% | - | - | - |
| | B2 | 55% | 100% | 27% | - | - | - | - | - | - | 23% | - | 100% | 100% | 100% |
| GN04: GALLERIA RATICOSA NORD | C4R | 100% | 100% | 52% | 46% | 43% | 49% | 45% | 24% | - | - | 41% | 24% | 30% | 59% |
| | C4V | - | - | 48% | 54% | 57% | 51% | 55% | 76% | 100% | 100% | 59% | 76% | 40% | 41% |
| | C61R | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 30% | - |
| GN04: GALLERIA RATICOSA DA CASTELVECCHIO VERSO SUD | B0 | - | - | - | - | - | - | 57% | - | 25% | - | - | - | - | - |
| | B2 | 17% | - | - | - | - | - | - | - | 75% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| | Ac | 83% | 100% | - | - | - | - | 43% | - | - | - | - | - | - | - |
| | Ab | - | - | 100% | 100% | 100% | 100% | - | - | - | - | - | - | - | - |
| GN05: GALLERIA SCHEGGIANICO | Ab | 100% | 100% | 69% | 43% | 82% | 74% | 92% | 68% | 59% | 88% | 100% | - | - | - |
| | Ac | - | - | 31% | 57% | 18% | 26% | 8% | 32% | 41% | 12% | - | - | - | - |
| GN06: GALLERIA FIRENZUOLA DA ROVIGO VERSO SUD | Ab | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 62% | 100% | 100% | - | - | 21% | 100% | 50% | 50% |
| | Ac | - | - | - | - | - | 38% | - | - | 100% | 100% | 79% | - | 50% | 50% |
| GN06: GALLERIA FIRENZUOLA DA SAN GIORGIO | B2 | 100% | 100% | 100% | 100% | 61% | 20% | - | 48% | 48% | 35% | 95% | 100% | 100% | 68% |
| | C1 | - | - | - | - | - | - | 72% | 52% | 52% | 65% | 5% | - | - | 32% |
| | C4R | - | - | - | - | 39% | 80% | 28% | - | - | - | - | - | - | - |
| GN09: GALLERIA VAGLIA | Ac | - | 67% | 55% | 73% | 66% | 62% | 81% | 58% | 52% | 65% | 65% | 84% | 79% | 80% |
| | B01 | 82% | 20% | 27% | 16% | 34% | 38% | 19% | 42% | 30% | 15% | 18% | - | - | 20% |
| | B2 | 18% | 13% | 17% | 11% | - | - | - | - | 18% | 20% | 17% | 16% | 21% | - |

ROCKSOIL S.p.A.
CONSULENZA E ASSISTENZA TECNICA
nel campo della GEINGEGNERIA

SCHEM\621SB-AF 21.03.00 - REV.02 SB

Fig. 2: Produzioni medie giornaliere ottenute nella costruzione delle gallerie per la nuova linea ferroviaria A.V. tra Bologna e Firenze (approccio A.DE.CO.-RS).

2. Fattori che influenzano lo scavo

Dovendo parlare di progetto dello scavo di opere in sotterraneo, prima di addentrarsi ad illustrare i criteri di progettazione veri e propri, appare indispensabile chiarirsi le idee su quali sono i fattori che influenzano lo scavo e sui quali il progettista può esercitare un efficace controllo. Si tratta in particolare:

- degli interventi di riqualificazione del terreno;
- del sistema di abbattimento;
- delle fasi di scavo;
- della profilatura del fronte;
- della profondità degli sfondi;
- della cadenza d'avanzamento.

2.1 Gli interventi di riqualificazione del terreno occupano una posizione importante. Infatti, l'abbattimento del terreno può avvenire in assenza o in presenza di questo tipo d'interventi e ciò, oltre a essere determinante per l'efficacia dell'effetto arco che si produrrà al contorno della cavità, si ripercuote marcatamente, in termini progettuali, anche sugli altri fattori che influenzano lo scavo e che tra poco illustreremo.

Nel ricordare che gli interventi di riqualificazione sono di tipo:

- conservativo, quando il loro effetto primario è quello di contenere il decadimento della tensione principale minore;
- migliorativo, quando agiscono principalmente incrementando le caratteristiche di resistenza al taglio del mezzo;

tra gli strumenti a disposizione del progettista che esercitano un effetto essenzialmente conservativo vale la pena menzionare:

- il consolidamento del nucleo d'avanzamento, per profondità non inferiori al diametro di scavo, mediante elementi strutturali di vetroresina;
- la realizzazione in avanzamento, lungo il profilo di scavo, di ombrelli tronco-conici, costituiti dall'accostamento di colonne sub-orizzontali di terreno consolidato mediante jet-grouting;
- la realizzazione in avanzamento, lungo il profilo di scavo, di tegole di spritz-beton fibrorinforzato realizzati mediante pretaglio meccanico, utilizzando lo stesso pretaglio come cassaforma;
- la bullonatura radiale realizzata mediante bulloni ad ancoraggio puntuale;

Esercitano invece un effetto prevalentemente migliorativo:

- la realizzazione in avanzamento di ombrelli tronco-conici di terreno consolidato mediante iniezioni tradizionali o per congelamento;
- la realizzazione in avanzamento di ombrelli tronco-conici di drenaggi, quando si è in presenza di falda;
- la realizzazione, al contorno della cavità, di anelli di terreno armato mediante bulloni ad aderenza continua.

2.2 Altro parametro caratterizzante lo scavo di una galleria, sul quale il progettista deve compiere la propria scelta con grande prudenza, sensibilità e oculatezza, è il sistema di abbattimento che può essere meccanizzato o tradizionale.

Qui le possibilità di scelta sono davvero ampie. Anche volendo restringere il concetto di scavo meccanizzato a quei soli sistemi in cui tutte le fasi realizzative dell'opera sotterranea, dall'abbattimento del terreno alla realizzazione del rivestimento definitivo vengono eseguite

in sequenza da una macchina, come in un'unica grande catena di montaggio, il progettista può disporre di:

- frese da roccia ad attacco integrale aperte o scudate, a scudo singolo e doppio;
- scudi semplici, a lame, ad aria compressa, hydroshield, EPB, mixshield.

In tema di abbattimento tradizionale la scelta non è meno vasta. Si va dallo scavo eseguito mediante l'impiego di esplosivi all'abbattimento meccanico, che in funzione del tipo di terreno può essere operato con frese ad attacco puntuale, martelloni demolitori, ripper, pale meccaniche di varia foggia e, in casi particolari e limitati, mediante rocksplitter o agenti demolitori non esplosivi (Bristar, Cardox, ecc.).

La scelta del sistema di abbattimento è principalmente funzione del tipo di terreno in gioco, delle sue caratteristiche fisiche e meccaniche, della sua omogeneità, degli stati tensionali e della geometria della sezione.

Benché la complessa e generalmente scadente geologia della penisola italiana abbia favorito lo sviluppo delle tecniche d'abbattimento tradizionali a scapito di quelle meccanizzate, negli ultimi anni, grazie alla disponibilità sul mercato di macchine ad attacco integrale assai più flessibili ed affidabili di un tempo, in grado di garantire buone prestazioni anche in terreni soffici, questo tipo di scavo è in crescente evoluzione anche nel nostro Paese. In particolare, si è dimostrato vantaggioso soprattutto:

- come mezzo d'indagine, nella realizzazione di fori pilota di piccolo diametro lungo l'asse delle gallerie da realizzare (analisi dei parametri di funzionamento della fresa secondo il "Metodo RS");
- in sostituzione delle tecniche tradizionali, nella costruzione di gallerie sotto ridotte coperture, specie in ambito urbano, dove l'esigenza di limitare e controllare le subsidenze, velocizzare i tempi esecutivi, sottopassare in sicurezza le fondazioni degli edifici, i sottoservizi e le preesistenze in genere pone le condizioni più adatte allo scavo meccanizzato perché possa dispiegare tutte le proprie potenzialità.

Nel ricordare che esso ha il proprio punto di forza nella velocità e nella continuità realizzativa, condizioni che permettono di conseguire risparmi notevoli, in termini di tempi e costi, rispetto allo scavo tradizionale, è importante sottolineare come, conseguentemente, lo scavo meccanizzato sia destinato al fallimento in caso di fermi macchina prolungati e ripetuti. Per questo motivo, il progetto di un'opera in sotterraneo da realizzare con scavo meccanizzato dev'essere caratterizzato da un livello qualitativo più elevato di quello, già auspicabilmente notevole, di un'opera da realizzare con tecniche di scavo tradizionali. In particolare, la possibilità di affrontare lo scavo con tecniche meccanizzate si dovrebbe valutare già in sede di progetto di fattibilità e la decisione dovrebbe scaturire da approfondite valutazioni di rischio e da analisi di confronto costi/benefici tra scavo meccanizzato e scavo tradizionale. A questo scopo è indispensabile poter disporre di indagini preventive geologiche-stratigrafiche, geostrutturali, idrogeologiche, geotecniche-geomeccaniche estremamente accurate e in numero tale da minimizzare, da un lato, i rischi da "imprevisto" e consentire, dall'altro lato, una ponderata scelta della macchina che, come noto, è un elemento determinante per il successo del lavoro. Essa è fortemente condizionata, oltre che dalle dimensioni della sezione di scavo, dalle caratteristiche fisiche, chimiche, geotecniche e geomeccaniche dei terreni da affrontare, nonché dalle condizioni di stabilità intrinseca del fronte e del cavo anche in relazione all'eventuale presenza di acqua.

2.3 La scelta delle fasi di scavo ha un'enorme influenza sia nei riguardi della stabilità dell'opera (specialmente in fase costruttiva, ma anche a più lungo termine) sia nei riguardi della velocità d'avanzamento (produzione) che sarà possibile sviluppare.

Nel ricordare che lo scavo può essere condotto a piena sezione, a mezza sezione o previa parzializzazione spinta, è interessante evidenziare come gli orientamenti più recenti privilegino, ogni volta che è possibile (quindi quasi sempre se si escludono le gallerie di forma e dimensioni inusuali), lo scavo a piena sezione, anche e soprattutto nei terreni e nelle condizioni tenso-deformative più difficili. In passato, in situazioni complesse, il metodo costruttivo con cunicoli laterali e getto anticipato dei piedritti occupava un'importante posizione. Oggi non è più molto diffuso a causa delle anguste condizioni di lavoro nei cunicoli, che si traducono in ridotte velocità d'avanzamento, che nei casi migliori non sono mai superiori a 1 m/g. Anche l'avanzamento a mezza sezione, pur consentendo un maggior grado di meccanizzazione dal momento che l'altezza della galleria di calotta è in genere di 4,5 m o più, non gode più dei favori di un tempo, in quanto, oltre a non dare comunque garanzie sulla stabilità del fronte di scavo senza adeguati interventi, generalmente pone seri problemi statici all'atto dell'apertura dello strozzo.

Lo scavo a piena sezione, a prima vista paradossale nelle situazioni più difficili per la potenziale instabilità del fronte di scavo, la cui altezza raggiunge anche i 9÷12 m, invece si rivela spesso assai affidabile e performante, purché si assicuri la stabilità di quest'ultimo (l'unica zona critica con questo tipo d'avanzamento) con opportuni interventi di consolidamento. 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 permette sovente di avanzare in condizioni di sicurezza eccellenti e di conseguire produzioni fuori dalla portata di altri metodi.

2.4 La profilatura del fronte di scavo è un altro fattore su cui il progettista può esercitare il proprio controllo. A questo scopo egli dovrà decidere se il tipo di terreno e le condizioni tenso-deformative in gioco consentiranno di operare in sicurezza senza adottare particolari accorgimenti riguardo alla forma del fronte o se, al contrario, sia indispensabile profilare la parete a forma concava per agevolare la formazione, in senso longitudinale, dell'effetto arco necessario per minimizzare i movimenti estrusivi e garantire la sicurezza delle lavorazioni in sua prossimità.

2.5 La profondità degli sfondi può variare dal mezzo metro a diversi metri ed è funzione del tipo di terreno, della sua omogeneità, dell'intensità degli stati tensionali in gioco, della presenza o meno d'interventi di riqualificazione del terreno, del sistema di abbattimento impiegato.

2.6 La cadenza d'avanzamento, cioè la velocità e la regolarità con cui si avanza, ha un'importanza economica del tutto evidente, ma anche riflessi non trascurabili sulla statica del cavo a breve e a lungo termine. È stato infatti dimostrato che, quando le condizioni tenso-deformative sono difficili, mantenere un'adeguata cadenza di scavo significa arrecare minor disturbo all'ammasso circostante, ridurre l'estensione delle plasticizzazioni al contorno dello scavo e quindi l'importanza dei fenomeni deformativi conseguenti. Nei terreni con spiccato comportamento reologico (rigonfiamento, fluage, ecc.), questo risulta decisamente attenuato. La conseguenza è una galleria più stabile in fase costruttiva e spinte minori sui rivestimenti di prima fase e definitivi.

Le tabelle che seguono forniscono alcuni criteri che possono tornar utili, se ci si è orientati verso lo scavo di tipo tradizionale, per guidare la scelta dei parametri che più lo caratterizzano

[i valori della profondità degli sfondi e della cadenza d'avanzamento sono riferiti a gallerie di diametro corrente (12÷13 m)].

TABELLA “A”

| PARAMETRO | CATEGORIA DI COMPORTAMENTO (A.DE.CO.-RS) | | |
|--|--|------------|------------|
| | A | B | C |
| Interventi sistematici di riqualificazione | mai | talvolta | sempre |
| Concavità del fronte | consigliabile | imperativa | imperativa |
| Profondità sfondi [m] | 2,5 ÷ 5 | 1 ÷ 2,5 | ≤ 1,5 |
| Cadenza avanzamento [m/g] | > 5 | 1,5 ÷ 5 | 1,5 ÷ 3 |

TABELLA “B”

| PARAMETRO | RESISTENZA DELLA MATRICE [MPa] | | |
|------------------------|--------------------------------|--|-----------|
| | < 3 | 3 ÷ 20 | > 20 |
| Sistema d'abbattimento | ripper | martellone frese ad attacco puntuale ² | esplosivo |

² utilizzabili solo in gallerie di piccola-media sezione

3. Il progetto dello scavo per le gallerie di linea del nuovo collegamento ferroviario ad alta velocità tra Bologna e Firenze

Per realizzare il nuovo collegamento ferroviario ad alta velocità tra Bologna e Firenze saranno scavati oltre 12 milioni di metri cubi di terreno, per lo più di qualità assai eterogenea, in condizioni tenso-deformative spesso difficili e talvolta attraverso importanti orizzonti acquiferi. Alcune formazioni presentano anche il problema della presenza di gas, sempre insidioso e delicato da affrontare.

Al momento dello studio di diagnosi si era evidenziato che il 27% del tracciato si sarebbe sviluppato entro ammassi che, all'atto dello scavo, sarebbero stati sollecitati in campo elastico, il 53% sarebbe stato prevedibilmente interessato da fenomeni deformativi in campo elastoplastico, che avrebbero richiesto interventi immediati di contenimento al contorno del cavo, infine il 20% circa del tracciato sarebbe stato caratterizzato da fenomeni d'instabilità evidenti già al fronte di scavo, risolvibili operando a monte del fronte stesso con opportuni interventi di riqualificazione del terreno, atti a riportare artificialmente la situazione verso la stabilità.

A fronte di questa situazione si è scartata subito l'ipotesi di adottare tecnologie di scavo meccanizzato, preferendo il più flessibile scavo tradizionale, mediante esplosivo o meccanico.

Eccezion fatta per casi particolari come il camerone di San Pellegrino, dove le grandi dimensioni della sezione, la particolare morfologia del versante e la fratturazione dell'ammasso vicino all'imbocco hanno consigliato l'adozione di un attacco su tre cunicoli separati, per tutti gli altri casi si è deciso, in accordo ai più recenti orientamenti teorizzati dall'A.DE.CO.-RS, di adottare sistematicamente un avanzamento a piena sezione, consolidando il fronte di scavo ove necessario, onde conseguire i vantaggi in termini statici ed economici evidenziati già in numerose altre occasioni da questo tipo di approccio.

Le scelte inerenti alla fase di terapia (sezioni tipo e parametri caratteristici dello scavo) si sono quindi completate come segue, in funzione dei diversi tipi di terreno e del comportamento tenso-deformativo previsto in fase di diagnosi.

TABELLA “C”

| FORMAZIONE | GALLERIA | σ_c [MPa] | CATEGORIA DI COMPORTAMENTO (ADECO-RS) | H ₂ O | SEZ. TIPO PREV | PARAMETRI DELLO SCAVO | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------|---------------------|--|------------------|----------------------|--------------------------|--------------------|---------------|----------------|
| | | | | | | Interv. riqualif. | Sistema abbatt. | Sfondo [m] | Prod. [m/g] |
| Pliocene Intrapp. Superiore [EpS] | Pianoro Sud | 12 | B | | B0, B2 | | martell. | 1,5 | 3 |
| Marne di Bismantova [EmB] | Monte Bibeles Nord | 30 | A | | Ab, Ac | | esplosiv. | 4,5÷5 | 5 |
| Flysh di Monghidoro [LaM] | Monte Bibeles Sud | 8 | B | | B0, B2 | | martell. | 1÷2,5 | 1,5 |
| Complesso Caotico [LC] | Raticosa Nord | 2 | C | | C4R, C4V | si | ripper | 1,2 | 1,5 |
| Marnoso-Arenacea [RMA] | Firenzuola da Rovigo | 40 | A | si | Ab, Ac | drenaggi | esplosiv. | 2,5÷5 | 2 |
| Argille del Bacino del Mugello [aBM] | Firenzuola da S. Giorgio | 2 | C | si | C1, C4R | si | ripper | 1÷1,2 | 1,5 |
| Formazione di Monte Morello [ScM] | Vaglia | 30 | A | | Ac | | esplosiv. | 2,5÷5 | 6÷7 |

- Pliocene Intrappenninico Superiore (galleria Pianoro): le caratteristiche geomeccaniche appena discrete dei terreni appartenenti a questa formazione e gli stati tensionali in gioco facevano prevedere una variabilità di comportamento da fronte stabile a breve termine a fronte instabile (categoria B e C). Nel primo caso (quello prevalente) non appariva necessario operare interventi di riqualificazione dell’ammasso purché si fosse mantenuta una buona velocità d’avanzamento (superiore ai 2 m/g). Si sono allora progettate le sezioni tipo B0 e B2, adatte per affrontare le situazioni operative attese. Considerata la media resistenza della matrice, come mezzo per l’abbattimento del terreno si è optato per il martellone. Si è quindi valutato che una profondità di sfondo di 1,5 m, con il fronte sagomato a forma concava, avrebbe consentito di mettere in opera una centina per ogni turno di 8 ore, assicurando la cadenza d’avanzamento voluta con la regolarità necessaria. Queste scelte in fase operativa si sono dimostrate azzeccate ed hanno permesso di raggiungere produzioni medie reali superiori a 3 m/g.
- Marne di Bismantova (galleria M. Bibeles Nord): trattasi di un ammasso a consistenza lapidea poco fratturato, costituito da marne per circa 2 Km e poi da arenarie intercalate da interstrati marnosi. Lo studio di diagnosi evidenziava un comportamento prevalente a fronte stabile (categoria A) senza necessità d’interventi di riqualificazione dell’ammasso. Le caratteristiche di quest’ultimo ($\sigma_c > 30$ Mpa), hanno indotto ad adottare un sistema di abbattimento tradizionale, mediante esplosivo, con lo sparo di una volata al giorno su sfondi di 4,5 ÷ 5 m.
- Flysh di Monghidoro (galleria M. Bibeles Sud): consiste in una fitta alternanza di argilliti, marne argillose, calcari e calcareniti fortemente tettonizzate, con evidenti piegature alla scala del fronte e intensamente fratturate. La categoria di comportamento prevista era la B (fronte stabile a breve termine), con possibili passaggi in C (fronte instabile). L’abbattimento sarebbe avvenuto conseguentemente, in assenza o in presenza di interventi di riqualificazione dell’ammasso. Considerata la marcata fratturazione di questo, nonostante la consistenza lapidea della matrice si è preferito impiegare per l’abbattimento il martel-

lone, con sfondi massimi di 2,5 m nelle zone sane e più ridotti, sino a 1 m, in quelle maggiormente argillitiche. In queste condizioni la produzione media raggiunta è di 1,5 m/g di galleria finita.

- Complesso caotico (galleria Raticosa): si tratta di argille scagliose intensamente fratturate e tettonizzate, di scarsa qualità geomeccanica, da scavare sotto elevati stati tensionali (categoria di comportamento C). A fronte di questa difficile situazione, si è progettato uno scavo a piena sezione previa riqualificazione del nucleo e del contorno del cavo con elementi strutturali di vetroresina operati in avanzamento. Le pareti dello scavo vengono immediatamente rivestite con centine dotate di puntone al piede e spritz-beton. Le murette e l'arco rovescio vengono gettati entro un diametro dal fronte. Per l'abbattimento di questo tipo di terreno, piuttosto tenero e disomogeneo, si è optato per l'impiego del ripper, con cui risulta agevole profilare a forma concava la parete del fronte. Infine, si è valutata adeguata una profondità di sfondo di 1,2 m circa. Con queste prescrizioni si stanno mantenendo cadenze d'avanzamento dell'ordine di 1,5 m/g.
- Formazione marnoso-arenacea (galleria Firenzuola): si tratta di un ammasso acquifero formato da alternanze di marne e arenarie assai consistenti, a bancate suborizzontali di ordine da decimetrico a metrico. Le buone caratteristiche di resistenza e deformabilità del materiale determinano un comportamento allo scavo in campo elastico anche sotto le maggiori coperture (categoria A: fronte stabile). Le stesse impongono d'impiegare l'esplosivo per abbattere il terreno, anche se ciò comporta difficoltà di profilatura della sezione. Per questa operazione si sono previste profondità di sfondo variabili da 2,5 a 5 m, in funzione delle problematiche idrogeologiche di volta in volta affrontate. La produzione media, fortemente condizionata dalle venute d'acqua, è di circa 2 m/g.
- Argille del bacino del Mugello (galleria Firenzuola): sono formate da limi argillosi con intercalazioni sabbiose fini e sature. L'avanzamento sarebbe prevedibilmente avvenuto in categoria di comportamento C (fronte instabile), quindi in presenza d'interventi di riqualificazione dell'ammasso (preconsolidamento del nucleo e del contorno del cavo). Lo scavo, immediatamente rivestito (murette e arco rovescio sono gettati entro un diametro dal fronte), viene eseguito mediante ripper per sfondi di 1 ÷ 1,2 m, profilando il fronte a forma concava. La cadenza dell'avanzamento viene mantenuta costante intorno a 1,5 m/g.
- Formazione di Monte Morello (galleria Vaglia): trattasi di un flysch costituito da calcari, calcari marnosi e marne poco fratturati, a bancate compatte di ordine decimetrico. La buona qualità geomeccanica determina un comportamento prevalente in categoria A (fronte stabile). Per l'abbattimento è indispensabile l'impiego dell'esplosivo con sfondi massimi di 5 m. La produzione media è di 6 ÷ 7 m/g.

4. Il progetto dello scavo per la galleria di servizio della galleria Vaglia

Recentemente è stato messo a punto il progetto dello scavo della galleria di servizio "Ginori", di 9.259 m di lunghezza e 5,6 m di diametro, che corre per un tratto di 6.501 m parallelamente alla galleria Vaglia, alla quale sarà collegata con by-pass pedonali ogni 250 m (figg. 3 e 4). Nei suoi tratti iniziale e finale, di 1.588 m e 1.170 m, corre con una pendenza dell'1,8 ‰, rispettivamente a scendere e a salire. La necessità ambientale di procedere allo scavo da un unico attacco a Cava Ginori, quella di controllare, durante l'avanzamento, l'interferenza con le acque ipogee ed infine la necessità di contenere i tempi di realizzazione entro limiti ristretti hanno portato a scegliere una modalità di costruzione completamente meccanizzata.

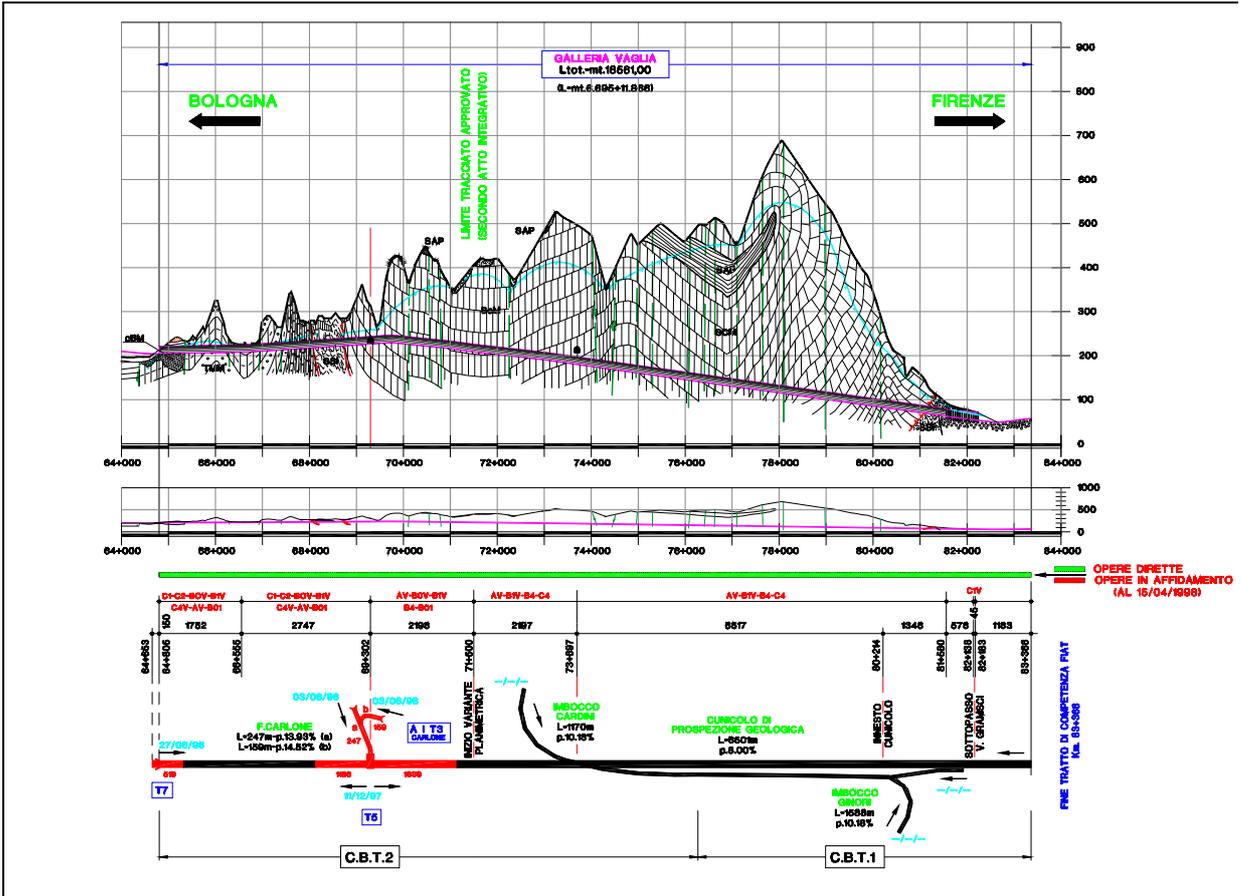


Fig. 3: Andamento planimetrico della galleria di servizio “Ginori” e profilo geologico della

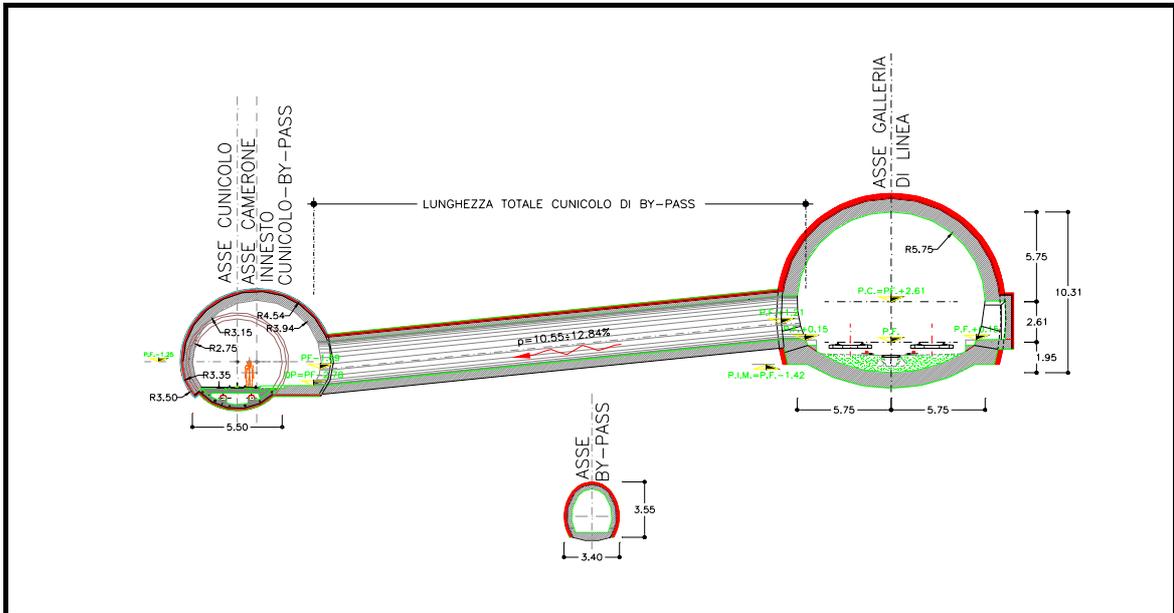


Fig. 4: Sezione tipica della galleria di servizio “Ginori” in corrispondenza dei by-pass

Seguendo la strada già sperimentata con successo per il progetto delle gallerie dell'attraversamento appenninico della linea ferroviaria ad alta velocità tra Bologna e Firenze, si sono introdotte alcune importanti novità anche nella gestione progettuale dello scavo con fresa. È utile, infatti, ricordare che il progetto delle gallerie di linea della linea ferroviaria ad alta velocità Bologna-Firenze, adottando criteri univoci e non soggettivi per la definizione delle sezioni tipo e delle relative variabilità, per la prima volta per un'opera pubblica di queste dimensioni, almeno in Italia, ha permesso al Committente di stipulare col General Contractor, un contratto con la formula "chiavi in mano" e poi di realizzare le gallerie in regime di vera Assicurazione Qualità, senza che fossero richieste per questo procedure tali da creare ritardi e intoppi ai cantieri.

Come per le gallerie di linea da realizzare in "tradizionale" si erano inseriti nel progetto (e quindi nel contratto) specifici criteri per gestire in maniera standardizzata e codificata le variabilità che inevitabilmente si sarebbero evidenziate in corso d'opera, allo stesso modo per la galleria di servizio "Ginori", da realizzare con fresa, si sono inseriti nel progetto i criteri da seguire in corso d'opera per l'adozione di provvedimenti operativi e/o progettuali da applicare in quelle situazioni che, durante la realizzazione dello scavo con fresa, avessero evidenziato lievi differenze tra condizione di scavo prevista e condizione reale.

4.1. La gestione progettuale dello scavo meccanizzato

I terreni attraversati dalla galleria "Ginori" appartengono a un'unica formazione, la formazione di Monte Morello, che certamente è complessa, con caratteristiche geomeccaniche che variano significativamente, da quelle proprie di un'argillite a quelle di un calcare compatto. Per questo motivo il progetto meccanico della fresa si è basato su una serie di input progettuali elaborati dal progettista statico, che hanno portato alla realizzazione di una macchina certamente innovativa, attrezzata con avanzati sistemi geognostici, che dovrebbe essere in grado di adeguare le modalità di avanzamento alle diverse situazioni geomeccaniche incontrate durante l'avanzamento, e anche di realizzare, all'occorrenza, interventi di riqualificazione del terreno sia sul nucleo sia sul contorno del futuro scavo (fig. 5). Le modalità di acquisizione dei parametri geomeccanici e di funzionamento della macchina, i criteri di adeguamento delle modalità d'avanzamento della stessa e quelli d'intervento preventivo sul terreno sono conte-

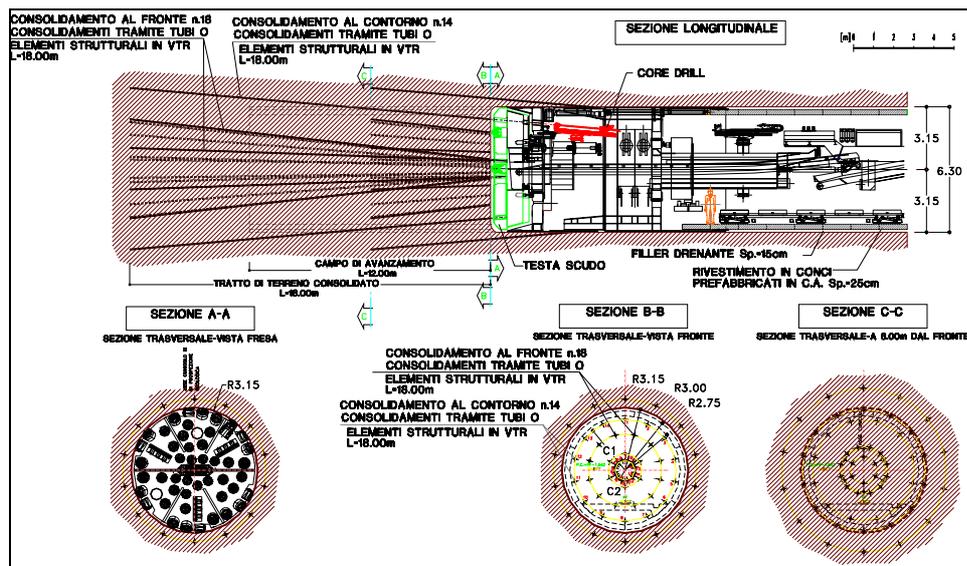


Fig. 5: Interventi di riqualificazione del terreno realizzabili dalla fresa

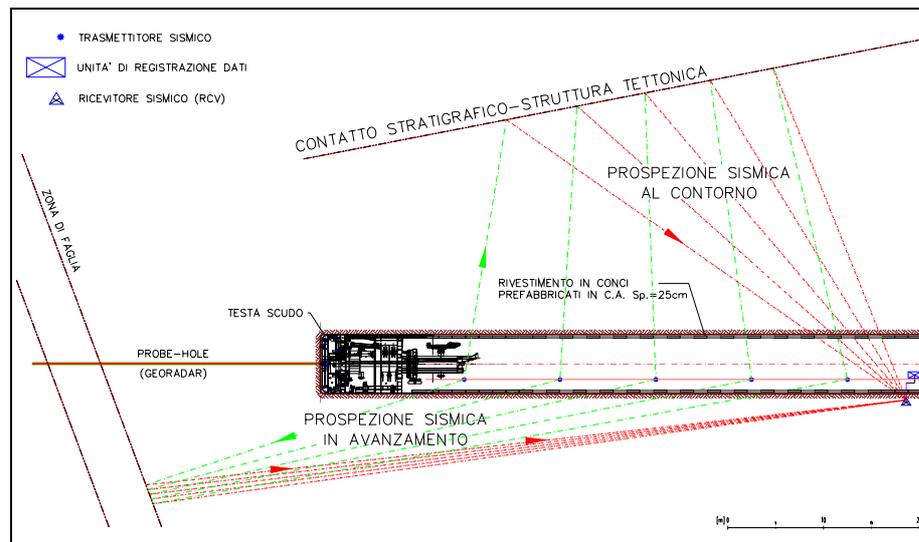


Fig. 6: Indagini geognostiche realizzabili dalla fresa

nuti in un documento allegato al progetto e denominato "Linee guida per la realizzazione delle indagini in avanzamento, l'adozione delle modalità operative più adeguate e la realizzazione degli interventi di consolidamento del terreno". Tale documento intende definire, già in sede di progetto, i criteri che l'operatore della fresa e/o il progettista dovranno adottare in corso d'opera per:

- confermare le modalità operative in corso;
- eseguire indagini integrative per comprendere meglio la natura della roccia a monte del fronte di scavo;
- variare le modalità operative per adeguarle alle necessità riscontrate;
- adottare gli interventi progettuali di riqualifica del terreno al nucleo d'avanzamento e al contorno del cavo, che la macchina è in grado di realizzare.

Le "linee guida" indicano, quindi, descrivendo e quantificando, i principali parametri da registrare in corso d'opera. Si tratta, in particolare, di

- parametri di funzionamento della fresa;
- parametri geologico-geomeccanici ottenuti da indagini sismiche realizzate sistematicamente in avanzamento ed eventualmente integrate da prove georadar in probe-hole realizzati sul fronte (fig. 6).

Si tratta di parametri utili per il controllo continuo e sistematico delle caratteristiche dell'ammasso e del suo comportamento allo scavo. Ad essi si sono associati i campi di valori corrispondenti al normale funzionamento della fresa: qualora si riscontrassero valori sensibilmente differenti da quelli previsti, e quindi riferibili a condizioni geomeccaniche locali e particolari (zone tettonizzate, improvvisi cambiamenti litologici e strutturali, ecc.) diverse da quelle ipotizzate, l'operatore e/o il progettista dovranno adottare le azioni correttive o integrative previste nelle "Linee guida".

In particolare, con i criteri predefiniti potranno essere adottati sia provvedimenti operativi (extrascavo della testa, blocco del telescopismo, azionamento dei pistoni di coda, ecc.), sia indagini integrative (carotaggi, ecc.), sia interventi progettuali di riqualifica del terreno.

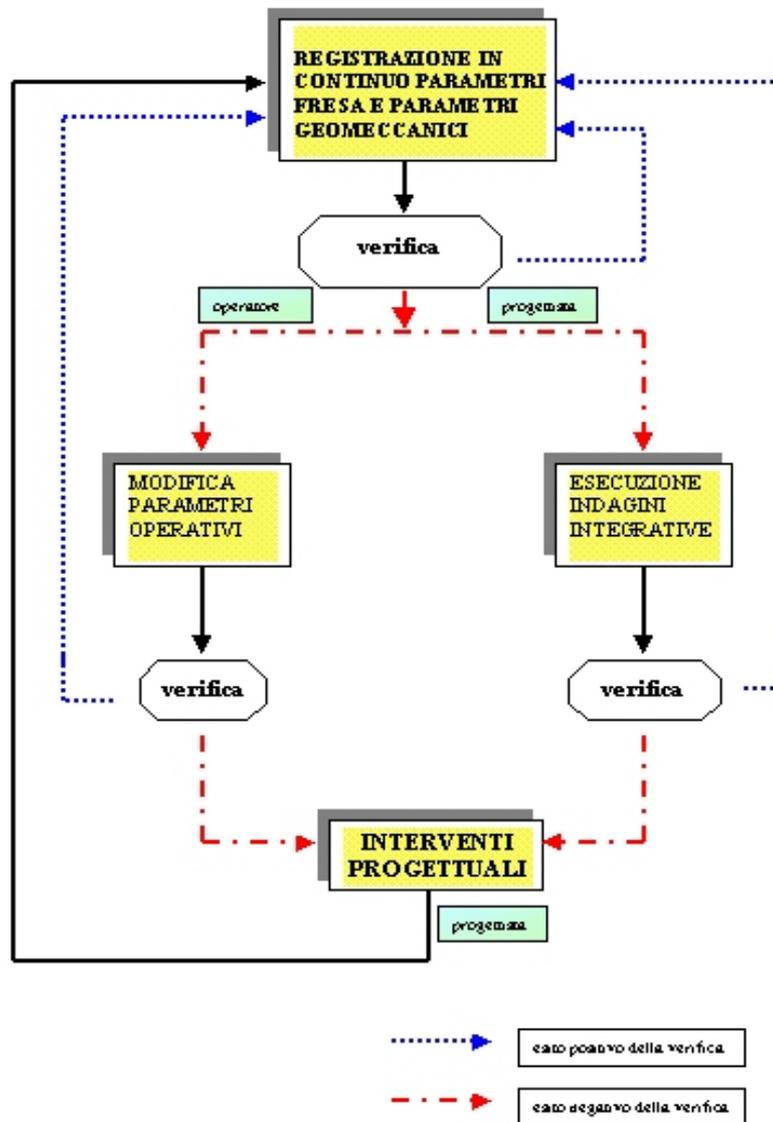


Fig. 7: Diagramma di flusso della gestione progettuale dello scavo meccanizzato

Solo se il contesto incontrato non corrisponde a nessuno di quelli ipotizzati, occorrerà valutare soluzioni diverse da quelle previste nel progetto (fig. 7).

Con questa impostazione si è voluto evitare che azioni non codificate, magari marcatamente influenti sul comportamento tenso-deformativo dell'ammasso, potessero venir adottate in maniera del tutto arbitraria. Nello stesso tempo si è voluto fornire una guida affinché gli ordinari scostamenti tra previsione progettuale e realtà, privi di caratteristiche di emergenza, potessero venir adeguatamente affrontati con azioni rapportate a un quadro progettuale di riferimento standardizzato.

4.2 Caratteristiche del rivestimento

Per concludere, è interessante, parlando dello scavo meccanizzato della galleria "Ginori", fornire qualche informazione sulle caratteristiche del rivestimento, che sarà realizzato in conci

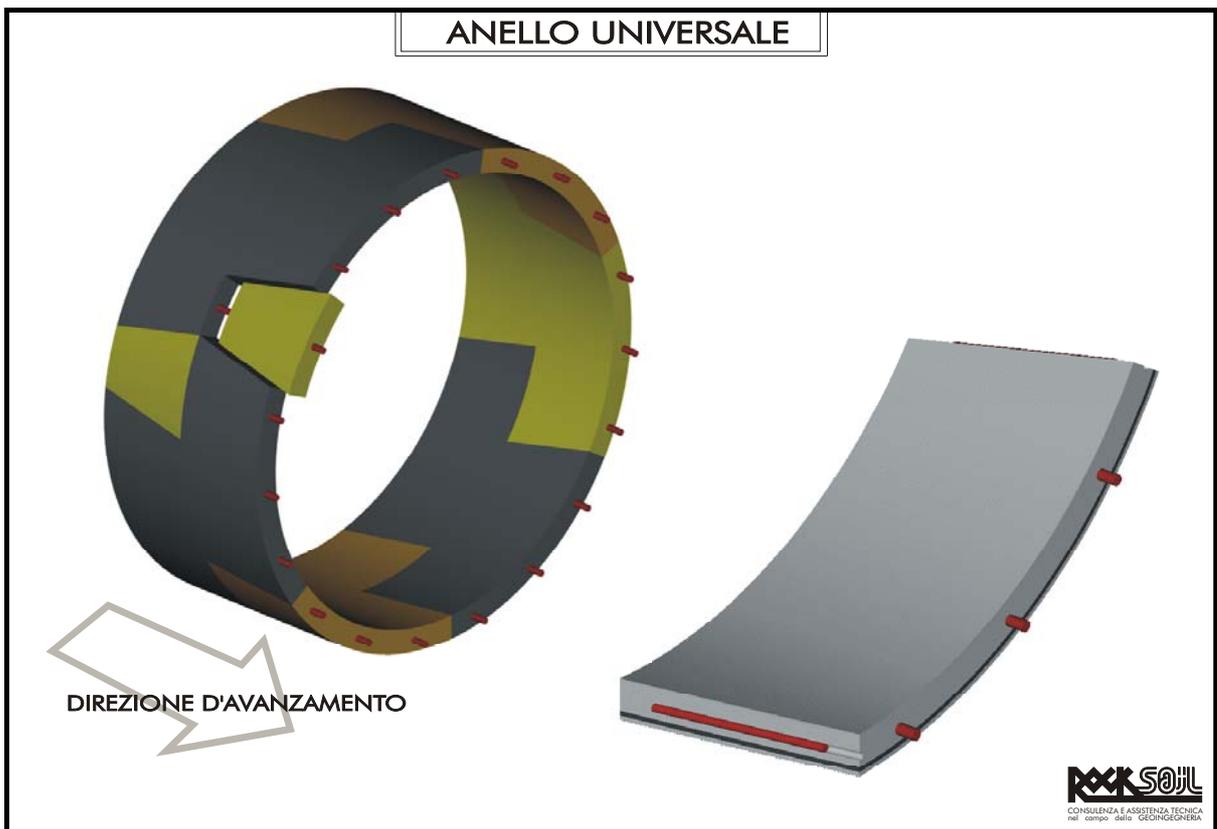


Fig. 8: Carpenteria della gallerie di servizio “Ginori”

prefabbricati di c.a. di 25 cm di spessore. In particolare, l'anello di rivestimento sarà composto da cinque conci più quello di chiave.

La sua forma cilindrica troncata obliquamente permetterà di seguire il tracciato teorico della galleria con eccellente approssimazione, montando l'anello nella sequenza di volta in volta più opportuna. I conci sono collegati tra loro solo longitudinalmente, mentre trasversalmente sono semplicemente interfacciati. Il piano viario è realizzato mediante conci prefabbricati di forma e dimensioni appositamente studiate (fig. 8).

5.0 Conclusioni

La costruzione di un'opera in sotterraneo s'identifica nell'operazione di asportazione del terreno che avviene durante la fase di scavo. Si è evidenziato che questa operazione turba inevitabilmente gli equilibri naturali preesistenti nell'ammasso (impatto dello scavo) e che le modalità con cui essa viene condotta hanno grande influenza sulla stabilità a breve e a lungo termine dell'opera da realizzare, quindi sulla sicurezza degli scavi, sul valore e sulla regolarità delle produzioni che è possibile ottenere.

Poiché, d'altra parte, stabilità dell'opera e produzioni sono obiettivi principali per il progettista di opere in sotterraneo, ne consegue che lo scavo e le modalità con cui questo viene eseguito sono elementi primari di progettazione e come tali devono far parte integrante del progetto di qualsiasi galleria.

Dopo aver illustrato i principali fattori che influenzano lo scavo, si sono forniti alcuni criteri di progettazione facendo riferimento alle esperienze maturate sui cantieri per l'alta velocità ferroviaria tra Bologna e Firenze.

BIBLIOGRAFIA

- [1] LUNARDI P., “Evolution des technologies d’excavation en souterrain dans des terrains meubles”, Colloque chez le “Comité Marocain des Grands Barrages” - Rabat, 30 settembre 1993
- [2] LUNARDI P., “L’importanza del precontenimento del cavo in relazione ai nuovi orientamenti in tema di progetto e costruzione di gallerie”, Gallerie e grandi opere sotterranee, n°. 45, anno 1995
- [3] LUNARDI P., “Progetto e costruzione di gallerie secondo l’approccio basato sull’analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli” (articolo in tre parti), Quarry and Construction, marzo 1994, marzo 1995, aprile 1996
- [4] LUNARDI P., “Avanza la galleria meccanica” - Le Strade, maggio 1996
- [5] POMA A., STEINER W., “Sistemi di scavo meccanizzato nelle opere ferroviarie in sotterraneo: problematiche progettuali a confronto”, Convegno su “Scavo meccanizzato integrale di gallerie: esperienze ed esigenze di committenti, fabbricanti di macchine, imprese e progettisti”, Roma, 13-15 maggio 1997
- [6] LUNARDI P., “Storia del collegamento ferroviario tra Bologna e Firenze - Aspetti progettuali e costruttivi delle opere in sotterraneo”, Gallerie e grandi opere sotterranee, n°. 54, anno 1998
- [7] ENRICI BAION R., FOCARACCI A., VALLINO COSTASSA G., “Storia del collegamento ferroviario tra Bologna e Firenze - La fase progettuale e costruttiva delle gallerie”, Gallerie e grandi opere sotterranee, n°. 54, anno 1998