

Avanza la galleria meccanica

Dall'avvio delle prime esperienze ottocentesche l'impiego di mezzi automatici per lo scavo di gallerie oggi si è diffuso ovunque. Con notevoli vantaggi in termini di velocità di lavoro e di organizzazione dei cantieri



La meccanizzazione in galleria costituisce senza dubbio un argomento di grande attualità. Dalle prime esperienze riuscite compiute da Somellier durante lo scavo del traforo ferroviario del Frejus nel 1860, quando per la prima volta furono utilizzate perforatrici pneumatiche che sollevavano i minatori dalla fatica di operare a mano l'esecuzione dei fori da mina, la tecnologia ha progredito con passi da gigante, tanto che oggi il mero trasferimento dall'uomo alla macchina degli oneri connessi alle operazioni di scavo è diventato

un fatto quasi banale. Tuttavia, se ripercorriamo mentalmente il cammino compiuto negli ultimi cento anni è facile rendersi conto di come tutto ciò sia avvenuto a prezzo di enormi sforzi e innumerevoli tentativi, di fallimenti e delusioni, che rendono ancor più esaltanti i recenti, significativi successi conseguiti. Naturalmente, l'evoluzione tecnologica, oltre a manifestarsi attraverso la realizzazione di macchine fresatrici sempre più efficienti, ha coinvolto inevitabilmente un po' tutti gli elementi che costituiscono una galleria (il terreno, lo scavo, i di-

versi componenti del rivestimento) mutandone l'importanza ed i ruoli reciproci. Appare giusto, dedicare un po' di tempo anche a questi elementi, per capire meglio come possano inquadarsi nel grande tema della meccanizzazione in galleria.

Probabilmente le nostre idee a questo riguardo potranno essere assai più chiare una volta che avremo dato risposta ai seguenti quattro quesiti:

- perché si punta sempre di più sulla meccanizzazione in galleria?
- la meccanizzazione è applicabile a

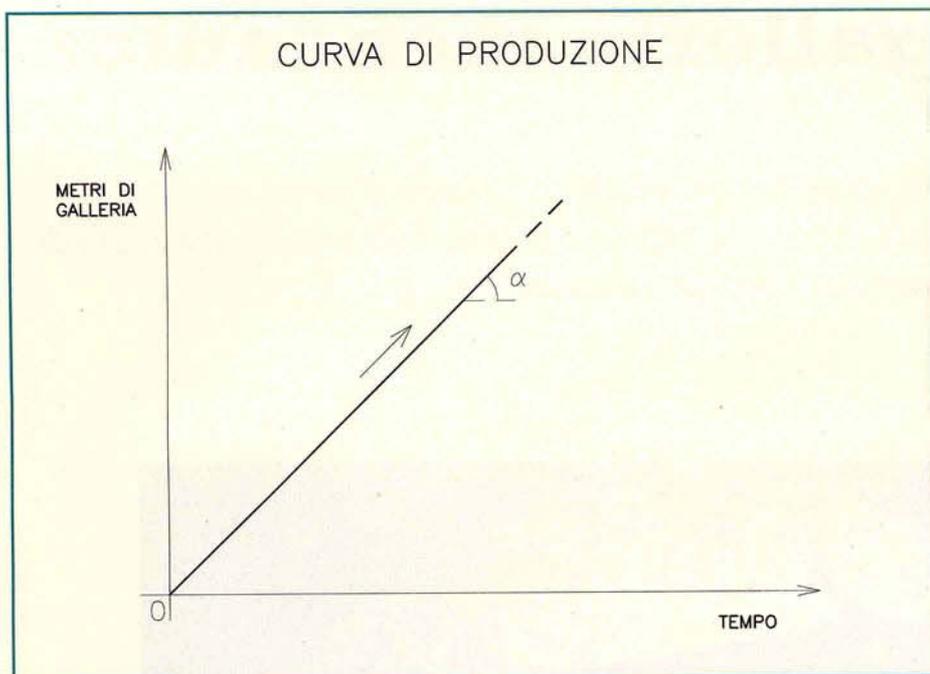


Fig. 1

ogni tipo di terreno e a ogni situazione tenso-deformativa?

- è sufficiente limitare la meccanizzazione al solo scavo di avanzamento?

- si può parlare di meccanizzazione per gli interventi sul terreno e per la messa in opera di rivestimenti?

La risposta al primo quesito appare immediata: si punta sempre di più sulla meccanizzazione in galleria perché attraverso la meccanizzazione dell'avanzamento è possibile conseguire l'obiettivo dell'industrializzazione delle opere in sottterraneo, cioè la capacità di pianificare la loro realizzazione programmando e poi rispettando con precisione fasi e cadenze di scavo, tempi e costi di costruzione, come si fa abitualmente per qualsiasi altra opera di ingegneria civile.

In altre parole, attraverso la meccanizzazione s'intravede la possibilità di migliorare le produzioni in termini di cadenza e velocità d'avanzamento. In termini di cadenza, con l'ottenimento di curve di produzione (fig. 1) ad andamento pressoché lineare, con evidenti vantaggi nei riguardi dell'ottimizzazione delle risorse di cantiere; in termini di velocità d'avanzamento (curve di produzione caratterizzate da coefficienti angolari

il più possibile elevati in rapporto ai materiali attraversati), con notevoli vantaggi sia economici sia statici.

Infatti, conseguire con la meccanizzazione delle buone velocità d'avanzamento, soprattutto nei terreni con problemi tenso-deformativi importanti, significa garantire un miglior comportamento del mezzo all'azione dello scavo ed, in particolare, impedire che la galleria avanzi preceduta dal disturbo che questo produce nell'ammasso circostante. E' noto, infatti, che il raggio d'influenza del fronte di scavo R_f è funzione di σ_{gd} , σ_1 , σ_3 , ϕ , V , essendo V la velocità d'avanzamento (fig. 2). In particolare, R_f diminuisce all'aumentare di quest'ultima implicando, da un lato, la riduzione della distanza utile per mettere in opera interventi di stabilizzazione che divengano staticamente attivi in tempo conveniente per essere efficaci, dall'altro lato, la necessità, da parte del cantiere, di adeguare conseguentemente tutte le lavorazioni che dovranno svolgersi in tempi più ristretti.

Se è vero che, grazie ai vantaggi che permette di conseguire e che sono stati sopra evidenziati, la meccanizzazione aiuta progettisti e costruttori a far sì che, a consuntivo, siano rispettate, per linearità e coefficiente angolare, le curve di

produzione ipotizzate in fase di studio programmatico, quindi a realizzare l'obiettivo dell'industrializzazione degli scavi in sottterraneo, è del tutto conseguente cercare di dar risposta anche al secondo quesito, che recita: "La meccanizzazione è applicabile a ogni tipo di terreno e a ogni situazione tenso-deformativa?"

La risposta, come dimostrano i diagrammi di produzione ottenuti recentemente per gallerie scavate in svariati tipi di terreno utilizzando diverse tecnologie di meccanizzazione dell'avanzamento (fig. 3), oggi è senza dubbio affermativa, grazie all'esistenza dei sistemi di precontenimento del cavo messi a punto nell'ultimo decennio. In precedenza la meccanizzazione era attuabile solo nei terreni a consistenza lapidea soggetti a stati tensionali tali da non produrre apprezzabili situazioni d'instabilità del cavo e nei terreni sciolti, anche se sedi di falde acquifere, purché dal battente non elevato. L'impiego di frese ad attacco integrale TBM nelle rocce dove si poteva configurare una situazione riconducibile a modelli convergenza-contenimento, e di scudi EPB o Hydroschild nei terreni sciolti, interessati da pressioni idrostatiche inferiori a 5 ÷ 6 bar, nei quali si poteva configurare una situazione riconducibile a modelli estrusione-contenimento, consentiva (e consente) di garantire cadenze d'avanzamento costanti (linearità delle produzioni) con avanzamenti dell'ordine delle decine di metri/giorno, in funzione del diametro di scavo e dell'eterogeneità dei terreni attraversati.

Lo stesso obiettivo, nel caso dello scavo di gallerie in terreni a consistenza lapidea con problemi tenso-deformativi o in terreni di scarsa consistenza con problemi tenso-deformativi ugualmente rilevanti, dove la situazione è riconducibile a modelli estrusione-precontenimento, è rimasto irrisolto per anni e solo nell'ultimo decennio, grazie, come abbiamo detto, alla messa appunto dei sistemi di precontenimento del cavo, la costanza della cadenza di avanzamento e la buona produzione sono diventate una realtà.

Ci riferiamo, in particolare, a quei sistemi, detti conservativi, che permettono di intervenire sulla rigidità del nucleo attraverso:

- il semplice contenimento del fronte di scavo, praticabile con particolare efficacia soprattutto con l'impiego di scudi ad azione meccanica o a pressione di fluido o,

con effetti più limitati, con il getto sullo stesso di un manto di *spritz-beton*;

- consolidamento del nucleo d'avanzamento, realizzabile mediante l'utilizzo di tubi di vetroresina, di *jet-grouting* in orizzontale, di iniezioni tradizionali o del congelamento;

- la protezione periferica del nucleo d'avanzamento con gusci di *spritz-beton* o di calcestruzzo fibrorinforzati, oppure con gusci di terreno pretrattato (mediante *jet-grouting* sub-orizzontale o tubi di vetroresina iniettati con malte cementizie o iniezioni tradizionali o congelamento); e di anticipare e di rigimare per questa via qualsiasi fenomeno deformativo del fronte (estrusioni) o del cavo (convergenze).

Quando si costruisce una galleria, infatti, si realizza un sistema le cui componenti primarie sono: il terreno (eventualmente consolidato), il rivestimento e lo scavo. Appare del tutto logico che qualsiasi aumento della produzione, cioè della velocità con cui viene eseguito lo scavo per creare il vuoto all'interno del profilo della galleria, potrà avere conseguenze sulle altre componenti del sistema.

Di conseguenza, la risposta al terzo quesito: "E' sufficiente limitare la meccanizzazione al solo scavo di avanzamento?" non può che essere negativa, essendo assolutamente indispensabile che la meccanizzazione stessa sia estesa anche agli interventi sul terreno e alla messa in opera dei diversi componenti del rivestimento per ottenere, da un lato, il bilanciamento tra le produzioni delle diverse lavorazioni, dall'altro lato la riduzione al minimo del numero di queste e delle macchine necessarie per eseguirle.

Ma "Si può parlare di meccanizzazione per gli interventi sul terreno e per la messa in opera di rivestimenti?" Per rispondere a questo quarto e ultimo quesito appare opportuno esaminare in dettaglio il ruolo giocato da ciascun elemento che costituisce un'opera in sottoterraneo allo scopo di evidenziare, se è il caso, come esso possa in qualche modo essere influenzato dalla meccanizzazione in galleria.

In fig. 4 sono graficizzati (sulla base di un censimento fatto su circa 100 chilometri di gallerie realizzate nell'ultimo decennio) i costi medi unitari di costruzione ripartiti, appunto, tra le voci "scavo", "terreno" e "rivestimento", in funzione della situazione tenso-deformativa

affrontata (fronte stabile, fronte stabile a breve termine, fronte instabile).

Risulta subito evidente come, nell'economia globale dell'opera, "scavi" e "rivestimenti" rappresentino una costante che incide per il 95% nel caso di gallerie scavate in situazioni di fronte stabile, per circa l'85% per quelle realizzate in situazioni di fronte stabile a breve termine e per 65 ÷ 40% per quelle realizzate in situazioni di fronte instabile.

Da questi dati si evince che la voce "terreno" è quella che pesa di più sul costo dell'opera finita, con percentuali anche del 60%. Questo accade perché delle tre componenti primarie il terreno è quella più importante, controllabile pe-

raltro solo parzialmente e con difficoltà.

Si tratta, in pratica, del materiale da costruzione del progettista di gallerie, del mezzo con cui egli deve operare. E' certamente un materiale assai anomalo, se confrontato con quelli tradizionali dell'ingegneria civile: discontinuo, disomogeneo, anisotropo. La conoscenza approfondita delle sue caratteristiche di compattezza, durezza, abrasività, resistenza e deformabilità è assolutamente indispensabile per poter scegliere con successo il tipo di macchine con cui affrontarlo. Sappiamo che esso presenta, in superficie, caratteristiche assai varie, dipendenti, però, esclusivamente dalla propria natura intrinseca (consistenza natu-

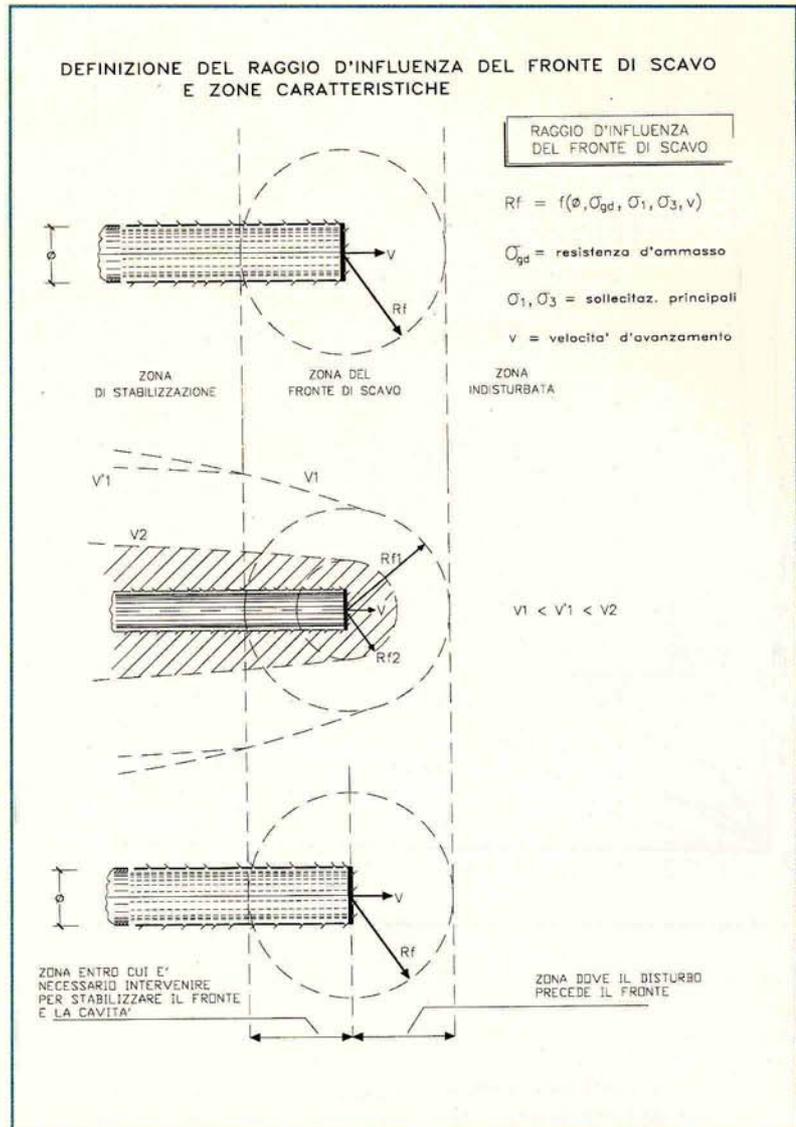


Fig. 2

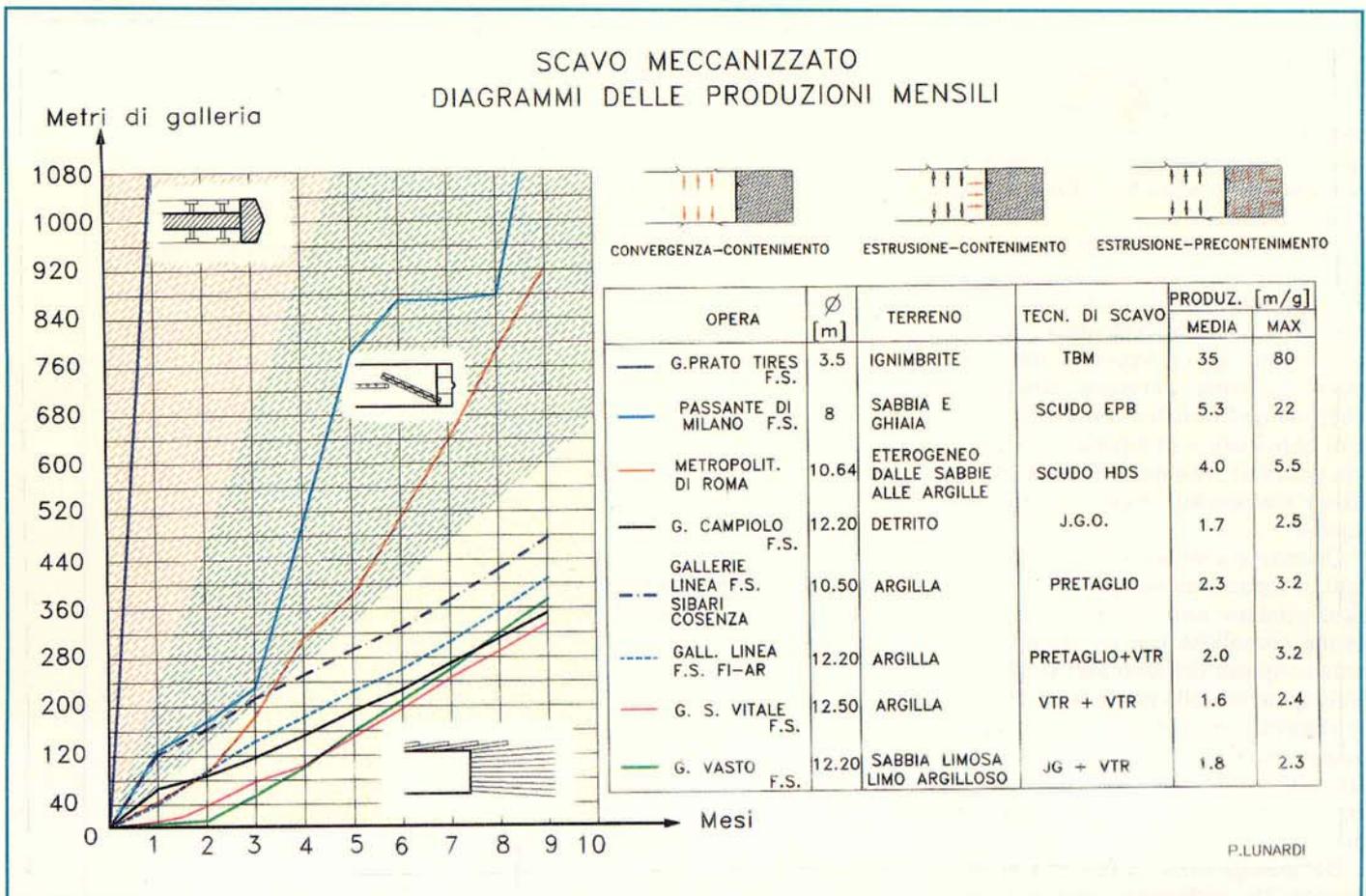


Fig. 3

rale), mentre in profondità esse mutano anche in funzione dell'entità degli stati tensionali che lo sollecitano (consistenza acquisita) e determinano, come abbiamo già accennato, il suo comportamento allo scavo (fronte stabile, fronte stabile a breve termine, fronte instabile). Studi e ricerche compiuti nel corso degli ultimi venticinque anni hanno evidenziato, a questo proposito, il ruolo determinante giocato, per la statica a breve e a lungo termine della galleria, dalla rigidità del terreno costituente il nucleo d'avanzamento prima che questo venga abbattuto.

In particolare, aumentando in maniera adeguata la rigidità del nucleo, è possibile migliorare il comportamento tenso-deformativo della galleria passando, per esempio, da una situazione a fronte instabile a una a fronte stabile, con grandi vantaggi anche per la statica del futuro cavo.

Questo è possibile producendo azioni di precontenimento e contenimento del

cavo con opportuni interventi di consolidamento del terreno, che costituiscono, perciò, il suo più efficace strumento di controllo. A seconda del grado di efficacia degli interventi di consolidamento che siamo capaci di operare, possiamo dunque controllare, almeno parzialmente, il comportamento tenso-deformativo del terreno allo scavo.

Gli interventi di consolidamento possono essere di tipo conservativo o di tipo migliorativo:

- conservativo, quando il loro effetto primario è quello di contenere il decadimento, all'interno del materiale, della tensione principale minore σ_3 ;
- migliorativo, quando agiscono principalmente incrementandone le caratteristiche di resistenza al taglio.

Tra gli interventi di tipo conservativo che permettono di intervenire sulla rigidità del nucleo, abbiamo già citato il contenimento del fronte di scavo e la protezione periferica del nucleo d'avanzamento.

Analogamente, tra gli interventi di tipo migliorativo, permette di intervenire sulla rigidità del nucleo il consolidamento del nucleo d'avanzamento.

L'efficacia di un intervento di consolidamento è legata non solo alla sua accurata progettazione ma anche alla sua perfetta esecuzione. Appare quindi di grande importanza curare la qualità di questo tipo d'interventi anche attraverso la messa a punto di un efficace sistema di controllo qualità. E' nondimeno importante velocizzare le operazioni di realizzazione dell'intervento garantendo anche per esse cadenze di lavorazione costanti. Anche a questo riguardo la meccanizzazione può far molto, come ci illustreranno i nostri relatori.

Una volta che il progettista si è assicurato, preconsolidando il terreno, la collaborazione di quest'ultimo alla stabilità e alla sicurezza dei lavori d'avanzamento, egli deve ancora preoccuparsi di garantire l'agibilità e la sicurezza della galleria

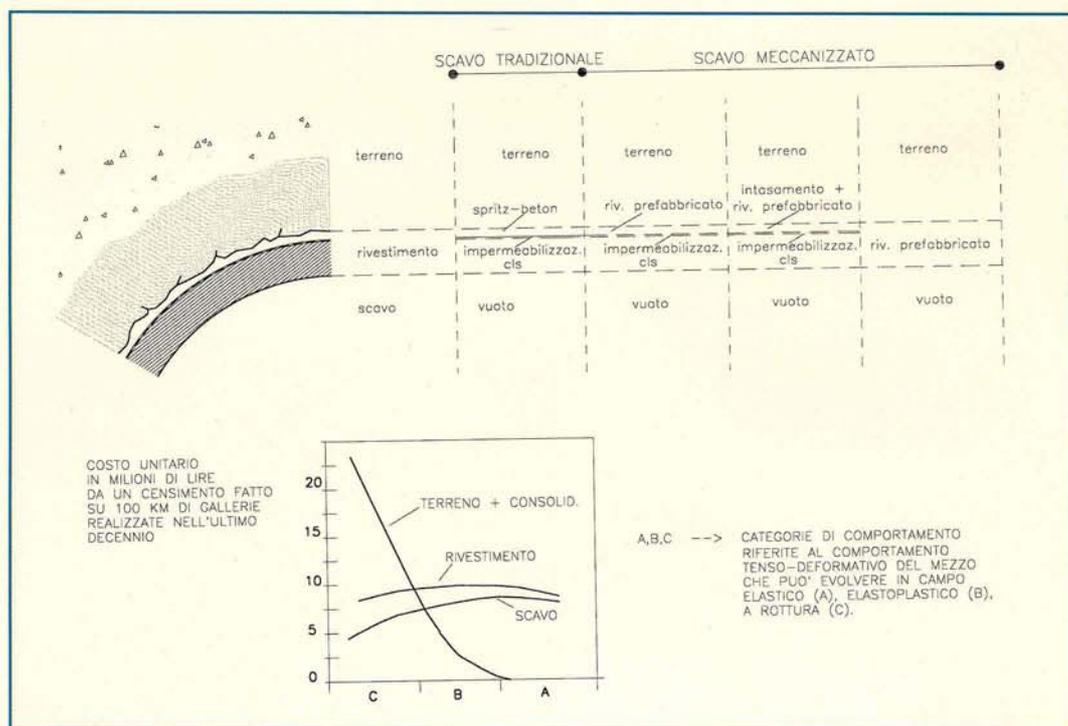


Fig. 4

a breve e lungo termine con i coefficienti di sicurezza richiesti.

E' questo il ruolo svolto dalle vere e proprie opere di rivestimento della galleria, solitamente costituite da:

- un rivestimento di prima fase, detto anche prerivestimento, consistente in un guscio di spritz-beton di adeguato spessore, eventualmente armato con rete elettrosaldata e centine. Nel caso di scavo meccanizzato, il rivestimento di prima fase spesso viene sostituito da un rivestimento prefabbricato che può essere anche definitivo ed eventualmente integrato con iniezioni d'intasamento a tergo;

- un arco rovescio di calcestruzzo, eventualmente armato, la cui realizzazione e i cui tempi di messa in opera sono funzione del comportamento tenso-deformativo dell'ammasso allo scavo;

- uno strato d'impermeabilizzazione, spesso formato da fogli di PVC termosaldati. L'impermeabilizzazione, che potrebbe erroneamente essere ritenuta indispensabile solo nel caso di scavi sotto falda, è invece sempre un elemento di grande importanza per l'integrità nel tempo delle strutture di prerivestimento e di rivestimento. Infatti, le acque meteoriche che penetrano nel terreno, se non appropriatamente deviate verso l'esterno del cavo, oltre a essere origine di fastidiosi gocciolamenti, producono il precoce ammaloramento di dette strutture,

specie se nel contatto con il terreno si caricano di agenti corrosivi. Vista in questo senso, l'impermeabilizzazione può senz'altro essere ritenuta un investimento per ridurre sensibilmente i costi di manutenzione della galleria nel tempo;

- un rivestimento di seconda fase, detto anche rivestimento definitivo, che può essere costituito da un guscio di calcestruzzo, eventualmente armato, o da conci prefabbricati, generalmente di elevata resistenza. Il compito del rivestimento definitivo è quello di adeguare il coefficiente di sicurezza della galleria al valore richiesto in fase di esercizio. I materiali impiegati per il suo confezionamento devono rispondere a precisi requisiti di qualità e durabilità.

Il rivestimento di prima fase, l'arco rovescio, lo strato d'impermeabilizzazione ed il rivestimento di seconda fase sono, in ogni caso, materiali confezionati, sui quali perciò, abbiamo il completo controllo riguardo a qualità, durabilità, tempi di messa in opera e costi.

Infine, per quanto concerne lo "scavo", abbiamo già evidenziato come attraverso la meccanizzazione lo si possa trasformare in un prodotto industriale ottenendo contemporaneamente:

- un significativo contenimento del suo costo entro valori quasi costanti, indipendentemente dal tipo di terreno e di situazione tenso-deformativa da affrontare;

- un miglior controllo sui fenomeni deformativi del fronte (estrusioni) e del cavo (convergenze) conseguenti all'azione dell'avanzamento, con grandi benefici per la statica a breve e a lungo termine della galleria.

PIETRO LUNARDI

BIBLIOGRAFIA

P. LUNARDI, "Progetto e costruzione di gallerie secondo il metodo basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli - Presostegno e preconfinamento", Quarry and Construction, Marzo 1994.

P. LUNARDI, "Progetto e costruzione di gallerie secondo il metodo basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli - Ruolo e risultati della ricerca sperimentale", Quarry and Construction, Marzo 1995.

P. LUNARDI, "Progetto e costruzione di gallerie secondo il metodo basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli - Proposta del nuovo approccio", Quarry and Construction, Aprile 1996.