

Aspetti progettuali e costruttivi nella realizzazione di gallerie in situazioni difficili. Interventi di precontenimento del cavo

Quando progettista e costruttore si trovano ad affrontare una galleria in situazioni geotecniche difficili la loro attenzione deve concentrarsi sul problema della stabilità del fronte di scavo: è dalla tenuta del nucleo d'avanzamento, infatti, che dipende la risposta in termini deformativi del terreno al contorno del cavo, quindi la stabilità a breve e lungo termine della galleria. Le nuove metodologie del pretaglio meccanico a piena sezione e del preconsolidamento del nucleo mediante tubi di vetroresina, messe a punto dallo scrivente nel corso degli ultimi anni, risolvono per la prima volta i problemi connessi alla stabilità del fronte di scavo. La memoria riporta i risultati ottenuti in Italia con l'applicazione di queste metodologie.

GENERALITÀ

L'apertura di una cavità nel sottosuolo produce sempre una perturbazione nel terreno circostante, in seguito alla quale si instaurano nel mezzo stati tensionali diversi, per caratteristiche ed entità, rispetto a quello originario.

A seconda del rapporto esistente tra l'entità delle nuove sollecitazioni e le caratteristiche di resistenza e deformabilità del terreno, e quindi a seconda della risposta deformativa del mezzo che influisce sulla stabilità della galleria, il cavo può assumere conseguentemente comportamenti di diverso tipo, riconducibili, comunque, a tre fondamentali (ADECO-RS) (Fig. 1):

a - comportamento di tipo lapideo a fronte stabile;

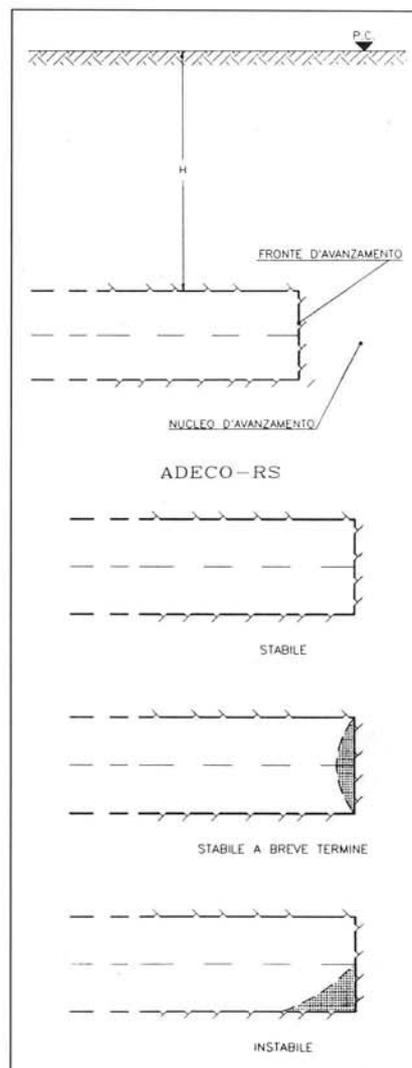
b - comportamento di tipo coesivo a fronte stabile a breve termine;

c - comportamento di tipo sciolto a fronte instabile.

Il primo caso, che si verifica quando le sollecitazioni indotte nel terreno non superano le caratteristiche di resistenza del mezzo, è caratterizzato da fenomeni deformativi che si evolvono in campo elastico. Esso non desta particolari preoccupazioni ai progettisti e ai costruttori di gallerie. Gli altri due casi, che si verificano quando le sollecitazioni indotte nel terreno superano le caratteristiche di resistenza del materiale, sono entrambi caratterizzati da fenomeni deformativi che si evolvono in campo elastoplastico, ma richiedono di essere trattati con metodologie d'intervento affatto diverse.

Mentre nel caso b) l'instabilità per effetto della plasticizzazione del terreno si

Fig. 1 - Condizioni di stabilità del nucleo d'avanzamento.



manifesta dopo il passaggio del fronte lasciando il tempo di operare con interventi tradizionali di contenimento radiale del cavo, nel caso c) i fenomeni d'instabilità coinvolgono il fronte stesso, rendendo assai difficoltoso, e talvolta impossibile, lo scavo della galleria con le tecniche tradizionali.

Quando progettista e costruttore si trovano ad affrontare una galleria in situazioni geotecniche difficili come quelle del caso c) credo che la loro attenzione debba concentrarsi soprattutto sul problema della stabilità del fronte di scavo: è dalla tenuta del nucleo, infatti, che dipende la risposta in termini deformativi del terreno al contorno del cavo, quindi la stabilità a breve e lungo termine della galleria.

È noto come qualsiasi allentamento per estrusione del nucleo di terreno al fronte provochi un abbattimento repentino della pressione originaria di confinamento $\sigma_3 = \sigma_r$ dell'ammasso al contorno della futura cavità ancor prima dell'arrivo del fronte di scavo stesso, predisponendo il terreno a deformazioni ra-

diali (convergenze) che una volta innescate risultano molto difficili da controllare e da regimare disponendo delle tradizionali tecniche di confinamento (centine, bulloni, spritz-beton, ecc.).

Ciò significa che, per evitare di avanzare costantemente in un terreno già detensionato e collassato e quindi di trovarsi ad affrontare situazioni incontrollabili, con notevole aggravio degli interventi di stabilizzazione del cavo, è imperativo garantire il mantenimento, a monte del fronte di avanzamento, di quella pressione originaria di confinamento σ_3 che, da un lato, solo il nucleo al fronte, se mantenuto integro, è in grado di esercitare, e che, dall'altro lato, è indispensabile per impedire il detensionamento dell'ammasso fino al momento della messa in opera degli interventi di confinamento del cavo.

Purtroppo, la scarsa conoscenza dei meccanismi in gioco ha portato sino a pochi anni fa ad affrontare questo problema in maniera del tutto inadeguata, perché del fenomeno dell'instabilità del nucleo veniva colto solo l'aspetto più

vistoso, l'impedimento delle normali operazioni d'avanzamento, senza sospettare ripercussioni particolari sulla statica a breve e lungo termine del cavo. Infatti, se riflettiamo un momento su quanto è stato suggerito in passato in tema di progettazione di gallerie, vediamo, per esempio, che Rabcewicz, Bieniawski e Barton, quando i terreni sono difficili e il fronte è instabile, si limitano a suggerire avanzamenti a sezione parzializzata, con il ricorso alla messa in opera di "sostegni" più o meno improvvisati per "tener su" in qualche modo il terreno, lasciando completamente irrisolto il problema statico e di conseguenza quello della programmazione degli scavi in termini di tempi e di costi. Le classificazioni che vengono consigliate dagli stessi Autori (Figg. 2a e 2b) denunciano conseguentemente dei grossi limiti, perché risolvono i problemi nel solo caso dei terreni di buona consistenza risultando di scarso ausilio nel caso dei terreni difficili.

Lombardi e Panet hanno studiato a fondo dal punto di vista teorico gli equi-

Fig. 2a - Classificazione delle rocce secondo V. Rabcewicz-Pacher.

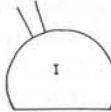
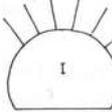
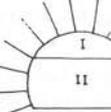
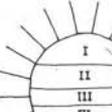
CLASSI DI ROCCIA	I DA STABILE A LEGERMENTE FRIABILE	II MOLTO FRIABILE	III DA FRANOSO A MOLTO FRANOSO	IV SPINGENTE	Va MOLTO SPINGENTE	Vb MATERIALE SCIOLTO
CARATTERISTICHE	MATERIALE COMPATTO, FESSURAZIONE DA LEGGERA A MEDIA	SUDDIVISIONE ACCENTUATA PER STRATIFICAZIONE E FRATTURAZIONE; LE SINGOLE FESSURE SONO PIENE DI MATERIALE ARGILLOSO; INTERCALAZIONI SCISTOSE.	ELEVATO GRADO DI SUDDIVISIONE PER STRATIFICAZIONE E FRATTURAZIONE IN PIÙ PIANI; LE FESSURE RISULTANO PIENE DI MATERIALI ARGILLOSI.	ROCCIA MOLTO ALTERATA; RIEPIGATA E SCISTOSA; FASCI DI FAGLIE; MATERIALE SCIOLTO BEN CONSOLIDATO, COERENTE.	MATERIALE COMPLETAMENTE MILONITIZZATO ED ALTERATO, RIDOTTO A GHIAIETTO, SCIOLTO NON CONSOLIDATO, LEGGERMENTE COERENTE.	MATERIALE SCIOLTO, INCOERENTE.
COMPORTEMENTO	LA RESISTENZA DELLA ROCCIA ALLA COMPRESSIONE UNIASSIALE σ_{cd} È MAGGIORE DELLA TENSIONE TANGENZIALE σ_r ; CONDIZIONI DI EQUILIBRIO PERMANENTE ESISTENTE O ASSICURATO DA: MISURE DI PROTEZIONE LOCALE	RINFORZO DELL'ANELLO DI ROCCIA PORTANTE IN CALOTTA.	IL LIMITE DI RESISTENZA DELLA ROCCIA VIENE RAGGIUNTO E SUPERATO AL CONTORNO DELLA SEZIONE. SONO NECESSARI SOSTEGNI E LA CREAZIONE DI UN ANELLO DI ROCCIA PORTANTE.	LE TENSIONI TANGENZIALI SUPERANO LA RESISTENZA DELLA ROCCIA. IL MATERIALE, A COMPORTAMENTO PLASTICO, TENDE VERSO LA CAVITÀ RIDUCENDONE LA SEZIONE; FENOMENO DI INTENSITÀ: MEDIA FORTE SPIRTE LATERALI E SOLLEVAMENTO DELLA PLATEA. I MOVIMENTI VENGONO CONTRASTATI DALL'ANELLO PORTANTE COMPLETAMENTE CHIUSO.	VEDI CLASSE Va	
INFLUENZA DELL'ACQUA	NESSUNA.	IRRELEVANTE.	PREVALENTE SUL CAVO DELLE FESSURE.	DISCRETA.	ANCHE FORTE (IL MATERIALE TENDE AD IMBIBIRSI)	
SCAVO	A PIENA SEZIONE. 	A PIENA SEZIONE 	CALOTTA E STROZZO 	A SEZIONI PARZIALI I+IV 	A SEZIONI PARZIALI I+VI 	A SEZIONI PARZIALI I+VI 

Fig. 2b

Geomechanics Classification guide for excavation and support in rock tunnels
Shape: horseshoe; Width: 10 m; Vertical stress: below 25 MPa; Construction: drilling and blasting

Rock mass class	Excavation	Support		
		Rockbolts (20 mm dia., fully bonded)	Shotcrete	Steel sets
1. Very good rock RMR: 81-100	Full face: 3 m advance	Generally no support required except for occasional spot bolting		
2. Good rock RMR: 61-80	Full face: 1.0-1.5 m advance; Complete support 20 m from face	Locally bolts in crown 3 m long, spaced 2.5 m with occasional wire mesh	50 mm in crown where required	None
3. Fair rock RMR: 41-60	Top heading and bench: 1.5-3 m advance in top heading; Commence support after each blast; Complete support 10 m from face	Systematic bolts 4 m long, spaced 1.5 m-2 m in crown and walls with wire mesh in crown	50-100 mm in crown and 30 mm in sides	None
4. Poor rock RMR: 21-40	Top heading and bench: 1.0-1.5 m advance in top heading; Install support concurrently with excavation-10 m from face	Systematic bolts 4-5 m long, spaced 1-1.5 m in crown and walls with wire mesh	100-150 mm in crown and 100 mm in sides	Light ribs spaced 1.5 m where re- quired
5. Very poor rock RMR: < 20	Multiple drifts: 0.5-1.5 m advance in top heading; Install support concurrently with excavation; shotcrete as soon as possible after blasting	Systematic bolts 5-6 m long, spaced 1-1.5 m in crown and walls with wire mesh. Bolt invert	150-200 mm in crown 150 mm in sides and 50 mm on face	Medium to heavy ribs spaced 0.75 m with steel lagging and forepoling if required. Close invert

libri che si creano in corrispondenza al fronte di scavo di una galleria. Lombardi, con la teoria delle linee caratteristiche, ha il merito di aver evidenziato il contributo della resistenza del nucleo nel gioco di questi equilibri; Panet, esaminando attraverso l'applicazione dei teoremi limite della teoria della plasticità le condizioni di equilibrio longitudinale e trasversale del fronte di un tunnel circolare rivestito per tutta la lunghezza con un manufatto perfettamente rigido, ha fornito alcune interessanti soluzioni, ma i loro contributi possono essere correttamente applicati, quando le condizioni sono difficili, solo al caso di gallerie scavate con scudi.

Se si esamina quanto è stato fatto in passato in tema di costruzione di gallerie in situazioni difficili, si vede che il problema della stabilità del nucleo al fronte di scavo è affrontato con metodologie diverse, in funzione delle condizioni al contorno dettate dalle situazioni morfologiche, geologico-geotecniche, idrologiche, e dalla geometria degli scavi. Le metodologie più conosciute sono (Fig. 3):

- la parzializzazione della sezione di scavo;
- il confinamento del fronte di scavo.

La parzializzazione del fronte di scavo è una metodologia, nata probabilmente con la prima galleria scavata dall'uomo. Essa, prestandosi con difficoltà ad essere oggetto di tecniche innovative, a tutt'oggi non fa registrare particolari

progressi, nonostante venga impiegata ricorrentemente essendo la sua utilizzazione ancora prevista da alcuni sistemi costruttivi quali il NATM a cui, ancora oggi, fanno purtroppo riferimento tante amministrazioni nei propri capitolati.

Il confinamento del fronte di scavo è una metodologia che, per l'avanzamento in terreni difficili in assenza di falda acquifera, prevede l'impiego di mezzi meccanici (scudi integrali muniti di attrezzi di brandaggio o teste fresanti di vario tipo), per l'avanzamento in terreni in presenza di falda acquifera prevede, invece, l'impiego di fluidi in pressione (scudi a fanghi bentonitici, ecc.).

Il confinamento del fronte è stato oggetto, soprattutto negli ultimi anni, di studi e di affinamenti tecnologici che ne hanno incrementato l'affidabilità in termini progettuali, operativi e di produzione. Quindi, anche se non si può parlare di novità sotto il profilo metodologico, si registrano notevoli progressi nella messa a punto delle tecnologie di confinamento del fronte, con particolare riferimento all'impiego di fluidi e liquidi in pressione, ai quali si accompagnano conseguentemente anche quelli relativi ai sistemi di confinamento del cavo, mediante rivestimenti in calcestruzzo prefabbricato o estruso.

A queste metodologie tradizionali se ne è aggiunta una nuova, proposta e messa a punto dallo scrivente nel corso degli ultimi anni, che si distingue per il fatto

che, durante l'avanzamento, impone di agire sul terreno prima del passaggio del fronte, impedendone il detensionamento.

Si tratta della *realizzazione di interventi conservativi sul nucleo al fronte di scavo*, che risolve la stabilità del fronte per vie diverse, ma complementari: da un lato scaricando il nucleo al fronte grazie all'azione di effetti arco artificiali prodotti dall'impiego di gusci di precontenimento del cavo, costituiti da terreno consolidato o da spritz-beton fibrorinforzato, lanciati in avanzamento oltre il fronte, realizzati con la tecnica del jet-grouting in orizzontale o con quella del pretaglio meccanico; dall'altro lato incrementando direttamente la resistenza al taglio del nucleo con consolidamenti di tubi in vetroresina ad interasse e di lunghezza variabili in funzione delle diverse situazioni geotecniche.

È noto come questi interventi di precontenimento del cavo e preconsolidamento del nucleo possano essere realizzati separatamente o contemporaneamente passando dai terreni incoerenti a quelli coesivi a seconda delle diverse condizioni di saturazione.

Si rimanda, per il jet-grouting in orizzontale alle pubblicazioni in bibliografia. In questa nota verranno trattati il pretaglio meccanico e il preconsolidamento del nucleo con tubi di vetroresina, proposti più recentemente dallo scrivente.

IL PRETAGLIO MECCANICO

Il pretaglio meccanico consiste nel praticare un'incisione di spessore e lunghezza predeterminati sul fronte di scavo, lungo la traccia del profilo d'estradosso della futura galleria.

L'incisione, ottenuta mediante una speciale macchina dotata di testa fresante a catena, viene immediatamente riempita con calcestruzzo spruzzato fibrorinforzato, opportunamente additivato per ottenere eccellenti doti di resistenza in tempi brevi (Fig. 4a). Si realizza così un prerivestimento in materiale cementizio, lanciato oltre il fronte di scavo, capace di garantire un precontenimento radiale del terreno circostante tale da impedirne l'allentamento. Una volta passato il fronte d'avanzamento esso viene irrigidito il più presto possibile eseguendo il getto delle murette e dell'arco rovescio. Il rivestimento finale in calcestruzzo potrà essere completato successivamente.

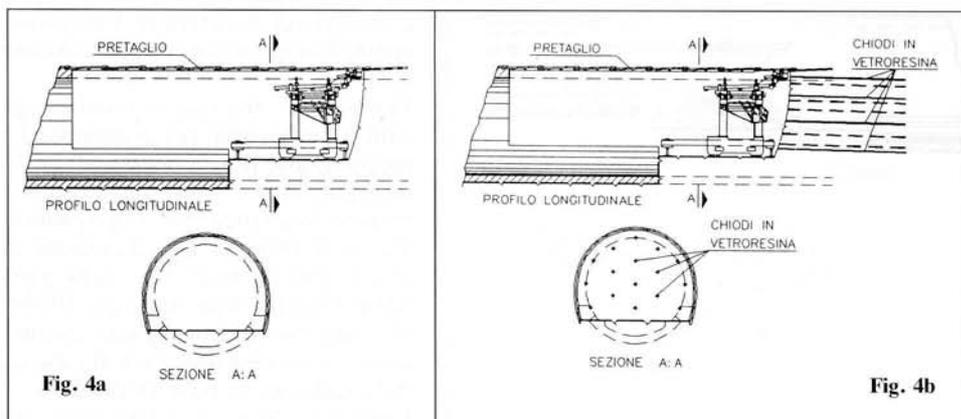
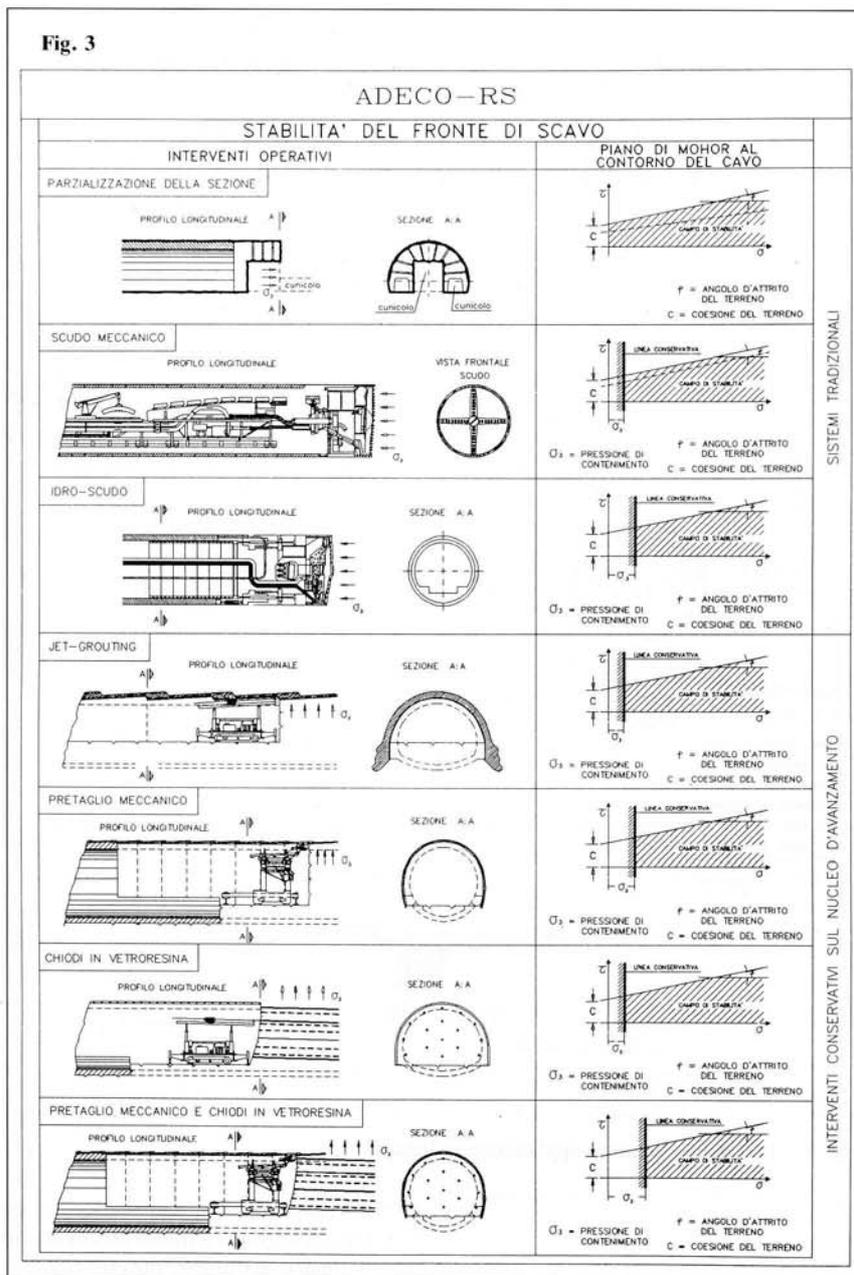
Il meccanismo attraverso il quale il pretaglio meccanico raggiunge lo scopo di migliorare sensibilmente il comportamento allo scavo di un terreno è duplice:

- l'azione di pre-contenimento radiale, evitando l'annullamento anche solo transitorio della tensione principale minore σ_3 , riduce o annulla l'estensione della plasticizzazione attorno al cavo mettendo in condizione il terreno di autosostenersi e di sviluppare un "effetto arco" in avanzamento tale da assicurare la stabilità trasversale della galleria;
- il tegolo di spritz-beton sporgente circa 4 m oltre il fronte, spostando più all'interno dell'ammasso la zona d'innescio di eventuali fenomeni d'estrusione, ne differisce la comparsa e ne diminuisce gli effetti.

La buona stabilità del fronte di scavo è presupposto importante per la riuscita del sistema. Nei casi in cui essa non è sufficientemente garantita dal solo guscio del pretaglio è indispensabile accoppiare sistemi di preconsolidamento del nucleo mediante tubi di vetroresina (Fig. 4b) o, in terreni acquiferi, mediante aureole di drenaggi in avanzamento.

Risultati delle applicazioni

Il metodo del pretaglio meccanico si può considerare ormai giunto alla piena ma-



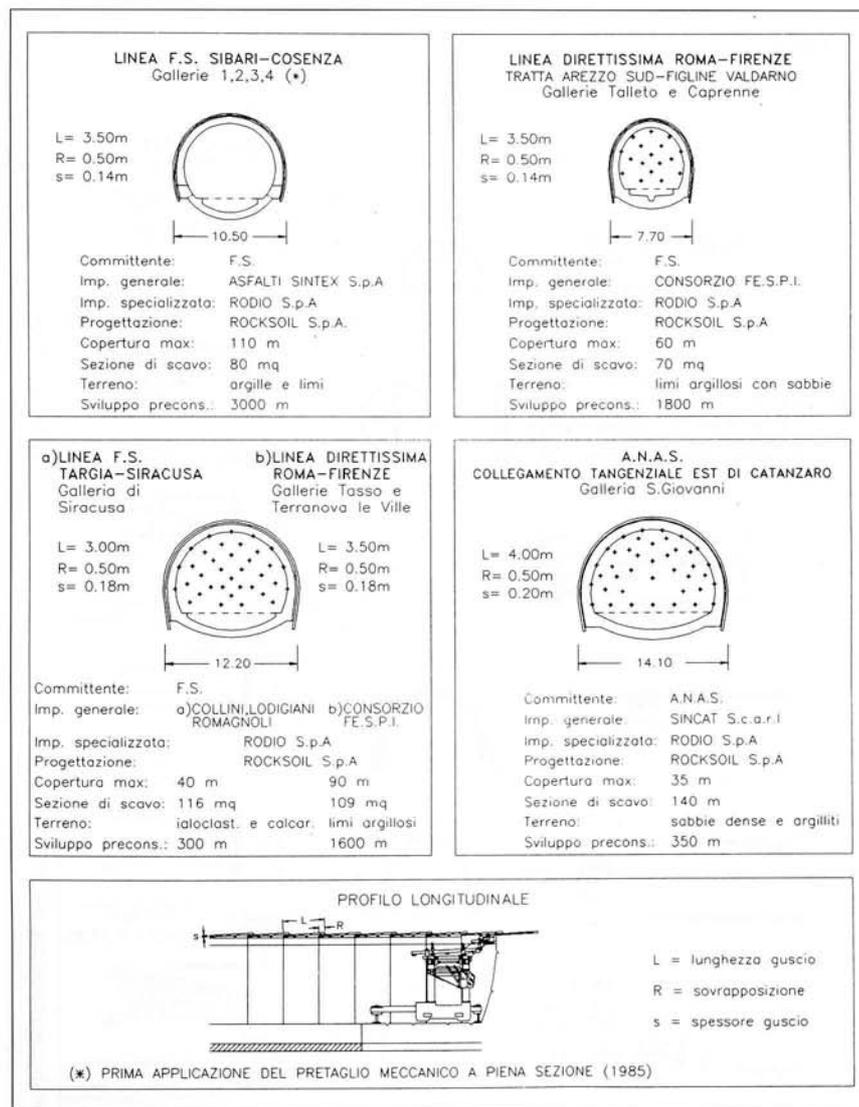
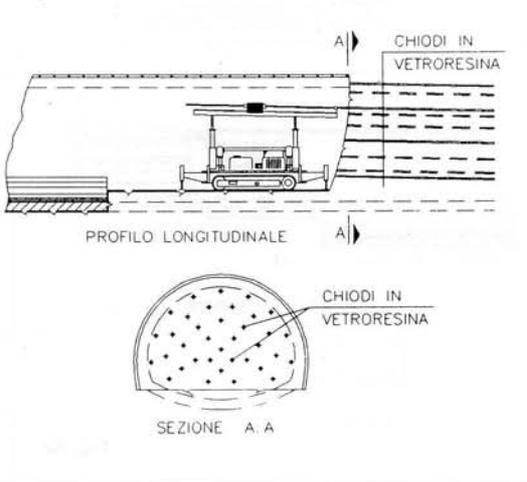


Fig. 5 - Pretaglio meccanico applicazioni in Italia.

Fig. 6



turità. Il suo campo d'applicazione va dai terreni argillosi a quelli limosi anche eterogenei e acquiferi, purché consentano, magari adottando particolari precauzioni, di mantenere l'incisione aperta il tempo necessario per realizzare il getto.

Dopo il suo impiego, avvenuto negli anni '70 in Francia, per avanzamenti a mezza sezione in gallerie di modeste dimensioni, la sua prima applicazione a piena sezione (circa 85 m²) è avvenuta in Italia nel 1985 per la realizzazione di alcune gallerie ferroviarie sulla linea Sibari-Cosenza (Lunardi et al., 1989). Da allora esso è stato applicato con notevole successo su oltre 6 km di gallerie, tutte realizzate in Italia (Fig. 5).

Con esso è stato possibile realizzare

avanzamenti a piena sezione, con produzioni medie dell'ordine di 3 m/giorno, su gallerie di 70-100 m² di sezione, in tempi programmati e in assoluta sicurezza operativa, in terreni ove altre tecnologie avevano fallito.

Le misure e i controlli eseguiti costantemente durante i lavori di scavo, oltre a consentire la definitiva messa a punto delle cadenze d'avanzamento e dei sistemi operativi, hanno permesso di verificare anche i vantaggi che questo sistema può offrire in termini reali di contenimento dei fenomeni deformativi e quindi, nel caso di gallerie corticali, di cedimenti in superficie. Si sono riscontrati valori medi di convergenza e cedimenti in superficie, nei tratti più corticali, millimetrici, di un ordine di grandezza più ridotti rispetto a quelli normalmente osservati in scavi eseguiti con metodi tradizionali in terreni analoghi. Essi iniziano a prodursi nel terreno solo alcuni decimetri prima dell'arrivo del fronte d'avanzamento.

Altre prerogative importanti nel metodo che si sono potute direttamente riscontrare sono:

- eliminazione quasi totale dei fuori sagoma e quindi sensibile riduzione della necessità di iniezioni di intasamento tra prerivestimento e terreno;
- riduzione dell'incidenza dei sostegni provvisori, in quanto praticamente sostituiti dal guscio del pretaglio;
- meccanizzazione spinta delle lavorazioni e regolarizzazione delle cadenze di avanzamento con vantaggiose ripercussioni sull'economia del cantiere e sulle produzioni ottenibili;
- realizzazione di un prerivestimento collaborante alla statica del rivestimento definitivo che può essere convenientemente ridotto di spessore.

IL PRECONSOLIDAMENTO DEL FRONTE MEDIANTE TUBI IN VETRORESINA

Il metodo consiste nel praticare sul fronte, in direzione sub-parallela all'asse della galleria, una serie di fori regolarmente distribuiti sull'area d'intervento. Entro i fori vengono inseriti tubi di vetroresina che sono immediatamente iniettati con malta di cemento (Fig. 6).

La profondità dell'intervento, oltre che dal diametro della galleria, è regolata anche, da un lato dalla convenienza a limitare l'incidenza di queste operazioni

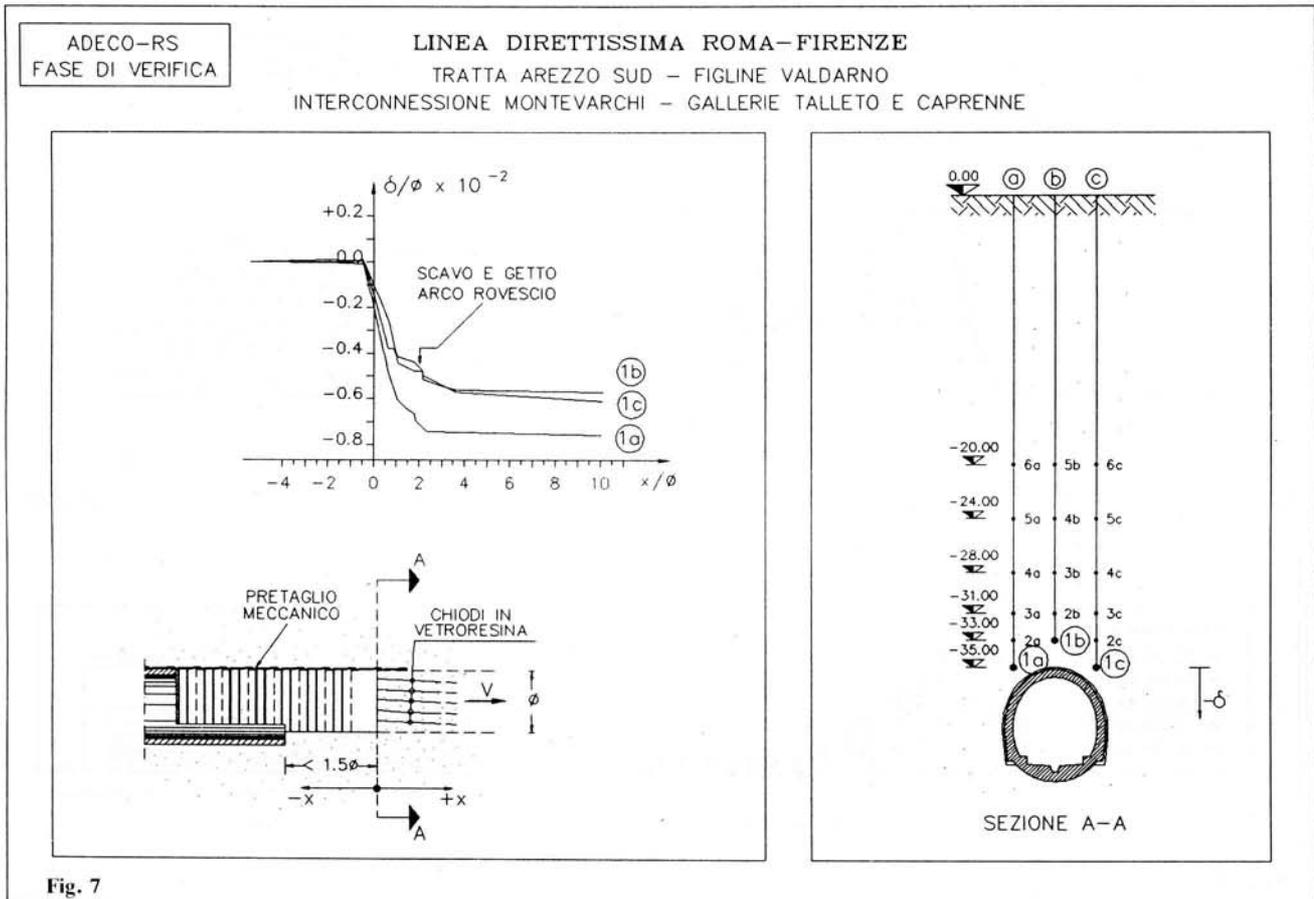


Fig. 7

per unità di lunghezza della galleria, dall'altro lato dall'impossibilità di operare agevolmente con tubi di lunghezza eccessiva.

La sua intensità è invece funzione della resistenza al taglio del terreno naturale, delle pressioni litostatiche in gioco e delle dimensioni della sezione di scavo. L'idea di utilizzare tubi di vetroresina è stata determinante per l'affermazione di questo tipo di preconsolidamento, in quanto il vetroresina unisce a elevati valori di resistenza una notevole fragilità, per cui risulta agevole, durante le operazioni di scavo, spezzare i tubi con la stessa benna che serve per l'escavazione del terreno.

Quando, in seguito all'avanzamento, la lunghezza residua dei tubi inseriti nel fronte risulta inferiore al raggio della galleria, si procede a metterne in opera una nuova serie.

L'intervento, se ben progettato e realizzato, consente di ottenere un sensibile miglioramento delle caratteristiche di resistenza e deformabilità del terreno costituente il nucleo del fronte di scavo della galleria.

Ciò si traduce in:

- ridotte deformazioni plastiche trasversali in corrispondenza del fronte della galleria, quindi fenomeni di convergenza contenuti e spesso trascurabili (effetto di pre-contenimento del cavo);
- conservazione delle caratteristiche intrinseche di resistenza e deformabilità del terreno all'estradosso della successiva porzione di materiale da scavare, quindi sensibile riduzione delle spinte a breve e lungo termine sui rivestimenti di prima e di seconda fase;
- irrigidimento del terreno al nucleo, quindi fenomeni d'estrusione nulli o comunque molto ridotti.

RISULTATI DELLE APPLICAZIONI

Il sistema è stato applicato per la prima volta durante gli scavi per la realizzazione delle gallerie a semplice binario "Talleto" e "Caprenne", oggi in servizio, facenti parte del tratto d'interconnessione tra la nuova linea ferroviaria "Direttissima" Roma-Firenze e quella

vecchia all'altezza di Montevarchi, nella tratta Arezzo Sud-Figline Valdarno.

L'avanzamento degli scavi, sotto coperture massime dell'ordine di 65 m, è avvenuto entro terreni sabbio-limosi e limo-sabbiosi, con intercalazioni argillo-limose contenenti lenti e livelli di sabbia saturi d'acqua. Lo stesso materiale, durante la costruzione di altre gallerie, aveva causato notevoli difficoltà d'avanzamento per instabilità del fronte. Si decise quindi di eseguire gli scavi sotto la protezione di trattamenti sistematici di precontenimento del cavo e/o preconsolidamento del nucleo, lanciati in avanzamento. Essi sono consistiti in:

- drenaggi in avanzamento;
- pretaglio meccanico e tubi di vetroresina iniettati sul nucleo di terreno al fronte (nel caso di materiali dotati di coesione);
- jet-grouting in orizzontale e tubi di vetroresina iniettati sul nucleo di terreno al fronte (nel caso di materiali incoerenti).

Si sono così realizzati oltre 3300 m di scavi a piena sezione di 60m², riuscendo a contenere i fenomeni deformativi en-

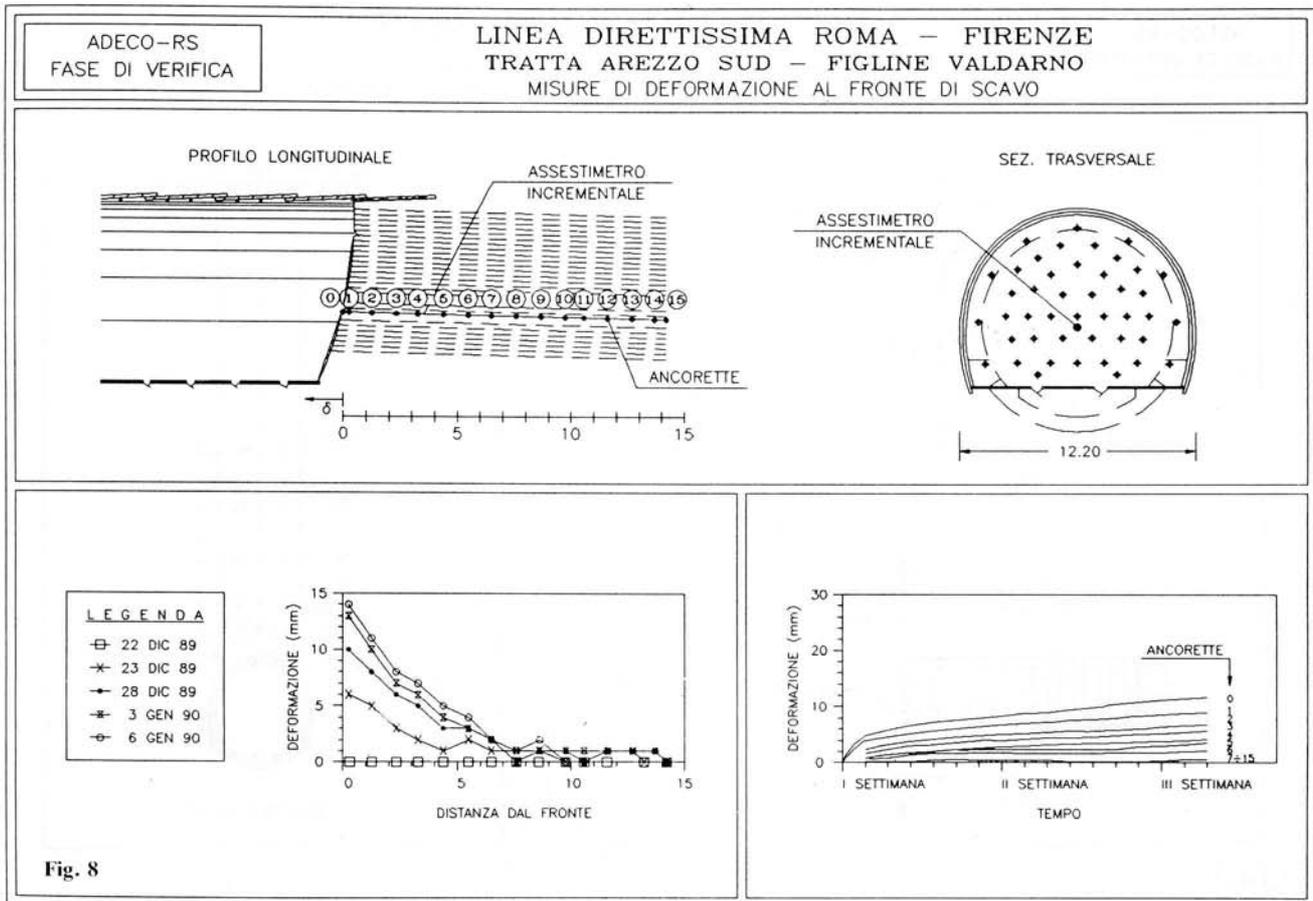


Fig. 8

tro valori di convergenza media inferiori a 4 cm.

Misure eseguite mediante la posa di estensimetri dall'alto (Fig. 7) avevano mostrato che i movimenti del terreno al contorno del cavo iniziavano a prodursi non prima che il fronte di scavo giungesse a solo 0.5 m dalla sezione di misura, e questo costituiva una conferma certa dell'efficacia del sistema di trattamento.

Confortati dal buon esito dimostrato, la nuova tecnologia d'avanzamento si è applicata anche per la costruzione delle gallerie a doppio binario (sezione di circa 115 m²) Tasso, Crepacuore, Poggio Orlandi, Terranova Le Ville, nelle tratte dove la situazione geologico-geotecnica poteva far prevedere l'insorgenza di fenomeni d'instabilità del fronte di scavo.

I risultati ottenuti sono di tutto rispetto: grazie all'efficacia del preconsolidamento, nonostante si procedesse a piena sezione, non si sono mai verificati fenomeni d'instabilità del fronte di scavo, e

questo ha consentito di avanzare con grande regolarità e con produzioni medie di circa 2,5 m/giorno.

Durante gli oltre 6000 m di scavi realizzati le convergenze misurate si sono mantenute sempre entro valori molto ridotti, mentre non si sono mai verificati movimenti estrusivi superiori al centimetro e mezzo (Fig. 8).

La Fig. 9 riassume l'applicazione del preconsolidamento del fronte mediante tubi di vetroresina in lavori già realizzati o in corso di esecuzione.

SPERIMENTAZIONE

Nella prospettiva di affrontare lo studio del comportamento di un fronte consolidato, attualmente si stanno mettendo a punto delle metodologie per prove di estrusione su campione di terreno in campo triassiale. Lo scopo non è tanto quello di ottenere risposte definitive sul problema, quanto quello di accedere a parametri misurati che possano permettere la taratura di un

equivalente modello matematico. Le possibilità di intervenire successivamente su quest'ultimo, sfruttando tutte le possibilità offerte dalla notevole flessibilità intrinseca nel metodo degli elementi finiti, giustifica la scelta iniziale della doppia modellazione (fisica e numerica).

Successivamente, sulla base dei risultati dei dati relativi a prove in situ di estrazione di singoli tubi di vetroresina potrà essere valutata l'interazione nucleo-tubi sul fronte di scavo di una galleria. In questo caso il calcolo può essere sviluppato per fasi operando su un modello globale di galleria e tenendo conto nella giusta sequenza delle fasi di consolidamento e di scavo.

Lo studio del comportamento non lineare (elastoplastico con o senza viscosità), potendo contare sulla taratura dei parametri geomeccanici, potrà fornire affidabili indicazioni globali (in qualche caso di dettaglio) sullo stato tenso-deformativo del terreno e delle parti strutturali.

CONCLUSIONI

Le metodologie presentate, il cui sviluppo è avvenuto solo recentemente, stanno trovando vaste applicazioni nel campo del tunnelling, soprattutto perché, per la prima volta, permettono di affrontare lo scavo anche delle gallerie più difficili, seppure a piena sezione, con gli stessi criteri di pianificazione, in termini di tempi e di costi, che sono sempre stati una esclusiva delle opere in sotterraneo realizzate nei terreni di buona consistenza.

Ciò significa che progettare e costruire una galleria in situazioni difficili oggi può non essere più frutto d'improvvisazione solo se in fase di progettazione si fa riferimento al calcolo numerico per la previsione della risposta deformativa del terreno ed in fase di costruzione si adottano le nuove tecniche di preconsolidamento del cavo e di preconsolidamento del nucleo al fronte che consentono di industrializzare lo scavo di avanzamento pur non impiegando sistemi meccanici rigidi come ad esempio gli scudi.

In terreni per i quali la maggior parte dei dissesti ha origine dal nucleo d'avanzamento e si ripercuote sulla stabilità e tenuta del perimetro della cavità, investire sul fronte di scavo diventa un'economia. Le recenti applicazioni di questa metodologia ed i risultati conseguiti sia in termini di costi sia in termini di produzioni sono lì a dimostrarlo.

Pietro Lunardi

(Università degli Studi di Parma)

BIBLIOGRAFIA

RABCEWICZ L.V. (1969): *Stability of tunnels under rock load*, "Warer power", n. 6, 7, 8.
 AMBERG W.A., LOMBARDI G. (1974): *Une méthode de calcul élastoplastique de l'état de tension et de déformation autour d'une cavité souterraine*, Proceedings III Congress I.S.R.M., Denver.
 BARTON N., LIEN R., LUNDE J. (1974): *Engineering classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support*, "Rock Mechanics", Vol. 6.

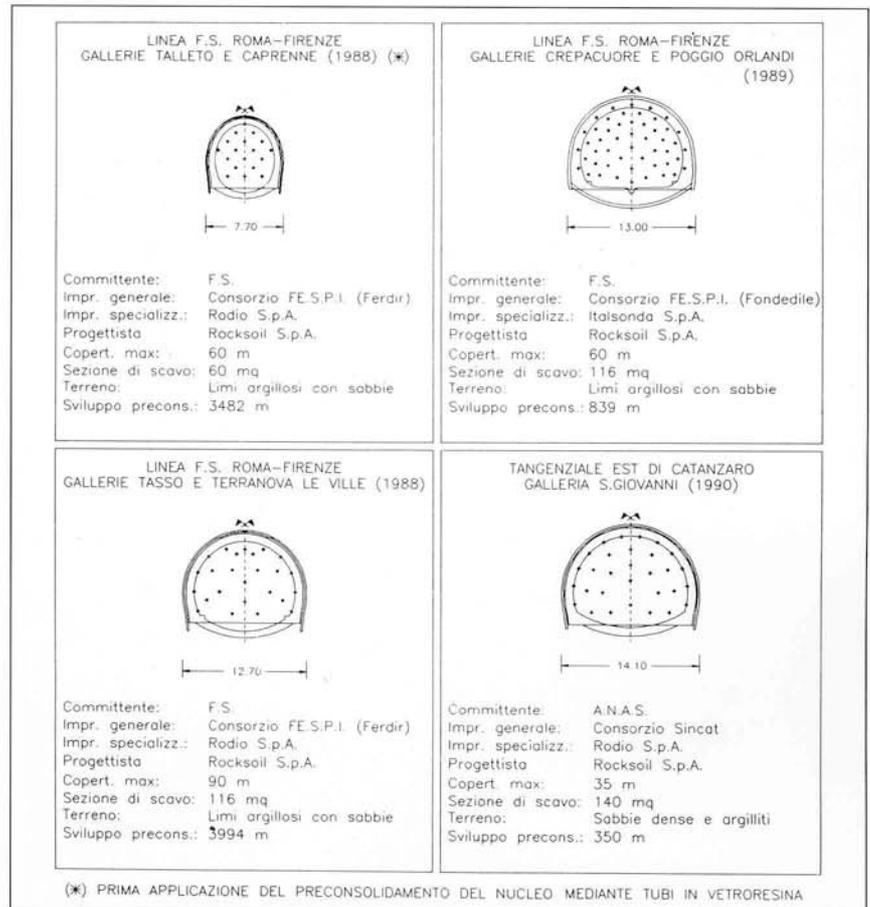


Fig. 9 - Preconsolidamento del nucleo mediante tubi in vetroresina.

BIENIAWSKI Z.T. (1984): *Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling*, Ed. Balkema, Rotterdam.
 LUNARDI P., LOUIS C. (1984): *Méthodes de présoutènement et pré-étanchement pour les travaux en souterrain*, Journées d'études internationales, Lione
 LOUIS C., LUNARDI P. (1984): *Consolidation des sols par la technique de jet-grouting. Etat des connaissances et expériences*, Colloque International "Renforcement en place des sols des roches", Parigi.
 LUNARDI P., MONGILARDI E., TORNAGHI R. (1986): *Il preconsolidamento mediante jet-grouting nella realizzazione di opere in sotterraneo*, Atti del Congresso Internazionale su "Grandi Opere Sotterranee", Firenze.
 CAMARGO GUAZZELLI J.L., LUNARDI P. (1988): *Tunnel de Campi-*

nas: evolución del diseño y problemas de operación, Atti del Congresso Internazionale su "Le gallerie e l'Acqua", Madrid.
 LUNARDI P. (1988): *ADECO-RS Analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli*, Seminar on "Design and Construction of Tunnels", ISMES, Bergamo.
 LUNARDI P., BINDI R., FOCARACCI A. (1989): *Nouvelles orientations pour le projet et la construction des tunnels dans des terrains meubles. Etudes et expériences sur le préconfinement de la cavité et la préconsolidation du noyau au front*, Colloque International "Tunnels et micro-tunnels en terrain meuble", Parigi.
 LECA E., PANET M. (1989): *Application du calcul à la rupture à la stabilité du front de taille d'un tunnel*, "Revue Française de Géotechnique", n. 48.