

NUOVI CRITERI DI PROGETTO E COSTRUZIONE PER UNA CORRETTA PIANIFICAZIONE DELLE OPERE IN SOTTERRANEO

Autore: Prof. Ing. Pietro Lunardi, Università di Parma

1 INTRODUZIONE

Se, in tema di gallerie ci si chiede che cosa sia cambiato in duemila anni di storia nel campo della progettazione e della costruzione credo che la risposta corretta possa essere una:

- in fatto di conoscenza dei criteri statici che regolano la stabilità di un cavo non è cambiato nulla, basti pensare a come venivano affrontati gli scavi in epoca greca e romana: con cunicoli in chiave allargandosi a scendere fino al piano di platea, del tipo di quelli ritrovati nelle Latomie di Siracusa (Orecchio di Dionisio);
- in fatto di tempi esecutivi molto poco è cambiato, infatti se solo ci si riferisce ai risultati del confronto tra il traforo ferroviario del Frejus del 1863 ed il corrispondente traforo autostradale terminato nel 1980, realizzati a più di un secolo di distanza, si osserva che mentre nel 1863 l'avanzamento medio annuo su sezione a doppio binario fu dell'ordine di 800 ml, nel 1980, su sezione di tipo autostradale, l'avanzamento non superò i 1200 ml; in un secolo è aumentata sì la meccanizzazione, ma è anche diminuito in proporzione di 1:20 l'impiego della manodopera;
- il vero cambiamento è invece avvenuto in fatto di rapporti di interdipendenza tra progettazione e costruzione di gallerie: oggi, grazie ai sistemi di previsione basati sul calcolo numerico ed alle nuove tecniche di scavo e di stabilizzazione delle pareti di scavo, che si affidano alla collaborazione del terreno, il progetto e la costruzione di un'opera in sotterraneo non si identificano, come è sempre avvenuto fino a qualche anno fa, ma rappresentano due momenti distinti e con una fisionomia ben definita in termini cronologici e pratici:
 - a) il momento della progettazione, è quello in cui, una volta definita la geometria dei volumi da scavare, sulla base di

una corretta modellazione dei terreni, si fanno previsioni (con l'aiuto di sistemi e modelli matematici) su natura ed entità dei fenomeni deformativi che si innescheranno nel terreno circostante la cavità al momento in cui con lo scavo verrà modificato lo stato tensionale preesistente nel sottosuolo. Si fanno ipotesi su fasi, mezzi e cadenze di scavo, su tipologia ed intensità degli interventi di regimazione dei fenomeni deformativi, compresi tutti i sistemi di stabilizzazione delle pareti di scavo di tipo attivo e di tipo passivo disponibili. Il progetto di una galleria si identifica quindi con lo studio, la previsione e la regimazione dei fenomeni "deformativi";

- b) il momento della costruzione è quello in cui si opera la deviazione del flusso delle tensioni preesistenti nel mezzo in cui si avanza e la sua conseguente canalizzazione al contorno dello scavo, in maniera da rendere minimo il disturbo al terreno in termini geomeccanici e quindi deformativi. Minore risulterà questo disturbo, minori risulteranno gli interventi richiesti per la stabilizzazione e la conservazione delle pareti di scavo, quindi maggiore risulterà, in definitiva, l'economia. E' il momento della verifica e del controllo delle scelte operative (fasi, mezzi e cadenze di scavo effettuate in fase progettuale) che possono influenzare in maniera determinante quello che viene definito il comportamento allo scavo del terreno o la risposta del terreno allo scavo ed agli interventi di stabilizzazione.

Credo che un importante contributo a questa nuova impostazione in tema di "progetto e costruzione di gallerie" sia stata la messa a punto del "metodo ADECO-RS", un metodo di progettazione e di costruzione di gallerie innovativo, che ha permesso di superare i limiti connessi alle teorie ed ai sistemi tradizionali fornendo un criterio di classificazione nuovo, valido per qualsiasi tipo di terreno, che raccoglie in sé tutti i progressi fatti negli ultimi anni in campo geognostico, di mezzi di calcolo e di tecnologie di avanzamento in condizioni difficili.

Ciò comporta come diretta conseguenza che:

- 1) non si è più costretti, in fase di costruzione di una galleria, a subire passivamente i fenomeni deformativi che, insieme all'acqua, sono l'unica insidia per la stabilità dei cavi, perchè siamo ormai in grado di prevederli e di regimarli. Ciò comporta, come diretta conseguenza, l'eliminazione totale dal vocabolario delle opere in sotterraneo della parola "sostegno" a cui in futuro si dovrà, salvo situazioni eccezionali, ricorrere solo nei casi in cui si sarà commesso qualche errore progettuale o costruttivo;
- 2) è possibile pianificare la costruzione di un'opera in sotterraneo, analogamente a quanto avviene in un qualsiasi altro campo dell'ingegneria, sia in termini di tempi di esecuzione sia in termini di costi.

Anche nel campo delle opere in sotterraneo si sta finalmente raggiungendo quella chiarezza, in fatto di assunzioni progettuali e scelte costruttive che non lascino niente all'improvvisazione, richiesta per ogni opera di ingegneria che si rispetti.

2 IL METODO ADECO-RS

2.1 Generalità

Il metodo ADECO-RS (Analisi delle DEformazioni Controllate nelle Rocce e nei Suoli) si contraddistingue, da quelli che sono stati sino ad oggi seguiti, per diverse importanti caratteristiche:

- 1) il progetto e la costruzione di una galleria non si identificano più come in passato, ma rappresentano due momenti ben distinti e con una fisionomia ben definita in termini cronologici e pratici;
- 2) il metodo è basato sulla previsione, il controllo e l'interpretazione della risposta deformativa dell'ammasso allo scavo, che diventa l'unico parametro a cui riferirsi prima per via teorica, come oggetto di previsione e regimazione, poi per via sperimentale, come oggetto di lettura ed interpretazione per la messa a punto del progetto in corso d'opera.
- 3) viene introdotto il concetto di precontenimento del cavo (fig. 1), che completa il già noto concetto di contenimento consentendo di superare anche le più difficili condizioni statiche in maniera programmata, senza ricorrere ad improvvisazioni costruttive;
- 4) prevede l'impiego dei sistemi conservativi, per mantenere quanto più possibile inalterate le caratteristiche strutturali del terreno, inteso come materiale da costruzione, quando queste giocano un ruolo fondamentale sulla velocità e la cadenza di avanzamento dei lavori in sotterraneo.

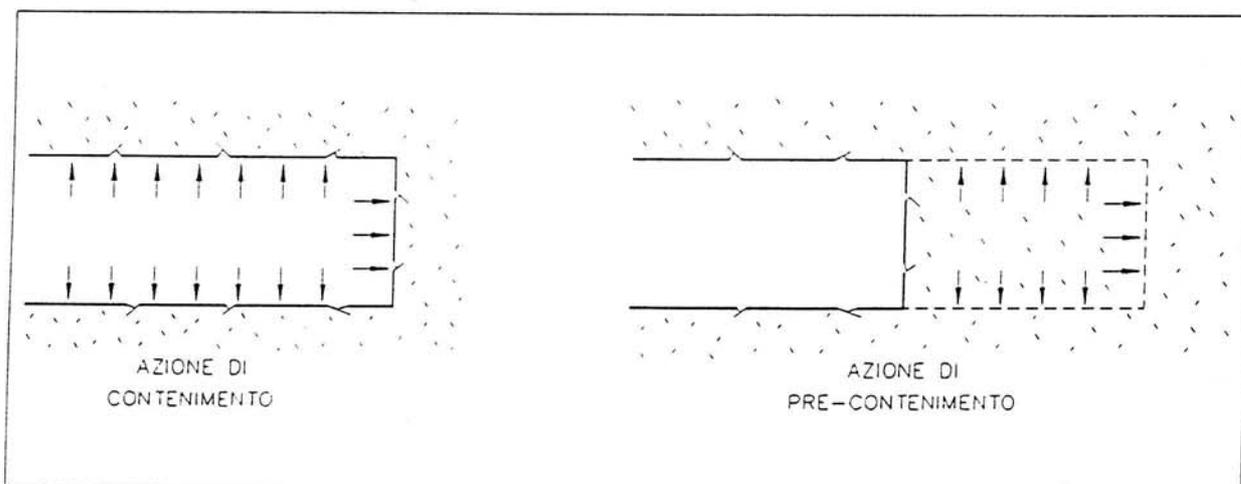


Fig. 1: azione di contenimento e di precontenimento.

2.2 Criteri di classificazione

Elemento peculiare del metodo è l'introduzione di un nuovo sistema di classificazione.

Partendo dall'osservazione che le deformazioni del terreno durante lo scavo e quindi la stabilità stessa di una galleria sono legate al comportamento del nucleo d'avanzamento, l'ADECO-RS assume, come elemento di classificazione, la stabilità del fronte d'avanzamento. Così, facendo riferimento ad un parametro unico valido per tutti i tipi di terreno (il comportamento deformativo del nucleo di terreno oltre il fronte d'avanzamento), il metodo supera le limitazioni dei sistemi sino ad oggi adottati, specie nel caso di terreni di scarsa consistenza.

In particolare, individua tre diverse categorie di comportamento (fig. 2):

Categoria A: fronte stabile, comportamento di tipo lapideo;

Categoria B: fronte stabile a breve termine, comportamento di tipo coesivo;

Categoria C: fronte instabile, comportamento di tipo sciolto.

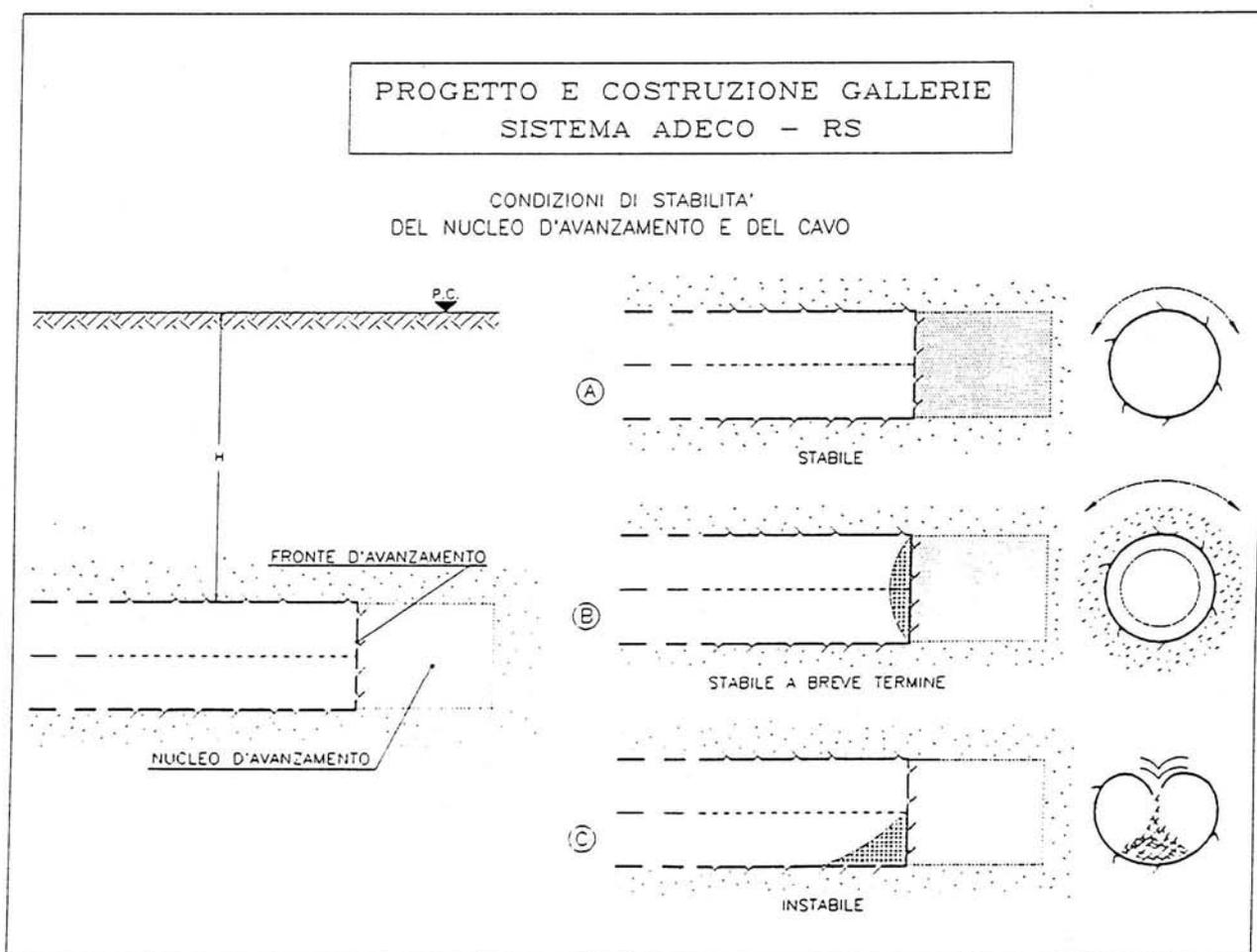


Fig. 2: le categorie di comportamento.

Categoria A

Si verifica quando lo stato di coazione nel terreno al fronte ed al contorno del cavo non supera le caratteristiche di resistenza del materiale. L'"effetto arco" si forma tanto più vicino alle pareti quanto più la sezione di scavo è aderente al profilo teorico.

I fenomeni deformativi evolvono in campo elastico, sono immediati e di ordine centimetrico.

Si possono verificare solo instabilità locali riconducibili al distacco gravitativo di blocchi isolati da uno sfavorevole assetto strutturale dell'ammasso roccioso; in questo contesto, infatti, gioca un ruolo fondamentale l'anisotropia tensionale e deformativa del terreno.

L'eventuale presenza di acqua, anche in regime idrodinamico, non influenza la stabilità della galleria, a meno che non si tratti di terreni alterabili o che gradienti idraulici troppo intensi non provochino un dilavamento tale da abbattere la resistenza al taglio lungo i piani di scorrimento.

Gli interventi di consolidamento sono per lo più volti ad impedire la sfioritura della roccia ed al mantenimento del profilo di scavo.

Categoria B

Si verifica quando lo stato di coazione nel terreno al fronte è tale da non superare in maniera evidente la capacità di resistenza del materiale, resistenza che però viene raggiunta ed oltrepassata, a fronte fermo, per modesta estensione (minore del raggio di scavo).

L'"effetto arco" non si realizza immediatamente al contorno del cavo, bensì ad una distanza che dipende dalla potenza della fascia dove il terreno plasticizza.

Il fronte, alle normali cadenze di avanzamento, risulta ancora globalmente stabile, ma la sua stabilità migliora o peggiora aumentando o diminuendo la velocità di avanzamento. Le deformazioni del nucleo, sotto forma di estrusioni, se presenti, non condizionano la stabilità della galleria, perché il terreno può mobilitare ancora una sufficiente resistenza residua.

Al contorno del cavo, invece, i fenomeni deformativi evolvono in campo elastoplastico e quindi sono differiti e di ordine decimetrico. I conseguenti fenomeni d'instabilità sono diffusi e, dopo il passaggio del fronte, lasciano il tempo di operare con interventi tradizionali di contenimento radiale.

La presenza di acqua, specie se in regime idrodinamico, riducendo la capacità di resistenza al taglio del terreno, favorisce l'estendersi della plasticizzazione ed accresce quindi l'importanza dei fenomeni d'instabilità. E' necessario perciò prevenirla soprattutto nella zona del fronte.

Categoria C

Si verifica quando lo stato di coazione nel terreno supera sensibilmente la capacità di resistenza del materiale anche nella zona del fronte d'avanzamento. L'"effetto arco" non può formarsi né al fronte né al contorno del cavo poiché il terreno non possiede sufficiente resistenza residua. I fenomeni deformativi sono inaccettabili perché evolvono immediatamente verso la rottura, coinvolgendo il nucleo, senza lasciare il tempo di operare con interventi di contenimento radiale: occorrono interventi di preconsolidamento che sviluppino un'azione di precontenimento capace di creare effetti arco artificiali.

La presenza di acqua in regime idrostatico, se non adeguatamente trattata, riducendo ulteriormente la capacità di resistenza al taglio del terreno, favorisce l'estendersi della plasticizzazione ed accresce, in definitiva, l'entità dei fenomeni deformativi. La stessa, in regime idrodinamico, si traduce in fenomeni di trascinarsi di materiale e di sifonamento assolutamente inaccettabili. E' dunque necessario prevenirla, soprattutto nella zona del fronte.

Sulla base di esperienze maturate in più di vent'anni di progettazione e costruzione di opere in sotterraneo si osserva che tutti i casi di opere già realizzate ricadono in queste tre categorie di comportamento.

2.3 Fasi di sviluppo del metodo ADECO-RS

Nello sviluppo logico del progetto e della costruzione di una galleria, il metodo ADECO-RS individua diverse fasi da seguire necessariamente in maniera cronologica (vedi fig. 3):

Il momento della progettazione si sviluppa in:

- fase conoscitiva: durante la quale avviene l'acquisizione, in relazione ai terreni interessati dalla galleria, delle conoscenze su 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 previsioni attendibili riguardo al comportamento della futura galleria durante lo scavo. Esse devono essere fatte in termini di genesi, localizzazione, evoluzione ed entità dei probabili fenomeni deformativi che si innescano al fronte d'avanzamento e di conseguenza nella fascia di terreno al contorno del cavo. Da queste previsioni dipende la scelta degli strumenti di stabilizzazione, quindi la riuscita dell'opera.
- fase di terapia: durante la quale, a seguito delle previsioni su tipo, localizzazione ed entità dei fenomeni deformativi al fronte ed al contorno del cavo previsti in fase di diagnosi,

PROGETTO E COSTRUZIONE GALLERIE
SISTEMA ADECO - RS

MOMENTO	FASE	ARGOMENTO
DELLA PROGETTAZIONE	<ul style="list-style-type: none"> - CONOSCITIVA - DIAGNOSI - TERAPIA 	<ul style="list-style-type: none"> - analisi degli equilibri naturali preesistenti - <u>studio e previsione</u> dei fenomeni deformativi - <u>regimazione</u> dei fenomeni deformativi in termini di scelte dei sistemi di stabilizzazione
DELLA COSTRUZIONE	<ul style="list-style-type: none"> - OPERATIVA - VERIFICA IN CORSO D'OPERA - MESSA A PUNTO DEL PROGETTO 	<ul style="list-style-type: none"> - <u>applicazione</u> degli strumenti di stabilizzazione per la regimazione dei fenomeni deformativi - <u>controllo e lettura</u> dei fenomeni deformativi come risposta dell'A.R. durante l'avanzamento degli scavi (rilevamento estrusione del fronte e convergenze superficiali e profonde del cavo) - <u>interpretazione</u> dei fenomeni deformativi - bilanciamento dei sistemi di stabilizzazione tra il fronte ed il perimetro di scavo

Fig. 3: fasi di sviluppo del metodo ADECO-RS.

si operano le scelte 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 di scavo.

Il momento della costruzione è costituito da:

- fase operativa (in cui si realizza lo scavo della galleria con le modalità previste dal progetto);
- fase di verifica: nella quale, durante la costruzione della galleria, si verifica, attraverso un'adeguata campagna di misure di 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.

Progettare correttamente un'opera in sotterraneo significherà allora saper prevedere, sulla base della conoscenza degli equilibri iniziali preesistenti, il comportamento che il terreno avrà durante lo scavo in termini di innesco ed evoluzione dei fenomeni deformativi, al fine di definire conseguentemente le tipologie d'intervento atte a contenerne l'effetto entro limiti accettabili, stabilendone i tempi e le cadenze di applicazione in funzione dell'avanzamento e della posizione del fronte di scavo.

Costruire correttamente un'opera in sotterraneo significherà, d'altra parte, operare nel rispetto delle scelte progettuali: in primo luogo leggendo accuratamente le risposte del terreno all'azione dell'avanzamento degli scavi e degli interventi di stabilizzazione, in termini di convergenze superficiali e profonde del fronte e delle pareti di scavo; in secondo luogo bilanciando, una volta interpretati i risultati delle letture, sfondi, velocità e cadenza di avanzamento, intensità, collocazione e tempi di applicazione degli interventi di stabilizzazione tra il fronte ed il perimetro di scavo.

2.3.1 Fase conoscitiva

Aprire uno scavo in sotterraneo significa turbare gli equilibri preesistenti. Progettare questo scavo riducendo al minimo il disturbo al mezzo in cui si deve operare, quindi riducendo al minimo la risposta deformativa, significa allora la conoscenza preventiva ed il più possibile completa dello stato degli equilibri naturali presenti nel terreno prima dell'intervento.

Da ciò discende la necessità di far precedere il momento della progettazione vera e propria e il momento della costruzione di una galleria da una fase conoscitiva durante la quale avviene l'acquisizione, in relazione ai terreni interessati dalle opere, di elementi litologici, strutturali, stratigrafici, morfologici, tettonici, idrologici, geotecnici, geomeccanici e tensionali, indispensabili al progettista per compiere l'analisi degli

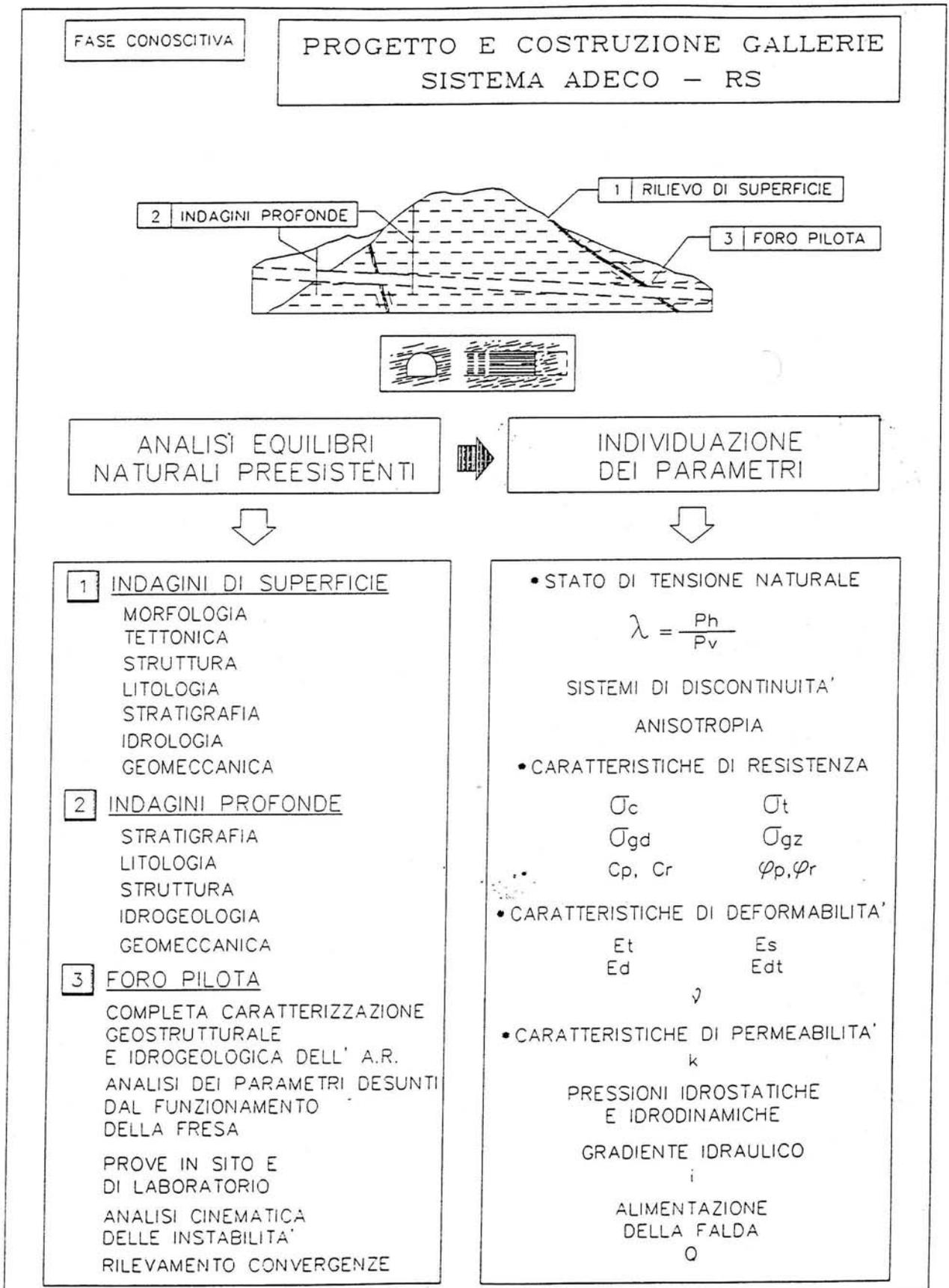


Fig. 4: fase conoscitiva: indagini e parametri da indagare.

equilibri naturali preesistenti e per potere operare correttamente nella fase successiva di "diagnosi".

Lo studio in fase conoscitiva dovrà procedere in due tempi successivi (fig. 4).

In una prima fase sarà redatto il profilo geologico di tentativo in asse tracciato, sviluppato sulla base della Carta Geologica d'Italia 1:100000, della letteratura esistente e dei rilievi aerofotogrammetrici, il tutto integrato dai rilievi di superficie, comprendenti:

- il rilievo litologico, con individuazione delle principali unità;
- il rilievo geomorfologico, con particolare riguardo alle condizioni di stabilità dei versanti;
- il rilievo geostrutturale, con l'individuazione delle principali linee di discontinuità;
- il rilievo idrogeologico, con la determinazione della rete idrologica principale ed il rilievo delle sorgenti. Di queste ultime sarà valutata la portata la cui evoluzione dovrà essere seguita in corso d'opera per stabilire l'influenza su esse dell'effetto drenante del cavo.

Il profilo di tentativo sarà accompagnato da una serie di schede litologiche dei litotipi incontrati in affioramento lungo il tracciato riportanti la sintesi dei rilievi eseguiti.

Qualora lo studio di prima fase deponga per la fattibilità di un cunicolo pilota, la progettazione (esecutiva) dovrà avvalersi dei rilievi geologici e geomeccanici in cunicolo, nonchè delle prove in situ progettate per la valutazione delle caratteristiche di resistenza e deformabilità dell'ammasso roccioso.

Nella seconda fase, sulla scorta dei risultati dello studio di prima fase, dovrà essere elaborato il progetto delle indagini geognostiche, comprendente la definizione delle indagini geofisiche indirette, delle prove in situ e dei sondaggi, prevalentemente a carotaggio continuo, di taratura, con recupero di campioni indisturbati nella porzione d'ammasso interessata dallo scavo.

Il prelievo dei campioni indisturbati sarà eseguito con attrezzature idonee a recare il minor disturbo possibile all'ammasso.

I campioni prelevati verranno utilizzati per la valutazione delle proprietà fisico-chimiche dell'ammasso roccioso in relazione alla loro evoluzione nel tempo, e per la valutazione dei parametri geotecnici e geomeccanici.

Verranno così determinati:

- curva intrinseca della matrice;
- parametri di deformabilità della matrice (modulo elastico iniziale e modulo di deformazione totale valutato per livelli di sollecitazione paragonabili a quelli che si instaureranno in seguito alla costruzione dell'opera).

Ove possibile dovranno essere determinate le caratteristiche di resistenza e deformabilità delle eventuali discontinuità

strutturali da cui derivare le curve intrinseche ed i parametri di deformabilità d'ammasso sulla base di considerazioni di dettaglio.

Lo studio di seconda fase sarà completato dalla stima dello stato tensionale naturale, sulla base delle coperture in gioco e delle strutture tettoniche principali.

Ove possibile è consigliabile, in ragione della rilevanza dell'opera in progetto e della complessità delle strutture tettoniche, eseguire prove di misurazione del tensore naturale degli sforzi al livello del cavo.

2.3.2 Fase di diagnosi

La fase di diagnosi è la fase più delicata di tutta la progettazione, durante la quale, sulla base degli elementi raccolti in fase conoscitiva, il progettista è chiamato a fare previsioni attendibili riguardo al comportamento della futura galleria in assenza di stabilizzazione. Da queste previsioni dipende infatti la scelta degli interventi di stabilizzazione, quindi la riuscita del progetto. Come già anticipato, le

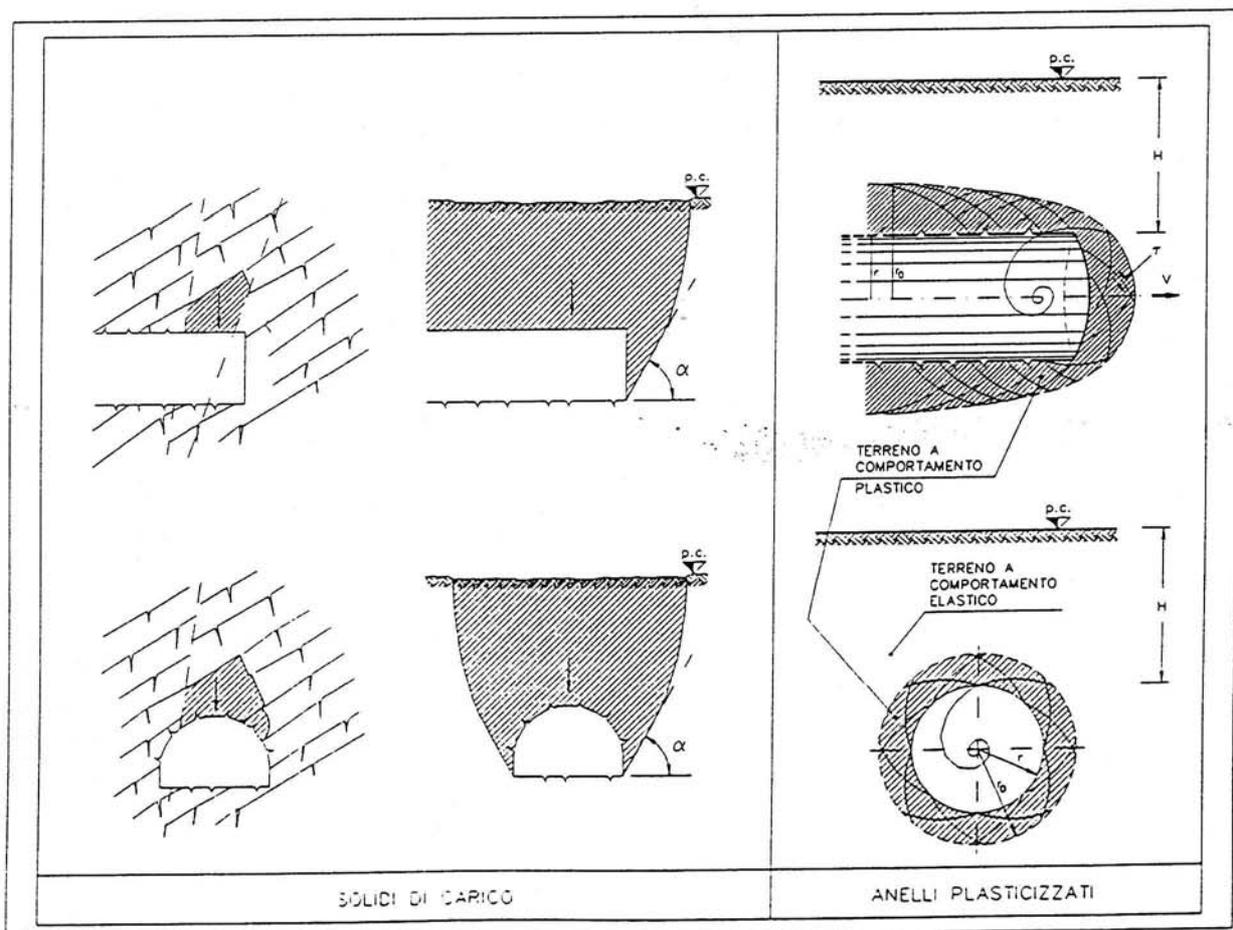


Fig. 5: comportamento a solidi di carico e ad anelli plasticizzati.

previsioni in questione devono essere fatte in termini di genesì, localizzazione, evoluzione ed entità dei probabili fenomeni deformativi che si innescano nella fascia di terreno attorno allo scavo, considerando con particolare attenzione il comportamento del fronte di avanzamento (stabile, stabile a breve termine, instabile), allo scopo di giungere all'individuazione, lungo il tracciato in sotterraneo, di tratte a comportamento deformativo omogeneo, cui associare corrispondenti categorie di comportamento.

A questo scopo, si dovranno considerare i seguenti fattori:

- morfologia, e caratteristiche geologico-geomeccaniche dell'ammasso da attraversare, con particolare riferimento alla situazione tettonico-strutturale ed ai parametri di resistenza e deformabilità;
- condizioni idrogeologiche generali, eventuali preesistenze sul territorio e vincoli ambientali;
- stato di sollecitazione naturale a quota scavo;

dall'analisi approfondita dei quali è possibile trarre un quadro generale qualitativo su come evolverà il comportamento della galleria durante lo scavo e giungere, così, ad una prima sommaria suddivisione del tracciato in tratte a comportamento omogeneo ed assegnare a ciascuna una categoria di comportamento. Naturalmente, questo quadro generale potrà risultare più o meno modificato in seguito alle verifiche più approfondite, che devono essere eseguite utilizzando gli strumenti di calcolo in campo elasto-plastico oggi disponibili, scelti in funzione del tipo di carichi prevedibili.

A questo proposito, si ricorda che, dal profilo qualitativo, si può a grandi linee distinguere in (fig. 5):

- fenomeni deformativi che si generano e si evolvono in campo elastico, dando luogo a carichi di tipo gravitativo condizionati dall'assetto strutturale e dall'anisotropia dell'ammasso (tipici dei terreni sciolti e dei terreni lapidei discontinui sotto deboli coperture);
- fenomeni deformativi che si innescano e si evolvono in campo elasto-plastico producendo carichi radiali (spinte di montagna) condizionati dalla situazione di plasticizzazione più o meno spinta dell'ammasso (tipici dei terreni lapidei sotto forti coperture, o dei terreni coesivi specie se soggetti a rigonfiamento per alterazione chimico-fisica).

Quindi si utilizzeranno:

- metodi a solidi di carico, per terreni sciolti e lapidei discontinui in campo elastico;
- metodi ad anelli plasticizzati, per terreni coesivi e lapidei sollecitati in campo elasto-plastico.

Tra i primi ricordiamo il metodo di Terzaghi, proposto in numerose varianti anche da altri autori (Ritter, Kommerell, ecc.), la teoria dei blocchi, il metodo numerico degli elementi distinti;

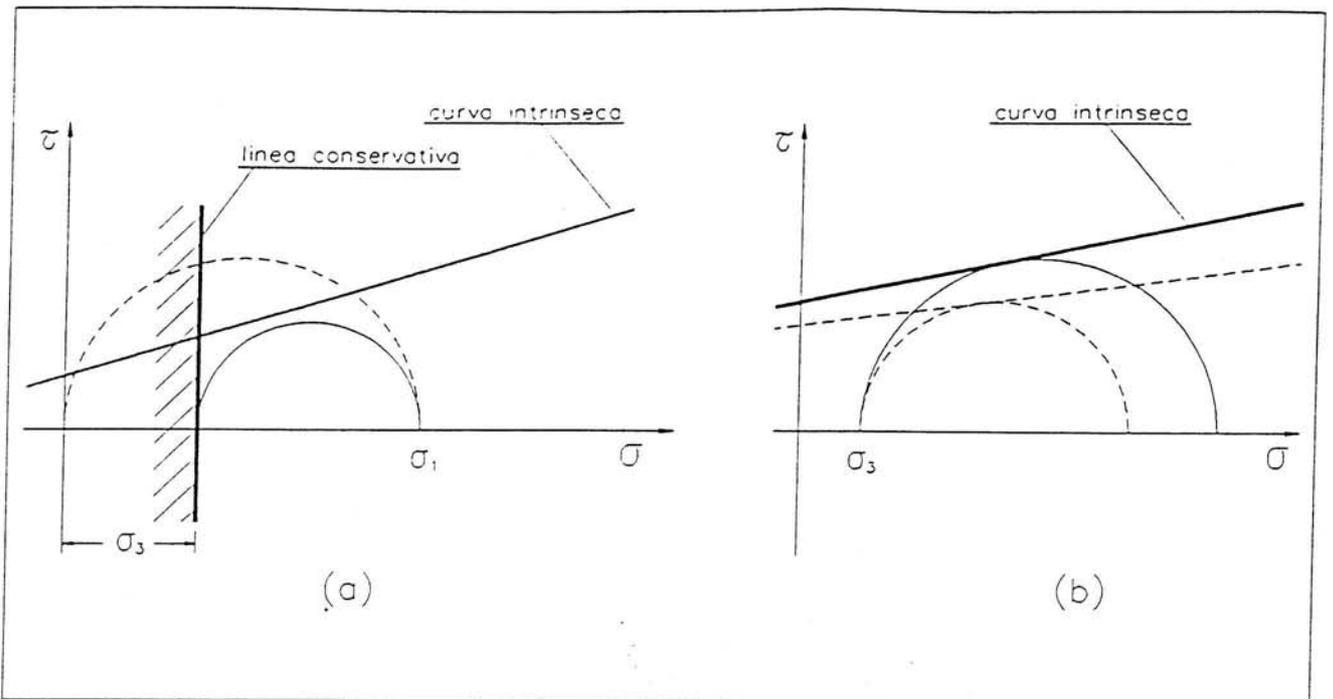


Fig. 6: effetto degli interventi conservativi (a) e migliorativi (b).

tra i secondi i più noti sono la teoria delle linee caratteristiche ed il metodo numerico degli elementi finiti.

2.3.3 Fase di terapia

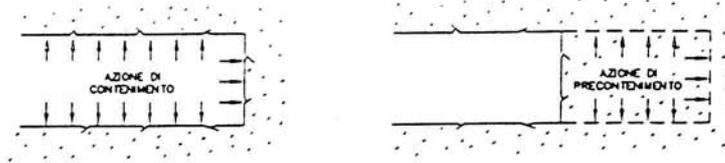
La fase di terapia è quella durante la quale, a seguito delle previsioni sulla qualità, la localizzazione e l'entità dei fenomeni deformativi che potrebbero prodursi sul fronte e al contorno della cavità durante l'avanzamento degli scavi, si devono operare le scelte in termini di sistemi, cadenze, fasi di scavo ma soprattutto di strumenti di stabilizzazione e di bilanciamento degli stessi tra il fronte e il perimetro di scavo (regimazione dei fenomeni deformativi).

Premesso che è nell'ambito di tali scelte che il progettista deve decidere se anticipare o assecondare od escludere, quindi contrastare qualsiasi tipo di fenomeno deformativo, credo sia importante in primo luogo analizzare:

- quali strumenti di stabilizzazione ha a disposizione chi progetta per operare in questo senso;
- come questi agiscono, per garantire la regimazione dei fenomeni deformativi, sulle caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso e sul suo detensionamento (in particolare su coesione, attrito e tensione principale minore);
- dove devono essere posti in opera rispetto alla posizione del fronte d'avanzamento perchè abbiano una funzione strutturale (di regimazione dei fenomeni deformativi).

Anzitutto è indispensabile, a proposito di strumenti di stabilizzazione, precisare che questi si possono raggruppare in tre categorie:

- 1) interventi di precontenimento del cavo, quando agiscono a monte del fronte di avanzamento e realizzano o facilitano la formazione



AZIONE SUL CAVO	STRUMENTI DI STABILIZZAZIONE		INTERVENTI AGENTI SU		H ₂ O IN PRESS		
			c.f	σ_c			
PRECONTENIMENTO	PRECONSOLIDAMENTI	INIEZIONI TRADIZIONALI (•)			*	*	*
		JET-GROUTING (•) SUBORIZZONTALE				*	
		PRETAGLIO (•)				*	
		DRENAGGI (•)			*		*
		CHIODI AL FRONTE (•)				*	
CONTENIMENTO	CONSRADIALE	SPRITZ-BETON (•)				*	
		SCUDO A PRESS. MECCANICA				*	
		SCUDO A PRESS. DI FLUIDO				*	*
	CONSRADIALE	BULLONATURA (•) ADERENZA CONT.			*		
		BULLONATURA (•) ANC. PUNTUALE				*	
		ARCO ROVESCIO (•)				*	
		SCUDI APERTI				*	
PRESOSTI		INFILAGGI					

LEGENDA

- (•) = INTERVENTI STRUTTURALI
- σ_c = PRESSIONE DI CONTENIMENTO
- c = COESIONE DEL TERRENO
- ρ = ANGOLO D'ATTRITO DEL TERRENO

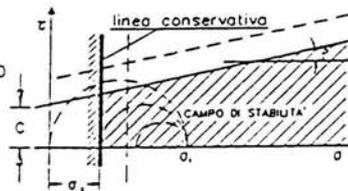
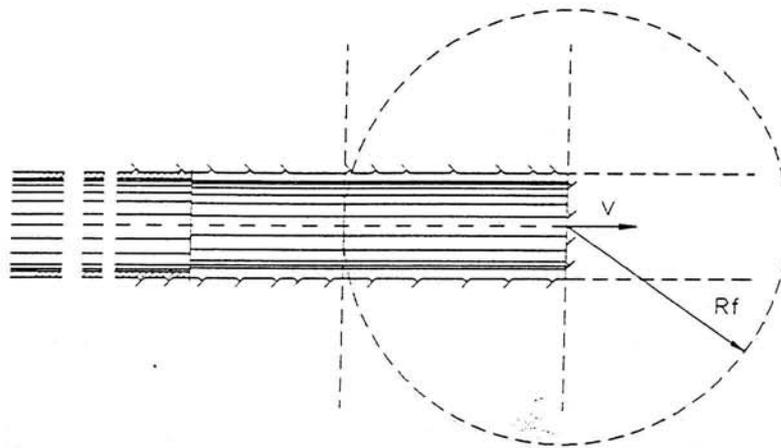


Fig. 7: effetto degli strumenti di stabilizzazione.

FASE DI TERAPIA

PROGETTO E COSTRUZIONE GALLERIE
SISTEMA ADECO - RS



V=velocità di avanzamento
del fronte o cadenza di
scavo

Rf=raggio d'azione
del fronte

STRUMENTI DI STABILIZZAZIONE	LONTANO DAL FRONTE	VICINO AL FRONTE	IN AVANZAMENTO SUL FRONTE
INIEZIONI			
JET-GROUTING ORIZZONTALE			
PRETAGLIO MECCANICO			
CHIODI IN VETRORESINA			
BULLONI A.C. ACCIAIO O VTR			
BULLONI A.P.			
ARCO ROVESCIO			
SCUDI A PRESS. MECC.			
SCUDI A PRESS. DI FLUIDO			
SCUDI APERTI			
INFILAGGI (*)			

(*) pur essendo realizzati oltre il fronte non possono essere considerati né strumenti di precontenimento né di preconsolidamento ad esclusione dei terreni a comportamento lapideo

(***) da eseguire nell'ambito Rf in funzione delle deformazioni

Fig. 8: zone d'intervento degli strumenti di stabilizzazione.

di un "effetto arco" artificiale in avanzamento, con funzione strutturale e protettiva;

- 2) interventi di contenimento del cavo, quando agiscono a valle del fronte di avanzamento ed hanno la funzione di contrastare i fenomeni deformativi che si sviluppano dopo il passaggio del fronte;
- 3) interventi di presostegno, quando agiscono a monte del fronte di avanzamento senza però avere alcuna influenza sulla formazione dell'"effetto arco", non essendo in grado né di contenere in maniera apprezzabile il decadimento della tensione principale minore né di migliorare la resistenza al taglio del terreno.

Gli interventi si dicono conservativi, quando il loro effetto primario è quello di contenere il decadimento della tensione principale minore, o migliorativi, quando agiscono principalmente incrementando le caratteristiche di resistenza al taglio del terreno.

Sul piano di Mohr, dove si è soliti rappresentare la curva intrinseca per descrivere graficamente le caratteristiche di resistenza degli ammassi rocciosi e dei terreni, l'effetto degli interventi del primo tipo è schematizzabile con il tracciamento di una "linea conservativa" che pone un limite al decadimento della tensione di confinamento naturale σ_3 ; l'effetto degli interventi migliorativi, invece, si traduce in un globale innalzamento della curva intrinseca, grazie al quale il dominio di stabilità risulta più ampio (vedi fig. 6).

La figura 7 raccoglie gli strumenti di stabilizzazione più diffusi nella pratica progettuale e costruttiva, evidenziando per ciascuno il tipo di azione svolta (precontenimento, contenimento o presostegno) e indicandone l'effetto sulla curva intrinseca e la linea conservativa.

Nella figura 8, facendo riferimento alla posizione del fronte, sono riportate schematicamente le zone dove gli strumenti di stabilizzazione devono essere posti in opera al fine di realizzare, in fase di avanzamento, un'azione di precontenimento del cavo, di contenimento o di semplice presostegno.

Interventi di precontenimento

Come già anticipato, la tenuta del fronte di scavo, quindi la conservazione della resistenza del nucleo, gioca un ruolo determinante nel meccanismo della statica di una galleria in costruzione. Quindi, quando in fase di "diagnosi" si riesce a prevedere che per una data sezione le deformazioni possono innescarsi prima dell'arrivo del fronte di scavo e che di conseguenza l'avanzamento può avvenire in un terreno già predisposto alla rottura o già interessato da fenomeni deformativi che all'arrivo del fronte verranno esaltati, bisogna intervenire a monte del fronte di scavo bloccando sul nascere i fenomeni stessi o anticipandoli se si vuole poi evitare di trovarsi in

difficoltà con convergenze incontrollabili sul profilo di scavo appena a valle del fronte stesso. La strada da seguire in questi casi, per evitare l'avanzamento in un mezzo già collassato, è di:

- a) mantenere il più possibile sostenute le velocità di avanzamento, compatibilmente con i problemi logistici;
- b) mantenere costante la cadenza di scavo;
- c) sagomare opportunamente il fronte (concavità);
- d) intervenire con gli strumenti necessari per conservare l'integrità del nucleo al fronte.

Questi strumenti, che agiscono all'interno dell'ammasso a monte del fronte di scavo quando questo è ancora interessato da coazioni di tipo triassiale, hanno in definitiva la funzione, anche migliorando la resistenza del terreno, di impedire alla tensione principale minore di decadere fino ad annullarsi quando ancora i fenomeni deformativi sono controllabili.

Facendo riferimento alla fig. 7, tra gli strumenti di stabilizzazione del fronte che possono considerarsi precontenimenti, in quanto capaci di produrre "effetti arco" artificiali in avanzamento, e che esercitano un'azione essenzialmente conservativa, troviamo:

- tegoli di spritz-beton fibrorinforzato realizzati mediante pretaglio meccanico lungo il profilo di scavo, con l'impiego dello stesso pretaglio come cassaforma (alleggerimento del nucleo);
- preconsolidamento del nucleo, per profondità non inferiori al diametro di scavo, mediante chiodi tubolari di vetroresina fissati al terreno con malta cementizia, con intensità da definire in funzione dell'incremento di resistenza al taglio che si intende conferire al terreno;
- ombrelli tronco-conici, costituiti dall'accostamento di colonne suborizzontali di terreno consolidato mediante jet-grouting (alleggerimento del nucleo).

Esercitano invece un'azione prevalentemente migliorativa:

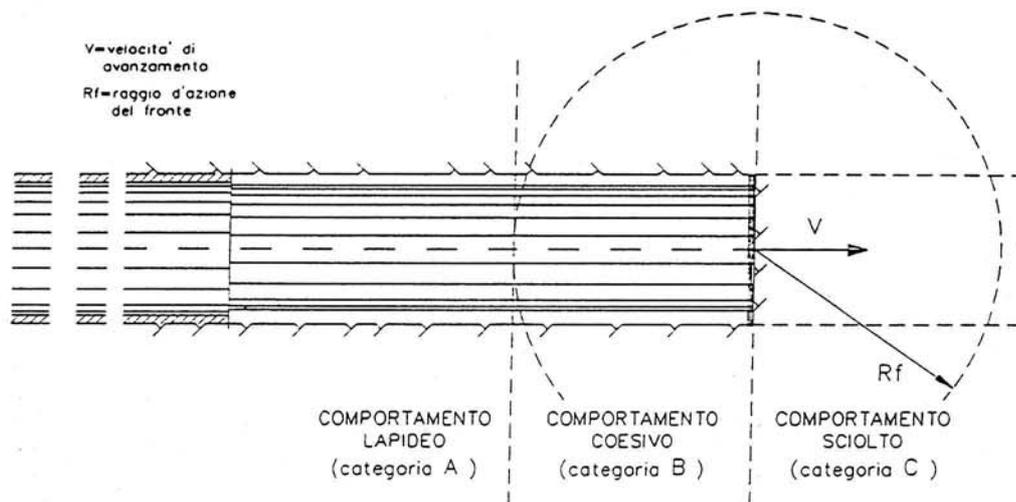
- ombrelli tronco-conici di terreno consolidato mediante iniezioni tradizionali (alleggerimento del nucleo);
- ombrelli tronco-conici di drenaggi, quando si è in presenza di falda.

Interventi di contenimento

Gli interventi di contenimento hanno la funzione di contenere i fenomeni deformativi residui sfuggiti all'azione di regimazione del nucleo al fronte di avanzamento. Il contenimento delle convergenze avviene attraverso interventi superficiali, rivolti per lo più ad impedire il decadimento delle pareti di scavo, ed interventi profondi, rivolti ad incrementare la resistenza al taglio del mezzo lungo le potenziali superfici di scorrimento evidenziate da Kastner, quindi a fare collaborare l'ammasso al contorno dello scavo alla statica della galleria.

FASE DI TERAPIA

PROGETTO E COSTRUZIONE GALLERIE
SISTEMA ADECO - RS



FRONTE		STABILE		STABILE A BREVE TERMINE			INSTABILE			
		A ₁	A ₂	B ₁	B ₂	B ₃	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄
STRUMENTI DI STABILIZZAZIONE	BULLONI RADIALI			●	●					
	SPRITZ-BETON ARMATO			●	●	●	●	●	●	●
	CONSOLIDAMENTO DEL FRONTE				●		●	●		
	ARCO ROVESCIO			●	●	●	●	●	●	●
	PRETAGLIO					●	●			
	CONSOLIDAMENTI RADIALI DA CUNICOLO PILOTA								●	
	JET-GROUTING							●		
	INIEZIONI IN AVANZAMENTO									●
	DRENAGGI			●	●	●	●	●	●	
	INFILAGGI			●						
FENOMENI DEFORMATIVI		CENTI-METRICI		DECIMETRICI			INACCETTABILI			

SEZ. C2

Fig. 9: Criteri di scelta degli strumenti di stabilizzazione per la composizione delle sezioni tipo.

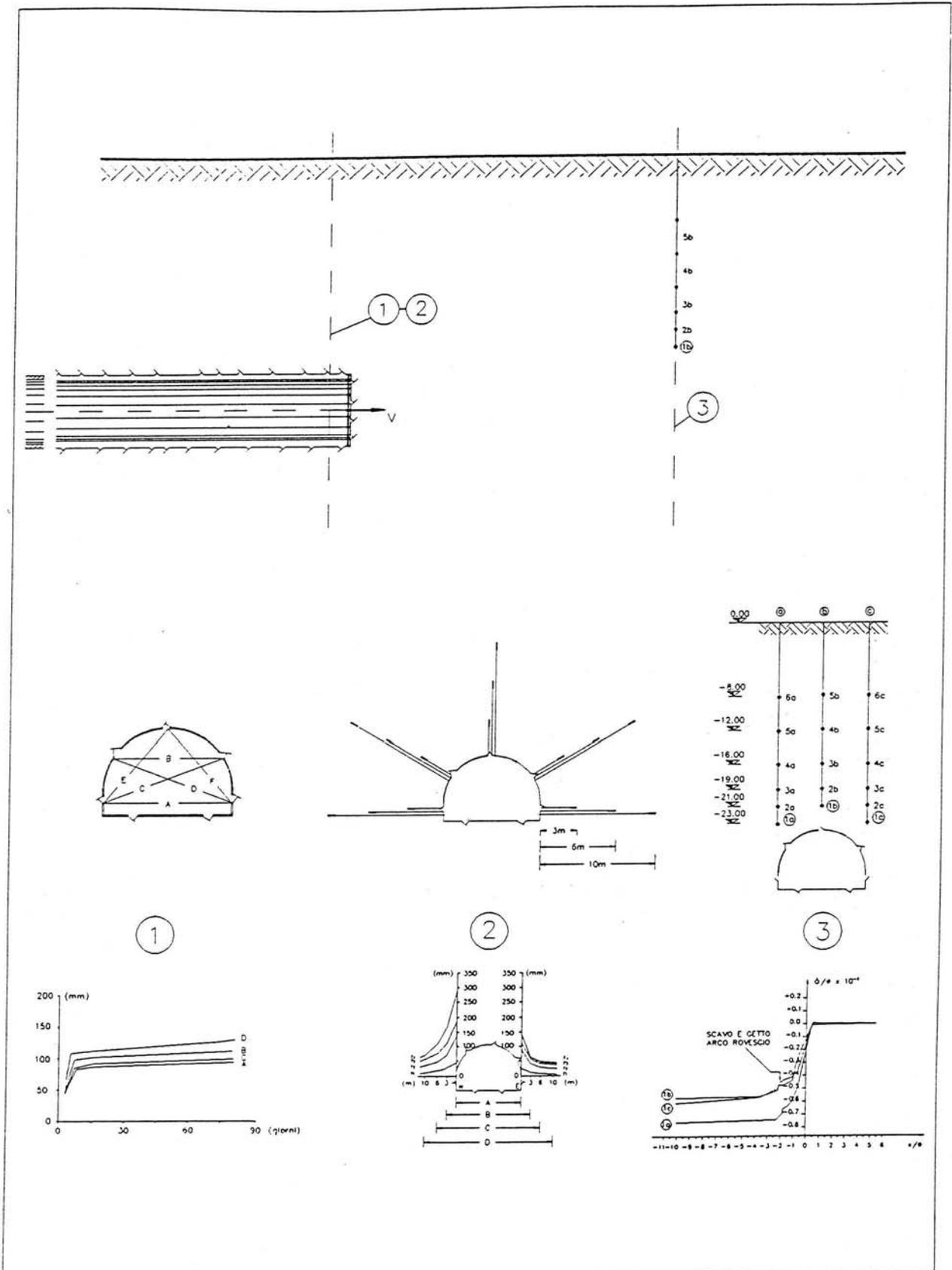


Fig. 11: fase di verifica: stazioni di misura delle deformazioni.

Tra questi si annoverano gli infilaggi, che lavorando come travi inflesse parallelamente all'asse galleria, si appoggiano sul nucleo al fronte di scavo peggiorandone le condizioni di stabilità.

Composizione delle sezioni tipo

Naturalmente questi strumenti di regimazione dei fenomeni deformativi possono essere impiegati singolarmente o in combinazione.

Come sappiamo, la stabilità del nucleo di terreno che costituisce il fronte d'avanzamento gioca un ruolo fondamentale sulla risposta deformativa dell'ammasso all'apertura della cavità in sotterraneo e quindi sulla stabilità stessa della galleria a breve ed a lungo termine.

In fase di diagnosi si è visto che le condizioni di stabilità di detto nucleo sono riconducibili a tre categorie di comportamento fondamentali, che caratterizzano e classificano, quindi, il tipo di galleria da scavare per la tratta in esame ed alle quali è del tutto conseguente riferirsi al momento della scelta degli strumenti di stabilizzazione cui affidare la stabilità e la sicurezza dell'opera.

Nella figura 9, nell'ambito della classificazione proposta, è schematicamente indicato il campo di applicabilità dei singoli strumenti di stabilizzazione a disposizione del progettista, dalla cui composizione scaturiscono le sezioni tipo idonee a garantire la fattibilità degli scavi e la stabilità a breve e a lungo termine della galleria (vedi esempio in fig. 10).

2.3.4 Fase di verifica

Una volta superato il momento della progettazione, l'avvio dei lavori di scavo deve coincidere con quello delle operazioni di controllo dei fenomeni deformativi, che potranno prodursi in superficie, lungo il tracciato della galleria, e all'interno della cavità, in corrispondenza al fronte ed alle pareti di scavo: con speciali estensimetri a nastro vengono controllate le convergenze perimetrali; mentre con estensimetri longitudinali e radiali multibase ad asta si controllano le estrusioni e le convergenze superficiali e profonde all'interno dell'ammasso a distanze variabili dal profilo di scavo. Quando poi le coperture della galleria lo permettono è particolarmente interessante, soprattutto per la misura dei fenomeni deformativi precedenti all'arrivo del fronte, mettere in opera, in una determinata sezione, degli estensimetri verticali multibase (fig. 11).

Quanto più saranno sistematici ed accurati questi controlli tanto più risulteranno affidabili ed utili le informazioni per il progettista il cui compito potrà risultare più o meno semplice a seconda del campo in cui evolvono i fenomeni deformativi.

Se infatti l'avanzamento si svolge in un mezzo a comportamento di tipo lapideo o sciolto, dove i fenomeni deformativi previsti sono talmente ridotti da non destare preoccupazione (caso dei terreni litoidi sotto deboli medie-coperture) o talmente elevati da essere inaccettabili e da indurre quindi a scelte di precontenimento del cavo (caso dei terreni incoerenti sotto qualsiasi copertura, argillosi e litoidi sotto forti coperture) il compito del progettista, una volta operate le scelte di regimazione adeguate alle situazioni previste, è molto alleviato; di conseguenza è ridotto anche il peso dei controlli in considerazione del fatto che i fenomeni deformativi hanno e devono avere una evoluzione rapida nel tempo e limitata come entità.

Diverso è l'impegno del progettista e diversa è la cura che deve essere messa nel rilevare le deformazioni del fronte, le convergenze superficiali e profonde del cavo, seguendo la loro evoluzione nel tempo e nello spazio, quando l'avanzamento avviene in un mezzo a comportamento di tipo coesivo.

In questo caso, infatti, dovendo trattare con fenomeni deformativi lenti, progressivi e differiti, di entità sempre crescente, solo dalla lettura dei controlli il progettista può prendere lo spunto da un lato per calibrare l'intensità, la tipologia degli interventi di stabilizzazione, il loro bilanciamento tra il fronte ed il cavo e dall'altro lato per mettere a punto le fasi, le cadenze, i sistemi di scavo.

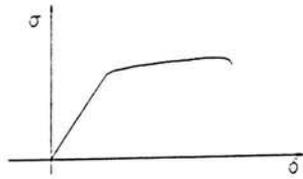
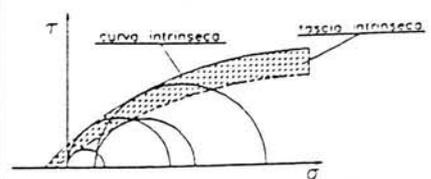
E' inutile sottolineare quanto sia importante in questa fase sapere interpretare correttamente i risultati forniti dai controlli, perchè è proprio da una corretta interpretazione che deriva la messa a punto del progetto in corso d'opera.

La fase di verifica proseguirà poi ad opera finita con un monitoraggio sistematico volto a controllarne la sicurezza in tutto l'arco della sua vita d'esercizio.

3 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

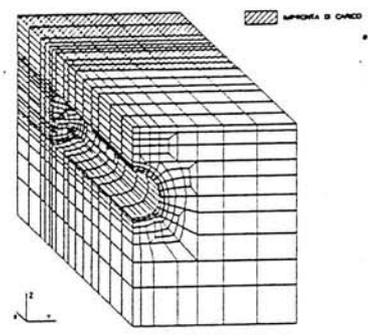
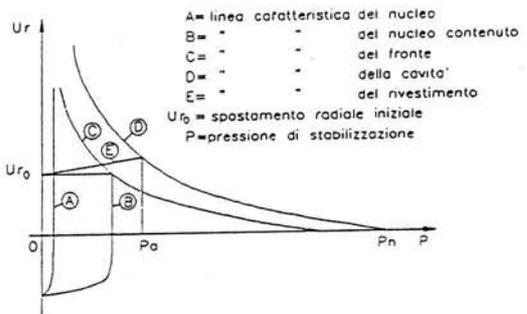
Il metodo ADECO-RS è un metodo di progettazione e costruzione di gallerie valido per qualsiasi tipo di terreno, che mettendo a frutto le conoscenze, i mezzi di calcolo, le tecnologie di attacco più recenti (fig. 12), offre ai progettisti una semplice guida per classificare un'opera in sotterraneo in tratte a comportamento deformativo omogeneo sulla base dei prevedibili fenomeni deformativi, assumendo come riferimento la stabilità del terreno al fronte d'avanzamento. A ciascuna tratta, in seguito ad uno studio tenso-deformativo condotto con i più moderni mezzi di calcolo, vengono associate sezioni tipo che prevedono sistemi di attacco ed interventi di stabilizzazione "strutturali" (regimazione dei fenomeni deformativi) di cui sono definiti costi (a metro lineare di galleria) e tempi esecutivi.

Così operando:

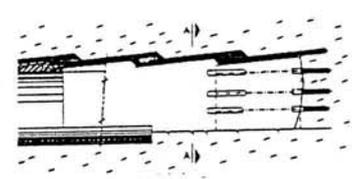
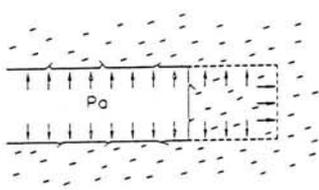


Fase conoscitiva

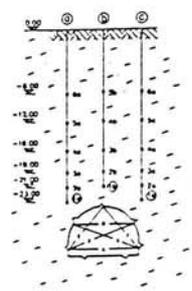
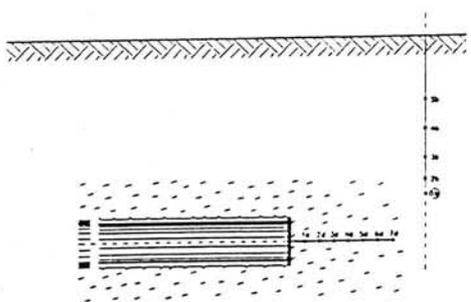
$\gamma, c_p, c_r, \varphi_p, \varphi_r, E_p, E_r, \phi ?$



Fase di diagnosi



Fase di terapia



Fase operativa e di verifica

Fig. 12: strumenti del metodo ADECO-RS.

- si valorizza l'importanza degli interventi di stabilizzazione come strumenti indispensabili per regimare i fenomeni deformativi, quindi come "elementi strutturali" ai fini della stabilità finale del cavo (le gallerie sono classificate e pagate in proporzione a quanto si deformano);
- si induce il costruttore, sulla base di un progetto completo ed affidabile, ad industrializzare le operazioni di avanzamento in ogni tipo di terreno, anche i più difficili;
- si evita, con la possibilità di pianificare interventi, tempi e costi di costruzione, il contenzioso che normalmente, sino ad oggi, si instaura tra Direzione dei Lavori ed Impresa costruttrice;
- si evita, assumendo come riferimento un solo parametro comune a tutti i tipi di terreno (il comportamento tenso-deformativo del fronte d'avanzamento) facilmente ed oggettivamente rilevabile durante l'avanzamento dei lavori, quella che è la più evidente pecca dei sistemi di classificazione precedenti (confrontare classi geomeccaniche con deformazioni) che sino ad oggi ha alimentato il suddetto contenzioso.

In virtù di queste importanti caratteristiche, il metodo è stato discusso e recepito nell'ambito di una Commissione del Ministero dei Lavori Pubblici, allo scopo di farne una normativa tecnica ed un capitolato completo di elenco prezzi validi sul territorio nazionale.

Con le esigenze dettate dalla pianificazione, l'arte di progettare e di costruire opere in sotterraneo perderà forse una parte del proprio fascino, ma sicuramente acquisterà, senza costringere o condizionare la fantasia dell'ingegnere, in efficienza e funzionalità.

Bibliografia

- LUNARDI P., "Applications de la Mécanique des Roches aux Tunnels Autoroutiers. Exemple des tunnels du Frèjus (côte Italie) et du Gran Sasso. Revue Française de Géotechnique, n. 12, 1979
- LUNARDI P., "Lo scavo delle gallerie mediante cunicolo pilota", Primo ciclo di conferenze di meccanica e ingegneria delle rocce, Torino, 25-28 Novembre 1986.
- 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 cavite et la preconsolidation du noyau au front". Colloque International "Tunnels et micro-tunnels en terrain meuble", Parigi, 7-10 Febbraio 1989
- 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, 18-20 Marzo 1991

- LUNARDI P./FOCARACCI A./GIORGI P./PAPACELLA A., "Tunnel face reinforcement in soft ground design and controls during excavation", Convegno Internazionale "Towards New Worlds in Tunnelling", Acapulco, 16-20 Maggio 1992
- LUNARDI P./BINDI R./FOCARACCI A., "Technical and financial planning of underground works: the ADECO-RS method", VI Forum Europeo di Ingegneria Economica, Università Bocconi, Milano, 13-14 Maggio 1993