

PROGETTO E COSTRUZIONE DI GALLERIE SECONDO IL METODO BASATO SULL'ANALISI DELLE DEFORMAZIONI CONTROLLATE NELLE ROCCE E NEI SUOLI

Pietro Lunardi, Milano

Parte terza:

PROPOSTA DEL NUOVO APPROCCIO

Premessa

Da quanto esposto nelle prime due parti di questa trattazione, pubblicate rispettivamente sui numeri di marzo 1994 e marzo 1995 di Quarry and Construction [1] [2], emerge che nel corso di questi ultimi anni sono sopravvenute alcune importanti novità in tema di progettazione e costruzione di opere in sotterraneo.

Sintetizzando, possiamo riassumerle in tre punti:

1. il riconoscimento dell'importanza della rigidità del nucleo in relazione al comportamento tenso-deformativo di una galleria in fase di avanzamento ed i positivi riscontri ottenuti nell'utilizzazione del nucleo stesso quale strumento di stabilizzazione efficace in tutti i tipi di terreno;
2. l'affermazione del concetto di precontenimento del cavo e, di conseguenza, la messa a punto di strumenti di stabilizzazione innovativi capaci di realizzarlo nella pratica costruttiva;
3. la conseguente possibilità di affrontare in sicurezza la realizzazione di gallerie in terreni di qualsiasi tipo in qualsiasi contesto e condizione tenso-deformativa.

Queste importanti novità, per essere diffusamente recepite e messe a profitto, impongono l'aggiornamento dei modelli progettuali e costruttivi tradizionali e la stesura di un diverso approccio di progetto e costruzione che le tenga nella dovuta considerazione.

A questo scopo, per non incorrere in errori che potrebbero pregiudicare l'efficacia del lavoro svolto, prima di iniziare a tradurre in una proposta di nuovo approccio le recenti cognizioni acquisite in tema di progetto e costruzione di gallerie, appare indispensabile stabilire delle linee guida che dovrebbero servire da riferimento a chi si accinge a progettare e costruire un'opera in sotterraneo.

Sembra ragionevole affermare che per progettare e costruire in maniera appropriata un'opera in sotterraneo è fondamentale:

in fase di progettazione:

- avere una conoscenza approfondita del mezzo in cui si

Troisième partie:

PROPOSITION DE LA NOUVELLE APPROCHE

Remarques préliminaires

La teneur des deux premières parties de ce rapport, publiées sur les numéros de mars 1994 et 1995 de Quarry and Construction [1] [2] révèle clairement que ces dernières années, nous avons assisté à des nouveautés importantes en matière de conception et de construction d'ouvrages souterrains.

Nous pouvons les résumer en trois points:

1. *importance reconnue de la rigidité du noyau en fonction du comportement tension-déformation d'un tunnel en phase d'avancement et les résultats positifs obtenus à travers l'utilisation du noyau en tant qu'instrument de stabilisation efficace, quel que soit le type de terrain;*
2. *affirmation du concept de préconfinement de la cavité et, par voie de conséquence, la mise au point d'instruments de stabilisation innovants, capables de la réaliser dans la pratique autrement dit dans la construction;*
3. *la possibilité qui en dérive d'affronter en toute sécurité la réalisation des tunnels dans des terrains de toute espèce, quels que soient les contextes et les conditions de tension et de déformation.*

Pour être largement accueillies et exploitées, ces nouveautés importantes nous obligent à mettre à jour des modèles de conception et de construction traditionnels et de mettre en place une approche différente de conception et de construction qui en tienne dûment compte.

Ainsi donc, pour ne pas tomber dans des erreurs qui pourraient compromettre l'efficacité du travail accompli, avant de commencer à transformer en proposition d'une nouvelle approche les connaissances récemment acquises en matière de projets et de construction de tunnels, il est indispensable d'établir les lignes directrices qui devraient servir de point de référence à tous ceux qui sont sur le point de concevoir et de construire un ouvrage souterrain.

Il est raisonnable d'affirmer que pour concevoir et construire correctement un ouvrage souterrain, il est fondamental:

dans la phase de la conception

- *de connaître à fond le milieu dans lequel il faudra opérer, et tout*

dovrà operare, con particolare riguardo alle sue caratteristiche di resistenza e deformabilità;

- studiare preliminarmente quale sarà il comportamento tenso-deformativo (risposta deformativa) di detto mezzo allo scavo, in assenza di interventi di stabilizzazione;

- definire il tipo di azioni di contenimento o di precontenimento necessarie per regimare e controllare la risposta deformativa del mezzo allo scavo;

- scegliere il tipo di intervento di stabilizzazione tra quelli oggi disponibili grazie alle tecnologie esistenti, sulla base delle azioni di precontenimento o di contenimento che esse sono in grado di garantire;

- compilare, in funzione del previsto comportamento del mezzo allo scavo, le sezioni tipo definendo, oltre agli interventi di stabilizzazione più adeguati al contesto in cui ci si aspetta di dover operare, fasi, cadenze e tempi di messa in opera degli stessi;

- dimensionare e verificare, attraverso il calcolo matematico, gli interventi prescelti per ottenere il comportamento desiderato del mezzo allo scavo ed il necessario coefficiente di sicurezza dell'opera;

in fase di costruzione:

- verificare, in corso d'opera, che il comportamento del mezzo allo scavo sia corrispondente a quello calcolato per via analitica in fase progettuale. Procedere quindi alla messa a punto del progetto bilanciando il peso degli interventi tra il fronte ed il perimetro del cavo.

Ne deriva che il progetto e la costruzione di un'opera in sotterraneo devono necessariamente articolarsi cronologicamente attraverso:

1. una fase conoscitiva, riferita alla conoscenza geologica, geomeccanica ed idrogeologica del mezzo;

2. una fase di diagnosi, riferita alla previsione, per via teorica, del comportamento del mezzo in termini di risposta deformativa in assenza di interventi di stabilizzazione;

3. una fase di terapia, riferita, prima, alla definizione delle modalità di scavo e stabilizzazione del mezzo al fine di regimare la risposta deformativa e poi alla valutazione, per via teorica, dell'efficacia, a questo riguardo, delle soluzioni scelte;

4. una fase di verifica, riferita al controllo per via sperimentale del comportamento reale del mezzo allo scavo in termini di risposta deformativa per la messa a punto dei sistemi di scavo e di stabilizzazione.

Per il progetto e la costruzione di opere in sotterraneo sino ad oggi sono stati seguiti due tipi principali di approccio.

Certi autori hanno proposto degli schemi d'ausilio al progettista per progettare le opere di stabilizzazione e rivestimento di una galleria sulla base di classificazioni geomeccaniche.

Tra questi, assai noti sono quelli elaborati da Bieniawski (R.M.R. System) e da Barton (Q System). Entrambi individuano classi geomeccaniche sulla base di una serie di parametri geomeccanici e geostrutturali. Ad ogni classe associano degli interventi tipo di stabilizzazione che determinano le sezioni di progetto. Purtroppo, come lamentato più volte gli stessi autori [3], è stato fatto un uso assai distorto di questo tipo di classificazioni, pretendendo di utilizzarle come base di metodi progettuali e costruttivi completi e non quale semplice ausilio per i progettisti di gallerie, come aveva inteso fare chi le ha ideate. Utilizzate per scopi diversi da quelli per cui erano state concepite, le classificazioni geomeccaniche, e di conseguenza i metodi di progettazione e costruzione che, come il NATM, a queste fanno riferimento, hanno denunciato notevoli limiti.

Le difficoltà di applicarle ai domini delle rocce tenere, dei flysh

particulièrement ses caractéristiques de résistance et de déformabilité;

- *d'étudier au préalable quel sera le comportement de tension et de déformation (réponse en déformation) de ce milieu à l'excavation, en l'absence d'interventions de stabilisation;*

- *de définir le type d'actions de confinement et de préconfinement nécessaires à maîtriser et à contrôler la réponse en déformation du milieu à l'excavation;*

- *de choisir le type d'intervention de stabilisation parmi celles dont nous disposons à l'heure actuelle grâce aux technologies existantes, sur la base des actions de préconfinement et de confinement qu'elles sont à même d'assurer;*

- *mettre en place - en fonction du comportement prévu du milieu d'excavation - les sections type tout en définissant, en plus des interventions de stabilisation les plus appropriées au contexte dans lequel on est supposé devoir opérer, les phases, les cadences et les temps de leur mise en chantier;*

- *de mesurer et vérifier à l'aide de calculs mathématiques, les interventions choisies pour obtenir le comportement voulu du milieu vis-à-vis de l'excavation ainsi que le coefficient de sécurité nécessaire de l'ouvrage;*

dans la phase de la construction:

- *vérifier, sur le chantier, si le comportement du milieu vis-à-vis de l'excavation correspond bien à celui qui a été calculé à travers l'analyse de la phase de la conception, avant de procéder à la mise au point du projet et équilibrer le poids des interventions entre le front de taille et le périmètre de la cavité.*

Il en dérive que la conception et la construction d'un ouvrage souterrain doivent inévitablement se structurer dans le temps à travers:

1. *une phase de reconnaissance liée à la connaissance géologique, géomécanique et hydrologique du milieu;*

2. *une phase de diagnostic liée à la prévision théorique du comportement du milieu au niveau de la réponse en déformation, en l'absence d'interventions de stabilisation;*

3. *une phase de thérapie liée tout d'abord à la définition des modalités d'excavation et de stabilisation du milieu pour contrôler sa réponse en déformation, puis, à l'évaluation théorique de l'efficacité des solutions choisies;*

4. *une phase de vérification liée au contrôle expérimental du comportement réel du milieu vis-à-vis de l'excavation au niveau de la réponse en déformation pour la mise au point des systèmes d'excavation et de stabilisation.*

Pour le projet et la construction d'ouvrages souterrains, deux principaux types d'approche ont été adoptés :

Certains auteurs ont proposé des modèles de support au concepteur pour projeter des ouvrages de stabilisation et de revêtement d'un tunnel sur la base de classifications géomécaniques.

Parmi ceux-ci, les modèles mis en place par Bieniawski (RMR System) et par Barton (Q System) sont bien connus. Tous deux définissent des classes géomécaniques sur la base d'une série de paramètres géomécaniques et géostrutturali. Ils associent à chaque classe des interventions type de stabilisation qui déterminent les sections de projet. Malheureusement - et les auteurs [3] sont les premiers à le regretter - il a été fait un usage assez erroné de ce type de classifications dans la mesure où l'on a prétendu les utiliser comme base de méthodes de conception et de construction complètes et non simplement en tant que simples supports pour les ingénieurs spécialistes de tunnels, ce qui était dans l'intention des auteurs.

Utilisées dans des buts différents de ceux pour lesquels elles avaient été conçues, les classifications géomécaniques, et par voie de conséquence les méthodes de conception et de construction qui - cas du NATM - s'y réfèrent, ont révélé des limites considérables.

e dei suoli, la loro non sufficiente considerazione degli effetti dello stato tensionale naturale e delle dimensioni e della geometria dello scavo nei riguardi del comportamento deformativo del cavo, il loro mancato aggiornamento in tema di sistemi costruttivi capaci di produrre azioni di precontenimento del cavo (il jet-grouting in orizzontale, il pretaglio meccanico, il preconsolidamento del nucleo d'avanzamento mediante tubi di vetroresina, ecc.) costituiscono infatti limiti oggettivi che rendono inevitabilmente incompleti e non universalmente validi gli approcci progettuali e costruttivi che fanno loro riferimento.

In alternativa a questo tipo di approccio essenzialmente empirico ne è stato utilizzato uno prettamente teorico, che ha portato a sviluppi interessanti, benché limitati sino ad oggi alla sola fase progettuale dell'opera sotterranea. Esso utilizza lo strumento matematico per descrivere il più fedelmente possibile il comportamento tenso-deformativo del terreno e delle strutture di rivestimento onde dimensionare queste ultime. I risultati più importanti che questo tipo di approccio ha permesso di cogliere sono:

- la definizione del concetto di pressione di contenimento del cavo, con cui il progettista è in grado di controllare l'estensione della fascia di terreno plasticizzato al contorno della galleria (raggio plastico R_p), come dimostrato analiticamente per la prima volta da Kastner nel 1962;

- il riconoscimento che il problema del calcolo per il dimensionamento del rivestimento di una galleria è assolutamente tridimensionale e che ciò non può essere lecitamente trascurato specialmente quando si affrontano situazioni di avanzamento in terreni soggetti ad elevati stati tensionali in rapporto alle proprie caratteristiche di resistenza e deformabilità. In questo senso, particolare merito ha avuto Lombardi che ha intuito l'importanza, per la statica di un'opera in sotterraneo, del nucleo di terreno al fronte di scavo;

- la dimostrazione che il valore della pressione esercitata dall'ammasso circostante sulle strutture di stabilizzazione e di rivestimento di una galleria non è predeterminato, ma dipende, tra gli altri fattori, anche dalle modalità di scavo e di messa in opera delle strutture stesse (come si può evincere dal metodo di calcolo delle "linee caratteristiche" (Lombardi, 1974 [12]) e da quello di "convergenza-confinamento" (Panet ed altri).

L'approccio teorico ha fornito ai progettisti gli strumenti di calcolo necessari per valutare il comportamento tenso-deformativo di un ammasso e dimensionare le strutture di stabilizzazione e di rivestimento di una galleria, ma non considera affatto i problemi costruttivi, per cui non costituisce certo un metodo di progettazione e costruzione integrato. Ad esempio non fornisce suggerimenti su come affrontare le situazioni d'instabilità del fronte di scavo.

Lo specchio riportato in figura 1 evidenzia in sintesi i limiti denunciati da ciascuno degli approcci illustrati ripartendoli per ognuna delle quattro fasi fondamentali della progettazione-costruzione di un'opera in sotterraneo (fase conoscitiva, fase di diagnosi, fase di terapia, fase di verifica).

Recentemente, grazie alle nuove conoscenze ac-

Elles peuvent être difficilement appliquées aux roches tendres, aux flysh et aux sols. Elles ne tiennent pas suffisamment compte des effets de tension naturelle, des dimensions et de la géométrie de l'excavation vis-à-vis du comportement en déformation de la cavité. Elles ne sont pas mises à jour en tant que systèmes de construction capables de produire des actions de préconfinement de la cavité (le jet-grouting horizontal, le prédécoupage mécanique, le prerenforcement du noyau d'avancement à l'aide de tubes en résine de verre, etc.). Tout cela constitue des limites réelles. De telle sorte que les approches de conception et de construction s'y référant se révèlent inévitablement incomplets et non universellement valables.

Une alternative existe à ce type d'approche essentiellement empirique. Elle est résolument théorique et a débouché sur des résultats intéressants encore qu'exclusivement limités jusqu'ici à la phase de conception de l'ouvrage souterrain. Cette approche recourt à l'instrument mathématique pour décrire le plus fidèlement possible le comportement de tension et de déformation du terrain et des structures de revêtement afin de les dimensionner. Les résultats les plus importants obtenus par cette approche sont:

- avoir défini le concept de pression de confinement de la cavité permettant au projeteur (l'ingénieur spécialiste des ouvrages en souterrain) de contrôler l'étendue du terrain plastifié sur le contour du tunnel (rayon plastique R_p), ce que Kastner a démontré analytiquement pour la première fois par en 1962

- avoir reconnu que le problème du calcul des dimensions du revêtement d'un tunnel est absolument tridimensionnel et qu'il n'est pas permis de négliger ce facteur, tout particulièrement lorsqu'il s'agit d'affronter des situations d'avancement dans des terrains soumis à des états de tension élevés par rapport à leurs caractéristiques de résistance et de déformabilité. En ce sens, Lombardi a eu le mérite remarquable d'avoir compris l'importance - pour la statique d'un ouvrage souterrain - du noyau de terrain sur le front de taille

- avoir démontré que la valeur de la pression exercée par le massif environnant sur les structures de stabilisation et de revêtement d'un tunnel n'est pas prédéterminé et qu'il dépend également, entre autres choses, des modalités d'excavation et de mise en oeuvre des structures (nous le déduisons de la méthode de calcul des "lignes caractéristiques" (Lombardi, 1974 [12]) et de la méthode de convergence-confinement" (Panet et autres).

L'approche théorique a fourni aux projeteurs les instruments de calcul nécessaires à évaluer le comportement de tension et de déformation d'un massif et à dimensionner les structures de stabilisation et de revêtement d'un tunnel. Elle ne tient cependant pas compte des problèmes de construction de sorte qu'elle ne constitue certes pas une méthode de conception et de construction intégrée. Elle ne fournit notamment pas les indications concernant la manière d'affronter les situations d'instabilité du front de taille.

La figure 1 montre schématiquement les limites présentées par chacune des approches illustrées, réparties sur chacune des quatre phases fondamentales de la conception-construction d'un ouvrage souterrain (reconnaissance, diagnostic, therapie, vérification).

Tout récemment, grâce aux connaissances acquises au cours de la recherche illustrée dans la deuxième partie de cet article, il a été possible de penser à un nouveau concept de

COMPARAISON ENTRE LES CONTRIBUTIONS FOURNIES PAR LES DIFFERENTES ECOLES AU PROBLEME DE LA CONCEPTION ET DE LA CONSTRUCTION DES TUNNELS

| Methodes de conception et/ou de construction | Théorie de Kastner - Fenner | NATM (Nouvelle Methode Austrichienne) | Classifications géomécaniques (Beniawski, Barton, ecc.) | Théorie des lignes caractéristiques | ADECO-RS |
|--|-----------------------------|---------------------------------------|---|-------------------------------------|----------|
| Phases de la conception | | | | | |
| Phase de Reconnaissance | ● | | ● | ● | ● |
| Phase de Diagnostic | ● | | ● | ● | ● |
| Phase de Therapie | | ● | | | ● |
| Phase de Verification | | ● | | ● | ● |

FIG. 1

quisite durante la ricerca illustrata nella seconda parte di questo articolo, è stato possibile pensare ad un nuovo concetto d'inquadramento delle gallerie, che, utilizzando quanto di buono è stato prodotto dai due approcci tradizionali dianzi illustrati, supera le limitazioni di questi ultimi fornendo una risposta adeguata a tutte e quattro le fasi progettuali e costruttive già citate (fig. 1).

In questa terza ed ultima parte della trattazione ne illustreremo in maniera sintetica, ma completa, i concetti informativi.

Criterio d'inquadramento secondo l'approccio basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli

L'approccio, basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli, si contraddistingue, da quelli che sino ad oggi sono stati presi come riferimento, per diverse importanti caratteristiche, in parte, già illustrate nelle parti già pubblicate di questo articolo. In particolare, l'approccio:

1. prevede che il progetto e la costruzione di una galleria non si identifichino più come in passato, ma rappresentino due momenti ben distinti e con una fisionomia ben definita in termini cronologici e pratici;

2. fa riferimento ad un nuovo tipo di inquadramento delle opere in sotterraneo, basata su un unico parametro comune a tutti gli scavi: il comportamento tenso-deformativo del sistema fronte di scavo-nucleo d'avanzamento;

3. fa riferimento alla previsione, al controllo e all'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.

4. introduce il concetto di precontenimento del cavo, che integra il già noto concetto di contenimento, consentendo di risolvere anche le condizioni statiche più difficili in maniera programmata, senza ricorrere ad improvvisazioni costruttive;

5. prevede l'impiego dei sistemi conservativi, per mantenere quanto più possibile inalterate le caratteristiche geotecniche e strutturali del terreno, inteso come "materiale da costruzione", quando questi giocano un ruolo fondamentale sulla velocità e la cadenza di avanzamento dei lavori in sotterraneo.

Elemento peculiare dell'approccio è, come abbiamo accennato, l'introduzione di un nuovo concetto di inquadramento delle opere in sotterraneo.

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

In particolare, come già illustrato nella seconda parte di questa trattazione, risultano individuate tre categorie di comportamento fondamentali (fig. 2):

Categoria A: comportamento a fronte stabile o di tipo lapideo;

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

Categoria C: comportamento a fronte instabile o di tipo sciolto.

Categoria A

La Categoria A è identificabile quando lo stato di coazione nel terreno al fronte ed al contorno del cavo non supera le caratteristiche di resistenza del mezzo. L'"effetto arco" si forma tanto più

encadrement des tunnels qui tout en utilisant ce qui a été fait de bon par les deux approches traditionnelles dont nous avons parlé contourne leurs limites et apporte une réponse appropriée aux quatre phases de conception et de construction citées (fig. 1).

Ce troisième et dernier volet du rapport illustre brièvement mais complètement les concepts essentiels.

Critere de encadrement selon l'approche basée sur l'analyse des deformations controlees dans les roches et dans les sols

L'approche basée sur l'analyse des déformations contrôlées dans les roches et dans les sols se distingue de celles qui ont été prises comme référence jusqu'ici pour des raisons importantes en partie illustrées dans les chapitres déjà publiés de cet article. Entre autres choses, cette approche:

1. prévoit que la conception et la construction d'un tunnel ne s'identifient plus comme dans le passé. Elles représentent deux phases bien distinctes ayant chacune une physionomie bien définie au niveau chronologique et pratique

2. fait référence à un nouveau type d'encadrement des ouvrages souterrains, basée sur un seul paramètre commun à toutes les excavations. Le comportement de tension et de déformation du système front de taille-noyau d'avancement

3. fait référence à la prévision, au contrôle et à l'interprétation de la réponse en déformation, du massif à l'excavation qui devient le seul paramètre auquel se référer. Pour commencer, par la voie théorique, comme objet de prévision et de contrôle. Puis par la voie expérimentale, comme objet de lecture et d'interprétation pour la mise au point du projet en cours de chantier

4. introduit le concept de préconfinement de la cavité qui intègre le concept déjà bien connu de confinement et permet d'apporter des solutions, même aux conditions statiques les plus difficiles, d'une manière programmée, sans recourir à des improvisations dans la construction

5. prévoit l'emploi de systèmes de conservation pour maintenir le plus intactes possible les caractéristiques géotechniques et structurelles du terrain dans le sens de "matériau de construction", lorsque ces caractéristiques jouent un rôle fondamental sur la vitesse et sur la cadence d'avancement des travaux souterrains.

Nous l'avons dit, l'introduction d'un nouveau concept de encadrement des ouvrages souterrains est un élément particulier de cette approche.

Partant de l'observation que les déformations du milieu au cours de l'excavation et donc la stabilité même d'un tunnel sont liées au comportement du noyau d'avancement, c'est la stabilité du système front de taille-noyau d'avancement qui devient l'élément d'encadrement. Faisant référence à un paramètre unique valable pour tous les types de terrain (le comportement de tension et de déformation du noyau de terrain en amont du front de taille) l'approche contourne donc les limites des systèmes adoptés jusqu'ici, tout particulièrement dans le cas de terrains à faible consistance.

Comme nous l'avons vu dans la deuxième partie du rapport, trois catégories fondamentales de comportement sont définies (fig. 2):

Catégorie A: Comportement à front stable ou de type pierreux

Catégorie B: Comportement à front stable à court terme ou comportement de type cohérent

Catégorie C: Comportement à front instable ou de type incohérent

Catégorie A

Elle se manifeste lorsque l'état de coaction dans le terrain, au front de taille et sur le contour de la cavité, ne dépasse pas les caractéristiques de résistance du milieu. Plus le profil d'excavation adhère au profil théorique et plus l'"effet de voûte" se forme près du profil d'excavation.

Les phénomènes en déformation évoluent en domaine élastique. Ils sont immédiats, de l'ordre des centimètres.

Le front de taille est globalement stable. Il peut se produire simplement

vicino al profilo di scavo quanto più questo è aderente al profilo teorico.

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

Il fronte di scavo è globalmente stabile. 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 discontinuità.

Gli interventi di stabilizzazione sono per lo più volti ad impedire la sfioritura del terreno ed al mantenimento del profilo di scavo.

Categoria B

La Categoria B è identificabile quando lo stato di coazione nel terreno al fronte ed al contorno del cavo, durante l'avanzamento, è tale da superare la capacità di resistenza in campo elastico del mezzo.

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

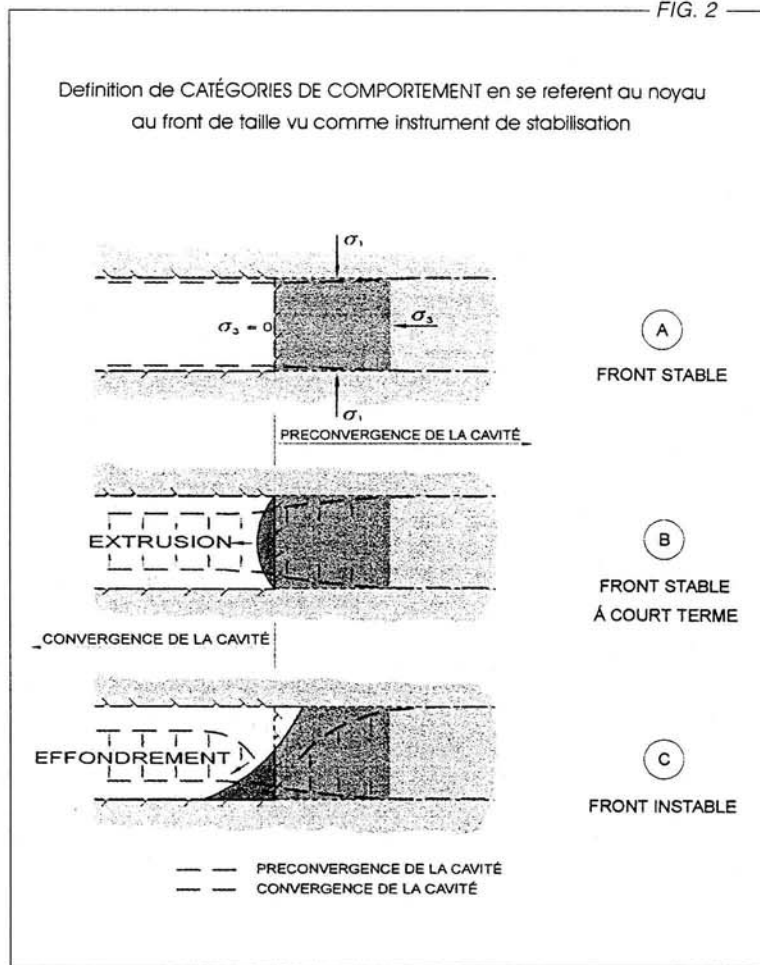
I fenomeni deformativi evolvono in campo elastoplastico, sono differiti e di ordine decimetrico.

Il fronte alle normali cadenze di avanzamento è stabile a breve termine e la sua stabilità migliora o peggiora aumentando o diminuendo la velocità di avanzamento. Le deformazioni del nucleo sotto forma di estrusioni non condizionano la stabilità della galleria, perché il terreno è ancora in grado di mobilitare una sufficiente resistenza residua.

I fenomeni d'instabilità, sotto forma di splaccaggi diffusi sul fronte ed al contorno del cavo lasciano il tempo di operare dopo il passaggio del fronte con interventi di stabilizzazione tradizionali di contenimento radiale. In talune circostanze può essere necessario ricorrere anche ad azioni di precontenimento del cavo, bilanciando gli interventi di stabilizzazione tra il fronte ed il cavo in modo da contenere i fenomeni deformativi in limiti accettabili.

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. È necessario perciò prevenirla soprattutto nella zona del fronte, deviandone i percorsi all'esterno del nucleo.

FIG. 2



des instabilités locales qui se ramènent à une chute de blocs sous l'effet de leur propre poids, isolés par une structure défavorable du massif rocheux. Dans ce contexte, l'anisotropie de la tension et de la déformation du terrain joue effectivement un rôle fondamental.

La présence éventuelle d'eau, même en régime hydrodynamique, n'influence pas la stabilité du tunnel, à moins qu'il ne s'agisse de terrains alterables ou que des gradients hydrauliques trop intenses ne provoquent une dénivellation capable de battre en brèche la résistance au cisaillement le long des plans de discontinuité.

Les interventions de stabilisation sont généralement destinées à empêcher la dégradation du terrain et à conserver le profil de l'excavation.

Catégorie B

Elle se manifeste lorsqu'au cours de l'avancement, l'état de coaction dans le terrain, au front de taille et sur le contour de la cavité, est susceptible de dépasser la capacité de résistance du milieu en domaine

élastique.

L'"effet de voûte" ne se réalise pas immédiatement sur le contour de la cavité mais à une distance qui dépend de la puissance de la bande où le terrain subit le phénomène de la plasticification.

Les phénomènes en déformation évoluent en domaine élastoplastique. Ils sont différés, de l'ordre des décimètres.

Dans les cadences normales d'avancement, le front de taille résulte stable à court terme et sa stabilité s'améliore ou se détériore selon que la vitesse d'avancement augmente ou diminue. Le cas échéant, les déformations du noyau sous la forme d'extrusions ne conditionnent pas la stabilité du tunnel parce que le terrain est encore en mesure de mobiliser une résistance résiduelle suffisante.

Les phénomènes d'instabilité, sous la forme d'écaillages diffus sur le front de taille et sur le contour de la cavité, laissent le temps d'opérer après le passage du front de taille à travers des interventions de stabilisation traditionnelles de confinement radial. Dans certains cas, il peut s'avérer nécessaire de recourir également à des actions de préconfinement de la cavité, équilibrant les interventions de stabilisation entre le front de taille et la cavité, de manière à contenir les phénomènes en déformation dans des limites acceptables.

La présence d'eau, tout particulièrement si elle est en régime hydrodynamique, réduit la capacité de résistance au cisaillement du terrain, favorise l'extension de la plasticification et accroît ainsi l'importance des phénomènes d'instabilité. Il est donc nécessaire de la prévenir essentiellement dans la zone du front, déviant son parcours à l'extérieur du noyau.

Catégorie C

Elle se manifeste lorsque l'état de coaction dans le terrain dépasse sensiblement sa capacité de résistance, même dans la zone du front de

Categoria C

La Categoria C è identificabile quando lo stato di coazione nel terreno supera sensibilmente la capacità di resistenza dello stesso 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 in campo di rottura dando luogo a gravi manifestazioni d'instabilità, quali il crollo del fronte ed il collasso della cavità, senza lasciare il tempo di operare con interventi di contenimento radiale: occorrono interventi di preconsolidamento lanciati a monte del fronte di avanzamento che sviluppino un'azione di precontenimento capace di creare effetti arco artificiali.

La presenza di acqua in regime idrostatico, se non tenuta in debito conto, 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 trascinamento di materiale e di sifonamento assolutamente inaccettabili. E' dunque necessario prevenirla, soprattutto nella zona del fronte, deviandone i percorsi all'esterno del nucleo.

Sulla base di esperienze maturate in più di venticinque 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.

Fasi di sviluppo dell'approccio basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli

Nello sviluppo logico del progetto e della costruzione di una galleria, l'approccio basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli, tenuto conto delle risposte affermative attribuite a ciascuno dei tre quesiti proposti nell'introduzione, suggerisce di procedere secondo le fasi sintetizzate nello schema riportato in fig. 3.

Il momento della progettazione comprende:

- **fase conoscitiva:** durante la quale il progettista, in relazione ai terreni interessati dalla galleria, procede alla caratterizzazione del mezzo in termini di meccanica delle rocce o dei suoli, indispensabile 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 procede ad una suddivisione della galleria stessa in tratte a comportamento deformativo omogeneo nell'ambito delle tre categorie di comportamento A, B, C sopra descritte, definendo per ciascuna tratta i particolari dell'evoluzio-

taile. L'"effetto de voûte" ne peut se former ni au front, ni sur le contour de la cavité car le terrain ne possède pas une résistance résiduelle suffisante. Les phénomènes en déformation sont inacceptables dans la mesure où ils évoluent immédiatement vers la rupture - donnant lieu à de graves manifestations d'instabilité telles que l'effondrement du front de taille et le collapse de la cavité sans laisser le temps d'agir à travers des interventions de confinement radial. Il s'impose donc de procéder à des interventions de préconsolidation en amont du front de taille, capables de développer une action de préconfinement qui puisse créer des effets de voûte artificiels.

Non correctement traitée, la présence d'eau en régime hydrostatique réduit davantage encore la capacité de résistance au cisaillement du terrain, favorise l'extension de la plasticification et accroît en définitive l'importance des phénomènes de déformation. Cette même présence d'eau, en régime hydrodynamique, se traduit par des phénomènes de traînement de matériel et de renard absolument inacceptables. Il est donc nécessaire de la prévenir essentiellement dans la zone du front et de dévier son parcours à l'extérieur du noyau.

Sur la base des expériences acquises en plus de vingt-cinq ans de conception et de construction d'ouvrages souterrains, nous signalons que tous les cas d'ouvrages déjà réalisés tombent dans ces trois catégories de comportement.

Phases de développement de l'approche basée sur l'analyse des déformations contrôlées dans les roches et dans les sols

Dans le développement logique du projet et de la construction d'un tunnel, l'approche fondée sur l'analyse des déformations contrôlées dans

les roches et dans les sols nous pousse à procéder conformément aux phases résumées sur le schéma de la fig. 3, compte tenu des réponses positives attribuées à chacune des trois questions posées dans l'introduction.

La phase de la conception comprend :

- une phase de reconnaissance au cours de laquelle, en fonction des terrains impliqués par le tunnel, le projeteur procède à la caractérisation de la mécanique des roches ou des sols du milieu, indispensable pour procéder à l'analyse des équilibres naturels préexistants et pour pouvoir opérer correctement dans la phase de diagnostic qui suit

- une phase de diagnostic au cours de laquelle, sur la base des éléments réunis au cours de la phase de reconnaissance, le projeteur procède à une subdivision du tunnel en tronçons dont le comportement de déformation est homogène, dans le cadre des trois catégories de comportement A, B, C qui viennent d'être décrites. Les détails de l'évolution de la déformation et les types de charges mobilisées par l'excavation sont définies pour chacun des tronçons

FIG. 3

| MOMENT | PHASE | ARGUMENT |
|--------------------|---------------------------------|--|
| DE LA CONCEPTION | - RECONNAISSANCE | - analyse des équilibres naturels préexistants |
| | - DIAGNOSTIC | - étude et prévision des phénomènes de déformation (*) en absence de stabilisation |
| | - THERAPIE | - régulation des phénomènes de déformation (*) en termes de choix des systèmes de stabilisation |
| DE LA CONSTRUCTION | - OPERATIONNELLE | - application des interventions de stabilisation pour la régulation des phénomènes de déformation (*) |
| | - VERIFICATION EN COURS D'OUVRE | - contrôle et lecture des phénomènes de déformation (*) comme réponse de l'A.R. durant l'avancement des excavation (relèvement extrusion du front et des convergences superficielles et profondes de l'excavation) |
| | - MISE AU POINT DU PROJET | - interprétation des phénomènes de déformation (*) - équilibrage des systèmes de stabilisation entre le front et le périmètre de l'excavation |

(*) Phénomènes de déformation en termes de extrusion du front et de convergence superficielle et profonde de la cavité

ne deformativa ed i tipi di carichi mobilitati dallo scavo;

• **fase di terapia:** durante la quale, a seguito delle previsioni fatte in fase di diagnosi, il progettista opera la scelta del tipo di azione da esercitare (preconfinamento o semplice contenimento) e degli interventi necessari, nell'ambito delle tre categorie di comportamento A,B,C, per ottenere la completa stabilizzazione della galleria. Opera quindi la composizione delle sezioni tipo longitudinali e trasversali dimensionandole e verificandone l'efficacia attraverso gli strumenti del calcolo matematico.

Il momento della costruzione comprende:

• **fase operativa:** durante la quale si realizza la messa in opera degli strumenti di stabilizzazione secondo le previsioni progettuali, adattandoli in termini di contenimento e preconfinamento alla reale risposta deformativa dell'ammasso e controllandoli secondo prestabiliti piani di controllo qualità;

• **fase di verifica:** in cui, mediante la lettura e l'interpretazione dei fenomeni deformativi (che sono la risposta del mezzo all'azione d'avanzamento), durante la costruzione dell'opera si verifica la correttezza delle previsioni fatte in fase di diagnosi e di terapia, onde perfezionare la messa a punto del progetto attraverso il bilanciamento degli strumenti di stabilizzazione tra il fronte e il cavo. La fase di verifica non si esaurisce a galleria ultimata, ma va proseguita per tutto l'arco della sua vita allo scopo di controllarne costantemente la sicurezza d'esercizio.

Progettare correttamente un'opera in sotterraneo significherà allora saper **prevedere**, sulla base della conoscenza degli equilibri naturali preesistenti, il comportamento che il terreno avrà durante lo scavo in termini di innesco ed evoluzione dei fenomeni deformativi, al fine di definire conseguentemente, nell'ambito delle tre categorie di comportamento fondamentali, il tipo di azioni da esercitare (contenimento o preconfinamento) e le tipologie d'intervento atte a contenerli entro limiti accettabili, stabilendo tempi e 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** la risposta deformativa del terreno all'azione dell'avanzamento e degli interventi di stabilizzazione, in termini di estrusioni e convergenze superficiali e profonde del fronte e delle pareti di scavo; in secondo luogo perfezionando (una volta **interpretati** i risultati delle letture) sfondi, velocità e cadenza di avanzamento, intensità, collocazione e tempi di applicazione degli interventi di stabilizzazione bilanciandoli opportunamente tra il fronte ed il perimetro di scavo.

Fase conoscitiva

Realizzare uno scavo in sotterraneo significa turbare gli equilibri preesistenti nel mezzo. Progettare questo scavo riducendo al minimo il disturbo al mezzo in cui si deve operare, quindi riducendo al minimo la risposta deformativa, presuppone 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 la progettazione e quindi la costruzione di una galleria da una fase conoscitiva durante la quale avviene la caratterizzazione del mezzo attraverso **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 equilibri naturali preesistenti e per poter operare correttamente nella fase successiva di "diagnosi".

Lo studio in fase conoscitiva procede in due tempi successivi

• **una fase di terapia** au cours de laquelle - à la suite des prévisions faites lors de la phase de diagnostic - le projecteur choisit le type d'action à adopter (préconfinement ou simple confinement) et les interventions nécessaires, dans le cadre des trois catégories de comportement A, B, C, afin d'obtenir la stabilisation complète du tunnel. Il effectue la composition des sections type longitudinales et transversales qu'il a dimensionnées et dont il va vérifier l'efficacité à travers les instruments de calcul mathématique.

La phase de la construction comprend :

• **la phase opérationnelle** au cours de laquelle se réalise la mise en oeuvre des instruments de stabilisation selon les prévisions conceptuelles, adaptés au niveau de confinement et de préconfinement à la réponse réelle en déformation du massif, et contrôlés selon des plans de contrôle de qualité préétablis

• **la phase de vérification** au cours de laquelle nous vérifions - à travers la lecture et l'interprétation des phénomènes en déformation (qui sont la réponse du milieu à l'action de l'avancement) la justesse des prévisions faites durant la phase de diagnostic et de therapie, afin de perfectionner la mise au point du projet à travers un équilibre des instruments de stabilisation entre le front de taille et la cavité. La phase de vérification ne s'achève pas lorsque le tunnel est terminé. Elle se poursuit tout au long de sa vie dans le but bien précis de contrôler constamment la sécurité de son exploitation.

Projeter correctement un ouvrage souterrain signifie dès lors savoir **prévoir**, sur la base de la connaissance des équilibres naturels préexistants, le comportement que le terrain aura au cours de l'excavation au niveau de l'ammorce et de l'évolution des phénomènes en déformation afin de définir donc - dans le cadre des trois catégories de comportement fondamentales - le type d'actions à mettre en place (confinement ou préconfinement) et les typologies d'intervention capables de les contenir dans des limites acceptables. Non sans établir des délais et des cadences d'application en fonction de l'avancement et de la position du front de taille.

Construire correctement un ouvrage souterrain signifie par ailleurs agir dans le respect des choix faits lors de la conception. Il faut pour cela, premièrement, **lire** très attentivement la réponse en déformation du terrain vis-à-vis de l'action d'avancement et des interventions de stabilisation, en termes d'extrusions et de convergences superficielles et profondes du front et des parois d'excavation. Deuxièmement, **perfectionner** - après interprétation des résultats des lectures - les percements, la vitesse, la cadence d'avancement, l'intensité, l'emplacement et les temps d'application des interventions de stabilisation en les équilibrant correctement entre le front et le périmètre d'excavation.

Phase de reconnaissance

Réaliser une excavation souterraine signifie bousculer les équilibres qui existaient dans le milieu. Projeter cette excavation en perturbant le moins possible le milieu où s'opère cette excavation et en réduisant le plus possible la réponse en déformation suppose dès lors une **connaissance préalable** le plus complète possible de l'état des équilibres naturels en présence dans le terrain avant l'intervention.

Il en dérive le besoin de faire précéder la conception et la construction d'un tunnel par une phase de reconnaissance au cours de laquelle a lieu la caractérisation du milieu à travers **l'acquisition des éléments lithologiques, structuraux, stratigraphiques, morphologiques, tectoniques, hydrologiques, géotechniques, géomécaniques et tensionnels des terrains intéressés par l'ouvrage**. Ces données sont indispensables au projecteur qui doit procéder à l'analyse des équilibres naturels préexistants et opérer correctement lors de la phase suivante de diagnostic.

La phase de reconnaissance prévoit deux étapes (fig. 4) :

Lors d'une **première étape** nous établissons un profil géologique de

(fig. 4).

In un primo tempo viene redatto un 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 del sistema idrologico principale ed il censimento delle sorgenti. Di queste ultime è indispensabile misurare la portata seguendone l'evoluzione in corso d'opera per stabilire l'influenza dell'effetto drenante del cavo su essa.

tentativa dans un axe tracé, développé sur la base de la Carte Géologique de l'Italie 1:100000, de la littérature existante et des relevés aérophotogrammétriques, le tout complété des relevés de surface comprenant:

- le relevé lithologique, avec une définition des principales unités
- le relevé géomorphologique, tenant tout particulièrement compte des conditions de stabilité des versants
- le relevé géostructural, avec une définition des principales lignes de discontinuité
- le relevé hydrogéologique, avec une détermination du système hydrologique principal et le recensement des sources. A propos de sources, il est indispensable de mesurer leur débit et de suivre leur évolution durant le chantier pour établir l'influence de l'effet drainant de la cavité.

Le profil de tentative sera accompagné d'une série de fiches lithologiques des lithotypes trouvés en affleurement le long du tracé, comportant la synthèse des relevés effectués.

Au cas où l'étude de la première phase déposerait en faveur de la faisabilité d'une galerie pilote (fig. 5), la conception (exécutive) peut se prévaloir avantageusement des relevés géologiques et géomécaniques dans la galerie [4] [5] ainsi que des tests in situ projetés pour l'évaluation des caractéristiques de résistance et de déformabilité du massif rocheux.

Lors d'une deuxième étape, sur l'acquis des résultats de l'étude de la première phase, nous élaborons le projet des recherches géognostiques comprenant la définition des recherches géophysiques indirectes, des essais in situ et des sondages - essentiellement par carottage continu - de tarage, avec récupération des échantillons non perturbés de la portion de massif intéressée par l'excavation.

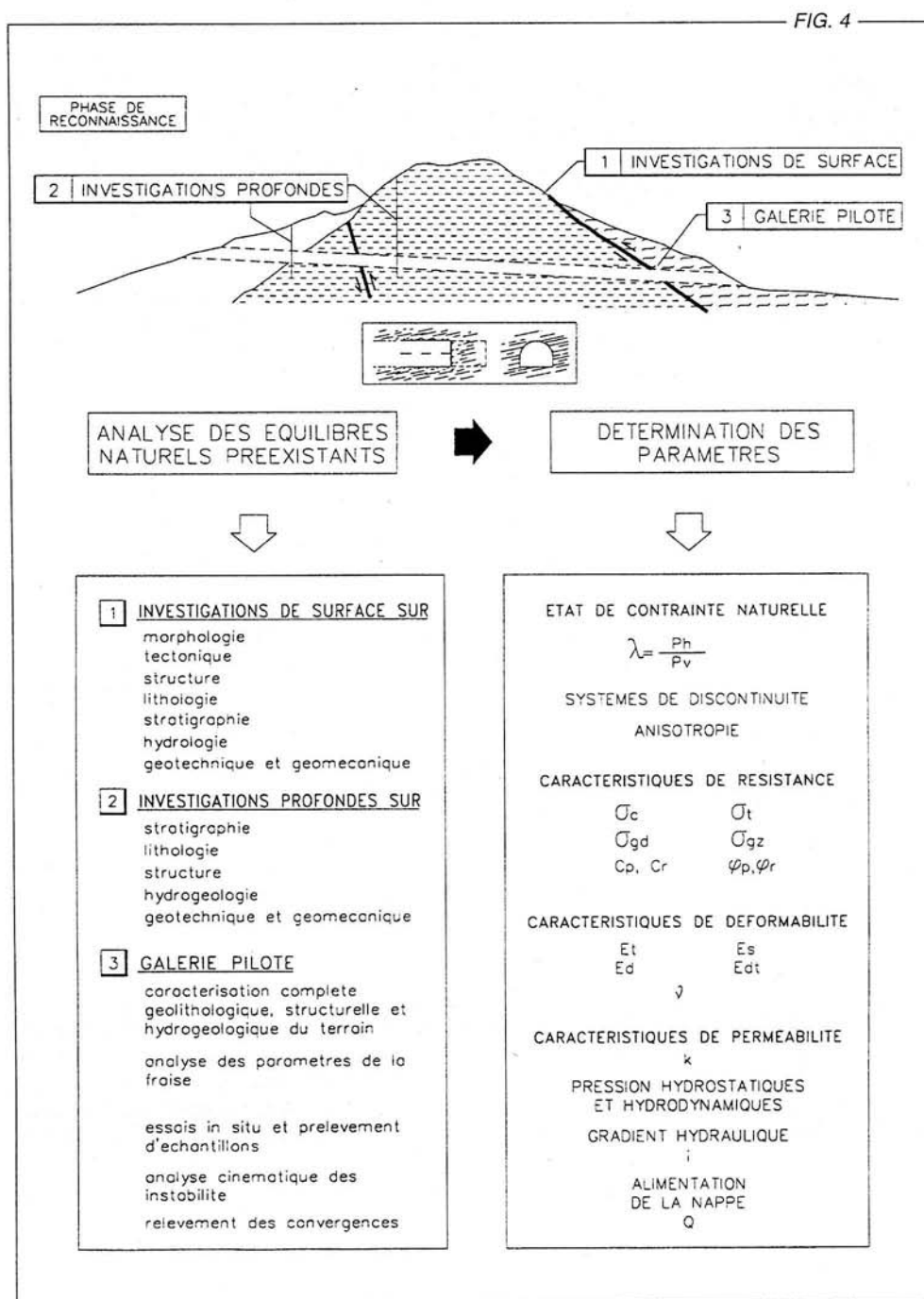
Le prélèvement d'échantillons non perturbés devra obligatoirement être fait à l'aide d'un équipement approprié susceptible de perturber le moins possible le massif. Les échantillons prélevés seront utilisés pour évaluer les propriétés physico-chimiques du massif rocheux en fonction notamment de leur évolution dans le temps et également pour évaluer les paramètres géotechniques et géomécaniques.

Ceci permet de déterminer:

- la courbe intrinsèque de la matrice
- les paramètres de déformabilité de la matrice (module élastique initial et module de déformation totale évalué pour des niveaux de contrainte comparables à ceux qui vont s'instaurer à la suite de la construction de l'ouvrage).

Dans la mesure du possible, il est important de déterminer les caractéristiques de résistance et de déformabilité d'éventuelles discontinuités structurales à partir desquelles obtenir les courbes intrinsèques et les paramètres de déformabilité du massif sur la base de considérations détaillées.

L'étude de la deuxième phase se complète par l'estimation de l'état de tension naturelle, sur la base des recouvrements en jeu et des



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

Qualora lo studio di prima fase deponga per la fattibilità di un cunicolo pilota (fig. 5), la progettazione (esecutiva) può vantaggiosamente avvalersi dei rilievi geologici e geomeccanici in cunicolo [4] [5], nonché delle prove in situ progettate per la valutazione delle caratteristiche di resistenza e deformabilità dell' ammasso roccioso.

In un secondo tempo, sulla scorta dei risultati dello studio di prima fase, viene 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 è indispensabile che sia 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 anche in relazione alla loro evoluzione nel tempo, e per la valutazione dei parametri geotecnici e geomeccanici.

Vengono così determinati:

- la curva intrinseca della matrice;
- i 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, è importante determinare 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 è completato dalla stima dello stato tensionale naturale, sulla base delle coperture in gioco e delle strutture tettoniche principali.

A seconda della rilevanza dell'opera in progetto e della complessità delle strutture tettoniche interessate, può essere assai opportuno eseguire, ogni volta che è possibile, prove di misurazione del tensore naturale degli sforzi alla profondità del cavo.

Fase di diagnosi

In fase di diagnosi il progettista, sulla base degli elementi raccolti in fase conoscitiva, procede ad una suddivisione del tracciato in tratte a comportamento deformativo omogeneo, nell'ambito delle tre categorie di comportamento fondamentali A, B, C (fronte stabile, fronte stabile a breve termine, fronte instabile). Onde perseguire questo obiettivo egli fa previsioni, per via teorica, sulla risposta deformativa del mezzo all'azione dello scavo, con particolare riguardo ai fenomeni deformativi che, in assenza di interventi di

strutture tettoniche principali.

Selon l'importance de l'ouvrage projeté et la complexité des structures tectoniques intéressées, il pourrait s'avérer très utile d'effectuer, le plus souvent possible, des tests de mesure du tenseur naturel des efforts au niveau de la profondeur de la cavité.

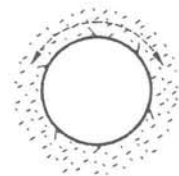
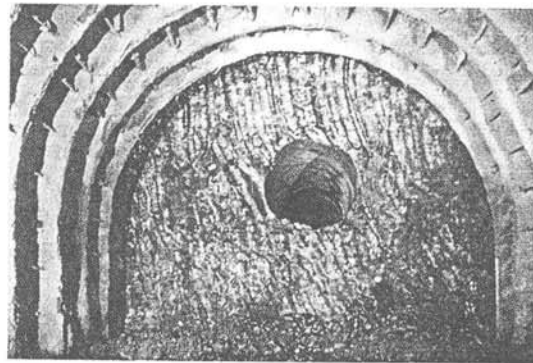
Phase de diagnostic

Lors de la phase de diagnostic, sur la base des éléments collectés lors de la phase de reconnaissance, le projeteur procède à une subdivision du tracé en tronçons ayant un comportement de déformation homogène dans le cadre des trois catégories fondamentales A, B et C (front stable, front stable à court terme et front instable). Pour aller de l'avant dans cet objectif, il fait des prévisions théoriques sur la réponse en déformation du milieu à l'action d'excavation. Il met tout particulièrement l'accent sur les phénomènes de déformation qui - à défaut d'interventions de stabilisation - se manifesteraient au front de taille et par voie de conséquence dans la partie de terrain qui entoure la cavité.

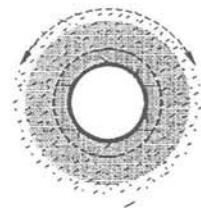
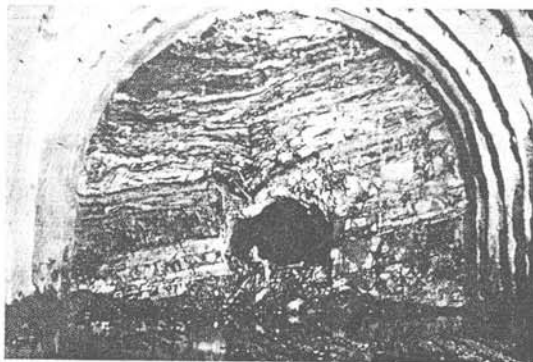
L'analyse de la réponse en déformation du front de taille-noyau d'avancement et de la cavité est faite, en ce qui concerne la genèse, la localisation, l'évolution et l'importance, en recourant à des méthodes expérimentales et à des instruments mathématiques tels que les lignes

FIG. 5

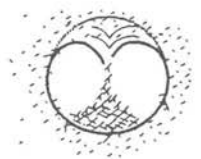
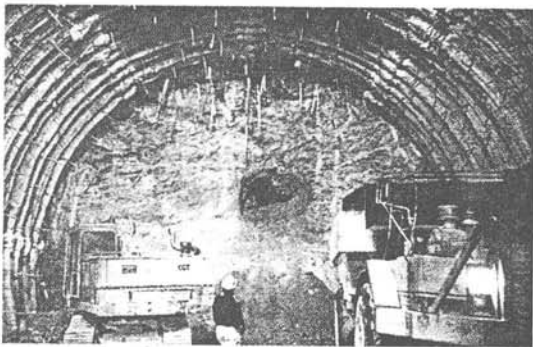
GALERIE PILOTE ET EFFET DE VÔUTE



① NATUREL



② DEVIÉ



③ NUL

stabilizzazione, si manifesterebbero al fronte d'avanzamento e, di conseguenza, nella fascia di terreno al contorno del cavo.

L'analisi della risposta deformativa del fronte-nucleo d'avanzamento e del cavo viene condotta, in termini di genesi, localizzazione, evoluzione ed entità, facendo ricorso a metodi sperimentali e strumenti matematici quali le linee caratteristiche, gli elementi finiti bi-tridimensionali, ecc., che, in funzione dell'attendibilità dei parametri geotecnici e geomeccanici d'ingresso, siano in grado di orientare il progettista nella definizione dell'appartenenza delle diverse tratte di galleria alle tre categorie di comportamento A, B, C già citate.

Tra questi ultimi, il metodo delle linee caratteristiche [12], utilizzabile nella maggior parte delle situazioni correnti, appare particolarmente utile e semplice da impiegare per perseguire questo scopo (fig. 6).

Tra i metodi sperimentali, in certi tipi di terreno le prove di estrusione in cella triassiale consentono di simulare in laboratorio, su provini indisturbati di materiale prelevato in situ, l'avanzamento della galleria sotto le diverse coperture e le modifiche tensionali indotte dall'azione di scavo nel sistema fronte-nucleo d'avanzamento, evidenziandone il tipo di comportamento (fig. 6).

Il risultato dello studio di diagnosi alla fine si concretizza nella stesura di un profilo longitudinale della galleria da progettare, sul quale sarà evidenziata la suddivisione in tratte a comportamento deformativo omogeneo e le categorie di comportamento (A, B, C) ad esse associate.

Definita l'appartenenza di ciascuna tratta ad una delle tre categorie di comportamento, fa parte della fase di diagnosi anche l'individuazione, nell'ambito di ciascuna categoria:

caratteristiche, les éléments finis bi-tridimensionnels etc., capables d'orienter le projeteur dans la définition de l'appartenance de différents tronçons de tunnel aux trois catégories de comportement A, B et C déjà citées.

Parmi ces méthodes, celle des lignes caractéristiques [12] utilisable dans la plupart des situations courantes se présente comme étant particulièrement utile et simple, à utiliser pour atteindre ces objectifs (fig. 6).

Parmi les méthodes expérimentales, dans certains types de terrain, les tests d'extrusion en cellule triaxiale permettent de simuler en laboratoire, sur des échantillons non perturbés de matière prélevée in situ, l'avancement du tunnel sous les différentes couvertures et les modifications de contrainte provoquées par l'action d'excavation dans le système front de taille-noyau d'avancement soulignant son type de comportement (fig. 6).

A la fin, le résultat de la phase de diagnostic se traduit par l'établissement d'un profil longitudinal du tunnel à projeter, profil qui soulignera la subdivision en tronçons ayant un comportement de déformation homogène et les catégories de comportement (A, B, C) associées.

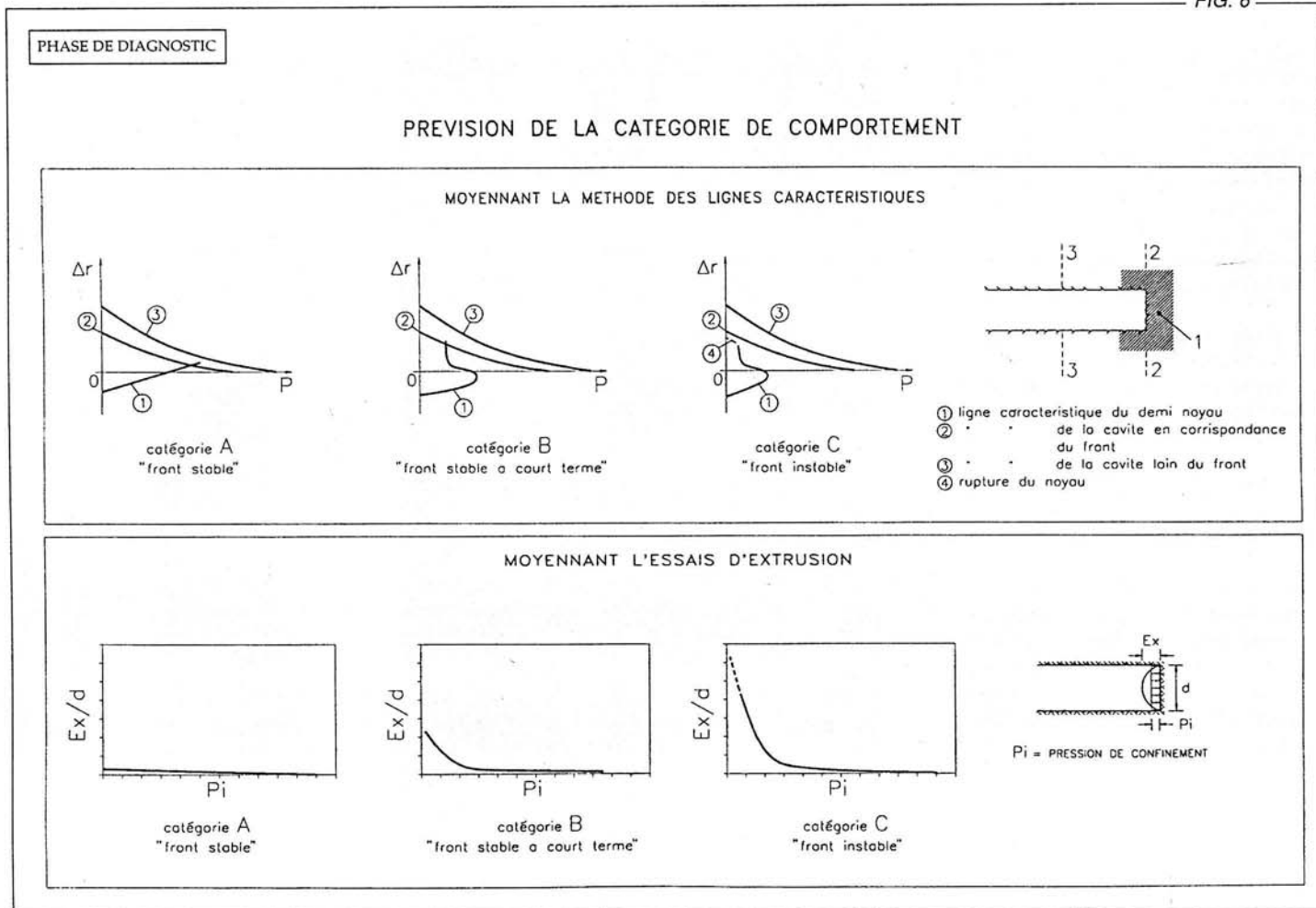
Après avoir défini l'appartenance de chaque tronçon à l'une des trois catégories de comportement, il incombe à la phase de diagnostic de définir dans le cadre de chaque catégorie:

a. les typologies de déformation qui se développeront sur le contour de l'excavation (extrusion, préconvergence et convergence)

b. les manifestations d'instabilité attendues qui s'ensuivent telles que:

- les chutes de blocs sous l'effet de leur propre poids et les écaillages sur le front de taille, produits par l'extrusion du noyau et par la*

FIG. 6



a) delle tipologie di deformazione che si svilupperanno al contorno dello scavo (estrusione, preconvergenza e convergenza);
 b) delle manifestazioni d'instabilità conseguenti ed attese, quali:

- distacchi gravitativi e splaccaggi al fronte, prodotti dall'estrusione del nucleo e dalla preconvergenza;
- distacchi gravitativi e splaccaggi al contorno del cavo prodotti dalla convergenza del cavo;
- collasso della cavità prodotto dal crollo del fronte.

c) dei carichi mobilitati dallo scavo secondo modelli a solidi di carico e ad anelli plasticizzati (fig. 7).

Fase di terapia

In fase di terapia il progettista, sulla base delle categorie di comportamento attribuite in fase di diagnosi, opera la scelta del tipo di azione da esercitare (precontenimento, contenimento, o presostegno) per ottenere la completa stabilizzazione della galleria (regimazione dei fenomeni deformativi).

Da quanto esposto in precedenza, circa l'importanza della rigidità del nucleo d'avanzamento nei riguardi del comportamento deformativo del fronte e del cavo, quindi della stabilità di tutta la galleria, risulta che, in linea di massima, egli:

- potrà limitarsi ad esercitare azioni di semplice contenimento, nel caso di gallerie con comportamento deformativo a fronte stabile (Categoria A);
- dovrà orientarsi a produrre energiche azioni di precontenimento - oltre, ovviamente, a quelle di contenimento - nel caso di gallerie con comportamento deformativo a fronte instabile (Categoria C);

preconvergenza

- les chutes de blocs sous l'effet de leur propre poids et les écaillages sur le contour de la cavité produits par la convergence de ce dernier
 - collapse de la cavité produit par l'effondrement du front de taille
- c. des charges mobilisées par l'excavation selon les modèles à solides de charge et à anneaux plastifiés (fig. 7).

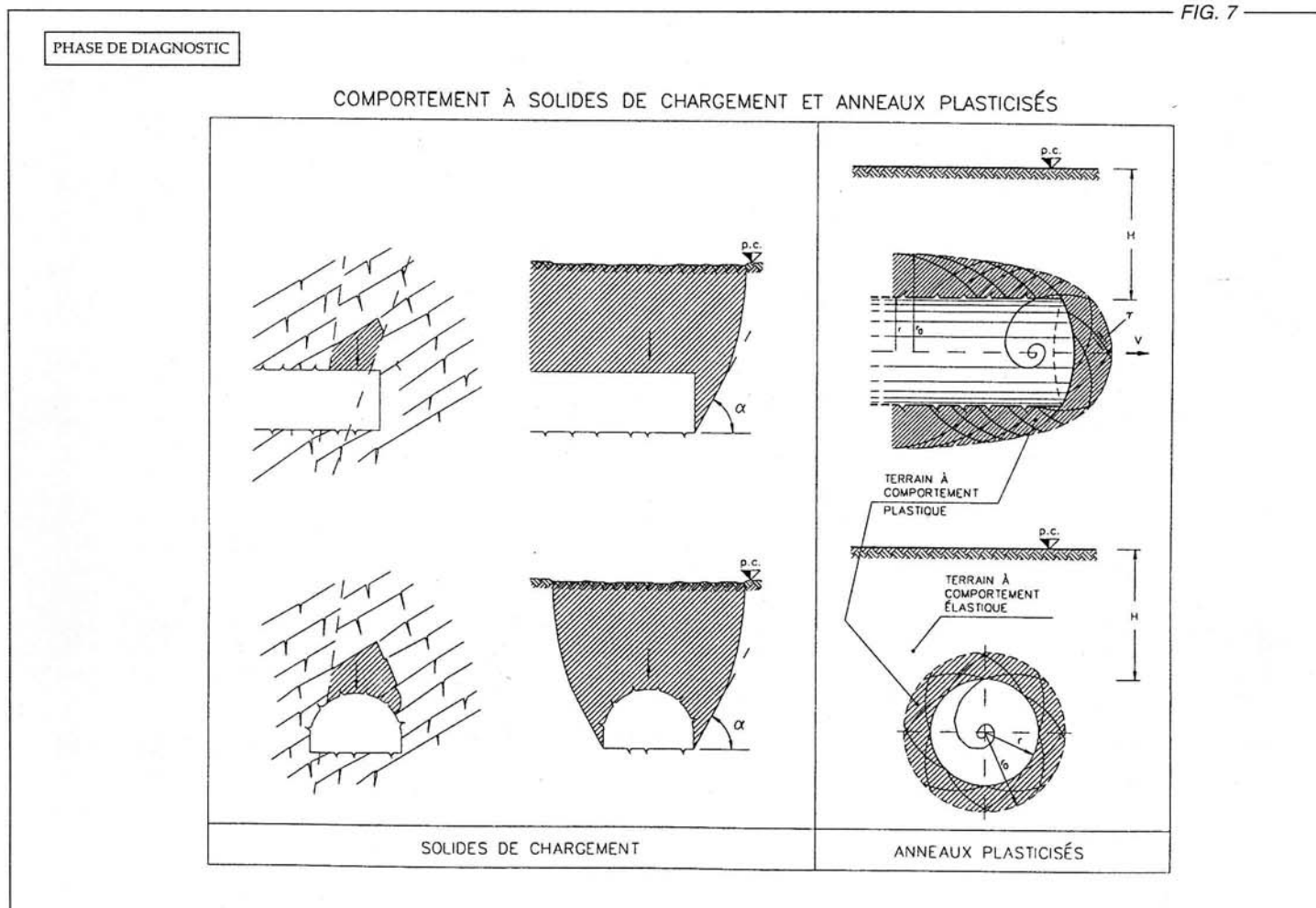
Phase de therapie

Lors de la phase de therapie, le projeteur, sur la base des categories de comportement définies lors de la phase du diagnostic, choisit le type d'action à adopter (preconfinement, confinement ou presoutènement) pour obtenir la stabilisation complète du tunnel (contrôle des phénomènes de déformation).

Conformément à ce qui a été dit plus haut sur l'importance de la rigidité du noyau d'avancement vis-à-vis du comportement de déformation du front de taille et de la cavité et par voie de conséquence de la stabilité du tunnel tout entier, il s'avère en principe qu'il:

- pourra se limiter à exercer des actions de simple confinement dans le cas de tunnels ayant un comportement de déformation à front stable (Catégorie A)
- devra tendre à produire des actions énergiques de preconfinement - au-delà naturellement de celles de confinement - dans le cas de tunnels ayant un comportement de déformation à front instable (Catégorie C)
- pourra opter entre preconfinement ou simple confinement de la cavité en fonction de la vitesse et de la cadence d'avancement supposées être réalisées dans le cas de tunnels ayant un comportement de déformation à front stable à court terme (Catégorie B).

Une fois que le type d'action à exercer aura été choisi, il faudra mettre



comportamento fondamentali, che caratterizzano ed inquadrano, 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 interventi di stabilizzazione cui affidare la stabilità e la sicurezza dell'opera.

Tenuto conto di ciò, in figura 9, nell'ambito dell'inquadramento proposto, è schematicamente indicato il campo di applicabilità dei singoli strumenti di stabilizzazione a disposizione del progettista, dal cui assemblaggio scaturiscono le sezioni tipo idonee a garantire la fattibilità dello scavo e la stabilità a breve e a lungo termine della galleria. In particolare:

- nelle tratte di galleria a fronte stabile (categoria di comportamento: A, sollecitazioni: in campo elastico, manifestazioni d'instabilità tipiche: distacchi gravitativi), gli interventi di stabilizzazione proposti hanno funzione soprattutto protettiva e sono determinati dall'assetto geostrutturale dell'ammasso e dall'eventuale presenza di acqua.

- nelle tratte di galleria a fronte stabile a breve termine (categoria di comportamento: B, sollecitazioni: in campo elastoplastico, manifestazioni d'instabilità tipiche: splaccaggi per estrusione del nucleo, preconvergenza e convergenza del cavo) gli interventi di stabilizzazione devono garantire la formazione dell'effetto arco il più possibile vicino al profilo di scavo. Vengono quindi proposti strumenti capaci d'impedire il decadimento delle caratteristiche di resistenza e deformabilità del terreno con particolare riferimento al sistema fronte-nucleo d'avanzamento, sviluppando azioni di contenimento o precontenimento adeguate a contrastare l'insorgere di fenomeni di plasticizzazione dell'ammasso, o per lo meno a limitarne l'estensione.

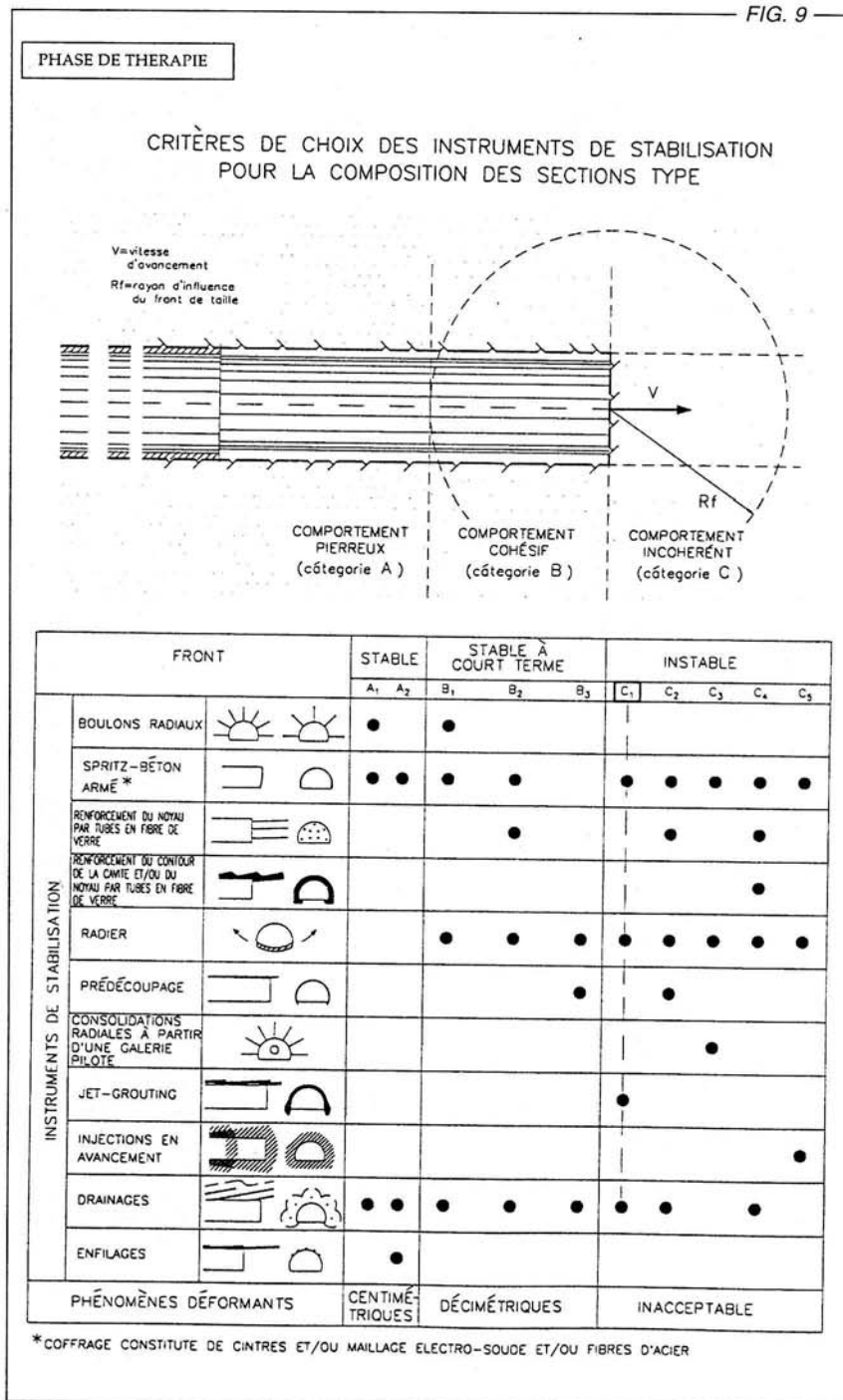
- nelle tratte di galleria a fronte instabile (categoria di comportamento: C, sollecitazioni: in campo di rottura, manifestazioni d'instabilità tipiche: crollo del fronte, collasso della cavità) gli interventi di stabilizzazione devono garantire la formazione di un effetto arco artifi-

aboutit aux sections type capables de garantir la faisabilité de l'excavation et la stabilité à court et à long terme du tunnel. Et notamment:

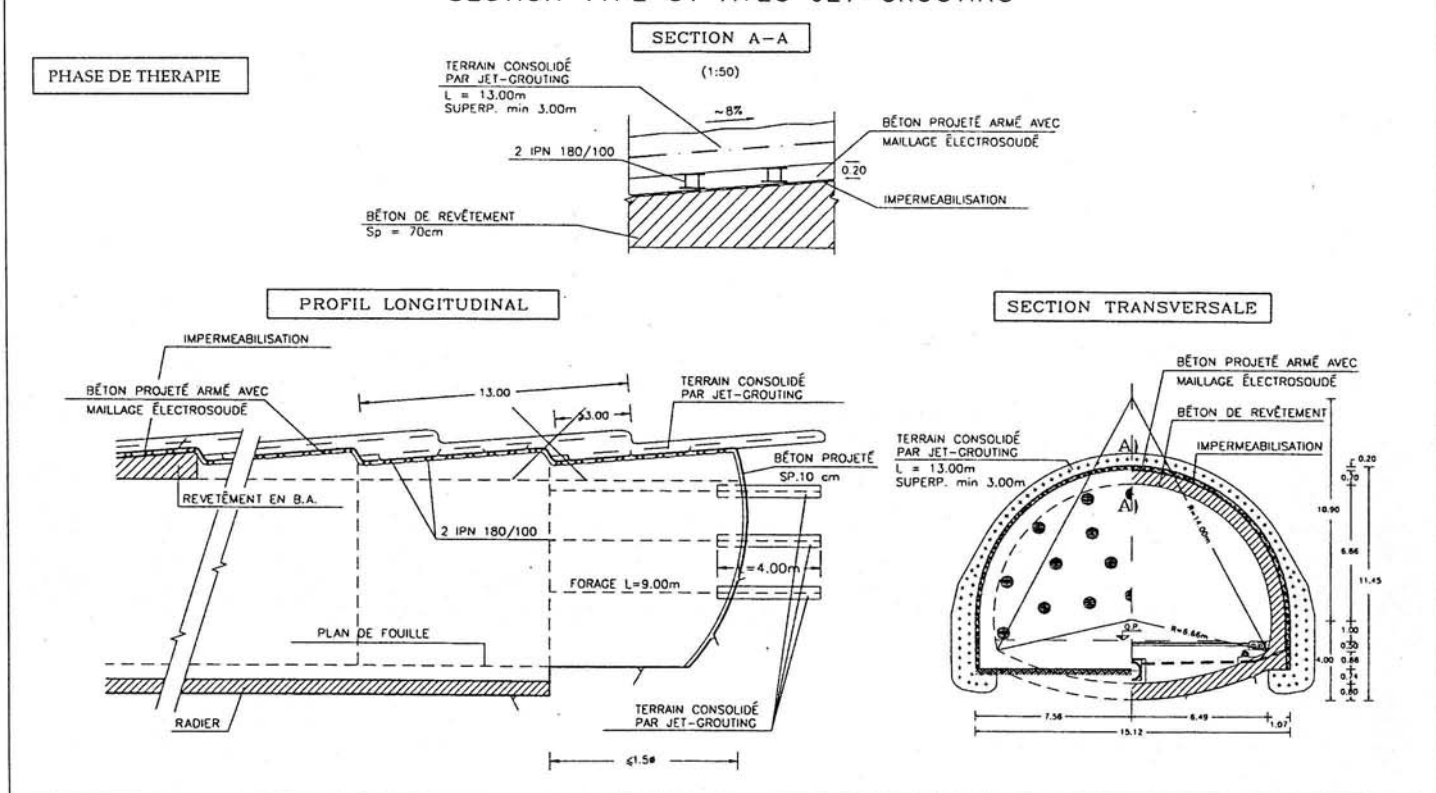
- dans les tronçons de tunnel à front stable (catégorie de comportement A, contraintes: en domaine élastique, manifestations d'instabilité typiques: chutes de blocs sous l'effet de leur propre poids), les interventions de stabilisation proposées ont essentiellement une fonction de protection. Elles sont déterminées par l'état géostrucurel du massif et par une éventuelle présence d'eau

- dans les tronçons de tunnel à front stable à court terme (catégorie de comportement B, contraintes: en domaine élastoplastique, manifestations d'instabilité typiques: chutes de blocs sous l'effet de leur propre poids par extrusion du noyau, préconvergence et convergence de la cavité), les interventions de stabilisation doivent garantir la formation de l'effet de voûte le plus près possible du profil d'excavation. Nous proposons donc des instruments capables d'empêcher la détérioration des caractéristiques de résistance et de déformabilité du terrain et notamment du système front de taille-noyau d'avancement. Ils développent des actions de préconfinement ou de confinement capables d'empêcher l'apparition de phénomènes de plastification du massif pour le moins de limiter leur extension

- dans les tronçons de tunnel à front instable (catégorie de comportement C, contraintes: en domaine de rupture, manifestations d'instabilité typiques: effondrement du front de taille et collapse de la cavité), les interventions de stabilisation doivent garantir la formation d'un effet de voûte artificiel en avance sur le front de taille. Nous proposons donc des instruments de préconfinement de la cavité qui assurent la stabilité du système front de taille-noyau d'avancement et - lorsque les phénomènes en déformation sont encore contrôlables - qui empêchent la tension principale mineure σ_3 de s'annuler.



SECTION TYPE C1 AVEC JET-GROUTING



ciale in anticipo sul fronte d'avanzamento. Vengono quindi proposti strumenti di precontenimento del cavo che, assicurando la stabilità del sistema fronte-nucleo d'avanzamento, impediscano di fatto, quando i fenomeni deformativi sono ancora controllabili, l'annullamento della tensione principale minore σ_3 .

La tabella di figura 9 può dunque venir utilizzata dal progettista quale riferimento per la definizione delle sezioni tipo sia longitudinali che trasversali.

La figura 10 illustra un esempio di composizione di sezione tipo C4.

Dimensionamento e verifica delle sezioni tipo. Sintesi della fase di terapia

Scelto il tipo di azione da esercitare, progettati gli interventi per realizzarla e composte le sezioni tipo, al progettista rimane ancora da dimensionare e verificare queste ultime con i metodi di calcolo già impiegati in fase di diagnosi. Di particolare rilievo al riguardo è la verifica del corretto bilanciamento degli interventi tra il fronte ed il perimetro di scavo e la valutazione del loro grado di efficacia in base all'accettabilità del comportamento tenso-deformativo previsto per la galleria una volta che sarà stato eseguito l'intervento. Naturalmente il calcolo, a seconda della particolare situazione tenso-deformativa supposta, può esser condotto ricorrendo a semplici modelli di "convergenza-contenimento" o, al contrario, a più complessi modelli di estrusione-contenimento o estrusione-precontenimento.

Il risultato dello studio di terapia viene quindi sintetizzato sul profilo geomeccanico della galleria riportando, per ogni tratta a comportamento deformativo omogeneo, la sezione tipo da adottare.

Fase di verifica

Una volta superato il momento della progettazione, l'avvio dei lavori di scavo (momento della costruzione) coincide con quello

La figura 10 mostra un esempio di composizione di sezione tipo C4.

Dimensionnement et vérification des sections type. Synthèse de la phase de therapie

Après avoir choisi le type d'action à accomplir, projeté les interventions pour la réaliser, composé les sections type, le projeteur doit dimensionner et vérifier ces dernières selon les méthodes de calcul déjà utilisées au cours de la phase de diagnostic. A cet égard, il est très important de vérifier l'équilibre correct des interventions entre le front et le périmètre d'excavation et d'évaluer leur degré d'efficacité sur la base du comportement acceptable prévu au niveau de la tension et de la déformation, une fois que l'intervention aura été effectuée. Naturellement, selon la situation de tension et de déformation supposée, le calcul peut être fait en recourant à de simples modèles de "convergence - confinement" ou au contraire à des modèles plus complexes d'extrusion-confinement ou d'extrusion-préconfinement.

Le résultat de l'étude de therapie se résume donc sur le profil géomécanique du tunnel reportant pour chaque tronçon à comportement en déformation homogène, la section type à adopter.

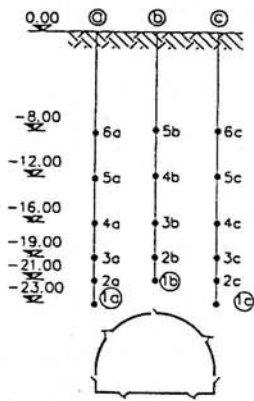
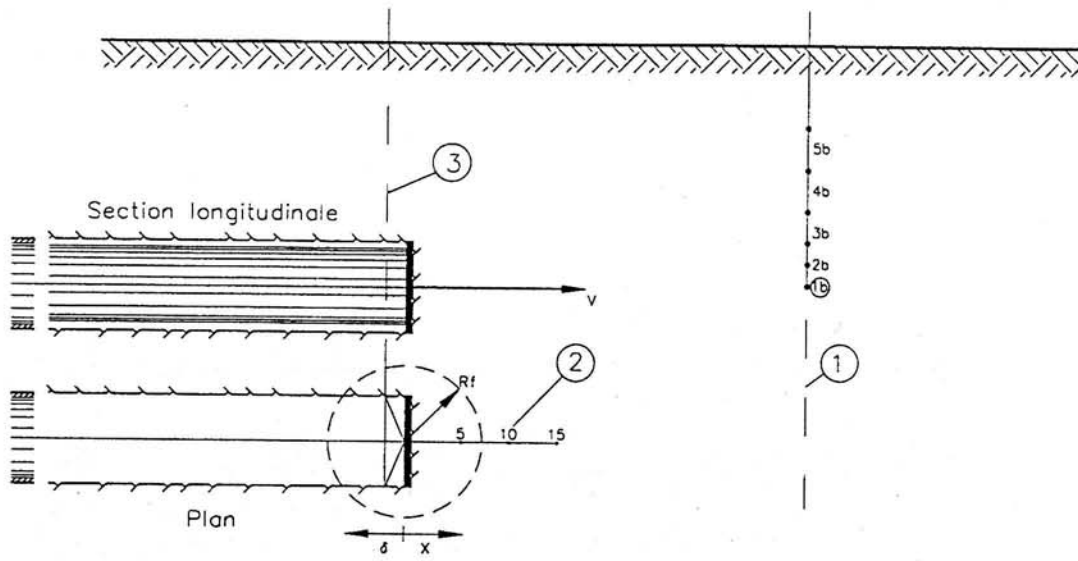
Phase de vérification

Passée la phase de conception, le démarrage des travaux d'excavation (phase de la construction) coïncide avec le démarrage de la vérification de la fiabilité des prévisions faites lors des phases de diagnostic et de therapie concernant les phénomènes en déformation.

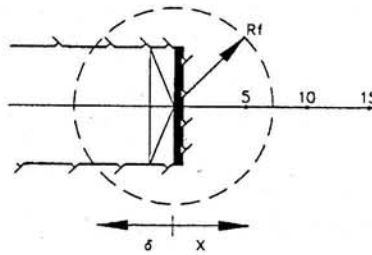
Cette vérification (qui acquiert une importance considérable du fait que la conception tout entière a été basée sur ces prévisions) se fait à travers la mesure et le contrôle de la "réponse" du milieu à l'action de l'excavation, réponse qui se manifeste sous la forme de phénomènes de déformation:

- à l'intérieur de la cavité, à la hauteur du front de taille et des parois de l'excavation;
- en surface, à la hauteur du tracé du tunnel.

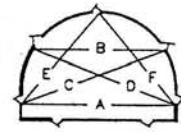
PHASE DE VERIFICATION



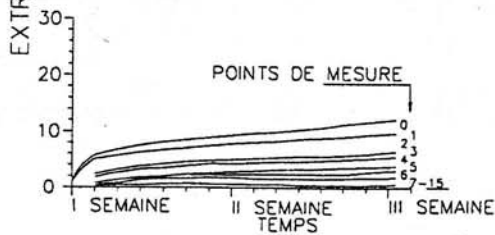
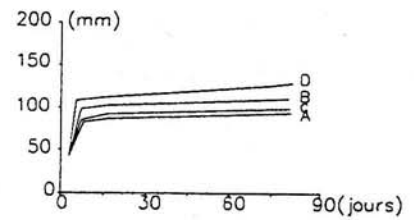
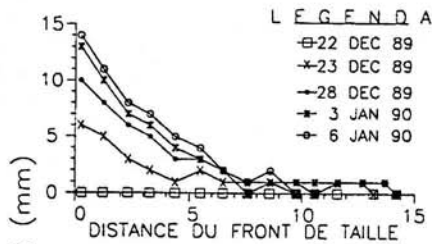
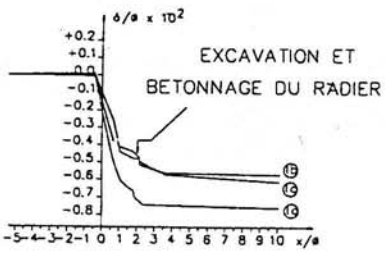
1



2



3



della verifica riguardo all'attendibilità delle previsioni fatte in fase di diagnosi e di terapia in termini di fenomeni deformativi.

Detta verifica (che assume grande importanza avendo basato l'intera progettazione su queste previsioni) avviene attraverso la misura ed il controllo della reale "risposta" del mezzo all'azione dello scavo, risposta che si manifesta sotto forma di fenomeni deformativi:

- all'interno della cavità, in corrispondenza al fronte ed alle pareti di scavo;
- in superficie, in corrispondenza al tracciato della galleria.

A questo scopo è prevista la predisposizione di adeguate stazioni di misura a monte, in corrispondenza ed a valle del fronte d'avanzamento (fig. 11).

Infatti, quando si prevede che l'avanzamento del fronte avverrà in condizioni di stabilità a breve termine o di instabilità, ogni volta che la copertura della galleria lo permette è particolarmente interessante e consigliabile mettere in opera in una determinata sezione, prima dell'arrivo del fronte, degli strumenti multibase verticali adatti a misurare i fenomeni deformativi radiali che precedono il suo arrivo (preconvergenze).

In corrispondenza del sistema fronte-nucleo d'avanzamento, poi, con sliding micrometre longitudinali ed estensimetri radiali multibase ad asta, si controlleranno rispettivamente le estrusioni e le convergenze superficiali e profonde all'interno dell'ammasso, a distanze variabili dal profilo di scavo, mentre con speciali estensimetri a nastro si controlleranno le convergenze perimetrali a valle del fronte.

Quanto più queste misure sono eseguite sistematicamente e con accuratezza tanto più risultano affidabili ed utili le informazioni che ne derivano al progettista, il cui compito potrà risultare più o meno complesso a seconda del campo in cui detti fenomeni evolvono.

Infatti, se l'avanzamento si svolge in un mezzo a comportamento di tipo lapideo o sciolto (rispettivamente Categoria A o C), 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 peso dei controlli è ridotto, in considerazione del fatto che i fenomeni deformativi hanno una evoluzione rapida nel tempo e limitata come entità. Di conseguenza è molto alleviato anche il lavoro del progettista, una volta operate le scelte di regimazione adeguate alla situazione reale.

Diverso è l'impegno del progettista e diversa è la cura che deve porre nell'analisi delle deformazioni del sistema fronte-nucleo d'avanzamento e delle 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 (Categoria B).

In questo caso, infatti, dovendo trattare con fenomeni deformativi lenti, progressivi e differiti, di entità sempre crescente, solo dalla continua lettura dei controlli il progettista può ottenere le informazioni necessarie da un lato per ottimizzare l'intensità ed il bilanciamento tra il fronte ed il cavo degli interventi di stabilizzazione operati e dall'altro lato per calibrare fasi, cadenze, e sistemi di scavo.

E' di conseguenza inutile sottolineare quanto sia importante saper interpretare correttamente i risultati forniti dai controlli, perchè è dalla loro corretta interpretazione che dipende la buona nessa a punto del progetto in corso d'opera.

E' invece importante sottolineare che la fase di verifica non termina a galleria finita, al contrario essa deve proseguire attraverso un'opera di monitoraggio sistematico, volta a controllare la sicurezza del tunnel per tutto l'arco della sua vita d'esercizio.

Dans ce but, il est prévu de disposer en amont des stations de mesure appropriées, au niveau et en aval du front de taille (fig. 11).

Toutes les fois qu'il est prévu que l'avancement du front de taille se fasse dans des conditions de stabilité à court terme ou d'instabilité, et toute les fois que le recouvrement du tunnel le permet, il est bon, voire tout à fait recommandé, de mettre en place, dans une section déterminée et avant l'arrivée du front, des instruments multi-base verticaux testés et capables de mesurer les phénomènes en déformation radiaux qui précèdent son arrivée (préconvergenances).

De plus, au niveau du système front de taille-noyau d'avancement, il sera possible, à l'aide de "sliding micrometres" longitudinaux et d'extensomètres radiaux multi-base à tige de contrôler les extrusions et les convergences superficielles et profondes à l'intérieur du massif respectivement, à des distances variables du profil d'excavation. Des extensomètres à bande permettront de contrôler les convergences périmétrales en aval du front.

Plus ces mesures seront effectuées systématiquement et avec précision et plus les informations obtenues par le projeteur - dont la tâche pourra s'avérer plus ou moins complexe selon le domaine où ces phénomènes se produisent - seront fiables et utiles.

Si l'avancement se déroule dans un milieu à comportement de type pierreux ou incohérent (Catégorie A ou C respectivement) où les phénomènes en déformation prévus sont tellement réduits qu'ils n'éveillent aucune préoccupation (cas des terrains lithoïdes sous des recouvrements faibles-moyens) ou tellement forts qu'ils sont inacceptables et obligent à procéder à un préconfinement de la cavité (cas des terrains incohérents sous n'importe quel recouvrement, argileux et lithoïdes sous de forts recouvrements) le poids des contrôles est effectivement réduit, compte tenu du fait que les phénomènes en déformation évoluent rapidement dans le temps et que cette évolution est limitée. Le travail du projeteur s'en trouve par conséquent fortement allégé une fois choisi le contrôle adéquat pour la situation réelle.

Lorsque l'avancement se fait dans un milieu à comportement de type cohérent (Catégorie B), l'effort du projeteur change de même que l'attention qu'il doit consacrer à l'analyse des déformations du système front de taille-noyau d'avancement et à l'analyse des convergences superficielles et profondes de la cavité dont il doit suivre l'évolution dans le temps et dans l'espace.

Dans ce cas, se trouvant face à des phénomènes de déformation lents, progressifs et différés, d'importance sans cesse croissante, la lecture constante des contrôles est effectivement la seule à fournir au projeteur les informations nécessaires d'une part pour optimiser l'intensité et l'équilibre - entre le front et la cavité - des interventions de stabilisation et, de l'autre, pour calibrer les phases, les cadences et les systèmes d'excavation.

Il est donc superflu de souligner l'importance de savoir interpréter correctement les résultats fournis par les contrôles. C'est de leur interprétation correcte que dépend une bonne mise au point du projet en chantier.

En revanche il est impératif de souligner que la phase de vérification ne s'achève pas avec l'achèvement du tunnel. Bien au contraire. Elle doit se poursuivre à travers un monitoring systématique destiné à contrôler la sécurité du tunnel pendant toute son exploitation autrement dit toute sa vie.

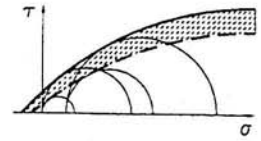
Conclusions

L'approche basée sur l'analyse des déformations contrôlées dans les roches et dans les sols est une approche de conception et de construction d'ouvrages souterrains valable pour tous les types de terrains. Elle exploite les connaissances, les moyens de calcul, les technologies d'attaque les plus récentes (fig. 12) et sert de guide au projeteur pour encadrer un tunnel dans l'une des trois catégories de comportement fondamentales. Les points de référence sont les conditions de stabilité du système front de taille-noyau d'avancement prévues à travers une étude théorique approfondie de la tension et de la déformation menée à l'aide d'instruments

FIG. 12

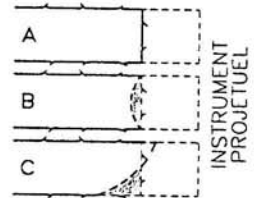
PHASE DE RECONNAISSANCE

CARACTÉRISATION DU MILIEU
en termes de mécanique des roches et des sols



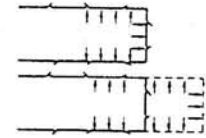
PHASE DE DIAGNOSTIC

DÉTERMINATION DES CATÉGORIES
DE COMPORTEMENT (A,B,C)
fondée sur la prévision de la stabilité du noyau
d'avancement par méthodes mathématiques
en absence d'interventions de stabilisation

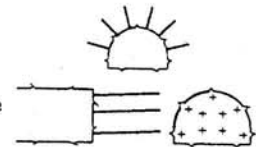


PHASE DE THERAPIE

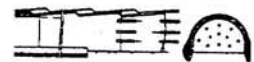
CHOIX DE L'ACTION DE CONFINEMENT OU DE
PRÉCONFINEMENT À EXERCER
dans le cadre des catégories de comportement (A,B,C)



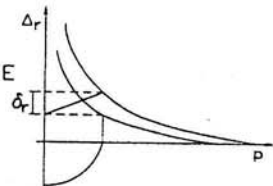
CHOIX DES INTERVENTIONS DE CONFINEMENT ET
PRÉCONFINEMENT
fondé sur les récents progrès en champ technologique



COMPOSITION DES SECTIONS TYPE
longitudinales et transversales

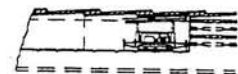


DIMENSIONNEMENT ET VERIFICATION DES SECTIONS TYPE
en termes de convergence-confinement,
extrusion-confinement et extrusion-préconfinement



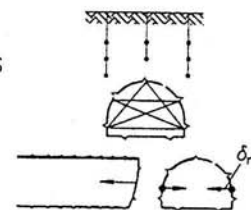
PHASE DE OPERATIONNELLE

MISE EN OUVRE DES INTERVENTIONS DE STABILISATION
en termes de confinement et preconfinement



PHASE DE VERIFICATION

CONTRÔLE DE LA EXACTITUDE DES EVALUATIONS FAITES
EN PHASE DE DIAGNOSTIC ET DE THERAPIE
par la lecture des phénomènes de déformation
comme réponse du milieu pendant
l'avancement des excavations



MISE AU POINT DU PROJECT
par équilibrage des intervention
entre le front et la cavité

CONTRÔLE DE LA SÛRETÉ DU TUNNEL EN
PHASE DE SERVICE

Considerazioni conclusive

L'approccio basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli è un approccio di progettazione e costruzione di opere in sotterraneo 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 inquadrare una galleria nell'ambito di tre categorie di comportamento fondamentali, assumendo come riferimento le condizioni di stabilità del sistema fronte-nucleo d'avanzamento previste attraverso un approfondito studio tenso-deformativo condotto per via teorica con gli strumenti del calcolo matematico. Per ciascuna tratta il progettista decide, in funzione del tipo di comportamento previsto, il genere di azione (precontenimento o semplice contenimento) da produrre per ottenere la regimazione dei fenomeni deformativi e, di conseguenza, sceglie gli interventi di stabilizzazione e la sezione tipo longitudinale e trasversale di volta in volta più adatta alla situazione. Sono prevedibili sezioni tipo adeguate per ogni genere di terreno ed ogni situazione tenso-deformativa. Di esse sono automaticamente individuati i costi (a metro lineare di galleria) ed i tempi esecutivi necessari.

In questo modo:

- 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 inquadrate e pagate in proporzione a quanto si deformano). A questo proposito, si fa notare che, nel bilancio economico di una realizzazione in sotterraneo, gli interventi di stabilizzazione e consolidamento del terreno sono rimasti l'unica variabile significativa a fronte delle voci scavo e rivestimento che, sempre di più, si tende ad assimilare come costanti per tutti i tipi di terreno (fig. 13);

- 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 misurabile 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 tra Direzione dei Lavori ed Impresa costruttrice.

Per queste importanti caratte-

de calcul mathématique. Pour chaque tronçon et en fonction du type de comportement prévu, le projecteur décide le genre d'action (préconfinement ou simple confinement) à entreprendre pour obtenir le contrôle des phénomènes en déformation. Par voie de conséquence, il choisit les interventions de stabilisation et la section type longitudinale et transversale la plus conforme à la situation au fur et à mesure. Des sections types appropriées peuvent être prévues pour tous les types de terrain et pour toutes les situations de tension et de déformation. Leur coût (par mètre linéaire de tunnel) et les temps d'exécution nécessaires sont automatiquement définis.

De la sorte,

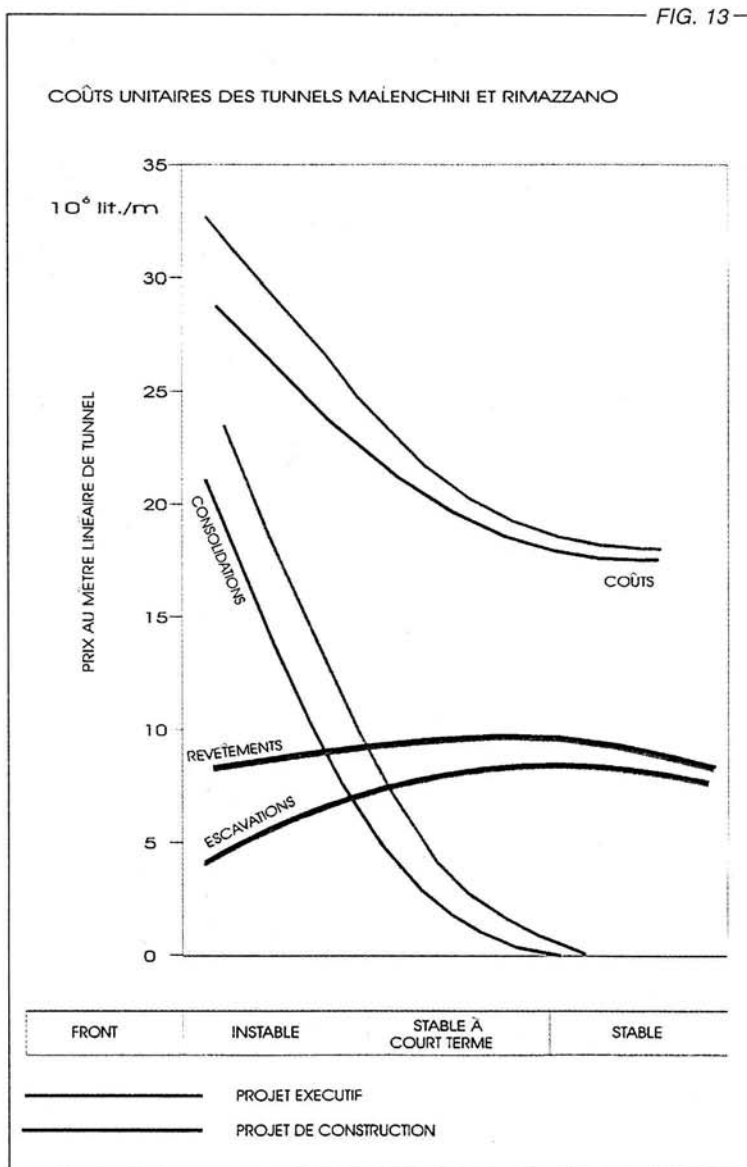
- nous valorisons l'importance des interventions de stabilisation en tant qu'instruments indispensables à maîtriser les phénomènes en déformation et donc en tant qu'"éléments structurels" aux fins de la stabilité finale de la cavité (les tunnels sont encadrés et payés en fonction de l'importance de leur déformation). A cet égard, il est juste de rappeler que dans le bilan économique d'une réalisation souterraine, les interventions de stabilisation et de consolidation du terrain sont restées la seule variable significative vis-à-vis des postes représentés par l'excavation et le revêtement que l'on tend de plus en plus à considérer constants, quel que soit le type de terrain (fig. 13);

- le projecteur - sur la base d'un projet complet et fiable - est amené à industrialiser les opérations d'avancement quel que soit le type de terrain, y compris les terrains les plus difficiles

- grâce à la possibilité de planifier les interventions, les délais et les coûts de construction, nous évitons le contentieux qui s'instaure normalement jusqu'ici entre la Direction des Travaux et l'Entreprise de Construction

- adoptant comme référence un seul paramètre commun à tous les types de terrain (le comportement tension - déformation du front de taille), facile à mesurer objectivement au cours de l'avancement des travaux, nous évitons l'inconvénient le plus flagrant des systèmes de classification précédents (confronter les classes géomécaniques avec les déformations) qui a alimenté jusqu'ici le contentieux en question entre la Direction des Travaux et l'Entreprise de Construction.

Compte tenu de ces caractéristiques importantes, l'approche a fait l'objet d'une discussion dans le cadre d'une Commission du Ministère des Travaux Publics, ayant pour objet la mise en place d'une réglementation technique et d'un cahier de charges doté d'une liste des prix valant pour le territoire national. Ce qu'ont fait trois



ristiche, l'approccio è stato assunto a base della discussione 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, analogamente a quanto fatto nel rinnovare recentemente i propri capitolati da tre importanti Amministrazioni italiane [21] [22] [23].

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

Bibliografia

- [1] LUNARDI P., "Progetto e costruzione di gallerie secondo il metodo vasato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli - Presostegno e preconfinamento", Quarry and Construction, Marzo 1994
- [2] LUNARDI P., "Progetto e costruzione di gallerie secondo il metodo vasato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli - Ruolo e risultati della ricerca sperimentale", Quarry and Construction, Marzo 1995
- [3] BIENIAWSKI Z.T., "Rock mass classification as a design aid in tunnelling", Tunnels & Tunnelling, Luglio 1968
- [4] LUNARDI P., "Lo scavo delle gallerie mediante cunicolo pilota", Politecnico di Torino, Primo ciclo di conferenze di meccanica e ingegneria delle rocce, Torino, 25-26 novembre 1986
- [5] CAMPANA M., LUNARDI P., PAPINI M., "Dealing with unexpected geological conditions in underground contraction: the pilot tunnel technique", Acts of 6th European Forum on "Cost Engineering" - Università Bocconi, Milano, 13-14 maggio 1993, Vol. 1
- [6] KASTNER H., "Statik des Tunnel-und Stollenbaues", 1971
- [7] RABCEWICZ L.V., "The New Austrian Tunnelling Method", Water Power, 1969
- [8] KOVARI K., "On the Existence of the NATM: Erroneous Concepts behind the New Austrian Tunnelling Method", Tunnel, 1/1994
- [9] LUNARDI P., "Progetto e costruzione di gallerie: presentazione del metodo ADECO-RS", ISMES - Programma di istruzione permanente - Bergamo 14-16 novembre 1988
- [10] 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
- [11] LUNARDI P., "Nuovi criteri di progetto e costruzione per una corretta pianificazione delle opere in sotterraneo", SAMOTER: Convegno su "La realizzazione delle grandi opere in sotterraneo" - Verona, 27-28 maggio 1993
- [12] LOMBARDI G., "Une méthode de calcul élasto-plastique de l'état de tension et de déformation autour d'une cavité souterraine", International Congress ISRM, Denver, 1974
- [13] 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
- [14] LUNARDI P., "Un nuovo sistema costruttivo per la realizzazione di gallerie di grande luce in terreni sciolti: l'Arco Cellulare", Gallerie e grandi opere sotterranee, n. 29 anno 1989
- [15] LUNARDI P. et al., "Soft ground tunnelling in the Milan Metro and Milan Railway Link. Case histories", Soft Ground Tunnelling Course - Institution of Civil Engineers - Londra 10-12 Luglio 1990
- [16] LUNARDI P., BINDI R., FOCARACCI A., "Nouvelles orientations pour le project 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 7-10 Febbraio 1989
- [17] LUNARDI P., FOCARACCI A., GIORGI P., PAPACELLA A., "Tunnel face reinforcement in soft ground design and controls during excavation", Convegno Internazionale su "Towards New Worlds in Tunnelling" - Acapulco 16-20 Maggio 1992
- [18] LUNARDI P., "Evolution des technologies d'excavation en souterrain dans des terrains meubles", Comité Marocain des Grands Barrages - Rabat, 30 Settembre 1993
- [19] LUNARDI P., "Fibre-glass tubes to stabilize the face of tunnels in difficult cohesive soils", SAIE : Seminar on "The application of fiber Reinforced Plastics (FRP) in civil structural engineering" - Bologna, 22 Ottobre 1993
- [20] LUNARDI P., "La stabilité du front de taille dans les ouvrages souterrains en terrain meuble: études et expériences sur le renforcement du noyau d'avancement", Symposium international "Renforcement des sols: expérimentations en vraie grandeur des années 80", Parigi, 18 novembre 1993
- [21] AUTOSTRADE S.p.A., "Norme Tecniche d'Appalto", 1992
- [22] ITALFERR SIS T.A.V. S.p.A., "Capitolato di Costruzione Opere Civili", 1992
- [23] A.N.A.S., "Capitolato Speciale d'Appalto, Parte II: Norme Tecniche", 1993

importantes Administrations italiennes [21], [22], [23] qui ont récemment refait leur cahiers de charges.

Les exigences dictées par la planification font sans doute perdre à l'art de projeter et de construire des ouvrages souterrains une partie de leur beauté mais elles lui confèrent très certainement une efficacité et une fonctionnalité plus grandes sans pour autant contraindre ou conditionner l'imagination du projeteur.

Bibliographie

- [1] LUNARDI P., "Progetto e costruzione di gallerie secondo il metodo basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli - Presostegno e preconsolidamento", Quarry and Construction, marzo 1994
- [2] LUNARDI P., "Progetto e costruzione di gallerie secondo il metodo basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli - Presostegno e preconsolidamento - Ruolo e risultati della ricerca sperimentale", Quarry and Construction, marzo 1995
- [3] BIENIAWSKI Z.T., "Rock mass classification as a design aid in tunnelling", Tunnels & Tunnelling, luglio 1968
- [4] LUNARDI P., "Lo scavo delle gallerie mediante cunicolo pilota", Politecnico di Torino, Primo ciclo di conferenze di meccanica e ingegneria delle rocce, Torino, 25-26 novembre 1986
- [5] CAMPANA M., LUNARDI P., PAPINI M., "Dealing with unexpected geological conditions in underground contraction: the pilot tunnel technique", Acts of 6th European Forum on "Cost Engineering" - Università Bocconi, Milano, 13-14 maggio 1993, Vol. 1
- [6] KASTNER H., "Statik des Tunnel und Stollenbaues", 1971
- [7] RABCEWICZ L.V., "The New Austrian Tunnelling Method", Water Power, 1969
- [8] KOVARI K., "On the existence of the NATM: erroneous concepts behind the New Austrian Tunnelling Method", Tunnel, 1/1994
- [9] LUNARDI P., "Progetto e costruzione di gallerie: presentazione del metodo ADECO-RS", ISMES - Programma di istruzione permanente - Bergamo 14 - 16 novembre 1988
- [10] LUNARDI P., BINDI R., FOCARACCI A., "Technical and financial planning of underground works: the ADECO-RS method", Acts of 6th European Forum on "Cost Engineering" - Università Bocconi, Milano, 13-14 maggio 1993, Vol. 1
- [11] LUNARDI P., "Nuovi criteri di progetto e costruzione per una corretta pianificazione delle opere in sotterraneo", SAMOTER: Convegno su "La realizzazione delle grandi opere in sotterraneo" - Verona, 27-28 maggio 1993
- [12] LOMBARDI G., "Une méthode de calcul élastoplastique de l'état de tension et de déformation autour d'une cavité souterraine", International Congress ISRM - Denver, 1974
- [13] 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
- [14] LUNARDI P., "Un nuovo sistema costruttivo per la realizzazione di gallerie di grande luce in terreni sciolti: l'Arco Cellulare". Gallerie e grandi opere sotterranee, n. 29 anno 1989
- [15] LUNARDI P. et al. "Soft ground tunnelling in the Milan Metro and Milan Railway Link. Case histories", Soft Ground Tunnelling Course - Institution of Civil Engineers - Londra 10-12 luglio 1990
- [16] LUNARDI P., BINDI R., FOCARACCI A., "Nouvelles orientations pour la conception 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" - Paris 7-10 février 1989
- [17] 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
- [18] LUNARDI P., "Evolution des technologies d'excavation souterraine dans des terrains meubles", Comité Marocain des Grands Barrages - Rabat, 30 septembre 1993
- [19] LUNARDI P., "Fibre-glass tubes to stabilize the face of tunnels in difficult cohesive soils" SAIE: Seminar on "The application of Fiber Reinforced Plastics (FRP) in civil structural engineering" - Bologna, 22 octobre 1993
- [20] LUNARDI P., "La stabilité du front de taille dans les ouvrages souterrains en terrain meuble: études et expériences sur la consolidation du noyau d'avancement". Symposium International "Consolidation des sols: expérimentations grandeur réelle des années 80", Parigi, 18 novembre 1993
- [21] AUTOSTRADE S.p.A. "Norme Tecniche d'Appalto", 1992
- [22] ITALFERR SIS T.A.V. S.p.A. "Capitolato di Costruzione Opere Civili", 1992
- [23] A.N.A.S., "Capitolato Speciale d'Appalto, Parte II: Norme Tecniche", 1993