

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

*Parte prima:*

PRESOSTEGNO  
E PRECONTENIMENTO

**Pietro Lunardi**, Milano

# PROGETTO E COSTRUZIONE DI GALLERIE SECONDO L'APPROCCIO BASATO SULL'ANALISI DELLE DEFORMAZIONI CONTROLLATE NELLE ROCCE E NEI SUOLI

Pietro Lunardi, Milano

Parte prima:

PRESOSTEGNO E PRECONTENIMENTO

## Premessa

E' noto come, durante la realizzazione di una galleria, le tensioni preesistenti nell'ammasso, una volta deviate dall'apertura del cavo, si canalizzano al suo contorno andando a creare delle zone di sovrasollecitazione in corrispondenza alle pareti di scavo. La canalizzazione del flusso di tensioni al contorno del cavo si definisce "effetto arco" ed è proprio grazie all'innescio di questo fenomeno che è possibile ricavare spazi nel sottosuolo garantendone la tenuta e la durabilità nel tempo.

L'"effetto arco", compatibilmente con l'entità degli stati tensionali in gioco, in relazione alle caratteristiche di resistenza e deformabilità del terreno, si può produrre (fig. 1):

- 1) in prossimità del profilo di scavo;
- 2) lontano dal profilo di scavo;
- 3) per niente.

Il primo caso si verifica quando il terreno al contorno del cavo ben sopporta il flusso delle tensioni deviate, rispondendo elasticamente in termini di resistenza e di deformabilità.

Il secondo caso si verifica quando il terreno al contorno del cavo, non essendo in grado di sopportare il flusso di tensioni deviate, risponde anelasticamente, plasticizzandosi e deformandosi proporzionalmente al volume di terreno coinvolto dal fenomeno di plasticizzazione; quest'ultimo, che provoca peraltro aumenti di volume del terreno interessato, propagandosi radialmente, fa deviare la canalizzazione delle tensioni verso l'interno dell'ammasso, finché lo stato tensionale di tipo triassiale risulta compatibile con le caratteristiche di resistenza del terreno.

In questa situazione, l'"effetto arco" si forma lontano dalle pareti di scavo ed il terreno al contorno, ormai alterato, potrà collaborare alla statica finale del cavo solo con la propria resistenza residua e darà luogo a fenomeni deformativi di notevole entità (convergenze, ecc.)

Première partie:

PRESOUTÈNEMENT ET PRECONFINEMENT

## Remarques préliminaires

Nous savons bien qu'au cours de la réalisation d'un tunnel, les contraintes préexistantes dans le massif se canalisent - une fois déviées de l'ouverture de la cavité - sur son contour et créent des zones de surcontrainte au niveau des parois d'excavation. La canalisation du flux des contraintes sur le contour de l'excavation se définit comme un "effet de voûte" et c'est justement grâce à l'amorce de ce phénomène qu'il est possible d'obtenir des espaces dans le sous-sol et de garantir leur tenue et leur durée dans le temps.

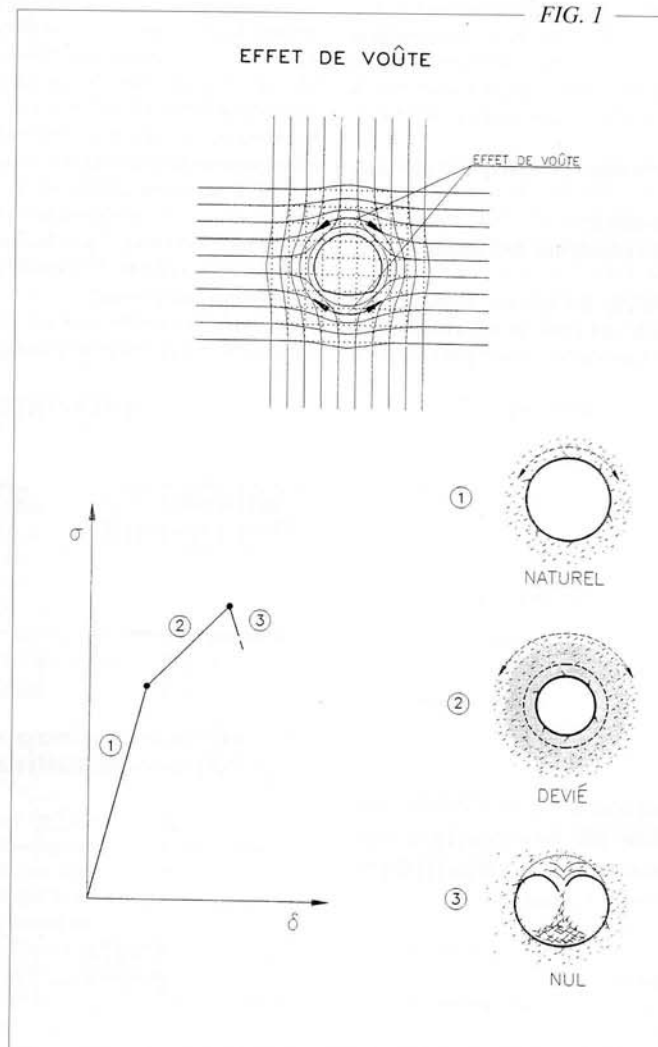
L'"effet de voûte" peut se produire, en fonction de l'importance des états de contrainte en jeu et en fonction des caractéristiques de résistance et de déformabilité du terrain (fig. 1):

- 1) à proximité du profil d'excavation
- 2) loin du profil d'excavation
- 3) ou ne pas se produire du tout

Le premier cas se produit lorsque le terrain sur le contour de la cavité supporte bien le flux des contraintes déviées et répond élastiquement en termes de résistance et de déformabilité.

Le second cas se produit lorsque le terrain sur le contour de la cavité n'est pas en mesure de supporter le flux des contraintes déviées et répond de manière inélastique en se plastifiant et en se déformant proportionnellement au volume de terrain impliqué par le phénomène de la plastification. Ce dernier - qui provoque par ailleurs des augmentations de volume du terrain intéressé dans la mesure où il se propage radialement - fait dévier la canalisation des contraintes vers l'intérieur du massif tant que l'état de contrainte de type triaxiale compatible avec les caractéristiques de résistance du terrain.

Dans cette situation, l'"effet de voûte" se forme loin des parois de l'excavation et le terrain sur le contour, désormais altéré, ne pourra collaborer à la statique finale de la



Il terzo caso si verifica quando il terreno al contorno del cavo, non essendo assolutamente in grado di sopportare il flusso di tensioni deviate, risponde in campo di rottura producendo il crollo della cavità.

Dall'analisi di questi tre casi, si può osservare che:

- l'effetto arco per via naturale si produce solo nel primo caso;
- nel secondo caso, l'effetto arco per via naturale si produce solamente se il terreno viene "aiutato" con interventi di stabilizzazione;
- nel terzo caso l'effetto arco, non potendosi produrre per via naturale, va prodotto per via artificiale, intervenendo adeguatamente sul terreno stesso prima di scavarlo.

Il progettista di gallerie, il cui primo e più importante obiettivo deve essere quello di studiare se e come l'effetto arco potrà innescarsi all'atto dello scavo del tunnel, una volta appurato che aiutando il terreno possiede gli strumenti per ricondurre il secondo ed il terzo caso al primo, dovrà chiarirsi definitivamente ed in maniera inequivocabile se vorrà affrontare la progettazione (che in fondo non è altro che la definizione dell'aiuto che egli intende dare al terreno per il controllo dell'effetto arco) secondo la filosofia del sostenere" o secondo la "filosofia del contenere" la cavità.

Se analizziamo che cosa s'intende per sostenere, e quindi per presostegno, e che cosa per contenere, e quindi per precontenimento, balzerà evidente quale debba essere l'approccio progettuale più adeguato per un progettista di gallerie (fig. 2).

Se il progettista deciderà di affrontare lo scavo con interventi di sostegno dovrà essere consapevole che:

- sostenendo il terreno compie un'azione passiva;
- accetta il detensionamento dell'ammasso e che la risposta deformativa dello stesso evolva praticamente in maniera incontrollata lasciando che l'effetto arco si allontani senza rimedio dal profilo di scavo;
- così operando risolve il problema della stabilità delle cavità che intende ricavare nel sottosuolo con criteri ereditati dall'ingegneria mineraria che, avendo obiettivi diversi rispetto all'ingegneria dei tunnels, ovviamente non si preoccupa di impedire il detensionamento dell'ammasso al contorno, di ridurre al minimo la risposta deformativa per il rispetto del profilo teorico di scavo, di salvaguardare l'integrità geomeccanica del terreno e di garantire la tenuta nel tempo della cavità progettata.

Se il progettista deciderà, invece, di affrontare lo scavo con "interventi di contenimento" dovrà sapere che:

- contenendo il terreno produce un'azione attiva;
- contenendo il terreno controlla il detensionamento dell'ammasso e la conseguente risposta deformativa;
- conservando e migliorando le caratteristiche del terreno, lo stesso può efficacemente collaborare alla statica finale del cavo; si valorizza così il terreno quale materiale da costruzione e si assicura la formazione dell'ef-

cavità che per la sua resistenza residua dà luogo a fenomeni di deformazione molto importanti (convergenze, etc...).

Le troisième cas se produit lorsque le terrain sur le contour de la cavité n'est absolument pas en mesure de supporter le flux des tensions déviées et lorsqu'il répond en champ de rupture produisant l'écrasement de la cavité.

Dans l'analyse de ces trois cas, nous observerons que :

- l'effet voûte par la voie naturelle ne se produit que dans le premier cas;
- dans le second cas, l'effet voûte par la voie naturelle ne se produit que si le terrain est "aidé" par interventions de stabilisation;
- dans le troisième cas, l'effet de voûte ne pouvant pas se produire par la voie naturelle, il devra l'être par la voie artificielle par une intervention adéquate sur le terrain même, avant d'excaver

Le projeteur du tunnel, dont l'objectif premier est d'étudier si l'effet de voûte pourra s'amorcer au moment de l'excavation du tunnel et comment il le fera, devra - après avoir vérifié si en aidant le terrain il pourra reconduire le second et le troisième cas au premier - décider une fois pour toutes et de manière inéquivocable s'il affrontera la conception - qui n'est autre au fond que la définition de l'aide qu'il entend apporter au terrain pour le contrôle de l'effet voûte - selon la philosophie du soutènement ou selon la philosophie du confinement de la cavité. Si nous analysons ce que nous entendons par soutenir et donc par présoutènement et ce que nous entendons par confiner et donc par préconfinement, nous comprendrons immédiatement quelle devra être l'approche conceptuelle la plus appropriée pour un projeteur de tunnels (fig. 2). Si le projeteur décide d'affronter l'excavation par des interventions de soutènement, il devra être bien conscient que :

- soutenant le terrain, il accomplit une action passive
- il accepte la détention du massif et que sa réponse en déformation évolue pratiquement d'une manière incontrôlée permettant à l'effet de voûte de s'éloigner irrémédiablement du profil d'excavation
- ainsi faisant, il résoud le problème de la stabilité de la cavité qu'il entend obtenir dans le sous-sol, selon des critères hérités de l'ingénierie minière qui ne se préoccupe naturellement pas - ayant des objectifs différents de l'ingénierie des tunnels - de ne pas détenir le massif sur le contour, de réduire le plus possible la réponse en déformation afin de respecter le profil théorique de l'excavation, de protéger l'intégrité géomécanique du terrain et de garantir la tenue dans le temps de la cavité projetée.

Si le projeteur décide en revanche d'affronter l'excavation par des "interventions de confinement", il doit savoir que:

- confinant le terrain, il produit une action active
- confinant le terrain, il contrôle la détention du massif et la réponse en déformation qui s'ensuit
- conservant et améliorant les caractéristiques du terrain, celui-ci peut collaborer efficacement à la statique finale de la cavité. Ce qui valorise le

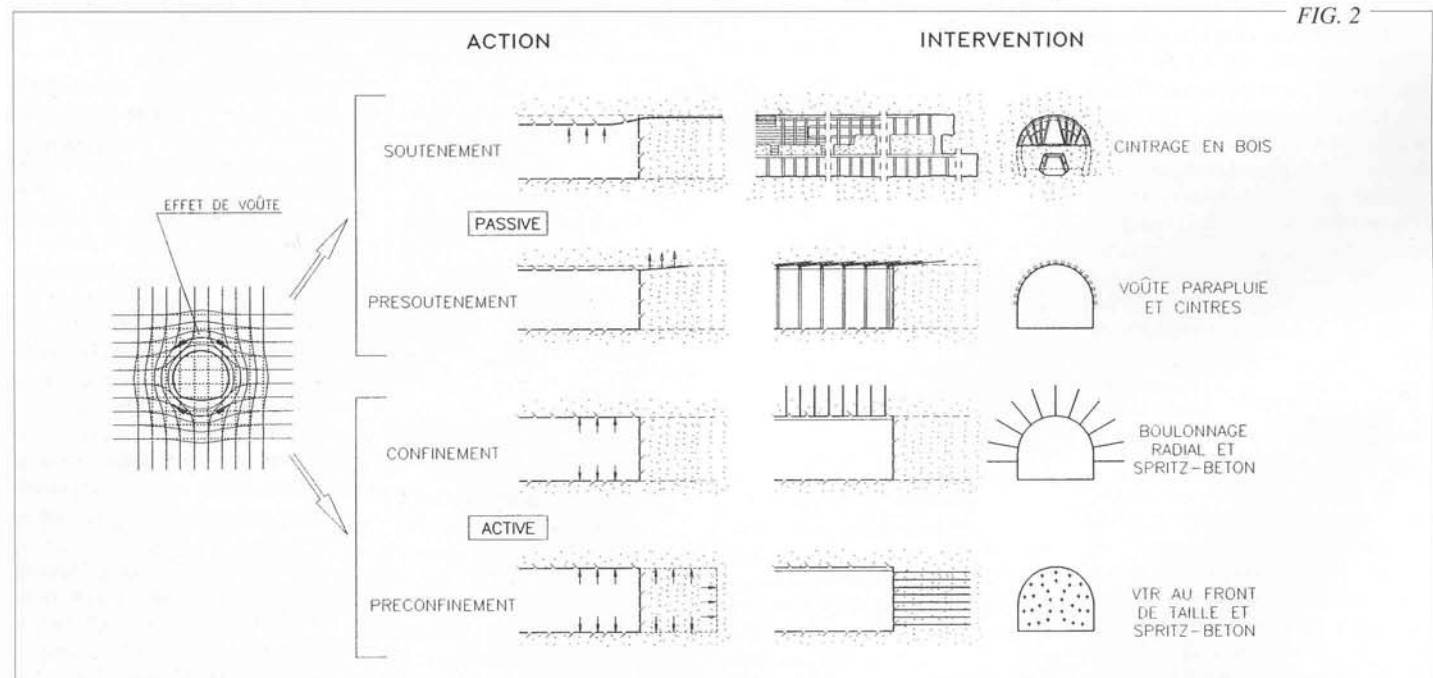


FIG. 2

fetto arco non troppo lontano dal profilo di scavo;  
- potrà ricorrere ad "interventi di sostegno" solo in caso di emergenza per limitare i danni conseguenti ad un errore progettuale o costruttivo.

Da queste considerazioni discende che il progettista di gallerie, in definitiva, se vorrà progettare e realizzare in maniera corretta la propria opera in sotterraneo, dovendo prendere in considerazione solo ed esclusivamente quegli "aiuti" al terreno (interventi di consolidamento, ecc.) che producono effetti arco, non avrà altra scelta

se non quella della "filosofia del contenere" cancellando dal proprio vocabolario la parola "sostenere" con i suoi derivati quali "sostegno" e "presostegno".

Infatti, anche il termine "presostegno" con il quale ci si riferisce ad azioni prodotte a monte del fronte di avanzamento, per distinguerle dai "sostegni" operati a valle dello stesso, è un'eredità della tradizione mineraria e non è altro che la traduzione dei "marciavanti", che nella versione moderna viene chiamata "infilaggi"; questi, come noto, anche se costituiti da elementi strutturali appoggiati su centine messe in opera dopo lo scavo e disposti lungo una generatrice circolare, non sono in grado di produrre effetti arco in avanzamento per carenza di reciproca collaborazione in senso trasversale. In tema di progetto e costruzione di gallerie, si dovrà allora parlare di contenimento, termine che meglio richiama il concetto di azione attiva capace di produrre e controllare gli effetti arco al contorno del cavo, come quella teorizzata da Kastner negli anni '50 e realizzata da Rabcewicz negli anni '60 con l'introduzione di tecnologie nuove, quali lo spritz-beton, le centine ed i bulloni. Conseguentemente, si dovrà parlare di precontenimenti per riferirsi a quelle azioni attive che producono effetti arco per via naturale e per via artificiale a monte del fronte di avanzamento.

A questo proposito, proprio in questi ultimi anni hanno fatto la loro apparizione, sulla scena del tunnelling, nuove tecnologie di avanzamento capaci di sviluppare azioni di precontenimento, che superando le carenze di quelle tradizionali (iniezioni, congelamento, ecc.) consentono finalmente, da un lato, di realizzare opere in sotterraneo in qualsiasi tipo di terreno con la stessa sicurezza con cui si affronta la costruzione delle altre opere di ingegneria civile, dall'altro lato, di assicurare il rispetto delle cadenze di avanzamento anche nei terreni più difficili, quindi di industrializzare lo scavo. La possibilità da parte del progettista di disporre del "nuovo strumento del precontenimento", oltre a quello tradizionale del "contenimento", apre una nuova pagina nella storia del tunnelling perché permette di affrontare il problema del progetto e della costruzione di una galleria con le stesse possibilità di successo indipendentemente dalla natura dei terreni, offrendo la possibilità di mettere a punto un metodo di progettazione, classificazione e costruzione applicabile ed attendibile in qualsiasi situazione geologico-geomeccanica e tensionale: un metodo che permetta finalmente di pianificare in termini di tempi e costi una galleria analogamente alle altre opere di ingegneria.

## Il nucleo d'avanzamento quale strumento di precontenimento e di stabilizzazione della galleria

Chi si accinge a progettare e costruire un'opera in sotterraneo, si trova a dover affrontare e risolvere un tema d'ingegneria civile particolarmente complesso, essendo una tal opera, rispetto ad una in superficie, assai meno predeterminabile nei suoi dati essenziali per la progettazione.

La costruzione di un'opera in sotterraneo, infatti, avviene per asportazione di materiale da un mezzo le cui caratteristiche sono di non facile valutazione, già sottoposto in natura a stati tensionali che le azioni di scavo e di costruzione modificano irreversibilmente, innescando delle reazioni dal cui controllo dipende la stabilità dell'opera. Allora, chi si accinge a progettare e costruire un'opera in sotterraneo non può prescindere dalla conoscenza (fig. 3):

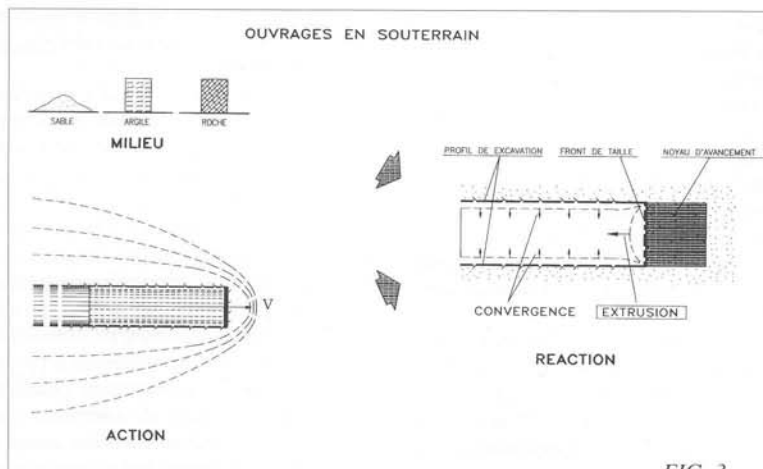


FIG. 3

terrain en tant que matériau de construction et assure la formation de l'effet de voûte pas trop loin du profil d'excavation. - il ne pourra recourir à des "interventions de soutien" qu'en cas d'urgence pour limiter les dommages consécutifs à une erreur de conception ou de construction.

Il se dégage de ces considérations que le projeteur de tunnels s'il veut en définitive concevoir et réaliser correctement son ouvrage souterrain et ne devant prendre en considération que les "aides" du terrain (interventions de

consolidation, etc...) qui produisent des effets de voûte, n'aura d'autre choix si ce n'est la "philosophie du confinement" effaçant de son vocabulaire le mot de "soutenir" avec tous ses dérivés tels que "soutènement" ou "présoutènement". Même le terme de "présoutènement" - qu'il adopte pour indiquer des actions produites en amont du front de taille, pour les différencier des "soutènements" effectués en aval - est un héritage de la tradition minière et n'est autre que ce que nous appelons aujourd'hui les "tubes préfores" ou la "voûte parapluie". Celle-ci, nous le savons bien, même constituée d'éléments structurels s'appuyant sur des cintres mis en chantier après l'excavation et disposés le long d'une génératrice circulaire, n'est pas à même de produire des effets de voûte en avancement du fait d'une collaboration transversale réciproque insuffisante.

En matière de projets et de construction de tunnels, il faudra parler de confinement, terme qui se prête mieux au concept d'action active, capable de produire et de contrôler les effets de voûte au contour de la cavité, dans le genre de celle présentée par Kastner au cours des années '50 et réalisée par Rabcewicz les années '60 grâce à l'introduction de nouvelles technologies et notamment le spritz-béton, les cintres et les boulons.

Il faudra donc parler de préconfinement pour indiquer les actions actives qui produisent des effets de voûte par la voie naturelle et par la voie artificielle, en amont du front de taille. Récemment, de nouvelles technologies d'avancement ont fait leur apparition dans le monde des tunnels. Elles sont capables de développer des actions de préconfinement qui remédient aux carences des technologies traditionnelles (injections, congélations, etc...) et qui permettent en définitive de réaliser d'une part des ouvrages souterrains dans n'importe quel type de terrain avec la même sécurité que lorsqu'on affronte la construction d'autres ouvrages de génie civil, et de l'autre, d'assurer le respect des cadences d'avancement, même dans des terrains plus difficiles, en d'autres termes d'industrialiser l'excavation. La possibilité pour le projeteur de disposer de ce "nouvel instrument de préconfinement" en plus de l'instrument traditionnel du "confinement" ouvre une nouvelle page dans l'histoire des tunnels dans la mesure où elle permet d'affronter le problème du projet et de la construction d'un tunnel avec les mêmes chances de réussite, indépendamment de la nature des terrains, tout en offrant la possibilité de mettre au point une méthode de conception, de classification et de construction fiable qui s'applique à toutes les situations géologiques, géomécaniques et de contrainte. Une méthode qui permet en fin de compte de planifier - au niveau des délais et des coûts - un tunnel au même titre que d'autres ouvrages d'ingénierie.

## Le noyau d'avancement en tant qu'instrument de préconfinement et de stabilisation du tunnel

Ceux qui se préparent à concevoir et à construire un ouvrage souterrain doivent affronter et résoudre un problème d'ingénierie civile particulièrement complexe, cet ouvrage étant - par rapport à un ouvrage en surface - bien moins facile à déterminer quant à ses données essentielles pour la conception. La construction d'un ouvrage souterrain se fait effectivement par élimination du matériel d'un milieu dont les caractéristiques ne sont pas faciles à évaluer, déjà soumis dans la nature à des états de

- del mezzo all'interno del quale opera;
- dell'azione che compie per operare lo scavo;
- della reazione attesa a seguito dello scavo.

Il mezzo, che è in pratica il materiale da costruzione del progettista di gallerie, è un materiale assai anomalo se confrontato con quelli tradizionali dell'ingegneria civile: discontinuo, disomogeneo, anisotropo. Esso presenta, in superficie, caratteristiche assai varie, dipendenti, però, esclusivamente dalla propria natura intrinseca (consistenza naturale) che condiziona la morfologia della crosta terrestre, mentre, in profondità, presenta caratteristiche mutevoli anche in funzione dell'entità degli stati tensionali che lo sollecitano (consistenza acquisita), condizionandone il comportamento allo scavo.

L'azione si esprime nell'avanzamento del fronte all'interno del mezzo. E' quindi un fenomeno prettamente dinamico: possiamo immaginare l'avanzamento di una galleria come un disco (il fronte) che procede con una certa velocità V all'interno dell'ammasso, lasciandosi dietro il vuoto. Esso produce una perturbazione nel mezzo, sia in senso longitudinale che trasversale, che ne altera gli stati tensionali preesistenti.

All'interno della zona perturbata, il campo di tensioni preesistente, che possiamo rappresentare come un reticolo di linee di flusso, viene deviato dalla presenza dello scavo (fig. 1) e si concentra in prossimità di esso producendo delle sovratensioni. L'entità di queste sovrasollecitazioni determina, per ogni mezzo, l'ampiezza della zona perturbata, (all'interno della quale il terreno subisce una caduta di caratteristiche geomeccaniche con un conseguente aumento di volume) e quindi, in relazione alla resistenza d'ammasso  $\sigma_{gd}$ , il comportamento del cavo.

L'ampiezza della zona perturbata in prossimità del fronte è definita dal raggio d'influenza del fronte d'avanzamento  $R_f$  (fig. 4), che individua lo spazio sul quale il progettista deve puntare la propria attenzione ed all'interno del quale avviene l'evoluzione da uno stato tensionale triassiale ad un piano (zona del fronte d'avanzamento o di transizione); per il corretto studio della galleria egli dovrà allora utilizzare metodi di calcolo tridimensionali e non solo piani.

La reazione è la risposta deformativa del mezzo all'azione dello scavo. Essa si genera a monte del fronte nell'ambito della zona perturbata in seguito alle sovratensioni generate nel mezzo al contorno del cavo e dipende dal mezzo (consistenza) e dalle modalità con cui viene realizzato l'avanzamento del fronte (azione).

La risposta deformativa del fronte e della cavità, in funzione della consistenza acquisita del mezzo e dell'azione prodotta, si evidenzia sotto forma di (fig. 5):

- estrusione del fronte
- preconvergenza (intesa come convergenza del profilo teorico a monte del fronte di avanzamento)
- convergenza

che a loro volta possono dar luogo ad alcune manifestazioni d'instabilità (si parla di instabilità ogniqualvolta si produce l'intrusione di materiale in galleria oltre il profilo teorico di scavo):

- distacchi gravitativi, splaccaggi e crollo del fronte, in corrispondenza del sistema fronte-nucleo d'avanzamento;
- distacchi gravitativi, splaccaggi e collasso della cavità, in corrispondenza al contorno del cavo.

Definito nucleo d'avanzamento il prisma di terreno a monte del fronte le cui dimensioni trasversale e longitudinale sono dell'ordine di grandezza del diametro della galleria (fig. 6), si può affermare, sulla base delle esperienze acquisite in

constrainte que les actions d'excavation et de construction modifient irréversiblement pour amorcer des réactions du contrôle desquelles dépend sa bonne réussite.

Ainsi donc, tous ceux qui s'apprentent à concevoir et à construire un ouvrage souterrain ne peuvent pas se passer de connaître (fig. 3):

- le milieu à l'intérieur duquel ils opèrent
- l'action accomplie pour faire l'excavation
- de la réaction attendue à la suite de l'excavation

Le milieu, qui est, dans la pratique, le matériel de construction du projeteur du tunnel, est un matériel assez anormal si nous le comparons aux matériaux traditionnels de l'ingénierie civile: discontinu, non homogène, anisotrope. Il présente, en surface, des caractéristiques assez variées, mais qui dépendent exclusivement de sa nature intrinsèque (consistance naturelle) qui conditionne la morphologie de la croûte terrestre alors qu'en profondeur, il présente des caractéristiques changeantes, en fonction notamment de l'importance des états de contrainte qui s'exercent sur lui (consistance acquise) et qui conditionnent son comportement à l'excavation.

L'action s'exprime dans l'avancement du front à l'intérieur du milieu. C'est donc un phénomène strictement dynamique: nous pouvons imaginer l'avancement d'un tunnel comme un disque (le front de taille) qui procède à une certaine vitesse V à l'intérieur du massif, laissant le vide derrière. Il produit une perturbation dans le massif, dans le sens longitudinal et dans le sens transversal qui altère les états de contrainte.

A l'intérieur de la zone perturbée, le champ de contraintes préexistant - que nous pouvons représenter comme un réticule de lignes de flux - est dévié par la présence de l'excavation (fig. 1) et se concentre à proximité, produisant des surtensions. L'importance de ces surcontraintes détermine, pour chacun des milieux, l'ampleur de la zone perturbée (à l'intérieur de laquelle le terrain subit une chute des caractéristiques géomécaniques et, par voie de conséquence, une augmentation de volume) et donc, en fonction de la résistance de massif  $\sigma_{gd}$ , le comportement de la cavité.

L'ampleur de la zone perturbée à proximité du front est définie par le rayon d'influence du front de taille  $R_f$  (fig. 4) qui localise l'espace sur lequel

le projeteur doit concentrer son attention. Pour une étude correcte du tunnel, il faudra utiliser des méthodes de calcul tridimensionnels et non seulement plans.

La réaction est la réponse en déformation du milieu à l'action de l'excavation. Elle se produit en amont du front dans le cadre de la zone perturbée à la suite des surtensions qui se sont produites dans le milieu sur le contour de la cavité et dépend du milieu (consistance) et des modalités selon lesquelles se fait l'avancement du front de taille (action).

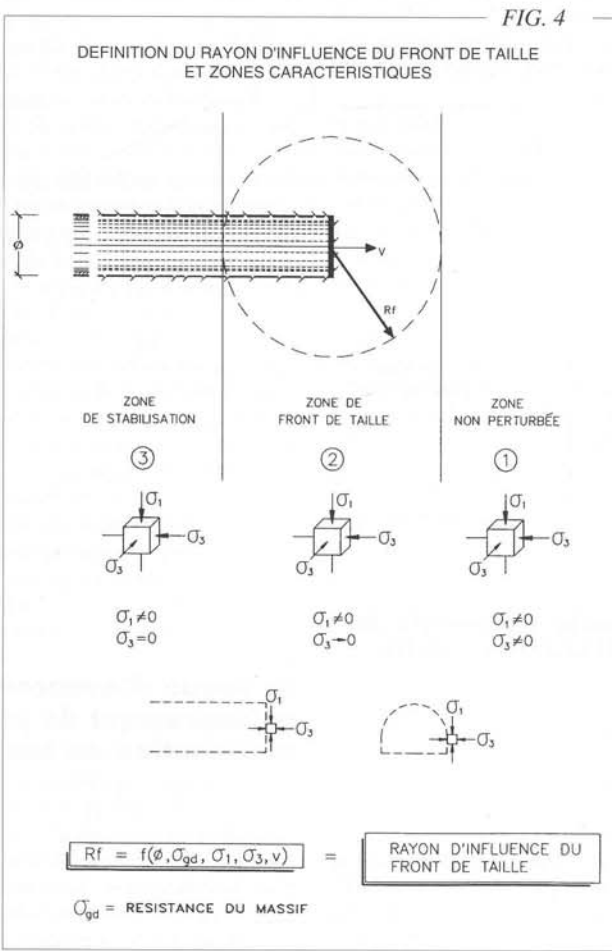
La réponse en déformation du front et de la cavité détermine l'intrusion du matériel dans le tunnel ainsi que le profil théorique d'excavation. Intrusion est synonyme d'instabilité des parois de l'excavation.

La réponse en déformation du front et de la cavité peut donc, en fonction de la consistance acquise par le milieu, se traduire sous la forme de (Fig. 5):

- estrusion du front de taille
- preconvergence ( dans le sens de convergence du profil théorique en amont du front de taille)
- convergence

qui peuvent à leur tour donner lieu à des manifestations d'instabilité (il est question d'instabilité toutes les fois que se produit l'intrusion de matériel dans le tunnel, au-delà du profil théorique d'excavation):

- chutes de blocs sous l'effet du poids propre, ecaillages et effondrement du



almeno 25 anni di ricerche condotte durante la realizzazione di oltre 250 km di gallerie, che tutte le suddette manifestazioni d'instabilità dipendono direttamente o indirettamente dalla rigidezza del nucleo.

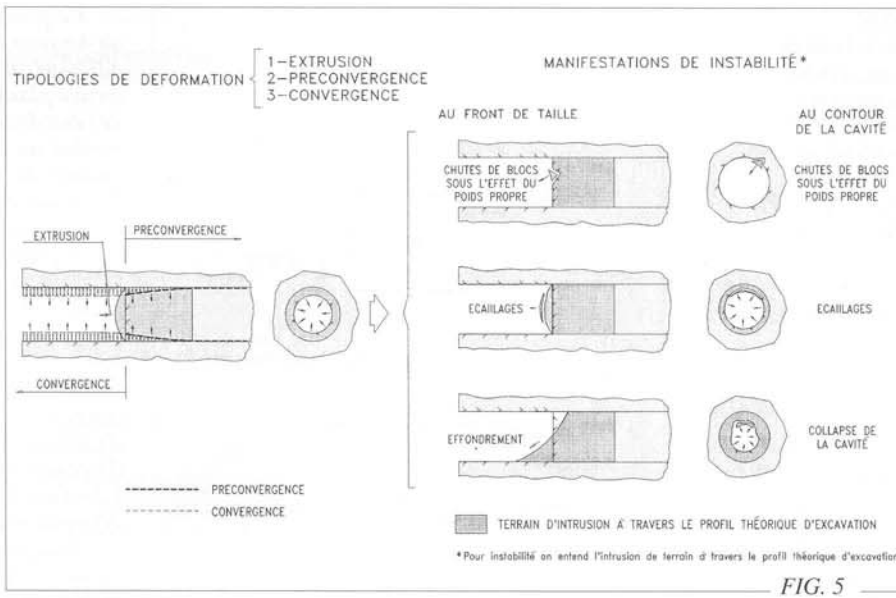
Si possono verificare tre situazioni fondamentali (fig. 6 e 7).

Se in fase di avanzamento di una galleria, nel passare da uno stato di coazione di tipo triassiale ad uno di tipo piano, l'annullamento dello stato di coazione al fronte ( $\sigma_3 = 0$ ) produce sul nucleo sollecitazioni in campo elastico, la

parete liberata (fronte d'avanzamento) si mantiene stabile con deformazioni limitate e assolutamente trascurabili. In questo caso, la canalizzazione delle tensioni al contorno del cavo ("effetto arco") si produce per via naturale vicino al profilo di scavo. Se, viceversa, l'annullamento dello stato di coazione al fronte ( $\sigma_3 = 0$ ) produce sul nucleo sollecitazioni in campo elastoplastico, anche la reazione è importante e la parete liberata del nucleo (fronte d'avanzamento), deformandosi elastoplasticamente verso l'interno del cavo (estrusione), dà luogo ad una situazione di stabilità a breve termine.

S'innesci, cioè, in assenza d'interventi, un fenomeno di plasticizzazione che, propagandosi longitudinalmente e radialmente dal contorno dello scavo, produce lo spostamento dell'"effetto arco" più all'interno dell'ammasso: solo operando con interventi di contenimento e/o precontenimento adeguati si può controllarne l'allontanamento dal profilo teorico di scavo.

Se, infine, l'annullamento dello stato di sollecitazione al fronte ( $\sigma_3 = 0$ ) produce sul nucleo sollecitazioni in campo di rottura, la risposta deformativa è inaccettabile e si ha una situazione di instabilità del nucleo che rende impossibile la formazione dell'"effetto arco": è il caso dei terreni incoerenti o sciolti entro i quali questo, non riuscendo a formarsi per via naturale, deve



front au niveau du système front-noyau d'avancement; b) chutes de blocs sous l'effet du poids propre, ecaillages et collapse de la cavité au niveau du contour de cette dernière. Après avoir défini le noyau d'avancement le prisme de terrain en amont du front de taille - dont les dimensions transversale et longitudinale sont du même ordre de grandeur que le diamètre du tunnel (fig. 6) - il est permis d'affirmer, sur la base des expériences acquises en plus d'un quart de siècle de recherches menées au cours de la réalisation de

250 km de tunnels au moins, que toutes ces manifestations d'instabilité dépendent directement ou indirectement de la rigidité du noyau.

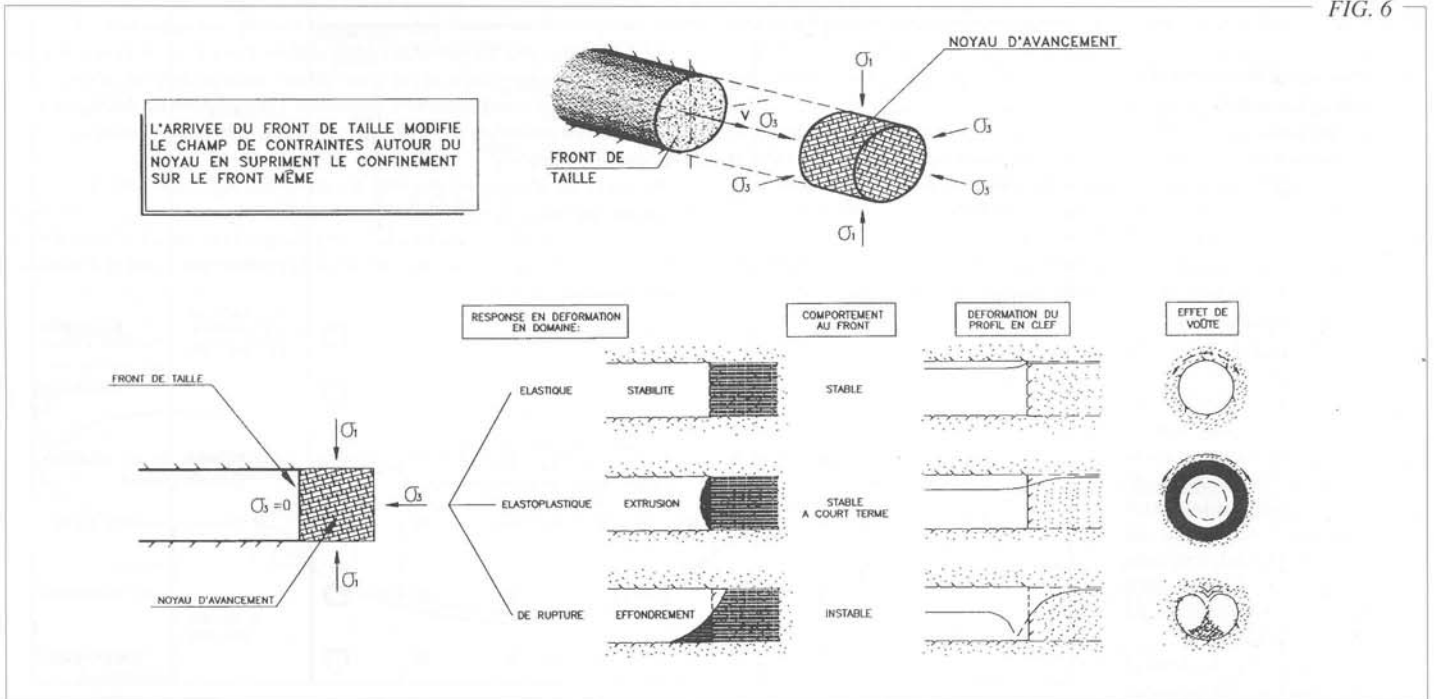
Il est possible de vérifier trois situations fondamentales (fig. 6 e 7).

Si dans la phase d'avancement d'un tunnel - en passant d'un état de coaction de type triaxial à un état de type plan - l'annulation de l'état de coaction au front de taille ( $\sigma_3 = 0$ ) produit sur le noyau des contraintes en champ élastique, la paroi libérée (front de taille) se maintient stable avec des déformations limitées et absolument négligeables.

Dans ce cas, la canalisation des contraintes sur le contour de la cavité (effet voûte) se produit par la voie naturelle à proximité du profil d'excavation.

Si en revanche l'annulation de l'état de coaction sur le front ( $\sigma_3 = 0$ ) produit sur le noyau des contraintes en champ élastoplastique, la réaction est importante aussi et la paroi libérée du noyau (front de taille) - qui se déforme élastoplastiquement vers l'intérieur de la cavité (extrusion) - donne lieu à une situation de stabilité à court terme.

En l'absence d'interventions, il s'amorce donc un phénomène de plastification qui se propage longitudinalement et radialement du contour de l'excavation et produit le déplacement de l'"effet voûte" plus à l'intérieur du massif.



essere prodotto per via artificiale.

Ne consegue che le caratteristiche di resistenza e deformabilità del nucleo d'avanzamento giocano un ruolo determinante sull'innescò e sull'evoluzione dei fenomeni deformativi del cavo.

Si può allora affermare che questi sono la diretta conseguenza dei fenomeni deformativi già innescati a monte del fronte ovvero delle scelte progettuali e costruttive operate a monte del fronte d'avanzamento per regimare la risposta deformativa (fig. 7).

Garantire la rigidità del nucleo d'avanzamento significa, allora, evitare i fenomeni d'instabilità del fronte e, di conseguenza, controllare la nascita della risposta deformativa a monte dello stesso, quindi anche la sua evoluzione a valle (fig. 8).

Misure sperimentali, riferite all'evoluzione delle deformazioni nel mezzo in relazione alla posizione del fronte d'avanzamento, confermano quanto sopra e pongono in evidenza che il raggio d'influenza del fronte  $R_f$  è tanto più ridotto quanto più il nucleo si mantiene rigido ed in campo elastico.

Ma come può il progettista garantire la rigidità del nucleo al fronte d'avanzamento? Producendo azioni di "precontenimento del cavo" mirate da un lato a scaricare il nucleo da stati di sovratensione (azione protettiva), dall'altro a conservare o migliorare le caratteristiche di resistenza e deformabilità del terreno (azione di consolidamento). L'azione di precontenimento del cavo viene così definita per distinguerla da quella di semplice contenimento che agisce al contorno dello stesso, a valle del fronte d'avanzamento (fig. 9).

L'azione di precontenimento, contrastando la nascita della risposta deformativa a monte del fronte, limita la sua evoluzione a valle, facilitandone la regimazione. Pertanto, al nucleo va conferita sufficiente rigidità per mantenere, finché è possibile, il terreno, all'interno del raggio d'influenza del fronte d'avanzamento, in campo elastico e per produrre un effetto arco più prossimo al contorno del cavo, con conseguente contenimento dei fenomeni deformativi.

L'importanza di aver introdotto l'azione di precontenimento del cavo nella progettazione e nella costruzione delle gallerie risiede nel fatto che si fornisce al progettista un nuovo strumento, che integra quelli normalmente impiegati - legati all'azione di semplice contenimento - e che impone un nuovo approccio di calcolo. Infatti, in quei casi in cui gli stati tensionali indotti dall'apertura del cavo, in rapporto alle caratteristiche di resistenza e deformabilità del nucleo consentono di operare la scelta degli strumenti di stabilizzazione in termini di solo contenimento del cavo, il progettista si potrà limitare a studiare il problema in termini di "convergenza-contenimento" (fig. 10); se occorrerà operare la scelta anche in termini di contenimento del fronte in quanto si evidenziano fenomeni di estrusione a fronte di ridotti stati tensionali, il problema sarà studiato secondo modelli di "estrusione-contenimento".

Se, infine, gli stati tensionali sono così elevati da rendere

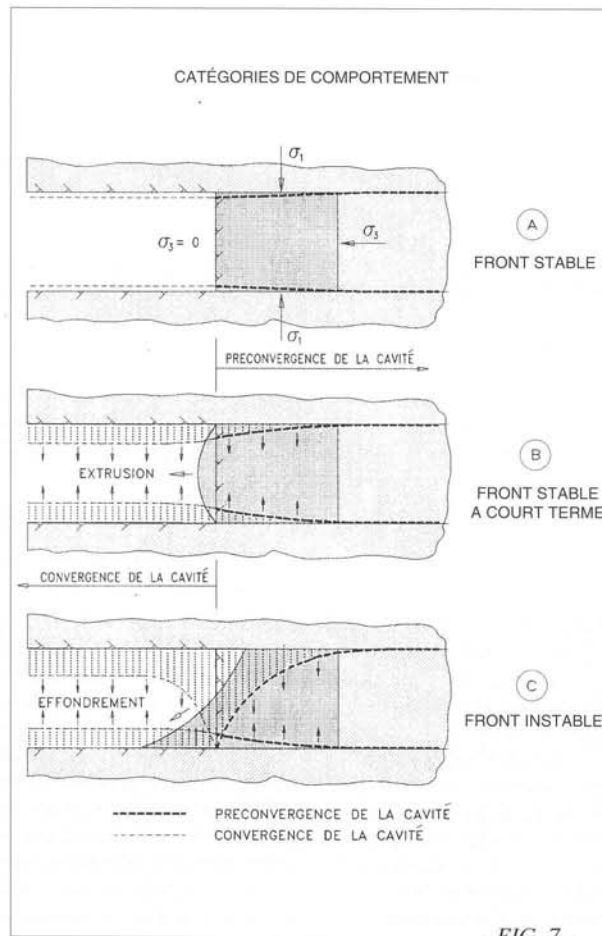


FIG. 7

Ce processus ne peut être contrôlé qu'à travers la réalisation d'interventions adéquates de stabilisation de la masse de terrain plastifié. Enfin, si l'annulation de l'état de contrainte sur le front ( $\sigma_3=0$ ) produit sur le noyau des contraintes en champ de rupture, la réponse en déformation est inacceptable et nous avons une situation d'instabilité du noyau qui empêche totalement la formation de l'"effet de voûte". C'est le cas des terrains incohérents dans lesquels cet effet - ne pouvant pas former par la voie naturelle - devra être produit par la voie artificielle.

Il s'ensuit que les caractéristiques de résistance et de déformabilité du noyau d'avancement jouent également un rôle déterminant sur l'amorce et sur l'évolution des phénomènes de déformation de la cavité.

Nous pouvons donc affirmer que ces derniers sont la conséquence directe des phénomènes de déformation déjà amorcés en amont du front autrement dit la conséquence des choix conceptuels et de construction opérés en amont du front de taille pour contrôler la réponse en déformation (fig. 7). Assurer la rigidité du noyau d'avancement signifie, donc, éviter les phénomènes d'instabilité du front et par voie de conséquence contrôler l'apparition de la réponse en déformation en amont de celui-ci et donc également son évolution en aval (fig. 8).

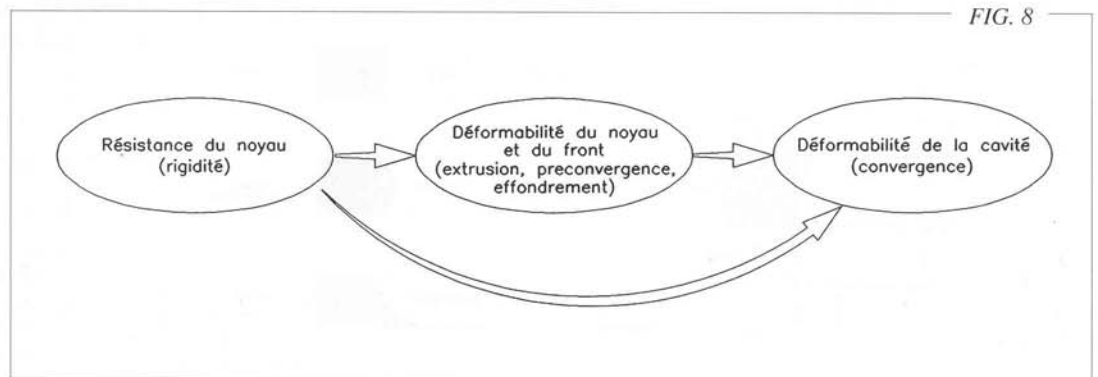
Des mesures expérimentales se référant à l'évolution des déformations

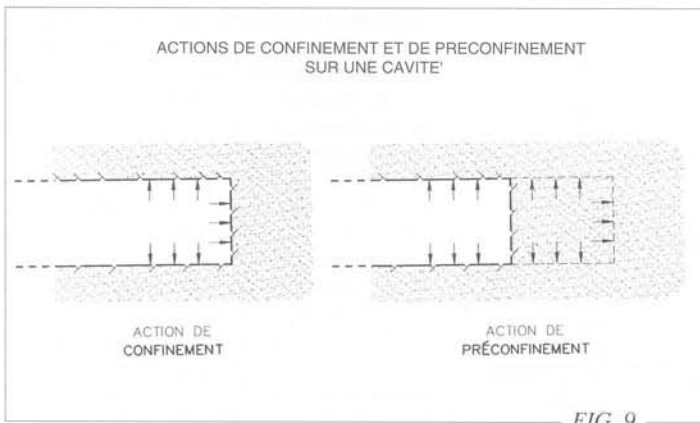
dans le milieu en fonction de la position du front de taille confirment ce qui précède et soulignent le fait que plus le noyau se maintient rigide et en champ élastique et plus le rayon d'influence du front  $R_f$  est réduit.

Mais le projeteur comment peut-il garantir la rigidité du noyau sur le front de taille? En produisant des actions de préconfinement de la cavité destinées, d'une part à décharger le noyau des états de surtension (action de protection), de l'autre, à conserver ou à améliorer les caractéristiques de résistance et de déformabilité du terrain (action de consolidation). L'action de préconfinement de la cavité est ainsi définie pour la distinguer de celle du simple confinement qui agit sur son contour, en aval du front de taille (fig. 9). L'action de préconfinement s'oppose à l'apparition de la réponse en déformation en amont du front de taille et limite donc son évolution en aval et facilite son contrôle.

De sorte qu'il convient de conférer au noyau suffisamment de rigidité afin de maintenir, jusqu'à ce que il est possible, le terrain - à l'intérieur du rayon d'influence du front de taille - en champ élastique et afin d'obtenir l'effet de voûte le plus proche du contour de la cavité et donc des phénomènes de déformation réduits.

FIG. 8





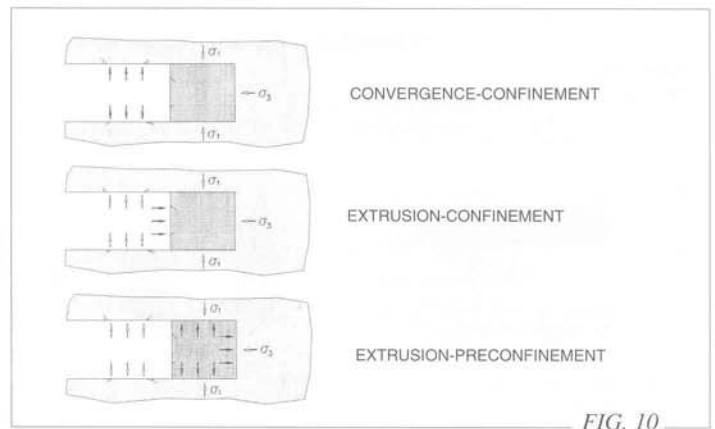
ininfluenti le azioni di contenimento del cavo e del fronte, il progettista dovrà lavorare sulla rigidità del nucleo adottando soluzioni di precontenimento del cavo e dovrà affrontare il problema di dimensionamento e di verifica degli interventi sul nucleo facendo ricorso a nuovi modelli "estrusione-precontenimento", che in passato sono stati oggetto di studio da parte di numerosi autori (fig. 11) e che oggi necessitano, alla luce dell'importanza che assume il nucleo d'avanzamento come strumento di stabilizzazione del cavo, di ulteriori ed aggiornati approfondimenti.

### Interventi di precontenimento

Al paragrafo precedente è stato evidenziato come il nucleo di avanzamento in funzione della propria rigidità sia in grado:

- 1) di produrre azioni di precontenimento;
- 2) producendo azioni di precontenimento, di controllare la risposta deformativa;
- 3) controllando la risposta deformativa, di agire come strumento di stabilizzazione di una galleria in fase di costruzione.

Esaminiamo allora di che tipo di interventi dispone il progettista per garantire la rigidità del nucleo d'avanzamento affinché lo stesso possa svolgere quell'azione di precontenimento del cavo indispensabile soprattutto nell'affrontare i terreni cosiddetti "difficili" e che sono considerati tali per



L'importanza di la mise in place de l'action de préconfinement de la cavité dans la conception et dans la construction des tunnels réside dans le fait qu'elle donne au concepteur un nouvel instrument qui complète les instruments normalement utilisés - liés à l'action de simple confinement - et qu'elle impose une nouvelle approche de calcul.

De fait, dans les cas où les états de contrainte provoqués par l'ouverture de la cavité permettent - en fonction des caractéristiques de résistance et de déformabilité du noyau - de choisir les instruments de stabilisation exclusivement au niveau du confinement de la cavité, le projeteur se limitera à étudier le problème en termes de convergence-confinement (fig. 10); s'il fallait choisir également au niveau du confinement du front dans la mesure où il se produit des phénomènes d'extrusion pour des états de contrainte réduits, le problème sera étudié selon des modèles d'"extrusion-confinement".

Enfin, si les états de contrainte sont élevés au point de rendre vaines les actions de confinement de la cavité et du front, le projeteur devra travailler sur la rigidité du noyau en adoptant des solutions de préconfinement de la cavité et affronter le problème de dimensionnement et de vérification des interventions sur le noyau en recourant à de nouveaux modèles "extrusion-préconfinement" qui dans le passé ont fait l'objet d'études pour plusieurs auteurs (fig. 11) et qui à présent, à la lumière de l'importance revêtu par

ETUDES THEORIQUES ET EXPERIMENTALES SUR LE FRONT DE TAILLE DU TUNNELS

FIG. 11

AUTEUR	METHODE EMPLOYEE	DOMAINE DE APPLICABILITE														
		GEOMETRIE DE LA CAVITE		RECOURVREMENTS		TERRAIN			NAPPE AQUIFERE	PARAMETRES EMPLOYES						
		FORME	Ø MAX EXPERIMENTE	BAS	ELEVE	C	O	S		C <sub>u</sub>	C'	φ	E	σ <sub>1</sub>	F <sub>0</sub>	N
AVEC FROTTEMENT																
BROMS-BENN.	EXPERIMENTAL			*		*			*			*		*		
LOMBARDI PANET-GUENOT	EN TERMES DE CONTRAINTES ET DEFORMATIONS	○		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
ELLSTEIN	ANALYSE DE STABILITE	○	4-6	*		*		*	*	*	*	*	*	*	*	
TAMEZ		○	8	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
TAMEZ GEN.		○		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
CHAMBON-CO.	CALCUL A RUPTURE	○	4-6	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
LEGA-PANET		○		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	

le noyau d'avancement en tant qu'outil de stabilisation de la cavité, demandent d'ultérieurs approfondissements et mises à jour.

### Interventions de préconfinement

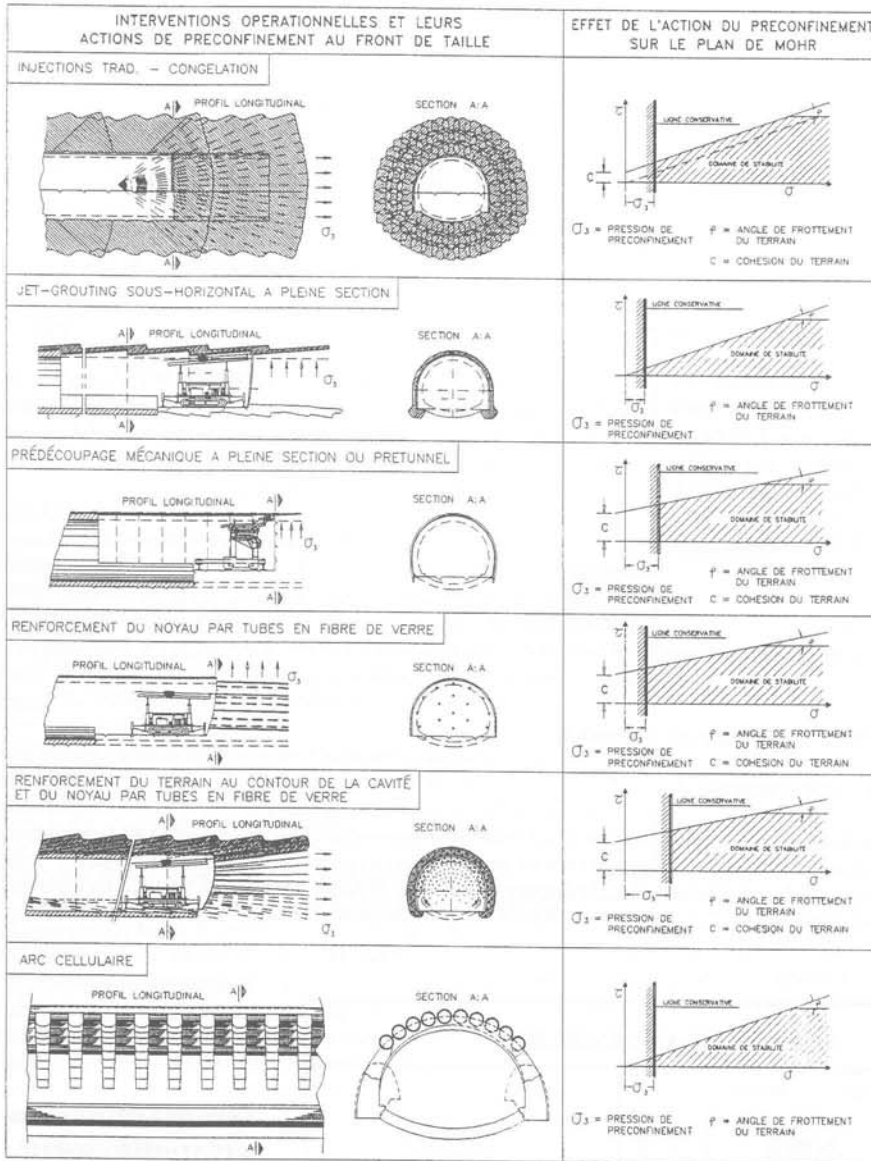
Dans le paragraphe précédent on avait souligné comment le noyau d'avancement en fonction de sa rigidité soit à même:

- 1) de produire actions de préconfinement;
- 2) en produisant des actions de préconfinement, de contrôler la réponse en déformation;
- 3) en contrôlant la réponse en déformation, d'agir en tant qu'instrument de stabilisation d'un tunnel en phase de construction.

Examinons alors les interventions à disposition du projeteur pour garantir la rigidité du noyau d'avancement à fin qu'il puisse accomplir cette action de préconfinement de la cavité indispensable surtout pour affronter les terrains dits



INTERVENTIONS PAR ACTION DE PRECONFINEMENT



Interventions conçues et relisées les 10 dernières années

FIG. 12

motivi legati alla consistenza naturale, agli stati tensionali ed alla presenza di acqua.

Si tratta di interventi per lo più di recente concezione che, per l'azione che svolgono a monte del fronte di avanzamento mirata ad impedire il detensionamento dell'ammasso ed a conservare la  $\sigma_3$  su valori diversi da zero, vengono definiti "interventi conservativi" (fig. 12).

L'azione "conservativa", esercitata da questi interventi, si può rappresentare sul piano di Mohr mediante una linea, detta, appunto, "conservativa", che rappresenta il limite al di sotto del quale la pressione principale minore  $\sigma_3$  non deve essere lasciata decadere, per mantenere il più possibile inalterata la curva interinseca del terreno e per non perdere il controllo della risposta deformativa dell'ammasso (fig. 13).

Questi interventi, che saranno complementari agli interventi tradizionali di semplice contenimento del fronte e del cavo (fig. 14), in relazione all'azione conservativa che svolgono nei riguardi del nucleo d'avanzamento, si possono a loro volta distinguere in (fig. 15):

- **interventi conservativi diretti** quando producono la canalizzazione delle

"difficili" e qui sono considerati tali per delle ragioni legate alla loro consistenza naturale, ai loro stati di contrainte e alla presenza d'acqua.

Il s'agit d'interventions de conception généralement récente qui - du fait de l'action qu'elles exercent en amont du front de taille, destinée à empêcher le détensionnement du massif à conserver le  $\sigma_3$  sur des valeurs autres que zéro, sont définies comme des "interventions de conservation" (fig. 12).

L'action de conservation exercée par ces interventions, peut être représentée sur le plan de Mohr moyennant une ligne, dite, justement, "de conservation", qui représente la limite au dessous de laquelle la pression principale mineure  $\sigma_3$  ne doit pas être laissée décroître, pour garder le plus possible inaltérée la courbe intrinsèque du terrain et ne pas perdre le contrôle de la réponse en déformation du massif (fig. 13).

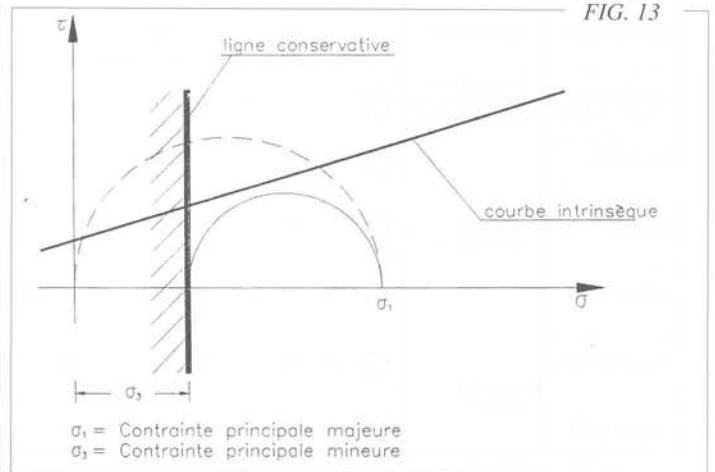
Ces interventions, complémentaires aux interventions traditionnelles de simple confinement du front et de la cavité (fig. 14), par rapport à l'action de conservation qu'elles opèrent face au noyau d'avancement, peuvent être à leur tour partagées en (fig. 15):

- **interventions de conservation directes**, lorsqu'elle produisent la canalisation des contraintes et la déviation au contour du noyau à travers prévoûtes de terrain consolidé moyennant jet-grouting sub-horizontale et couche de spritz-béton et de béton renforcé par fibres d'acier (prédécoupage mécanique et pré-tunnel), qui en agissant en amont du front de taille jouent une action de protection:

- **interventions de conservation indirectes** lorsque en agissant directement sur la consistence du noyau d'avancement en améliorent les caractéristiques de résistance et de déformabilité à travers des techniques de renforcement (renforcement du noyau par tubes en fibre de verre) prédisposent le noyau même à se maintenir stable même en l'absence d'interventions de protection;

- **interventions de conservation mixtes**, lorsque on opère au contour du noyau avec des techniques de protection et en même temps directement à l'intérieur du noyau avec des techniques de renforcement, celles-ci prédisposent le noyau à garder sa propre intégrité même lorsque la

FIG. 13



tensioni e la deviazione al contorno del nucleo attraverso gusci di terreno consolidato mediante jet-grouting in sub-orizzontale e gusci di betoncino o calcestruzzo fibrorinforzato (pretaglio meccanico e pretunnel) che agendo a monte del fronte di scavo svolgono un'azione protettiva;

- interventi conservativi indiretti quando, agendo direttamente sulla consistenza del nucleo d'avanzamento ne migliorano le caratteristiche di resistenza e deformabilità attraverso tecniche di consolidamento (consolidamento del nucleo mediante tubi di vetroresina), predisponendo il nucleo stesso a mantenersi stabile anche in assenza di interventi protettivi;

- interventi conservativi misti quando, agendo sia al contorno del nucleo con sistemi protettivi sia direttamente all'interno del nucleo con tecniche di consolidamento, predispongono lo stesso a conservare la propria integrità, anche qualora la natura dei terreni e l'entità delle coperture in gioco tendessero a creare situazioni proibitive di stabilità. Si possono considerare interventi "conservativi diretti" (fig. 16):

- il sistema del jet-grouting in sub-orizzontale (fig. 17), che consente di realizzare in avanzamento prevolte di terreno consolidato capaci di garantire la formazione dell'effetto arco per via artificiale anche in terreni completamente privi di coesione (prima realizzazione in assoluto nel 1983 in Italia per la "Galleria Campiolo" della linea ferroviaria Pontebba-Tarvisio - Committente: Ferrovie dello Stato - Impresa generale: Italstrade S.p.A. - Impresa specializzata: Rodio S.p.A. - Progettista: Rocksoil S.p.A. di Milano [1] [2] [4] [5] [12] [13] [14] [18] [22]);

- il sistema del pre-taglio meccanico (fig. 18), ripreso da una tecnologia francese (SIPREMEC) e messo a punto dall'autore per la "piena sezione", per l'attacco programmato di terreni coesivi o semicoesivi anche sotto falda. Il sistema consente di realizzare in avanzamento una prevolta di spritz-beton fibrorinforzato a protezione del nucleo, capace di impedire l'allentamento del terreno circostante e, di conseguenza,

favorire la formazione dell'effetto arco vicino al profilo di scavo (prima realizzazione in Italia nel 1985 su alcune gallerie della linea ferroviaria Sibari-Cosenza - Committente: Ferrovie dello Stato - Impresa generale: Asfalti Sintex S.p.A. - Impresa specializzata: Rodio S.p.A. - Progettista: Rocksoil S.p.A. di Milano [7] [12] [13] [16] [17] [22];

- il sistema del pretunnel (fig. 19), che permette di realizzare gallerie a piena sezione in terreni difficili eseguendo, in continuo, il getto del rivestimento definitivo in calcestruzzo a monte del fronte di avanzamento. Con questa tecnologia, che in Italia è attualmente in fase di sperimentazione, sarà anche possibile realizzare l'allargamento di gallerie autostradali, da due a tre corsie, mantenendo in esercizio il traffico durante le lavorazioni;

- il sistema dell'"Arco Cellulare" (fig. 20), che risolvendo il problema di prefabbricare il rivestimento definitivo dell'opera da costruire in sotterraneo prima di iniziarne lo scavo, consente di realizzare grandi cavità corticali

## INTERVENTIONS PAR ACTION DE SEUL CONFINEMENT

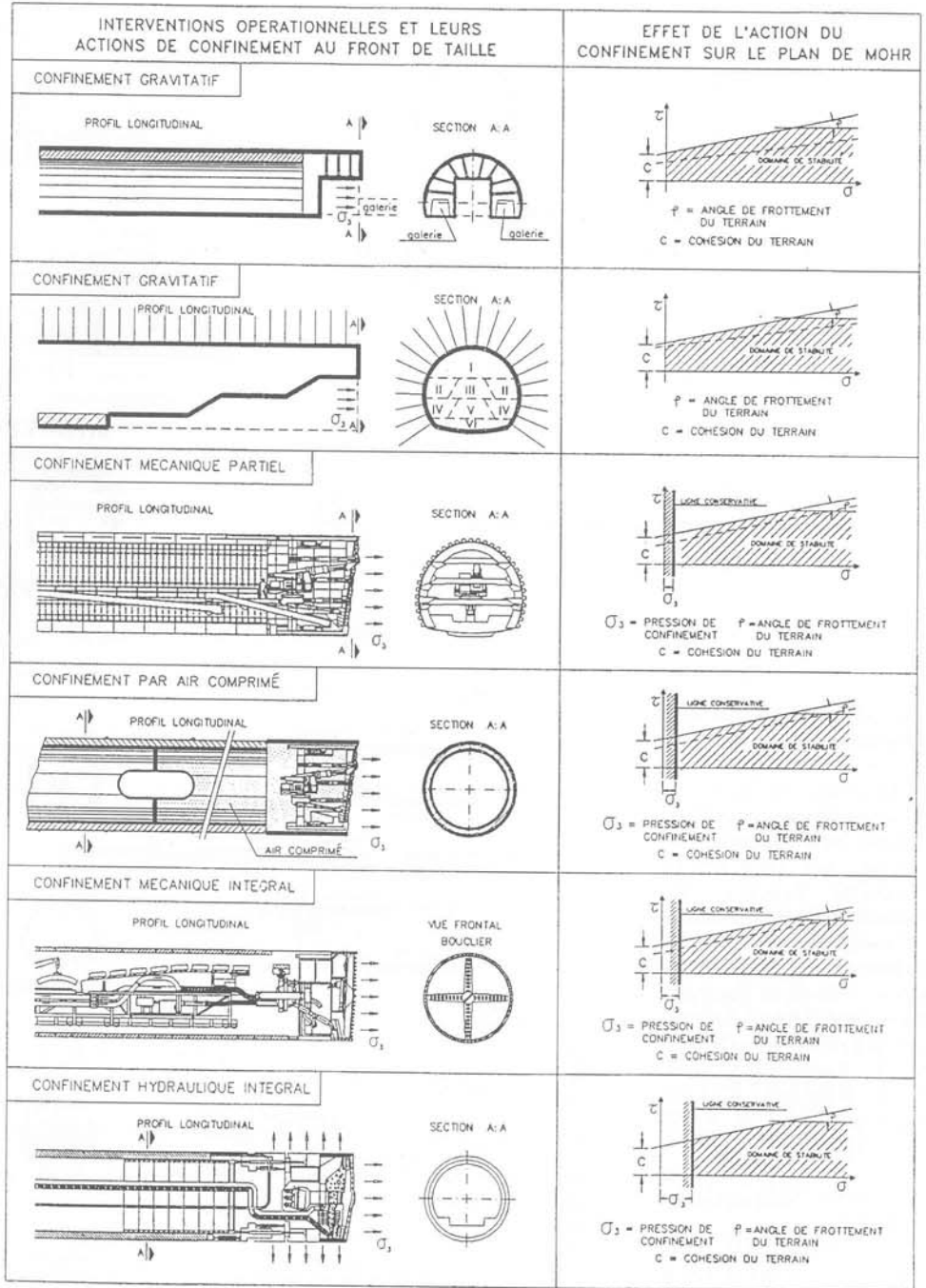


FIG. 14

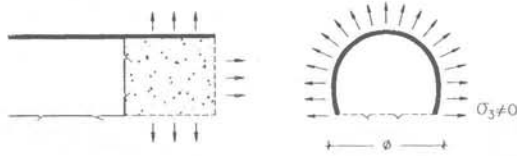
nature des terrains et l'entité des recouvrements en jeux tendaient à créer des conditions de stabilité prohibitives.

On peut considérer interventions "de conservation directes" (fig. 16):

- le système de jet-grouting sub-horizontale (fig. 17) qui permet de réaliser, sur l'avancement, des prévoltes de terrain consolidé capables de garantir la formation de l'effet de voûte par la voie artificielle même dans des terrains complètement dépourvus de cohésion (première réalisation dans l'absolu en 1983 en Italie avec le "Tunnel Campiolo", de la ligne ferroviaire Pontebba-Tarvisio pour Ferrovie dello Stato (les chemins de fer de l'Etat italien). Entreprise générale: Italstrade S.p.A.; Entreprise spécialisée: Rodio S.p.A.; projeteur: Rocksoil S.p.A. Milan [1] [2] [4] [5] [12] [13] [14] [18] [22]);

- le système de prédécoupage mécanique (fig. 18), que nous avons emprunté à une technologie française (SIPREMEC) et mis au point pour la "pleine

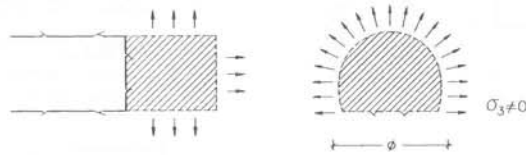
INTERVENTIONS DE CONSERVATION



INTERVENTION DIRECTE

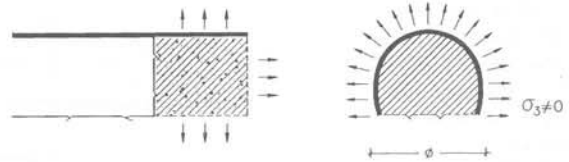
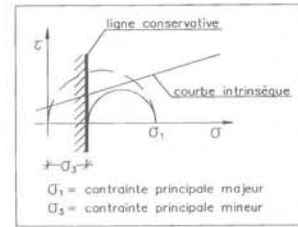
Protection du noyau par :

- prevoûte en terrain consolide par jet-grouting sous-horizontale
- prevoûte en spritz-beton (prédécoupage mécanique, pretunnel)



INTERVENTION INDIRECTE

Renforcement du noyau par tubes en fibre de verre (VTR)



INTERVENTION MIXTE

Protection et Renforcement du noyau par :

- injections et congélation
- prédécoupage + VTR
- jet-grouting + VTR
- VTR + VTR

FIG. 16

(fino a 60 m di luce) in area urbana entro terreni incoerenti o poco coerenti, anche sotto falda, praticamente senza causare cedimenti in superficie (prima realizzazione in assoluto nel 1988 per la "Stazione Venezia" del Passante ferroviario di Milano - Committente: MM Strutture ed Infrastrutture del Territorio S.p.A. - Impresa generale: Consorzio GIEMME - Impresa specializzata: Smetboring S.p.A., Rodio S.p.A., Icos S.p.A. - Progettista: Rocksoil S.p.A. di Milano [6] [8] [9] [10] [11] [12] [22]);

Si può considerare intervento "conservativo indiretto":

- il sistema del pre-consolidamento del nucleo al fronte di avanzamento mediante tubi di vetroresina (fig. 21), che consente di regolare la rigidità del nucleo e, di conseguenza, controllare la risposta deformativa a monte ed a valle del fronte. Il sistema ha trovato larga applicazione soprattutto nello scavo di gallerie in terreni di natura argillosa, dove i forti stati tensionali potevano determinare l'estrusione od il collasso del fronte (prima realizzazione in assoluto nel 1988 per le gallerie ferroviarie

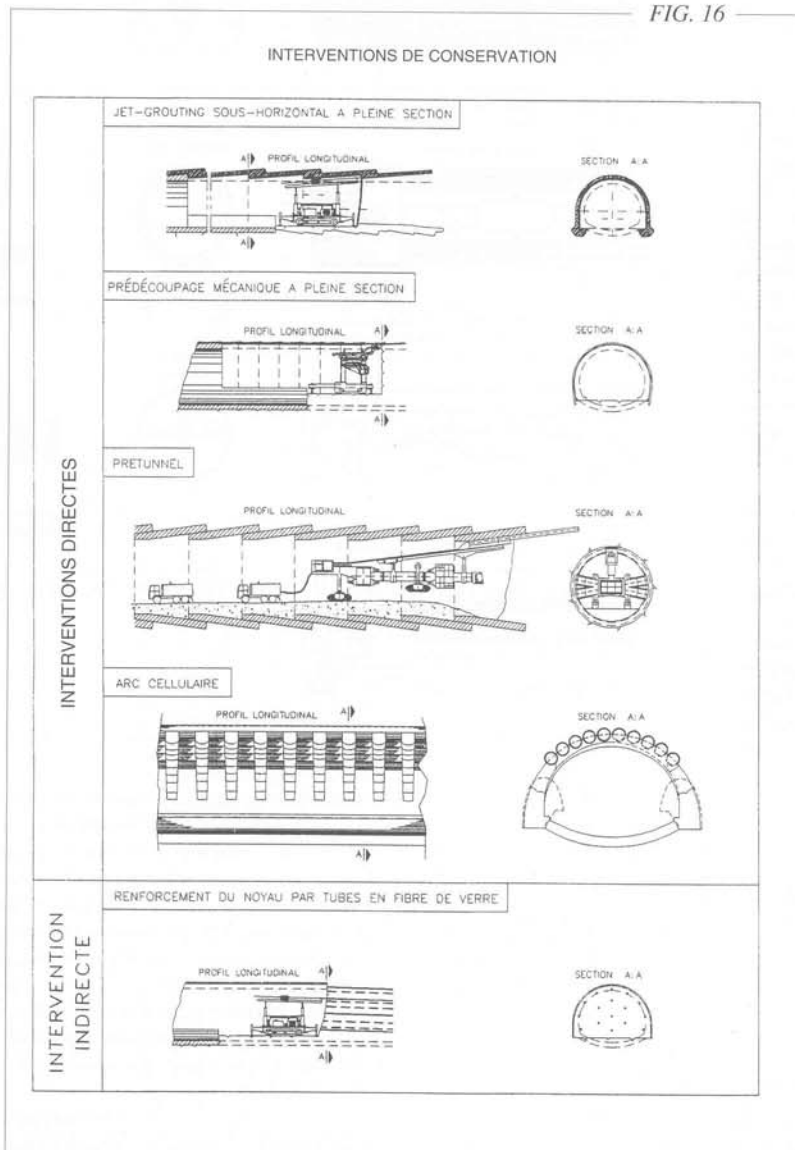


FIG. 15

section", pour l'attaque programmée de terrains cohésifs ou semicohésifs même sous la nappe. Le système consiste à réaliser en avancement, un prérevêtement en spritz-beton renforcé par fibres de acier pour protéger le noyau, capable d'empêcher le relâchement du terrain environnant et par voie de conséquence, de favoriser la formation de l'effet de voûte à proximité de l'arc proche du profil d'excavation (première réalisation en Italie en 1985, sur certains tunnels de la ligne de chemin de fer Sibari-Cosenza pour Ferrovie dello Stato. Entreprise générale : Asfalti Sintex S.p.A.; Entreprise spécialisée : Rodio S.p.A.; projeteur : Rocksoil S.p.A. Milan) [7] [12] [13] [16] [17] [22]);

- le système de pretunnel (fig. 19) - qui permet de réaliser des tunnels à pleine section dans des terrains difficiles en effectuant, en continu, le jet du revêtement définitif en béton en amont du front de taille. Il sera possible grâce à cette technologie - qui est à présent en phase d'expérimentation en Italie - d'élargir des tunnels autoroutiers de deux à trois voies tout en maintenant la circulation au cours des

del V Lotto della tratta Arezzo Sud-Figline Valdarno della linea ad "Alta Velocità" Roma-Firenze - Committente: Ferrovie dello Stato - Impresa generale: Consorzio FESPI - Impresa specializzata: Rodio S.p.A., Fondedile S.p.A. - Progettista: Rocksoil S.p.A. di Milano [7] [12] [17] [19] [22] [23] [24];

Gli interventi "conservativi misti" (fig. 22) si realizzano operando contemporaneamente un intervento diretto di protezione ed uno indiretto di rinforzo del nucleo.

Si possono considerare interventi "conservativi misti":

- il pretaglio ed il contemporaneo preconsolidamento del nucleo mediante tubi di vetroresina (prima realizzazione in assoluto nel 1988 per la "Galleria Tasso" e la "Galleria Terranova Le Ville" della linea ad "Alta Velocità" Roma-Firenze - Committente: Ferrovie dello Stato - Impresa generale: Consorzio FESPI - Impresa specializzata: Rodio S.p.A. - Progettista: Rocksoil S.p.A. di Milano [7]);

- il preconsolidamento sia del contorno del cavo sia del nucleo mediante tubi di vetroresina (prima realizzazione in assoluto nel 1991 per la "Galleria San Vitale" della linea ferroviaria Caserta-Foggia - Committente: Ferrovie dello Stato - Impresa generale: Consorzio COFERI - Impresa specializzata: Consonda S.p.A. - Progettista: Rocksoil S.p.A. di Milano [23] [24]);

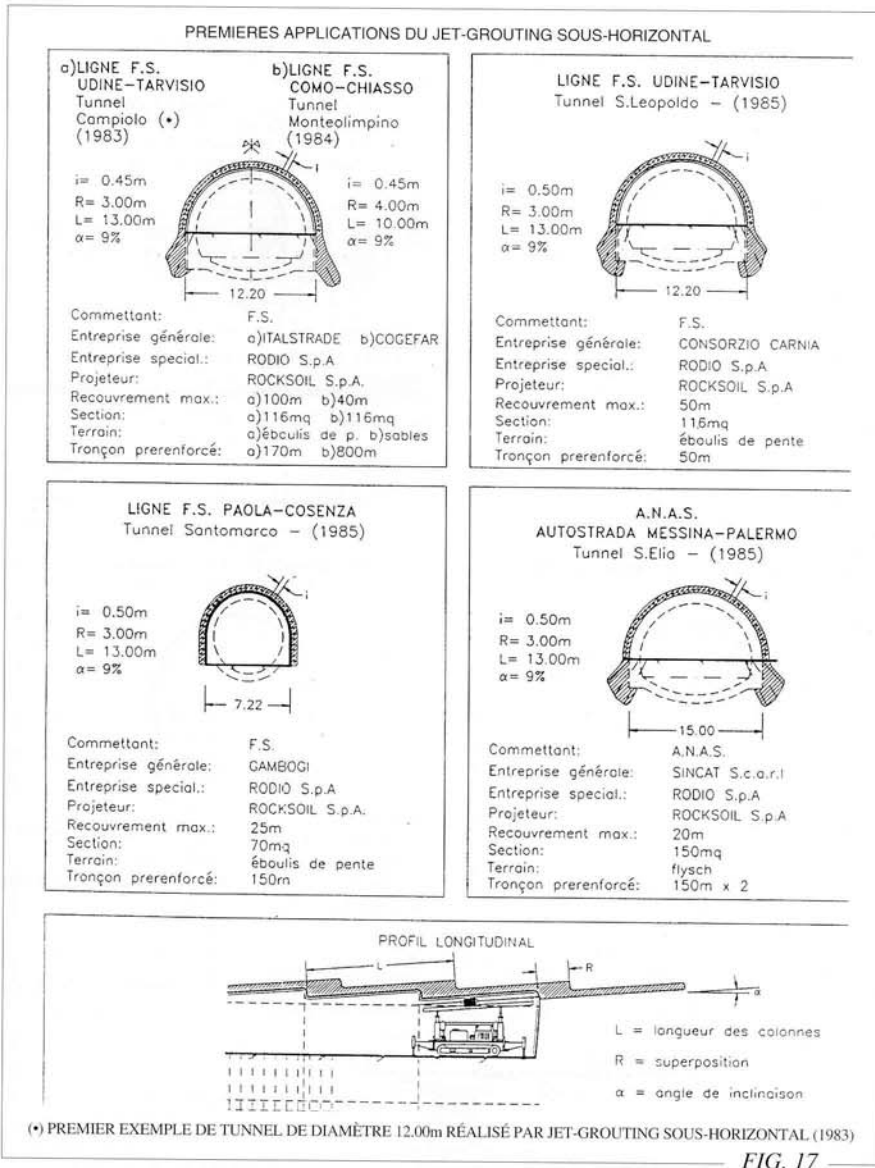
- il preconsolidamento del contorno del cavo mediante jet-grouting e quello del nucleo mediante tubi di vetroresina (prima realizzazione in assoluto nel 1991 per la "Galleria Vasto" della linea ferroviaria Ancona-Bari - Committente: Ferrovie dello Stato - Impresa generale: Fioroni S.p.A. - Impresa specializzata: Fondazioni Speciali S.p.A. - Progettista: Rocksoil S.p.A. di Milano).

Queste tecnologie, insieme ad altre particolari come:

- il sistema del jet-grouting in verticale (fig. 23), con cui è possibile creare nel terreno, prima di scavarlo, gusci di precontenimento di terreno consolidato, particolarmente efficaci per la realizzazione di opere d'imbocco in versanti detritici senza pregiudicare la stabilità e nel pieno rispetto dell'ambiente (prima realizzazione in assoluto nel 1985 per l'imbocco lato Pontebba della "Galleria San Leopoldo" della linea ferroviaria Pontebba-Tarvisio - Committente: Ferrovie dello Stato - Impresa generale: Consorzio Carnia - Impresa specializzata: Rodio S.p.A. Progettista: Rocksoil S.p.A. di Milano [3] [15] [18] [22]);

costituiscono gli interventi conservativi ideati dall'Autore e messi a punto dalla Rocksoil S.p.A. negli ultimi 10 anni (vedi le tabelle A e B dei lavori realizzati, allegate in fondo alla memoria).

La disponibilità delle tecnologie di scavo conservative, attraverso le



travaux.

- le système de l'"arc cellulaire" (fig. 20) résoud le problème de la préfabrication du revêtement définitif de l'ouvrage souterrain à construire avant de commencer son excavation dans la mesure où il permet de réaliser de grandes cavités corticales (jusqu'à 60 m de lumière) dans des zones urbaines, dans des terrains incohérents ou peu cohérents, y compris sous la nappe, pratiquement sans causer des tassements en surface (première réalisation dans l'absolu en 1988 pour la "Station Venezia" de la transversale ferroviaire de Milan, pour MM Structure et Infrastructures del Territorio S.p.A.; Entreprise générale: Consorzio GIEMME; Entreprise spécialisée: Smetboring S.p.A., Rodio S.p.A., Icos S.p.A.; Projeteur: Rocksoil S.p.A. Milan [6] [8] [9] [10] [11] [12] [22]).

On peut considérer intervention "de conservation indirecte" (fig. 16):

- le système de prérenforcement du noyau sur le front de taille par des tubes en fibre de verre (fig. 21) qui permet de régler la rigidité du noyau et par voie de conséquence de

contrôler la réponse en déformation en amont et en aval du front. Le système a été largement appliqué, notamment dans l'excavation de tunnels dans des terrains de nature argilleuse où les forts états de contrainte pouvaient déterminer l'extrusion ou l'effondrement (première réalisation dans l'absolu en 1988 pour les tunnels ferroviaires du Ve Lot du tronçon Arezzo Sud-Figline Valdarno de la ligne "Grande Vitesse" Rome-Florence pour Ferrovie dello Stato; Entreprise générale: Consorzio FESPI; Entreprise spécialisée: Rodio S.p.A., Fondedile S.p.A.; Projeteur: Rocksoil S.p.A. Milan [7] [12] [17] [19] [22] [23] [24]).

Les interventions "de conservation mixtes" sont réalisées en opérant en même temps une intervention directe de protection et une intervention indirecte de renforcement du noyau. On peut considérer interventions conservatrices mixtes" (fig. 22):

- le prédécoupage mécanique et le prérenforcement simultanée du noyau par des tubes en fibre de verre (première réalisation dans l'absolu en 1988 pour le "Tunnel Tasso" et le "Tunnel Terranova Le Ville" de la ligne Grande Vitesse Rome-Florence pour Ferrovie dello Stato; Entreprise générale: Consorzio FESPI; Entreprise spécialisée: Rodio; Projeteur: Rocksoil S.p.A. Milan [7]);

- le prérenforcement du contour de la cavité et du noyau par des tubes en fibre de verre (première réalisation dans l'absolu en 1991 pour le "Tunnel San Vitale" de la ligne ferroviaire Caserta-Foggia pour Ferrovie dello Stato; Entreprise générale: Consorzio COFERI; Entreprise spécialisée: Consonda; Projeteur: Rocksoil S.p.A. Milan [23] [24]) ou encore la préconsolidation du contour de la cavité par jet-grouting et le

quali è possibile esercitare un'azione di pre-contenimento del cavo in qualsiasi tipo di terreno ed a fronte di qualsiasi situazione tensionale, ha portato ad una vera e propria rivoluzione nel modo di affrontare gli scavi in sotterraneo.

Tale rivoluzione deriva dal fatto che l'azione di pre-contenimento garantisce il rispetto di cadenze costanti di avanzamento anche nelle situazioni difficili, impedendo il detensionamento del terreno a monte del fronte d'avanzamento ed evitando, di conseguenza, il manifestarsi delle predette manifestazioni d'instabilità, anche in quei contesti in cui gli interventi di semplice "contenimento" hanno sempre fallito e continueranno a fallire (fig. 24).

Questo stato di cose costituisce, allora, la necessaria premessa per incominciare, da un lato, a pensare concretamente alla possibilità di industrializzare le opere in sotterraneo e di poterle pianificare in

prerforamento del nocciuolo par des tubes en fibre de verre (première réalisation dans l'absolu en 1991 avec le "Tunnel Vasto" de la ligne de chemin de fer Ancona-Bari pour Ferrovie dello Stato; Entreprise générale: Fioroni S.p.A.; Entreprise spécialisée: Fondazioni Speciali S.p.A.; Projeteur: Rocksoil S.p.A. Milan).

Ces technologies unies à d'autres technologies particulières telles que :

- le système de jet-grouting vertical (fig. 23) avec lequel il est possible de créer dans le terrain, avant d'excaver, des coques de préconfinement de terrain consolidé, particulièrement efficaces pour la réalisation d'ouvrages d'entrée sur des versants détritiques sans compromettre leur stabilité et dans le respect le plus total de l'environnement (première réalisation dans l'absolu en 1985 pour l'entrée côté Pontebba du tunnel "San Leopoldo" de la ligne de chemin de fer Pontebba-Tarvisio pour Ferrovie dello

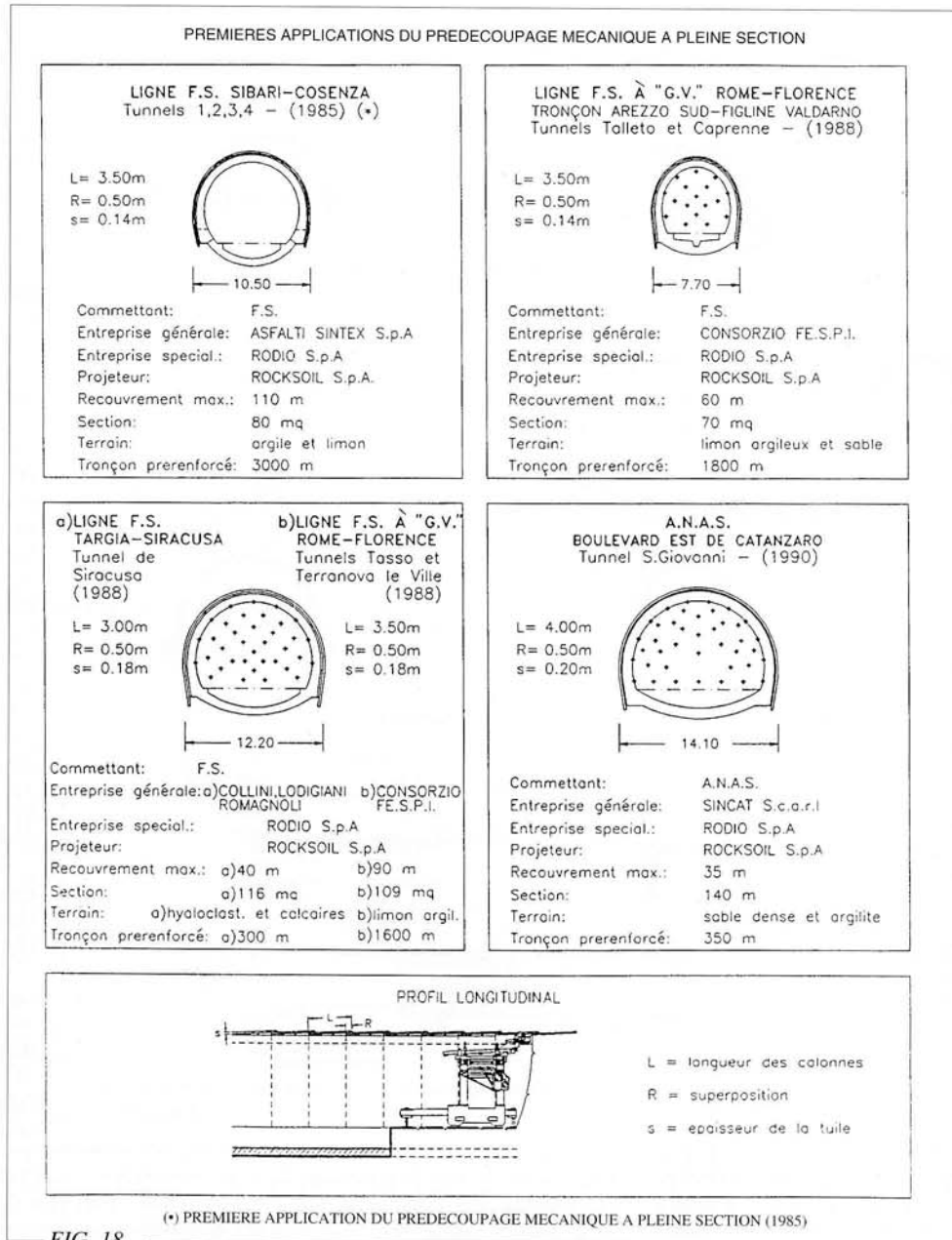


FIG. 18

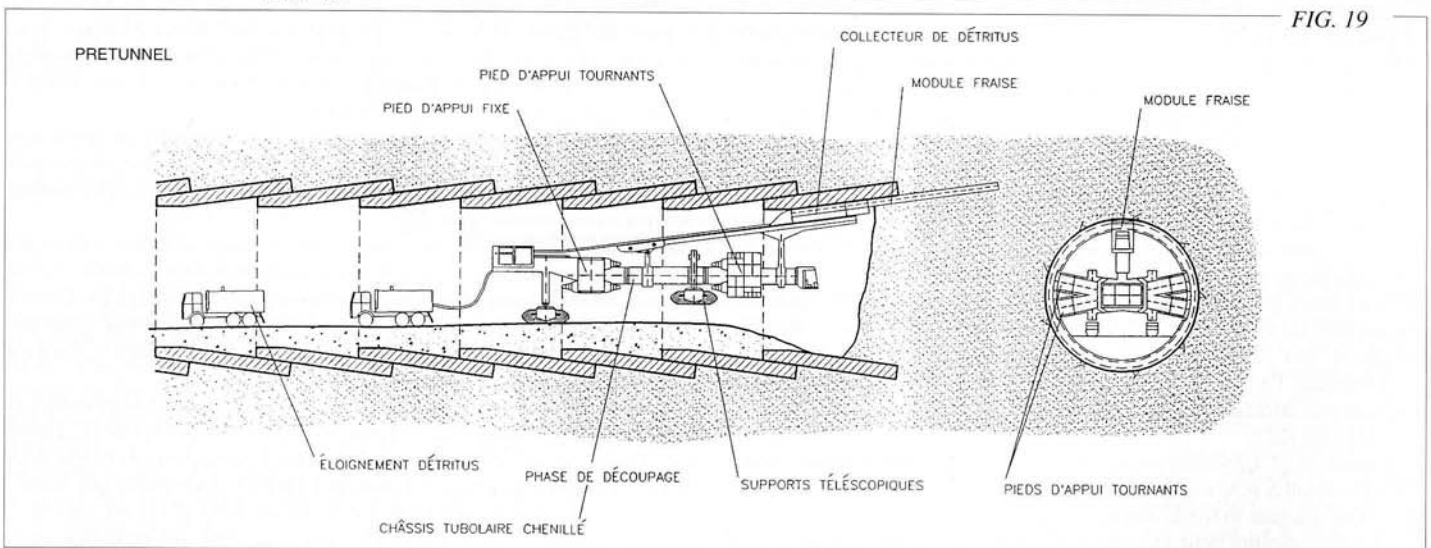


FIG. 19

LIGNE FERROVIARIE DU METRO SOUS LA VILLE DE MILAN  
ARC CELLULAIRE

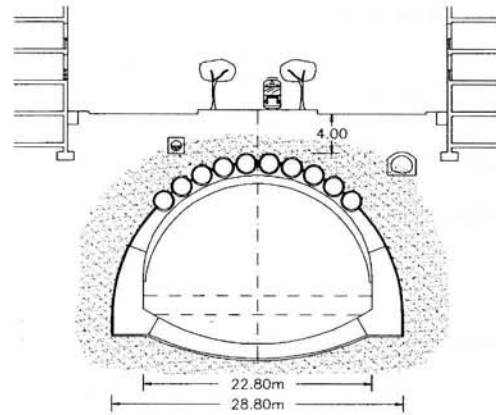
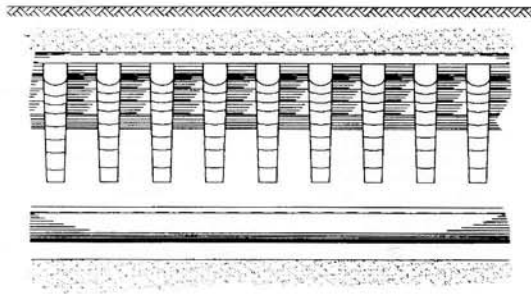


FIG. 20

termini di tempi e costi di costruzione prescindendo dalla natura del mezzo e dall'importanza delle coperture in gioco, dall'altro lato, per incominciare a mettere a punto un nuovo metodo di progettazione e costruzione di opere in sotterraneo che, prescindendo dalla natura del mezzo e dall'importanza delle coperture in gioco, sia capace di rispondere ai requisiti indispensabili per poter essere considerato completo ed universalmente valido:

- 1) essere applicabile in tutti i tipi di terreno ed in tutte le situazioni statiche;
- 2) fornire gli strumenti progettuali e costruttivi adeguati a risolvere le diverse situazioni statiche in qualsiasi tipo di terreno;
- 3) prevedere una netta separazione tra il momento della progettazione ed il momento della costruzione dell'opera;
- 4) permettere di pianificare l'opera in sotterraneo in termini di tempi e costi di costruzione.

A questi requisiti non hanno saputo rispondere completamente i metodi più largamente utilizzati sino ad oggi, sia quelli derivati da criteri di classificazione geomeccanica (e quindi validi solo per ammassi lapidei), sia quelli derivati da sistemi costruttivi come quello proposto da Rabcewicz.

Il Nuovo Metodo Austriaco (NATM), in particolare, che ha trovato larga diffusione negli ultimi trent'anni, ha rappresentato indubbiamente, al momento della sua introduzione, un notevole progresso rispetto al passato.

Esso ebbe principalmente il merito di:

- considerare per la prima volta il terreno come materiale da costruzione, orientandosi verso azioni di "contenimento" e non di sostegno;
- introdurre l'utilizzazione di nuove tecnologie di semplice contenimento con azione attiva quali lo spritz-beton ed i bulloni;
- sottolineare la necessità di rilevare ed interpretare sistematicamente la risposta deformativa dell'ammasso in termini di sola convergenza del cavo.

Oggi però, alla luce dei recenti progressi in campo tecnologico e di calcolo, denuncia importanti limiti:

PREMIERES APPLICATIONS DU RENFORCEMENT DU NOYAU PAR TUBES EN VTR

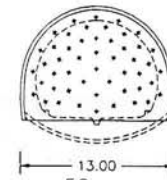
FIG. 21

LIGNE F.S. À "G.V." ROME-FLORENCE  
TRONÇON AREZZO SUD-FIGLINE VALDARNO  
Tunnels Talieto et Caprenne - (1988) (\*)



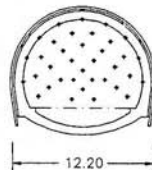
Committant: F.S.  
Entreprise générale: CONSORZIO FE.S.P.I.  
Entreprise special.: RODIO S.p.A.  
Projeteur: ROCKSOIL S.p.A.  
Recouvrement max.: 60 m  
Section: 70 mq  
Terrain: limon argileux et sable  
Tronçon prerenforcé: 3482 m

LIGNE F.S. À "G.V." ROME-FLORENCE  
Tunnels Crepacuore et Poggio Orlandi - (1989)



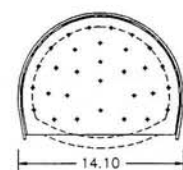
Committant: F.S.  
Entreprise générale: CONSORZIO FE.S.P.I.(Fondedile)  
Entreprise special.: ITALSONDA S.p.A.  
Projeteur: ROCKSOIL S.p.A.  
Recouvrement max.: 60 m  
Section: 116 mq  
Terrain: limon argileux et sable  
Tronçon prerenforcé: 839 m

LIGNE F.S. À "G.V." ROME-FLORENCE  
Tunnels Tasso et Terranova le Ville - (1988)



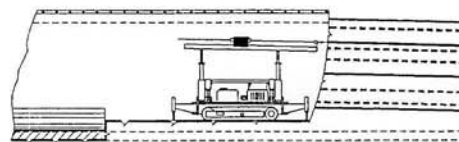
Committant: F.S.  
Entreprise générale: CONSORZIO FE.S.P.I.(Ferdir)  
Entreprise special.: RODIO S.p.A.  
Projeteur: ROCKSOIL S.p.A.  
Recouvrement max.: 90 m  
Section: 116 mq  
Terrain: limon argileux et sable  
Tronçon prerenforcé: 3994 m

A.N.A.S.  
BOULEVARD PERIPHERIQUE EST DE CATANZARO  
Tunnel S.Giovanni - (1990)



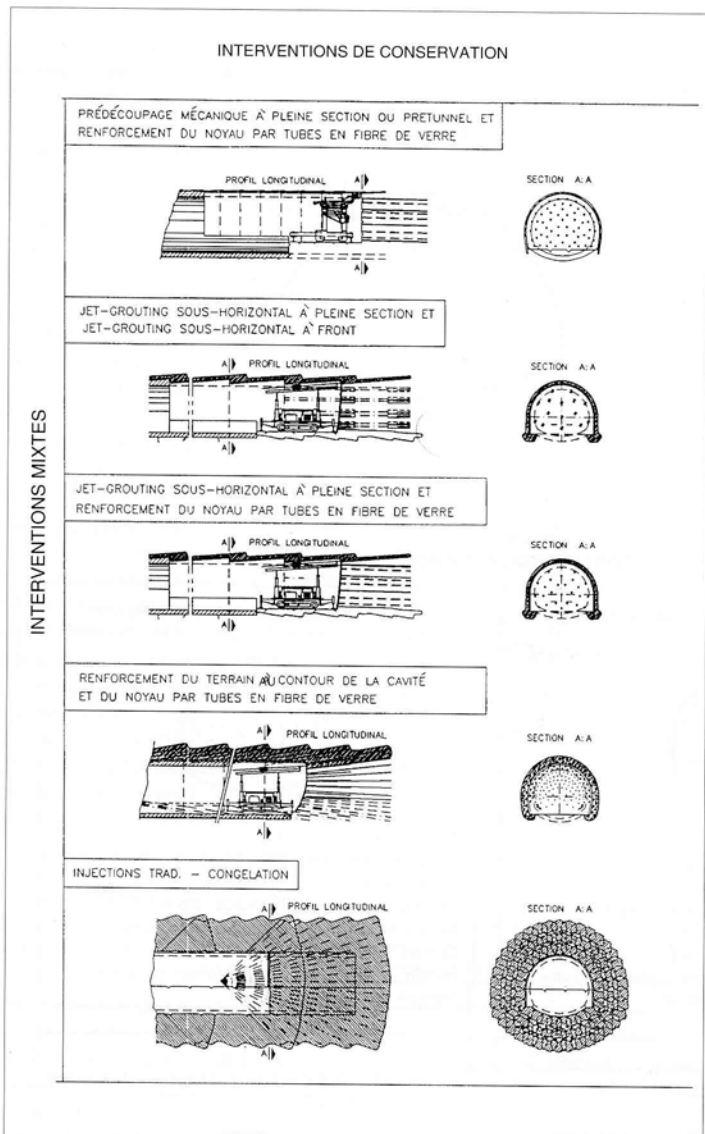
Committant: A.N.A.S.  
Entreprise générale: CONSORZIO SINCAT  
Entreprise special.: RODIO S.p.A.  
Projeteur: ROCKSOIL S.p.A.  
Recouvrement max.: 35 m  
Section: 140 mq  
Terrain: sable dense et argilite  
Tronçon prerenforcé: 350 m

PROFIL LONGITUDINAL

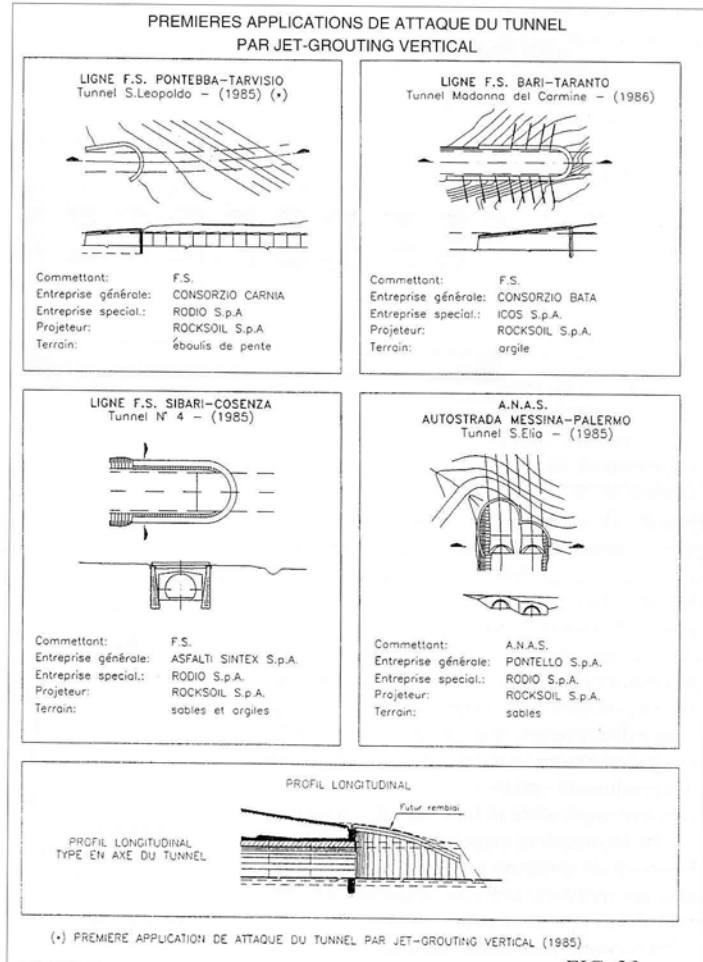


(\*) PREMIERE APPLICATION DU RENFORCEMENT DU NOYAU PAR TUBES EN VTR (1988)

P.LUNARDI - MILANO

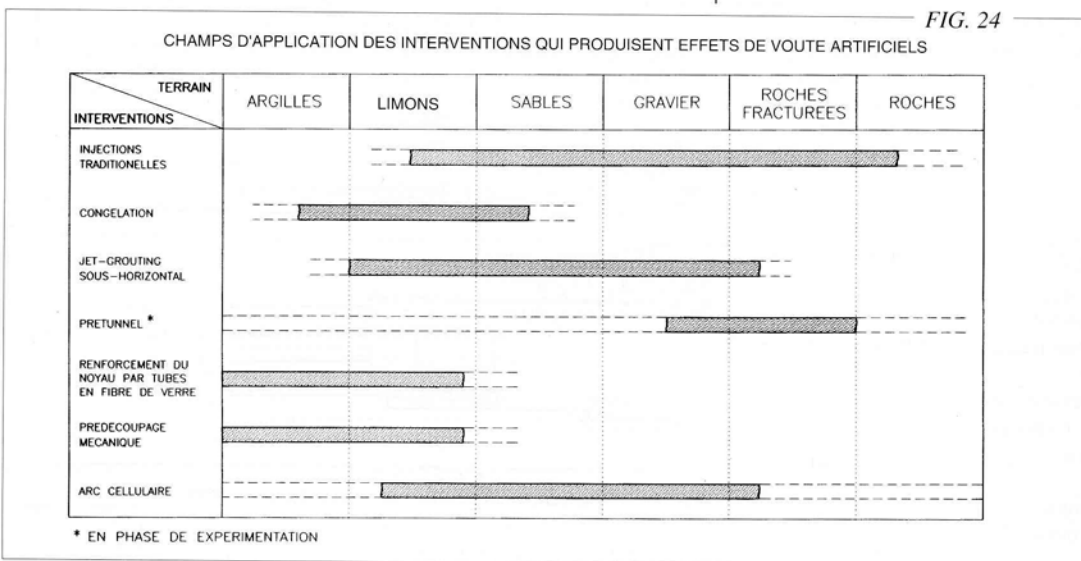


- rappresenta un sistema di classificazione incompleto e parziale, in quanto non applicabile in tutti i tipi di terreno ed in tutte le situazioni tenso-deformative;



Stato; Entreprise générale : Consorzio Carnia; Entreprise spécialisée : Rodio; Projeteur : Rocksoil S.p.A. Milan [3] [15] [18] [22]); constituent les interventions de conservation conçus par l'auteur et mis au point par Rocksoil S.p.A. les dix dernières années (voir les tableaux A et B des travaux réalisés annexés à ce rapport).

La disponibilité des technologies d'excavation conservatives - à travers lesquelles il est possible d'exercer une action de préconfinement de la cavité quel que soit le type de terrain et quelle que soit la situation de contrainte - a entraîné une véritable révolution dans la manière d'affronter les excavations souterraines.



**FIG. 24**

Cette révolution dérive du fait que l'action de préconfinement garantit le respect des cadences constantes d'avancement même dans les situations difficiles, empêche le détensionnement du terrain en amont du front de taille et évite par voie de conséquence l'apparition des manifestations d'instabilité dont nous avons parlé, y compris dans les contextes où les interventions de simple "confinement" ont toujours échoué et continueront de le faire (fig. 24). Cet état de choses constitue dès lors le point de départ indispensable pour commencer, d'une part à penser concrètement à la possibilité d'industrialiser les ouvrages souterrains et de les planifier en termes de temps et de coûts de construction

- trascura le nuove tecnologie, continuando a supporre erroneamente di poter risolvere tutte le situazioni tenso-deformative mediante la sola utilizzazione di bulloni, centine e spritz-beton;

- trascura completamente l'importanza del nucleo d'avanzamento e la necessità di utilizzarlo quale strumento di stabilizzazione della galleria;

- non prevede un momento della progettazione nettamente separato dal momento della costruzione.

Per superare questi limiti, è stato recentemente proposto un metodo che si basa sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli [20] [21]. Esso si propone come una nuova metodologia che, prendendo atto delle possibilità offerte dai più recenti strumenti d'indagine e di calcolo, in fase di progettazione, e dalle nuove tecniche di avanzamento e stabilizzazione del cavo, in fase di costruzione, valorizza in senso pratico i contributi scientifici ed operativi del NATM e degli altri metodi utilizzati nel passato, li interpreta in maniera innovativa e, superandone i limiti stessi, ne costituisce la naturale evoluzione, proponendo tra l'altro di:

- far riferimento ad un unico parametro, ovvero la risposta deformativa del mezzo allo scavo, 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;

- valorizzare la funzione del nucleo al fronte d'avanzamento quale strumento di stabilizzazione della cavità in fase di scavo;

- classificare le gallerie in base a categorie di comportamento riferite alle condizioni di stabilità del nucleo e del fronte d'avanzamento;

- integrare, in fase di scelta e dimensionamento degli interventi di stabilizzazione, i ben noti approcci "convergenza-contenimento" ed "estrusione-contenimento" con quello in termini di "estrusione-precontenimento";

e rendendo possibile affrontare l'approccio progettuale e costruttivo delle gallerie più difficili con gli stessi criteri di sicurezza adottati in quelle di facile realizzazione, al fine di prevedere in maniera attendibile tempi e costi di costruzione.

L'obiettivo dell'industrializzazione degli scavi è dunque oggi raggiungibile e con esso quello della pianificazione delle opere in sotterraneo, che potranno essere finalmente elevate alla dignità delle altre opere di ingegneria civile.

Un metodo di progettazione e costruzione con le citate caratteristiche può essere adottato come riferimento per lo sviluppo di una nuova normativa (analogamente a quanto fatto nel rinnovare recentemente i propri capitoli da tre importanti Amministrazioni italiane [25][26][27]) capace di rispondere in maniera adeguata alle esigenze di chi opera in sotterraneo.

PROJETS REALISES PAR INTERVENTIONS DE CONSERVATION

ANNÉE	COMMITTANT	TRAVAIL	Ø [m]	Diagrammi di sezione				N
				L [m]	L [m]	L [m]	L [m]	
1983	F.S.	UDINE-TARVISIO Tunnel Compilolo	12	170				
1984	F.S.	UDINE-TARVISIO Tunnel M. Palis	12	200				
1984	F.S.	PAOLA-COSENZA Tunnel Santamarco	7	150				
1984	F.S.	COMO-CHIASSO Tunnel M. Olimpino	12	800				
1985	F.S.	UDINE-TARVISIO Tunnel S.Leopoldo	12	50				1
1985	ANAS	MESSINA-PALERMO Tunnel S.Elia	15	150x2				1
1985	F.S.	SIBARI-COSENZA Tunnels 1,2,3,4	10	1300	2300	2300		
1986	F.S.	BARI-TARANTO Tunn. Madonna del Carm.	12	200				2
1986	F.S.	BARI-TARANTO Tunnel S.Francesco	12	100				2
1986	F.S.	UDINE-TARVISIO Tunnel Malborghetto	12	150				1
1987	Commune Campinas	Passage souterrain de la gare	14	300x2				2
1987	F.S.	UDINE-TARVISIO Tunnel Camporosso	12	650				2
1987	F.S.	UDINE-TARVISIO Tunnel S.Rocco	12	600				
1988	ANAS	AUT. DEI TRAFORI Tunnel Valsesia	15	600				
1988	ANAS	S.S. 42 Tunnel Lovere	11	200				
1988	MM	TRANSVERSALE FERR. DE MILANO Station Venezia	30				250	
1988	F.S.	LIGNE A "GV" ROME-FLORENCE Tunn. Talletto e Coprenne	8	2500	2800	2800		4
1988	F.S.	LIGNE A "GV" ROME-FLORENCE Tunnel Tasso	12	150		1650		2
1988	F.S.	LIGNE A "GV" ROME-FLORENCE Tunn. Terranova le Ville	12	200	1800	2200		3
1988	F.S.	LIGNE A "GV" ROME-FLORENCE Tunnel Poggio Orlandi	13	250		600		2
1988	F.S.	LIGNE A "GV" ROME-FLORENCE Tunnel Crepacuore	13	60		120		2
1989	ANAS	BOULEVARD DE CATANZARO Tunnel S.Giovanni	12		400	400		2
1989	ANAS	S.S. 42 Tunn. Costa Volpino	11			200		1
1989	Aqueduc des Pouilles	Aqueduc d'Ofanto	5			200		3
1989	F.S.	TARGIA-SIRACUSA Tunnel di Siracusa	12		1000	1000		
1989	R.A.V.	AUT. AOSTA-M. BIANCO Tunnel Villeneuve	12	275x2				2

REALISES PAR ROCKSOIL S.p.A. DE MILAN

TAB. A

*indépendamment de la nature du milieu et de l'importance des recouvrements en jeu. Et de l'autre, pour commencer à mettre au point une nouvelle méthode de conception et de construction d'ouvrages souterrains qui soit, indépendamment de la nature du milieu et de l'importance des recouvrements en jeu, capable de répondre aux conditions requises pour être considérée comme complète et universellement valable. Elle devra:*

- 1) s'appliquer quel que soit le type de terrain et quelles que soient les situations statiques;
- 2) fournir les instruments de conception et de construction adéquats, capables de résoudre les différentes situations quel que soit le type de terrain;
- 3) prévoir une nette séparation entre la conception et la construction de l'ouvrage;
- 4) permettre de planifier l'ouvrage souterrain en termes de temps et de coûts de construction.

*Les méthodes les plus largement utilisées jusqu'ici n'ont pas su répondre complètement à ces exigences. Qu'il s'agisse des méthodes dérivant de critères de classement géomécanique (et donc valables pour les massifs rocheux exclusivement) ou de méthodes dérivant de systèmes*

*de construction comme celui proposé par Rabcewicz.*

*La Nouvelle Méthode Autrichienne (NATM) qui a eu au demeurant une très large diffusion ces trente dernières années a incontestablement représenté lors de son introduction, un progrès considérable par rapport au passé. Elle a eu le mérite essentiel de:*

- considérer pour la première fois le terrain comme un matériel de construction et de s'orienter vers des actions de confinement et non pas de soutènement;
- introduire l'utilisation de nouvelles technologies de simple confinement avec une action active, telles que le spritz-béton et les boulons;
- souligner le besoin de relever et d'interpréter systématiquement la réponse en déformation di massif exclusivement en termes de convergence de la cavité.

*Aujourd'hui toutefois, à la lumière des progrès récents faits dans le domaine technologique et dans le calcul, la méthode révèle des limites importantes:*

- elle représente un système de classement incomplet et partiel dans la mesure où il ne s'applique pas à tous les types de terrain et à toutes les situations de contrainte et de déformation;
- elle néglige les nouvelles technologies et continue à prétendre, a tort, d'être à même de résoudre toutes les situations de contrainte et de déformation à travers la seule utilisation de boulons, de cintres et de spritz-béton;
- elle néglige complètement l'importance du noyau d'avancement et le besoin de l'utiliser en tant qu'instrument de stabilisation du tunnel;
- elle ne prévoit jamais une conception nettement séparée de la construction.

*Pour surmonter ces limites, une méthode a été récemment proposée qui se base sur l'analyse des déformations contrôlées dans les roches et dans les sols [20] [21]. Elle se présente comme une nouvelle méthodologie qui a pris acte des possibilités offertes par les instruments les plus récents de recherche*



et de calcul au cours de la phase de la conception et des nouvelles techniques d'avance-ment et de stabilisation de la cavité au cours de la phase de construction.





Une méthode qui valorise sur le plan pratique la contribution scientifique et opérationnelle du NATM et des autres méthodes utilisées dans le passé.

Elle les interprète dans un sens innovant, elle dépasse leurs limites et constitue leur évolution naturelle.

Elle propose entre autres choses de:

- faire référence à un seul paramètre autrement dit la réponse en déformation du milieu de l'excavation tout d'abord par la voie théorique, comme objet de prévision et de mise sous contrôle, puis par la voie expérimentale, comme objet de lecture et d'interprétation pour la mise au point du projet en chantier;
- valoriser la fonction du noyau au front de taille comme instrument de stabilisation de la cavité en phase d'excavation;
- classer les tunnels sur la base de catégories de comportement en fonction des conditions de stabilité du noyau et du front de taille;

PROJETS REALISES PAR INTERVENTIONS DE CONSERVATION

ANNÉE	COMMITTANT	TRAVAIL	Ø (m)	L (m)				N
								
1989	R.A.V.	AUT. AOSTA-M. BIANCO Tunnel Avisé	12	290x2				4
1989	F.S.	UDINE-TARVISIO Tunnel Tarvisio	16	1000				1
1989	SAT	AUT. LVORNO-CIVITAV. Tunnel Malenchini	12	900x2				2
1989	SAT	AUT. LVORNO-CIVITAV. Tunnel Rimozano	12	900x2		900x2		2
1990	Commune de Rome	Passage souterrain via Cristoforo Colombo	12,5	150				
1990	ANAS	S.S. 1 Tunnel Mantenero	11	150x2		2350x2		2
1990	LAURO	S.S. 38 Tunn. Valmagg. Ballardore	12	150				4
1990	COGEFAR	S.S. 38 Tunnel Mondadizza	12	60				1
1990	CARIBONI	S.S. 38 Tunn. Le Prese e Verzedo	12	100				2
1990	LODIGIANI	S.S. 38 Tunnel San Antonio	12	40				2
1990	TECNO SVILUPPO	S.S. 38 Tunnel Tola	12	80				2
1990	SECOL	S.S. 38 Tunnel Cepina	12	70				1
1990	R.A.V.	AUT. AOSTA-M. BIANCO Tunnel Leverogne	12	270x2				2
1990	R.A.V.	AUT. AOSTA-M. BIANCO Tunnel Villaret	12	240x2				4
1990	R.A.V.	AUT. AOSTA-M. BIANCO Tunnel Les Crêtes	12	450x2				2
1990	MM	MILANO Boulevard periferique est	11	70				2
1991	ANAS	S.S. 510 Lotti 5,6,7	11	900		400		15
1991	ANAS	S.S. 237 Tunnel Scabbio	11	300				3
1991	F.S.	CASERTA-FOGGIA Tunnel S.Vitale	12		300	1300		
1991	ANAS	S.S. 62 Tunnel M. Barro	11	100x2				1
1991	PIZZA-ROTTI	S.S. 470 Tunnel Lenno	12	30				
1992	ANAS	E. 45 Tunnel Quarto	11	100x2		200x2		3
1993	F.S.	ANCONA-BARI Tunnel Vasto	10	1270	1850	4970		
1993	F.S.	FIRENZE-EMPOLI Tunnel S.Vito	12	130		200		1
1993	F.S.	FIRENZE-EMPOLI Tunnel Bellasguardo	12	125		360		2
1993	ANAS	S.S. 106 Tunnel Lofini	11	90x2		90x2		2
1993	INTERMETRO	METRO DE ROME Stat. Baldo degli Ubaldi	21		120	120		

REALISES PAR ROCKSOIL S.p.A. DE MILAN

TAB. B

- intégrer - dans la phase du choix et du dimensionnement des interventions de stabilisation - les approches bien connues de "convergence-confinement" et d'"extrusion-confinement" avec celle d'"extrusion-préconfinement" en faisant en sorte qu'il soit possible d'affronter la conception et la construction des tunnels difficiles avec les mêmes critères de sécurité que ceux adoptés pour les tunnels faciles à réaliser afin de prévoir d'une manière fiable les temps et les coûts de construction.

Aujourd'hui, l'objectif de l'industrialisation des excavations est donc à notre portée de même que celui de la planification des ouvrages souterrains qui pourront enfin être élevés à la dignité des autres ouvrages d'ingénierie civile.

Une méthode de conception et de construction conforme aux caractéristiques que nous venons d'indiquer peut être adoptée comme référence pour le développement d'une nouvelle réglementation (comme cela a été fait par trois importantes administrations italiennes qui ont renouvelé récemment leur cahiers des charges [25][26][27]) capable de répondre correctement aux exigences de ceux qui opèrent en souterrain.

**Bibliografia**

[1] LUNARDI P., "Nouvelle Méthode de construction des écrans d'étanchéité dans les barrages en remblai", XIV Congresso Internazionale su "Le Grandi Dighe" - Rio de Janeiro, 6-7 Maggio 1982.  
 [2] LOUIS C., LUNARDI P., "Consolidation des sols par la technique de jet-grouting. Etat des connaissances et expériences", Colloque International "Renforcement en place des sols des roches", Parigi, Ottobre 1984.  
 [3] FAOROL., LUNARDI P., PASQUINI M., "Il jet-grouting nel consolidamento di imbocchi di gallerie autostradali", Atti del Congresso Internazionale su "Grandi Opere Sotterranee" - Firenze 8-11 Giugno 1986  
 [4] LUNARDI P., MONGILARDI E., TORNAGHI R., "Il preconsolidamento mediante jet-grouting nella realizzazione di opere in sotterraneo", Atti del Congresso Internazionale su "Grandi Opere Sotterranee" - Firenze 8-11 Giugno 1986  
 [5] CAMARGO GUAZZELLI J.L., LUNARDI P., "Tunel de Campinas: evolution del diseno y problemas de operacion", Atti del Congresso Internazionale su "Le gallerie e l'Acqua" - Madrid, 12-15 Giugno 1988  
 [6] LUNARDI P., "L'emploi de microtunnels pour la réalisation d'ouvrage souterrains de grande portée: l'Arc Cellulaire", Atti del Congresso Internazionale su "Le gallerie e l'Acqua" - Madrid, 12-15 Giugno 1988  
 [7] LUNARDI P., BINDI R., FOCARACCIA., "Nouvelles orientations pour le projet et la construction des tunnels dans des terrains meubles. Etudes et

experiences sur le preconfinement de la cavite et la preconsolidation du noyau au front", Colloque International "Tunnels et micro-tunnels en terrain meuble - Parigi 7-10 Febbraio 1989  
 [8] COLOMBO A., LUNARDI P., LUONGO E., PIZZAROTTI E.M., "L'Arc Cellulaire pour la Station "Venezia" du Passante Ferroviario Metropolitano de Milan", Colloque International "Tunnels et micro-tunnels en terrain meuble - Parigi 7-10 Febbraio 1989  
 [9] LUNARDI P., "Un nuovo sistema costruttivo per la realizzazione di gallerie di grande luce in terreni sciolti: l'Arc Cellulare", Gallerie e grandi opere sotterranee, n. 29 anno 1989  
 [10] COLOMBO A., LUNARDI P., LUONGO E., "Innovative techniques for the realization of large diameter tunnels in loose land", Congresso Internazionale su "Progress and Innovation in Tunnelling" - Toronto 9-14 Settembre 1989  
 [11] LUNARDI P., "Un nouveau systeme constructif pour la realisation de tunnel de grande portee dans terrains non coherents: l'Arc Cellulaire", Colloque International "Les fondations des grands ouvrages" - UNESCO - Parigi 27-29 Marzo 1990  
 [12] LUNARDI P., PIZZAROTTI E.M., "Soft groung tunnelling in the Milan Metro and Milan Railway Link. Case histories", Soft Ground Tunnelling Course - Institution of Civil Engineers - Londra 10-12 Luglio 1990  
 [13] COLOMBO A., LUNARDI P., PIZZAROTTI E.M., TESSERIN G.D., "Preconsolidamento del terreno mediante jet-grouting nel sottopasso della Tangenziale Est di Milano da parte della Linea 3 della metropolitana", Convegno

Internazionale su "Il consolidamento del suolo e delle rocce nelle realizzazioni in sotterraneo" - Milano 18-20 Marzo 1991  
 [14] GOLINELLI G., LUNARDI P., PERELLI CIPPO A., "La prima applicazione del jet-grouting in orizzontale come precontenimento delle scavo di gallerie in terreni incoerenti", Convegno Internazionale su "Il consolidamento del suolo e delle rocce nelle realizzazioni in sotterraneo" - Milano 18-20 Marzo 1991  
 [15] LUNARDI P., "L'impiego del jet-grouting per l'attacco di gallerie in terreni soffici", Convegno Internazionale su "Il consolidamento del suolo e delle rocce nelle realizzazioni in sotterraneo" - Milano 18-20 Marzo 1991  
 [16] ARSENA F.P., FOCARACCI A., LUNARDI P., VOLPE A., "La prima applicazione in Italia del pretaglio meccanico", Convegno Internazionale su "Il consolidamento del suolo e delle rocce nelle realizzazioni in sotterraneo" - Milano 18-20 Marzo 1991  
 [17] 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  
 [18] LUNARDI P., "Il consolidamento del terreno mediante jet-grouting", Quarry and Construction, marzo 1992  
 [19] LUNARDI P., FOCARACCI A., GIORDI 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

[20] LUNARDI P., BINDI R., FOCARACCIA., "Technical and financial planning of underground works: the ADECO-RS method", VI Forum Europeo di Ingegneria Economica - Università Bocconi - Milano, 13-14 Maggio 1993  
 [21] 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  
 [22] LUNARDI P., Evolution des technologies d'excavation en souterrain dans des terrains meubles", Comité Marocain des Grands Barrages - Rabat, 30 Settembre 1993  
 [23] LUNARDI P., "Glass-resin 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  
 [24] LUNARDI P., "La stabilite du front de taille dans les ouvrages souterrains en terrain meuble: etudes et experiences sur le renforcement du noyau d'avancement", Symposium international "Renforcement des sols: experimentations en vraie grandeur des annes 80", Parigi, 18 novembre 1993  
 [25] AUTOSTRADE S.p.A., "Norme Tecniche d'Appalto", 1992  
 [26] ITALFERR SIS T.A.V. S.p.A., "Capitolato di Costruzione Opere Civili", 1992  
 [27] A.N.A.S., "Capitolato Speciale d'Appalto, Parte II: Norme Tecniche", 1993