

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

Parte seconda:

RUOLO E RISULTATI DELLA RICERCA SPERIMENTALE

Pietro Lunardi, Milano

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

Pietro Lunardi, Milano

Parte seconda:

RUOLO E RISULTATI DELLA RICERCA Sperimentale

Premessa

Nella prima parte dell'articolo "Presostegno e preconfinamento", pubblicata sul numero di marzo 1994 di Quarry and Construction, è stata fatta una serie di affermazioni e considerazioni che si possono riassumere sinteticamente nei seguenti punti:

1) la tenuta e la durabilità di una cavità nel sottosuolo dipende dalla formazione dell'"effetto arco", ovvero dalla canalizzazione del flusso delle tensioni al contorno del cavo;

2) di conseguenza, il primo e più importante obiettivo del progettista di gallerie deve essere studiare se e come l'effetto arco potrà innescarsi all'atto dello scavo di una cavità;

3) la conferma della mobilitazione dell'"effetto arco" è fornita dalla lettura e dall'interpretazione della risposta deformativa del mezzo all'azione dello scavo;

4) la risposta deformativa si genera a monte del fronte, nell'ambito della zona perturbata a seguito delle sovratensioni generate nel mezzo al contorno del cavo e dipende dalla natura del mezzo sottoposto ad un certo stato tensionale (consistenza) e dalle modalità con cui viene realizzato l'avanzamento del fronte (azione);

5) la risposta deformativa si manifesta: prima al fronte d'avanzamento, con fenomeni di estrusione e di preconvergenza, poi al contorno del cavo, con fenomeni di convergenza dello stesso, in gran parte condizionati dai primi. Estrusione, preconvergenza e convergenza dipendono direttamente o indirettamente dalla rigidezza del nucleo al fronte o nucleo d'avanzamento e così quindi anche tutte le conseguenti manifestazioni d'instabilità;

6) allora, la stabilità di una galleria non può prescindere da quella del suo nucleo al fronte, il cui comportamento tensodeformativo deve quindi costituire oggetto di studio prioritario da parte del progettista di gallerie;

7) in questa ottica, il problema di stabilità di una galleria è intrinsecamente tridimensionale e come tale va trattato anche nei riguardi della scelta degli strumenti di calcolo;

8) il nucleo d'avanzamento può essere visto come strumento principale di stabilizzazione a breve ed a lungo termine della

Deuxième partie:

ROLE ET RESULTATS DE LA RECHERCHE EXPERIMENTALE

Introduction

Dans la première partie de l'article "Présoutènement et préconfinement", publié sur le numéro de mars 1994 de Quarry and Construction, nous procémons à une série d'affirmations et de considérations qui peuvent se résumer comme suit :

1) la tenue et la durée d'une excavation dans le sous-sol dépendent de la formation de l'"effet de voûte" autrement dit de la canalisation du flux des contraintes sur le contour de la cavité

2) par voie de conséquence, l'objectif premier et le plus important du projeteur de tunnels doit consister à étudier si l'effet de voûte pourra s'amorcer au moment de l'excavation d'une cavité et comment

3) la confirmation de la mobilisation de l'effet de voûte est fournie par la lecture et par l'interprétation de la réponse en déformation du milieu à l'action d'excavation

4) la réponse en déformation se produit en amont du front de taille, dans le cadre de la zone perturbée à la suite de surcontraintes provoquées dans le milieu sur le contour de l'excavation. Elle dépend de la nature du milieu soumis à un certain état de contrainte (consistance) et des modalités suivies dans la réalisation de l'avancement du front (action)

5) la réponse en déformation se manifeste tout d'abord au front de taille, par des phénomènes d'extrusion et de préconvergence, puis sur le contour de la cavité par des phénomènes de convergence du front conditionnés dans une large mesure par les premiers. Extrusion, préconvergence et convergence dépendent directement ou indirectement de la rigidité du noyau au front ou noyau d'avancement et donc toutes les manifestations d'instabilité qui s'ensuivent aussi

6) dès lors, la stabilité d'un tunnel ne peut pas ne pas dépendre de celle de son noyau au front de taille, dont le comportement de contrainte et de déformation devra faire l'objet d'une étude prioritaire de la part du projeteur de tunnels

7) dans cette optique, le problème de la stabilité d'un tunnel est intrinsèquement tridimensionnel et sera traité en tant que tel même en ce qui concerne le choix des instruments de calcul

8) le noyer d'avancement peut être vu comme l'instrument principal de la stabilisation à court et à long terme du tunnel. A court terme car il est à même de conditionner la réponse en déformation. A long terme car

galleria. A breve termine, in quanto è in grado di condizionare la risposta deformativa, a lungo termine, in quanto è in grado di uniformare e ridurre al minimo i carichi che si mobilitano, a seguito dell'avanzamento, sul rivestimento finale ed in base ai quali quest'ultimo viene dimensionato e verificato. Detto nucleo può quindi essere preso come riferimento per un nuovo tipo di normalizzazione delle opere in sotterraneo basato non più su classi geomecaniche, bensì su categorie di comportamento tenso-deformativo;

9) il riconoscimento di ciò ha permesso, da un lato la messa a punto del nuovo concetto di pre contenimento del cavo e di innovativi strumenti di stabilizzazione ("interventi conservativi"), dall'altro lato di cominciare a pensare ad un nuovo approccio progettuale e costruttivo, basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli, valido per qualsiasi tipo di terreno e qualsiasi condizione tenso-deformativa (A.DE.CO. - RS);

10) è diventato finalmente possibile progettare e costruire gallerie in qualsiasi contesto geomecanico e in qualsiasi condizione tenso-deformativa rispettando i tempi ed i costi di preventivo.

A queste importanti conclusioni si è giunti dopo oltre 25 anni di ricerche condotte secondo un programma di studi ed osservazioni che si è progressivamente sviluppato in tre fasi principali e che è stato applicato sistematicamente durante la costruzione di oltre 250 Km di gallerie, in presenza dei più svariati tipi di terreno, soggetti a diversi stati tensionali (vedi parte 1^a, Tabb. A e B).

Appare indispensabile, a questo punto, prima di addentrarci ad esporre i concetti base del nuovo approccio alla progettazione e costruzione di gallerie basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli, illustrare la ricerca e le osservazioni che ci hanno portato a formulare le affermazioni sopra richiamate, non senza aver prima sottolineato che quanto riportato negli esempi che seguiranno ha avuto una significativa ripetitività in numerose altre realizzazioni in sotterraneo, che per motivi di spazio non possono essere illustrate in questa sede.

La ricerca sulla risposta deformativa del mezzo

Partendo dalla considerazione che:

1) la stabilità di una cavità a breve e a lungo termine è strettamente legata alla "formazione dell'effetto arco", che deve essere l'oggetto primario di studio per il progettista di gallerie;

2) la formazione dell'effetto arco e la sua posizione rispetto alla cavità sono segnalate dalla "risposta deformativa" del mezzo all'azione dello scavo in termini di entità e tipologia;

si evidenziò la necessità di condurre studi approfonditi sui rapporti tra modifica dello stato tensionale nel mezzo indotta dall'avanzamento di una galleria e conseguente risposta deformativa di questo.

In particolare, si ritenne indispensabile focalizzare l'attenzione su genesi, evoluzione, controllo e stabilizzazione della risposta deformativa.

A questo scopo (fig. 1):

il est à même d'uniformiser et de réduire au maximum les charges qui se mobilisent, à la suite de l'avancement, sur le revêtement final et sur la base desquelles ce dernier est dimensionné et vérifié. Le noyau peut donc être adopté comme un point de référence pour un nouveau type de standardisation des ouvrages souterrains, basé non plus sur des classes géomécaniques mais sur des catégories de comportement de contrainte et de déformation

9) cette découverte nous a permis d'une part de mettre au point le nouveau concept de préconfinement de la cavité et des instruments innovants de stabilisation ("interventions de conservation") et, de l'autre, de commencer à penser à une nouvelle approche de conception et de construction, basée sur l'analyse des déformations contrôlées dans les roches et dans les sols, valable pour n'importe quel type de terrain et dans n'importe quelle condition de contrainte et de déformation (A.DE.CO. - RS);

10) il est devenu enfin possible de concevoir et de construire des tunnels quel que soit le contexte géomécanique et quelle que soit la situation de contrainte et de déformation, tout en respectant les délais et les coûts prévus par le devis.

Nous sommes parvenus à ces importantes conclusions au bout de 25 années de recherches menées selon un programme d'études et d'observations qui s'est développé progressivement en trois phases principales et qui a été appliquée systématiquement au cours de la construction de plus de 250 km de tunnels, en présence des types les plus divers de terrain, assujettis à différents états de contrainte (voir première partie, Tabb. A et B).

À ce stade, avant d'entrer dans le détail et d'exposer les concepts de base de la nouvelle approche de conception et de construction des tunnels basée sur l'analyse des déformations contrôlées dans les roches et dans les sols, il s'avère indispensable d'illustrer la recherche et les observations qui nous ont mené à formuler les affirmations ci-dessus, non sans avoir souligné auparavant que les exemples qui suivent se sont renouvelés et répétés dans de nombreuses autres réalisations souterraines que nous ne pouvons pas illustrer toutes pour des raisons d'espace.

La recherche sur la réponse en déformation du milieu

En partant de la considération que :

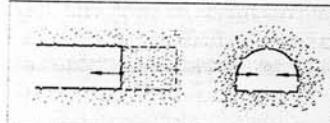
1) la stabilité d'une excavation à court et à long terme est strictement liée à la "formation de l'effet de voûte" qui doit faire l'objet fondamental de l'étude du projeteur de tunnels.

2) la formation de l'effet de voûte et sa position par rapport à la cavité

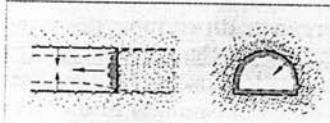
FIG. 1

PHASES DU PROGRAMME DE RECHERCHE SUR LA GENÈSE ET L'ÉVOLUTION DES PHÉNOMÈNES DU SYSTÈME "FRONT DE TAILLE - NOYAU D'AVANCEMENT"

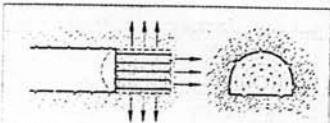
① OBSERVATION SISTÉMATIQUE DU COMPORTEMENT EN DÉFORMATION DU SYSTÈME FRONT DE TAILLE - NOYAU D'AVANCEMENT ET NON SEULEMENT DE LA CAVITÉ



② VÉRIFICATION DE L'EXISTENCE DE LIASONS ENTRE LE COMPORTEMENT EN DÉFORMATION DU SYSTÈME FRONT DE TAILLE - NOYAU D'AVANCEMENT ET DE LA CAVITÉ



③ VÉRIFICATION DE COMME EN RÉGLANT LA RIGIDITÉ DU NOYAU ON PEUT CONTRÔLER LA RÉPONSE EN DÉFORMATION DE LA CAVITÉ



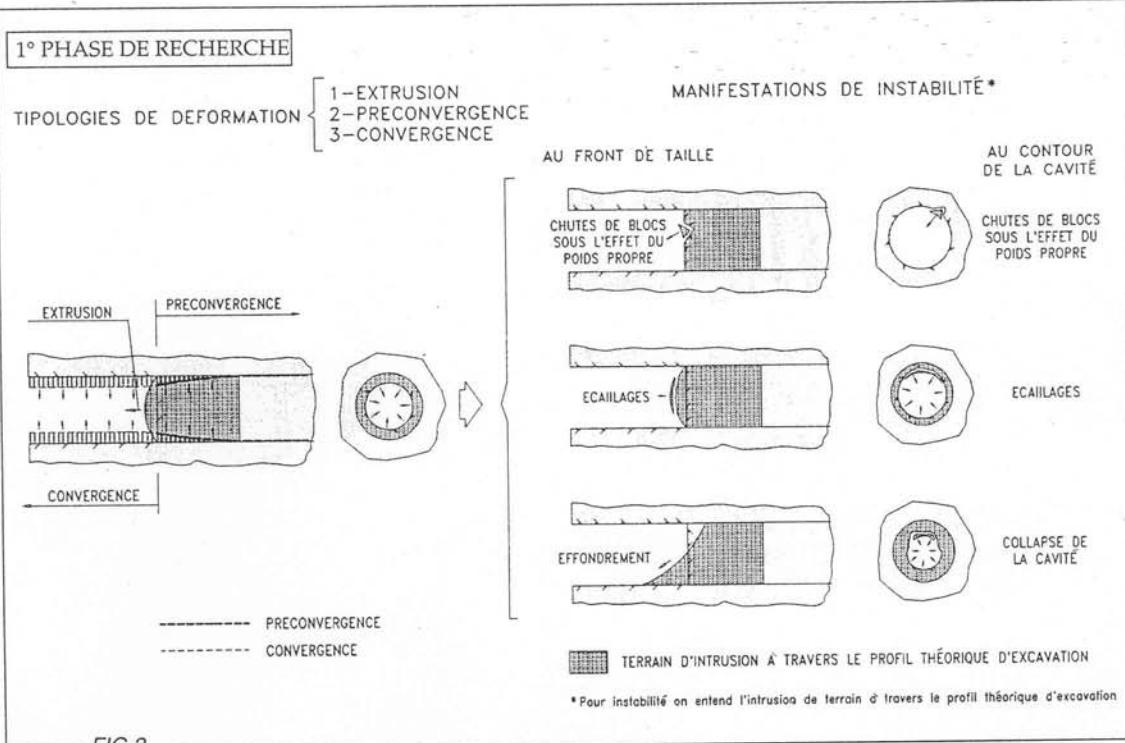


FIG.2

1) si decise di dedicare un primo periodo di tempo, denominato "prima fase di ricerca", all'osservazione sistematica del comportamento deformativo del sistema fronte-nucleo d'avanzamento e non della sola cavità, come suggerito e proposto ancora oggi dal NATM e dai metodi da esso derivati;

2) in un secondo periodo di tempo, denominato "seconda fase di ricerca", sulla base di analisi approfondite - soprattutto in termini cronologici - dei fenomeni d'instabilità osservati nel corso dell'esecuzione di numerose gallerie nei più svariati tipi di terreno e nelle più diverse situazioni teso-deformative, si è cercato di verificare l'esistenza di collegamenti tra il comportamento deformativo del sistema fronte-nucleo d'avanzamento (estruzione e preconvergenza) e quello della cavità (convergenza);

3) una volta appurato che il comportamento deformativo della cavità è sistematicamente condizionato dalla rigidità del nucleo di terreno al fronte, in un terzo periodo di tempo, denominato "terza fase di ricerca", si è lavorato per verificare fino a che punto, agendo sulla rigidità, quindi sulla deformabilità del nucleo, si potesse regolare e controllare la risposta deformativa della cavità.

Prima fase di ricerca

La prima fase di ricerca (osservazione sistematica del comportamento deformativo del sistema fronte-nucleo d'avanzamento) è stata condotta attraverso l'esecuzione di controlli sia strumentali sia visivi sul comportamento deformativo delle pareti di scavo, con particolare riferimento ai fenomeni di (fig. 2):

a) estruzione del fronte, che in funzione del tipo di materiale e dello stato tensionale in gioco può manifestarsi secondo geometrie di deformazione più o meno assialsimmetriche (spasciamento del fronte) o di ribaltamento gravitativo (rotazione del fronte);

b) preconvergenza della cavità, intesa come convergenza del profilo teorico a monte del fronte di avanzamento e strettamente dipendente dalle caratteristiche di deformabilità del nucleo in rapporto allo stato tensionale esistente;

c) convergenza della cavità, che si manifesta con la riduzione della sezione teorica di scavo.

A questo scopo, per quanto riguarda i controlli sperimentali, oltre all'esecuzione sistematica delle già note misure di convergenza

sont signalées par la "réponse en déformation" du milieu à l'action de l'excavation en termes d'importance et de typologie;

le besoin se fit résolument sentir de mener de l'avant des études approfondies sur les rapports entre la modification de l'état de contrainte dans le milieu, provoquée par l'avancement d'un tunnel et la réponse en déformation qui s'ensuit.

Nous estimons qu'il est tout particulièrement indispensable de focaliser l'attention sur la genèse, l'évolution, le contrôle et la stabilisation de la réponse en déformation. A ces fins (fig. 1):

1) nous avons décidé de consacrer une première

période de temps - appelée "première phase de recherche" à l'observation systématique du comportement en déformation du système front-noyau d'avancement et non de la cavité seule, comme l'a proposé et continue de le proposer même aujourd'hui le NATM et les méthodes qui en dérivent

2) dans une seconde période de temps, appelé "deuxième phase de recherche", sur la base des analyses approfondies des phénomènes d'instabilité observés au cours de l'exécution de nombreux tunnels dans les types de terrains les plus divers et dans les situations les plus disparates de contrainte et de déformation, - sur le plan chronologique notamment -, nous avons essayé de vérifier l'existence de liens entre le comportement en déformation du système front-noyau d'avancement (extrusion et préconvergenza) et celui de la cavité (convergenza)

3) une fois constaté que le comportement en déformation de la cavité est systématiquement conditionné par la rigidité du noyau de terrain au front de taille, dans une troisième période de temps, appelée "troisième phase de recherche", nous avons travaillé pour vérifier jusqu'à quel point, en agissant sur la rigidité et donc sur la deformabilità du noyau, il était possible de régler et de contrôler la réponse en déformation de la cavité.

Première phase de recherche

La première phase de recherche (observation systématique du comportement en déformation du système front-noyau d'avancement) a été menée en faisant des contrôles par instruments aussi bien que visuels sur le comportement en déformation des parois d'excavation, en ce qui concerne notamment les phénomènes de (fig. 2) :

a) extrusion du front de taille qui, en fonction du type de matériel et de l'état de contrainte en jeu peut se manifester selon des géométries de déformation plus ou moins axial-symétriques (gonflement du front) ou de renversement gravitationnel (rotation du front)

b) préconvergenza de la cavité entendue dans le sens de convergence du profil théorique en amont du front de taille, dépendant strictement des caractéristiques de déformabilità du noyau en rapport avec l'état de contrainte présente

c) convergenza de la cavité qui se manifeste avec la réduction de la section théorique d'excavation

A ces fins, en ce qui concerne les contrôles expérimentaux, en plus de l'exécution systématique des mesures de convergence de la cavité superficielles et profondes déjà connues, nous avons étudié, mis au point

del cavo superficiali e profonde, si sono studiati, messi a punto ed eseguiti nuovi tipi di controlli, che permettessero di studiare a fondo, in una sezione data, il comportamento deformativo del mezzo prima, durante e dopo l'arrivo del fronte d'avanzamento, con particolare riguardo alla zona del fronte stesso.

Ci riferiamo alle misure di preconvergenza eseguite dalla superficie attraverso la messa in opera, ogniqualvolta la morfologia del terreno e l'entità della copertura in gioco lo consentivano, di strumenti multibase per la misura delle deformazioni (estensimetri o sliding micrometers), inseriti verticalmente nel terreno in corrispondenza alla chiave ed alle reni della galleria da realizzare.

Nella maggior parte dei casi le misure di preconvergenza venivano accompagnate da misure di estrusione del nucleo d'avanzamento, realizzate mediante l'introduzione in orizzontale, nello stesso, di uno sliding micrometer ed integrate da battute topografiche di mire di riferimento posizionate sul fronte.

In relazione alle suddette tipologie di deformazione, le osservazioni visive condotte sistematicamente dall'interno del cavo hanno permesso, come già anticipato nella prima parte della trattazione, di associar loro le manifestazioni d'instabilità localizzate o sul fronte o sul contorno del cavo.

Seconda fase di ricerca

Una volta individuate le tipologie di deformazione e le manifestazioni d'instabilità che si possono verificare sul nucleo al fronte e sul contorno del cavo di una galleria, ci si è chiesti se, attraverso l'osservazione delle prime, fosse possibile in qualche modo essere orientati sul tipo e l'entità che avrebbero assunto le seconde. Si è quindi iniziata la seconda fase di ricerca [verifica dell'esistenza di eventuali collegamenti tra il comportamento deformativo del sistema fronte-nucleo d'avanzamento (\rightarrow estrusione e preconvergenza) e quello della cavità (\rightarrow convergenza)] che è stata condotta attraverso lo studio, l'osservazione ed il

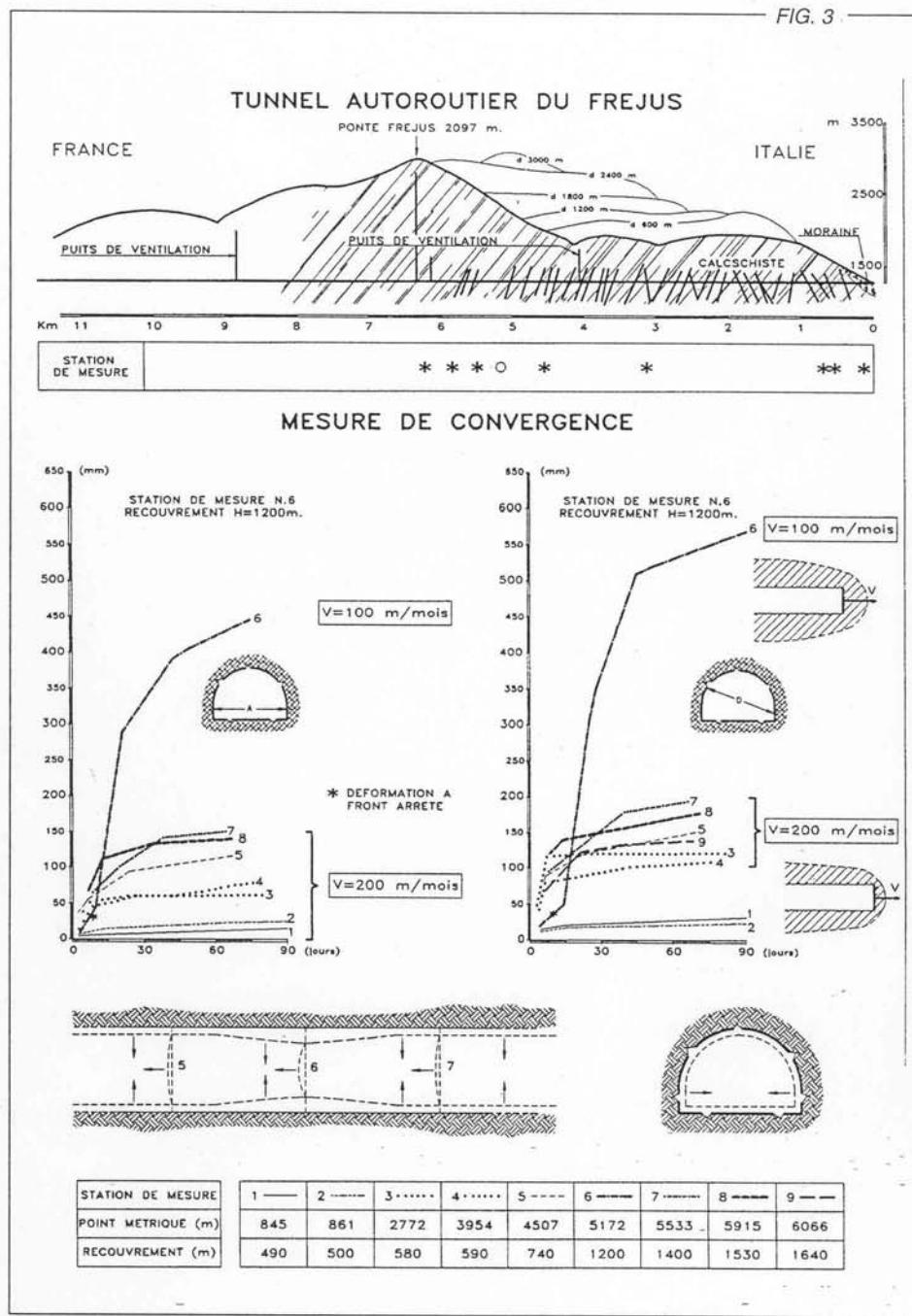
et effectué de nouveaux types de contrôles qui devaient nous permettre d'étudier à fond, dans une section donnée, le comportement en déformation du milieu avant, pendant et après l'arrivée du front de taille et tout particulièrement la zone du front même.

Nous nous référons aux mesures de préconvergence effectuées à partir de la surface à travers la mise en oeuvre - toutes les fois que la morphologie du terrain et l'importance de la couverture en jeu le permettaient - d'instruments multibase pour la mesure des déformations (tassomètres ou sliding micrometers), introduits verticalement dans le terrain à la hauteur de la clef et des reins du tunnel à réaliser.

Dans la plupart des cas, les mesures de préconvergence s'accompagnaient de mesures d'extrusion du noyau d'avancement, réalisées par l'introduction horizontale dans le noyau même d'un sliding micrometer et complétées de ratissages topographiques de cibles de référence positionnées sur le front.

En ce qui concerne ces typologies de déformation, les observations visuelle effectuées systématiquement à l'intérieur de la cavité nous ont permis, comme nous l'avons déjà dit dans la première partie de cette étude, de leur associer les manifestations d'instabilité localisées soit sur le front soit sur le contour de la cavité.

FIG. 3



Deuxième phase de recherche

Après avoir défini les typologies de déformation et les manifestations d'instabilité qui peuvent se produire sur le noyau au front de taille et sur le contour de la cavité d'un tunnel, nous nous sommes posé la question de savoir si à travers l'observation des premières il était possible d'être en quelque sorte orientés sur le type et sur l'importance qu'auraient eu les secondes. Nous avons ainsi commencé la deuxième phase de recherche [vérification de l'existence de liens éventuels entre le comportement en déformation du système front-noyau d'avancement (< extrusion et préconvergence) et celui de la cavité (< convergencia)] qui a été menée à travers l'étude, l'observation et le contrôle des événements en déformation du front et

controllo degli eventi deformativi del fronte e del cavo, con particolare riguardo alla loro entità e successione cronologica in funzione dei sistemi, delle fasi e delle cadenze di scavo che venivano di volta in volta adottati.

Prima di esporre i risultati conseguiti in questa fase sperimentale, è indispensabile illustrare brevemente, con qualche esempio significativo, le osservazioni compiute.

L'esempio del Traforo autostradale del Frejus (1975)

Il Traforo autostradale del Frejus ha attraversato per il 95% del suo sviluppo (di 13 Km di lunghezza, con coperture fino a 1700 m) una formazione metamorfica di calcescisti litologicamente omogenea lungo il tracciato.

Il progetto della galleria è stato confortato da una campagna geologica e geomecanica condotta dalla galleria ferroviaria adiacente (realizzata nel 1860) e da gallerie di servizio. Le prove di resistenza e deformabilità eseguite su campioni di calcescisto indicavano i seguenti parametri geotecnici medi: angolo d'attrito: 35°; coesione: 3 MPa; modulo elastico: 10000 MPa.

Nell'ambito del progetto originario (1975) non erano state formulate previsioni sul comportamento deformativo della galleria, perché questo non rientrava nella prassi abituale dell'epoca.

Tenuto conto di quanto era noto dell'esperienza fatta da Sommeiller durante la realizzazione del tunnel ferroviario adiacente, avvenuta circa un secolo prima, fu scelto di avanzare a piena sezione con immediata stabilizzazione dell'anello di roccia al contorno del cavo, per uno spessore di circa 4,5 m, mediante bulloni attivi ad ancoraggio puntuale, integrati da spritzbeton. Il rivestimento definitivo di calcestruzzo, mediamente di 70 cm di spessore, veniva gettato a seguire e completava l'opera.

Lo studio dei fenomeni deformativi ha costituito la parte più significativa della campagna di osservazioni e misure eseguite in corso d'opera per tenere sotto controllo la risposta dell'ammasso roccioso agli interventi di stabilizzazione operati, in considerazione del-

de la cavità, en tenant tout particulièrement compte de leur importance et de leur succession chronologique en fonction des systèmes, des phases et des cadences d'excavation adoptés au fur et à mesure.

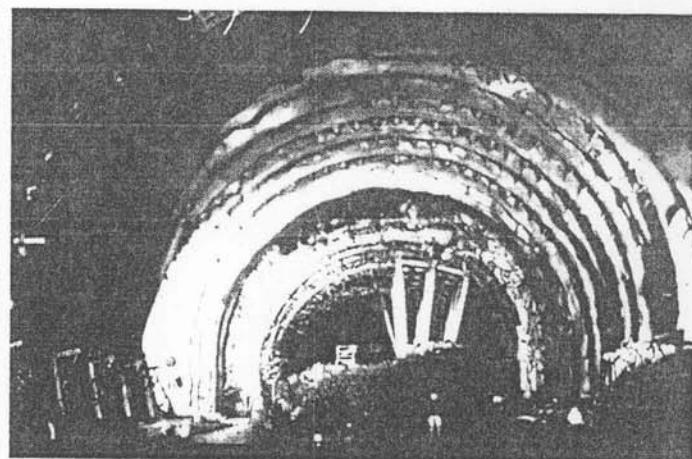
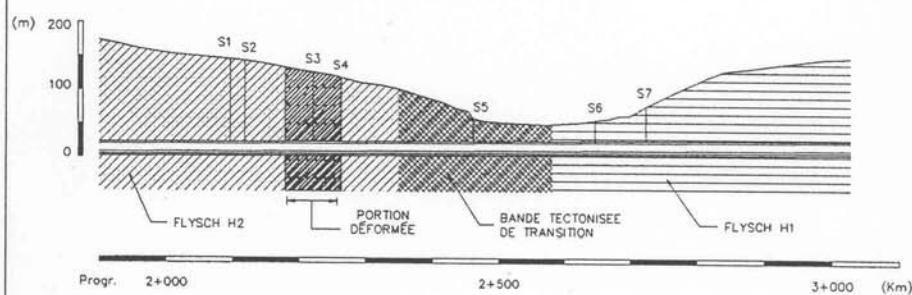


Photo 1 - Tunnel S. Stefano: collapse de la cavité

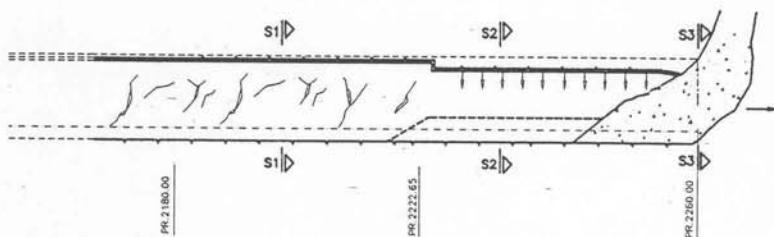
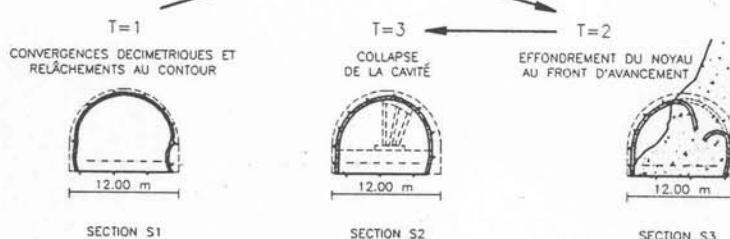
FIG. 4

LIGNE FERROVIAIRE GENOVA-VENTIMIGLIA - TUNNEL S. STEFANO

Portion déformée



T = SUCCESION CHRONOLOGIQUE DES EVENEMENTS



Avant de présenter les résultats obtenus dans cette phase expérimentale, il est indispensable d'illustrer rapidement, à l'appui de quelques exemples significatifs, les observations faites.

L'exemple du Tunnel de l'autoroute du Fréjus (1975)

Le Tunnel de l'autoroute du Fréjus traverse sur 95% de son tracé (13 km de longueur, avec des couvertures jusqu'à 1.700 m linéaires) une formation métamorphique de calcschistes lithologiquement homogène le long de son tracé.

A l'appui du projet du tunnel, une campagne géologique et géomécanique menée dans le tunnel ferroviaire adjacent (réalisée en 1860) et dans les tunnels de service. Les tests de résistance et de déformabilité effectués sur des échantillons de calcschistes indiquaient les paramètres géotechniques suivants : angle de friction 35°

fatto eccezionale che ci si trovava per la prima volta ad affrontare una galleria da realizzarsi entro un ammasso omogeneo (calcescisto) con coperture variabili, sottoposta ad un campo di tensioni crescenti e variabili con la copertura (0 - 1700 m).

Fino a circa 500 m di copertura, rimanendo l'ammasso sollecitato in campo elastico, la galleria mostrava un comportamento a fronte stabile, con fenomeni deformativi trascurabili e limitate manifestazioni d'instabilità sul fronte e sul cavo dovute esclusivamente a distacchi di tipo gravitativo.

All'aumentare della copertura, e con essa dello stato tensionale, l'ammasso roccioso entrava in elastoplasticità e la galleria assumeva un comportamento a fronte stabile a breve termine, con fenomeni di convergenza al contorno del cavo di ordine decimetrico (convergenza diametrale 10-20 cm). La fascia di roccia armata collaborava efficacemente alla statica della galleria, limitando la loro entità ed evitando la comparsa delle conseguenti manifestazioni d'instabilità.

L'avanzamento, grazie anche alla buona qualità della roccia, procedeva senza problemi alla velocità di circa 200 m/mese, finché alla progressiva 5173 i lavori non furono temporaneamente arrestati per le ferie estive in una zona d'ammasso omogenea, in corrispondenza ad una copertura di circa 1200 m (fig. 3).

La stazione di misura per le convergenze n. 6, messa subito in opera ad un metro dal fronte (progr. 5172), presentava, dopo i 15 giorni di arresto, una deformazione massima di circa 10 cm. Si trattava indubbiamente di deformazione di solo flusso (a carico costante), essendo il fronte, nel frattempo, rimasto completamente fermo. Ripresi gli scavi, la convergenza diametrale, nella medesima sezione, s'incrementava assai bruscamente su valori mai misurati prima, fino a raggiungere 60 cm dopo 3 mesi mentre più avanti, proseguendo l'avanzamento, essa riassumeva dopo poche decine

cohésion 3 MPa
module élastique 10.000 MPa

Dans le cadre du projet original (1975), aucune prévision n'avait été formulée quant au comportement en déformation du tunnel car à l'époque, cela ne relevait pas des pratiques habituelles.

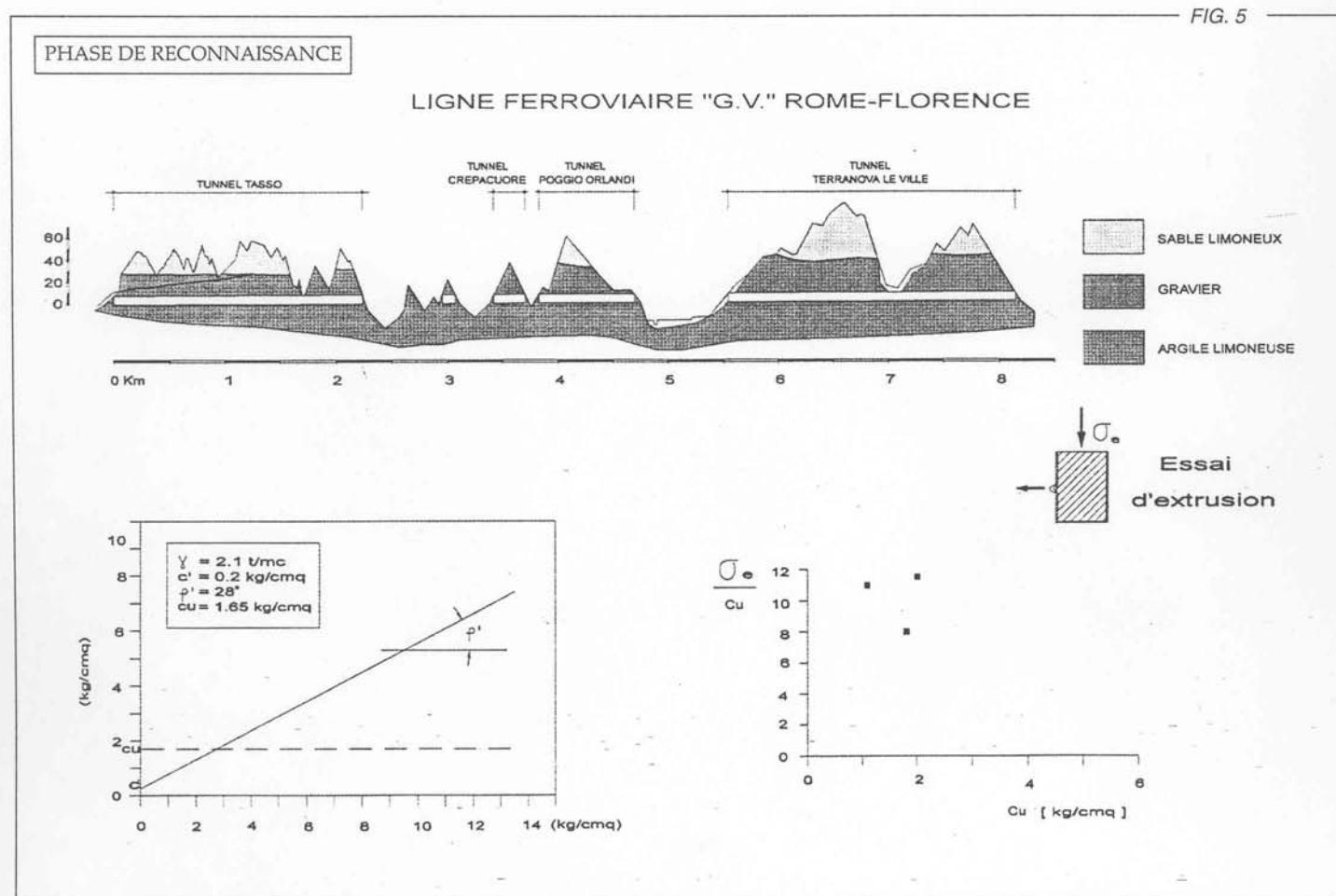
Compte tenu de l'expérience faite par Sommeiller au cours de la réalisation du tunnel ferroviaire adjacent qui avait eu lieu un siècle plus tôt, nous avons choisi d'avancer à pleine section en stabilisant immédiatement l'anneau de roche autour de la cavité, sur une épaisseur de 4,5 m environ, grâce à des boulons actifs à ancrage ponctuel intégrés de spritz-béton. Le revêtement définitif en béton dont l'épaisseur moyenne était de 70 cm, était coulé par la suite, et complétait l'ouvrage.

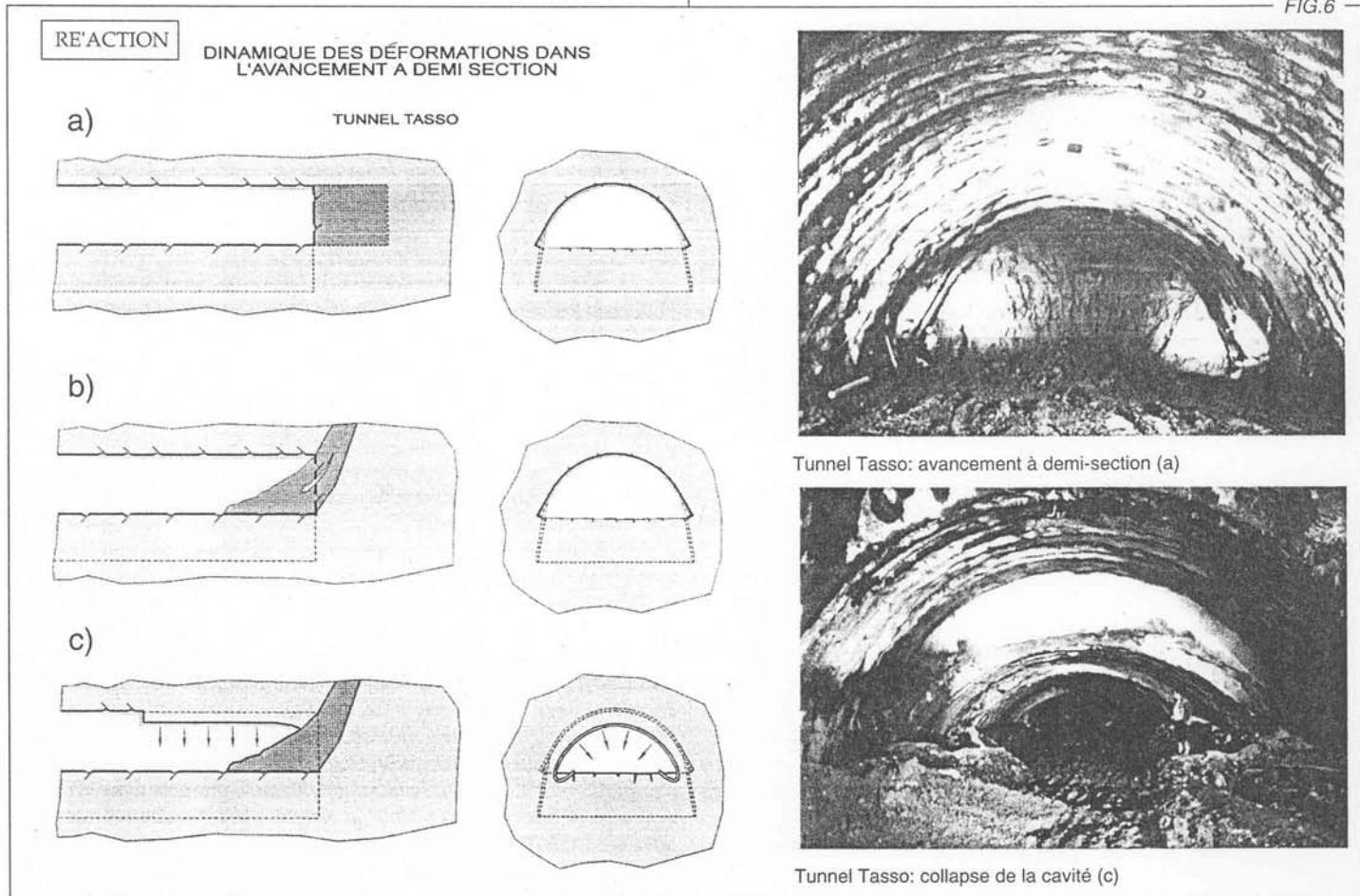
L'étude des phénomènes en déformation a constitué la partie la plus significative de la campagne d'observation et de mesures pratiquée en plein chantier pour tenir sous contrôle la réponse du massif rocheux face aux interventions de stabilisation opérées. Compte tenu notamment du fait exceptionnel que nous nous trouvions pour la première fois à devoir affronter un tunnel qui allait être réalisé dans un massif homogène (cale-schiste) avec des couvertures variables, soumis à un champ de contraintes croissantes et variant selon la couverture (0 - 1.700 m).

Jusqu'à 500 m environ de couverture, cette contrainte s'exerçant dans un champ élastique, le tunnel présentait un comportement à front stable, avec des phénomènes en déformation négligeables et des manifestations d'instabilité limitées sur le front de taille et sur la cavité, dues exclusivement à des arrachements de type gravitationnel.

Avec l'augmentation de la couverture et par voie de conséquence l'augmentation de l'état de contrainte, le massif rocheux passait en élastoplasticité et le tunnel adoptait un comportement à front stable à court terme, avec des phénomènes de convergence sur le contour de la cavité de l'ordre de quelques décimètres (convergence diamétrale 10 - 20 cm). La bande de roche armée collaborait efficacement à la statique du tunnel

FIG. 5





di metri i valori normali (convergenza diametrale circa 20 cm).

Occorre precisare che, prima dell'interruzione dei lavori, la cavità era stata consolidata fino ad un metro dal fronte con più di 30 bulloni a metro lineare, ma nessun intervento era stato realizzato sul nucleo.

Una volta ripreso l'avanzamento, l'intervento di stabilizzazione al contorno del cavo era stato riattivato con la stessa intensità e la medesima cadenza precedenti.

Se ne dedusse che, durante il fermo del cantiere di avanzamento, il nucleo di terreno al fronte, non aiutato da interventi di consolidamento, aveva avuto il tempo di estrudere in elastoplasticità, innescando un fenomeno di detensionamento per fluage dell'ammasso al suo contorno (preconvergenza) che a sua volta era stato la causa del vistoso incremento delle convergenze del cavo rispetto ai valori normali (fig. 3).

L'esempio della galleria S. Stefano (1984)

La galleria S. Stefano fa parte del nuovo tracciato a doppio binario della linea ferroviaria Genova-Ventimiglia, nel tratto compreso tra S. Lorenzo al Mare e Ospedaletti.

L'opera attraversa la formazione di flysch ad Helmintoidi caratteristica della Liguria occidentale. Si tratta di scisti argillosi ed argilloso-arenacei con sottili banchi di arenarie e calcarie marnosi ripiegati ed intensamente fratturati. La componente argillo-scistosa è fortemente laminata. Una zona di transizione assai tettonizzata segna il passaggio tra il termine H2 ed il termine H1 più calcareo-marnoso della formazione (fig. 4).

Le prove di resistenza su campione condotte in laboratorio fornivano valori di angolo d'attrito variabili tra 20 e 24 gradi e coesione da 1,5 MPa a 0.

Anche in questo caso, quando sono iniziati i lavori nel 1982, non

limitant leur importance et évitant l'apparition des manifestations d'instabilité en découlant.

L'avancement, grâce notamment à la bonne qualité de la roche, procédait sans problèmes, à la vitesse de 200 m le mois, tant que les travaux ne furent pas arrêtés momentanément (à la progressive 5172) pour les vacances d'été, dans une zone de massif homogène, en présence d'une couverture de 1.200 m environ (fig. 3).

'La station de mesure pour les convergences n. 6, mise immédiatement en chantier à un mètre du front de taille (progr. 5172), présentait, au bout de 15 jours d'arrêt, une déformation maximum de 10 cm environ. Il s'agissait incontestablement d'une déformation de simple fluage (à charge constante), le front étant resté complètement immobile entre temps. A la reprise des excavations, la convergence diamétrale, dans la même section, augmentait assez brusquement jusqu'à atteindre des valeurs jamais mesurées auparavant - 60 cm au bout de trois mois. Puis, poursuivant l'avancement, la convergence retrouvait des valeurs normales après quelques dizaines de mètres (convergence diamétrale de 20 cm environ).

Il convient de préciser qu'avant l'interruption des travaux, la cavité avait été consolidée jusqu'à un mètre du front de taille avec plus de 30 boulons par mètre linéaire mais aucune intervention n'avait eu lieu sur le noyau. Une fois l'avancement repris, l'intervention de stabilisation sur le contour de la cavité s'était poursuivie avec la même intensité et à la même cadence qu'auparavant.

Nous en avons déduit qu'au cours de la fermeture du chantier d'avancement, le noyau de terrain au front de taille, non aidé par des interventions de consolidation, avait eu tout le temps d'extruder en élastoplasticité, amorçant un phénomène de détente par fluage du massif sur son contour (préconvergence) qui a produit à son tour l'augmentation très importante des convergences de la cavité par rapport aux valeurs normales (fig. 3).

erano state fatte previsioni sul comportamento deformativo della galleria.

Il progetto originario prevedeva l'avanzamento a piena sezione, con la messa in opera di centine e spritz-beton quale rivestimento di prima fase e di un anello di calcestruzzo di grosso spessore (fino a 110 cm) quale rivestimento definitivo.

Durante i lavori di scavo si poté constatare che fintanto che si avanzava in condizioni di elasticità, i fenomeni deformativi del fronte e del cavo erano del tutto trascurabili e le manifestazioni d'instabilità localizzate pressoché assenti (comportamento a fronte stabile). Addentrando con gli scavi di avanzamento in una zona interessata da stati tensionali residui di origine tettonica e trovandosi l'ammasso in condizioni di elastoplasticità, le manifestazioni deformative cominciavano a causare qualche difficoltà, anche in relazione alla comparsa di importanti spinte dissimmetriche dovute alla presenza, nel terreno, di masse rigide disperse nella matrice plastica. Contemporaneamente, al fronte d'avanzamento si osservavano splacchaggi di materiale, segnale certo della presenza di un movimento estrusivo tipico di una situazione di fronte stabile a breve termine, mentre le convergenze assumevano valori decimetrici.

Ad un certo momento, essendosi la situazione tensionale dell'ammasso evidentemente evoluta fino al campo della rottura, si verificava il crollo dell'intero fronte d'avanzamento (situazione di fronte instabile), cui seguiva, nel giro di qualche ora, il collasso della cavità, con convergenze diametrali di oltre 2 m, anche nella parte già stabilizzata con centine e spritz-beton, per una tratta significativa di oltre 30 m a valle del fronte stesso (fig. 4 e foto 1).

Si fa osservare, a questo punto, che il tipo di terreno attraversato nelle tre situazioni tenso-deformative evidenziate era essenzialmente il medesimo e che l'unico fenomeno di collasso della cavità, con convergenze di ordine metrico anche se in una parte di galleria già stabilizzata, si è verificato solo quando è venuto a mancare il contributo di rigidità del nucleo al fronte d'avanzamento.

L'esempio della galleria Tasso (1988)

La galleria Tasso fa parte di una serie di gallerie scavate verso la metà degli anni '80 per la realizzazione della nuova linea "Direttissima" Roma-Firenze (fig. 5). L'area in cui è ubicata l'opera appartiene al bacino lacustre del Valdarno Superiore, ed è costituita da sabbie limose e limi sabbiosi intercalati da livelli argillo-limosi contenenti lenti e livelli sabbiosi saturi d'acqua.

Il progetto originario prevedeva di avanzare a mezza sezione, stabilizzando le pareti dello scavo con centine e spritz-beton. Le centine venivano vincolate al piede con tiranti sub-orizzontali e fondate su micropali o su colonne di terreno consolidato mediante jet-grouting.

Inizialmente lo scavo, in condizioni di fronte stabile a breve termine, non diede luogo ad apprezzabili fenomeni deformativi, né del fronte né del cavo.

All'aumentare delle coperture e quindi dello stato tensionale del mezzo, anche a causa delle scarse caratteristiche geomecaniche del materiale attraversato, si passò in brevissimo tempo da una situazione di fronte stabile a breve termine ad una di fronte instabile. In seguito al crollo del fronte, nonostante si avanzasse a mezza sezione, nel corso di una sola notte si produceva il collasso della cavità con convergenze diametrali dell'ordine di 3-4 m e con il coinvolgimento di circa 30-40 m di galleria già scavata e protetta da centine e spritz-beton (fig. 6).

2.2.4 Risultati della seconda fase di ricerca

Lo studio e l'analisi dei casi illustrati e di altri analoghi permise di osservare che:

quando si avanza in condizioni di elastoplasticità d'ammasso è molto importante non lasciare al nucleo il tempo di deformarsi. A

L'exemple du tunnel de S. Stefano (1984)

Le tunnel de S. Stefano fait partie du nouveau tracé à double voie de la ligne de chemin de fer Gênes-Vintimille, dans le tronçon compris entre S. Lorenzo al Mare et Ospedaletti.

L'ouvrage traverse la formation de flysch à helminitoïdes caractéristique de la Ligurie occidentale. Il s'agit de schistes argileux et argileux-arénacés avec de minces bancs de grès et de calcaires marneux repliés et intensément fracturés. La composante argilo-schisteuse est fortement laminée. Une zone de transition assez tectonisée marque le passage entre la partie H2 et la partie H1 la plus calcaire-marneuse de la formation (fig. 4).

Les tests de résistance effectués en laboratoire sur des échantillons prélevés révélaient des valeurs d'angle de friction variant entre 20 et 24 degrés avec une cohésion de 1,5 MPa à 0.

Dans ce cas aussi, lorsque nous avons commencé les travaux, en 1982, aucune prévision n'avait été faite sur le comportement en déformation du tunnel.

Le projet initial prévoyait l'avancement à pleine section, avec la mise en chantier de cintres et de spritz-béton en tant que revêtement de première phase et d'un anneau de béton de grande épaisseur (jusqu'à 110 cm) en tant que revêtement définitif.

Au cours des travaux d'excavation, il a été possible de constater que tant que nous avancions dans des conditions d'élasticité, les phénomènes en déformation du front et de la cavité étaient tout à fait négligeables. Les manifestations d'instabilité localisées étaient pratiquement absentes (comportement à front stable). Au fur et à mesure que les excavations avançaient et que nous pénétrions dans une zone intéressée par des états de contrainte résiduels d'origine tectonique, le massif se trouvant dans des conditions d'elastoplasticité, les manifestations en déformation commençaient à entraîner quelques difficultés compte tenu notamment d'importantes poussées dissymétriques dues à la présence dans le terrain de masses rigides dispersées dans la matrice plastique. En même temps, nous observions sur le front de taille, des détachements de plaques de matériel, signal sûr et certain de la présence d'un mouvement extrusif typique d'une situation de front stable à court terme et avec des convergences dont les valeurs étaient de l'ordre de quelques décimètres.

A un moment donné, la situation de contrainte du massif ayant manifestement évolué jusqu'au champ de rupture, c'était l'effondrement du front de taille tout entier (situation de front instable) suivi, dans l'espace de quelques heures, du collasso de la cavité, avec des convergences diamétrales de plus de 2 mètres, même dans la partie déjà stabilisée par des cintres et du spritz-béton, sur une longueur très significative (plus de 30 m en aval du front de taille (fig. 4 et photo 1).

Il convient, à ce stade, de noter que le type de terrain traversé dans les trois situations de contrainte et de déformation montrées était fondamentalement le même et que le seul phénomène de collasso de la cavité, avec des convergences de l'ordre de quelques mètres, bien que dans une partie de tunnel déjà stabilisé, ne s'est produit en fait que lorsque la contribution de rigidité du noyau au front de taille a fait défaut.

L'exemple du tunnel du Tasso (1988)

Le tunnel du Tasso fait partie d'une série de tunnels excavés vers la moitié des années '80 pour la réalisation de la nouvelle ligne "G.V." Rome-Florence (fig. 5). La zone où l'ouvrage se situe appartient au bassin lacustre du Valdarno Superiore, constituée de sables limoneux et de limons sablonneux intercalés de strates argilo-limoneux contenant des lentilles et des niveaux sablonneux saturés d'eau.

Initialement, le projet prévoyait d'avancer à demi-section, établissant les parois de l'excavation par des cintres et du spritz-béton. Les cintres étaient fixés au pied par des tirants sub-horizontaux et reposaient sur les micropieux ou sur des colonnes de terrain consolidé par jet-grouting.

Initialement, l'excavation - qui se trouvait dans des conditions de front stable à court terme - ne manifesta pas de phénomènes en déformation appréciables, ni du front, ni de la cavité.

Au fur et à mesure que les couvertures et donc l'état de contrainte du milieu augmentaient, à cause notamment des caractéristiques géomécaniques insuffisantes du matériel traversé, on passe en très peu de

questo riguardo, appare assai significativo l'esempio del Frejus sopra riportato, dove, in un ammasso litologicamente omogeneo, l'arresto dell'avanzamento del fronte in un mezzo sollecitato in campo elastoplastico comportò, alla ripresa dei lavori, un vistoso incremento dei fenomeni di estrusione, di preconvergenza e, infine, di convergenza del cavo. Una volta ripreso l'avanzamento, questi fenomeni si ristabilirono rapidamente entro i valori precedentemente misurati. Ciò significa che, mantenendo sostenuta e costante la cadenza di scavo, è possibile evitare l'innesto dei fenomeni di estrusione e preconvergenza, che costituiscono l'anticamera dei successivi fenomeni di convergenza del cavo;

il crollo del nucleo ed il collasso della cavità non si verificano mai senza che l'uno sia seguito dall'altro ed, in particolare, senza che il secondo non sia preceduto dal primo. Questa situazione, osservata più volte durante la realizzazione di numerose gallerie, oltre a quelle citate nei casi dianzi illustrati, evidenzia, al di là di qualsiasi ragionevole dubbio (fig. 7):

1) l'esistenza di un legame stretto tra il fenomeno di estrusione del nucleo al fronte d'avanzamento ed i fenomeni di preconvergenza e convergenza;

2) l'esistenza di stretti legami tra il crollo del nucleo d'avanzamento ed il collasso della cavità, anche se già stabilizzata;

3) che i fenomeni deformativi relativi al cavo sono sempre cronologicamente consequenti e dipendenti da quelli che coinvolgono il nucleo al fronte d'avanzamento.

Quanto osservato nella seconda fase di ricerca evidenzia altresì la necessità di far sì che l'effetto arco, la cui formazione come sappiamo condiziona la stabilità della galleria, s'innesti già a monte del fronte d'avanzamento per continuare ad essere operativo in una determinata sezione anche dopo l'allontanamento del fronte stesso dalla medesima.

Terza fase di ricerca

I risultati della seconda fase di ricerca rafforzavano l'impressione che la rigidità del nucleo d'avanzamento di una galleria giocasse un ruolo determinante sulla stabilità della stessa a breve ed a lungo termine.

Visto che il comportamento del cavo rispondeva conseguentemente alla rigidità del nucleo, appariva logico ipotizzare la possibilità di utilizzare il nucleo come strumento di stabilizzazione per la galleria in avanzamento, una volta che fosse confermata la possibilità di influire sulla sua rigidità con interventi appropriati.

Si è allora lavorato sulla rigidità del nucleo per verificare sino a che punto ciò ci avrebbe permesso di controllare la risposta deformativa della cavità.

Per fare questo si sono dovute studiare e mettere a punto tecnologie nuove, che permettessero di agire sul nucleo per variarne la resistenza al taglio e le caratteristiche di deformabilità (nascita dei sistemi conservativi diretti, indiretti e misti) (vedi parte 1^a, fig. 15).

Le nuove idee si sono sperimentate durante la realizzazione di

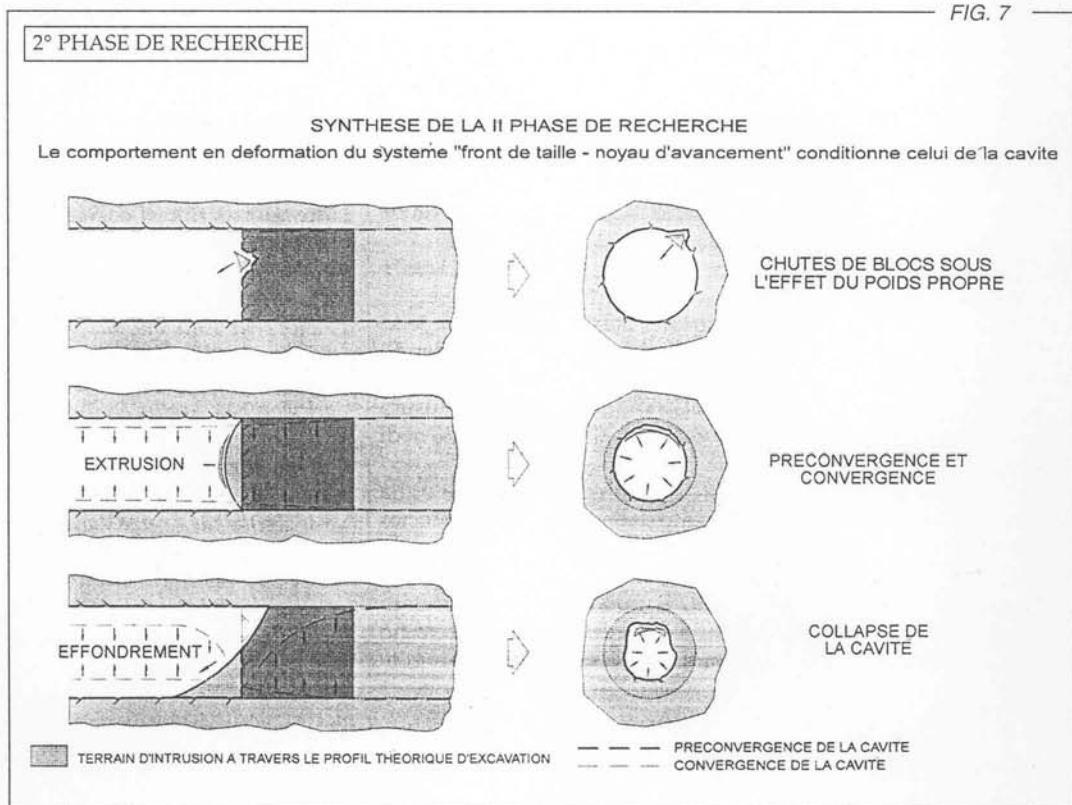
temps d'une situation de front stable à court terme à une situation de front instable. Après l'effondrement du front, malgré un avancement à demi-section, il se produisait, pendant une seule nuit, le collage de la cavité avec des convergences diamétrales de l'ordre de 3 - 4 mètres sur 30 - 40 mètres de tunnel déjà excavé et protégé par des cintres et du spritz-béton (fig. 6.).

Résultats de la deuxième phase de recherche

L'étude et l'analyse des cas illustrés ainsi que d'autres cas analogues nous ont permis de constater que :

- lorsque nous avançons dans des conditions d'élastoplasticité du massif, il est extrêmement important de ne pas laisser au noyau le temps de se déformer. A cet égard, l'exemple du Fréjus dont nous avons parlé est très significatif puisque dans un massif lithologiquement homogène, l'arrêt de l'avancement du front dans un milieu contraint en champ élastoplastique a comporté, avec la reprise des travaux, une augmentation très importante des phénomènes d'extrusion, de préconvergence et enfin de convergence de la cavité. Une fois l'avancement repris, ces phénomènes reprennent rapidement les valeurs qui avaient été mesurées auparavant. Cela signifie que si nous conservons une cadence d'excavation soutenue et

FIG. 7



constante, il est possible d'éviter l'amorce des phénomènes d'extrusion et de préconvergence qui constituent l'antichambre des phénomènes de convergence de la cavité qui s'ensuivent.

- l'effondrement du noyau et le collage de la cavité ne se produisent jamais sans que l'un suive l'autre et en particulier sans que le second ne soit précédé du premier. Cette situation, observée plusieurs fois au cours de la réalisation de nombreux tunnels en plus de ceux cités dans les cas que nous venons d'illustrer, souligne, au-delà de tout doute possible (fig. 7):

1) l'existence d'un lien étroit entre le phénomène d'extrusion du noyau au front de taille et les phénomènes de préconvergence et de convergence

2) l'existence de liens étroits entre l'effondrement du noyau d'avancement et le collage de la cavité, aussi si déjà stabilisé

3) que les phénomènes de déformation relatifs à la cavité sont toujours chronologiquement postérieurs aux phénomènes qui impliquent le noyau d'avancement dont ils dépendent.

Ce que nous avons observé dans la seconde phase de recherche montre

diverse gallerie in condizioni tenso-deformative difficili. Vediamo, in particolare, che cosa si è fatto in un cantiere sperimentale particolarmente significativo.

L'esempio della galleria San Vitale (1991)

La galleria "San Vitale", di 4200 m di lunghezza, con coperture variabili fino a 150 m, fa parte del progetto di raddoppio e potenziamento della linea ferroviaria Caserta-Foggia, tra le stazioni di Apice e Vitulano, alle porte di Benevento.

Il tracciato si sviluppa all'interno di terreni appartenenti a due unità lito-stratigrafiche: l'"Unità di Altavilla" e l'"Unità delle Argille Varicolori" (vedi profilo in fig. 8).

L'"Unità di Altavilla", mediamente tettonizzata, è costituita da alternanze di livelli di sabbie, talvolta anche poco cementate, e livelli di argille, argille marnose e siltose.

La sottostante Unità delle Argille Varicolori è costituita da due diversi litotipi: uno prevalentemente argilloso-marnoso, l'altro a predominanza calcareo-marnosa. Entrambi sono stati oggetto di un'intensa tettonizzazione, che ha conferito loro una struttura scagliosa disordinata e caotica rendendoli estremamente alterabili, dando luogo alla minuta fratturazione dei termini litoidi più competenti. Questi adesso si ritrovano sotto forma di ammassi isolati immersi in una matrice argillosa o argillo-marnosa e non in livelli continui come probabilmente erano in origine. Il terreno si presenta ridotto in minimi frammenti che tendono a conferirgli il comportamento di un ammasso sciolto, con riccioli di materiale lapideo piegato dalle forze tettoniche e disperso nella matrice argillosa, la cui scagliosità, da decimetrica a millimetrica, la rende sensibilissima all'umidità dell'aria.

Breve storia dello scavo

Lo scavo della galleria è iniziato nel marzo 1986. Il progetto originario era impostato secondo i criteri del NATM, prevedendo per tutta la galleria lo scavo in classe Vb a sezioni parzializzate e l'esecuzione di una bullonatura radiale a valle del fronte; la chiusura dell'anello resistente di prima fase veniva realizzata a circa 30 m di distanza dal fronte stesso.

Con questo sistema si è proceduto a fronti contrapposti sino alla fine del 1988, in un tratto caratterizzato dalla presenza della facies marnoso-arenacea dell'unità di Altavilla, con coperture dell'ordine dei 30 - 40 m.

Come si evidenzia nella fig. 9, il metodo d'avanzamento predisposto non prevedeva alcun tipo di contenimento del terreno a monte del fronte. Di conseguenza, appena intestatisi nelle argille varicolori, si producevano vistosi fenomeni di estrusione del nucleo d'avanzamento, accompagnati da rilevanti fenomeni di preconvergenza che si ripercuotevano immediatamente a valle sulla mezza sezione con convergenze radiali importanti, sino a valori di ~1.00 m, che compromettevano completamente lo spessore utile per il rivestimento in calcestruzzo, obbligando a bloccare i lavori di scavo.

In seguito a ciò, nel 1989 veniva predisposto un nuovo progetto, specifico per la tratta in argille scagliose. L'avanzamento era previsto ancora a mezza sezione, con l'impiego di infilaggi metallici, tiranti radiali pretesi in corrispondenza delle reni e tubi di vetroresina sul fronte. L'esecuzione di un arco rovescio provvisorio completava l'intervento di prima fase (fig. 9).

L'introduzione del preconsolidamento del fronte, peraltro secondo procedure e criteri non corretti, non sortiva alcun effetto efficace ed i risultati erano disastrosi sia dal punto di vista della produzione (solo 80 m di avanzamento in 1 anno) che da quello statico. La breve tratta scavata era infatti soggetta a continui sfornellamenti, convergenze elevate, rotture del rivestimento di prima fase, ecc..

Durante tutto il 1991 non fu compiuto alcun avanzamento. Il Consorzio d'imprese COFERI, in accordo con la Comittenza

clairement le besoin de faire en sorte que l'effet de voûte - dont la formation, nous le savons, conditionne la stabilité du tunnel - s'amorce déjà en amont du front de taille pour continuer à être opérationnel dans une section donnée, même après que le front se sera éloigné d'elle.

Troisième phase de recherche

Les résultats de la deuxième phase de recherche renforçaient notre impression que la rigidité du noyau d'avancement d'un tunnel jouait un rôle déterminant dans sa stabilité à court et à long terme.

Vu que le comportement de la cavité répondait corrélativement à la rigidité du noyau, il est apparu logique d'envisager la possibilité d'utiliser le noyau comme instrument de stabilisation pour le tunnel en avancement, après confirmation de la possibilité d'influencer sa rigidité par des interventions appropriées.

Nous avons donc travaillé sur la rigidité du noyau pour vérifier jusqu'à quel point ceci aurait permis de contrôler la réponse en déformation de la cavité.

Pour le faire, il nous a fallu étudier et mettre au point des technologies nouvelles qui nous permettaient d'agir sur le noyau pour varier sa résistance au cisaillement et ses caractéristiques de déformabilité (naissance des systèmes de conservation directs, indirects et mixtes). (voir première partie, fig. 15).

Les nouvelles idées ont été expérimentées au cours de la réalisation de plusieurs tunnels dans des conditions de contrainte et de déformation difficiles. Voyons tout particulièrement ce qui a été fait dans un chantier expérimental particulièrement significatif.

L'exemple du tunnel de San Vitale (1991)

Le tunnel de San Vitale, 4.200 mètres de longueur, avec des couvertures variables jusqu'à 150 m, fait partie du projet de doublement et de renforcement de la ligne de chemins de fer Caserta-Foggia entre les gares d'Apice et de Vitulano, aux portes de Benevento.

Le tracé se développe à l'intérieur de terrains appartenant à deux unités litho-stratigraphiques. L'"Unità di Altavilla" et l'"Unità delle Argille Varicolori" ou Argiles écaillées (voir profil de la fig. 8).

L'Unità di Altavilla, moyennement tectonisées, est constituée d'alternances de niveaux de sable, parfois même peu cimentées, et de niveaux d'argiles, d'argiles marnouses et siltouses.

L'Unità delle Argille Varicolori qui se trouve au-dessous est constituée de deux différents lithotypes. L'un essentiellement argileux-marno, l'autre essentiellement calcaire-marno. Tous deux ont fait l'objet d'une tectonisation intense qui leur a conféré une structure écaillée désordonnée et chaotique et les a rendus extrêmement altérables, donnant lieu à une fragmentation très menue des parties lithoides les plus compétentes. Actuellement, celles-ci ont pris la forme de massifs isolés enfermés dans une matrice argileuse ou argileuse-marno et non en niveaux continus comme c'était le cas initialement. Le terrain se présente réduit en menus fragments qui tendent à lui conférer le comportement d'un massif incohérent, avec des boucles de matériaux pierreux pliés par les forces tectoniques et dispersés dans la matrice argileuse dont les écailles ne sont plus de l'ordre de décimètres mais de millimètres, ce qui la rend très sensible à l'humidité de l'air.

Très rapidement, l'histoire de l'excavation

L'excavation du tunnel a commencé le mois de mars 1986. Le projet initial reposait sur des critères du NATM. Il prévoyait pour tout le tunnel, l'excavation en classe Vb à sections parzializzate et l'exécution d'un boulonnage radial en aval du front de taille. La fermeture de l'anneau résistant de la première phase était réalisée à 30 m environ de distance du front de taille. Grâce à ce système, il a été procédé par fronts opposés jusqu'à la fin de 1988, dans un segment qui se caractérisait par la présence de la facies marno-arenacea de l'Unità di Altavilla, avec des couvertures de l'ordre de 30 - 40 mètres. Comme nous le voyons dans la fig. 9, la méthode d'avancement mise en place ne prévoyait aucun type de confinement du terrain en amont du front de taille. Par conséquent, aussitôt arrivés dans les argiles écaillées, il se produisait des phénomènes d'extrusion très

(Ferrovie dello Stato), decideva allora di affidare la progettazione alla Rocksoil S.p.A. di Milano che, tenuto conto delle indicazioni tratte dal programma di ricerca sino ad allora attuato, accantonava completamente tutti i progetti precedenti, impostando per i restanti 1800 m di galleria un nuovo criterio di avanzamento che fonda i suoi principi sulla regimazione dei fenomeni deformativi attraverso l'irrigidimento del nucleo al fronte, quindi producendo azioni di precontenimento del cavo.

Fase conoscitiva per la galleria San Vitale

Prima di iniziare la nuova progettazione, si è giudicato opportuno procedere per una più approfondita caratterizzazione geotecnica dei materiali interessati dagli scavi. Oltre alle consuete prove di laboratorio, che hanno permesso la ricostruzione delle curve intrinseche del materiale e che hanno evidenziato la grande attitudine di questi terreni ad assorbire rapidamente umidità con una conseguente drastica riduzione di resistenza al taglio (fig. 10), si sono eseguite diverse prove di estrusione:

a velocità di carico costante;

in cella triassiale;

in centrifuga.

Le ultime due, ideate e messe a punto dalla Rocksoil S.p.A. di Milano per essere utilizzate specificatamente durante la fase di diagnosi, consentono di studiare la futura risposta deformativa del sistema fronte-nucleo d'avanzamento, simulando in laboratorio, in maniera verosimile, l'avanzamento dello scavo di una galleria per qualunque stato tensionale.

In particolare, nella prova in cella triassiale il provino di terreno viene inserito nella cella ricostituendo lo stato tensionale originario dell'ammasso. Grazie alla pressione di un fluido, tale stato tensionale viene riprodotto anche all'interno di un particolare volume cilindrico

visibles du noyau d'avancement doublés de phénomènes importants de préconvergence qui se répercutaient immédiatement en aval sur la demi-section avec des convergences radiales importantes, jusqu'à des valeurs de ~1,00 m, qui compromettaient complètement l'épaisseur utile pour le revêtement en béton, obligeant l'arrêt les travaux d'excavation.

A la suite de cela, en 1989, un nouveau projet était élaboré, spécialement pour le segment en argiles écaillées. L'avancement était prévu encore à demi-section, avec l'emploi de tubes métalliques préforés, de tirants radiaux prétendus au niveau des reins et de tubes en résine de verre sur le front de taille.

L'exécution d'un radier provisoire complétait l'intervention de la première phase (fig. 9)

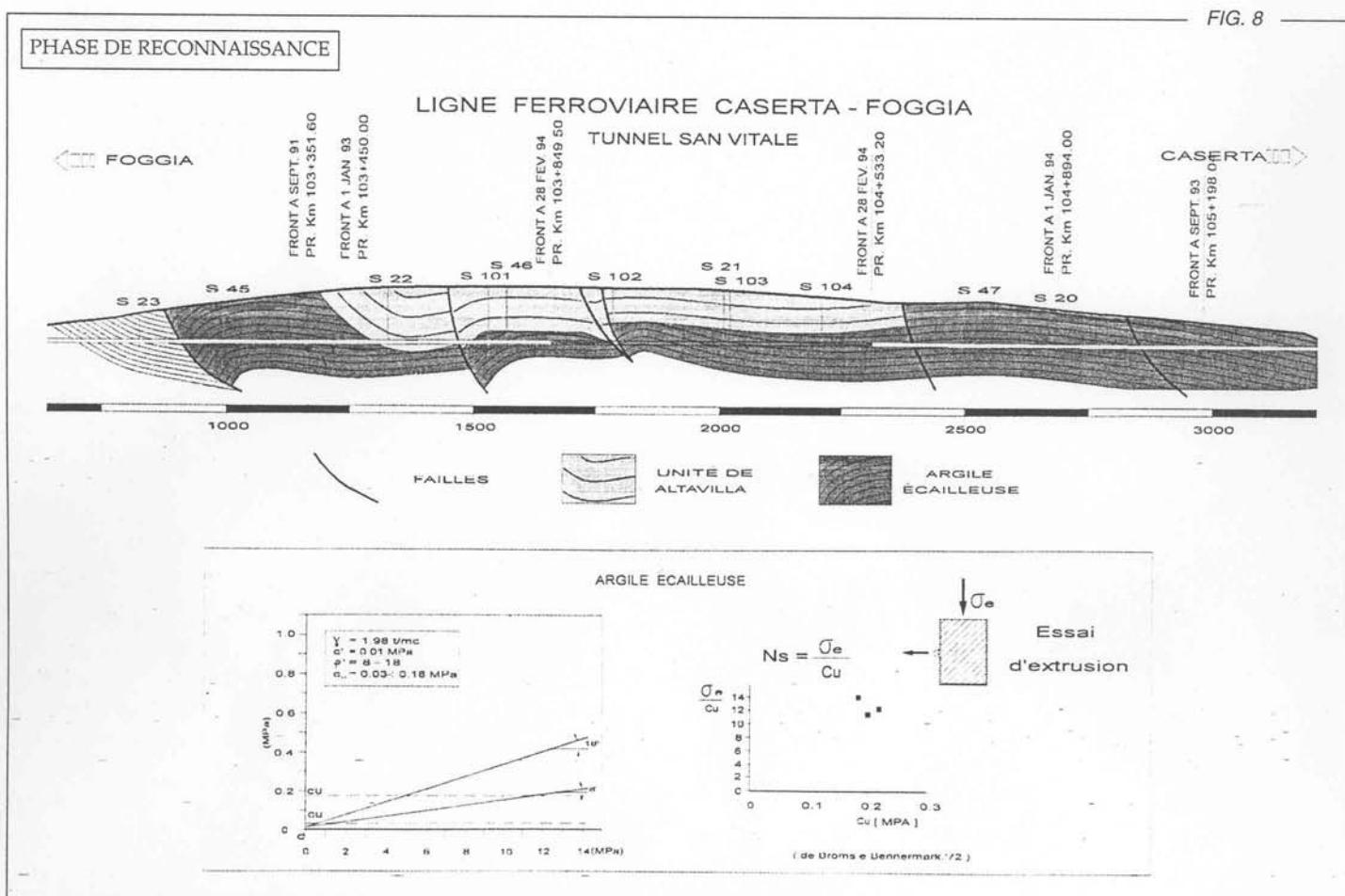
L'introduction du renforcement du noyau, effectuée par ailleurs selon des procédures et des critères non corrects, n'avait aucun effet efficace. Les résultats étaient désastreux tant du point de vue de la production (80 m seulement d'avancement en un an) que du point de vue statique. Le court segment excavé était effectivement assujetti à des chutes de matériel constantes, à des convergences élevées, à des ruptures du revêtement de la première phase, etc.

Au cours de tout 1991, aucun avancement ne fut fait. Le Groupe d'entreprises COFERI, en accord avec le client (les Chemins de Fer italiens) décidait de confier le projet à Rocksoil S.p.A. de Milan qui, compte tenu des indications fournies par le programme de recherche appliquée jusqu'alors, abandonnait totalement tous les projets précédents, adoptant pour les 1.800 m de tunnel restants un nouveau critère d'avancement dont les principes reposent sur le contrôle des phénomènes en déformation à travers le durcissement du noyau au front de taille, produisant donc des actions de préconfinement de la cavité.

Phase de reconnaissance pur le tunnel de San Vitale

Avant de commencer le nouveau projet, nous avons retenu utile de

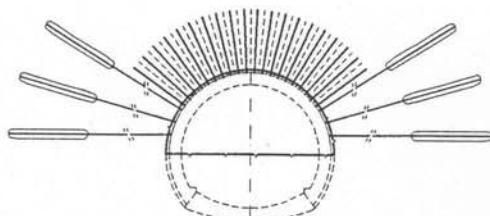
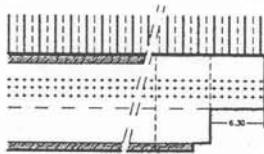
FIG. 8



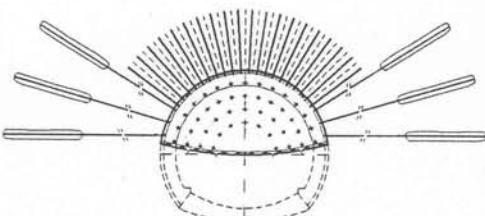
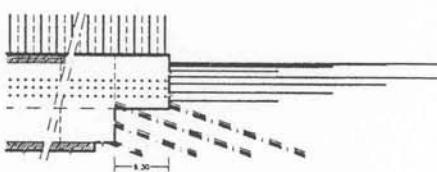
PHASE DE THERAPIE

LIGNE FERROVIAIRE CASERTA-FOGGIA - TUNNEL SAN VITALE

Creusement type 1 (1985)



Creusement type 2 (1990)



Creusement type 3 (1990)

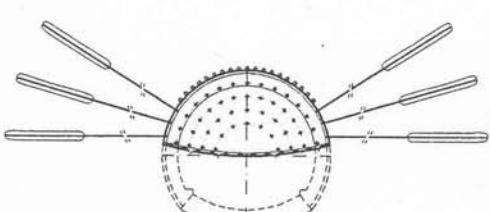
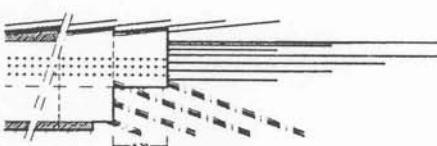


FIG. 9

(che simula la galleria nella zona del fronte d'avanzamento) ricavato prima della prova all'interno del provino e coassiale ad esso.

Mantenendo lo stato tensionale al contorno del campione e riducendo progressivamente la pressione del fluido all'interno del volume cilindrico suddetto, si simula la modifica tensionale presso il fronte indotta dallo scavo e si ottiene una valutazione dell'entità del fenomeno estrusivo al fronte d'avanzamento in funzione del tempo.

Delle prove di estrusione in centrifuga è utile servirsi specialmente quando è necessario considerare attentamente l'effetto della gravità. Esse consentono: da un lato di considerare l'effetto delle pressioni geostatiche agenti al contorno dello scavo anche nel caso di coperture medio-alte, dall'altro lato di seguire accuratamente, attraverso trasduttori di pressione e di spostamento inseriti appropriatamente all'interno del modello, l'andamento nel tempo del fenomeno estrusivo.

Il lettore interessato può trovare una più ampia illustrazione delle prove di estrusione in centrifuga eseguite per la realizzazione della galleria San Vitale nella memoria [10] riportata in bibliografia.

Le prove di estrusione, integrate con semplici modelli matematici agli elementi finiti, sono estremamente utili anche per la taratura dei parametri geomecanici (c , ϕ , E) da utilizzare nelle successive fasi di diagnosi e di terapia.

A completamento della fase conoscitiva si sono effettuate prove insitu di sfilamento dei tubi di vetroresina dal fronte, per determinare la resistenza limite di aderenza tra la malta di cementazione ed il terreno alla profondità di progetto.

I risultati di tali prove, onerose e di difficile esecuzione, sono stati confrontati ed integrati con quelli precedentemente ottenuti in terreni analoghi.

procéder à une caractérisation géotechnique plus approfondie des matériaux impliqués par les excavations. En plus des tests habituels de laboratoire qui nous ont permis de reconstruire les courbes intrinsèques du matériel et qui ont révélé la grande capacité qu'avaient ces terrains d'absorber rapidement l'humidité et de réduire donc considérablement la résistance au cisaillement (fig. 10), nous avons procédé à différents tests d'extrusion :

- à vitesse de charge constante
- en cellule triaxiale
- en centrifugeuse

Les deux derniers, conçus et mis au point par Rocksoil S.p.A. de Milan pour être utilisées spécialement au cours de la phase de diagnostic, permettent d'étudier la future réponse en déformation du système front-noyau d'avancement, simulant en laboratoire sur des bases vraisemblables l'avancement de l'excavation d'un tunnel dans quelque état de contrainte que ce soit.

Tout particulièrement dans le test en cellule triaxiale, l'échantillon de terrain est introduit dans la cellule en reconstituant l'état de contrainte initial du massif. Grâce à la pression d'un fluide, cet état de contrainte est reproduit également à l'intérieur d'un volume cylindrique particulier (qui simule le tunnel dans la zone du front de taille) obtenu avant le test à l'intérieur de l'échantillon et coaxial par rapport à lui.

Conservant l'état de contrainte sur le contour de l'échantillon et réduisant progressivement la pression du fluide à l'intérieur du volume cylindrique en question, nous simulons la modification de contrainte au front provoquée par l'excavation et nous obtenons une évaluation de l'importance du phénomène d'extrusion au front de taille en fonction du temps.

Il est particulièrement utile de se servir des tests d'extrusion en centrifugeuse spécialement lorsqu'il est nécessaire de prendre attentivement en considération l'effet de la gravité. Ces tests permettent d'une part de

FIG. 10

Fase di diagnosi per la galleria San Vitale
In fase di diagnosi, lo studio dei risultati delle prove di estrusione e delle linee caratteristiche della galleria deponeva, in assenza di interventi di stabilizzazione e regimazione dei fenomeni deformativi, per un comportamento a fronte decisamente instabile (figg. 11 e 12). La situazione appareva ulteriormente compromessa poiché, così come evidenziato dalle prove di estrusione effettuate in laboratorio, a seguito dell'allentamento del terreno dovuto allo scavo si produceva al contorno della cavità una rapida variazione del contenuto d'acqua dell'argilla, con conseguente riduzione del fattore di stabilità all'estruzione.

Le prove di estrusione venivano anche modellate numericamente con programmi agli elementi finiti per tarare, da un lato, i parametri di resistenza e deformabilità in funzione degli stati tensionali iniziali, dall'altro lato, per valutare qualitativamente il probabile tipo di cinematismo atteso al fronte, il volume di terreno interessato dal fenomeno estrusivo e l'importanza dei carichi mobilitati.

Fase di terapia per la galleria San Vitale

In fase di terapia, considerati i risultati della fase di diagnosi, le caratteristiche dei terreni da scavare e le esperienze maturate in casi analoghi, si sceglieva di intervenire in maniera decisa a monte del fronte d'avanzamento impedendo, da un lato, l'abbattimento della tensione principale minore sul nucleo, quindi il suo detensionamento in corrispondenza al paramento del fronte stesso, dall'altro lato cercando di innescare artificialmente quell'effetto arco che il terreno autonomamente non avrebbe potuto mobilitare.

Si è allora progettato un intervento conservativo di tipo misto che potesse assolvere a questa doppia funzione (fig. 13), che comprendesse:

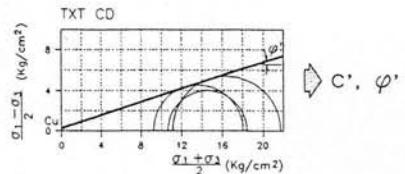
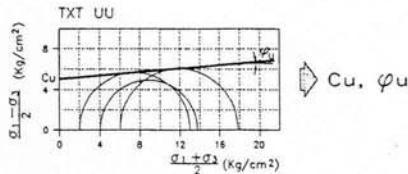
preconsolidamento del nucleo d'avanzamento mediante tubi di vetroresina ad aderenza migliorata;

preconsolidamento del contorno del cavo mediante un guscio di

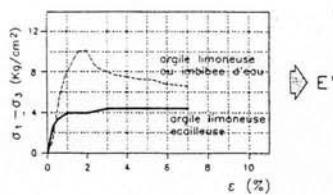
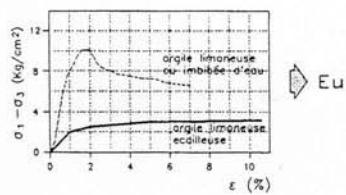
PHASE DE RECONNAISSANCE

LIGNE FERROVIAIRE CASERTA-FOGGIA - TUNNEL SAN VITALE Essais geotechnique

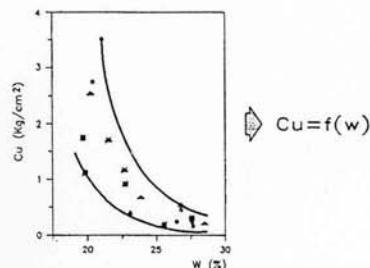
ESSAIS DE RESISTANCE



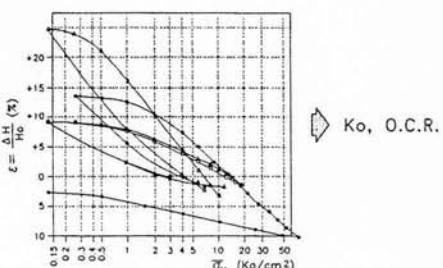
ESSAIS DE DEFORMABILITE



ESSAIS DE SENSIBILITE A L'HUMIDITE



ESSAIS DE GONFLEMENT



considérer l'effet des pressions géostatiques agissant sur le contour de l'excavation même dans le cas de couvertures moyennes-hautes. D'autre part, ils nous permettent de suivre méticuleusement - à travers des transducteurs de pression et de déplacement correctement introduits à l'intérieur du modèle - le comportement du phénomène d'extrusion dans le temps.

Le lecteur intéressé peut trouver une illustration plus ample des tests d'extrusion en centrifugeuse effectués pour la réalisation du tunnel de San Vitale dans le mémoire [10] cité dans la bibliographie.

Les tests d'extrusion, intégrés de simples modèles mathématiques aux éléments finis, sont extrêmement utiles même pour l'étalonnage des paramètres géomécaniques (c, ϕ, E) à utiliser dans les phases suivantes de diagnostic et de traitement.

Pour compléter cette phase d'étude nous avons effectué *in situ* des tests d'extraction des tubes en résine de verre du front pour déterminer la résistance limite d'adhérence entre le mortier de cimentation et le terrain à la profondeur du projet.

Les résultats de ces tests, onéreux et difficiles à exécuter, ont été confrontés et intégrés à ceux précédemment obtenus dans des terrains analogues.

Phase de diagnostic pour le tunnel de San Vitale

Dans la phase de diagnostic, l'étude des résultats des tests d'extrusion et des lignes caractéristiques du tunnel penchait - en l'absence d'interventions de stabilisation et de contrôle des phénomènes de déformation - en faveur d'un comportement à front résolument instable (fig. 11 et 12). La situation apparaissait encore plus compromise car comme montré par les tests d'extrusion faits en laboratoire, à la suite du relâchement du terrain du fait de l'excavation, il se produisait sur le contour de la cavité une rapide variation du contenu en eau de l'argile suivie d'une réduction du facteur de stabilité à l'extrusion.

Les tests d'extrusion étaient également modélisés numériquement avec des programmes aux éléments finis pour étalonner d'une part les paramètres de résistance et de déformabilité en fonction des états de contrainte initiaux et de l'autre, pour évaluer qualitativement le type probable de cinématisme

materiale cementizio realizzato con la tecnica del pretaglio meccanico;

drenaggi;

arco rovescio di c.a. gettato a ridosso del fronte.

L'intervento di prima fase è completato da un rivestimento di centine e spritz-beton rinforzato con fibre d'acciaio, mentre il rivestimento di seconda fase in calcestruzzo viene gettato a seguire.

Nell'ambito del progetto si è prevista anche una soluzione alternativa a quella del pretaglio, che prevedesse la sostituzione del guscio di spritz-beton fibrorinforzato con un anello di terreno consolidato con tubi di vetroresina, attrezzati per l'esecuzione di iniezioni di ricompressione ed iniettati ad alta pressione (foto 2).

Il dimensionamento degli interventi di chiodatura al fronte, in termini di intensità, profondità e geometria, è stato eseguito, in prima approssimazione, per vie diverse: una sperimentale, basata sull'interpretazione delle prove di estrusione, l'altra teorica, basata sulla teoria delle linee caratteristiche (fig. 14).

Nel primo caso, sui diagrammi ricavati attraverso le prove di estrusione, si è individuata la pressione di preconfinamento necessaria per la stabilizzazione del fronte. L'intensità dell'intervento (numero di tubi di vetroresina da mettere in opera per garantire tale pressione) si è valutata quindi sulla base dei risultati delle prove di sfilamento. Quando questi non erano disponibili, si sono fatte ipotesi attendibili sulla base di prove esperite in terreni simili.

Analoghe valutazioni si sono eseguite con il metodo delle linee caratteristiche tenendo conto, in maniera semplificata, dell'effetto della chiodatura del fronte nel calcolo della linea caratteristica del nucleo.

Entrambi gli approcci (prove di estrusione e linee caratteristiche) hanno fornito risultati tra loro confrontabili, a conferma dell'analogia concettuale esistente.

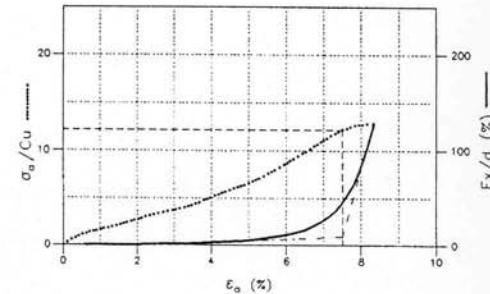
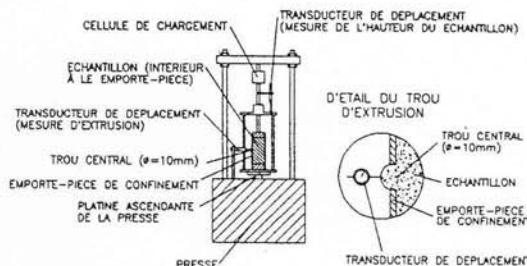
- La profondità dell'intervento (lunghezza dei tubi) è stata infine

PHASE DE DIAGNOSTIC

LIGNE FERROVIAIRE CASERTA-FOGGIA - TUNNEL SAN VITALE Essais d'extrusion

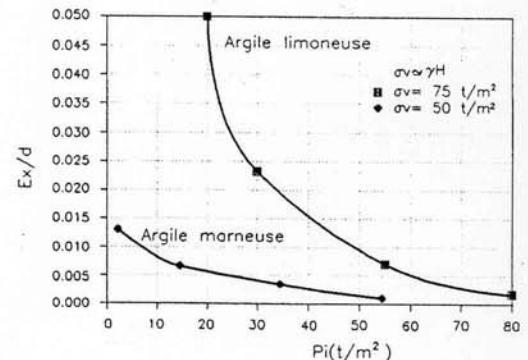
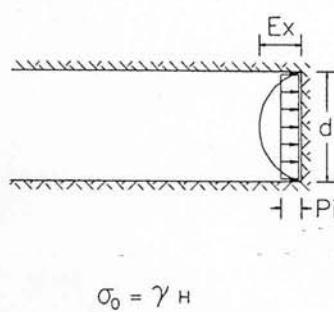
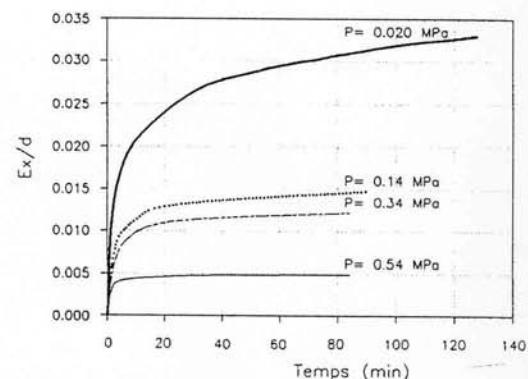
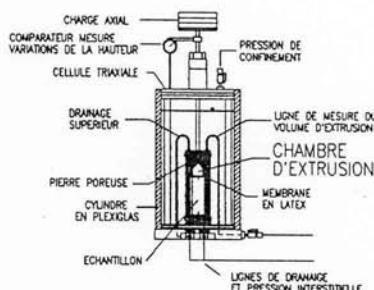
a - Essai d'extrusion à vitesse de chargement contrôlée

$$(Broms et Bennermark) \rightarrow N_s = \frac{\sigma_a}{C_u} = \text{Coefficient de stabilité}$$



b - Essai d'extrusion en cellule triaxiale

$$\rightarrow P_i = \text{Pression dans la chambre d'extrusion}$$



attendu au front de taille, le volume de terrain impliqué par le phénomène d'extrusion et l'importance des charges mobilisées.

Phase de therapie pour le tunnel de San Vitale

Dans la phase de therapie, compte tenu des résultats de la phase de diagnostic, des caractéristiques des terrains à creuser et des expériences acquises dans des cas analogues, nous avons choisi d'intervenir décidément en amont du front de taille empêchant d'une part la diminution de la contrainte principale inférieure sur le noyau et de l'autre, essayant d'amorcer artificiellement l'effet de voûte que le terrain n'aurait pas réussi

materiale cementizio realizzato con la tecnica del pretaglio meccanico;

drenaggi;

arco rovescio di c.a. gettato a ridosso del fronte.

L'intervento di prima fase è completato da un rivestimento di centine e spritz-beton rinforzato con fibre d'acciaio, mentre il rivestimento di seconda fase in calcestruzzo viene gettato a seguire.

Nell'ambito del progetto si è prevista anche una soluzione alternativa a quella del pretaglio, che prevedesse la sostituzione del guscio di spritz-beton fibrorinforzato con un anello di terreno consolidato con tubi di vetroresina, attrezzati per l'esecuzione di iniezioni di ricompressione ed iniettati ad alta pressione (foto 2).

Il dimensionamento degli interventi di chiodatura al fronte, in termini di intensità, profondità e geometria, è stato eseguito, in prima approssimazione, per vie diverse: una sperimentale, basata sull'interpretazione delle prove di estrusione, l'altra teorica, basata sulla teoria delle linee caratteristiche (fig. 14).

Nel primo caso, sui diagrammi ricavati attraverso le prove di estrusione, si è individuata la pressione di preconfinamento necessaria per la stabilizzazione del fronte. L'intensità dell'intervento (numero di tubi di vetroresina da mettere in opera per garantire tale pressione) si è valutata quindi sulla base dei risultati delle prove di sfilamento. Quando questi non erano disponibili, si sono fatte ipotesi attendibili sulla base di prove esperite in terreni simili.

Analoghe valutazioni si sono eseguite con il metodo delle linee caratteristiche tenendo conto, in maniera semplificata, dell'effetto della chiodatura del fronte nel calcolo della linea caratteristica del nucleo.

Entrambi gli approcci (prove di estrusione e linee caratteristiche) hanno fornito risultati tra loro confrontabili, a conferma dell'analogia concettuale esistente.

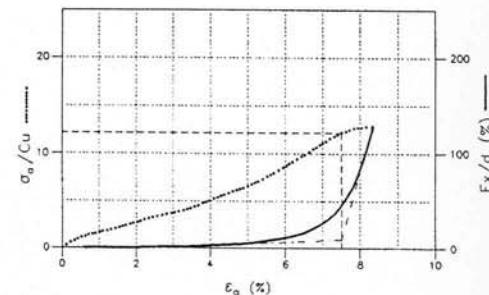
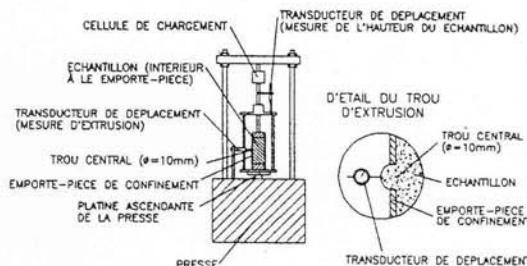
- La profondità dell'intervento (lunghezza dei tubi) è stata infine

PHASE DE DIAGNOSTIC

LIGNE FERROVIAIRE CASERTA-FOGGIA - TUNNEL SAN VITALE Essais d'extrusion

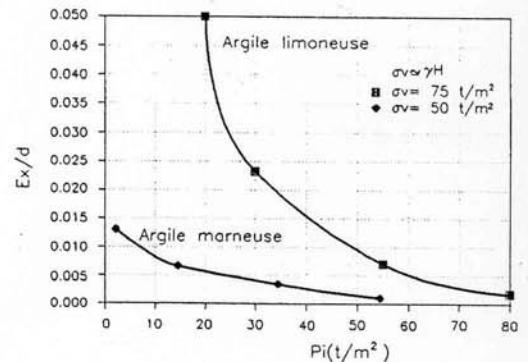
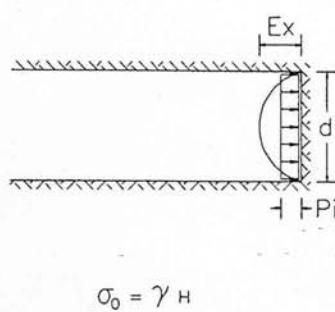
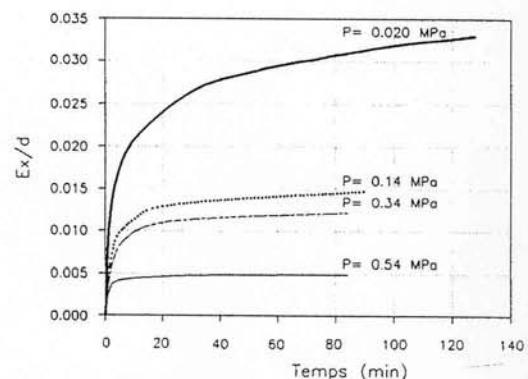
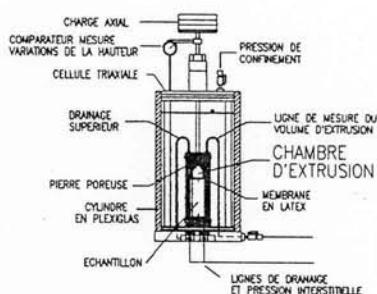
a - Essai d'extrusion à vitesse de chargement contrôlée

$$(Broms et Bennermark) \rightarrow N_s = \frac{\sigma_a}{C_u} = \text{Coefficient de stabilité}$$



b - Essai d'extrusion en cellule triaxiale

$$\rightarrow P_i = \text{Pression dans la chambre d'extrusion}$$



attendu au front de taille, le volume de terrain impliqué par le phénomène d'extrusion et l'importance des charges mobilisées.

Phase de therapie pour le tunnel de San Vitale

Dans la phase de therapie, compte tenu des résultats de la phase de diagnostic, des caractéristiques des terrains à creuser et des expériences acquises dans des cas analogues, nous avons choisi d'intervenir décidément en amont du front de taille empêchant d'une part la diminution de la contrainte principale inférieure sur le noyau et de l'autre, essayant d'amorcer artificiellement l'effet de voûte que le terrain n'aurait pas réussi

definita in funzione dei meccanismi cinematici evidenziati dalla simulazione numerica delle prove di estrusione.

Per eliminare le semplificazioni a cui oggi siamo costretti quando valutiamo l'effetto di preconsolidamento esercitato dai tubi di vetroresina al fronte, si sta mettendo a punto un tipo di prova di estrusione in centrifuga che fornirà una valutazione diretta dell'intensità dell'intervento di chiodatura necessario.

La verifica delle soluzioni adottate e la messa a punto della geometria dell'intervento sono state infine eseguite mediante un modello numerico tridimensionale agli elementi finiti in campo non lineare (figg. 15 e 16).

Il modello ha ampiamente confermato l'importanza del controllo esercitato dal nucleo d'avanzamento sulla statica della cavità, evidenziando come i cinematicismi attivati in fase di scavo possano essere controllati agendo sull'intensità degli interventi di consolidamento sul nucleo.

In definitiva, lo studio di terapia evidenziava, per la soluzione base, la necessità di preconsolidare il nucleo d'avanzamento con circa 50 tubi di vetroresina Ø 40/10 di 18 m di lunghezza; per la soluzione alternativa, confermava la possibilità di sostituire il guscio del pretaglio con una coronella di terreno consolidato mediante 49 tubi di vetroresina Ø 60/40, equipaggiati con valvole per l'esecuzione di iniezioni di ricompressione.

Fase operativa per la galleria San Vitale

Confortati dall'esito delle verifiche effettuate mediante il calcolo numerico, si è proceduto all'applicazione pratica degli interventi scelti in fase progettuale nell'ambito delle sezioni tipo previste (fig. 13).

I primi 300 m di galleria si sono scavati con buoni risultati adottando la soluzione base. In seguito, l'intercettazione lungo il tracciato di consistenti intercalazioni calcaree, spesso accompagnate da ampi ripiegamenti di origine tettonica, rendeva difficoltosa la fresatura dell'arco di pretaglio, creando inaccettabili problemi di geometria e di statica della volta. Non potendo più contare sulla collaborazione dell'anello protettivo al contorno del cavo, costituito dal pretaglio meccanico, poiché veniva meno la sua continuità, si è deciso di passare alla soluzione alternativa, che grazie all'impiego del preconsolidamento mediante tubi di vetroresina anche al

à mobiliser à lui tout seul.

Nous avons donc projeté une intervention de conservation de type mixte qui répondrait à cette double fonction (fig. 13) et qui comprendrait - un renforcement du noyau d'avancement par des tubes en résine de verre à adhérence améliorée

- une prérenforcement du contour de la cavité par un écran de matériel cimentaire réalisé selon la technique du prédécoupage mécanique - des drainages

- un radier en b.a. coulé derrière le front de taille

L'intervention de la première phase est complétée par un revêtement de cintres et de spritz-béton renforcé de fibres d'acier alors que le revêtement de la seconde phase en béton est coulé aussitôt après.

Dans le cadre du projet, nous avons prévu également une solution alternative à celle du prédécoupage, prévoyant le remplacement des tuiles de spritz-béton renforcé de fibres par une anneau de terrain renforcé par des tubes de résine de verre, équipés pour l'exécution d'injections de recompression et injectés à haute pression (photo 2).

Le dimensionnement des interventions de clouage au front, en termes d'intensité, de profondeur et de géométrie, a été effectué, dans une première approximation, par deux méthodes différentes. Une méthode expérimentale, basée sur l'interprétation des tests d'extrusion et une méthode théorique, basée sur la théorie des lignes caractéristiques (fig. 14).

Dans e premier cas, sur les diagrammes obtenus à travers les tests d'extrusion, nousavons défini la pression de préconfinement nécessaire à la stabilisation du front. L'intensité de l'intervention (nombre des tubes en résine de verre à mettre en oeuvre pour garantir cette pression) a été donc évaluée sur la base des résultats des tests d'extraction. Lorsqu'ils n'étaient pas disponibles, des hypothèses fiables ont été avancées sur la base de tests faits dans des terrains analogues.

Des évaluations analogues ont été faites avec la méthode des lignes caractéristiques en tenant compte, d'une manière simplifiée, de l'effet du clouage du front e taille dans le calcul de la ligne caractéristique du noyau.

Les deux approches ont fourni des résultats comparables entre eux et confirmé donc l'analogie conceptuelle existante.

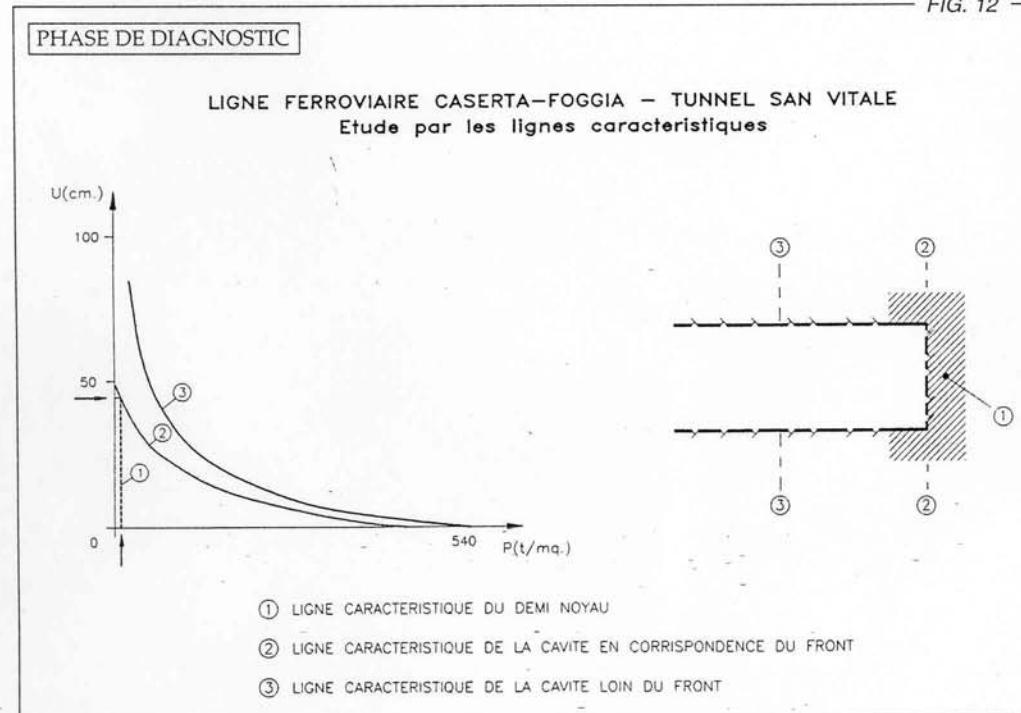
La profondeur de l'intervention (longueur des tubes) a été enfin définie en fonction des mécanismes cinématiques révélés par la simulation numérique des tests d'extrusion.

Pour éliminer les simplifications que nous sommes obligés d'adopter lorsque ous évaluons l'effet de préconfinement exercé par les tubes en résine de vrre au front, nous mettons au point un type de test d'extrusion e centrifugeuse qui fournira une évaluation directe de l'intensité de l'intervention de clouage nécessaire.

Enfin, la vérification des solutions adoptées et la mise au point de la géométrie de l'intervention ont été effectuées à l'aide d'un modèle numérique tridimensionnel aux éléments finis en champ non linéaire (fig. 15 et 16).

Le modèle a largement confirmé l'importance du contrôle exercé par le noyau d'avancement sur la statique de la cavité. Il a souligné que les cinematicismi attivati dans la phase de l'excavation peuvent être controllés en agissant sur l'intensité des interventions de consolidation sur le noyau.

En définitive, l'étude de traitement soulignait, pour la solution de base, le besoin de renforcer le noyau d'avancement au moyen de 50 tubes de résine de verre Ø 40/10 de 18 m de longueur. Pour la solution alternative, l'étude conirmait la possibilità de remplacer les tuiles de prédécoupage



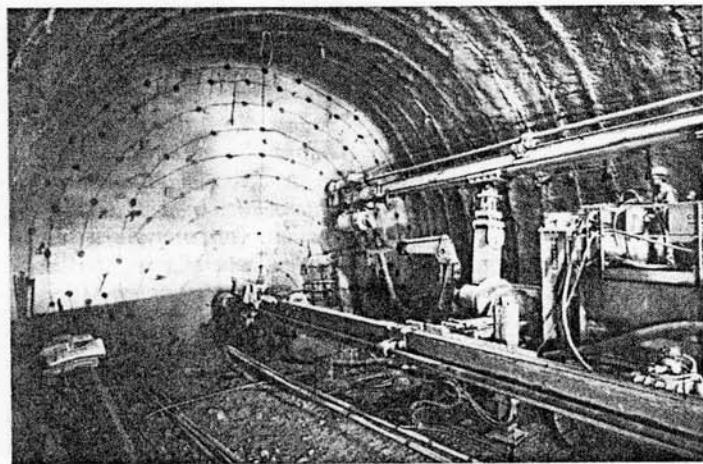
contorno del cavo dava garanzie di continuità.

L'adozione della nuova sezione tipo ha permesso di incrementare, con opportuni accorgimenti operativi, le già buone produzioni che si ottenevano con il pretaglio meccanico (fig. 17).

Si è constatato che, in situazioni particolarmente critiche, il preconsolidamento del nucleo, da solo, può non essere in grado di contrastare efficacemente i fenomeni deformativi, pur intensificando il trattamento.

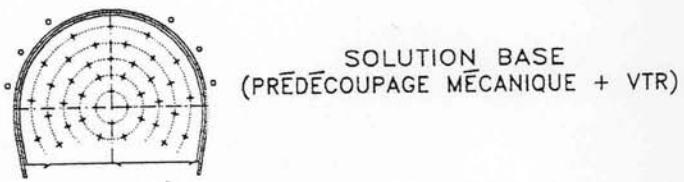
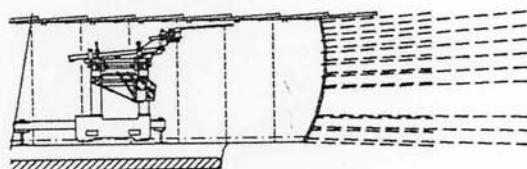
Si è visto che queste situazioni possono essere superate:
lavorando sulla forma del nucleo, per creare in avanzamento una fascia di terreno consolidato al contorno dello stesso;
operando eventualmente con interventi radiali di consolidamento al contorno della cavità dimensionati per assorbire le convergenze residue che il nucleo da solo non è in grado d'impedire.

Photo 2 - Tunnel San Vitale: avancement par la solution alternative

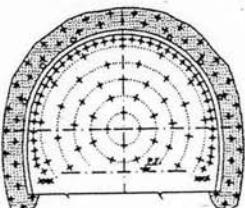
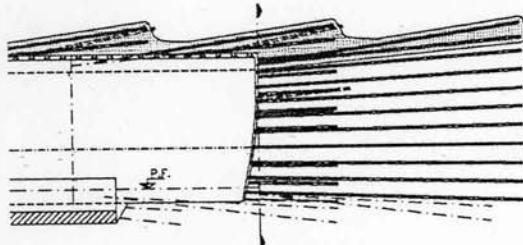


PHASE DE THERAPIE

LIGNE FERROVIAIRE CASERTA-FOGGIA — TUNNEL SAN VITALE



SOLUTION BASE
(PRÉDÉCOUPAGE MÉCANIQUE + VTR)



SOLUTION ALTERNATIVE
(VTR + VTR)

par une couronne de terrain renforcé par 49 tubes en résine de verre Ø 6040, équipés de vannes pour l'exécution d'injections de recompression.

Phase opérationnelle pour le tunnel de San Vitale

Rassurés par le résultat des vérifications effectuées à travers le calcul numérique, nous avons procédé à l'application pratique des interventions choisies dans la phase conceptuelle, dans le cadre des sections type prévues (fig. 13).

Les 300 premiers mètres de tunnel ont été excavés avec de bons résultats, adoptant la solution de base. Par la suite, l'interception le long du tracé d'intercalages calcaires importants souvent doublés d'ample replis d'origine tectonique, rendait difficile le fraisage de l'arc de prédécoupage, créant des problèmes inacceptables de géométrie et de statique de la voûte. Ne pouvant plus compter sur la collaboration de l'anneau de protection sur le contour de la cavité, constitué par le prédécoupage mécanique car sa continuité aurait fait défaut, nous avons décidé de passer à la solution alternative qui donnait des garanties de continuité grâce à l'emploi du prérenforcement à l'aide de tubes en résine de verre, même sur le contour de la cavité.

L'adoption de la nouvelle section type nous a permis d'augmenter - à travers des mesures opérationnelles appropriées - les production déjà bonne que nous obtenions avec le prédécoupage mécanique (fig. 17).

Nous avons constaté que dans des situations particulièrement critiques, le renforcement du noyau seul peut ne pas suffire à s'opposer efficacement aux phénomènes de déformation même si nous intensifions le traitement.

Nous avons bien vu que ces situations peuvent être surmontées
- en travaillant sur la forme du noyau afin de créer dans l'avancement une bande de terrain renforcé sur le contour du noyau

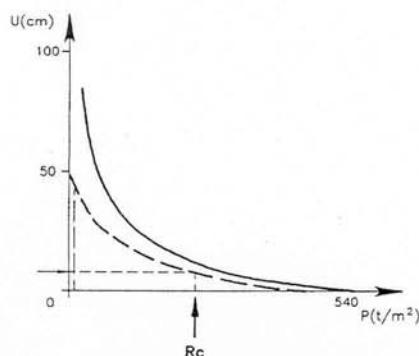
- en opérant éventuellement par des interventions radiales de renforcement sur le contour de la cavité, dimensionnées pour absorber les convergences résiduelles que le noyau n'est pas capable d'empêcher à lui tout seul.

A l'heure actuelle, l'excavation du tunnel San Vitale procède avec la section type alternative, sans rencontrer de difficultés.

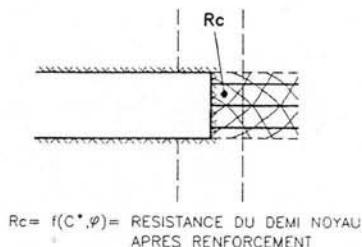
FIG. 13

PHASE DE THERAPIE

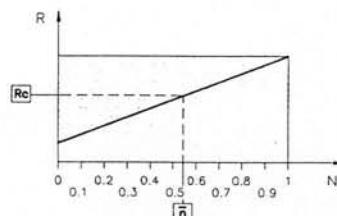
EVALUATION DE L'ETENDUE DU RENFORCEMENT DU NOYAU
POUR EVITER SA INSTABILITE



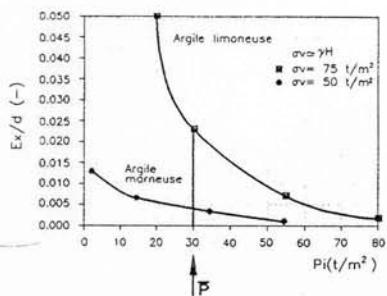
PAR LIGNES CARACTERISTIQUES



COURBES EXPERIMENTALES POUR LA DETERMINATION DU NOMBRE DES TUBES AVEC REFERENCE A L'ACCROISSEMENT DE RESISTANCE



PAR ESSAIS D'EXTRUSION



P = PRESSION LIMITE DE CONFINEMENT DE L'EXTRUSION

COURBES EXPERIMENTALES POUR LA DETERMINATION DU NOMBRE DES TUBES AVEC REFERENCE A LA RESISTANCE limite A L'EXTRACTION

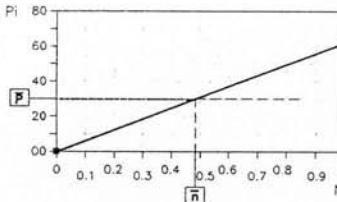


FIG. 14

Attualmente lo scavo della galleria San Vitale procede con la sezione tipo alternativa senza incontrare nessuna difficoltà.

Fase di verifica in corso d'opera per la galleria San Vitale

Il sistema di avanzamento adottato, che ha come obiettivo la creazione dell'effetto arco anticipatamente sullo scavo, richiede, ai fini di verificarne il comportamento, il monitoraggio continuo dei fenomeni deformativi; ciò permette al sistema stesso di essere messo a punto tempestivamente in funzione della loro evoluzione a fronte degli interventi di stabilizzazione operati. Il monitoraggio prevede l'esecuzione di:

- misure estensimetriche dalla superficie, nelle tratte a ridotta copertura, operate in modo da poter rilevare l'andamento delle preconvergenze e convergenze a monte ed a valle del fronte d'avanzamento della galleria in corrispondenza alla stazione di misura;

- misure di estrusione del nucleo al fronte d'avanzamento;

- misure di convergenza del cavo, mediante nastro d'acciaio Invar;

- misure di pressione al contatto tra le strutture di rivestimento ed l'ammasso circostante;

- misure di martinetto piatto all'intradosso del rivestimento definitivo in calcestruzzo per il rilevamento dello stato di sollecitazione.

Naturalmente, questi controlli base vengono integrati con altri qualora la particolarità della situazione lo richieda.

In particolare, nella galleria San Vitale si sono operate per la prima volta nella storia del tunnelling misure sistematiche e contemporanee di estrusione e convergenza.

Le misure di estrusione del fronte di scavo, eseguite dall'ISMES

Phase de vérification en cours de chantier du tunnel de San Vitale

Le système d'avancement adopté dont l'objectif est de créer l'effet de voûte en anticipation sur l'excavation, exige pour vérifier son comportement le monitoring continu des phénomènes en déformation. Cela permet au système lui-même d'être mis au point en temps utile, en fonction de leur évaluation face aux interventions de stabilisation opérées. Le monitoring prévoit l'exécution de

- mesures extensimétriques de la surface, dans les segments à couverture réduite, opérées de manière à pouvoir relever le comportement des préconvergences et des convergences en amont et en aval du front de taille du tunnel à la hauteur de la station de mesure

- mesures d'extrusion du noyau au front de taille

- mesures de convergence de la cavité par bande d'acier Invar

- mesures de pression au contact entre les structures de revêtement et le massif environnant

- mesures de vérin plat à l'intrados du revêtement définitif en béton pour les relevés de l'état de contrainte

Naturellement, ces contrôles de base sont intégrés d'autres contrôles au cas où la particularité de la situation l'exigerait.

Dans le tunnel de San Vitale, nous avons notamment fait, pour la toute première fois dans l'histoire de la construction des tunnels, des mesures systématiques et simultanées d'extrusion et de convergence.

Les mesures d'extrusion du front de taille, effectuées par ISMES S.p.A. de Bergame au moyen de l'introduction d'un sliding micrometer dans le noyau d'avancement, révèlent des valeurs moyennes de près de 2 cm contre les 20 cm mesurés en 1990 (fig. 18). Les mesures de convergence à leur tour révélaient des valeurs moyennes de 7 cm seulement contre les 100 cm et davantage observés en 1990 (fig. 19). La réduction significative des valeurs mesurées démontre avec certitude l'efficacité de la nouvelle

PHASE DE THERAPIE

LIGNE FERROVIAIRE CASERTA-FOGGIA - TUNNEL SAN VITALE

ANALYSE MEF TRIDIMENSIONNELLE

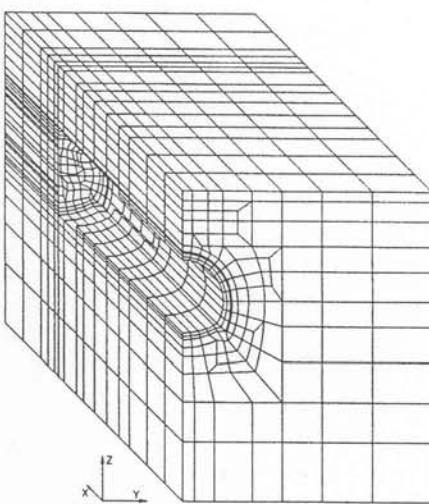
- GÉOMÉTRIE ET ÉTAT DE CONTRAINTE RÉELS
- DIMENSIONNEMENT DES CONSOLIDATIONS, PRÉREVÊTEMENTS, REVÊTEMENTS FINALS
- VERIFICATIONS DU RENFORCEMENT DU NOYAU
- SIMULATION DES CADENCES OPERATIONNELLES

MISE AU POINT DU MODÈLE:

a) DE PHASE DE RECONNAISSANCE:

C, ϕ , E
 C_u , ϕ_u , E_u
 γ , γ' , γ_{sat}
modèle constitutif

CRITÈRE DE RUPTURE

b) DE PHASE DE DIAGNOSTIC:

typologie des interventions
de consolidations,
de préconfinement et
de confinement



c) DE PRÉCEDENTES CONSIDÉRATIONS DE THERAPIE:

nombre et longueur
des tubes au front
de taille



FIG. 15

S.p.A. di Bergamo mediante l'inserimento di sliding micrometer nel nucleo di avanzamento, evidenziano valori medi prossimi a 2 cm, contro i 20 cm misurati nel 1990 (fig. 18). Le misure di convergenza, a loro volta, segnalano valori medi di soli 7 cm contro gli oltre 100 cm osservati nel 1990 (fig. 19). La significativa riduzione dei valori misurati dimostra con certezza l'efficacia della nuova impostazione progettuale.

Particolarmente interessante è l'andamento delle estrusioni e delle convergenze all'interno di un ciclo completo di lavorazioni, che comprende il consolidamento del nucleo con tubi di vetroresina per una profondità di 18 m e lo scavo di avanzamento per una profondità minima di 6 m e massima di 9 m; a questo proposito si fa notare che le profondità di avanzamento vengono definite di volta in volta in funzione dell'andamento e dell'entità delle convergenze del cavo, che non devono superare la soglia stabilità dal progettista al fine di mantenere la risposta deformativa il più

approche conceptuelle.

Ce qui est particulièrement intéressant est le comportement des extrusions et des convergences à l'intérieur d'un cycle complet de travaux comportant le renforcement du noyau avec des tubes en résine de verre sur une profondeur de 18 m et l'excavation d'avancement sur une profondeur minimum de 6, et maximum de 9 m. Notons à cet égard que les profondeurs d'avancement sont définies au fur et à mesure, en fonction du comportement et de l'importance des convergences de la cavité qui ne doivent pas dépasser le seuil établi par le concepteur afin de maintenir la réponse en déformation le plus possible en champ élastique. La lecture des diagrammes extrusion-convergence reproduits dans la figure 20 (qui se réfèrent à un segment de tunnel excavé dans un terrain particulièrement médiocre) nous montre que l'avancement du front - au fur et à mesure de la réduction de la profondeur du noyau renforcé de 18 m initialement à 10,50 m et par conséquent de la réduction de sa rigidité moyenne aussi - est suivi d'un comportement en déformation du noyau même (extrusion) et de la cavité en aval du front de taille (convergence) progressivement plus déplacé de l'élastique vers l'élastoplastique. Les courbes de convergence passent notamment d'un comportement initial typique d'une situation qui évolue rapidement vers la stabilité à des comportements qui révèlent une difficulté croissante des phénomènes de déformation à s'épuiser.

Dans cette optique, la convergence de la cavité devient alors un signal très important pour le projet qui doit établir le moment où il sera nécessaire d'arrêter l'avancement pour effectuer un nouveau renforcement et rétablir la profondeur minimum du noyau renforcé pour maintenir le massif en domaine élastique.

Résultats de la troisième phase de recherche

L'étude et les expérimentations menées dans le tunnel de San Vitale ont montré d'une part l'existence d'un lien étroit entre les phénomènes de déformation qui se produisent à l'intérieur du noyau d'avancement du tunnel (extrusions) et de l'autre, ceux qui se produisent plus tard sur le contour de la cavité, en aval du front de taille (convergences). Elles ont également révélé que les phénomènes de déformation de la cavité peuvent être contrôlés et sensiblement réduits en réglant artificiellement la déformabilité du noyau d'avancement et donc sa rigidité (confinement des extrusions). Ceci est possible à travers l'exécution d'interventions appropriées de stabilisation dimensionnées et distribuées entre le noyau au front et la cavité, en fonction des caractéristiques de résistance et de déformabilité du milieu compte tenu de la situation de contrainte contingente.

Compte tenu de cela, dans le cas d'un milieu contraint en domaine élastoplastique :

- si l'état de contrainte en fonction des caractéristiques du milieu est réduit, il se pourrait qu'il suffise d'agir exclusivement sur la cavité par des interventions radiales, évitant toute intervention de type longitudinal sur

possibile in campo elastico. Dalla lettura dei diagrammi estrusione-convergenza riportati in fig. 20 (che si riferiscono ad una tratta di galleria scavata in terreno particolarmente scadente) si nota come, a seguito dell'avanzamento del fronte, al ridursi della profondità del nucleo consolidato dai 18 m iniziali a 10,50 m con conseguente riduzione anche della sua rigidezza media, si sviluppi un comportamento deformativo del nucleo stesso (estrusione) e della cavità a valle del fronte (convergenza) progressivamente più spostato dall'elastico verso l'elastoplastico. In particolare le curve di convergenza, da un andamento iniziale tipico di una situazione che evolve rapidamente verso la stabilità, assumono gradatamente andamenti che evidenziano una crescente difficoltà dei fenomeni deformativi ad esaurirsi.

La convergenza del cavo diventa allora, in questa ottica, un segnale importantissimo per il progettista, al fine di stabilire il momento in cui è necessario arrestare l'avanzamento per eseguire un nuovo consolidamento e ripristinare la profondità di nucleo consolidato minima per mantenere l'ammasso in campo elastico.

Risultati della terza fase di ricerca

Lo studio e le sperimentazioni condotte nella galleria San Vitale hanno evidenziato, da un lato, l'esistenza di uno stretto legame tra i fenomeni deformativi che avvengono all'interno del nucleo d'avanzamento della galleria (estrusioni) e quelli che si sviluppano successivamente al contorno del cavo, a valle del fronte di scavo (convergenze), dall'altro, che i fenomeni deformativi del cavo possono essere controllati e sensibilmente ridotti regolando artificialmente la deformabilità del nucleo d'avanzamento, quindi la sua rigidezza (contenimento delle estrusioni). Questo è possibile attraverso l'esecuzione di adatti interventi di stabilizzazione dimensionati e distribuiti tra il nucleo al fronte ed il cavo, in funzione delle caratteristiche di resistenza e deformabilità del mezzo in rapporto alla situazione tensionale contingente.

Con riferimento a ciò, nel caso di mezzo sollecitato in campo elastoplastico:

se lo stato tensionale rapportato alle caratteristiche del mezzo è ridotto, può darsi sia sufficiente agire soltanto sul cavo con interventi radiali evitando qualsiasi intervento di tipo longitudinale sul nucleo d'avanzamento;

se lo stato tensionale è elevato occorrerà, al contrario, agire soprattutto su detto nucleo consolidandolo con interventi longitudinali, evitando totalmente quelli radiali a valle del fronte.

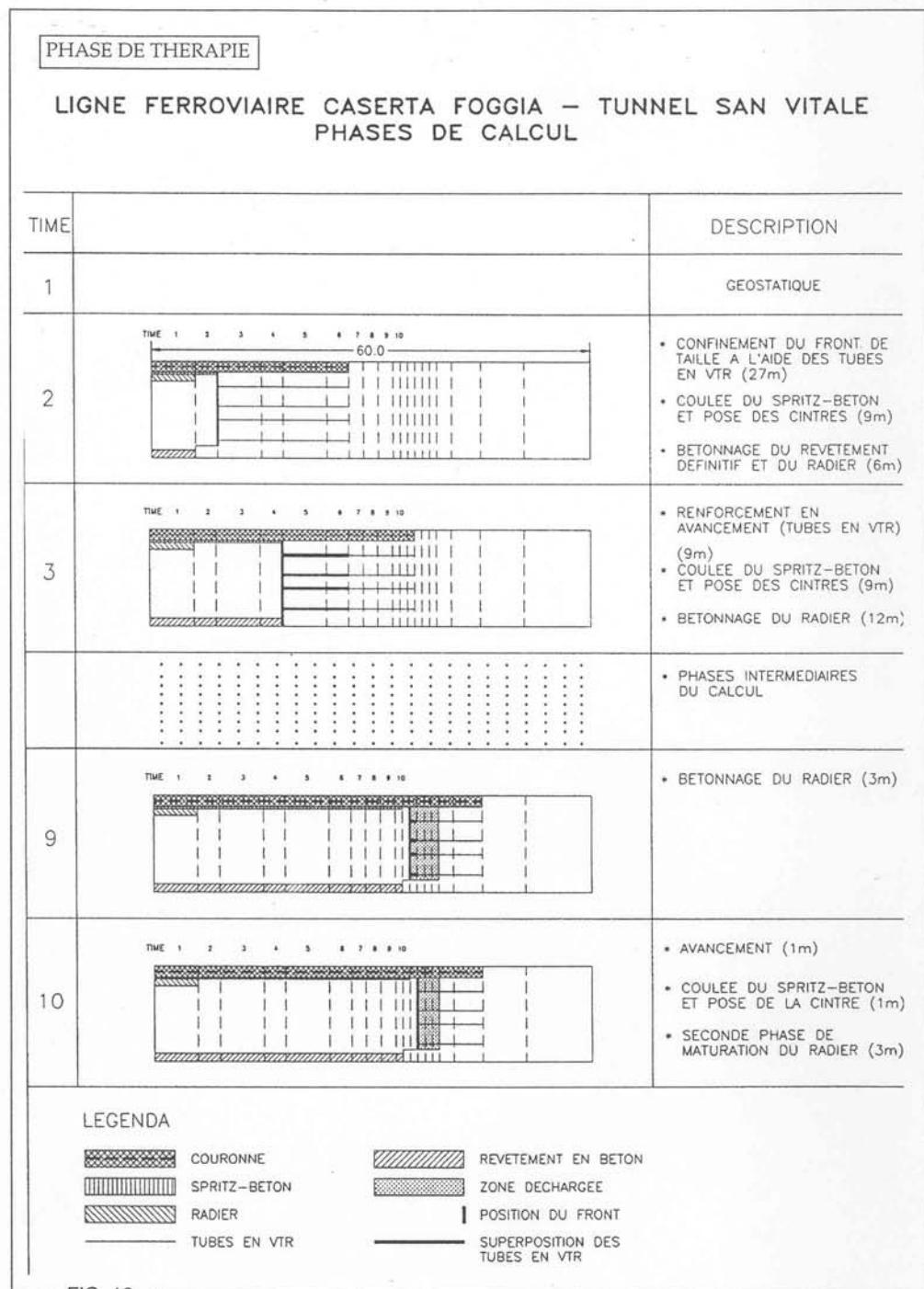


FIG. 16

le noyau d'avancement

- si l'état de contrainte est élevé, il faudra en revanche agir surtout sur le noyau en le consolidant par des interventions longitudinales, évitant totalement les interventions radiales en aval du front de taille.

Au cas où le milieu serait contraint en domaine de rupture, il devient impératif de durcir le noyau d'avancement par des actions de préconfinement de la cavité qui pourront être intégrées par des actions de confinement appropriées en aval du front de taille. A cet égard, les expériences faites (et celles décrites au points précédents sont particulièrement significatives) nous recommandent (voir fig. 21) de

- travailler en avancement sur la forme et sur le volume du noyau à travers la réalisation d'une couronne de protection de terrain renforcé sur le contour du noyau. Au cours de la réalisation du tunnel de San Vitale, nous avons notamment vu que pour surmonter les problèmes de segments particulièrement difficiles, il a été extrêmement utile d'opérer dans ce sens.

LIGNE FERROVIAIRE CASERTA-FOGGIA – TUNNEL SAN VITALE
Productions par typologie d'avancement

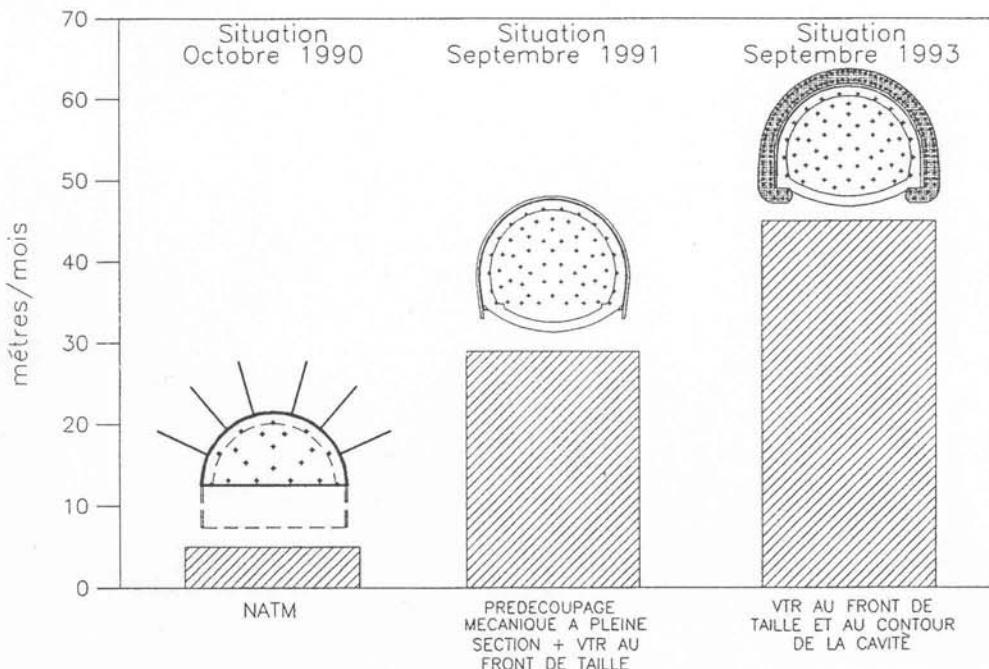


FIG. 17

Nel caso di mezzo sollecitato in campo di rottura, diventa imperativo irrigidire il nucleo d'avanzamento con azioni di precontenimento del cavo, che potranno venir integrate con opportune azioni di contenimento a valle del fronte di scavo. Al riguardo, le esperienze fatte (e quelle descritte ai punti precedenti sono particolarmente significative) consigliano di (vedi fig. 21):

lavorare in avanzamento sulla forma e sul volume del nucleo, attraverso la realizzazione di una coronella protettiva di terreno consolidato al contorno dello stesso. In particolare, durante la realizzazione della galleria San Vitale, si è visto come, per superare tritte particolarmente difficili, sia stato efficace operare in tal senso.

Se ciò non risultasse sufficiente occorre:

eseguire ulteriori interventi radiali di consolidamento al contorno della cavità, dimensionati per assorbire le convergenze residue che il nucleo, pur irrigidito, da solo non è in grado d'impedire.

In quest'ultimo caso, il bilanciamento degli interventi tra il nucleo ed il cavo, stabilito in sede di progetto, potrà venir messo a punto in corso d'opera.

Il nucleo d'avanzamento come strumento di stabilizzazione

I risultati conseguenti alla ricerca, in estrema sintesi, si possono così riassumere:

nella "prima fase di ricerca" si sono identificate tre tipologie fondamentali di deformazione (estrusione del fronte, preconvergenza e convergenza) e le manifestazioni d'instabilità ad esse conseguenti (distacchi gravitativi, splaccaggi, crollo del fronte e della cavità);

nella "seconda fase di ricerca" si sono ottenute le conferme sperimentali che tutti i fenomeni deformativi (estrusione del fronte, preconvergenza e convergenza) e le manifestazioni d'instabilità visibili dall'interno del cavo e ad essi conseguenti (distacchi

Si cela devait s'avérer insuffisant, il faudra :

- procéder à des interventions radiales supplémentaires de renforcement sur le contour de la cavité, dimensionnées pour absorber les convergences résiduelles que le noyau, bien que durci, n'est pas en mesure d'empêcher à lui tout seul.

Le noyau d'avancement en tant qu'instrument de stabilisation

Les résultats consécutifs à la recherche peuvent se résumer très rapidement comme suit :

- dans la "première phase de recherche", nous avons défini trois typologies fondamentales de déformation (extrusion du front de taille, préconvergence et convergence) et les manifestations d'instabilité qui en découlent (chutes de blocs sous l'effet du poids propre, écaillages, effondrement du front et collage de la cavité).

- dans la "deuxième phase de recherche", nous avons obtenu la confirmation expérimentale que tous les phénomènes de déformation (extrusion du front de taille, préconvergence et convergence) ainsi que les manifestations d'instabilité visibles de l'intérieur de la cavité qui en découlent (chutes de blocs sous l'effet du poids propre, écaillages, effondrement du front et collage de la cavité) dépendent directement ou indirectement de la rigidité du noyau d'avancement.

- dans la "troisième phase de recherche" nous avons expérimenté qu'il était possible d'utiliser le noyau au front comme un instrument de stabilisation, agissant artificiellement sur la rigidité du noyau pour contrôler les phénomènes en déformation de la cavité.

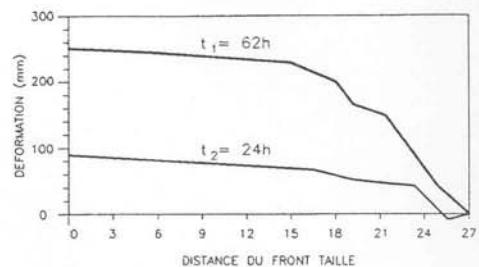
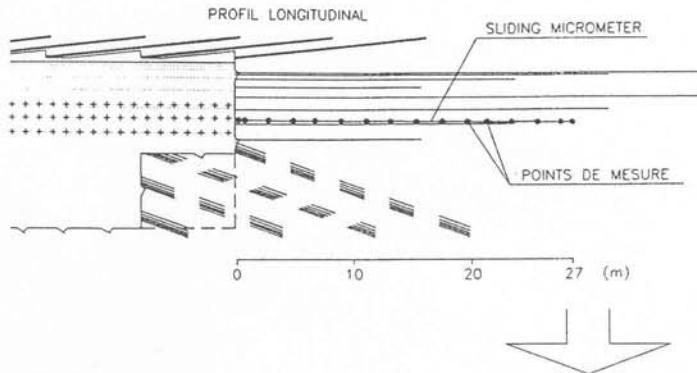
Par ailleurs, les résultats de la recherche

- confirment notre opinion que la réponse en déformation du milieu à l'action de l'excavation doit servir de point de référence principal au projeteur de tunnels à plus forte raison parce qu'elle est l'indice de l'amorce et de la position de l'effet de voûte par rapport au profil d'excavation

PHASE DE VERIFICATION

LIGNE F.S. CASERTA-FOGGIA - TUNNEL SAN VITALE
Mesures d'extrusion au front de taille

SITUATION OCTOBRE '90



SITUATION SEPTEMBRE '91

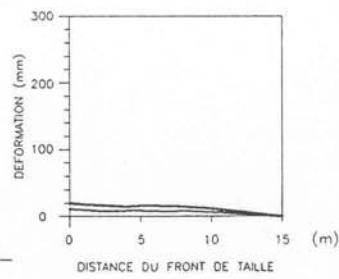
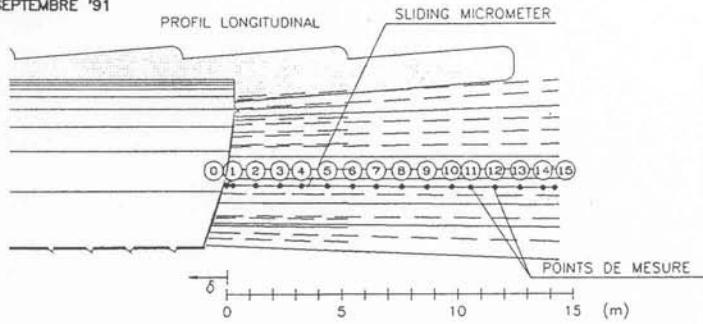


FIG. 18

gravitativi, splaccaggi, crollo del fronte, collasso della cavità) dipendono direttamente o indirettamente dalla rigidezza del nucleo d'avanzamento;

nella "terza fase di ricerca" si è sperimentato come sia possibile, utilizzare il nucleo al fronte come strumento di stabilizzazione, agendo artificialmente sulla rigidezza del nucleo stesso, per regimare i fenomeni deformativi del cavo.

I risultati conseguiti nella ricerca, d'altra parte: confermano che la risposta deformativa del mezzo all'azione

autrement dit de la condition de stabilité atteinte par le tunnel

- soulignent l'importance de tenir sous contrôle la réponse en déformation du système front - noyau d'avancement au lieu de se limiter au seul contrôle de la cavité, dans la mesure où, comme nous l'avons vu, l'importance des charges agissant à long terme sur le revêtement dépend également de la rigidité du noyau

- montrent que la réponse en déformation s'amorce en amont du front de taille, à la hauteur du noyau d'avancement et qu'elle évolue en aval, le long de la cavité

- indiquent clairement l'existence d'un lien direct entre la réponse en déformation du système front - noyau d'avancement et celle de la cavité dans le sens que cette dernière est la conséquence directe de la première

- prouvent qu'en agissant sur la rigidité du noyau d'avancement par des interventions de protection et de renforcement, il est possible de contrôler sa déformabilité (extrusion, préconvergence) et par voie de conséquence, de contrôler également la réponse en déformation de la cavité (convergence).

En définitive, les résultats de la recherche permettent de considérer le noyau d'avancement comme un nouvel instrument de stabilisation à court et à long terme pour la cavité. Un instrument dont la résistance et la déformabilité jouent un rôle déterminant dans la mesure où elles peuvent conditionner l'aspect qui doit préoccuper le plus le projeteur de tunnels autrement dit le comportement de la cavité à l'arrivée du front de taille.

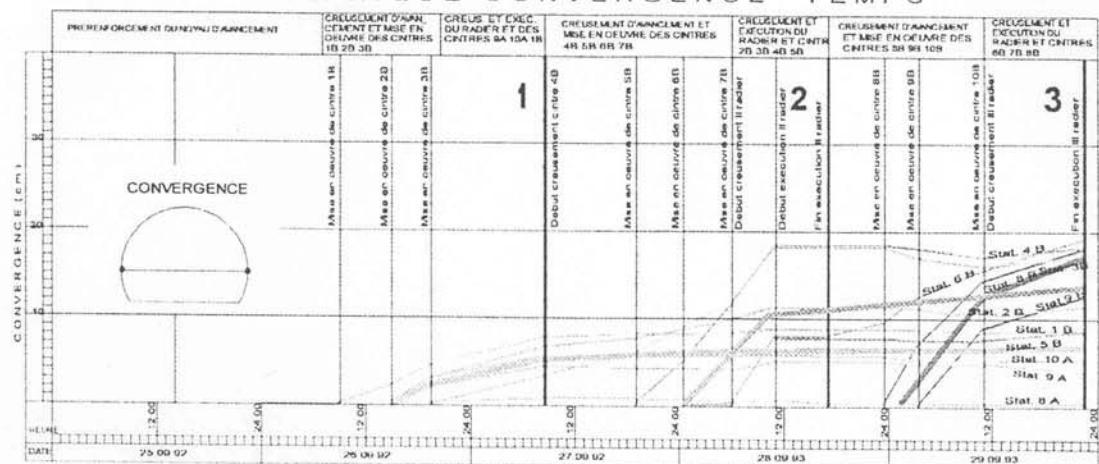
C'est pourquoi il est permis d'affirmer que le projeteur de tunnels doit - pour être à même de mettre en place un projet capable de garantir la stabilité à court et à long terme de l'ouvrage - concentrer toute son attention sur les phénomènes de contrainte et de déformation du système front - noyau d'avancement, autrement dit sur ses conditions de stabilité.

Il s'ensuit que le comportement du système front - noyau d'avancement peut être adopté comme point de référence pour une standardisation des tunnels, avec en sus, l'avantage de constituer un paramètre conservant sa

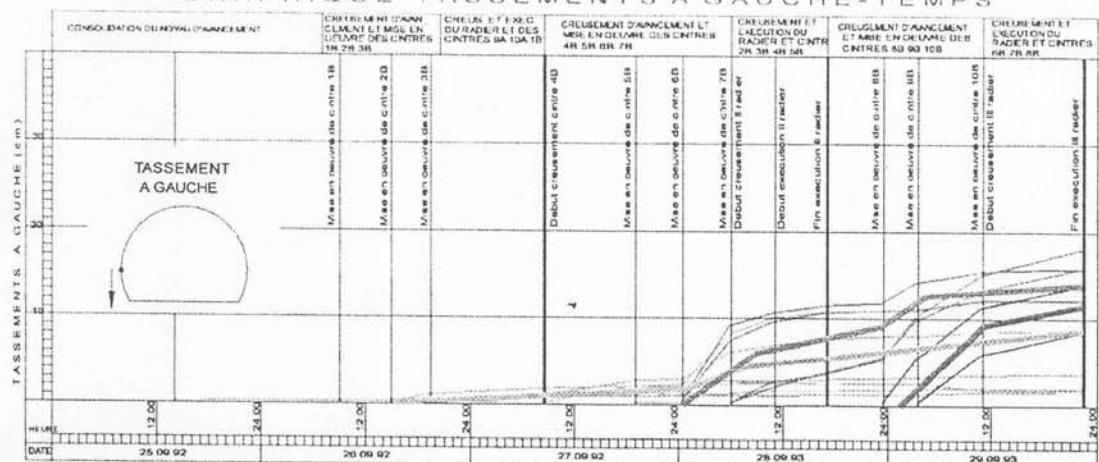
CONSORZIO COFERI

Direzione Tecnica:	Dott. Ing. Giovanni De Pra Dott. Ing. Franco Grassi Dott. Ing. Emiliano Marchesini
Alta Sorveglianza F.S.:	Dott. Ing. Michele Tàmmaro Dott. Ing. Giuseppe Caruso
Ingegneria Specialistica F.S.:	Dott. Ing. Alessandro Conti Puergher Dott. Ing. Piero Pietrantoni Dott. Ing. Antonio Poma
Progettazione ROCKSOIL S.p.A. dal 1991:	Dott. Ing. Alessandro Focaracci Dott. Ing. Ettore Pagani Dott. Ing. Giovanna Cassani

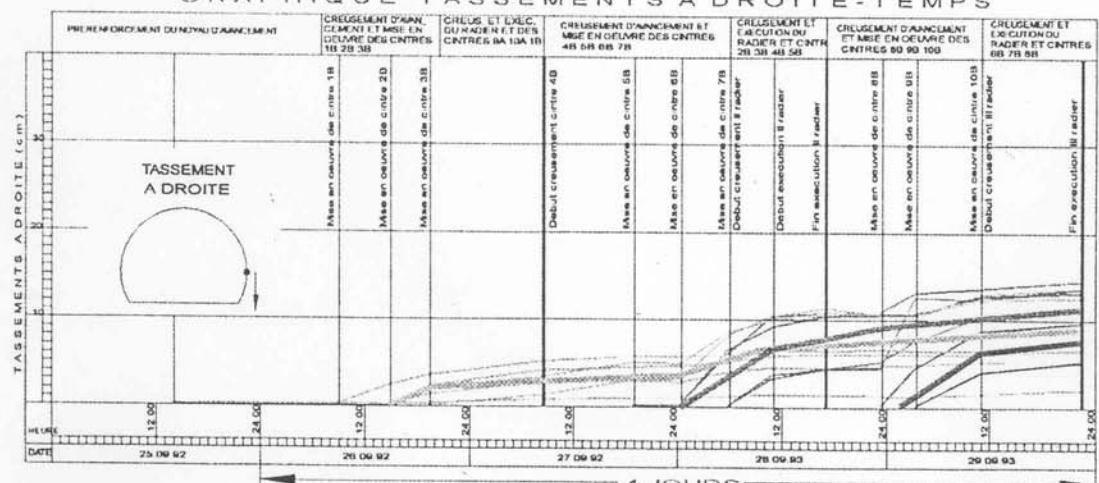
GRAPHIQUE CONVERGENCE - TEMPS



GRAPHIQUE TASSEMENTS A GAUCHE - TEMPS



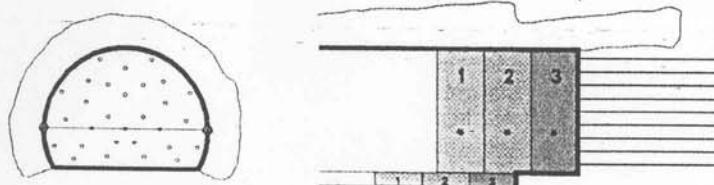
GRAPHIQUE TASSEMENTS A DROITE - TEMPS



4 JOURS

18.00 mt

9.00 mt



1
2
3

FIG. 19

PHASE DE VERIFICATION

LIGNE FERROVIAIRE CASERTA-FOGGIA – TUNNEL SAN VITALE
DIAGRAMMES EXTRUSION-CONVERGENCE EN FONCTION DU AVANCEMENT

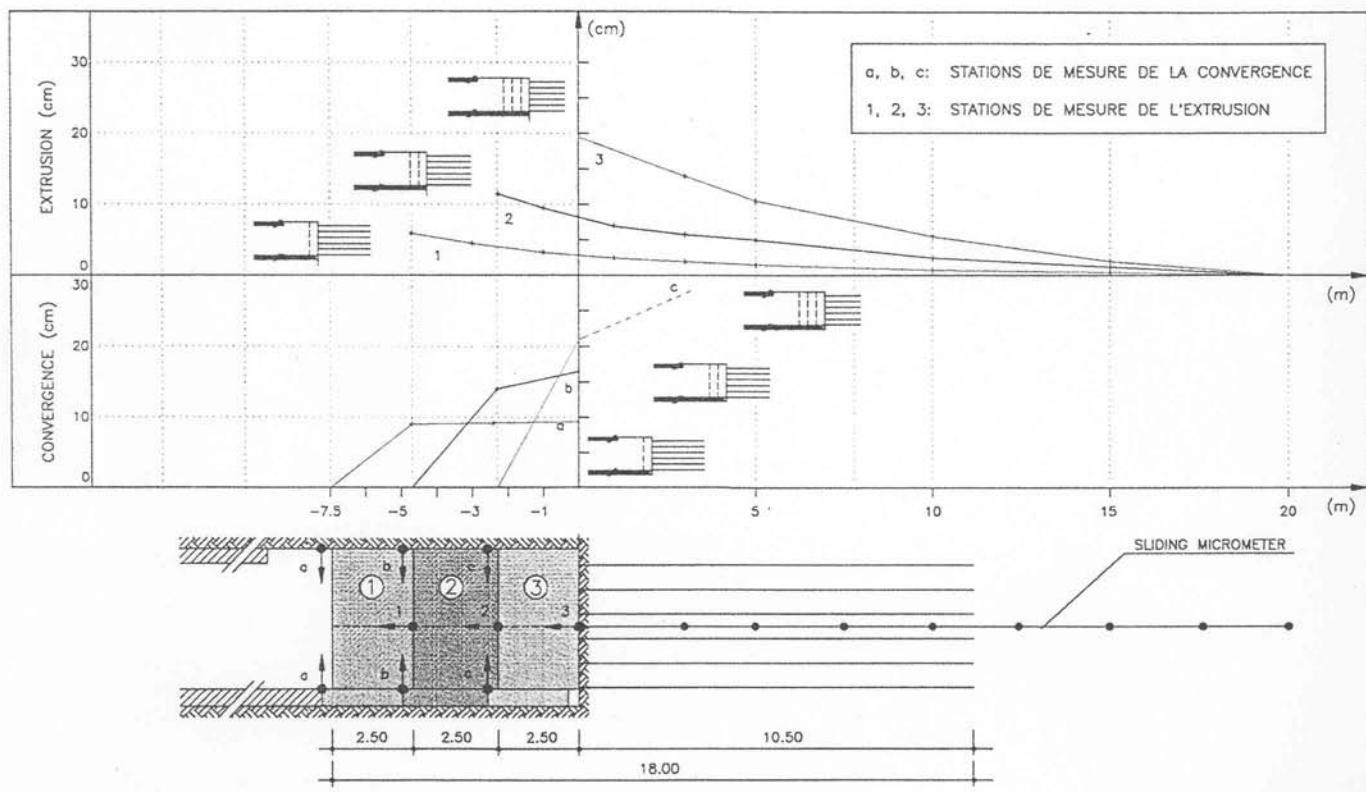


FIG. 20

dello scavo deve essere il riferimento principale per il progettista di gallerie, anche perché essa è indice dell'innesto e della posizione dell'effetto arco rispetto al profilo di scavo, ovvero della condizione di stabilità raggiunta dalla galleria;

sottolineano l'importanza di tenere sotto controllo la risposta deformativa del sistema fronte - nucleo d'avanzamento e di non limitarsi al solo controllo della cavità in quanto, come si è visto, l'entità dei carichi agenti a lungo termine sul rivestimento dipende anche dalla rigidezza del nucleo;

evidenziano che la risposta deformativa nasce a monte del fronte in corrispondenza al nucleo d'avanzamento ed evolve a valle dello stesso lungo la cavità;

indicano chiaramente l'esistenza di un legame diretto tra la risposta deformativa del sistema fronte - nucleo d'avanzamento e quella della cavità, nel senso che quest'ultima è diretta conseguenza della prima;

dimostrano che operando sulla rigidezza del nucleo d'avanzamento con interventi protettivi e di rinforzo è possibile controllare la sua deformabilità (estrusione, preconvergenza), controllando di conseguenza anche la risposta deformativa della cavità (convergenza).

I risultati della ricerca, in definitiva, permettono di guardare al nucleo d'avanzamento come nuovo strumento di stabilizzazione a breve ed a lungo termine per la cavità: uno strumento la cui resistenza e deformabilità giocano un ruolo determinante, in quanto in grado di condizionare l'aspetto che più di tutto deve preoccupare il progettista di gallerie e cioè: il comportamento del cavo all'arrivo del fronte d'avanzamento.

propre valeur quel que soit le type du terrain et quelle que soit la situation statique.

Dans cette optique, les trois situations fondamentales de contrainte et de déformation du système front - noyau d'avancement (déjà décrites dans la première partie de cette étude) définissent également les trois types possibles de comportement de la cavité (voir première partie, fig. 7):

- comportement à front stable (catégorie de comportement A)
- comportement à front stable à court terme (catégorie de comportement B)
- comportement à front instable (catégorie de comportement C)

Dans la situation à front stable, la stabilité globale du tunnel est pratiquement assurée, même en l'absence d'interventions de stabilisation. Dans les situations B et C, les résultats de la recherche indiquent que pour éviter les phénomènes d'instabilité du front et donc de la cavité, et pour essayer de revenir à une condition à front stable (A), il faut opérer par des interventions correctement équilibrées entre le front et la cavité et avec une intensité appropriée à la situation de contrainte réelle en fonction des caractéristiques de résistance et de déformabilité du milieu.

Si le système front - noyau d'avancement constitue d'une part le "voyant lumineux" du comportement futur de la cavité et de l'autre, un instrument de stabilisation dans les mains du projeteur, il est nécessaire de pousser aux conséquences extrêmes les connaissances extraordinaires acquises et développer, au niveau du projet et au niveau de la construction, une approche collant davantage à la réalité par rapport à celles qui ont été utilisées jusqu'ici.

L'approche selon l'analyse des déformations contrôlées dans les roches et dans les sols, dont les concepts et les informations seront illustrés dans la troisième partie de cette étude, représente en ce sens une réponse logique et sans équivoque aux résultats de la recherche.

Per questo motivo si può affermare che il progettista di gallerie, per essere in grado di approntare un progetto adeguato a garantire la stabilità a breve ed a lungo termine dell'opera, deve puntare tutta la propria attenzione sui fenomeni tenso-deformativi del sistema fronte-nucleo d'avanzamento, ovvero sulle sue condizioni di stabilità.

Ne consegue che il comportamento del sistema fronte - nucleo d'avanzamento può venir assunto come riferimento per una normalizzazione delle gallerie, con il vantaggio di essere un parametro che conserva la propria validità in tutti i tipi di terreno ed in tutte le situazioni statiche.

In questa ottica, le tre fondamentali situazioni tenso-deformative del sistema fronte-nucleo d'avanzamento (già descritte nella prima parte di questa trattazione) individuano anche i tre possibili tipi di comportamento della cavità (vedi parte 1^a, fig 7):

comportamento a fronte stabile (categoria di comportamento A);

comportamento a fronte stabile a breve termine (categoria di comportamento B);

comportamento a fronte instabile (categoria di comportamento C).

Nella situazione a fronte stabile la stabilità globale della galleria è praticamente garantita anche in assenza di interventi di stabilizzazione. Nelle situazioni B e C i risultati della ricerca indicano che per evitare i fenomeni d'instabilità del fronte e quindi del cavo, e cercare di riportarsi verso una condizione a fronte stabile (A), occorre operare con interventi opportunamente bilanciati tra fronte e cavo e d'intensità adeguata alla situazione tensionale reale rapportata alle caratteristiche di resistenza e deformabilità del mezzo.

Se il sistema fronte-nucleo d'avanzamento costituisce, da un lato la "spia" del futuro comportamento della cavità, dall'altro lato un nuovo formidabile strumento di stabilizzazione nelle mani del progettista, è necessario portare alle estreme conseguenze le straordinarie cognizioni acquisite e sviluppare un approccio progettuale e costruttivo più aderente alla realtà, rispetto a quelli sino ad oggi in uso.

L'approccio secondo l'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli, i cui concetti informatori saranno illustrati nella terza parte di questa trattazione, rappresenta, in questo senso, una risposta conseguente ed inequivocabile ai risultati della ricerca.

Bibliografia

- [1] KASTNER H., "Statik des Tunnel-und Stollenbaus", 1971
- [2] RABCEWICZ L.V., "The New Austrian Tunnelling Method", Water Power, 1969
- [3] TAMEZ E., "Estabilidad de tuneles excavados en suelos", Conferenza presso la Mexican Engineering Academy, Messico 1984
- [4] KOVARIK, "On the Existence of the NATM: Erroneous Concepts behind the New Austrian Tunnelling Method", Tunnel, 1/1994
- [5] LUNARDI P., "Progetto e costruzione di gallerie: presentazione dell'approccio ADECO-RS", ISMES - Programma di istruzione permanente - Bergamo, 14-16 novembre 1988
- [6] LOMBARDI G., AMBERG W.A., "Une méthode de calcul élastoplastique de l'état de tension et de déformation autour d'une cavité souterraine", Congresso Internazionale ISRM, Denver, 1974
- [7] 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", Colloquio Internazionale su "Tunnels et micro-tunnels en terrain meuble - Parigi 7-10 Febbraio 1989
- [8] 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
- [9] 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
- [10] LUNARDI P., "Glass-resin tubes to stabilize the face of tunnels in difficult cohesive soils", SAIE : Seminario su "The application of fiber Reinforced Plastics (FRP) in civil structural engineering" - Bologna, 22 Ottobre 1993
- [11] LUNARDI P., "La stabilité du front de taille dans les ouvrages souterraines en terrain meuble: études et expériences sur le renforcement du noyau d'avancement", Symposio Internazionale su "Renforcement des sols: expérimentations en vraie grandeur des années 80", Parigi, 18 novembre 1993
- [12] AUTOSTRADE S.p.A., "Norme Tecniche d'Appalto", 1992
- [13] ITALFERR SIST.A.V.S.p.A., "Capitolato di Costruzione Opere Civili", 1992
- [14] A.N.A.S., "Capitolato Speciale d'Appalto, Parte II: Norme Tecniche", 1993

