

PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONGRESS ON TUNNELS AND WATER
MADRID / 12-15 JUNE 1988

TUNNELS AND WATER

*Water and its influence on the design,
construction, and exploitation of
tunnels and underground works*

Edited by

J.MANUEL SERRANO

Spanish Tunnelling Association (AETOS)

OFFPRINT



A.A.BALKEMA / ROTTERDAM / BROOKFIELD / 1988

L'emploi de microtunnels pour la réalisation d'ouvrages souterrains de grande portée: L'arc cellulaire

P.Lunardi
Université de Florence, Italie

RESUME: on expose les motivations qui ont amené à l'utilisation de l'arc cellulaire pour la réalisation de grandes cavités souterraines; après une brève description du procédé de construction et des avantages présentés par ce système, à l'aide d'un exemple d'application on décrit les calculs comparatifs qui ont été effectués, au cours de son projet, vis-à-vis des méthodes d'excavation traditionnelles.

1 GENERALITES

La réalisation d'un ouvrage souterrain entraîne toujours une altération de l'équilibre naturel pré-existant dans le sol et la réussite de l'opération dépend de la capacité de la nature et de l'homme de rétablir à long terme une nouvelle condition d'équilibre stable.

Si l'on considère la situation représentée, en termes de sollicitations, par un champ de contraintes dans le sol uniformément croissantes avec la profondeur, l'introduction d'une cavité induit inévitablement une modification de ce champ, qui entraîne un flux de contraintes détourné vers régions à l'extérieur du tunnel.

Ceci a lieu, en général, au prix de phénomènes déformatifs, qui peuvent être plus ou moins importants en dépendance des ouvertures en jeu et des sols traversés.

La conséquence naturelle de ceci est la formation dans le sol de l'"effet voûte", qui rend possible l'existence dans le sous-sol de grandes cavités et galeries naturelles et dont la formation est liée à la stabilité, à bref et à long terme, de tout ouvrage souterrain réalisé par l'homme.

L'"effet voûte" peut être regardé comme la réaction de la nature à la blessure qui lui est portée, réaction par laquelle la nature même essaie, si possible, de cicatrifier cette blessure en rétablissant une nouvelle configuration d'équilibre stable. Cette tentative, selon la situation géo-morphologique, la géométrie de l'ouvrage et le type de sol, pourra faillir ou être couronnée de succès.

Le rôle de l'homme, et de l'ingénieur

géo-mécanique en particulier, est la coordination de cet effort spontané de la nature en adéquance les techniques, les phases et les temps de construction, aux sols, à la situation de l'endroit et, bien sûr, à l'importance de l'ouvrage qu'il compte réaliser.

2 LE PROBLEME STATIQUE DES GALERIES DE GRANDE PORTEE

Quand le diamètre de l'ouvrage à creuser est supérieur à 12-14 m, il est nécessaire d'adopter des précautions particulières.

En fait, il y a manifestement une nette différence entre le creusement d'un boyau de quelque mètre de portée et d'une cavité de taille importante. On sait que la masse de sol aux alentours de la cavité perturbée par le percement (dont le volume détermine l'intensité des phénomènes déformatifs et des poussées dues à la pesanteur) est proportionnelle au diamètre de l'excavation.

Ceci signifie que, plus la taille de l'ouvrage à bâtir est importante, plus les difficultés auxquelles la nature doit faire face pour rétablir une nouvelle condition d'équilibre stable sont grandes, ce qui rend nécessaire l'aider par le biais de techniques d'excavation et de stabilisation appropriées.

Dans le cas de tunnels de grande portée, ces techniques consistent, en général, à réaliser l'avancement de l'excavation à section partialisée, de façon à obtenir une déviation graduelle du flux des contraintes autour de l'ouvrage.

Dans les sols incohérents, à des profon-

jeurs supérieures au rayon d'excavation, ils existent les conditions de couverture pour réaliser (au moins artificiellement, si non même naturellement) la canalisation des contraintes vers l'intérieur du sol. Dans ce cas, la stabilisation du tunnel peut être effectuée en traitant le sol autour de l'excavation de façon à augmenter sa résistance, jusqu'à des valeurs compatibles avec sa nouvelle fonction d'arc portant naturel.

Ceci est fréquemment obtenu en préconsolidant le matériau dans une région autour de l'excavation par injections traditionnelles ou par "jet-grouting", l'extension du traitement étant telle à obtenir un arc de terrain avec bonnes caractéristiques de résistance.

Si, au contraire, on est contraint à opérer en présence de couvertures plus réduites, inférieures au rayon de la future galerie, par faute d'épaisseurs au-dessus de la calotte on ne peut pas réaliser une consolidation suffisante, à cause aussi des difficultés qu'on rencontre en effectuant des injections dans le terrain de façon satisfaisante avec des valeurs de pression réduites.

Ce problème est aggravé et de solution difficile dans le cas de galeries à réaliser en milieu urbain, au dessous de bâtiments et de structures fort sensibles aux tassements du sol en surface.

L'excavation de galeries à trou borgne de grande portée en conditions similaires a été, jusqu'à aujourd'hui, un problème insoluble qui a obligé à se rabattre sur des solutions à ciel ouvert qui, de toute façon, ne sont pas toujours possibles en zones bâties. La seule façon pour rendre faisable un tel ouvrage est la réalisation, par des matériaux capables de fournir des valeurs de résistance supérieures au terrain consolidé, d'un arc artificiel portant, avant de procéder avec le véritable creusage de la future galerie.

Ces considérations ont abouti à l'idée de l'"arc cellulaire".

3 L'ARC CELLULAIRE

Un "arc cellulaire" est une structure composite assimilable à un grillage à section semi-circulaire (fig. 1), dont les éléments longitudinaux (cellules) sont formés par des tuyaux préfabriqués en b.a., qui une série de gros cintres transversaux (arcs) rend collaborant entre eux.

Du point de vue constructif, il est intéressant de souligner que cette structure dérive de l'assemblage coordonné de technologies déjà connues et amplement déve-

loppées.

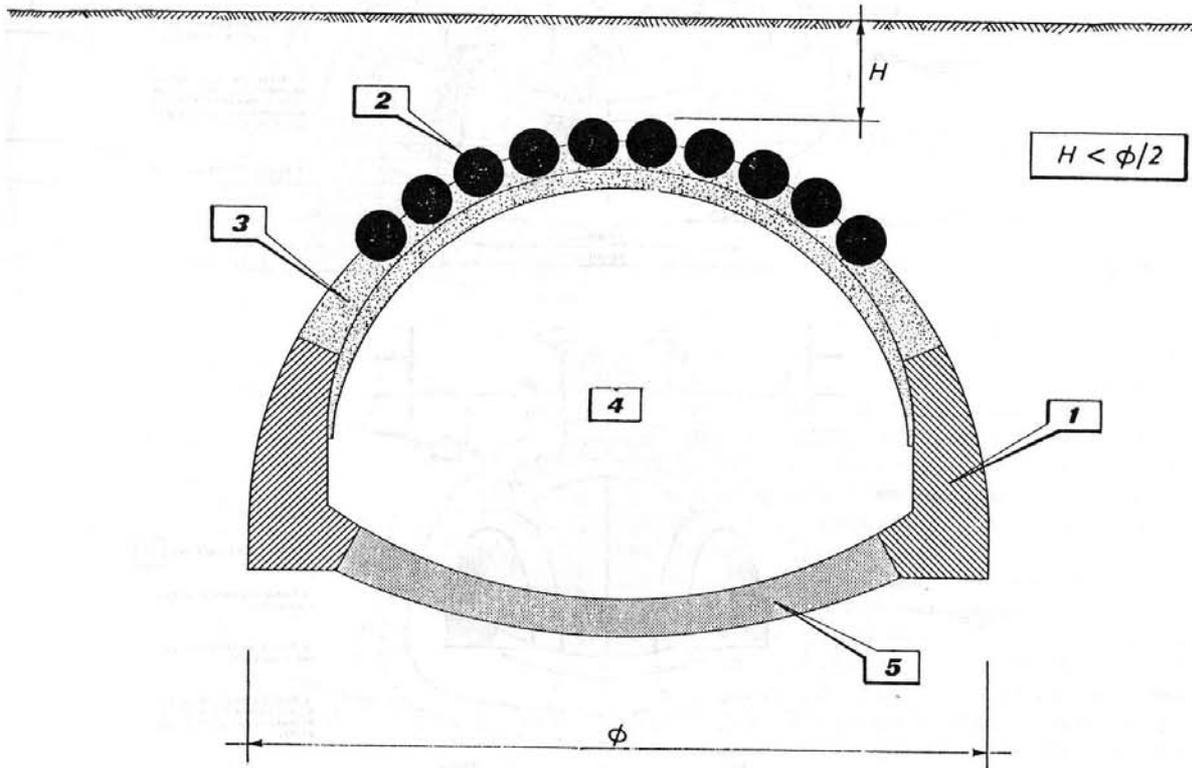
La réalisation pratique a lieu en 9 phases principales (fig. 2):

- a) de l'intérieur d'une galerie de service, creusée en axe à la galerie finale, on effectue systématiquement des préconsolidations du terrain autour des futures galeries des piédroits et, éventuellement, le long de l'arc de voûte. Il faut noter que la préconsolidation en correspondance de la calotte de la galerie vise au but de donner au matériau une faible cohésion, ce qui peut être superflu pour plusieurs types de sol;
- b) percement des galeries des piédroits;
- c) préparations des chambres de poussée pour l'enfoncement, avec la méthode du "pousse-tube", d'une série de tuyaux en b.a., accostés l'un l'autre, en correspondance du profil de calotte de la future galerie;
- d) réalisation des microtunnels de calotte
- e) excavation des coffrages (dont les parois sont constituées par le sol même) pour la mise en oeuvre des arcs de liaison en b.a. à travers les microtunnels. Le marinage est effectué par les galeries latérales;
- f) coulée des piédroits de la galerie finale;
- g) armature et remplissage par béton des microtunnels longitudinaux de calotte et des arcs transversaux de liaison;
- h) excavation du sol à l'intérieur de la section de la galerie finale, sous la protection de l'arc cellulaire déjà actif;
- i) coulée de la voûte renversée.

L'emploi de l'arc cellulaire s'adapte bien à plusieurs types de sols et d'ouvrages souterrains, si bien qu'il semble intéressant, en particulier, dans le cas de galeries de grande portée à creuser en milieu urbain avec une couverture limitée. La caractéristique qui rend cette technique décidément avantageuse (et parfois même irremplaçable) vis-à-vis des méthodes traditionnelles, est la manière suivant laquelle a lieu le passage de la condition d'équilibre initiale du terrain non perturbé à la condition d'équilibre finale, quand la galerie est terminée.

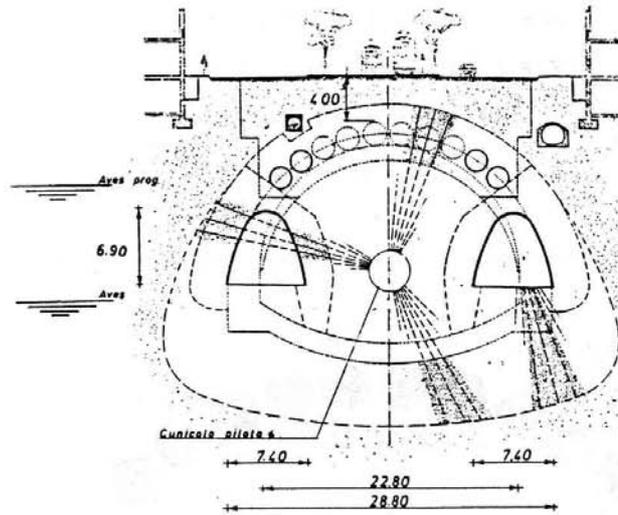
L'efficacité des systèmes d'avancement traditionnels est basée sur l'effet tridimensionnel du front, favorable à la statique à court terme du trou. Toutefois, ceci oblige à accepter un certain montant de phénomènes déformatifs: ceux qui ont lieu dans le sol avant que le front d'avancement arrive doivent être acceptés entièrement, à moins de recourir à des lourdes et coûteuses interventions de préconsolidations du noyau.

ARCO CELLULARE
CELLULAR ARCH
ARC CELLULAIRE
ARCO CELULAR



	ITALIANO	ENGLISH	FRANÇAIS	ESPAÑOL
	<i>fasi esecutive</i>	<i>phases of construction</i>	<i>phases exécutives</i>	<i>etapas de ejecución</i>
1	getto piedritti	pillars casting	coulée piédroits	hormigonado piederechos
2	infissione tubi prefabbricati	driving precasted pipes	fouçage des tubes préfabriqués	instalacion tubos prefabricados
3	getto arco cellulare di calotta	cellular arch casting	coulée arc cellulaire de voûte	hormigonado arco celular boveda
4	scavo	excavation	excavation	excavacion
5	getto arco rovescio	inverted arch casting	coulée radier	hormigonado solera

fig. 1

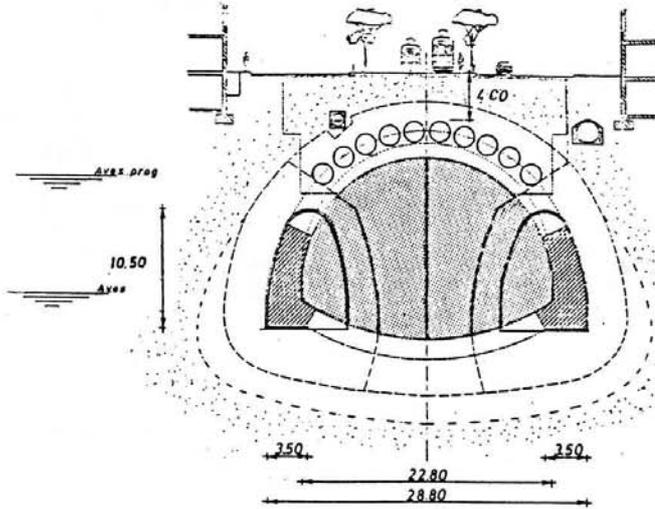


FASI ESECUTIVE A

• Consolidamento zona tubi e gallerie laterali

• Infilazione tubi partendo dalle reali verso la calotta e integrazione con solidamento calotta gallerie laterali

• Scavo 1° fase gallerie laterali

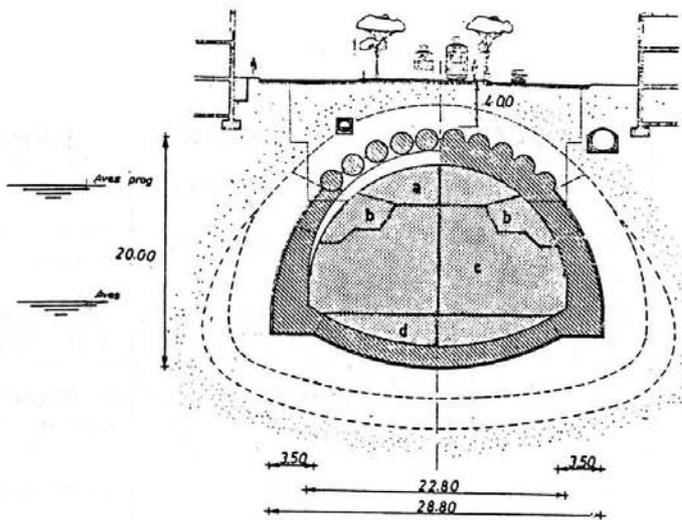


FASI ESECUTIVE B

• Completamento consolidamenti

• Scavo di 11° fase gallerie laterali

• Esecuzione impermeabilizzazione piedritti, armatura e getto pilastri



FASI ESECUTIVE C

• Scavo archi di collegamento tra i tubi (a) e tra i tubi e i piedritti (b), armatura e getto archi e tubi

• Scavo calotta (c)

• Scavo strazza e arco rovescio (d), getto sottofondo ad esecuzione impermeabilizzazione, armatura e getto arco rovescio

fig. 2

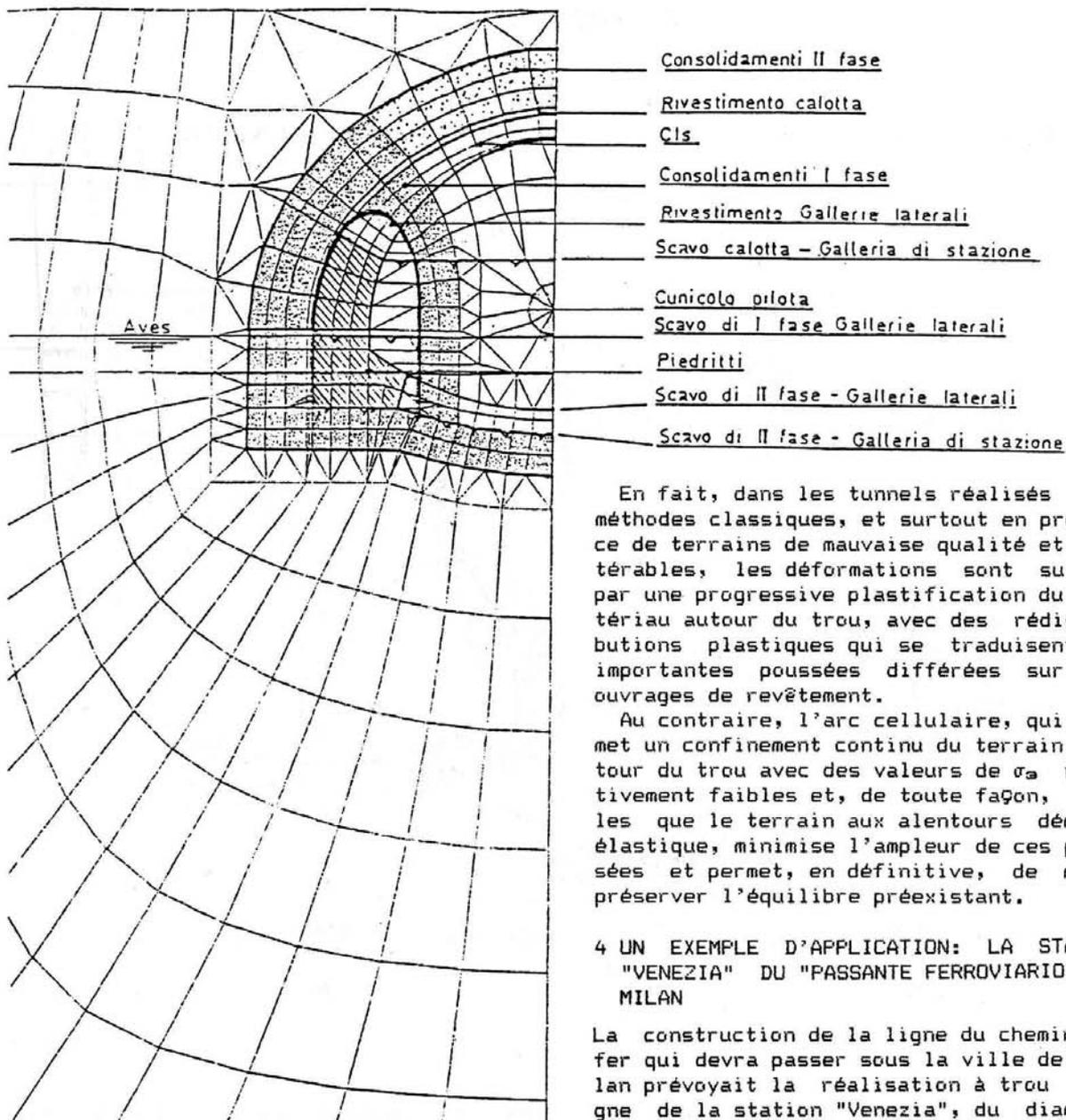


fig. 3

Dans le cas de galeries de grande portée, l'ampleur de ces déformations peut être importante et, dans le cas de tunnels métropolitains, se traduit en tassements en surface considérables.

Au contraire, en renonçant à la contribution statique du front, l'arc cellulaire permet de minimiser, et souvent d'annuler, ce type de déformations, et donc de réaliser des excavations corticales, de portée autrement impensable à trou borgne, sans provoquer des tassements importants en surface. Le fait d'empêcher les phénomènes déformatifs en certains types de matériaux peut entraîner des avantages remarquables, aussi en ce qui concerne les poussées sur le revêtement.

- Consolidamenti II fase
- Rivestimento calotta
- CIs
- Consolidamenti I fase
- Rivestimento Gallerie laterali
- Scavo calotta - Galleria di stazione
- Cunicolo pilota
- Scavo di I fase Gallerie laterali
- Piedritti
- Scavo di II fase - Gallerie laterali
- Scavo di II fase - Galleria di stazione

En fait, dans les tunnels réalisés avec méthodes classiques, et surtout en présence de terrains de mauvaise qualité et altérables, les déformations sont suivies par une progressive plastification du matériau autour du trou, avec des redistributions plastiques qui se traduisent en importantes poussées différées sur les ouvrages de revêtement.

Au contraire, l'arc cellulaire, qui permet un confinement continu du terrain autour du trou avec des valeurs de σ_a relativement faibles et, de toute façon, telles que le terrain aux alentours demeure élastique, minimise l'ampleur de ces poussées et permet, en définitive, de mieux préserver l'équilibre préexistant.

4 UN EXEMPLE D'APPLICATION: LA STATION "VENEZIA" DU "PASSANTE FERROVIARIO" DE MILAN

La construction de la ligne du chemin de fer qui devra passer sous la ville de Milan prévoyait la réalisation à trou borgne de la station "Venezia", du diamètre intérieur de 22.80 m.

Le diamètre global de l'excavation était donc de 29 m env. et, si l'on tient compte des couvertures extrêmement réduites (4 ÷ 5 m), en présence de sous-services et de structures pré-existantes pour les premiers mètres de terrain, ainsi que de la nature du sol (alluvions récents et incohérents, partiellement plongés sous nappe), on comprend que, dans le cas considéré, les problématiques au regard de la stabilité du trou précédemment exposées étaient enflées.

Le projet initial prévoyait la réalisation d'une consolidation effectuée en plusieurs étapes au porteur de la galerie, l'exécution de deux galeries latérales qui auraient abrité les piédroits du revêtement, l'excavation de la voûte, avec mise

COUPE TYPE

Galleria di linea

Stazione VENEZIA

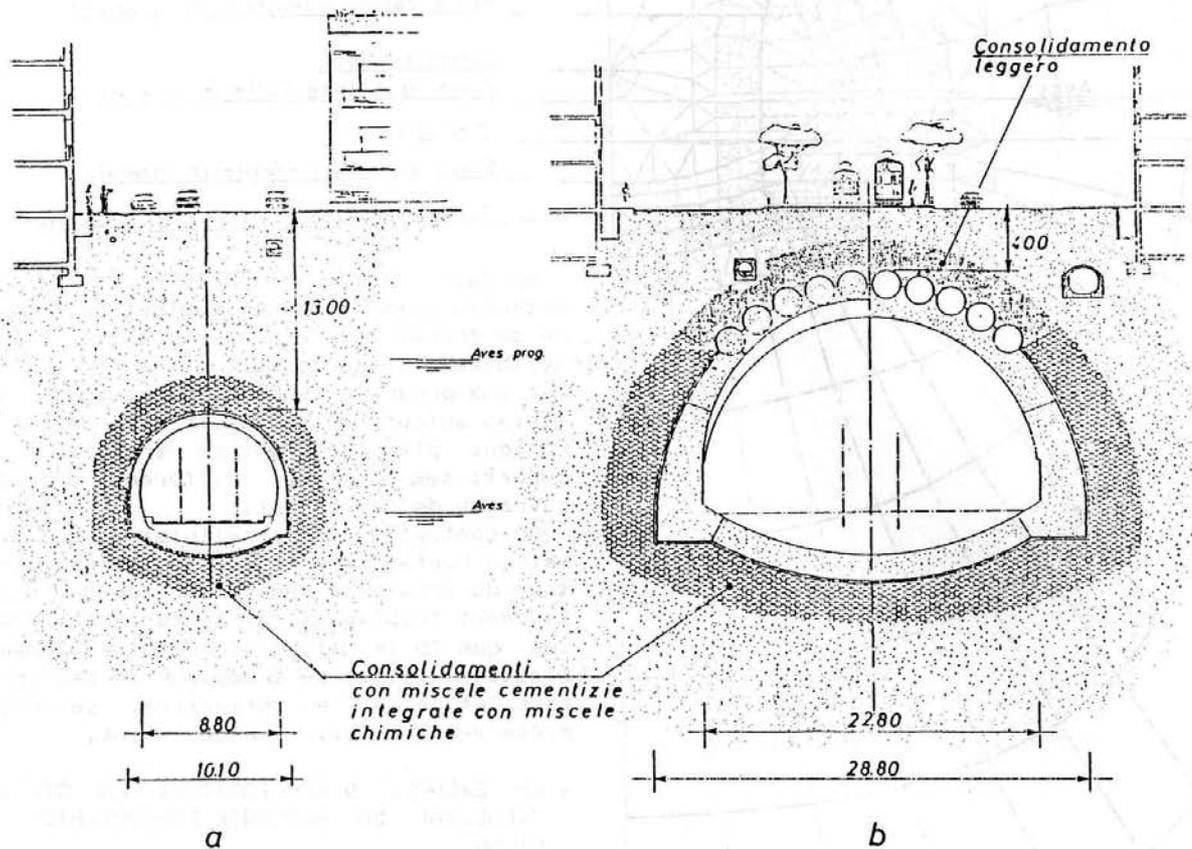


fig. 4

en oeuvre d'un prérevêtement constitué par cintres en béton projeté et avec coulée du revêtement final en b.a., et finalement l'achèvement de l'excavation et la coulée de la voûte renversée.

Pourtant, cette technique, qui avait déjà été amplement exploitée avec succès pour les galeries de ligne ($\phi = 8.80$ m) et pour cavités de portée supérieure avec couverture suffisante, suite à une première série de vérifications (fig. 3) effectuées par la méthode des éléments finis, s'avéra non apte à assurer, dans ce cas particulier, une suffisante sécurité vis-à-vis de la stabilité du trou et du contrôle des tassements en surface.

En fait, la simulation numérique mit en évidence la formation de vastes zones plastifiées lors de l'excavation de la calotte et le fait que les tassements surfaci-

ques atteignaient des valeurs très élevées, absolument incompatibles avec le maintien du fonctionnement des structures et des sous-services pré-existants.

La cause de ceci était à attribuer à l'impossibilité de pouvoir réaliser un adéquat épaisseur de terrain consolidé dans la zone de calotte, faute de couvertures réduites et du conséquent faible confinement du sol, et à l'excessive déformabilité du prérevêtement.

La fig. 4 montre la comparaison entre les géométries et les consolidations utilisées pour la galerie de ligne et pour la station Venezia. En fig. 4b on illustre le gabarit de la Station réalisée avec la méthode de l'"arc cellulaire", à laquelle on fit recours pour surmonter les problématiques précédemment exposées.

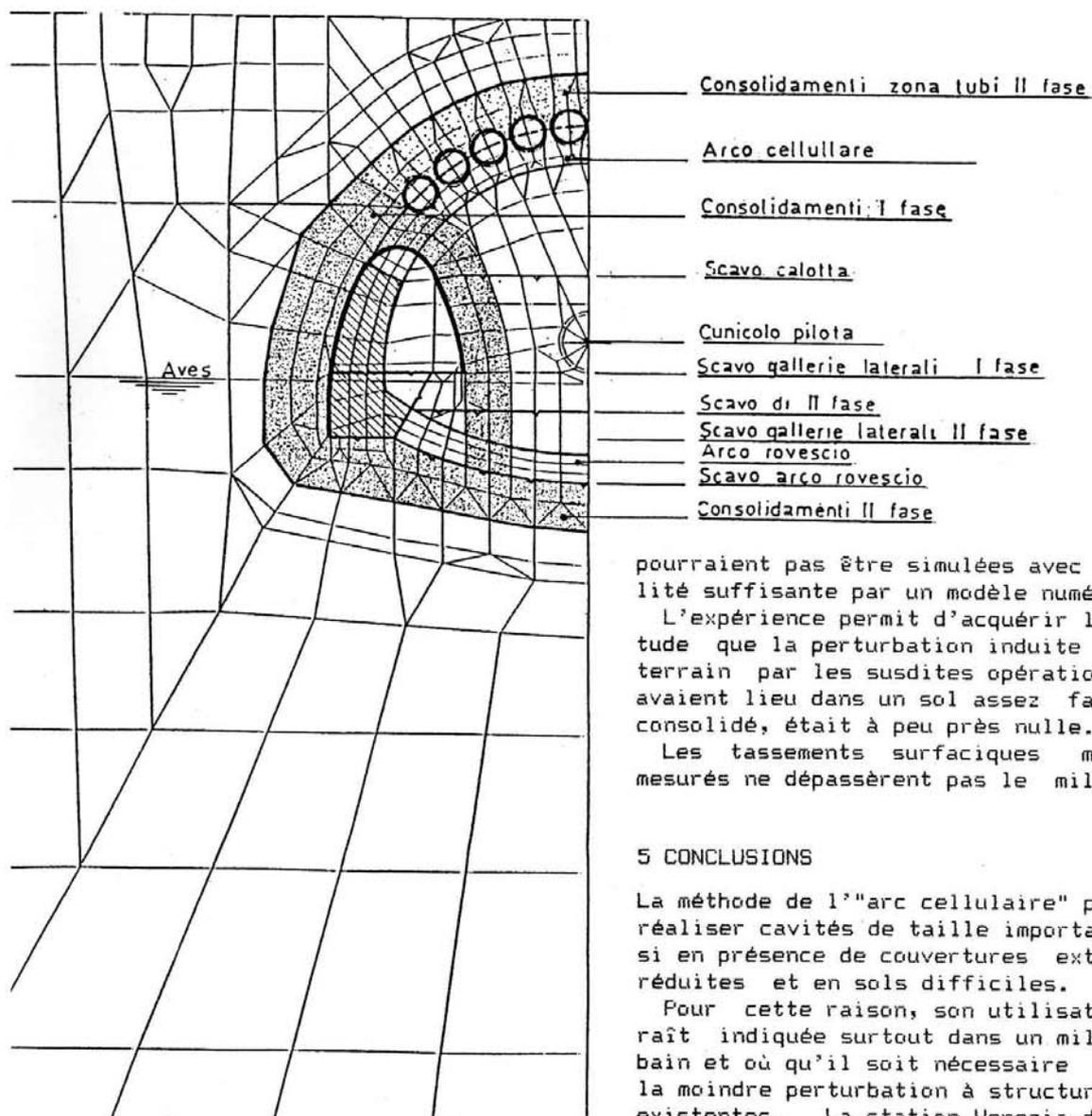


fig. 5

Les analyses par E.F. effectuées pour la galerie réalisée avec la méthode de l'"arc cellulaire" (fig. 5), témoignèrent la validité du choix de projet, puisque, à l'ouverture des excavations en calotte, aucune plastification du terrain ne fut observée et les tassements surfaciques calculés ne dépassèrent pas la valeur de quelques millimètres.

Dans le cadre de la successive réalisation du projet, qui est encore en cours, on effectua aussi, sur échelle réelle, un essai d'enfoncement de 3 tuyaux et de connexion des mêmes à l'aide de segments d'arc, après avoir partiellement démolis les tuyaux. L'essai, qu'on rapportera plus en détail dans un autre mémoire, fut instrumenté avec extensimètres incrementaux pour la mesure des déformations du sol pendant les phases de travail, qui ne

pourraient pas être simulées avec crédibilité suffisante par un modèle numérique.

L'expérience permit d'acquiescer la certitude que la perturbation induite dans le terrain par les susdites opérations, qui avaient lieu dans un sol assez faiblement consolidé, était à peu près nulle.

Les tassements surfaciques maximales mesurés ne dépassèrent pas le millimètre.

5 CONCLUSIONS

La méthode de l'"arc cellulaire" permet de réaliser cavités de taille importante aussi en présence de couvertures extrêmement réduites et en sols difficiles.

Pour cette raison, son utilisation paraît indiquée surtout dans un milieu urbain et où qu'il soit nécessaire apporter la moindre perturbation à structures pré-existantes. La station Venezia du "Passante Ferroviario Metropolitano" de la ville de Milan, qui est actuellement en construction, avec ses 29 m env. de portée et 4 m de couverture seulement, est une confirmation de ce qu'on a affirmé.

Toutefois, on juge possible atteindre des portées de percement encore supérieures, puisque la méthodologie se prête à être employée avec extrême flexibilité, en variant de façon opportune la taille des arcs et des cellules (tuyaux) et l'entraxe des arcs mêmes.

REMERCIEMENTS

L'Auteur remercie M.M. Adolfo Colombo (Directeur Technique de "Metropolitana Milanese"), Renzo Bindi et Enrico Maria Pizzarotti (Rocksoil S.r.l., Milan) pour leur coopération à la mise au point de la technologie de l'arc cellulaire.