

UN NOUVEAU SYSTEME CONSTRUCTIF POUR LA REALISATION DE TUNNEL DE GRANDE PORTEE DANS DES TERRAINS NON COHERENTS : L'"ARC CELLULAIRE"

par Pietro LUNARDI*

Mot-clé. - Tunnel.

Résumé. - L'ouverture d'une cavité dans des terrains non cohérents, au-delà d'une certaine portée d'excavation, ne peut se réaliser avec des méthodologies traditionnelles, surtout si le recouvrement est réduit, comme dans le cas des stations de métro.

L'"arc cellulaire" est un nouveau système de construction qui permet de surmonter des difficultés en réalisant la totalité de la structure portante, le confinement du terrain et le revêtement de la cavité, avant l'excavation même.

Après avoir discuté les principes directeurs du système, on présente les expériences obtenues au cours de la première application, dans le sous-sol de Milan, pour la construction d'un tunnel d'environ 30m de diamètre externe et seulement 4m de recouvrement de terrain non cohérent.

En conclusion du mémoire, on expose quelques considérations sur les développements possibles et sur les perspectives apportées par ce nouveau système constructif.

A new large span tunnels method in non cohesive soil : the "Cellular Arch"

Key-word. - Tunnel.

Abstract. - The excavation of cavities in loose ground, exceeding a certain dimension, is not feasible using traditional methods, especially if the overburden is small, as often is the case place in underground railway stations.

The "Cellular Arch" method allows these difficulties to be overcome by creating the complete earth supporting structure and cavity lining even before the excavation is started.

After a discussion on the basic principles of the method, we will talk about the experiences gained during its first application in the subsoil of Milan for building the "Venezia" Subway Station on the Milan Railway Link, a cavity of nearly 30m outside diameter and just 4m of incoherent soil overburden.

To conclude, some considerations about the possible developments and prospects offered by this new method of construction will be described.

* "Rocksoil", Piazza San Marco, 1 - Milano - Italie.

I. - INTRODUCTION

Si la réalisation d'excavations en trou borgne de grandes dimensions ($\phi > 15\text{m}$) entraîne normalement des problèmes peu communs de conception et de construction, c'est dû surtout à l'importance des masses de terrain mobilisées par l'excavation, mais aussi à la difficulté de contrôler en phase opératoire n'importe quel genre d'instabilité, tout en tenant compte de l'échelle des sections en question. C'est de là que dérive la nécessité, pour ceux qui ont à concevoir et à construire une cavité de grandes dimensions, de connaître parfaitement la nature des terrains pour prévoir, dès le diagnostic, les déformations lors du creusement et également pour pouvoir programmer, au cours du traitement, les phases, les cadences, les systèmes d'excavation et les interventions de stabilisation nécessaires pour garantir la stabilité de la cavité à court terme comme à long terme.

Plus particulièrement, il faut examiner avec soin de quelle façon le champ des contraintes modifié par l'ouverture de la cavité ("effet d'arc") pourra être contrôlé par le choix des phases d'excavation et des interventions de stabilisation et, par conséquent, comment la déviation des isostatiques pourra être pilotée avec les mêmes instruments (phases d'excavation et instruments de stabilisation) dans les différentes situations géostructurelles et géomécaniques des terrains rencontrés. Si l'on considère ensuite qu'un tunnel est d'autant plus stable que l'"effet d'arc", en correspondance avec la résistance moyenne du milieu, arrive à se mobiliser près des parois de l'excavation, on devra alors intervenir pour que, dans tous les cas, la concentration des tensions se produise dans un terrain dont la résistance est suffisante pour garantir que les sollicitations et les déformations associées restent dans le domaine élastique.

On peut représenter, dès lors, trois situations différentes :

a- l'"effet d'arc" se mobilise au voisinage du profil d'excavation : si la résistance et la déformabilité du terrain sont suffisantes pour garantir que la réponse aux états de contrainte induits par l'ouverture de la cavité reste dans le domaine élastique, la stabilité sera assurée par la mobilisation de l'"effet d'arc" près de la cavité ;

b- l'"effet d'arc" se mobilise loin du profil d'excavation : si le terrain réagit anélastiquement aux sollicitations induites par le creusement, le phénomène de plastification s'amorce au contour de la cavité, puis se propage, ce qui produit un déplacement des contraintes vers l'intérieur du massif où un état de contraintes de type triaxial se révèle compatible avec les caractéristiques de résistance du terrain ; l'"effet d'arc", qui tend ainsi à se produire loin du profil d'excavation, ne pourra être ramené vers la cavité que

par la réalisation d'interventions adéquates de stabilisation de l'anneau de terrain plastifié ;

c- l'"effet d'arc" n'arrive pas à se mobiliser. C'est le cas des terrains sans cohésion ou très meubles dans lesquels l'"effet d'arc", n'arrivant pas à se former de façon naturelle comme dans les cas a- et b-, doit être produit de façon artificielle.

Si la cavité à creuser possède une couverture suffisante ($H > \phi/2$) pour permettre l'emploi des techniques traditionnelles de consolidation (injection à basse pression, "jet-grouting", etc...), une bande de terrain traitée et d'épaisseur adéquate pourra garantir une distribution des contraintes acceptable sur le contour de la cavité au moment de son ouverture et, par conséquent, la mobilisation artificielle de l'"effet d'arc" à proximité de la calotte.

Mais, si les couvertures sont réduites au point ($H < \phi/2$) qu'il nous faut imposer une limitation des pressions d'injection et empêcher par conséquent la réalisation des consolidations ayant une fonction statique sur le contour de la cavité, le recours à des systèmes différents devient alors impératif.

Les techniques d'"excavation à ciel ouvert" (fig. 1) ne sont pas toujours réalisables en zone urbaine. Le seul système disponible jusqu'à aujourd'hui pour construire en trou borgne de grandes cavités corticales est le "Système Anvers", adopté pour la première fois au cours des années 70 pour la construction de quelques tunnels du métro de cette ville. Ce système consiste à enfoncer dans le terrain une série de tube côte à côte dans un plan horizontal, avec un pousse-tubes. Les tubes sont ensuite armés et remplis de béton, tandis que le terrain alentour est traité de façon à obtenir une plaque monolithique sous laquelle on peut commencer les travaux d'excavation (fig. 1). C'est avec ce système que l'on a réalisé jusqu'à présent, dans des terrains meubles, des tunnels d'une ouverture maximale de 18m. Au-delà de cette ouverture, les tubes, qui tiennent lieu de poutres appuyées aux extrémités, deviennent excessivement déformables et les tassements en surface deviennent incompatibles avec les conditions généralement imposées dans les aires urbaines.

En alternative au "Système Anvers", une solution qui paraît aujourd'hui possible, consiste à réaliser, à l'intérieur du terrain, un arc portant préfabriqué (d'une consistance supérieure à celle du terrain consolidé) avant de procéder au creusement même du tunnel.

C'est de cette réflexion que dérive l'idée de l'"Arc Cellulaire", un nouveau système constructif inventé et mis au point par le soussigné, et qui permet d'ouvrir des tunnels en trou borgne et à pleine section, de dimensions jusqu'à présent impensables ($\phi > 20\text{m}$), dans des terrains non cohérents ou semi-cohérents, même là où les couvertures sont inférieures au rayon d'excavation.

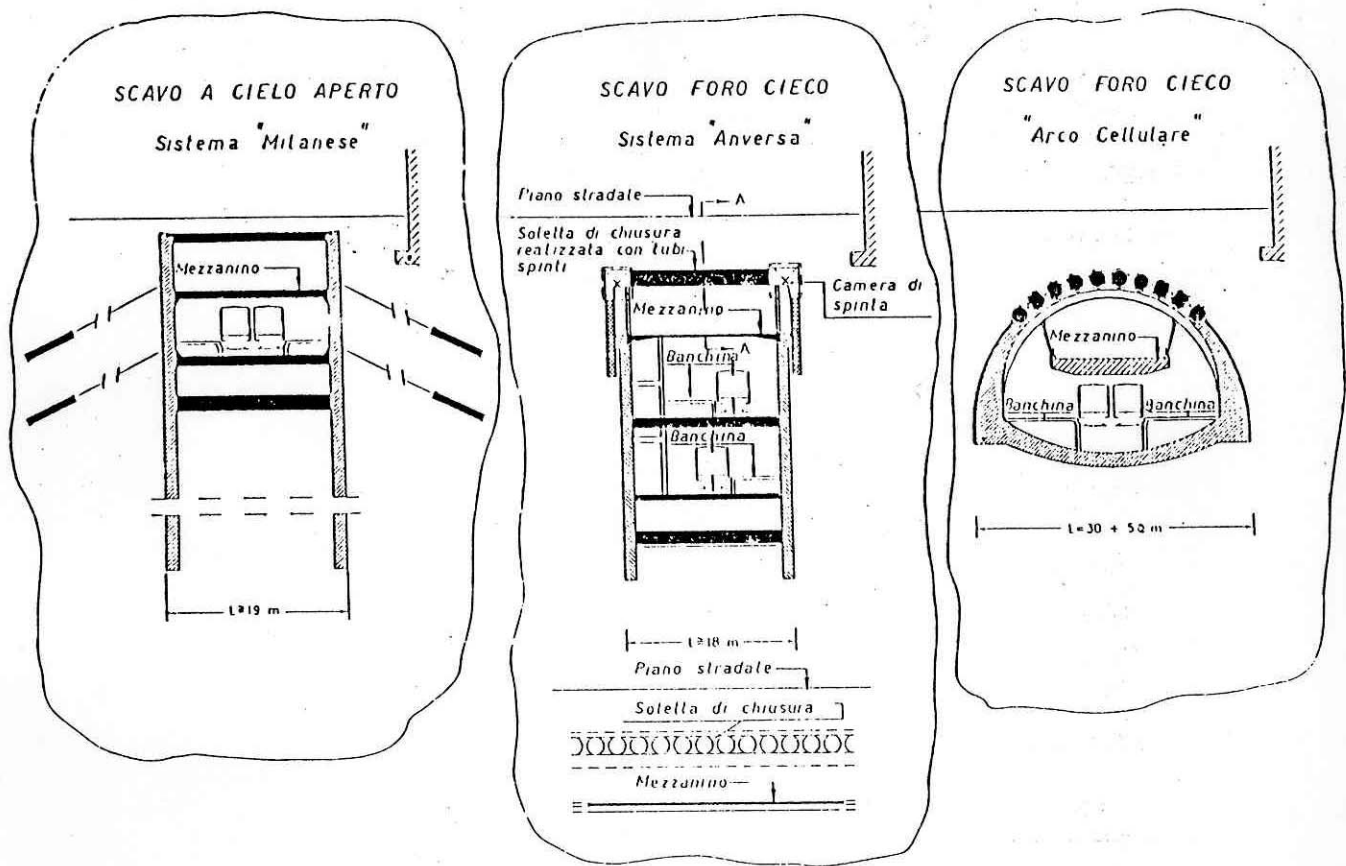


Fig. 1.- Evolution des systèmes de construction pour les grandes cavités souterraines : Creusement à "ciel ouvert", "Système Anvers", "Arc Cellulaire".

Fig. 1.- The evolution of construction systems for large metropolitan cavities : "cut and cover" method, "Antwerp System", "Cellular Arch".

II.- L'ARC CELLULAIRE

L'"Arc Cellulaire" (fig. 2 et 3) est une structure composite qui ressemble à une grille de section semi-circulaire, dont les éléments longitudinaux (cellules) sont constitués de tubes en béton armé et qui collaborent par une série de gros cintres transversaux (arcs).

Au point de vue constructif, il est intéressant de souligner que cette structure est née de l'assemblage coordonné de technologies déjà connues et amplement expérimentées.

Le système de l'"Arc Cellulaire" représente, en effet, une évolution du "Système Anvers". Au lieu d'utiliser les tubes de façon à former une plaque, ce système prévoit de les enfoncer horizontalement dans le terrain, d'après un profil sub-circulaire, en direction longitudinale par rapport à l'axe du futur tunnel, et de fixer la structure par des assemblages avec des arcs doubleaux, qui constituent la principale structure portante et qui sont posés sur un entre-axe adéquat (fig.2). On forme ainsi, avant même le creusement du tunnel, une grille semi-cylindrique en béton armé, qui est en mesure de garantir le transfert parfait des tensions vers le contour de la cavité tout en créant artificiellement l'"effet d'arc" indispensable à

la stabilité, à court terme comme à long terme, de l'ouvrage à creuser.

La réalisation pratique de l'"Arc Cellulaire" se fait en plusieurs phases (voir fig. 2, 3 et 4) :

a- Depuis un tunnel de service, percé dans l'axe du tunnel final, on exécute des préconsolidations systématiques du terrain tout autour des futurs tunnels de piédroit et éventuellement le long de l'arc de voûte. Il faut noter que la préconsolidation en correspondance de la calotte du tunnel a pour but de conférer une légère cohésion au terrain et il se peut qu'elle ne puisse être exécutée dans de nombreux types de matériaux.

b- Creusement des tunnels de piédroits.

c- Dans un chantier tout à fait indépendant du chantier inférieur des tunnels de piédroit, on prépare les chambres de poussée pour l'enfondement (avec la méthode du pousse-tubes) d'une série de tubes côte à côte en béton armé en correspondance du profil de la calotte du futur tunnel.

d- Réalisation des micro-tunnels de calotte.

e- Excavation, par des micro-tunnels, des coffrages (dont les parois sont constituées par le terrain même) pour la coulée des arcs d'assemblage en béton armé. L'évacuation des matériaux s'effectue par les tunnels latéraux.

- f- Coulée des piédroits du tunnel final.
- g- Coffrage et remplissage avec du béton, des micro-tunnels longitudinaux de calotte et des arcs doubleaux d'assemblage.
- h- Excavation du terrain à l'intérieur de la section du tunnel final, sous la protection de l'"Arc Cellulaire" pratiquement déjà actif.
- i- Coulée de l'arc revers.

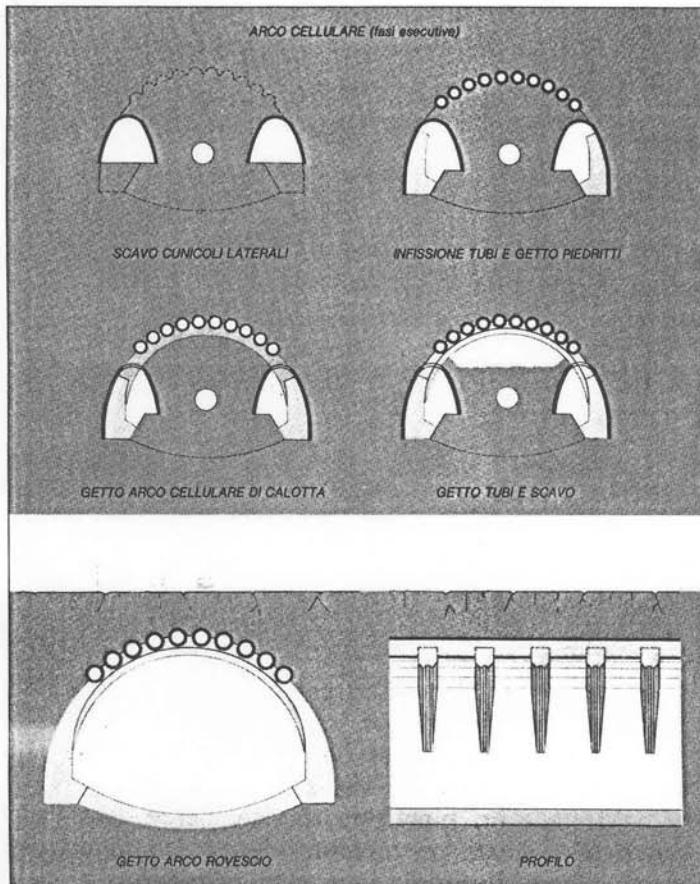


Fig. 2.- Synthèse des phases exécutives de l'"Arc Cellulaire" :

- 1- Bétonnage des piédroits ;
- 2- Enfoncement des tuyaux préfabriqués ;
- 3- Bétonnage de l'arc de calotte ;
- 4- Creusement ;
- 5- Bétonnage du radier.

Fig. 2.- Synthesis of the executive phases of the "Cellular Arch" :

- 1- Casting the posts ;
- 2- Jacking the precasted pipes ;
- 3- Casting the roof arch ;
- 4- Excavation ;
- 5- Casting the invert.

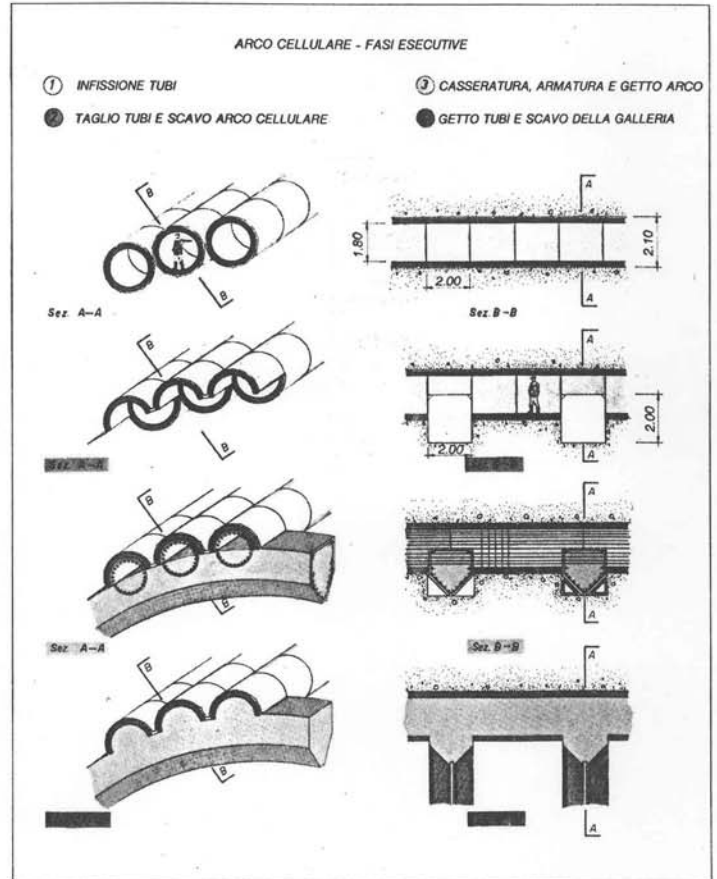


Fig. 3.- Détails de la construction des "cellules" et des "arcs".
Fig. 3.- Constructional details of the "cells" and "arches".

La caractéristique qui rend cette technique avantageuse par rapport aux méthodes traditionnelles, et peut-être même irremplaçable, est la façon dont se produit le passage de la condition d'équilibre initial du terrain non traité à celle d'équilibre final du tunnel terminé.

Les systèmes d'avancement traditionnels se basent sur l'effet tridimensionnel du front, qui contribue de façon déterminante à l'équilibre à court terme de la cavité. Si le noyau de terrain au front, en fonction de sa nature et des contraintes induites par le creusement, se présente comme étant déformable, les déformations successives qui sont amorcées dans le massif avant l'arrivée du front même doivent être acceptées par le projeteur, à moins de recourir à de graves et coûteuses interventions de préconsolidation lancées à l'avancement.

L'importance de ces déformations, dans le cas des tunnels à grande ouverture, peut être considérable et, dans le cas des tunnels de métro, peut se traduire par des tassements en surface inacceptables.

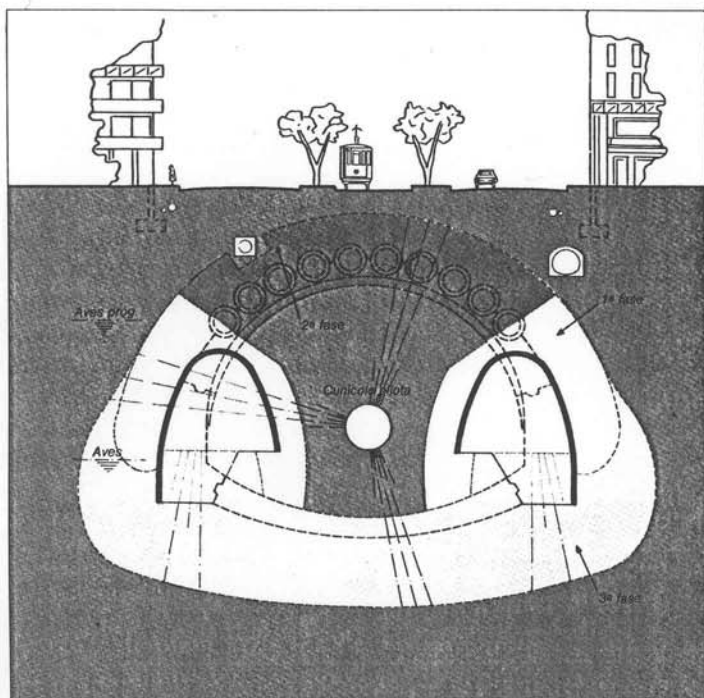


Fig. 4.- Schéma des préconsolidations à partir d'une galerie centrale de service.

Fig. 4.- Scheme of preconsolidation from the central service trench duct.

Au contraire, l'"Arc Cellulaire", tout en renonçant à l'apport statique du soutènement par le front, permet de réduire, et souvent même d'annuler, ce genre de déformations et donc de réaliser des excavations à faible profondeur d'une ouverture qu'on ne pourrait pas concevoir autrement en trou borgne, et cela sans provoquer des tassements considérables en surface.

Le fait d'empêcher des phénomènes de déformations dans certains types de matériaux peut présenter des avantages considérables même par rapport aux poussées du revêtement.

En effet, dans des tunnels réalisés avec des méthodes traditionnelles, et surtout quand les terrains sont faibles et altérables, la décompression progressive du matériau, qui se produit généralement sur le contour de la cavité, provoque des plastifications qui se traduisent inévitablement par des déformations et donc par d'importantes poussées différées sur les ouvrages de revêtement.

Au contraire, l'"Arc Cellulaire", en provoquant un confinement continu du terrain autour de l'excavation, avec des valeurs de σ_3 relativement contenues et qui sont de toutes façons telles qu'elles maintiennent le terrain environnant dans le domaine élastique, permet de réduire l'effet de ces poussées et, par conséquent, de conserver quasi inaltérés les équilibres préexistants.

III.- UN EXEMPLE DE PROJET : LA STATION "VENEZIA" DU "PASSANTE" FERROVIAIRE DU METROPOLITAIN DE MILAN

Dans le cadre de la construction de la ligne ferroviaire du métro sous la ville de Milan, il était prévu de réaliser la station "Venezia" en trou borgne avec un diamètre interne de 22,80m.

Le diamètre total d'excavation était ainsi voisin de 29m et la couverture était extrêmement réduite, de l'ordre de 4 à 5m, avec la présence de sous-services et de structures préexistantes dans les premiers mètres du terrain. Les sols sont des alluvions récentes sans cohésion partiellement immergées dans la nappe. On comprend combien étaient grandes, dans ce cas, les difficultés relatives à la stabilité de la cavité qu'il fallait construire.

Le projet initial prévoyait la réalisation d'une consolidation effectuée en plusieurs phases sur le contour de l'excavation, l'exécution de deux tunnels latéraux, futurs emplacements des piédroits du revêtement, l'excavation de la voûte avec la pose d'un pré-revêtement constitué de cintres et de béton projeté avec coulée du revêtement final en béton armé, et enfin la terminaison de l'excavation et la coulée du radier. Cette technique, déjà largement expérimentée avec succès pour les tunnels de la ligne ($\phi = 8,80\text{m}$) et pour des cavités d'une ouverture plus grande mais avec une couverture suffisante ($H > \phi/2$), se révéla à la suite d'une première série de vérifications, effectuées par le calcul avec la méthode des éléments finis, ne pas être en mesure de garantir, dans ce cas précis, une sécurité suffisante pour la stabilité de l'excavation et pour le contrôle des tassements en surface.

En effet, la simulation numérique a mis en évidence la formation d'importantes zones de terrain plastifié au moment de l'excavation de la calotte et a donné des valeurs assez élevées pour les tassements en surface, tout à fait incompatibles avec le maintien de la fonctionnalité des structures et des sous-services préexistants. La cause de tout cela doit être attribuée à l'impossibilité de réaliser une épaisseur suffisante de terrain consolidé dans la zone de calotte, étant donné la couverture réduite et, par conséquent, le faible confinement du terrain, et aussi à la déformabilité excessive du pré-revêtement.

Pour surmonter toutes ces difficultés, on a eu recours à la méthode de l'"Arc Cellulaire". La faisabilité technique et la mise au point de la méthode ont demandé des études approfondies et des expérimentations in situ.

La figure 5 illustre le maillage des éléments finis du modèle numérique pour l'étude du comportement tensio-déformatif de la structure et du terrain environnant au cours de la construction et pour l'ouvrage en service. Les résultats obtenus ont montré

la validité du choix du projet, en ce sens qu'au cours de chacun des quatorze passages de calcul, correspondant aux différentes phases de travail, aucune plastification importante du terrain n'a été mise en évidence et que les tassements de surface calculés ne dépassaient pas quelques millimètres.

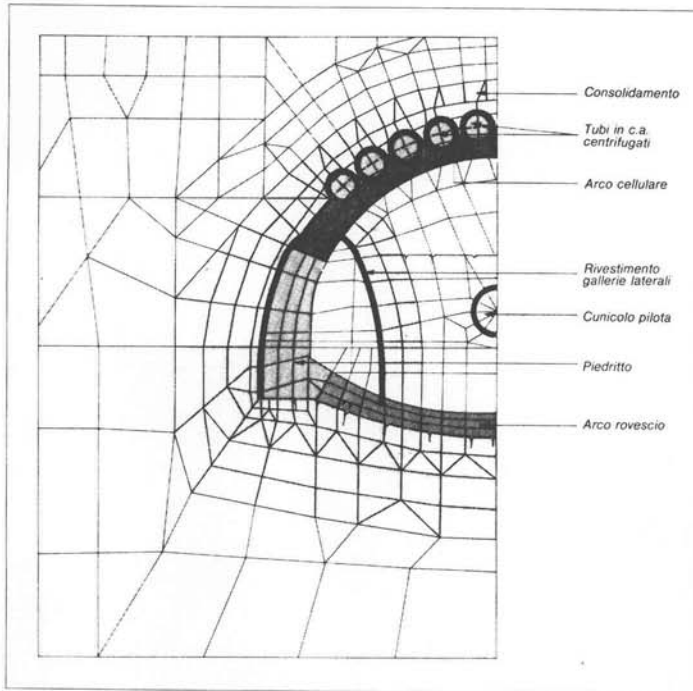


Fig. 5.- Détails du maillage des éléments finis utilisé.

Fig. 5.- Details of the finite elements mesh used.

Encouragés par ce résultat, et avant de procéder à l'application du système pour la réalisation de la Station elle-même, on a estimé opportun d'en approfondir l'étude et la mise au point en effectuant en vraie grandeur une épreuve d'enfoncement de trois tubes dans un terrain consolidé avec une intensité différente, ainsi que leur assemblage avec des segments d'arc, et cela après avoir démolí partiellement les tubes mêmes (fig. 6). Pour l'épreuve, on s'est servi d'instruments tels que des extensomètres pour mesurer les déformations du terrain pendant les différentes phases de travail, et aussi pour pouvoir constituer une vérification utile par rapport aux incertitudes du modèle numérique qui n'est pas toujours suffisamment sûr dans sa bidimensionnalité.

Cette expérimentation complexe nous a permis :

a- d'acquérir des informations et d'approfondir les connaissances sur les caractéristiques mécaniques du terrain naturel et du terrain traité ;

b- de vérifier la possibilité d'effectuer des micro-tunnels par la méthode du pousse-tubes à l'intérieur d'un terrain consolidé ;

c- d'établir les caractéristiques des mélanges de consolidation et l'intensité des traitements les plus appropriés même par rapport à l'avancement des micro-tunnels ;

d- de mettre au point, du point de vue opératoire, les séquences de démolition des tubes, d'excavation, de coffrage et de coulée des arcs ;

e- de vérifier que les déformations du terrain et les tassements en surface pendant les différentes phases de travail sont comprises dans des limites acceptables et conformes à celles qui ont été prévues.

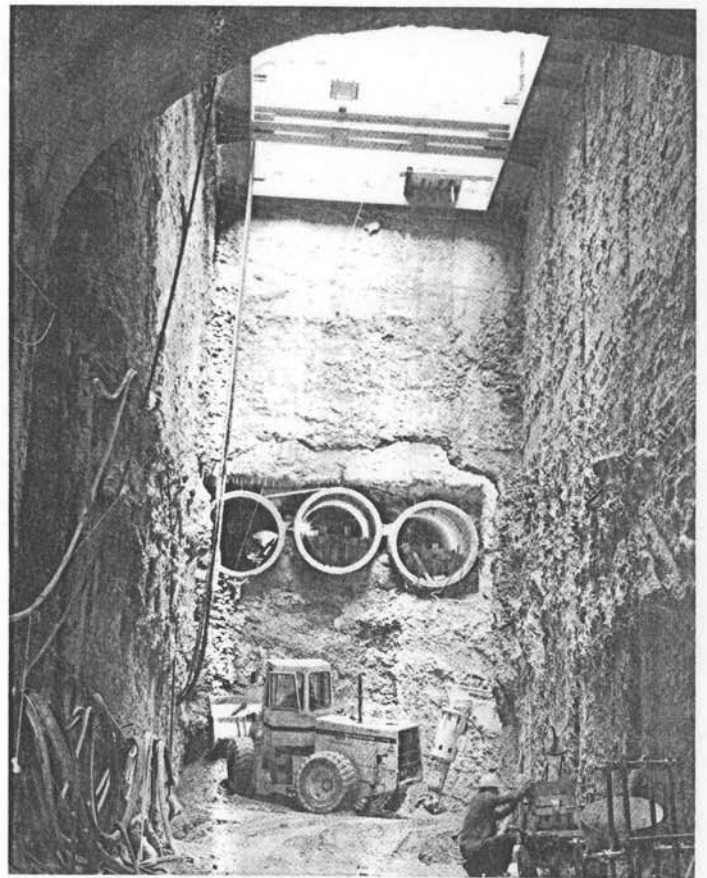


Fig. 6.- Station "Venezia" : terrain d'essai, résultat après l'enfoncement des tuyaux à échelle réelle.

Fig. 6.- The "Venezia" Station of the Milan Railway Link : tests fields, result after jacking of the pipes at real scale.

Les plus grands tassements de surface mesurés ont été inférieurs au millimètre. Ayant ainsi acquis la certitude que le dérangement provoqué au terrain par les opérations de construction était pratiquement inexistant, et fort de l'expérience obtenue par l'expérimentation, on a pu finalement commencer les travaux pour l'exécution réelle de la Station "Venezia".

C'est dans ce but qu'on a creusé et équipé le puits de poussée, situé dans la "viale Regina Giovanna", pour l'enfoncement des tubes, après avoir monté trois ponts préfabriqués en acier pour garantir la continuité de la circulation routière et des tramways (fig. 7). On a ensuite réalisé une galerie de service, le long de l'axe de la future station, d'où on a lancé des préconsolidations légères du terrain sur une bande qui comprend la zone des tubes et des arcs.

On a ensuite procédé au creusement des tunnels latéraux et à la coulée des piédroits de la Station (fig. 8).

En même temps, on procédait à l'enfoncement des tubes en béton armé, mesurant 210cm de diamètre externe et 180cm de diamètre interne, qui est actuellement en phase terminale avec des productions moyennes journalières d'environ 8ml (fig. 9).

La réalisation des arcs avec le découpage partiel des tubes est en cours d'exécution (fig. 10).

Les travaux avancent actuellement sans imprévus ni difficultés particulières, et l'on prévoit qu'ils seront terminés avant 1991.

4.- DEVELOPPEMENTS POSSIBLES DU SYSTEME

On a effectué différentes recherches pour définir les limites d'applicabilité de la méthode de l'"Arc Cellulaire" dans la construction des tunnels de grande ouverture dans des terrains non cohérents avec une faible couverture et en présence de nappe.

Après avoir schématisé le problème et déterminé les paramètres variables, on est passé au dimensionnement maximal des principaux éléments constructifs en utilisant un modèle aux éléments finis monodimensionnels pour simuler le comportement de la structure et l'interaction entre celle-ci et le terrain.

Pour cela, on a utilisé une loi de comportement linéaire pour les éléments structuraux, tandis que le terrain a été schématisé d'après un modèle à la "Boussinesq", tout en considérant la présence d'une bande de matériau consolidé autour de la cavité.

On a étudié trois géométries différentes caractérisées par un rapport L/H égal à 2,09 ; 1,73 et 1,5 avec une ouverture L variant jusqu'à 60m.

Les résultats du calcul nous ont permis d'établir des abaques et des tableaux (fig. 11, 12 et 13), qui donnent les épaisseurs minimales des éléments structuraux (qui dépendent des variations de la géométrie) en fonction de la forme, du diamètre externe, de la profondeur de la nappe et de la couverture.

On remarque comment l'augmentation du diamètre externe dans la géométrie 1 engendre rapidement des sollicitations telles qu'elles requièrent des dimensions considérables des éléments structuraux. Dans la géométrie 2 et plus particulièrement dans la géométrie 3, dans l'hypothèse de chargements symétriques, on

obtient une courbe des pressions qui s'écarte toujours moins de l'axe géométrique de la structure. Ceci entraîne un état de tension essentiellement de type axial, qui permet un élanement plus grand et des déformations plus petites de la structure.

L'arc de calotte représente de toute façon l'élément structurel le plus sollicité par rapport à ses propres caractéristiques géométriques.

Plus particulièrement, pour la zone de fixation arc-pédroit, les diagrammes illustrent la nécessité d'adopter des sections d'un niveau considérable à cause de la réduction brusque de la surface résistante.

Malgré cela, le passage à des formes ayant des rapports L/H inférieurs permet de réaliser des arcs de calotte de dimensions nettement contenues par rapport aux dimensions externes croissantes et à l'augmentation de la couverture. On remarque en effet que pour des tunnels ayant un diamètre externe de 60m et une ouverture de 15m, on a une réduction de l'ordre de 50% de l'épaisseur minimale nécessaire en calotte lorsqu'on passe de la géométrie 1 à la géométrie 3 (fig. 12). Cependant, des structures conçues de cette manière peuvent ne pas être en mesure de supporter des dissymétries accentuées de chargement.

Des changements de niveau de la nappe ne produisent que de légères variations des sollicitations de la structure au point qu'on peut les considérer comme pratiquement sans influence sur le plan statique, pour les géométries 1 et 2. La typologie 3, tout en se comportant parfaitement, en terme statique et en déformation, semble plus sensible aux variations de niveau de la nappe.

Une évaluation sûre des tassements provoqués en surface par la réalisation des tunnels ne peut être faite qu'en prenant en considération un grand nombre de paramètres et notamment la caractérisation géotechnique du terrain naturel, celle de la bande de terrain consolidé, la couverture et les modalités d'exécution des travaux.

Les tassements produits par les déformations élastiques des structures ne dépassent pas 2cm, même pour les grandes valeurs du diamètre externe, et pour des couvertures de 15 mètres.

Sur le diagramme de la figure 11, on peut observer que les déplacements en clé, avec un même diamètre externe, diminuent en passant de la géométrie 1 jusqu'à la 3.

D'après les résultats de cette recherche, la méthode de l'"Arc Cellulaire" semble pouvoir être appliquée avec succès pour réaliser en trou borgne des cavernes peu profondes de grande ouverture, supérieure même à 60m, dans des terrains meubles et sous la nappe.

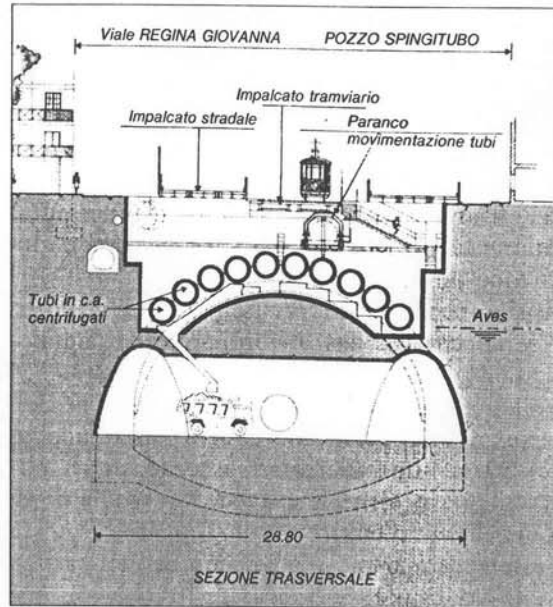
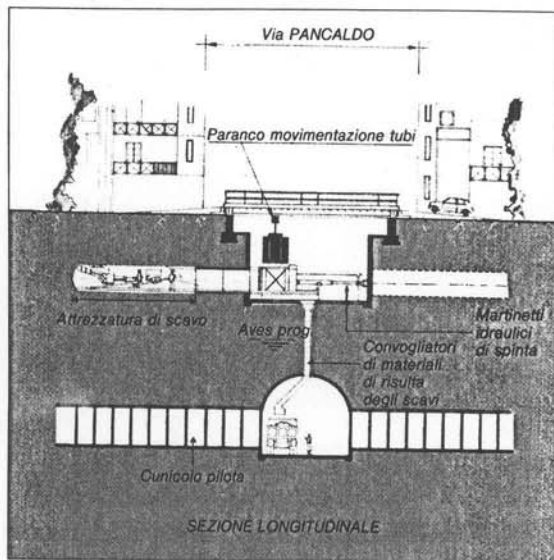


Fig. 7.- Sections transversale et longitudinale du puits pour le poussage des tuyaux.
 Fig. 7.- Longitudinal and cross sections of the thrust shaft used for pipes jacking.

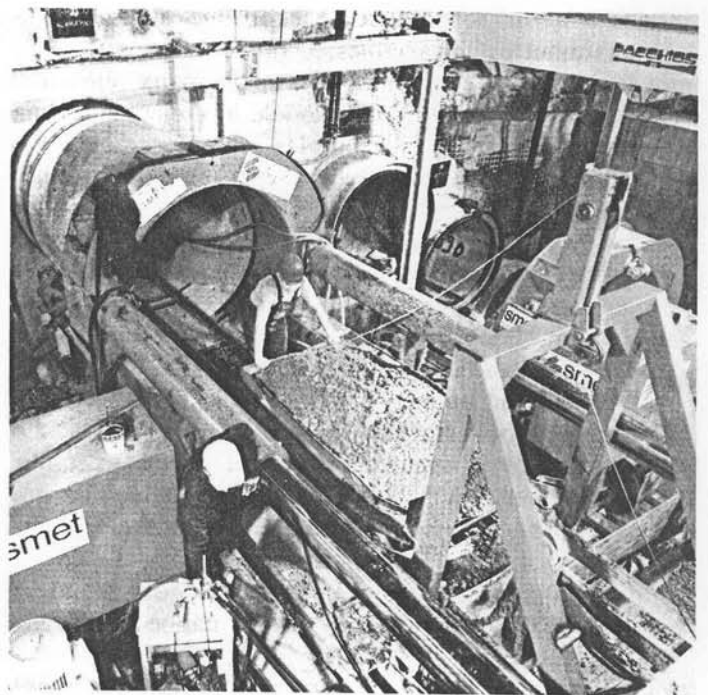
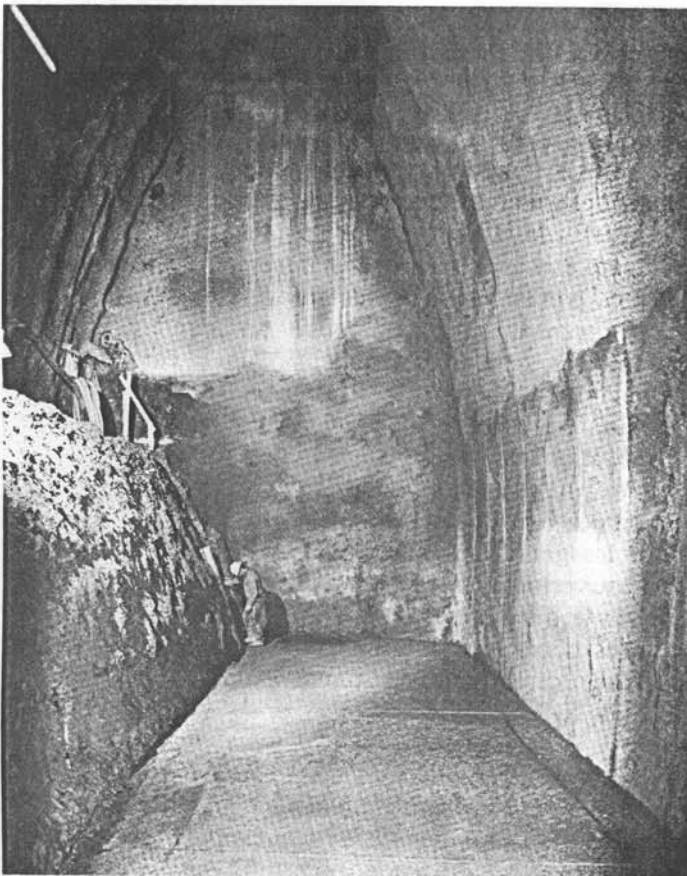


Fig. 8.- Station "Venezia" : Préparation du plateau pour la coulée du piedroit.
 Fig. 8.- The "Venezia" Station of the Milan Railway Link : Post footing before casting.

Fig. 9.- Station "Venezia" : puits de poussée et enfonçage des tuyaux.
 Fig. 9.- The "Venezia" Station of the Milan Railway Link : Pipe jacking from the thrust shaft.

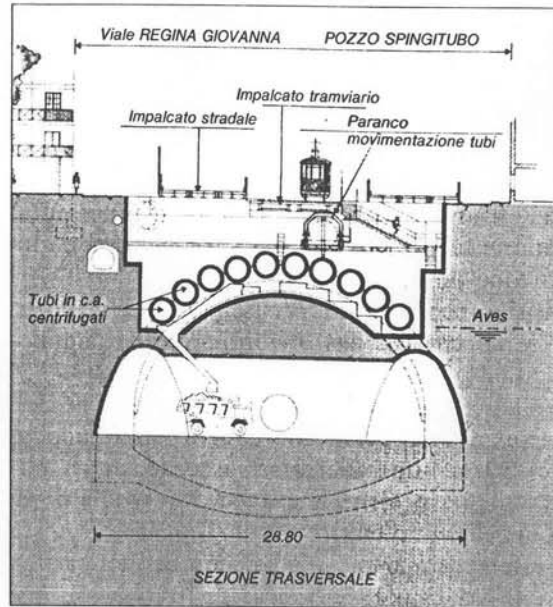
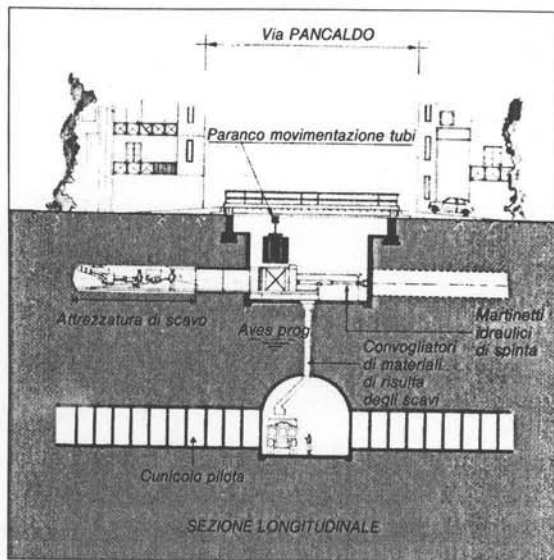


Fig. 7.- Sections transversale et longitudinale du puits pour le poussage des tuyaux.
 Fig. 7.- Longitudinal and cross sections of the thrust shaft used for pipes jacking.

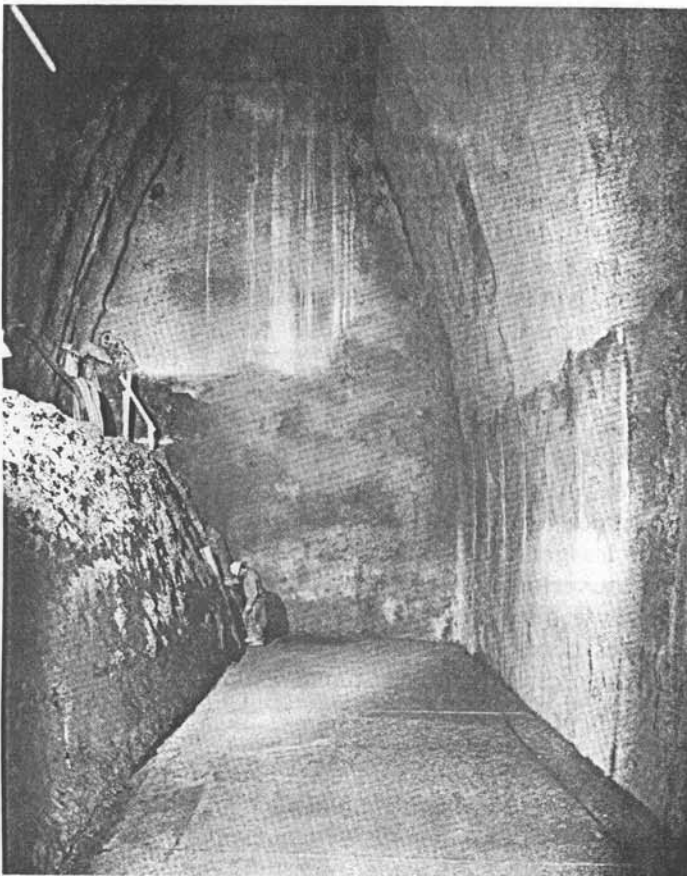


Fig. 8.- Station "Venezia" : Préparation du plateau pour la coulée du piedroit.
 Fig. 8.- The "Venezia" Station of the Milan Railway Link : Post footing before casting.

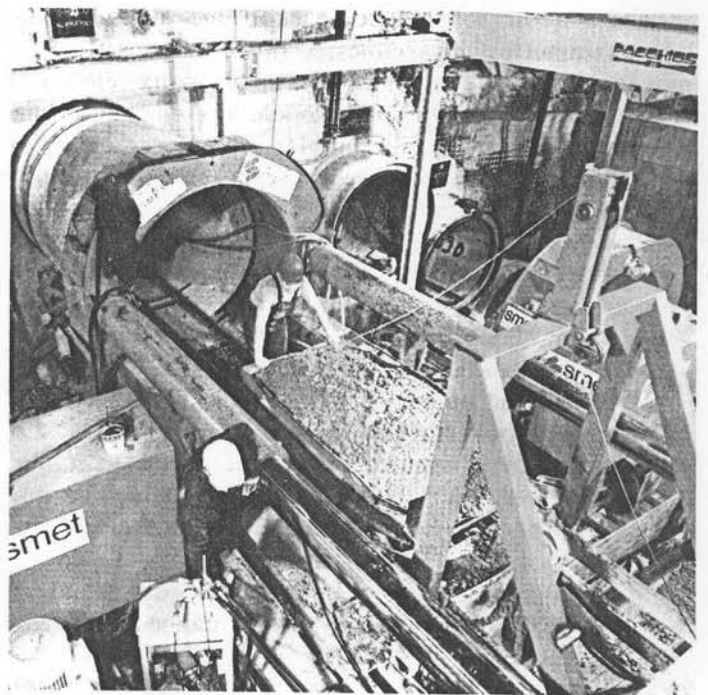


Fig. 9.- Station "Venezia" : puits de poussée et enfonçage des tuyaux.
 Fig. 9.- The "Venezia" Station of the Milan Railway Link : Pipe jacking from the thrust shaft.

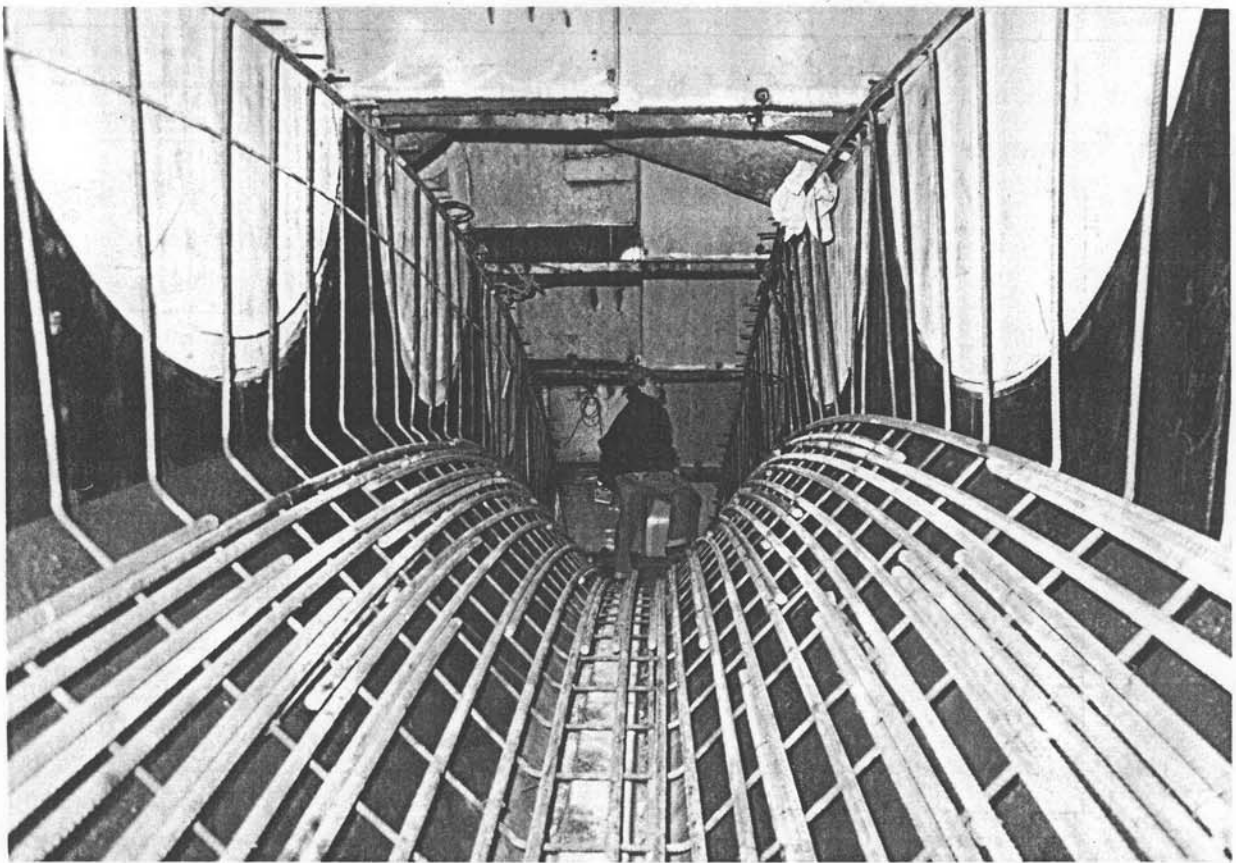


Fig. 10.- Station "Venezia" : Préparation du coffrage pour le bétonnage de l'arc.

Fig. 10.- The "Venezia" Station of the Milan Railway Link : Moulding for arch casting.

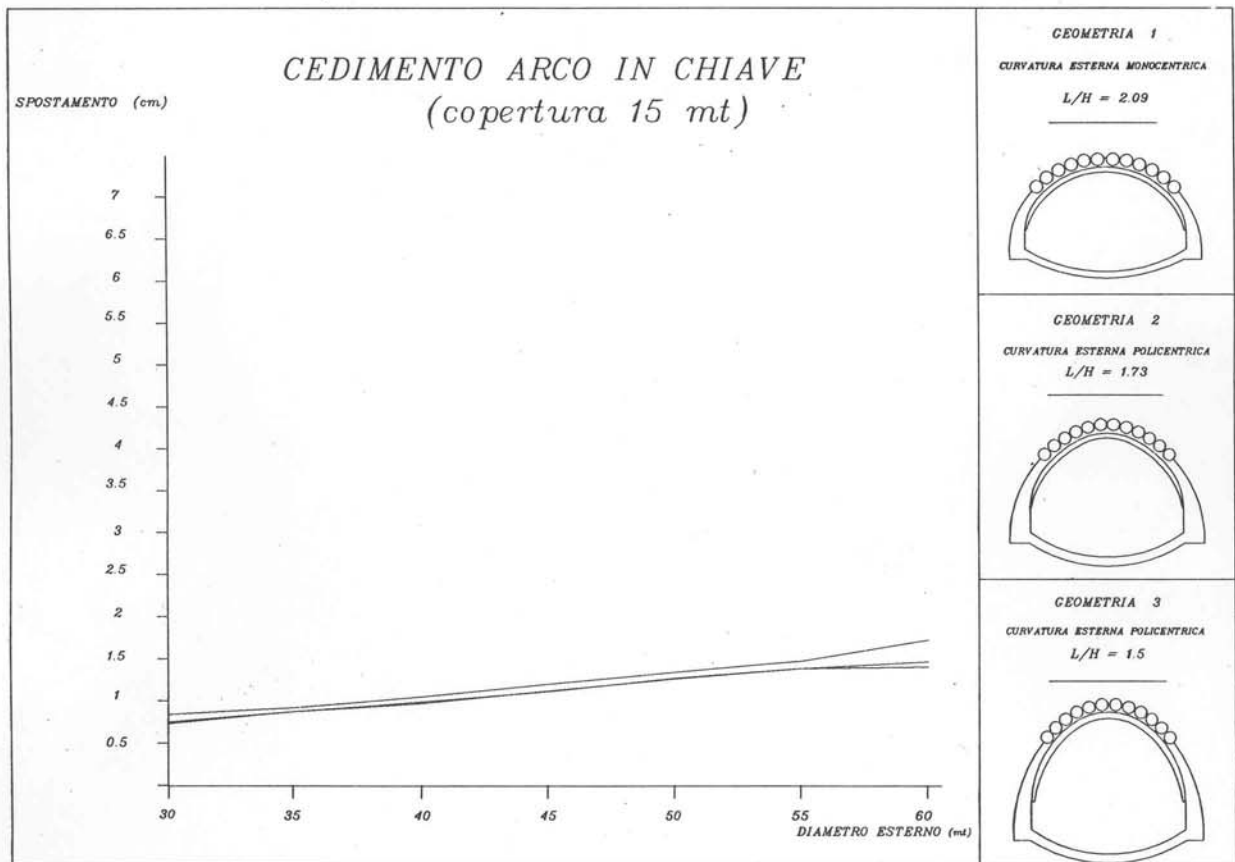


Fig. 11.- Déplacements en clé.

Fig. 11.- Displacements in the crown.

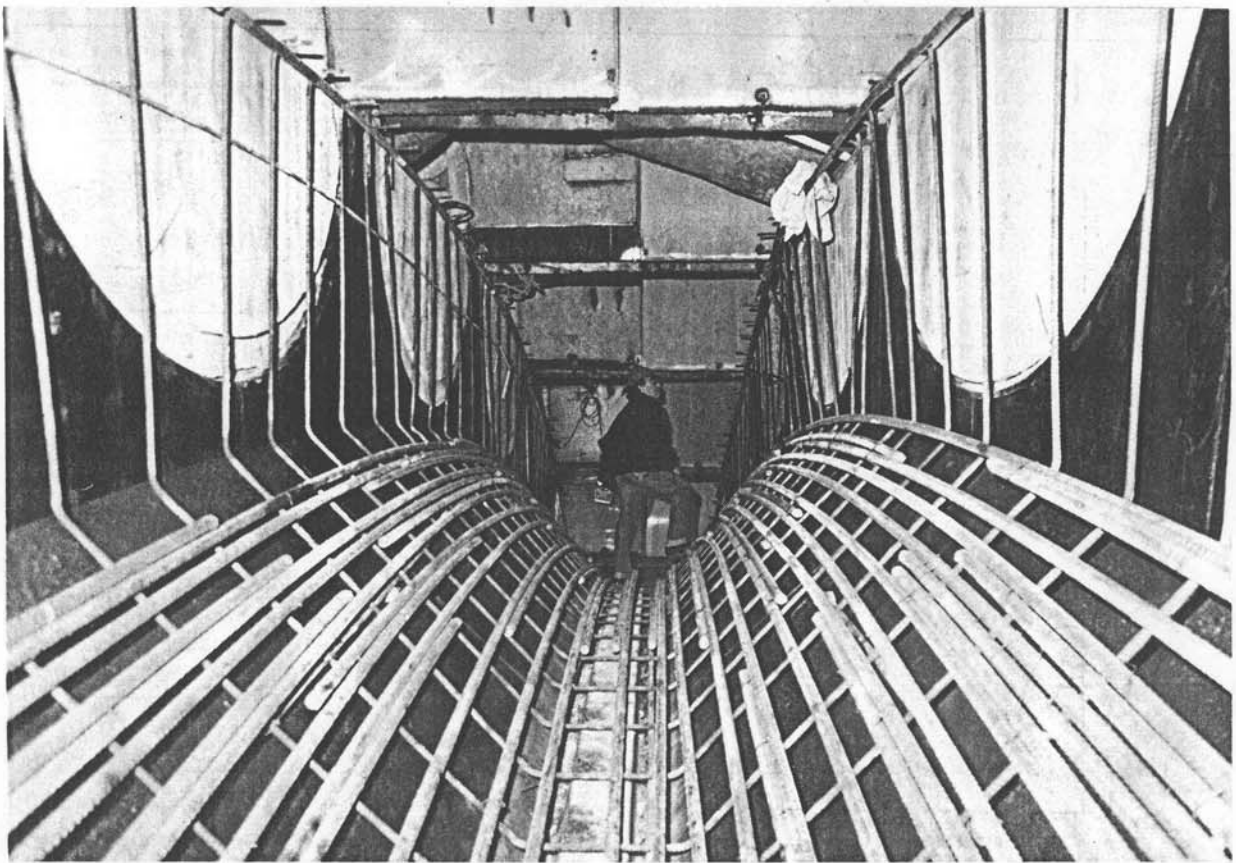


Fig. 10.- Station "Venezia" : Préparation du coffrage pour le bétonnage de l'arc.
 Fig. 10.- The "Venezia" Station of the Milan Railway Link : Moulding for arch casting.

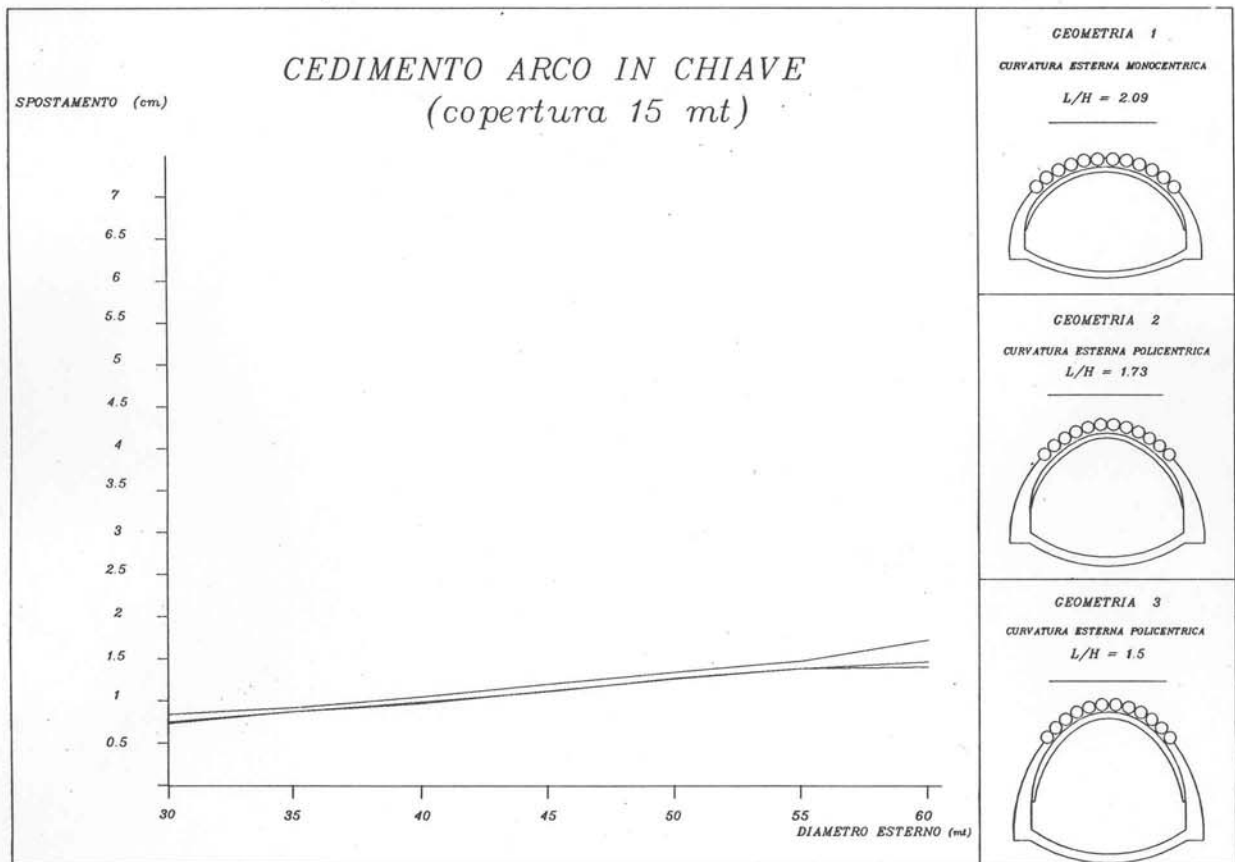


Fig. 11.- Déplacements en clé.
 Fig. 11.- Displacements in the crown.

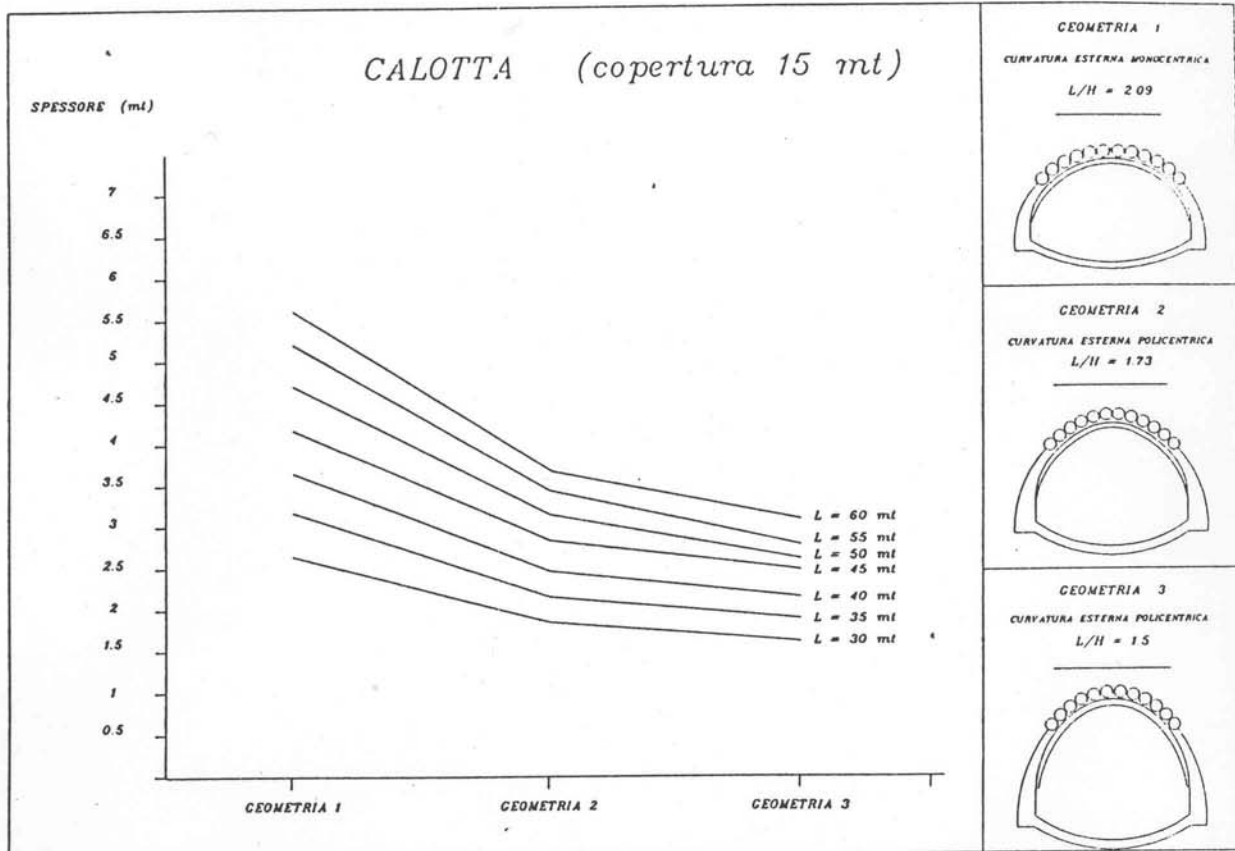


Fig. 12.- Epaisseur minimale nécessaire en calotte.
 Fig. 12.- Minimum thickness required in the vault.

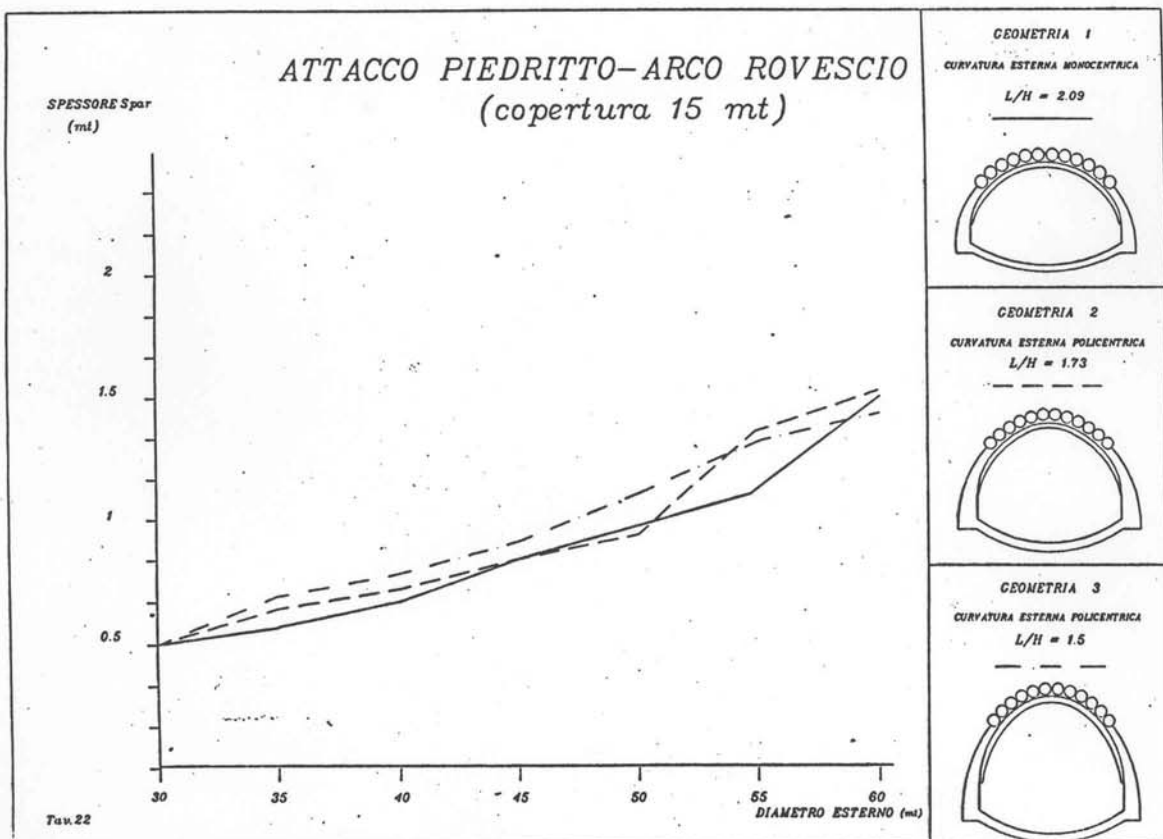


Fig. 13.- Epaisseur minimale nécessaire dans la zone de fixation arc-pié droit.
 Fig. 13.- Minimum thickness required at the arch-post connection.

5.- CONCLUSIONS

Aujourd'hui, lorsque l'on parle de récupérer des espaces dans le sous-sol des centres urbains, on est de plus en plus orienté vers des solutions en trou borgne plutôt qu'à ciel ouvert pour une série de motifs parmi lesquels les plus importants sont les suivants :

a- dans les chantiers urbains, il est de plus en plus difficile d'interférer avec la circulation de surface déjà à la limite du collapsus ;

b- l'ouverture de chantiers pour des excavations à ciel ouvert dans l'aire métropolitaine provoque des désorganisations et des endommagements dont on ne peut évaluer facilement les coûts réels directs et indirects. C'est un facteur qui doit cependant être pris en considération lorsque l'on compare les coûts d'excavation en trou borgne et à ciel ouvert.

La méthode de l'"Arc Cellulaire" permet de réaliser en trou borgne et à pleine section des cavités de dimensions considérables, même avec des couvertures réduites et dans des terrains difficiles. C'est pour cette raison que son application semble appropriée au milieu urbain et aussi partout où il est nécessaire de provoquer le dérangement minimal des structures préexistantes. La Station "Venezia" du "Passante Ferroviario Metropolitano" de la ville de Milan, actuellement en construction, avec ses 29m d'ouverture et seulement 4m de couverture est une preuve de la validité de la méthode.

Les recherches effectuées jusqu'à présent révèlent la possibilité de réaliser des ouvertures d'excavation encore plus grandes, car la méthodologie se prête à être adaptée avec une extrême flexibilité, en faisant varier opportunément les dimensions des arcs et des cellules (tubes), ainsi que l'entre-axe des arcs.

Bibliographie

LUNARDI P., (1988) - L'emploi de micro-tunnels pour la réalisation d'ouvrages souterrains de grande portée : l'"Arc Cellulaire". *Int. Cong. on "Tunnels and Waters"*, vol. 3, Madrid, Balkema.

COLOMBO A., LUNARDI P., PIZZAROTTI E.M., (1988). - L'emploi de l'"Arc Cellulaire" dans la réalisation de la Station "Venezia" du "Passante Ferroviario Metropolitano" de Milan. *Int. Cong. on "Tunnels and Waters"*, vol. 3, Madrid, Balkema.

COLOMBO A., LUNARDI P., LUONGO E., PIZZAROTTI E.M., (1989). - l'"Arc Cellulaire" pour la Station "Venezia" du "Passante Ferroviario Metropolitano" de Milan. *Col. Int. "Tunnels et Micro-tunnels en terrain meuble"*, vol. 2, Paris, Ponts & Chaussées.

LUNARDI P., (1989). - Un nuovo sistema costruttivo per la realizzazione di gallerie di grande luce in terreni sciolti : l'"Arco Cellulare". *Gallerie e grandi opere sotterranee*, n° 29.