



JOURNÉES D'ÉTUDE

LA VILLE SOUTERRAINE 2

Deuxième manifestation internationale sur les
Stratégies récentes de développement
des travaux souterrains urbains

MERCREDI 19 ET JEUDI 20 MARS 1997

10, rue du Débarcadère - PARIS 17^e
Salle Pradeau - 1^{er} sous-sol

II

sous la présidence de

Bernard TARBÈS

*Syndicat National du Béton Armé,
des Techniques Industrialisées et de l'Entreprise Générale*

P. Lunardi

Usages du sous-sol urbain en Italie : confrontation de deux cas significatifs

- Ligne ferroviaire souterraine de Milan : Stazione Venezia (technique de l'arc cellulaire)
- Métro de Rome : Stazione Baldo degli Ubaldi (technique du prédécoupage)

1. Introduction

L'Italie présente un territoire essentiellement montagneux et une densité de population parmi les plus élevées du monde. Malgré cela, c'est l'un des pays les plus industrialisés. Il s'ensuit des problèmes considérables de communication commerciale, de pollution de l'environnement et de pollution acoustique, une grande pénurie d'espaces pour l'établissement d'activités humaines.

C'est pour ce motif que depuis quelques années déjà, l'Italie prend nettement conscience des bénéfices pouvant être obtenus à travers une utilisation plus diffuse et plus performante de la ressource représentée par le sous-sol où seraient placés des services d'utilité publique.

Bien que les terrains constituant le sous-sol italien soient parmi les plus difficiles pour la réalisation d'ouvrages souterrains, de nombreux travaux sont en cours d'exécution. Ils présentent un intérêt considérable compte tenu de leur envergure et des difficultés de construction dues au contexte où il s'impose de travailler.

Nous illustrerons deux de ces ouvrages : la Stazione Venezia de la Transversale Ferroviaria de Milan et la Stazione Baldo degli Ubaldi du métro de Rome (fig. 0). Tous deux font partie d'un projet de transport qui se dénoue dans le sous-sol urbain. L'intérêt qu'ils suscitent est motivé par les dimensions des excavations à réaliser tout autant que par les systèmes de construction innovants adoptés pour la construction.

2. La Transversale Ferroviaire de Milan et Stazione Venezia

La Transversale Ferroviaire de Milan reliera les différents réseaux ferroviaires qui arrivent à la métropole et permettra d'aboutir à un seul système intégré de transport comprenant les lignes métropolitaines et les lignes de transport urbain de surface. Elle permettra tout particulièrement de réaliser la liaison entre les lignes ferroviaires provenant du secteur nord-ouest de la ville et celles provenant du secteur sud-est. Parallèlement, dans le tronçon compris entre les stations Lancetti et Porta Vittoria, le transport pourra être utilisé au niveau urbain et métropolitain. La Transversale Ferroviaire traverse en souterrain la ville tout entière à une profondeur moyenne de 20 mètres sur un développement total de 18 km environ avec dix stations dont six souterraines. Stazione Venezia est stratégiquement située dans le centre commercial de la ville et représente l'ouvrage souterrain ayant les dimensions les plus grandes de tout le réseau de transport régional.

Il s'agit d'un grand tunnel de quelque 30 mètres de diamètre extérieur et de 250 mètres de long, creusé en trou aveugle dans un terrain incohérent et sous la nappe, avec 4 mètres seulement de couverture sous les fondations des édifices du XVIIIe siècle. Sa construction a été possible grâce à l'adoption d'un nouveau système de construction connu sous le nom d' "arc cellulaire" qui permet de réaliser le revêtement final de l'ouvrage avant même de commencer son excavation

2.1 Choix de la méthode de construction

Le tunnel principal de la station présente une section d'excavation de 440 m², six fois le tunnel de ligne à deux voies et presque deux fois le tunnel le plus grand réalisé jusqu'ici à Milan. L'excavation, effectuée à trou aveugle dans des terrains récents et incohérents, avait un diamètre global de 30 m environ et une couverture sous les fondations des anciens édifices qui existaient déjà de 4 à 5 mètres seulement.

La présence de cette couverture insuffisante posa d'emblée des doutes quant aux résultats qu'il aurait été possible d'obtenir avec la

méthode traditionnelle basée sur le revêtement de la cavité dans un terrain consolidé, immédiatement protégé par des ceintres métalliques et du béton projeté (fig. 1). Un traitement préventif du terrain sur le contour de la voûte du tunnel, approprié aux grandes dimensions de la section d'excavation, apparaissait effectivement irréalisable. De surcroît, les analyses statiques de déformation effectuées par la voie numérique avec la méthode des éléments finis (fig. 2) indiquaient que la structure de confinement, réalisée avec des ceintres et du béton projeté, aurait été trop déformable et non à même de contenir les tassements superficiels à l'intérieur des limites voulus pour la sauvegarde des structures limitrophes et des sous-services existants.

La recherche d'une solution alternative à la solution traditionnelle permettant d'obtenir - en présence de grandes lumières - une structure moins déformable et immédiatement active au moment de l'excavation, a abouti à la mise au point d'une méthode nouvelle et innovante appelée "arc cellulaire", théoriquement capable de percer à trou aveugle et à pleine section des tunnels ayant un diamètre jusqu'à 60 m dans des terrains incohérents ou semi-cohérents et sous nappe, en présence de couvertures même inférieures au rayon d'excavation.

L'arc cellulaire est constitué d'une structure composite assimilable à une claie à section semi-circulaire dont les éléments longitudinaux (cellules) sont constitués de tubes en béton armé rendus collaborants par une série de gros ceintres transversaux (arcs) (fig. 3).

La caractéristique qui rend cette technique plus avantageuse par rapport aux méthodes traditionnelles est la manière de régler le passage de la condition d'équilibre initial du terrain encore non perturbé à une condition d'équilibre final du terrain, tunnel fini, susceptible d'éviter l'apparition de décompressions dans le matériel et donc de tassements en surface.

L'excavation est effectuée lorsque la structure portante, considérablement rigide, est déjà complètement construite et à

même de fournir au terrain le confinement indispensable sans subir des déformations significatives.

La réalisation pratique de l' "arc cellulaire" se fait en 9 phases principales (fig. 4)

1. Traitement de consolidation du terrain :
à partir d'un petit tunnel de service de petit diamètre, pratiqué dans l'axe du tunnel final, nous procédons à des préconsolidations systématiques du terrain sur le contour des futurs tunnels de piédroit et éventuellement le long de l'effet de voûte
2. Excavation des deux tunnels latéraux de piédroit
3. Coulée des piédroits du tunnel final
4. Dans un chantier indépendant du chantier inférieur du tunnel de piédroit a lieu la préparation de la chambre de poussée pour la fixation, côte à côte, d'une série de tubes en béton armé à la hauteur du profil de calotte du futur tunnel
5. Scellement des tubes en béton armé selon la méthode du pousse-tube pour la réalisation des microtunnels de calotte
6. Excavation des coffrages (dont les cloisons sont constituées du terrain même) à travers les microtunnels, pour la coulée des arcs de liaison en béton armé. L'élimination des débris se fait à travers les tunnels latéraux
7. Armature et remplissage des microtunnels longitudinaux de calotte et des arcs transversaux de liaison avec du béton
8. Excavation du terrain à l'intérieur de la section du tunnel final sous la protection de l' "arc cellulaire" déjà pratiquement actif
9. Coulée par plus phases du radier

2.2 Phase opérationnelle

La longueur du tunnel - 215 mètres - a comporté l'exécution de 10 microtunnels en calotte et la fixation de 2.159 tubes en béton armé. Les tubes, préfabriqués selon le système de précompression radiale par congélation de ciment haute résistance, ont un diamètre extérieur de 2.100 mm, un diamètre interne de 1.800 mm et une longueur de 2 mètres.

Leur fixation a été effectuée au moyen d'un équipement comprenant un bouclier métallique cylindrique de 2.100 mm de diamètre et de 7,7 mètres de long, divisé en deux parties. La partie avant, de 4,2 mètres, à tête mobile, contient une fraise hydraulique (fig. 5) à mouvements informatisés et des bandes transporteuses pour le marin. La partie arrière de 3,50 mètres, contient les moteurs, les pompes et les réservoirs pour l'huile hydraulique.

L'avancement des tubes était obtenu à l'aide de deux vérins hydrauliques à course longue, placés à l'intérieur du puits de poussée, qui opéraient à une pression de 600 bar (fig. 5).

Le travail avec un équipement double nous a permis d'obtenir des productions journalières de fixation de 8 à 9 mètres/jour.

Des contrôles topographiques effectués au cours de la fixation et une fois la fixation terminée nous ont assuré de la bonne qualité de l'exécution. Les relevés des déviations de la direction et de la hauteur ont donné des résultats absolument insignifiants.

Parallèlement à la phase de fixation des tubes, nous procédions à la construction de tunnels latéraux pour la réalisation des piédroits sur lesquels s'appuient les arcs.

Les tunnels - largeur 7,6 mètres, hauteur 11,0 mètres et surface totale d'excavation 60 m² (fig. 6) - ont été effectués en deux phases :

- 1) Excavation de 40 m² jusqu'à la hauteur de la nappe
- 2) Exécution - du niveau de la première phase - d'injections de consolidation dans la nappe sous les futurs piédroits et radier, puis, abaissement de l'excavation jusqu'au niveau de l'imposte de la base du piédroit

L'excavation et le prérevêtement consécutif des tunnels latéraux qui avaient tous la même longueur que le tunnel principal, ont été effectués selon les méthodes traditionnelles autrement dit avec des ceintres métalliques, un grillage électrosoudé et du spritz-béton.

La production moyenne a été de deux mètres linéaires environ par jour de piédroit fini de sorte que les 430 mètres de piédroit (215 de chaque côté) ont été achevés en quelque 11 mois, plus ou moins le même temps qui a servi à la fixation des tubes qui se faisait en parallèle.

La structure transversale de soutien de la calotte est constituée d'une série de 35 arcs intermédiaires placés en interaxe de 6,00 m plus deux aux extrémités.

La construction des arcs a représenté la partie la plus difficile de la technique de l' "arc cellulaire". Dans ce cas particulier, elle a été particulièrement complexe à cause de la section rétrécie à l'intrados, imposée par des exigences architectoniques.

Les phases de l'exécution se sont succédé de la manière suivante (fig. 7) :

- 1) Découpage et élimination de la partie de tube intéressant la section de l'arc
- 2) Excavation de l'arc effectuée essentiellement à la main, jusqu'à atteindre les tunnels latéraux de piédroit
- 3) Assemblage à l'intérieur de l'excavation des coffrages préfabriqués en acier
- 4) Mise en oeuvre de l'armature des arcs et des tubes
- 5) Coulée des arcs et des tubes de calotte

Le radier du tunnel principal présente - sur un développement de 92 mètres, une épaisseur de 1,5 à 2 mètres et une section totale de coulée de 38 m³/ml, - le niveau inférieur à 6,5 mètres au-dessous du niveau de la nappe.

L'exécution s'est faite par échantillons s de 5 m de long, réalisés chacun en moyenne en une semaine de sept jours ouvrables. Les travaux ont été coordonnés de manière à limiter l'ouverture de l'excavation à trois jours seulement.

2.3 Système de monitoring

Les dimensions considérables de la cavité, l'originalité des structures, les contraintes de surface réellement existantes nous ont obligé à étudier et à réaliser un vaste programme de monitoring permettant d'évaluer :

- les déplacements superficiels, tout particulièrement à le niveau de la fondation des édifices existants, au cours de toutes les phases du travail.
- les déformations du terrain à proximité des tunnels
- les contraintes et les déformations dans les structures de revêtement définitives

L'enregistrement et l'élaboration des mesures effectuées avec chacun des instruments (fig.8) a fourni un tableau suffisamment complet de la situation de tension et de déformation du terrain ainsi que de la structure dans les différentes phases d'exécution tout en permettant une comparaison utile et constante tant avec les résultats du projet qu'avec les limites imposées pour le maintien de l'efficacité fonctionnelle de la structure.

En ce qui concerne notamment les déplacements superficiels, après les soulèvements initiaux, conséquence des injections de consolidation, l'excavation suivante de piédroit n'a pas comporté de déformations appréciables. Dans la phase d'excavation de la calotte, des tassements plus marqués se sont manifestés. L'augmentation des déformations, lente au début, puis plus rapide aussitôt que le front de taille avait dépassé la section de mesure, s'est réduite petit à petit au fur et à mesure que le front s'éloignait. Ce comportement, mis en évidence par les points topographiques dans l'axe de la route (fig. 9) est confirmé bien que dans une mesure moindre par ceux situés au niveau des édifices. Là, les déplacements maximum au cours du passage du front de taille n'ont pas dépassé la valeur de 1-2 mm.

3. Stazione Baldo degli Ubaldi du métro de Rome

La station Baldo degli Ubaldi est une des cinq nouvelles stations appartenant au prolongement de la "ligne A" Ottaviano -Battistini de la ville de Rome qui complétera la liaison entre les quartiers de la banlieue de la zone ouest et le centre historique ainsi que la ville du Vatican.

La station - 22 mètres de lumière - est située en plein centre ville, dans un sous-sol fondamentalement argileux.

Les nombreuses enquêtes géologiques et géotechniques effectuées entre 1987 et 1994 nous ont permis de reconstruire d'une manière détaillée l'évolution stratigraphique des terrains concernés par le chantier. Deux catégories de terrains ont été définies :

- une formation de base constituée d'argiles bleues pliocéniques avec des niveaux sablonneux d'une épaisseur allant du centimètre au décimètre
- une formation plus superficielle constituée de terrains sableux-limonneux qui ont, localement, des valeurs de consistance extrêmement basses.

La figure 11 montre l'évolution de la stratigraphie.

Le tunnel de la station est plongé dans l'argile pliocénique, formation constituée du point de vue granulométrique de limons argileux surconsolidés au-dessous de la nappe.

Ses dimensions, le contexte d'une grande densité urbaine avec une forte présence de fondations d'édifices à deux mètres seulement de l'extrados du tunnel et la nature complexe des terrains à excaver rendaient sa réalisation particulièrement délicate.

3.1 Choix de la méthode de construction

Dans ce cas tout comme dans le précédent, la proximité de nombreux édifices résidentiels a exigé impérativement de contenir les phénomènes de déformation bien en dessous de l'ordre de

grandeur qui caractérise les tunnels creusés dans des terrains cohérents. En l'absence de mesures appropriées, l'état de tension induit par les opérations d'excavation aurait effectivement produit, sur le front de taille, des phénomènes d'extrusion bien plus dangereux pour les édifices se trouvant au-dessus et il aurait donné lieu à des tassements superficiels importants.

L'adoption de méthodes de construction traditionnelles basées sur le revêtement de l'excavation dans un terrain consolidé au moyen de ceintres métalliques et de spritz-béton n'aurait pas permis de faire face à ce genre d'inconvénients.

Pour réaliser le revêtement de la calotte du tunnel, nous avons donc projeté un système de construction particulier qui conjugue la technologie du prédécoupage mécanique effectuée pour la première fois au monde sur une lumière de 22 mètres, et le principe de la "voûte active".

Le prédécoupage mécanique permet notamment le préconfinement de la cavité dans la phase d'excavation. Il produit un confinement des phénomènes de déformation en amont du front d'excavation et il garantit la sécurité des opérations de construction du tunnel.

De plus, la mise en place du revêtement définitif dans des voussoirs préfabriqués à la distance maximum de 2,70 mètres du front produit une action immédiate de confinement alors que l'utilisation des vérins détermine une réduction des déformations de la coque de prédécoupage aussi bien qu'un centrage des contraintes dans les voussoirs et l'absence de traction dans le béton afin de garantir la stabilité de la structure à long terme.

Enfin, la préconsolidation du noyau de terrain sur le front, avec un nombre approprié d'éléments structurels en VTR réduit les phénomènes d'extrusion du terrain et par voie de conséquence, l'amorce de phénomènes de préconvergence et de convergence de la cavité qui pourraient déterminer des tassements de surface.

Les analyses FEM (méthode des éléments finis) effectuées nous laissent prévoir que les tassements maximum de surface, dus exclusivement à l'excavation du tunnel, seront de l'ordre de 1,5 cm.

3.2 La phase opérationnelle

Afin d'atteindre la cote prévue pour les excavations du tunnel de la station, nous avons réalisé deux puits, (Pozzo Aurelia Cornelia et Pozzo Valle Aurelia) d'une profondeur de 30 et de 40 mètres, avec une section de 200 m² environ. Les structures de confinement des puits sont constituées de paroi de poteaux \varnothing 1200 en béton armé. Une fois les travaux achevés, les deux puits serviront de locaux de service technologique (fig. 10).

Après l'exécution des puits (fig. 12), nous avons procédé à l'excavation de deux tunnels latéraux de 9 mètres de hauteur sur 5 de largeur, emplacement futur des piédroits. Pour contrôler les phénomènes de déformation qui se sont manifestés durant l'excavation, nous avons procédé à des interventions de préconsolidation du noyau par des éléments structuraux en VTR et de confinement de la cavité par des ceintres métalliques doubles type IPN 180, en combinaison avec du spritz béton renforcé de fibres de 20 cm d'épaisseur. Les deux tunnels de piédroit ont été creusés en conservant toujours une distance non inférieure de 40 mètres entre les deux fronts. Sur ce, nous sommes passés à la coulée en chantier des piédroits en béton armé réalisée en deux phases.

Une fois l'exécution des piédroits achevée, nous avons commencé l'excavation du tunnel de la station qui a avancé du côté du puits Valle Aurelia vers le puits Aurelia Cornelia. Actuellement toujours en cours d'exécution, elle procède par deux phases:

- excavation de la calotte (dimensions 8,50 mètres de hauteur et 21 de largeur pour une surface de 125 m²)
- excavation du radier (surface 90 m²) par échantillons au terme de la réalisation de chaque excavation de calotte

Pour confiner et contrôler les phénomènes de déformation du terrain et donc pour réduire le plus possible les répercussions sur les édifices au-dessus, nous avons procédé à des interventions différentes en fonction de l'objectif à atteindre.

- Pour garantir la préconsolidation de la cavité, nous avons réalisé, tous les 2,70 mètres d'avancement, des coques de prédécoupage remplies de béton renforcé de fibres de 3,50 m de long et de 20 cm d'épaisseur. La superposition entre une coque et la suivante est de 0,80. Le développement des coques de prédécoupage est de 28 mètres pour une lumière nette de 21 mètres. Les coques sont inclinées de 8° pour permettre l'exécution de la coque suivante avec la superposition minimum que nous venons d'indiquer
- Pour contenir les phénomènes d'extrusion du terrain sur le front de taille (de l'ordre des décimètres) nous avons appliqué 47 éléments structurels en VTR de 25 mètres de long avec une superposition de 6,10 m

De plus, pour éviter des phénomènes de surcharge des coques de prédécoupage, nous avons mis au point un système de pose du revêtement à faible distance (max. 2,70) du front de taille. Le revêtement définitif consiste dans la pose de 12 voussoirs préfabriqués dont 2 d'appui sur les pénétrations, 9 standard (fig. 13) et un voussoir de clé.

Une fois l'arc terminé, une recompression est faite pour garantir le recentrage des contraintes et contribuer à limiter les déformations, donc les tassements.

Bref, la succession opérationnelle des phases de construction organisées en cycles d'avancement de 2,70 mètres est la suivante .

- 1) Excavation = 0,90 m
- 2) Exécution de la coque de prédécoupage remplie de béton projeté à haute résistance et prise rapide
- 3) Mise en oeuvre de l'arc de voussoirs de la "Voûte Active"

- 4) Mise en charge du premier vérin dans le voussoir avec une force $N=40$ t
- 5) Excavation de 0,90 m
- 6) Mise en oeuvre de l'arc suivant de voussoirs de la "Voûte Active"
- 7) Excavation de 0,90 m
- 8) Mise en oeuvre de l'arc suivant de voussoirs de la "Voûte Active"
- 9) Mise en charge du second vérin avec une force $N_2=360$ t, distance du front $d=20-30$ m
- 10) Exécution de consolidations en VTR de 25 m de long tous les 18,90 m d'avancement

Une fois l'excavation de la calotte achevée, nous sommes passés à l'exécution de l'excavation de rabaissement et à la coulée du radier par échantillons

3.3 Système de monitoring

En plus de la vérification du comportement du tunnel, comme nous l'avons dit plus d'une fois, le contexte dans lequel nous avons opéré a exigé une attention très particulière de notre part à l'égard du contrôle des effets des travaux en termes de subsidence superficielle.

Les grandeurs soumises à un monitoring attentif (fig. 11 et 14) sont les suivantes :

- affaissements des édifices dans la zone concernée par les travaux
- variations des niveaux de nappe, à la fois superficielle et profonde
- mouvement du terrain de fondation des édifices
- déformations du noyau de terrain sur le front de taille et de la cavité des tunnels

Le monitoring a été subdivisé en deux phases :

- A) le monitoring dans la phase d'excavation des puits et des tunnels de piédroit
- B) le monitoring au cours de l'excavation de la calotte et du radier du tunnel de la station

Monitoring A

Les résultats obtenus révèlent l'existence d'un phénomène de subsidence qui a atteint sa valeur maximum (50 mm) au niveau de l'édifice situé près du puits Valle Aurelia et à la hauteur du côté pair des rails. Le phénomène est provoqué par un processus de consolidation du terrain. L'analyse de toutes les données recueillies (mesures d'extrusion et convergence au front de taille du tunnel, mesures concernant le tassement et l'inclinaison) nous a permis d'évaluer les mesures les plus appropriées à contrecarrer les phénomènes en cours. Afin de produire une action de confinement du terrain de fondation des édifices, nous avons effectué en plusieurs phases, deux barrières de confinement selon la technologie du jet-grouting (env. 250 traitements columnaires \varnothing 600, interaxe moyen $i=60$ cm). De cette façon, nous avons atteint le double but de confiner les tassements des édifices et de fournir un confinement approprié du terrain de fondation des édifices au cours de l'excavation de la calotte du tunnel de la station.

Monitoring B

Le projet de monitoring du tunnel de la station prévoit la mise en oeuvre de :

- 3 stations primaires de monitoring placées à 5, 10 et 15 mètres du puits Valle Aurelia
- 3 stations secondaires de monitoring placées à 36, 60 et 90 mètres du puits Valle Aurelia

Chacune de ces stations est constituée de :

- 3 "strain gauges" à corde vibrante
- 3 cellules de pression à huile

Nous effectuerons également des mesures d'extrusion avec un Sliding Deformeter d'une longueur de 30 m chacun, installés au cours de la pose des éléments en VTR ainsi que des mesures laser à même d'évaluer la position de certaines cibles placées sur les voussoirs.

Des appareils de mesure des tassements incrémentiels et des clinomètres nous permettront de relever la mesure des déplacements du terrain en profondeur.

Parallèlement, nous procéderons à relever les mesures de subsidence des édifices et les variations du niveau de la nappe.

A l'état actuel des choses, les mesures faites nous indiquent que

- les valeurs des extrusions cumulatives se maintiennent au-dessous de 2 cm ce qui révèle un comportement du terrain en champ élastique
- les tassements superficiels au niveau des édifices, dus au passage du front, ne mesurent que 2 - 3 millimètres, alors que pour cette phase, nos prévisions étaient de 8 - 10 mm.

4. Conclusions

Le présent mémoire décrit deux ouvrages importants qui ont en commun le contexte dans lequel ils ont été réalisés. Tous deux ont été construits (dans le second cas la construction est encore en cours) dans des environnements urbains, en présence de situations géologico-géotechniques difficiles et dans des conditions contraignantes particulièrement décourageantes.

Les principales caractéristiques communes sont :

- grand diamètre de la section d'excavation
- présence du niveau de nappe au-dessus du plan d'excavation
- besoin d'avoir des tassements superficiels réduits
- besoin de conserver en exercice la viabilité

Pour conclure, il nous semble important de relever que face à des situations que nous pouvons facilement classer comme étant "hors de l'ordinaire", il nous a été possible de développer une technologie d'exécution "sur mesure" résolument innovante telle que l' "arc cellulaire", déjà connue comme prédécoupage mécanique combiné à la "Voûte Active" mais pour une lumière supérieure de beaucoup aux applications normales qui nous a incontestablement permis de

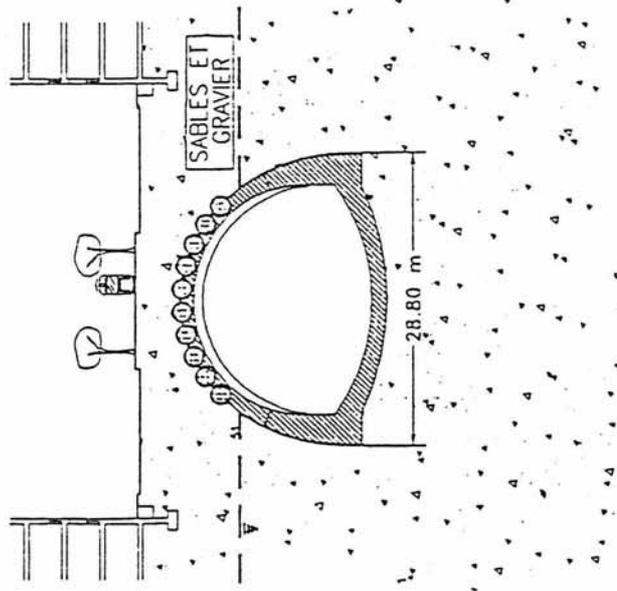
résoudre avec succès les multiples problèmes que nous avons dû affronter.



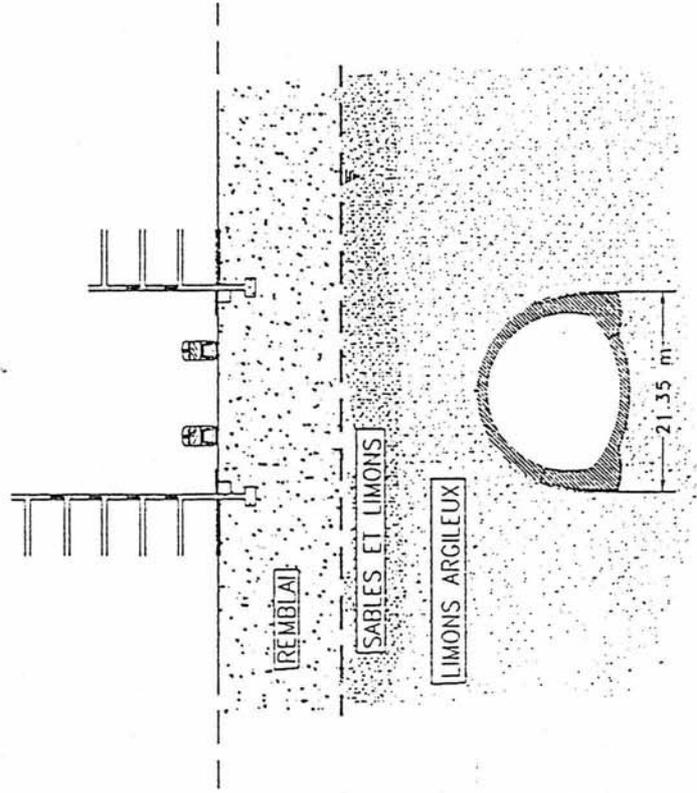
Fig. 0

CONCEPTION ET EXECUTION DES TUNNELS
SYSTEME ADECO-RS

STATION "VENEZIA"



STATION "BALDO degli UBALDI"



P. LUIGIARDI - MILANO

ABC020 DWG 06.07.95 - 05

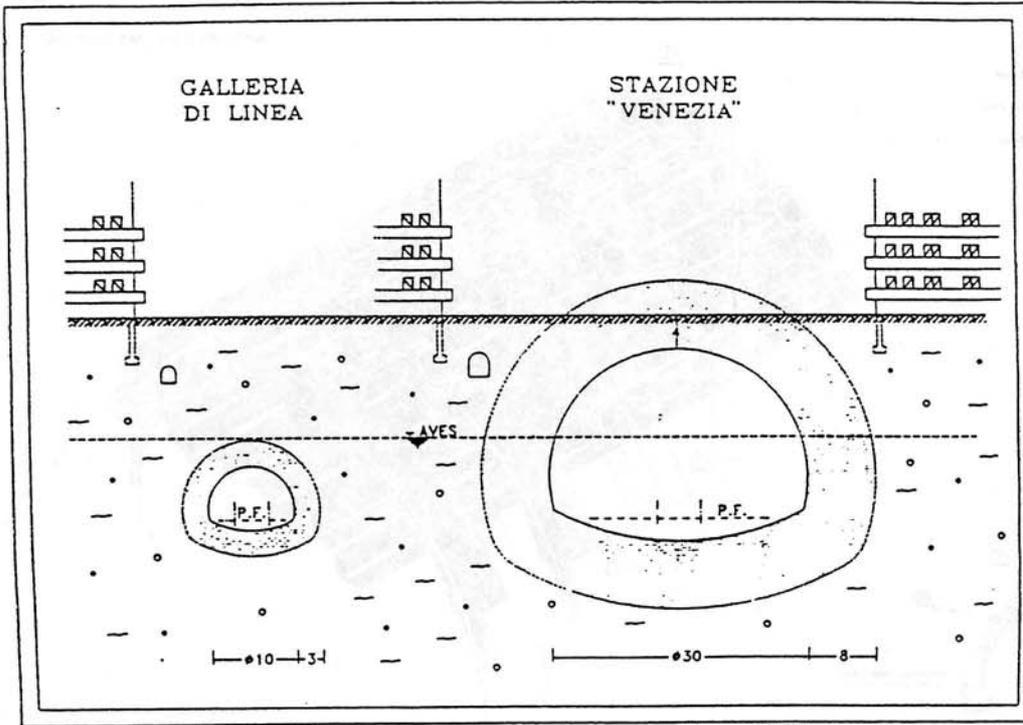


Fig. 1

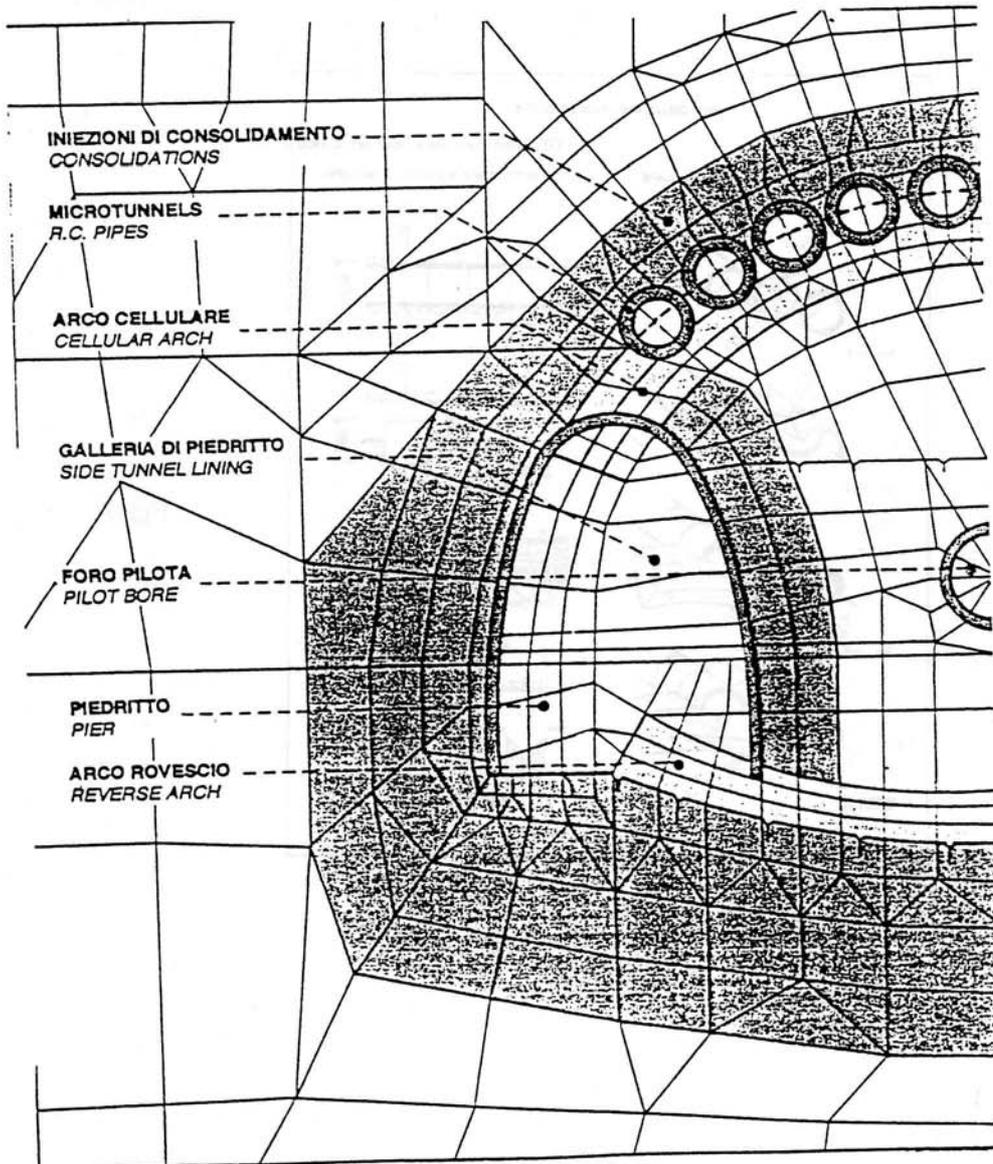


Fig. 2

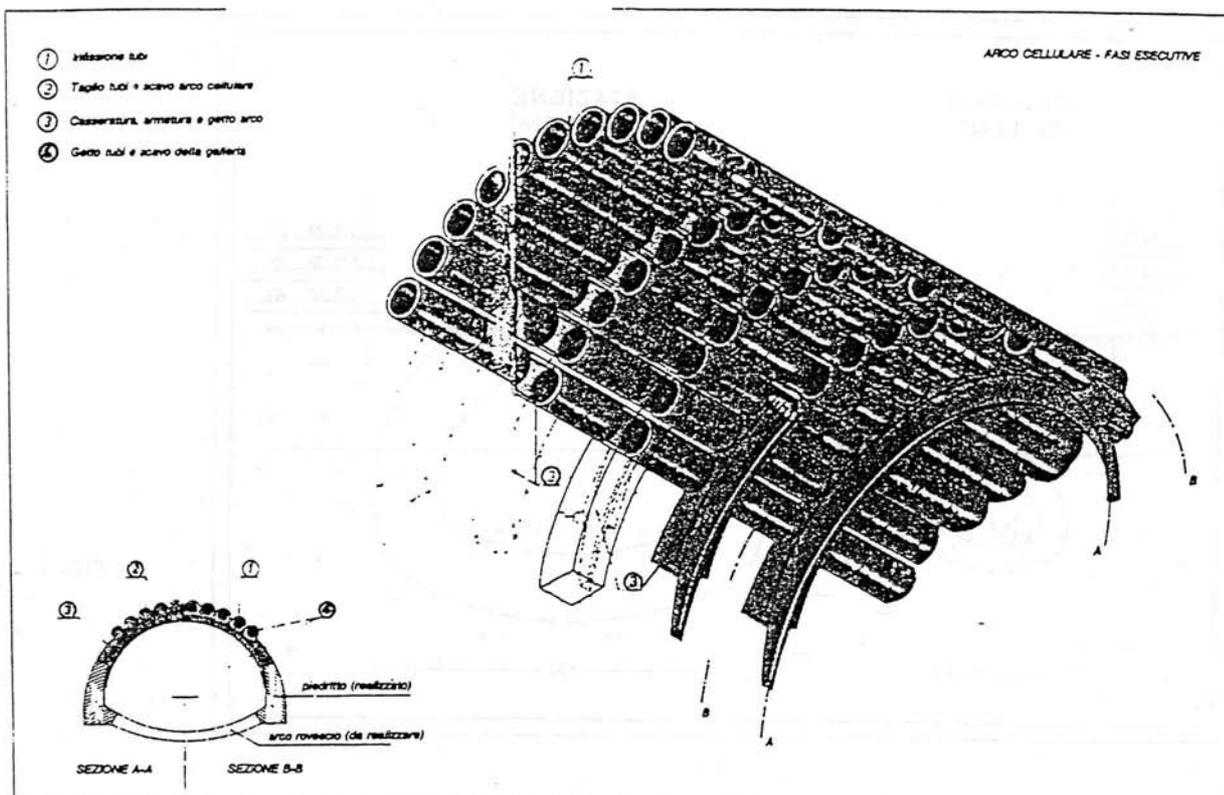


Fig. 3

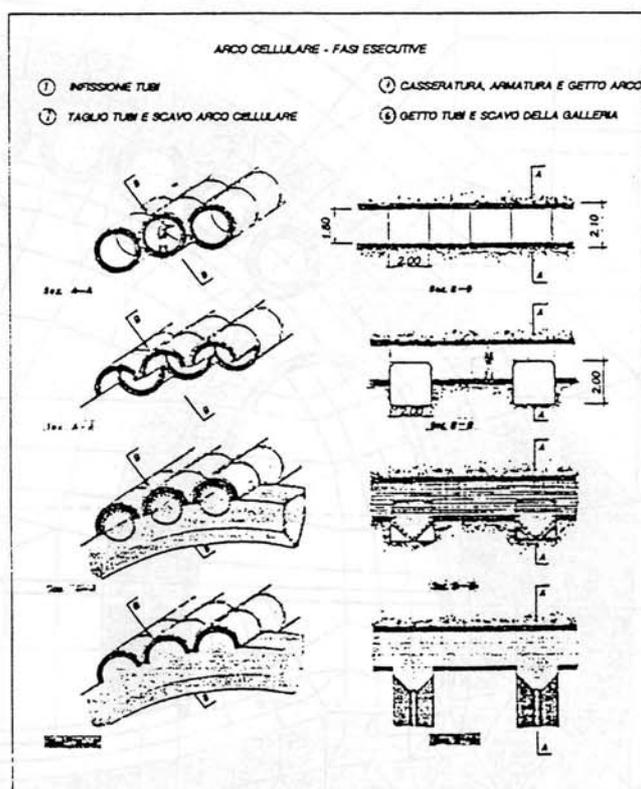


Fig. 7

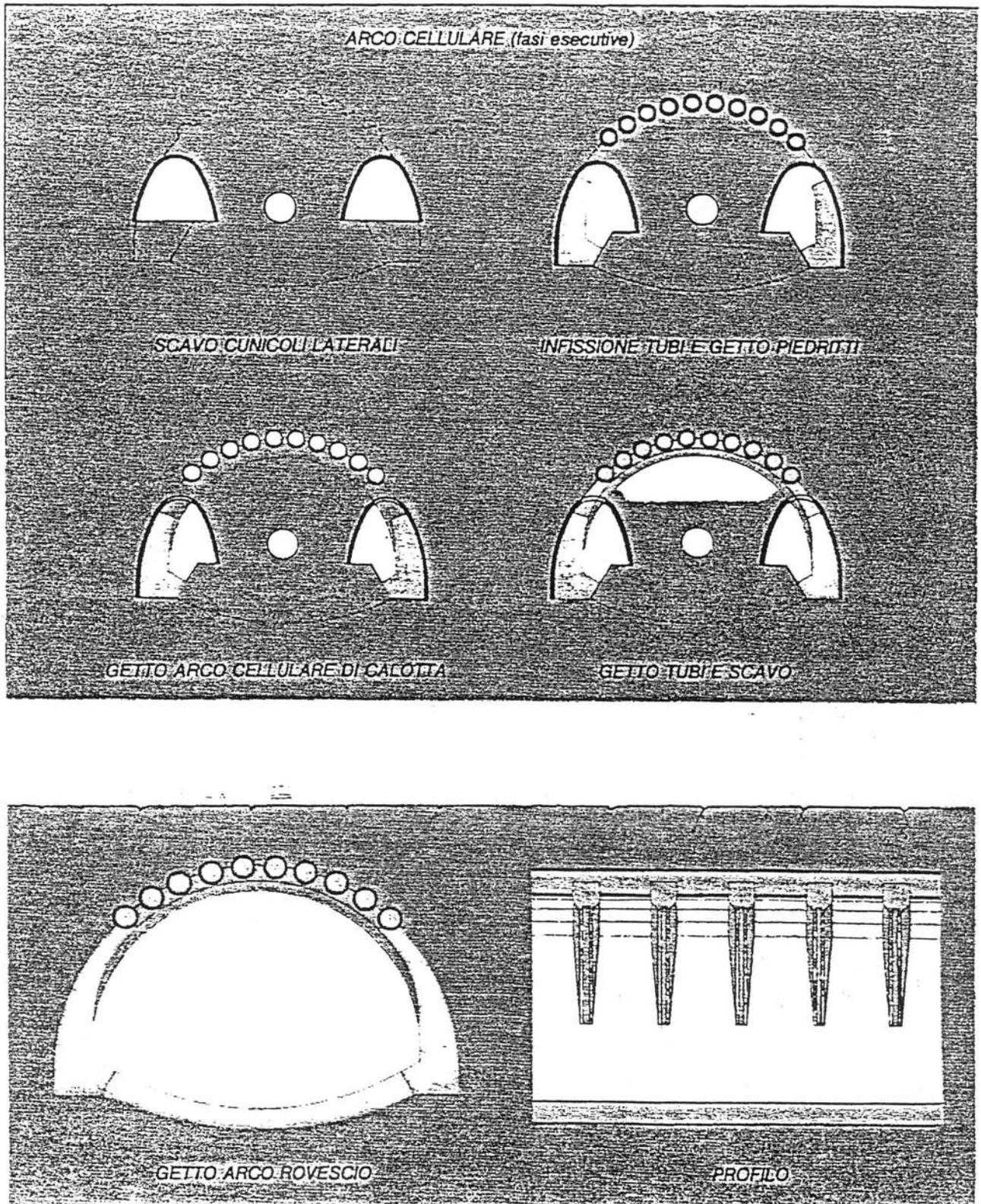


Fig. 4

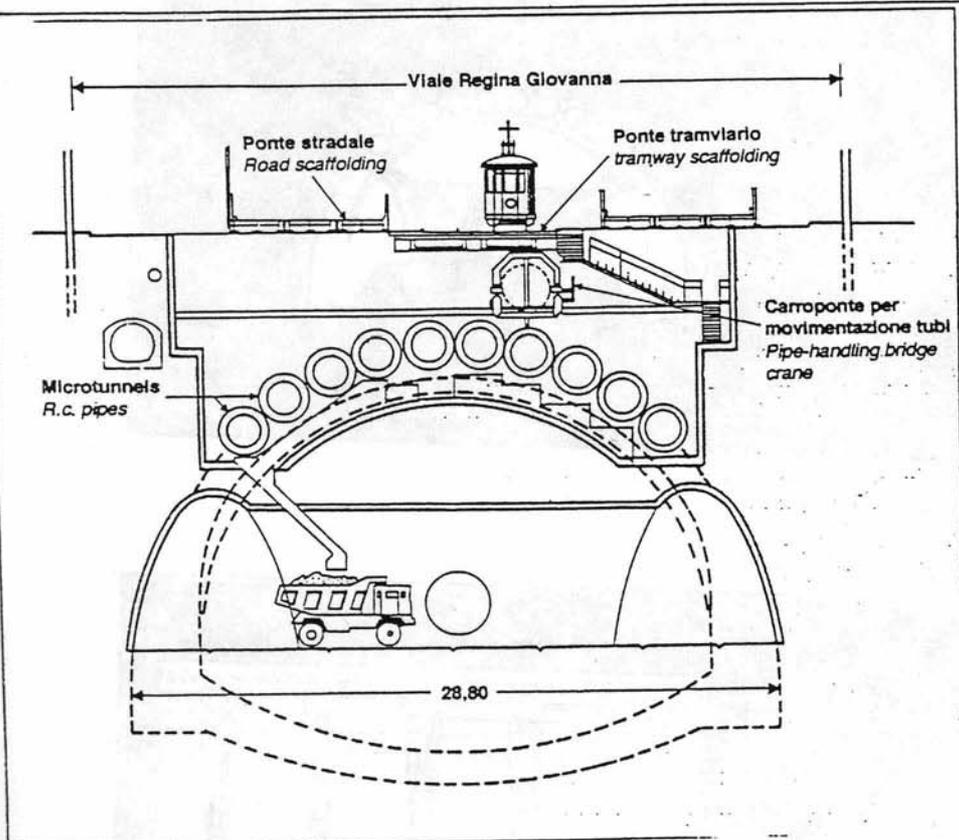
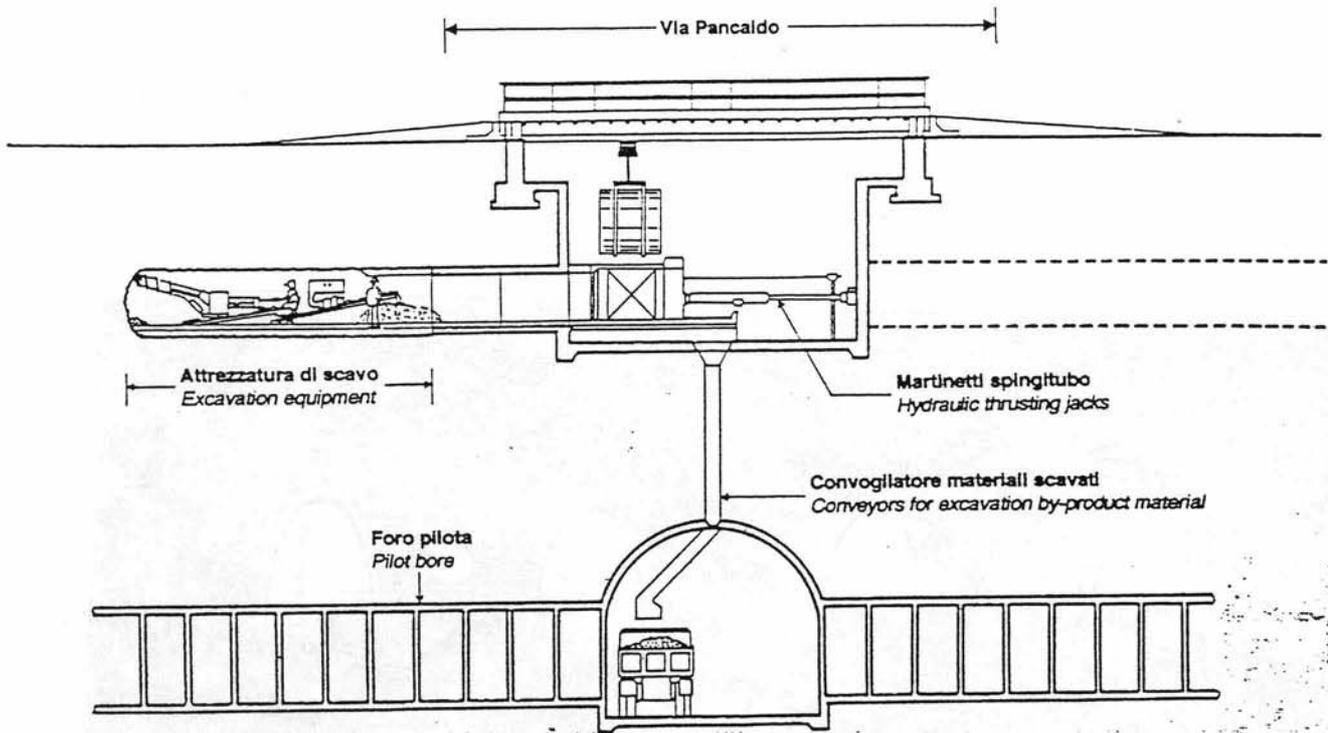


Fig. 5

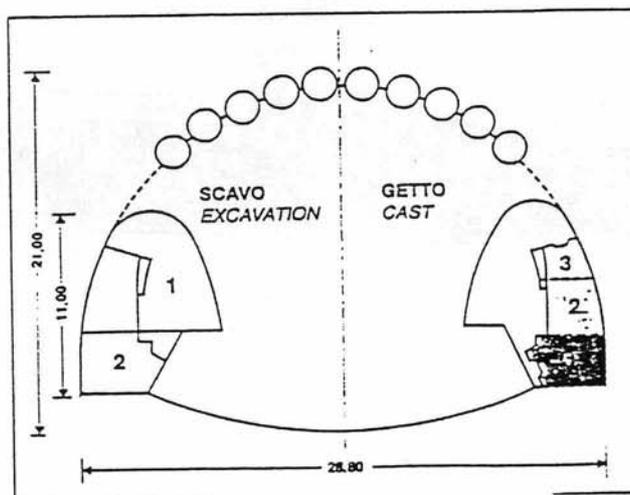


Fig. 6

(related to the grouting stage)
CHECKED AT THE END OF CONSTRUCTION

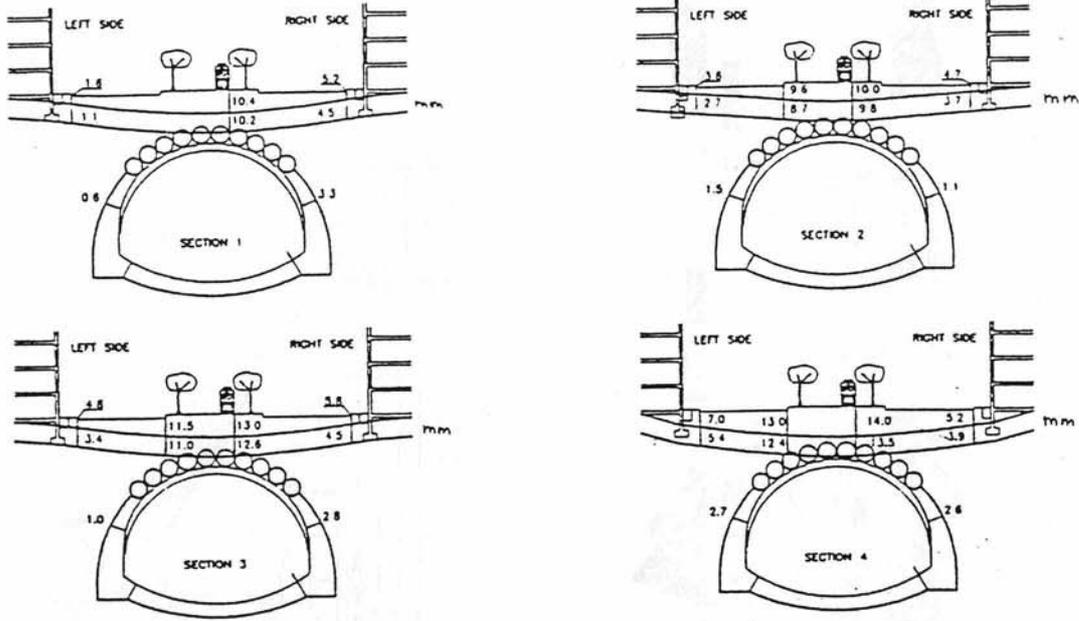


Fig. 8

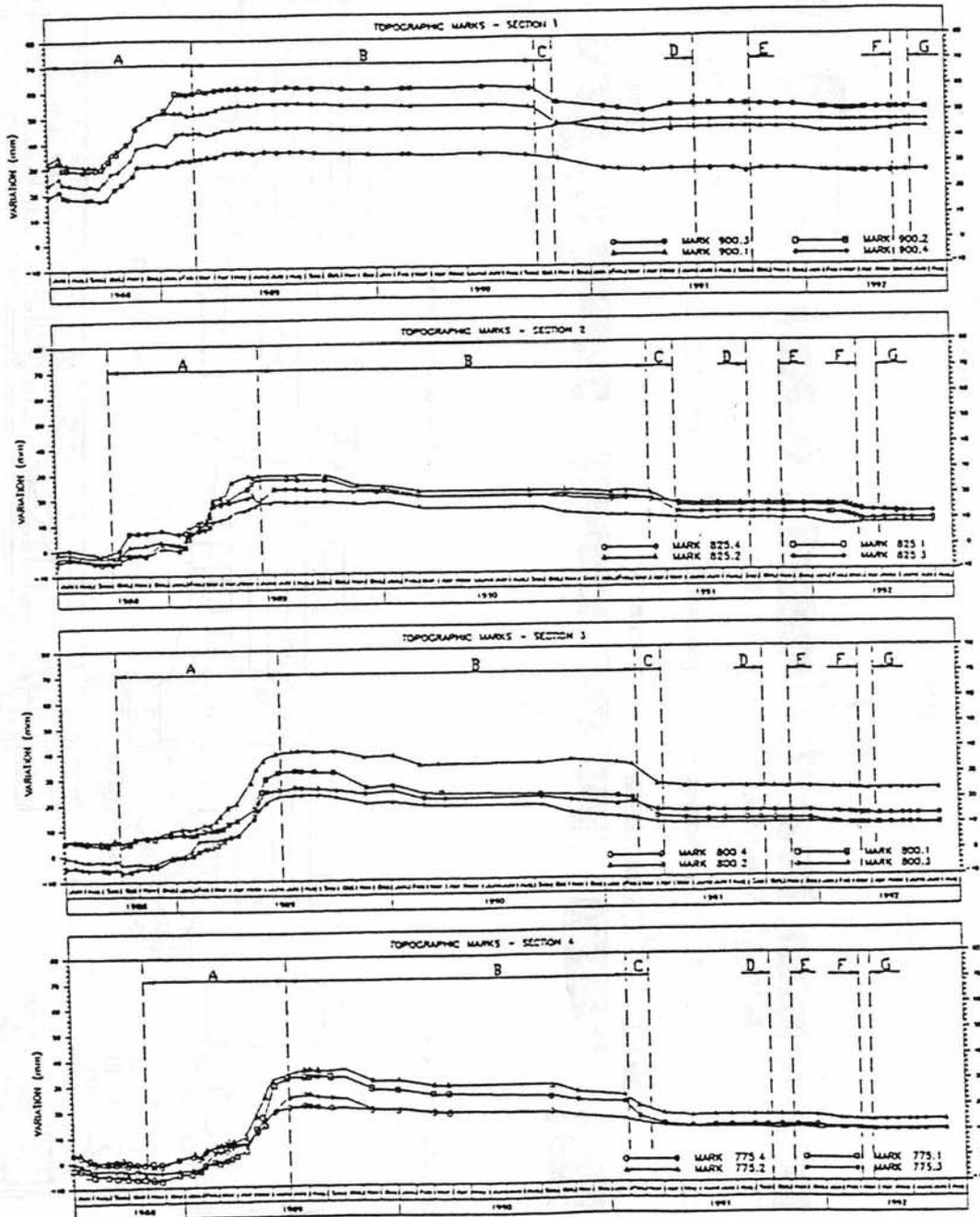


Fig. 9

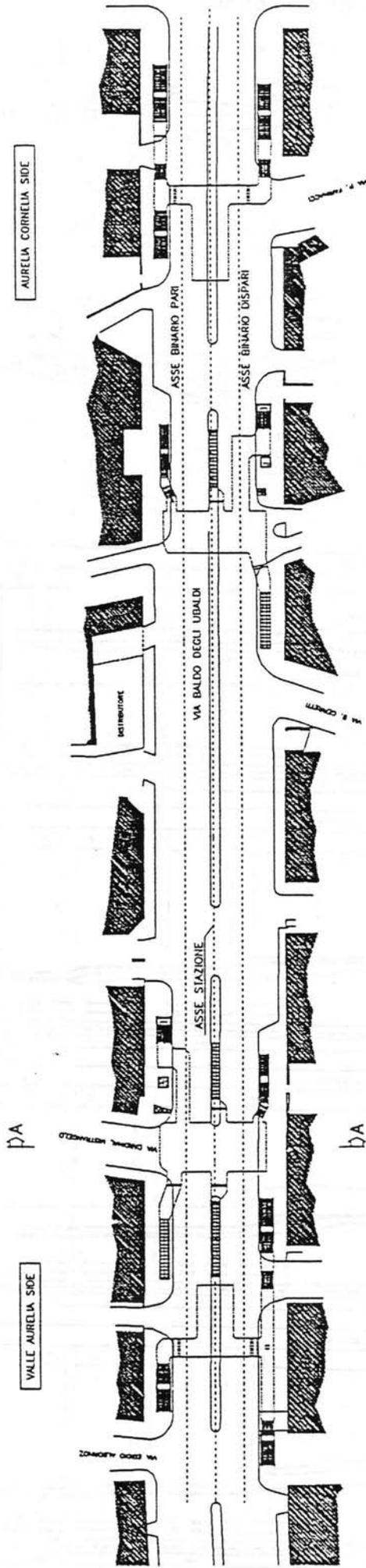
A) GROUTING; B) CELLULAR ARCH CONSTRUCTION; C) UPPER SECTION EXCAVATION;
D) MEZZANINE CASTING; E) BOTTOM SECTION EXCAVATION; F) INVERTED ARCH EX-
CAVATION; G) INVERTED ARCH CASTING
Topographic mark displacements during construction.

DESIGN AND CONSTRUCTION OF TUNNELS
 ADECO-RS SYSTEM

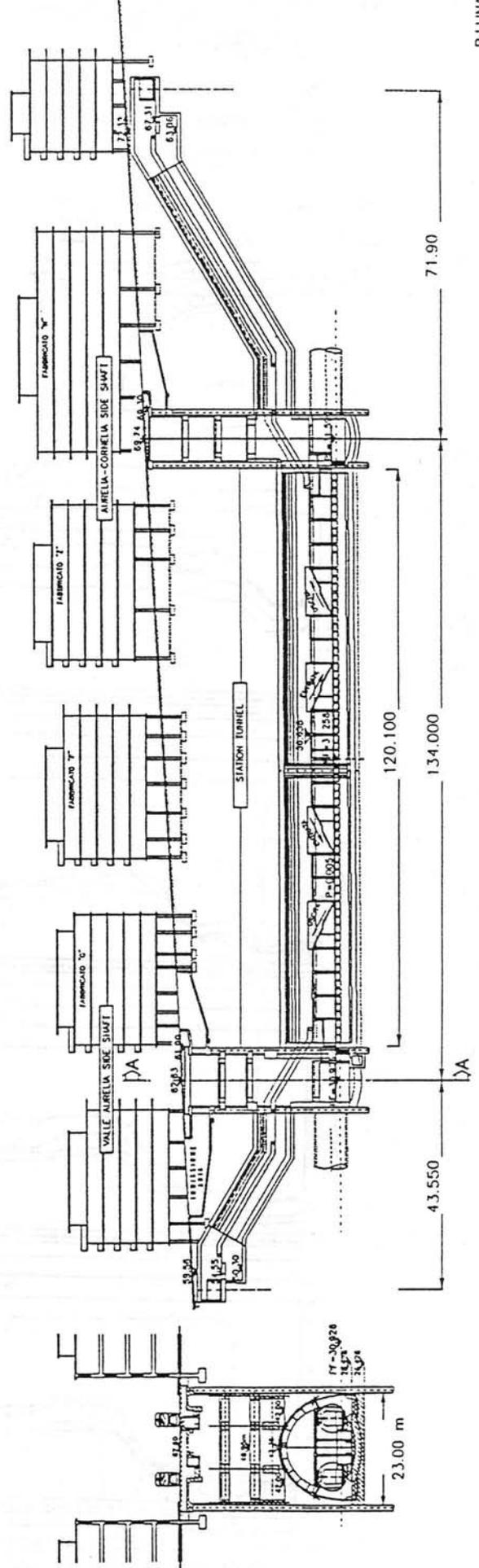
Fig. 10

ROME UNDERGROUND - "BALDO DEGLI UBALDI" STATION

PLAN



LONGITUDINAL PROFILE



DESIGN AND CONSTRUCTION OF TUNNELS
ADECO-RS SYSTEM

ROME UNDERGROUND - "BALDO DEGLI UBALDI" STATION
"RIGHT TRACK"

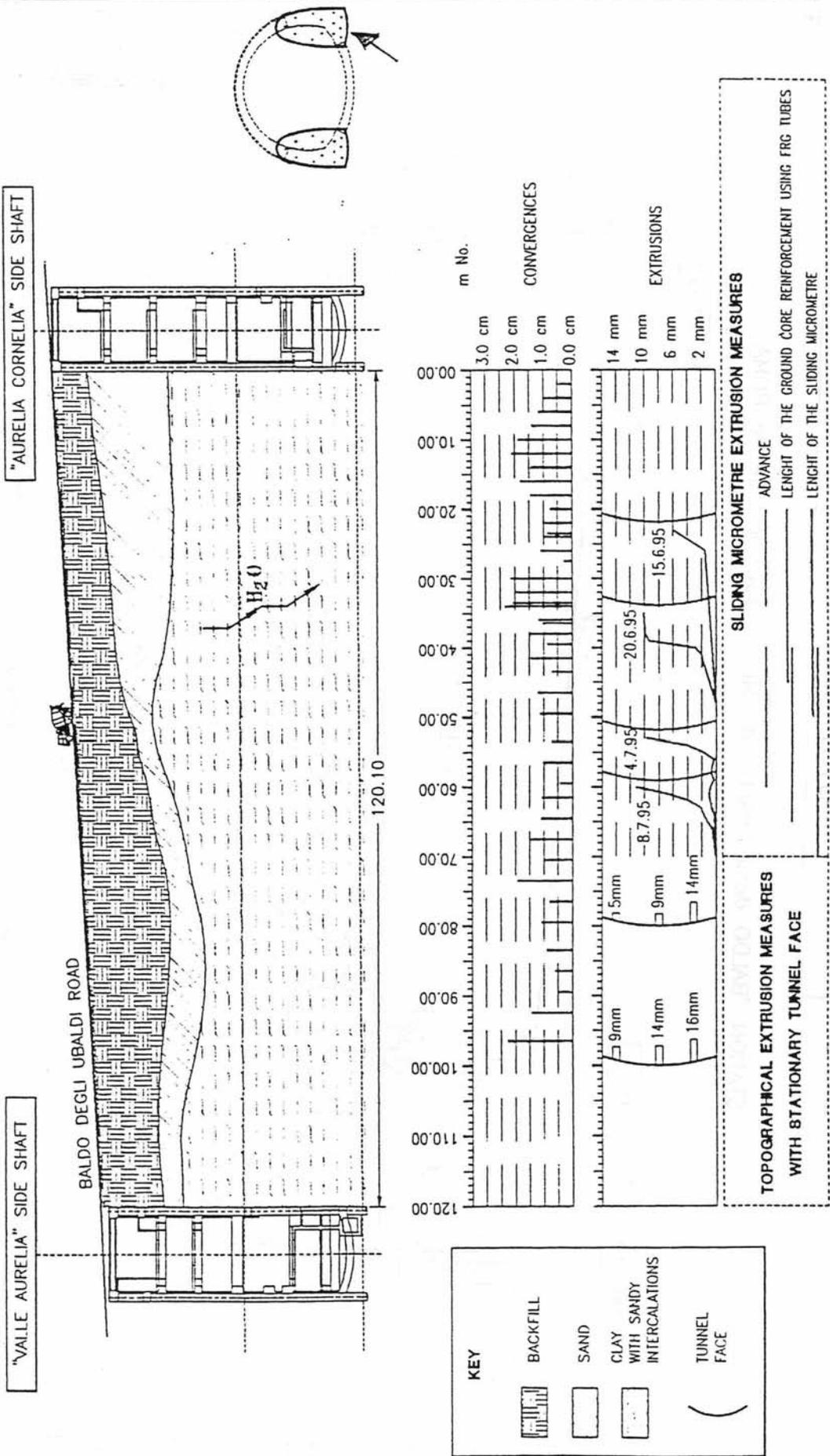


Fig. 11

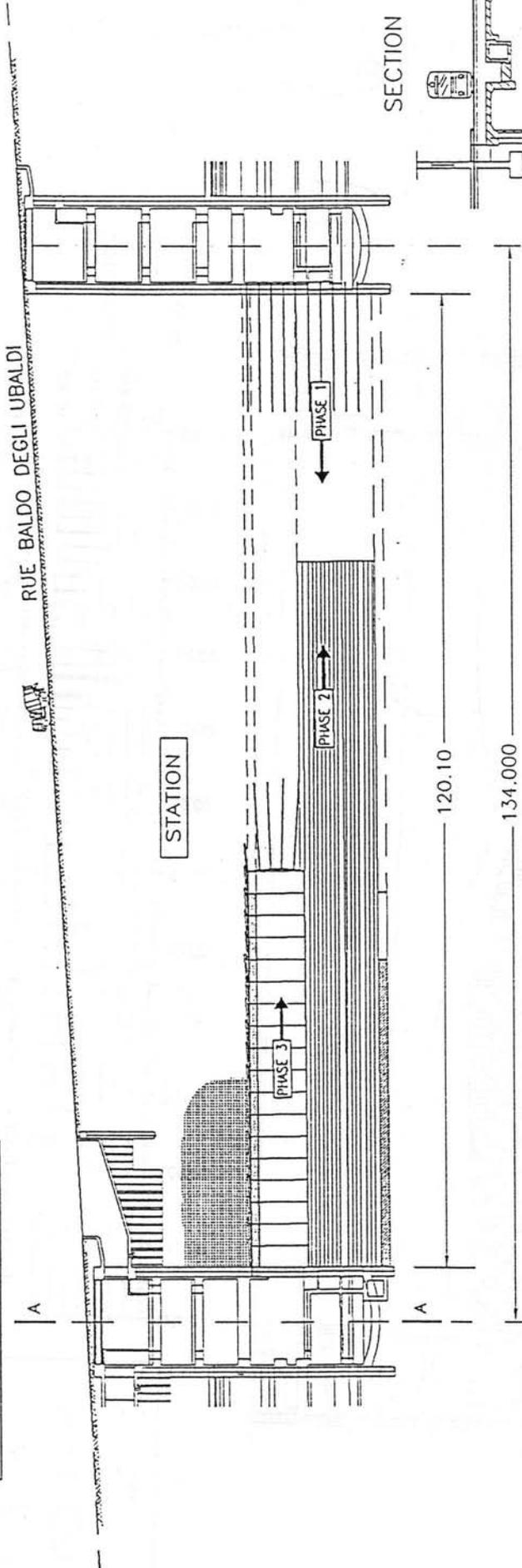
CONCEPTION ET EXECUTION DES TUNNELS
SYSTEME ADECO-RS

FIG. 12

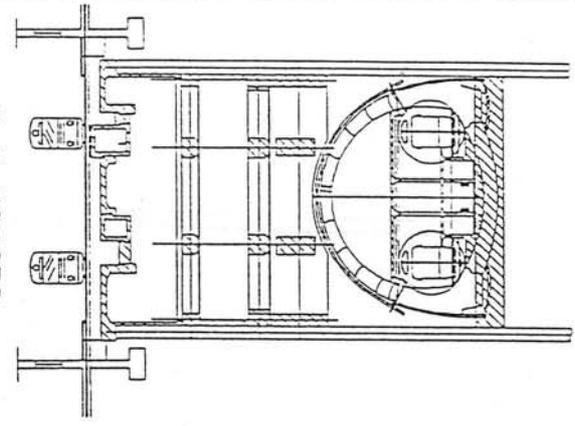
STATION "BALDO degli UBALDI" du METRO sous la ville de ROMA

PUIT COTE AURELIA-CORNELIA

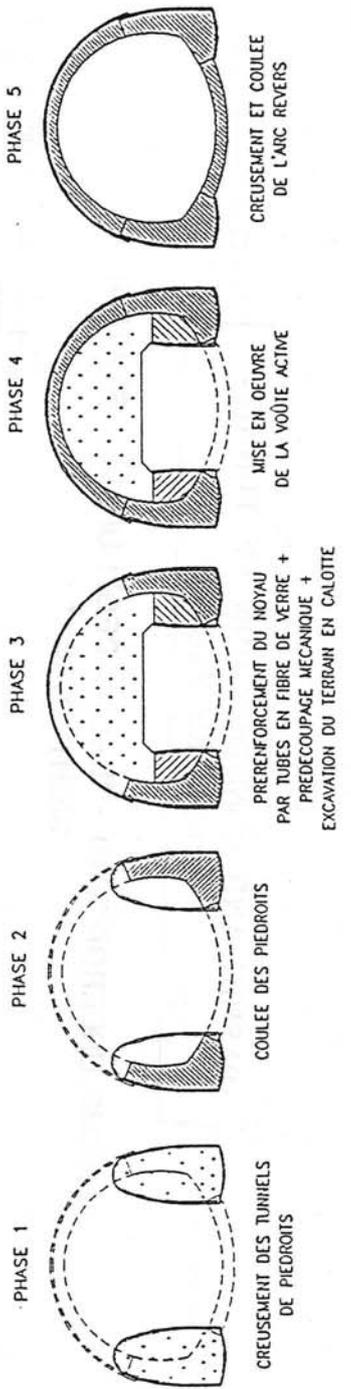
PUIT COTE VALLE AURELIA



SECTION A-A



PHASES D'EXECUTION

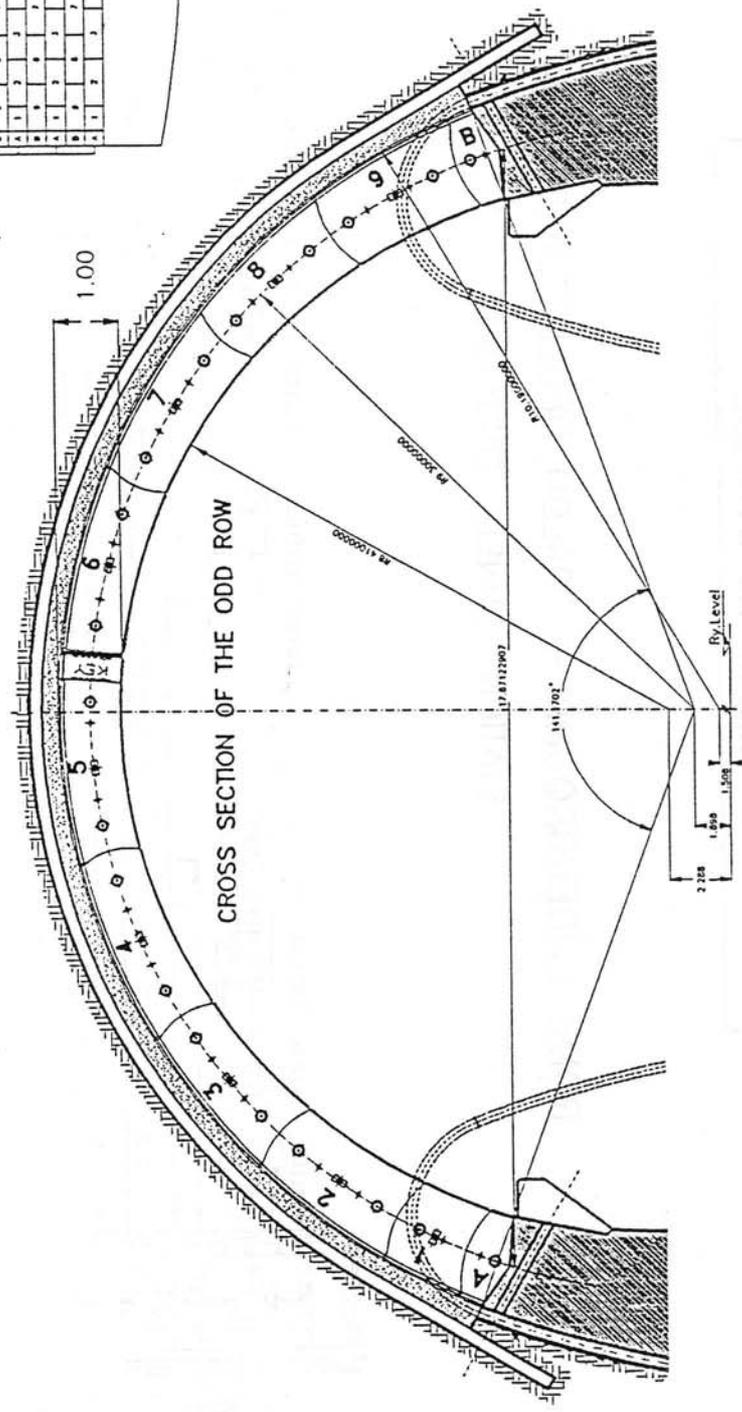
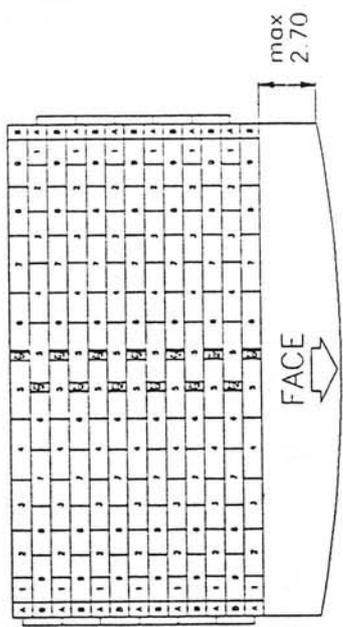
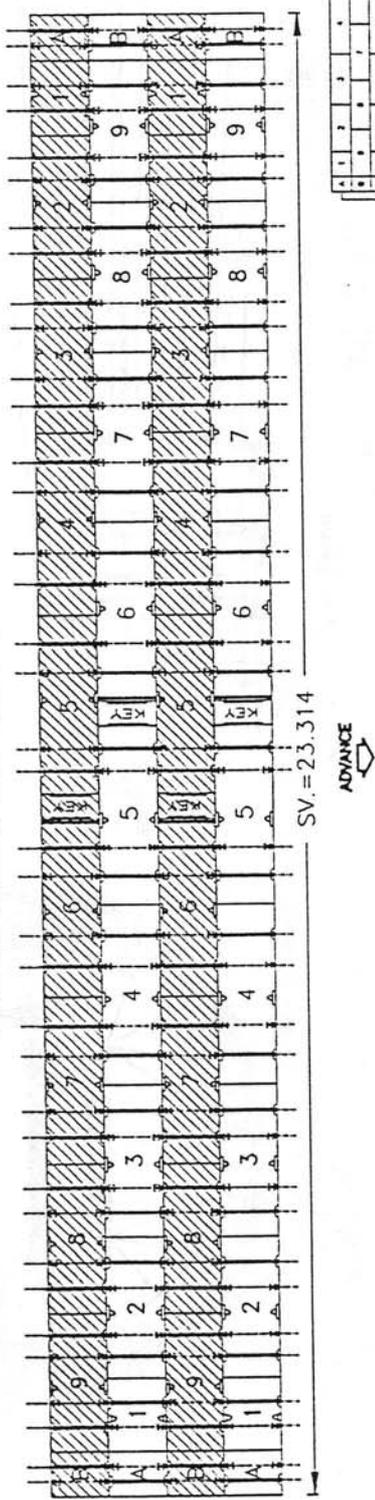


P. LUJARDI - MILANO

DESIGN AND CONSTRUCTION OF TUNNELS
 ADECO-RS SYSTEM

Fig. 13

ROME UNDERGROUND - "BALDO DEGLI UBALDI" STATION
 PROFILE ALONG THE CENTRES OF THE HOLES



DESIGN AND CONSTRUCTION OF TUNNELS
ADECO-RS SYSTEM

Fig. 14

ROME UNDERGROUND - "BALDO DEGLI UBALDI" STATION
STATION TUNNEL MONITORING

