

PREFABRICATED LININGS FOR METROPOLITAN UNDERGROUND RAILWAY TUNNELS CON-
STRUCTED USING MECHANISED SHIELDS

P.Lunardi^(a), E.M.Pizzarotti^(b), G.Cassani^(c), M.Rivoltini^(c)

^aProfessor of Engineering, University of Parma, Technical Director, Rocksoil S.p.A. Piazza S. Marco 1, Milan, Italy

^bEngineer, Technical Manager, Rocksoil S.p.A., Via Solferino 40, Milan, Italy

^cEngineer, Rocksoil S.p.A. Via Solferino 40, Milan, Italy

Abstract

A discussion is presented of design aspects of three projects currently under construction:

- the Genoa Underground Metro, section Principe - Le Grazie (1,700 m approx. of twin tunnel), overall tunnel diameter of 6.1 m., excavated using EPB shield in various ground (loose materials, shaley marls, marly limestones) under the water table, back fill injections of segments at high pressure in valves fitted in the segments themselves;
 - the Naples Underground Metro, Line 1, lot 3 (2,100 m approx. of twin tunnel), overall tunnel diameter of 6.4 m., excavated using open face mechanised shield, ground consisting of tuffs and pozzuolanas, above the water table, simple filler segment backfill injections;
 - the Milan Urban Link Line, lots 6P, 5P and 3P (3,000 m. approx. of twin tunnel), overall tunnel diameter of 7.5 m., excavated using EPB shield, extruded concrete for segment back fill, alluvial soil (sands and gravels), above the water table.
- Particular design aspects of the three projects are examined and these include the geometry of the prefabricated segments, the type of joints, the static dimensioning of the structures and the method used for following the theoretical geometrical line of the route during excavation. The aim is to examine the different problems that had to be dealt with and the different design decisions that were made as a result.

The design of linings in prefabricated segments for tunnels constructed using full face mechanised shields is conditioned by numerous factors:

- the nature of the ground to be bored;
- overburden and morphology of the surface;
- presence of buildings and structures in the proximity of the tunnel;
- presence of water in the ground;
- geometry of the route, vertical and horizontal;

- type of injections to be carried out on the outside of the lining;
- type of excavating equipment;
- type of guidance and control systems for shield advance.

Normally, from a statics view point, a circular lining made of prefabricated segments is an intrinsically labile system that can only be solved statically if at least one of the following conditions is satisfied:

- the loads applied do not exploit the lability of the structure;
- the joints and arrangement of the segments act together to reduce the degrees of freedom of the structure;
- injections effected on the outside of the segments succeed in conferring an adequate degree of rigidity and monolithic properties on the system;
- injections carried out on the outside of the segments are at a pressure which is sufficient to counteract the effect of external loads.

It is therefore clear, then, that the design of segments (thickness, reinforcement, joints, geometry, etc.) is considerably influenced by the distribution of loads around the segment ring (these in turn depend on the nature of the surrounding ground and its response to excavation) and by the method used to fill the ring shaped cavity between the outside of the segments and the perimeter of the excavation.

The presence of water along the route causes both technical and static problems:

- the entrance of water into the tunnel must be prevented both in the short and long term (choice of seals or injection systems that guarantee the impermeability of the linings);
- additional hydrostatic thrusts on the linings must be considered.

The geometry of the segments is directly affected by the geometry (vertical and horizontal) of the route. The different types of rings installed can in fact vary from an ideal minimum number of types (straight rings, strictly for straight routes) to rings of different types (straight and trapezoid) according to the geometry of the curves.

Routes which are very winding, both vertically and horizontally, very often mean that it is impossible to find an ideal trapezoid geometry and either spacers coupled with the segments, or special segments, must be used to produce more marked deviations to the route of the tunnel.

Injections on the outside of the segments can be of two types:

- simple backfill;
- controlled pressure.

While simple filler injections are used simply to guarantee continuous and homogeneous contact between the lining and the surrounding ground, controlled pressure injections are used to prevent excessive surface settlement in loose soils. They also have a precise statics function which is to create an even distribution of the loads acting on the lining and this will also affect the type of joints to be used between segments.

The latter can be either of the flat or profiled type and may either require bolting or not. Although bolting may always be necessary at the installation stage, the distribution of external pressure on the lining may not exploit the lability of a "ring of segments" and consequently bolts may not be required for the final structure.

The longitudinal geometry of the segments (length and radius of curvature that they can describe) will depend on the characteristics of the excavating equipment. It is affected by technical details such as the design of the reinforcement in the segments, for the distribution of the thrust from the jacks, and the possibility of carrying out backfill injections from the tail of the shield rather than directly through the segments.

The dimensions and shape of the segments will depend on the control and guidance systems of the machine: different guidance systems can optimise the systems for erecting the segments in different ways.

The "lining" system, consisting of segments, joints and seals, will not therefore be one and one only for a given tunnel and the optimum lining for a shield built tunnel cannot be decided a priori.

This paper discusses three projects currently under construction, all in urban environments, with excavation using mechanised shield and lined with prefabricated concrete segments. They are as follows:

- the Principe - Le Grazie section of the Genoa light weight metropolitan railway: 1,200 m approx. of twin tunnel;
- Line 1, lot 3 from Salvator Rosa station to Vanvitelli station of the Naples Metro; 1,200 m of twin tunnel;
- lots 3P, 5P and 6P of the Milan Urban Link Line: 3,800 m approx. of twin tunnel.

A) Genoa Metro: section Principe - Caricamento

Client: Municipality of Genoa

Main Contractor and Construction Manager; Ansaldo Trasporti S.p.A.

Construction Sub Contractor: Consorzio Imprese Riunite Genova 2 S.ca.r.l.

The single track running tunnels have an overall diameter of 6.1 m. and an internal diameter of 4.9 m. They are constructed using an EPB shield with bentonite slurries as a fluidification agent.

The choice of method and excavation equipment was governed by the heterogeneous nature of the ground and the presence of the water table at the same level or above the crown of the tunnel.

In particular the route passes through alluviums, fill and marine sediments, shaley marls and marly limestones and the latter are not always sound as far as mechanical properties are concerned.

The overburden of the tunnel is never less than 6 m. and never more than 10 m.

The lining of the tunnel consists of an external ring of pre-cast r.c. segments fitted with hydrophylic expanding rubber seals, jointed using both radial and longitudinal bolts.

A secondary lining, to be installed at subsequent stages, will consist of an in situ casting of a second internal ring completely water-proofed with pvc sheeting. It is reinforced with steel fibre.

The shield is approximately 6.25 m in diameter and manufactured by James Howden & Co.

The overall diameter of the prefabricated segment rings is 6.10 m and the thickness is 0.30 m. The secondary lining is 0.20 m in thickness.

The prefabricated segments are erected to form a ring of six segments plus one key segment.

The rings are of two different types: straight rings with a constant length of 1.2 m and trapezoid rings, with an average length of 1.2 m., which when joined describe curves with a horizontal radius equal to 130 m.

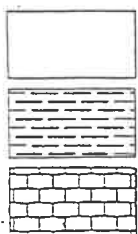
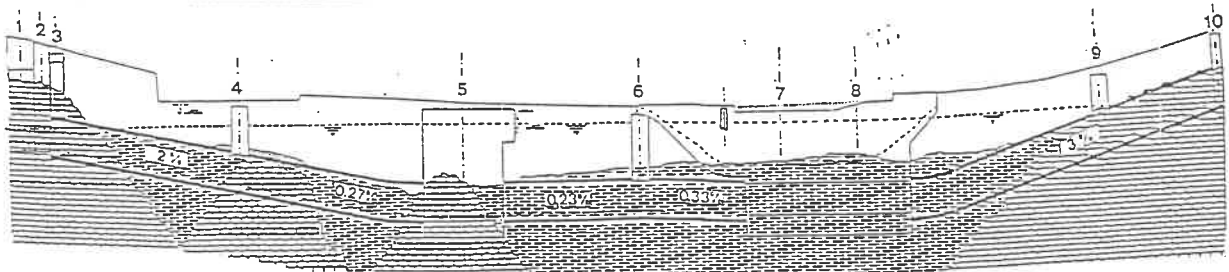
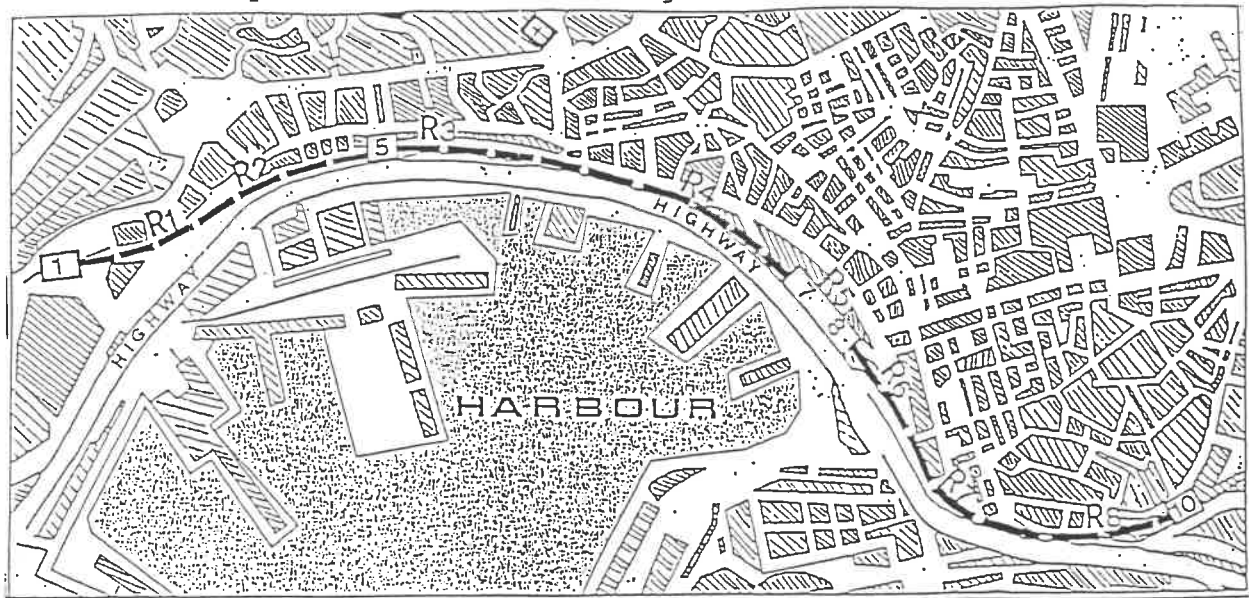
Use of these two types of rings in the correct sequence, with the help of spacers and without rotation of the ring on its axis, makes it possible to approximate the theoretical geometrical route of the tunnel with a broken line. The tunnel is particularly winding with quite tight curves (min R = 160 m).

The sequence of the rings is calculated and optimised using special computer software so that the difference between the theoretical line and the actual line of the route of the tunnel is never greater than 2.5 cm.

The excavating equipment is fitted with a guidance system (CAP) which is able to provide completely automatic control of tunnel advance.

The system is in fact capable of correcting and compensating for accumulated deviations from the theoretical route of the tunnel adjusting the thrust settings and making changes to the optimum sequence of rings for subsequent ring erection.

Transverse joints between segments and longitudinal joints between rings have a flat profile and the connections are made using short straight bolts fixed to steel plates anchored in the segment itself.



embankment and alluvial ground
marl
limestone

- 1 Principe Station
- 2 Principe Shaft
- 3 S.Tomaso F.S. tunnel
- 4 Ventilation chamber
- 5 Darsena Station
- 6 Ventilation chamber
- 7 Communication passage
- 8 S.Giorgio Station
- 9 Ventilation chamber
- 10 Extraction shaft

Minimum radii of planimetric curves

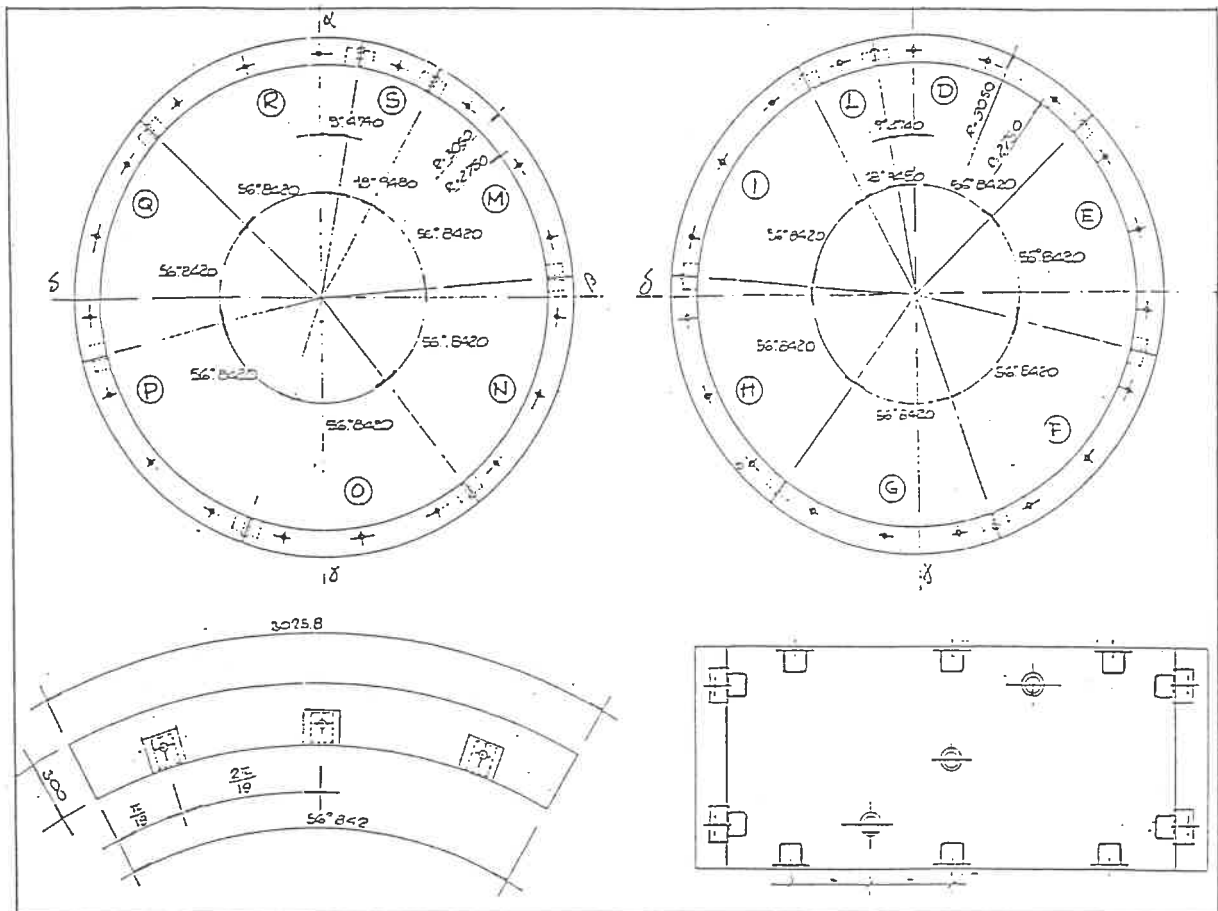
- R1 = 200 m
- R2 = 400 m
- R3 = 160 m
- R4 = 160 m
- R5 = 160 m
- R6 = 160 m
- R7 = 200 m
- RB = 160 m

Back fill injections around the rings (Clean Back system, Tachibana & Co Ltd) are carried out continuously as soon as the ring leaves the shield. The injections are effected by means of special valves (Charcon Tunnel) positioned close to the edges of the ring and in the segments adjacent to the key segment. The method of injection and the pressure is designed to make sure that the ring is stressed with a uniform thrust on its outer surface so that the segments are subject to mainly compressive forces. Injection pressure

is constant and controlled, a little greater than the maximum value of external loads. The result is full centring of the pressure on the lining.

The method used for back fill injection of the segments means that transverse continuity between segments is not necessary and consequently segments with flat joints, longitudinally and transversally, were opted for.

Each ring can then be considered as an independent static entity with respect to the rest of the structure.



Bolt jointing was used, both longitudinally and transversally, to guarantee greater safety and rigidity of the structure and to prevent dislocations and it was in any case needed for the erection of the segments. For the same reasons the positioning of the transverse joints was staggered from one ring to another. This means that two different types of rings must be produced: type A with the key segment to the right and type B with the key segment to the left.

B) Naples Metro: Line 1, lot 3

Client: Municipality of Naples

Main Contractor: Società per la progettazione e la costruzione della Metropolitana di Napoli S.p.A.

Project management: Overall design and works direction: Metropolitana Milanese Strutture e Infrastrutture per il Territorio S.p.A.

Construction Sub Contractor: Metrosud S.p.A. Napoli

The single track running tunnels (o.d. = 6.40 m.) were excavated using an open face shield with an articulated mantle (Markham & Co. Ltd).

The ground through which the tunnel passes consists of rock and soil of a volcanic nature: tuffs and pozzuolanas in part loose and in part cohesive,

above the water table in all places.

The sections of the tunnel which pass through tuffs and pozzuolanas were identified by geological surveys and different types of lining were decided for the two different types of material.

While the tuffs in question respond excellently to excavation and do not exert any pressure on the lining, the pozzuolanas exhibit the classic behaviour of a soil.

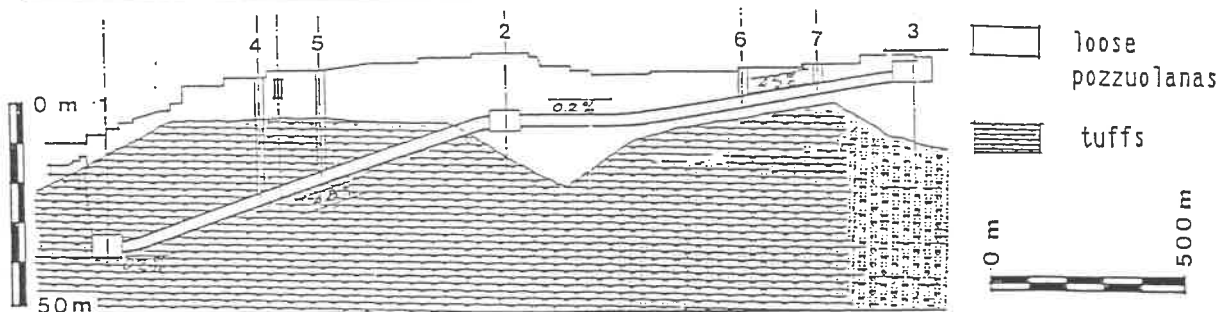
The total overburden of the tunnel is between 10 and 30 m.



- 1 S.Rosa Station
- 2 Cilea Station
- 3 Vanvitelli Station
- 4 Ventilation chamber
- 5 Ventilation chamber
- 6 Ventilation chamber
- 7 Ventilation chamber

Minimum radii of horizontal curves

- R1 = 600 m
- R2 = 300 m
- R3 = 550 m
- R4 = 325 m
- R5 = 210 m



The final lining of the tunnel consists of a ring of prefabricated segments in r.c. for the section in pozzuolana and in f.r.c. (Bekaert) for the section in tuff. The segments are fitted with seals and are jointed both radially and longitudinally using bolts.

The diameter of the shield is approximately 6.55 m and the overall diameter of the prefabricated segments is 6.40 m with a thickness of 0.30 m.

The geometrical criteria for the design of the segments were the same as those adopted for the Genoa Metro. The rings are in fact of two different types: straight with a constant length and trapezoid with an average length of 1.2 m, which when connected describe a curve with a horizontal radius of 210 m. The radial joints are staggered to avoid alignment between rings (key segments are alternated, right and left).

As has been said the theoretical route of the tunnel is approximated by using appropriate sequences of these two types of rings, with the help of spacers and without rotation of the ring on its axis.

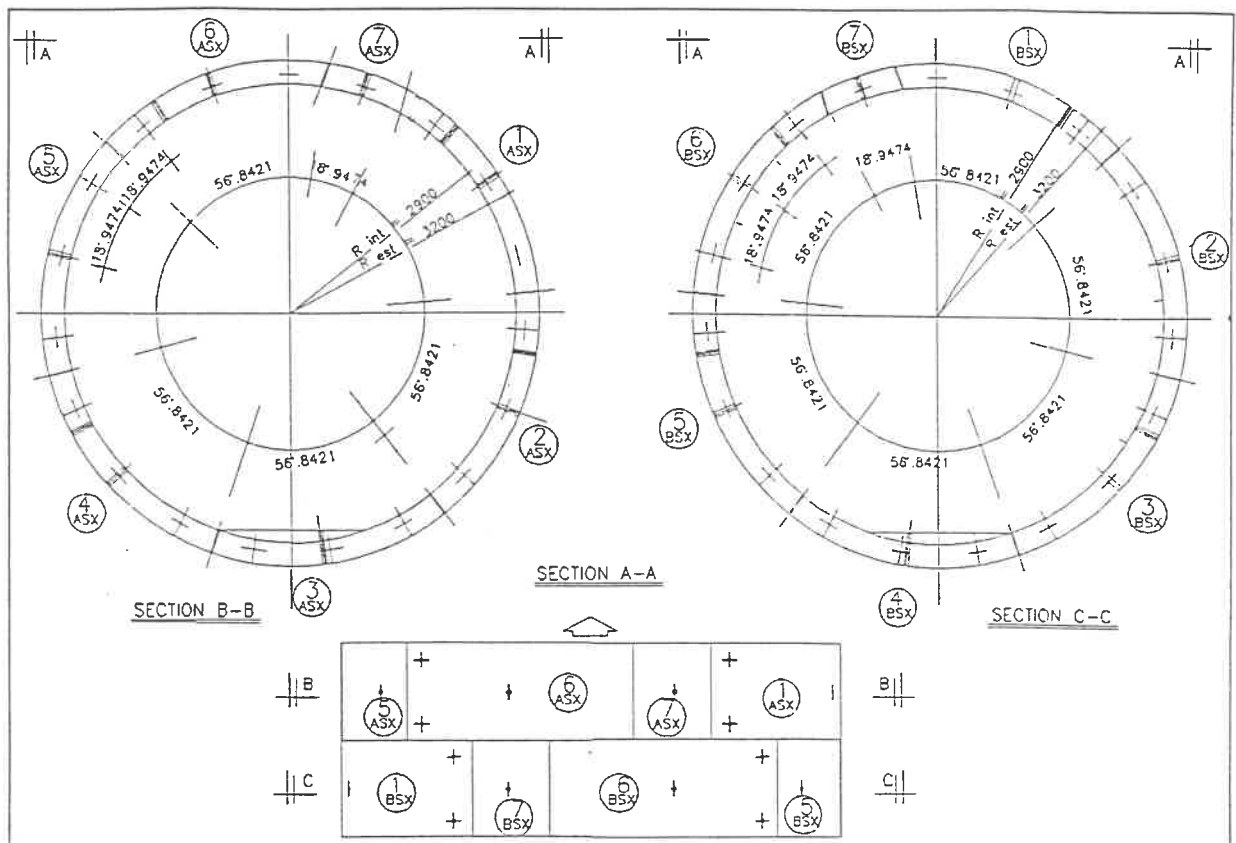
The sequence of the rings is calculated and optimised using special computer software so that the difference between the theoretical line and the actual line of the route of the tunnel is never greater than 2.5 cm.

The excavating equipment is fitted with a special measurement system(ZED)

for tunnel advance. This system establishes the position of the machine with respect to the planned line of the route. The machine operator can make use of this data to intervene and try to minimise deviations from the planned route.

Transverse and longitudinal joints between segments have a flat profile and the connections are made using short straight and curved bolts.

Back fill injections around the rings are carried out directly through holes in the segments (Charcon Tunnel) for simple back fill of the overbreak. The injection pressure is designed to make sure that the cavity between the outside of the ring and the ground is completely filled and that no mortar returns inside the shield through the tail seal.



Radial jointing using bolts ensures the transmission of normal and shear action, but is not able to transmit moment except to a negligible extent. If the succession of rings is considered as a monolithic entity then the moments calculated must be incremented on the basis of that hypothesis. The design moments are practically equal to double the calculated moments.

For the section in tuff, the design of the dimensions of the longitudinal and radial bolts was based on criteria relating to assembly operations and erection errors. The type of bolt is the same as that used for the Genoa Metro.

For the segments in pozzuolana, however, the bolts were designed to permit the transmission of shear action between segments. The transverse bolts are of the same type as those used for tuff but double in number while the longitudinal bolts are curved with a high yield point.

It is interesting to note that the shield chosen did not have double seal

brushes and could not support pressure back fill injections. On the other hand these injections were not strictly necessary, even in the pozzuolana, since the overburden was relatively large and consequently problems of surface settlement were less important. In Milan and Genoa surface settlement dictated the use of controlled pressure injections.

The choice of excavating equipment, open face type rather than pressurised as in the other two cases discussed, was justified on similar grounds.

C) Milan Urban Link Line: lots 3P, 5P and 6P

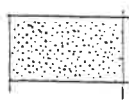
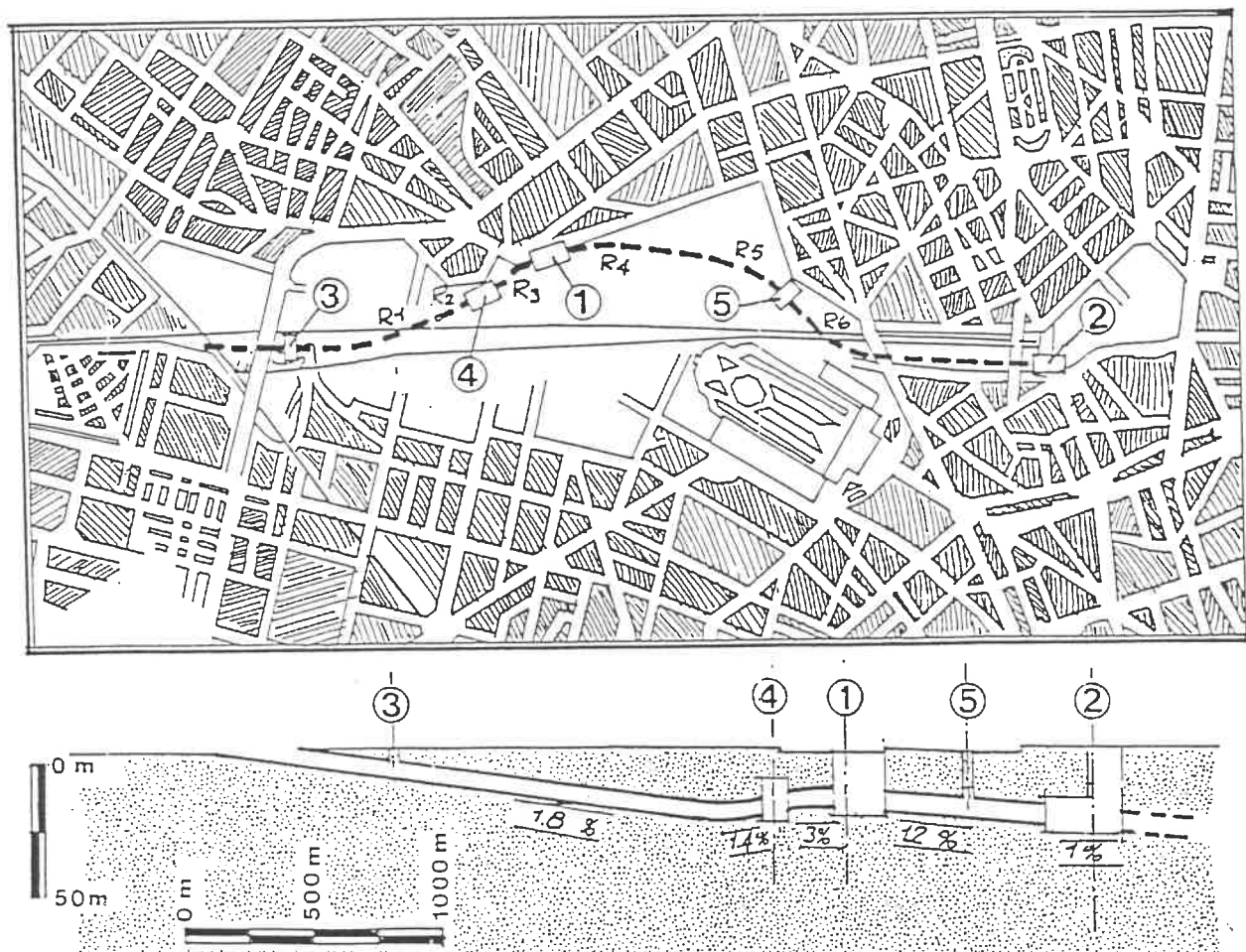
Client: Region of Lombardy, Municipality of Milan, State Railways, North Milan Railways

Project management: Overall design and works direction: Metropolitana Milanese Strutture e Infrastrutture per il Territorio S.p.A.

General Constructor: Consorzio Passante S.c.a.r.l.

Executive design: C.P.E. s.r.l, Reico S.p.A. and Rocksoil S.p.A.

The single track running tunnels, 7.5 m in diameter, are excavated using an EPB shield. The ground is completely non cohesive and partially below the water table.



alluviums
(sand and
gravel)

Minimum radii of
planimetric curves

R1 = 605 m R3 = 400 m R5 = 400 m
R2 = 400 m R4 = 400 m R6 = 450 m

1 Lancetti Station
2 Garibaldi Station
3 Ventilation chamber
4 Interchange railway tunnel
5 Ventilation chamber

In fact the Milanese sub-soil consists entirely of alluvial deposits with a granulometry that varies from silty sand to gravel. The density of the ground varies with depth: fairly dense for the first 10 m and very dense at depths of more than 30 m.

The overburden of the tunnel is between 4 m. and 14 m..

The lining of the tunnel consists of pre-cast r.c. segments fitted with seals, jointed using bolts radially and plastic pins longitudinally (Mayreder Consult).

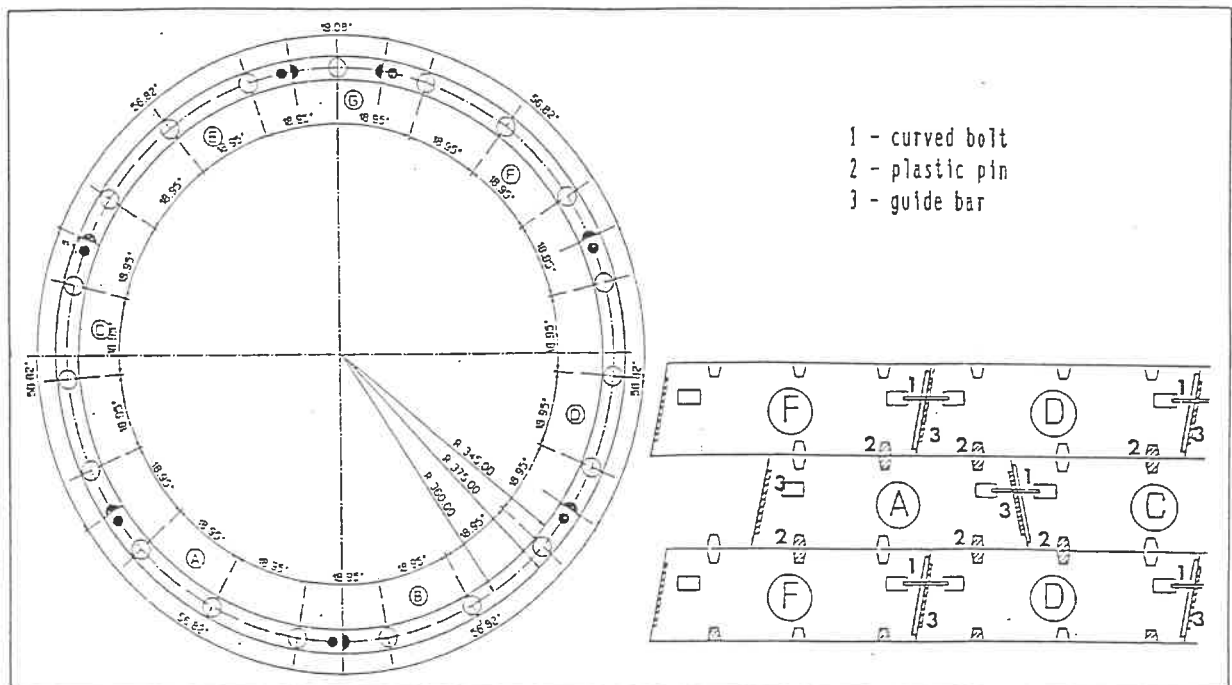
There is no secondary lining cast inside the segments which, as is the case in Naples, constitute the final lining of the tunnels.

The shield is approximately 8.00 m in diameter and was manufactured by Neypric Framatome Mecanique to the design specifications and with the co-operation of Mitsubishi Heavy Industries.

The fluidification agent used at the face inside the cutting excavation chamber is a foam (Obayashi process).

The overall diameter of the prefabricated segment rings is 7.5 m and the thickness is 0.30 m. The prefabricated segments are erected to form a ring of six segments plus one key segment with an average length of 1.2 m.

The rings are all trapezoid in shape and when simply butted together describe a curve with a horizontal minimum radius of curvature equal to 300 m.



Back fill injections around the rings to fill the overbreak are carried out with extruded concrete using Hochtief technology.

The concrete is pumped through nozzles positioned around the circumference of the tail of the shield so as to fill the space, between the ground and the segments, immediately behind the machine.

The concrete is maintained constantly under pressure so as to counterbalance the thrusts from the ground and prevent the onset of subsidence. Control of shield advance is effected by constant monitoring of the position of the machine with respect to the planned theoretical line of the route. A laser measurement system establishes the position of the machine with respect to its theoretical point of advance and the horizontal angle of deviation between the planned line of the route and the horizontal axis of the

machine (ZED). Inclinometers are used to measure roll of the machine on its axis and "look-up". All this data means that the operator can act to minimise deviations of the machine from the planned theoretical route.

In addition, three extensometers (Ring Orientation Units) placed around the line of the ring of segments, between the thrust jacks, measure the distance between the last ring installed and the machine.

The required rotation of the ring for optimum filling of the space between the last ring installed and the rear of the shield is calculated automatically.

It is interesting to note that this system, which involves rotation of the rings but nevertheless always avoids longitudinal alignment of adjacent radial joints, is possible thanks to the injection method used. Injection is effected directly from the tail of the shield without the need to fit the segments with special nozzles in precise positions to be maintained constant along the whole route. This system also means that the number of different types of segments and rings can be minimised with obvious advantages in terms of productivity. There will always be 6 + key = 7 segments for each ring.

The transverse joints are flat and the connections between successive rings are effected by means of plastic pins which are forced into special seatings in the concrete of the segments.

The injection system adopted (continuous and controlled pressure) does not require any particular static performance from these joints, which were in fact designed on the basis of assembly and possible erector-cutter system error criteria. The radial joints, however, are shaped to allow the insertion of a guide bar to facilitate the erection process of the segments.

They are locked together using curved bolts. These bolts do not have any particular static functions either, but they effect correct compression of the hydraulic seal and provide electrical continuity for the earthing of the lining along the various sections of the tunnel.

The stresses resulting on the ring of segments are essentially compressive thanks to the effect produced by the pressure of the back fill injections on the segments. This means that extremely light reinforcement can be used together with joints with no static functions (there is no transmission of bending action and shear actions are transmitted by friction), as already described.

From the various experiences in tunnel design discussed here it is clear that the design of the lining, in all its parts (segments, joints and seals), of a shield bored tunnel has to be dealt with case by case. The machine-segment-ground system must be defined and a real and genuine construction and operational technology set up. Such a technology will often allow original ideas to be introduced to the various methods that are adopted from time to time.

REFERENCES

- 1 R.J.S. Mc Bean: - Precast concrete shafts and tunnel linings. Institute of Civil Engineering and British Tunnelling Society: "Soft Ground Tunnelling Course", Imperial College, July 1990, London.
- 2 P. Fiorini, V. Guglielmetti, P. Lunardi, S. Morelli, E.M. Pizzarotti (1991), The "Principe-Caricamento" stretch of the Genova subway carried out with an E.P.B. shield. Congress "Towards new Worlds in Tunnelling" ITA '92, Acapulco, Mexico 16-20 May 1992

RIVESTIMENTI PREFABBRICATI DI GALLERIE METROPOLITANE REALIZZATE CON SCUDO MECCANIZZATO

Autori: G.Cassani^(a), P.Lunardi^(b), E.M.Pizzarotti^(c), M.Rivoltini^(d)

^aEngineer, Rocksoil S.p.A. Via Solferino 40, Milano, Italia

^bProfessor of Engineering Parma University, Technical Director Rocksoil S.p.A. Piazza San Marco 1, Milano, Italia

^cEngineer, Technical Manager, Rocksoil S.p.A. Via Solferino 40, Milano, Italia

^dEngineer, Rocksoil S.p.A. Via Solferino 40, Milano, Italia

Abstract: Vengono riportate le esperienze progettuali effettuate su tre lavori attualmente in corso di realizzazione circa la geometria dei conci prefabbricati, le tipologie delle unioni, il dimensionamento statico delle strutture, le modalità con cui viene seguito il tracciato. I casi presentati riguardano:

- la Metropolitana di Genova nel tratto Principe-Le Grazie (≈ 1200 m per 2 canne) con galleria da 6.1 m di diametro esterno realizzata con scudo EPB in terreni vari (materiali sciolti, marne argillose, calcari marnosi) sotto falda. Le iniezioni a tergo dei conci sono effettuate da valvole installate sui conci stessi con pressioni elevate;
- la Metropolitana di Napoli nella linea 1, lotto 3 (≈ 2100 m per 2 canne) con galleria da 6.4 m di diametro esterno realizzata con scudo meccanizzato a fronte aperto in terreni costituiti da tufi e pozzolane sciolte sopra falda con iniezioni di semplice intasamento a tergo dei conci;
- il Collegamento Ferroviario Passante di Milano nei lotti 6P, 5P e 3P (≈ 3000 m per 2 canne) con galleria da 7.5 m di diametro esterno realizzata con scudo EPB con calcestruzzo estruso a tergo dei conci, in terreni alluvionali (sabbie e ghiaie) sopra falda.

Dei tre lavori vengono evidenziati aspetti peculiari di progetto quali la geometria dei conci prefabbricati, le tipologie delle unioni, il dimensionamento statico delle strutture, le modalità con cui viene seguito l'andamento del tracciato teorico durante gli scavi) al fine di evidenziare le differenti problematiche che è stato necessario affrontare e le diverse scelte progettuali che ne sono derivate.

La progettazione dei rivestimenti in conci prefabbricati per gallerie realizzate con scudo meccanizzato full face è condizionata da numerosi fattori:

- caratteristiche dei terreni attraversati;
- coperture e morfologia di superficie;
- presenza di manufatti in prossimità delle gallerie;
- presenza d'acqua nel terreno;
- andamento plano-altimetrico del tracciato;
- tipo di iniezioni da eseguire a tergo del rivestimento;
- caratteristiche dell'attrezzatura di scavo;
- caratteristiche dei sistemi di guida e di controllo dell'avanzamento dello scudo.

Di norma, dal punto di vista statico, un rivestimento circolare in conci prefabbricati è un sistema intrinsecamente labile che può essere staticamente risolto solo se viene soddisfatta almeno una delle seguenti condizioni:

- i carichi applicati non approfittano della labilità strutturale;
- le unioni e la disposizione dei conci concorrono nel ridurre i gradi di libertà della struttura;
- le iniezioni a tergo dei conci riescono a conferire al sistema un adeguato grado di rigidità e monoliticità;
- le iniezioni a tergo dei conci vengono eseguite a pressioni tali da riequilibrare i carichi esterni.

E' evidente quindi che il progetto dei conci (spessori, armature, unioni, geometria, etc.) risulta notevolmente influenzato dalla distribuzione dei carichi al contorno dell'anello (che dipendono a loro volta dalle caratteristiche dei terreni attraversati e dal loro comportamento allo scavo) e dalle modalità di riempimento dell'intercapedine anulare tra conci e perimetro di scavo.

La presenza d'acqua lungo il tracciato comporta problemi sia tecnologici che statici:

- vanno impedito le venute d'acqua in galleria sia nel breve che nel lungo termine (scelta di guarnizioni o sistemi di iniezione che garantiscano la tenuta stagna dei rivestimenti);
- devono essere considerate spinte idrostatiche aggiuntive sui rivestimenti.

La geometria dei conci è direttamente influenzata dall'andamento plano-altimetrico del tracciato; la tipologia degli anelli messi in opera può infatti variare da un numero minimo ideale di tipi di anelli (anello retto per tracciati esclusivamente rettilinei) ad anelli di varia natura (rettilinei e trapezi) a seconda della geometria delle curve.

Tracciati molto sinuosi sia altimetricamente che planimetricamente comportano molto spesso l'impossibilità di determinare una geometria ideale e richiedono l'utilizzo di spessoramenti che accoppiati ai conci producano deviazioni più marcate dell'asse galleria o di conci speciali.

Le iniezioni realizzate a tergo di conci possono essere di due tipi:

- di semplice intasamento;
- a pressione controllata.

Mentre le iniezioni di intasamento hanno il solo scopo di garantire un contatto continuo e omogeneo tra rivestimento e terreno, le iniezioni a pressione controllata sono necessarie per evitare eccessivi cedimenti superficiali in terreni sciolti. Hanno inoltre una precisa funzione statica in quanto permettono di ricentrare i carichi agenti sul rivestimento influenzando anche la tipologia delle unioni tra conci.

Queste ultime possono essere realizzate con giunti piani o sagomati e possono richiedere o meno la presenza di bullonatura. Se infatti la bullonatura è sempre necessaria in fase di montaggio, la distribuzione delle pressioni esterne sul rivestimento può essere tale da non sfruttare la labilità dell'"anello di conci", non richiedendo la presenza di bullonatura in fase finale.

Dalle caratteristiche dell'attrezzatura di scavo dipendono la geometria dei conci in senso longitudinale (lunghezza e raggio di curvatura minimo descrivibile), particolari tecnologici quali l'armatura di diffusione dei carichi di spinta dei martinetti e la possibilità di eseguire le iniezioni di intasamento dalla coda dello scudo piuttosto che direttamente dai conci.

Al sistema di guida e di controllo di avanzamento della macchina sono legate le scelte sulla morfologia dei conci: diversi sistemi di guida possono infatti in modo differente ottimizzare la sequenza di messa in opera degli anelli.

Il sistema "rivestimento", costituito da conci, unioni e guarnizioni, non è dunque univocamente determinato e non può quindi essere indicato a priori

un rivestimento ottimale per gallerie scudate.

Vengono qui presentati tre lavori attualmente in corso di realizzazione in ambiente urbano relativi a gallerie eseguite con scudi meccanizzati e rivestite con conci in calcestruzzo prefabbricato.

I casi esposti riguardano:

- la Metropolitana Leggera di Genova nella tratta Principe - Le Grazie: \approx 1200 m di galleria per due canne;
- la Metropolitana di Napoli nella Linea 1, lotto 3 dalla Stazione Salvatore Rosa alla Stazione Vanvitelli: \approx 2100 m di galleria per due canne;
- il Collegamento Ferroviario Passante di Milano nei lotti 3P, 5P e 6P: \approx 3800 m di galleria per due canne.

A) Metro-Genova: tratta Principe - Caricamento.

Commitente : Comune di Genova

Concessionaria and Construction Manager: Ansaldo Trasporti S.p.A.

General Constructor: Consorzio Imprese Riunite Genova 2 S.c.a.r.l.

Le gallerie di linea a singolo binario sono realizzate mediante uno scudo EPB con utilizzo di fango bentonitico come agente fluidificante ed hanno diametro esterno di 6.1 m e diametro interno utile di 4.9 m.

La scelta del metodo e dell'attrezzatura di scavo è stata guidata dalla eterogeneità dei terreni e della presenza della falda a quota uguale o superiore a quella della calotta della galleria.

In particolare lungo il tracciato si incontrano alluvioni, riporti e sedimenti marini, marne argillose e calcari marnosi, questi ultimi non sempre provvisti di buone caratteristiche meccaniche.

La copertura della galleria è sempre compresa tra i 6 e i 10 m.

Il rivestimento della galleria è costituito da un anello esterno in conci in c.a. provvisti di guarnizioni di tenuta in gomma idrofila espansiva (Hydro-tite), solidarizzati mediante bulloni sia radiali che longitudinali.

Inoltre è previsto il getto in opera in tempi differiti di un secondo anello interno completamente impermeabilizzato con guaina in pvc, armato con fibre in acciaio.

Il diametro dello scudo, prodotto dalla James Howden & Co., è di circa 6.25 m.

Il diametro esterno degli anelli in conci prefabbricati è di 6.10 m ed il loro spessore è di 0.30 m. Lo spessore minimo del rivestimento interno è di 0.20 m.

I conci prefabbricati vengono composti in modo da formare anelli di 6 conci più 1 concio di chiave.

Gli anelli sono di due tipi diversi: anelli retti aventi lunghezza costante di 1.2 m ed anelli trapezi aventi lunghezza media di 1.2 m, che accostati descrivono delle curve aventi raggio planimetrico pari a 130 m.

Una opportuna sequenza di questi due tipi di anelli, messi in opera senza rotazioni rispetto all'asse, con l'ausilio di adeguati spessoramenti approssima il tracciato teorico della galleria, particolarmente sinuoso e con curve assai strette ($R_{min} = 160$ m).

La successione degli anelli è stata determinata ed ottimizzata attraverso un programma di calcolo automatico in modo che non si abbiano in alcun punto del tracciato differenze superiori ai 2.5 cm tra asse tracciato e asse galleria.

L'attrezzatura di scavo è dotata di un sistema di guida (CAP) che può consentire un controllo completamente automatico dell'avanzamento; il sistema può infatti correggere e compensare le deviazioni accumulate rispetto al-

l'asse teorico del tracciato variando l'impostazione delle manovre di spinta e la successione ottimale degli anelli per i turni successivi.

I giunti longitudinali tra i conci e trasversali tra gli anelli sono piani e i collegamenti sono realizzati attraverso bulloni rettilinei corti vincolati a piastre in acciaio ancorate nel concio stesso.

Le iniezioni sul contorno degli anelli (Clean back System, Tachibana & Co. Ltd.) vengono eseguite con continuità non appena l'anello lascia lo scudo, da apposite valvole (Charcon Tunnel) ubicate vicino ai bordi dell'anello, nei conci adiacenti a quello di chiave, con modalità e pressioni tali da garantire che l'anello sia sollecitato da spinte uniformi sul suo contorno in modo che i conci siano sottoposti a prevalenti sforzi di compressione. Le iniezioni sono realizzate con pressione costante e controllata, pari o di poco superiore al massimo valore dei carichi esterni. In tal modo si ottiene una piena centratura delle pressioni sui rivestimenti.

Le modalità di esecuzione delle iniezioni a tergo dei conci permettono di non realizzare la continuità trasversale tra i conci. Si è optato quindi per giunti lisci sia in senso longitudinale che trasversale.

Ogni anello può essere considerato staticamente indipendente dal resto della struttura.

Per garantire alla struttura maggiore sicurezza e rigidità e per evitare dislocazioni sono comunque stati utilizzati bulloni sia in direzione longitudinale che trasversale, in ogni caso necessari per la messa in opera dei conci. Allo stesso scopo i giunti trasversali sono sfalsati da anello ad anello. Ciò richiede la produzione di due tipi di anelli differenti: tipo A con concio di chiave a destra e tipo B con concio di chiave a sinistra.

B) Metropolitana di Napoli: Linea 1, lotto 3

Committente : Comune di Napoli

Concessionaria : Società per la progettazione e la costruzione della
Metropolitana di Napoli S.p.A.

Construction Manager: Metropolitana Milanese Strutture e Infrastrutture
per il territorio S.p.A.

General Constructor: Metrosud S.p.A. Napoli

Le gallerie di linea a singolo binario ($\phi_{ext} = 6.40$ m) sono realizzate mediante l'impiego di uno scudo a fronte aperto con mantello articolato (Markham & Co. Ltd.).

I terreni attraversati dalle gallerie sono costituiti da rocce e suoli di natura vulcanica: tufi e pozzolane in parte sciolte ed in parte coerenti sempre sopra falda.

Le tratte in cui la galleria attraversa il tufo e la pozzolana sono state ben identificate dalla campagna geognostica e per i due diversi materiali è stato sviluppato un diverso rivestimento.

Mentre infatti i tufi in esame manifestano un ottimo comportamento allo scavo e non danno luogo a spinte sul rivestimento, la pozzolana ha il comportamento classico di una terra.

La copertura totale della galleria è compresa tra i 10 e i 30 m.

Il rivestimento definitivo della galleria è costituito da un anello in conci prefabbricati realizzati in c.a. per il tratto in pozzolana ed in c.f.r. (Bekaert) per il tratto in tufo, provvisti di guarnizioni di tenuta e solidarizzati mediante bulloni sia radiali che longitudinali.

Il diametro dello scudo è di ≈ 6.55 m, il diametro esterno dei conci prefabbricati è di 6.40 m ed il loro spessore è di 0.30 m.

I criteri geometrici utilizzati per il progetto dei conci sono gli stessi

adottati per la Metropolitana di Genova; gli anelli sono infatti di due tipi: retti aventi lunghezza costante e trapezi aventi lunghezza media pari a 1.2 m, che accostati descrivono una curva planimetrica con 210 m di raggio, con giunti longitudinali sfalsati (concio di chiave alternativamente a destra e a sinistra).

Come detto il tracciato teorico della galleria viene approssimato con una sequenza di questi due tipi di anelli senza rotazioni rispetto all'asse e con l'ausilio di adeguati spessoramenti. La successione degli anelli è stata determinata ed ottimizzata con un programma di calcolo automatico in modo da non avere alcun punto del tracciato differenze superiori ai 2.5 cm tra asse tracciato e asse galleria. Il controllo dell'avanzamento è ottenuto mediante un sistema di rilevamento (ZED) che consente di stabilire la posizione della macchina rispetto all'asse tracciato. Questi dati permettono all'operatore di intervenire sul sistema di manovra dello scudo per cercare di minimizzare gli errori di guida.

I giunti longitudinali e trasversali tra i conci sono piani e i collegamenti sono realizzati attraverso bulloni rettilinei e curvi.

Le iniezioni sul contorno degli anelli vengono eseguite da valvole installate direttamente nei conci (Charcon Tunnel) a semplice intasamento dell'extrascavo con pressioni tali da permettere il completo riempimento dell'intercapedine anulare e da evitare ritorni della malta all'interno dello scudo attraverso la guarnizione di coda.

Il collegamento radiale mediante bulloni assicura la trasmissione di azioni assiali e taglianti, ma non è in grado di trasmettere momento se non in modo trascurabile. Considerando quindi la successione di anelli come monolitica è necessario incrementare i momenti calcolati in base a tale ipotesi. I momenti di progetto sono praticamente pari al doppio dei momenti di calcolo.

Per la tratta in tufo la bullonatura longitudinale e radiale è stata dimensionata per le azioni di montaggio e di falsa manovra della messa in opera degli anelli. Il tipo di bullonatura è la stessa già descritta per Metro Genova.

Nel caso invece di conci in pozzolana la bullonatura è stata dimensionata in modo da permettere la trasmissione delle azioni di taglio fra i conci; i bulloni trasversali sono dello stesso tipo di quelli previsti in tufo, ma in numero doppio, i bulloni longitudinali sono curvilinei e ad alto limite di snervamento.

E' interessante sottolineare che lo scudo adottato, mancando di doppie spazzole di tenuta, non consente l'esecuzione di iniezioni in pressione; d'altra parte tali iniezioni non risultano strettamente necessarie neanche nella parte in pozzolana date le coperture relativamente alte, che rendono meno importanti i problemi di cedimenti superficiali, che hanno invece dettato la scelta di iniezioni a pressione controllata a Genova e Milano.

Per analoghe motivazioni è giustificabile la scelta del tipo di attrezzatura di scavo, a fronte aperto anziché in pressione come negli altri due casi presentati.

C) Collegamento Ferroviario Passante di Milano: lotti 3P, 5P e 6P

Committente: Regione Lombardia, Comune di Milano, Ferrovie dello Stato, Ferrovie Nord Milano

Construction Manager: MM Strutture ed Infrastrutture del Territorio S.p.A.

General Constructor: Consorzio Passante S.c.a.r.l.

Progettazione esecutiva : C.P.E. s.r.l., Reico S.p.A. e Rocksoil S.p.A.

Le gallerie di linea a singolo binario sono realizzate mediante uno scudo

EPB in terreni completamente incoerenti e parzialmente sotto falda.

Il sottosuolo milanese è infatti interamente costituito da depositi alluvionali la cui granulometria varia da sabbia limosa a ghiaia. La densità del terreno varia con la profondità: da piuttosto densa per i primi 10 m a molto densa a profondità superiori ai 30 m.

La copertura delle gallerie è compresa tra i 4 ed i 14 m.

Il rivestimento è costituito da conci in c.a. prefabbricati provvisti di guarnizioni di tenuta, solidarizzati mediante bulloni radiali e spinotti in plastica longitudinali (Mayreder Consult).

Non è previsto alcun getto di finitura all'interno del rivestimento in conci, che costituisce, come nel caso di Napoli, il rivestimento definitivo delle gallerie.

Il diametro dello scudo EPB, prodotto dalla Neyrpic Framatome Mecanique su progetto e con la collaborazione delle Mitsubishi Heavy Industries, è di circa 8.00 m. L'agente fluidificante utilizzato al fronte all'interno della camera di scavo è una schiuma (procedimento Obayashi).

Il diametro esterno dell'anello in conci prefabbricati è di 7.5 m ed ha uno spessore di 0.30 m; l'anello è costituito da 6 conci più 1 concio di chiave aventi lunghezza media di 1.2 m.

Gli anelli hanno tutti forma trapezia in modo da formare se semplicemente accostati una curva planimetrica del raggio minimo di 300 m.

Le iniezioni sul contorno degli anelli a riempimento dell'extrascavo vengono realizzate con calcestruzzo estruso, secondo tecnologia Hochtief, pompato attraverso ugelli posti lungo la circonferenza della coda dello scudo in modo da riempire lo spazio tra conci e scavo immediatamente alle spalle della macchina.

Il calcestruzzo è inoltre mantenuto costantemente in pressione in modo da controbilanciare le spinte del terreno impedendo l'innescarsi di cedimenti. Il controllo dell'avanzamento della fresa viene realizzato con un monitoraggio continuo della posizione della macchina rispetto all'asse teorico del tracciato; con un sistema di rilevamento laser vengono infatti valutate la posizione della macchina rispetto alla progressiva teorica di avanzamento e l'angolo di deviazione planimetrica fra asse fresa e asse tracciato (ZED).

Degli inclinometri provvedono invece a valutare il rollio della macchina intorno al suo asse (roll) ed il suo beccheggio (look-up).

Tutti questi dati permettono di intervenire e correggere la posizione della fresa in modo da minimizzare lo scostamento tra asse reale e asse teorico.

Inoltre tre estensometri (Ring Orientation Unit) posti tra i martinetti di spinta lungo lo sviluppo circolare dell'anello di conci rilevano l'interspazio tra l'ultimo anello posato e la macchina.

Viene quindi automaticamente calcolata la rotazione da dare all'anello per riempire al meglio lo spazio rimasto tra ultimo anello montato e la parte posteriore della fresa.

E' interessante notare che l'applicazione del descritto sistema che prevede la rotazione degli anelli, messi in opera comunque sempre con giunti longitudinali non continui, è possibile grazie alla particolare tecnologia di iniezioni adottata che prevede la loro realizzazione direttamente dalla coda dello scudo senza attrezzare i conci stessi, in posizioni particolari da mantenere costanti lungo tutto il tracciato, con apposite valvole. Con questo sistema si ottiene inoltre di minimizzare il numero di conci diversi (7) conseguendo ovvi vantaggi in termini produttivi.

I giunti trasversali sono piani ed i collegamenti tra due anelli successivi sono realizzati con spinotti in plastica, che vengono forzati nei conci in alloggiamenti appositamente ricavati nel calcestruzzo.

Il sistema di iniezione adottato (continuo e a pressione controllata) non richiede che queste giunzioni offrano particolari prestazioni statiche e gli spinotti sono stati di fatto dimensionati per resistere alle operazioni di montaggio e ad eventuali false manovre del sistema fresa-erettore.

I giunti radiali sono invece sagomati in modo da permettere l'inserimento di una barra di guida che facilita la posa in opera dei conci e vengono serrati per mezzo di bulloni curvi.

Anche questi bulloni non hanno particolari funzioni statiche, ma provvedono alla corretta compressione della guarnizione di tenuta idraulica e a dare continuità elettrica alle armature per provvedere alla messa a terra del rivestimento dei vari tratti di galleria.

Le sollecitazioni risultanti sull'anello di conci sono essenzialmente di compressione grazie all'effetto prodotto dalle pressioni di iniezione del calcestruzzo a tergo dei conci.

Questo ha comportato armature estremamente leggere e giunzioni con funzione non statica (non c'è passaggio di azioni flettenti fra i giunti e le azioni taglienti vengono trasmesse per attrito) come già precedentemente descritto.

Le principali caratteristiche geometriche e tecnologiche adottate nei tre lavori presentati sono riassunti nella tabella 1.

Dalle esperienze presentate risulta evidente che la progettazione del rivestimento di una galleria scudata nel suo complesso (conci, unioni e guarnizioni) va affrontata caso per caso, mettendo a punto il sistema macchina-conci-terreno, cioè definendo una vera e propria tecnologia costruttiva ed operativa che consente spesso di introdurre elementi di originalità nelle soluzioni di volta in volta adottate.

| | Genova Metro | Napoli Metro | Milan Railway Link |
|-------------------|---|--|---|
| length | ≈1200 m per 2 canne | ≈2100 m per 2 canne | ≈3800 m per 2 canne |
| external ϕ | 6.10 m | 6.40 m | 7.50 m |
| thickness | 0.30 m | 0.30 m | 0.30 m |
| soil | embankment, alluvial ground, argillaceous marl and marly limestone. | tuffs and pozzolane | alluvial ground, gravel and sands |
| cover overburden | 6 ÷ 10 m | 10 ÷ 30 m | 4 ÷ 14 m |
| water table | a livello calotta galleria | assente | al di sotto della galleria |
| internal lining | 0.20 m fiber reinforced concrete | - | - |
| track min. radius | 160 m | 210 m | 300 m. |
| shield | EPB (slurry) | road header shield | EPB (foam) |
| injections | continous and at controlled pressure eseguite dai conci | di semplice intasamento eseguite dai conci | continous and at controlled pressure (extruded concrete |