

Giovanna Cassani, M. Sc. Eng., Rocksoil S.p.A., Milano/IT

Lavori in sotterraneo per EXPO 2015

L'esposizione universale a Milano

In occasione della esposizione universale EXPO 2015 le strutture in sotterraneo milanesi hanno conosciuto un significativo sviluppo. Ben due nuove linee metropolitane sono state infatti progettate e costruite per questo importante evento internazionale, le Linee M4 ed M5 che permettono un più facile e veloce ingresso nel centro della città dalle aree circostanti. La prima con tracciato Est-Ovest e la seconda con tracciato Nord-Ovest. L'articolo descrive le opere progettate da Rocksoil nelle due tratte, che riguardano tutte le gallerie di linea di M4 ed M5, 10 stazioni in sotterraneo per la Linea M5 e 6 stazioni in sotterraneo sulla Linea M4.

Underground Works for EXPO 2015

The Universal Exhibition in Milan

Underground structures in Milan have undergone significant expansion in preparation for EXPO 2015, the Universal Exhibition. In fact, two new Metro lines, the M4 and the M5, which provide quicker and easier access to the city centre from the surrounding areas, have been designed and built for this important international event. The former runs east-west, and the latter north-west.

1 Introduzione

La prima opera realizzata è stata la linea M5 (lilla), realizzata in Project Financing in due lotti funzionali distinti completamente in sotterraneo. Il primo lotto costruito tra le stazioni Bignami e Garibaldi, già sotto traffico dal 2014, il secondo che connette le Stazioni Garibaldi ed Harar, conosciuto come estensione EXPO che entrerà sotto traffico nel maggio 2015. La linea conta in tutto 19 stazioni, per un totale di 12,9 km, 6,2 km per la tratta Bignami-Garibaldi e 6,7 km per la tratta Garibaldi - San Siro. I principali lavori di scavo sono stati realizzati utilizzando una singola TBM EPBs (galleria a doppio binario del diametro 8,85 m) per il primo lotto e quattro TBM EPBs più piccole (gallerie a singolo binario del diametro di 6,70 m) per il secondo.

Anche la costruzione della nuova linea M4 (blu), anch'essa gestita in Project Financing, è stata suddivisa in due diversi lotti: la prima tratta unirà l'aeroporto cittadino di Milano Linate con la stazione ferroviaria Forlanini e verrà aperta in occasione dell'EXPO, la seconda tratta garantirà invece il collegamento fra la Stazione Ferroviaria Forlanini e la Stazione Ferroviaria San Cristoforo, così unendo le parti orientali ed occidentali della città, e sarà realizzata e completata entro il 2020.

La linea conta in tutto 21 stazioni in sotterraneo ed avrà una lunghezza totale di 14,2 km; le gallerie di linea saranno scavate usando quattro TBM EPBs (due gallerie a singolo binario del diametro di 6,5 m) per le tratte esterne al centro cittadi-

1 Introduction

Line M5 (lilac) was the first of the two lines to be constructed. It runs entirely underground and was completed in two different operational sections using the project finance formula. The first section, between Bignami and Garibaldi stations, has already been in operation since 2014; the second, known as the EXPO extension, which connects the Garibaldi and Harar stations, will come into operation during May 2015.

The line has a total of 19 stations in a total of 12.9 km, 6.2 km in the Bignami-Garibaldi section and 6.7 km in the Garibaldi-San Siro section. The tunnels (twin-track tunnels with a diameter of 8.85 m) were completely excavated by a single EPB TBM for the first section and four smaller EPB TBMs (single-track tunnels with diameters of 6.70 m) for the second.

The construction of the new M4 (blue) line, also managed according to the project finance formula, was divided into two different sections. The first section will link Milan Linate airport to the Forlanini railway station and will open with the EXPO. The second section will then connect the Forlanini and San Cristoforo railway stations, linking the eastern and western parts of the city. Construction will be completed by 2020.

The line has altogether 21 underground stations and will have a total length of 14.2 km. The running tunnels will be bored using four EPB TBMs (two single-track tunnels with

U-Bahn-Arbeiten für die Expo 2015

Die Weltausstellung in Mailand

Der Ausbau der U-Bahn in Mailand anlässlich der Weltausstellung EXPO 2015 macht bedeutende Fortschritte. Für dieses wichtige internationale Ereignis wurden die beiden neuen Linien M4 und M5 projektiert, mit denen die Stadt aus den umliegenden Gebieten einfacher und schneller zu erreichen sein wird. Hierbei verläuft die Linie M4 auf der Ost-West-Trasse und die M5 von Nord nach West.

Travaux souterrains pour EXPO 2015

L'exposition universelle à Milan

Dans le cadre de l'exposition universelle EXPO 2015 qui se tiendra à Milan, les infrastructures souterraines de la ville ont connu un développement significatif. C'est ainsi en effet que deux nouvelles lignes métropolitaines ont été planifiées et/ou déjà réalisées pour répondre aux besoins de ce grand évènement à l'échelon international. Il s'agit, plus précisément, des lignes M4 et M5 qui permettent un accès plus facile et plus rapide au centre de la ville à partir de ses banlieues; la première présentant un tracé est-ouest, tandis que la seconde est orientée nord-ouest.

no; la parte centrale del tracciato sarà invece realizzata con due TBM EPBs del diametro di 9,15 m per lo scavo di galleria a canna a doppio binario.

2 Il progetto della Linea M5

La Linea 5 è la prima linea completamente automatica a media capacità del sistema metropolitano della città di Milano. L'automatismo integrale ha consentito di ottenere una capacità analoga a sistemi tradizionali di trasporto pesanti riducendo in modo significativo i costi ed i tempi di costruzione, utilizzando infatti treni più corti. I lavori sono stati condotti in Project Financing, il primo esempio in Italia nel settore, con un investimento di circa 1 340 Milioni di Euro, con una partecipazione pubblica del 57,0 % ed un contributo privato del 43,0 %. La società concessionaria Metro 5 SpA restituirà il finanziamento attraverso la gestione in concessione della linea. I lavori sono cominciati nel 2006 e la concessione terminerà nel 2040. le opere civili hanno un valore di circa 690 Milioni di Euro, pari a oltre il 50 % dell'investimento complessivo.

La Linea, che prevede interscambi con tutte le altre linee metropolitane e di superficie ad oggi realizzate, è stata progettata per una portata massima di 25 728 passeggeri/h/direzione con una frequenza dei convogli di 75 s e per una portata media di 12 060 passeggeri/h/direzione con una frequenza convogli di 160 s.

Il progetto della prima tratta funzionale della Linea M5 ha comportato la realizzazione di una galleria scudata, di alcuni tratti di galleria naturale a singolo e doppio binario, la costruzione di nove stazioni e di un deposito terminale per il ricovero dei convogli (Bignami, Ponale, Bicocca, Ca' Granda, Istria, Marche, Zara, Isola e Garibaldi) e quella di alcuni pozzi e manufatti necessari per l'esecuzione delle opere (per esempio ingresso e uscita fresa). Per la gran parte del tracciato la linea transita di sotto V.le Fulvio Testi e V.le Zara e prevede la connessione con le Linee della Metropolitana M2 e M3.

diameters of 6.5 m) for the sections outside the city centre. The central part of the track, however, will be constructed using two 9.15 m diameter EPB TBMs to bore the twin track tube tunnels.

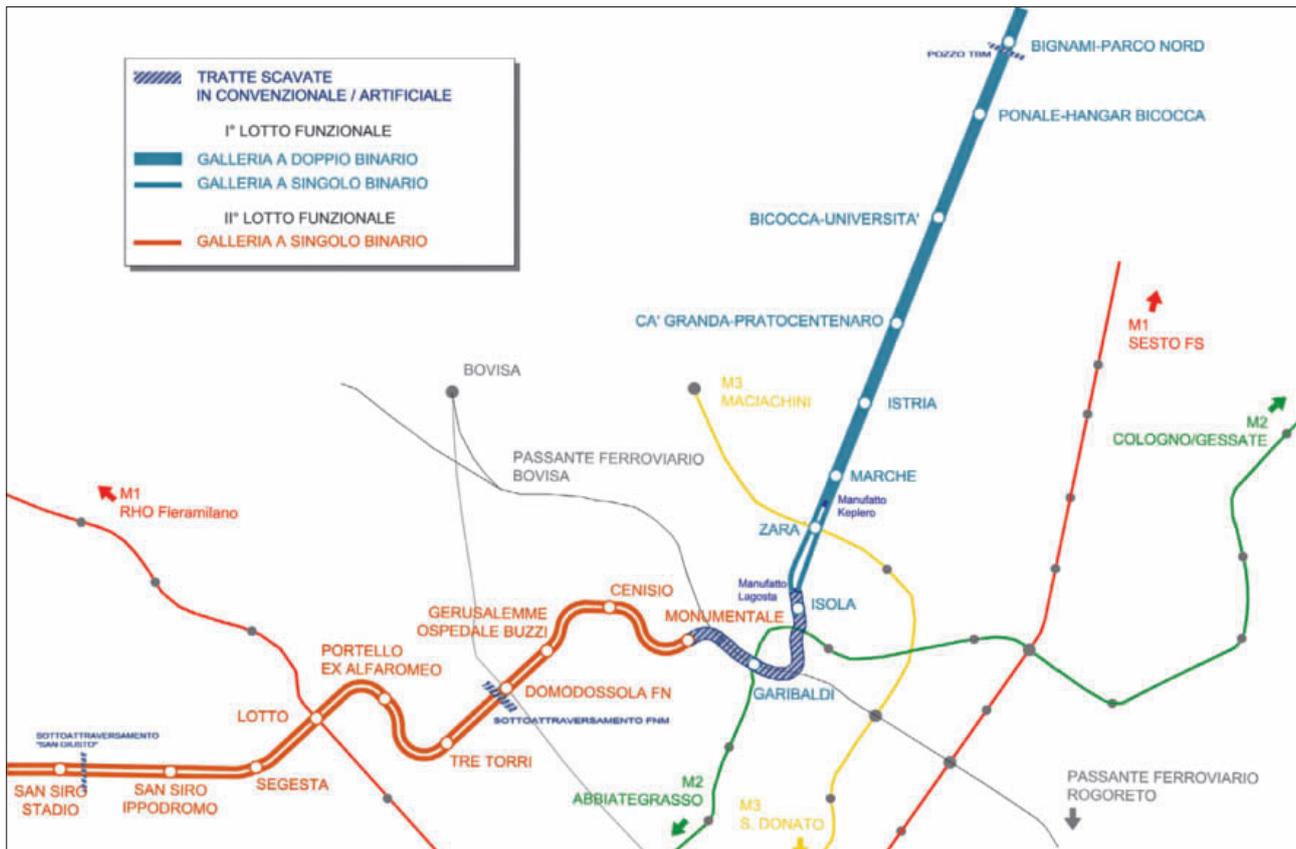
This article describes the works designed by Rocksoil for the two sections, including all Line M4 and M5 tunnels, 10 underground stations for Line M5 and six underground stations on Line M4.

2 The Line M5 Project

Line 5 is the first fully automated medium-capacity line in the Milan Metro system. Full automation makes it possible to achieve similar capacity to that of conventional high-volume transit systems, resulting in a significant reduction in cost and construction time, even using shorter trains. The works were carried out in accordance with the project finance formula, the first Italian example within the sector, with an investment of around 1.34 billion EUR, of which 57 % came from government participation and 43 % from private contributions. Concessionaire Metro 5 S.p.A. will repay the funding by operating the line. Work commenced in 2006 and will be completed in 2040. The civil works have a value of about 690 million EUR, accounting for over 50 % of the total investment.

The line, which provides interchanges with all other underground and surface lines completed to date, has been designed for a maximum capacity of 25,728 passengers/h/direction assuming a train frequency of 75 s, and for an average capacity of 12,060 passengers/h/direction assuming a train frequency of 160 s.

The design for the first operational section of Line M5 involved the construction of a bored tunnel, some single- and twin-track drill and blast tunnel sections, nine stations, and a terminal depot to house the trains (Bignami, Ponale Bicocca, Ca' Granda, Istria, Marche, Zara, Isola and Garibaldi) as well as



1 Schema generale della Linea M5
General scheme of Line M5

Le prime sette stazioni e il deposito, le gallerie di linea e i pozzi intertratta tra le Stazioni Bignami e Zara sono stati progettati dalla Rocksoil S.p.A.

Lo scavo della galleria di linea si sviluppa per 3450 m circa in meccanizzato, per 195 m circa in tradizionale a doppio binario e per 2630 m in tradizionale a singolo binario. Il diametro esterno della galleria in fresa è pari a 8,85 m e lo spessore dei conci in c.a. è pari a 40 cm. La tratta 1 è stata messa sotto traffico nel 2014.

Il progetto del prolungamento della seconda tratta della Linea M5 ha previsto la realizzazione di due gallerie scudate, di alcuni tratti di galleria naturale a singolo binario, la costruzione di dieci stazioni in sotterraneo realizzate a cielo aperto (San Siro Harar, San Siro Trotter, Segesta, Lotto, Portello, Tre Torri, Domodossola, Gerusalemme, Cenisio, Monumentale) e di diversi manufatti intertratta. Rocksoil S.p.A. si è occupata della progettazione di tutte le gallerie di linea e delle stazioni San Siro Trotter, Domodossola e Lotto (realizzata parzialmente in top down) e di alcuni pozzi d'intertratta (accesso VVFF) e del Posto di Comunicazione Harar.

Lo scavo della galleria di linea, che si sviluppa per 9767 m circa in meccanizzato e per 213 m in tradizionale a singola canna, è stato completato nel 2013. Il diametro esterno della galleria in fresa è pari a 6,70 m e lo spessore dei conci in c.a. è pari a 30 cm.

some shafts and other structures necessary for the construction of the works (e.g. entry and exit of the machine). Most of the route of the line passes beneath Viale Fulvio Testi and Viale Zara, with connections to Metro Lines M2 and M3. The first seven stations and the depot, running tunnels and cross passages between Bignami and Zara stations were designed by Rocksoil S.p.A.

Excavation of the approximately 3,450 m of tunnel for the line was mechanized, with approximately 195 m being completed as conventional twin tracks, and 2,630 m as conventional single track. The bored diameter of the tunnel is 8.85 m and the thickness of the reinforced concrete segments is 40 cm. Section 1 went into operation in 2014.

The extension project for the second section of Line M5 involved the construction of two bored tunnels, some sections of single-track drill and blast tunnel, ten underground stations completed with open excavation (San Siro Harar, San Siro Trotter, Segesta, Lotto, Portello, Tre Torri, Domodossola, Gerusalemme, Cenisio, and Monumentale) and various inter-line structures. Rocksoil S.p.A. was responsible for the design of all running tunnels, the stations at San Siro Trotter, Domodossola and Lotto (partially completed with top down construction) a number of cross passages (fire service access) and the Harar communications station.

La tratta 2 entrerà sotto traffico, completando l'intero tracciato della Linea M5, in occasione dell'inaugurazione di EXPO 2015.

2.1 Gallerie di Linea

Essendo il terreno interessato dallo scavo di tipo incoerente, quindi privo di capacità di auto sostentamento, e completamente immerso in falda, la scelta per lo scavo delle gallerie di linea è stata quella dell'adozione di macchine di scavo a completa sezione scudata TBM di tipo EPB, capaci di ripetere cicli di scavo, posare in opera il rivestimento definitivo prefabbricato ed eseguire iniezioni di intasamento a tergo del rivestimento.

Tale metodologia è attualmente uno standard per la realizzazione di gallerie metropolitane in ambito urbano, poiché consente di risolvere le problematiche legate alla presenza di falda, alle interferenze con le preesistenze interferite e, generalmente, la realizzazione delle opere senza preventivi interventi di consolidamento del terreno.

Le caratteristiche geotecniche dei materiali da affrontare sono ben note perché la città di Milano ha una rete metropolitana piuttosto estesa e molte strutture realizzate in sotterraneo con varie destinazioni d'uso, inoltre il contesto geotecnico risulta sostanzialmente molto omogeneo.

Per entrambe le tratte l'utilizzo di frese TBM EPB ha garantito:

- la stabilità e l'impermeabilità del fronte di scavo

The excavation of the running tunnel, with a 9,767 m section excavated mechanically and a 213 m single-tube section conventionally excavated was completed in 2013. The bored diameter of the tunnel is 6.70 m and the thickness of the reinforced concrete segments is 30 cm. Section 2 will come into operation at the opening of EXPO 2015, completing the entire route for Line M5.

2.1 Running Tunnels

In addition to being completely immersed in groundwater, the local terrain has been affected by inconsistent excavation and is therefore incapable of supporting itself. For this reason, the running tunnels were excavated mechanically in complete sections with an EPB shielded TBM capable of repeating excavation cycles, installing the final precast lining and grouting behind the lining.

This methodology is currently standard for the construction of underground tunnels in urban areas because it provides a solution to problems with groundwater and existing obstructions, and generally facilitates construction of the works without the need for soil consolidation as a precautionary intervention.

The geotechnical characteristics of the materials concerned are well known since the city of Milan has an extensive underground network with many structures built for various



2 Stazione Monumentale. Gallerie scudate
Monumentale station, bored tunnels

- una perdita di volume contenuta allo 0,5 % del volume di scavo, che ha consentito un agevole controllo dei cedimenti superficiali in aree fortemente urbanizzate.

Sulla prima tratta è stata utilizzata una fresa da 9,40 m, sulla seconda quattro frese da 6,70 m. Lo scavo in meccanizzato della gallerie di linea della seconda tratta, la cui messa sotto traffico è prevista in occasione dell'EXPO, è stato completato nel 2013.

Particolare attenzione è stata prestata nello studio delle maggiori interferenze: per la tratta 1 i passaggi sotto il ponte ferroviario che attraversa V.le Fulvio Testi e al di sotto del fiume Seveso; per la tratta 2 i passaggi sotto al sottopasso stradale San Giusto (presso il P.C. Harar) e delle Ferrovie Nord Milano (in corrispondenza della stazione Domodossola). In vari casi, per l'avanzamento in galleria in scavo tradizionale e per il miglioramento delle caratteristiche dei suoli in particolari condizioni di transito fresa (ingresso e uscita macchina) si sono definiti appositi consolidamenti.

Il rivestimento delle gallerie del Lotto 1 è stato realizzato con anelli in 7 conci prefabbricati dello spessore di 40 cm imbullonati sia in direzione trasversale che longitudinale. Le gallerie di Linea del Lotto 2 hanno invece un rivestimento con anelli a 5 conci prefabbricati dello spessore di 30 cm.

La copertura media della prima tratta è stata di soli 12 m ed ha richiesto un particolare controllo delle pressioni per garantire un adeguato controllo dei cedimenti in superficie, la seconda tratta ha coperture mediamente più alte, che nel caso della Stazione Lotto sono arrivate a 25 m.

La fresa della prima tratta ha lavorato con produzioni di picco giornaliere fino a 40,5 m e produzioni medie giornaliere di 26,4 m, le frese della seconda tratta hanno avuto produzioni giornaliere di 1415 m/g e produzioni massime di 32-35 m/g.

Nell'ambito del Lotto 1 sono state realizzate anche delle gallerie scavate in tradizionale sia a singolo che a doppio binario, utilizzando consolidamenti con iniezioni da piano campagna quando possibile o jet grouting in sub orizzontale in presenza di vincoli di superficie che abbiano reso impossibile operare da piano campagna. Le tratte scavate in tradizionale sono state realizzate in corrispondenza dello scavalco della Linea 3 in corrispondenza della Stazione di interscambio Zara.

2.2 Stazioni

Le Stazioni Bignami, Ponale, Bicocca, Ca' Granda, Istria e Marche, attraversate dalla galleria eseguita in scavo meccanizzato, sono state realizzate mediante diaframmi puntonati/tirantati che hanno consentito scavi mediamente della profondità di 22 m. La lunghezza delle banchine di stazione è pari a 50 m.

purposes. The geotechnical context is also substantially homogeneous.

The use of EPB TBM machines for both routes guarantees the stability and water-tightness of the excavation face as well as containment of the volume loss to 0.5 % of the excavation volume, which has facilitated the control of surface subsidence in highly urbanized areas.

Particular attention was paid to the analysis of locations of significant interference, specifically, the passage below the railway bridge crossing Viale Fulvio Testi and below River Seveso for Section 1, and the two passages below the San Giusto road underpass (at the PC Harar) and Ferrovie Nord Milano (at the Domodossola station) for Section 2. In several cases, specific consolidations were defined in order to advance the tunnel using conventional excavation methods and to improve the characteristics of the soils under specific transit conditions for the machine (entry and exit of the machine).

The lining of the tunnels in Section 1 was constructed with rings comprised of seven 40 cm thick precast segments, bolted both in the transverse and longitudinal directions. In contrast, the running tunnels for Section 2 are lined with rings comprising five 30 cm thick precast segments.

The average overburden in the first section was only 12 m and required special pressure control to ensure adequate limitation of surface subsidence. The second section, on average, has deeper overburden, reaching 25 m in the case of Lotto station.

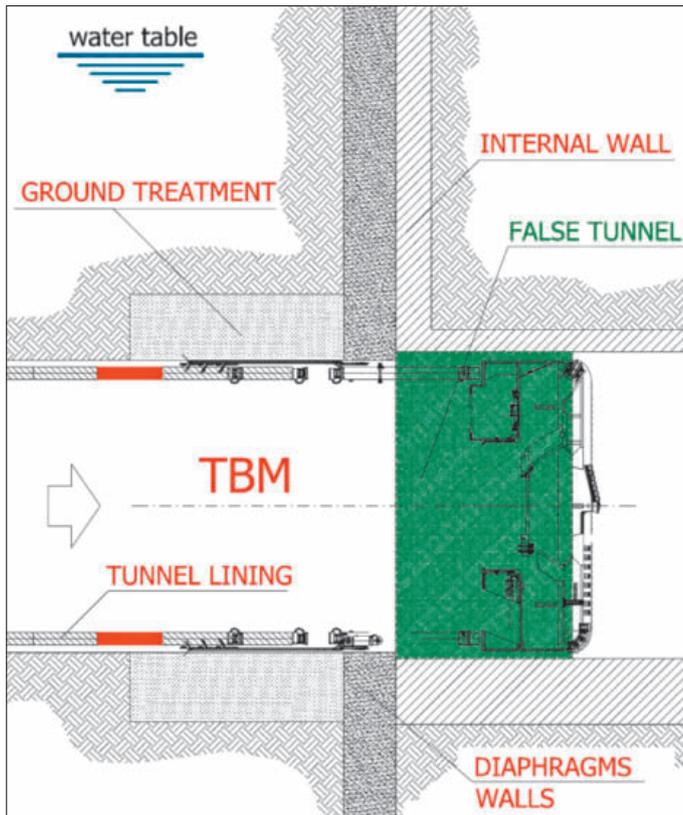
The machine for the first section has been working with a peak daily advance of up to 40.5 m and average daily advance of 26.4 m. The machines for the second section have achieved an advance rate of 14–15 m/d with a maximum of 32–35 m/d.

In the area of Section 1, both single- and twin-track tunnels were excavated using conventional methods with the ground consolidated by grouting from ground level when possible, or with sub-horizontal jet grouting where surface constraints prevented operation from ground level. The sections of the Line 3 overpass at the Zara interchange station were excavated using conventional methods.

2.2 Stations

Bignami, Ponale Bicocca, Ca 'Granda, Istria and Marche stations, which were crossed by the mechanically excavated tunnel, were constructed using strutted/tied diaphragm walls, which allowed excavation to an average depth of 22 m. The station platforms are 50 m long.

Of particular interest with regard to the construction of the stations in the second operational section between Garibaldi and San Siro was the construction of Lotto station, which provides an interchange to the existing Line 1, and which



3 Falso tunnel per l'ingresso della TBM in stazione
False tunnel for the entrance of the TBM into the station

Di particolare interesse nell'ambito della realizzazione delle stazioni del secondo Lotto funzionale tra Garibaldi e San Siro, anch'esse realizzate con scavi a cielo aperto sostenuti da diaframmi tirantati/puntonati, è stata la costruzione della Stazione Lotto, stazione di interscambio con la esistente Linea 1. A causa dell'interferenza con le opere preesistenti, la Stazione Lotto, con i suoi 30 m di scavo, risulta la più profonda della Linea 5. La stazione è stata realizzata mediante diaframmi in c.a. con funzione di breve e di lungo termine. Il considerevole battente idraulico (circa 15 m) ha richiesto l'utilizzo di un'idrofresa, consentendo di contenere le deviazioni di verticalità dei pannelli e garantendo quindi l'impermeabilità dello scavo. Durante lo scavo sono stati utilizzati come strutture di contrasto delle paratie sia tiranti in acciaio in trefoli (con utilizzo solo provvisorio) che puntoni. La stazione è stata inoltre realizzata parzialmente in Top Down, tecnica che ha richiesto il getto in fase di scavo delle due penultime solette. L'impermeabilità del fondo scavo è stata garantita attraverso la realizzazione di un tampone realizzato con iniezioni di miscele cementizie e chimiche. La forte contropinta idraulica ha reso inoltre necessaria l'introduzione di chiavi di taglio di collegamento del solettone con i diaframmi così da impedire fenomeni di galleggiamento dell'intera struttura. A causa della presenza delle strutture della adiacente stazione della linea M1, per oltre un terzo del perimetro di scavo, è risultato impossibile l'utilizzo di tiranti per cui sono stati inseriti dei puntoni metallici a doppio ordine, realizzati con tubi del diametro di 90 cm e della lunghezza di 23 m.

was also carried out by means of open excavation supported by strutted/tied diaphragm walls. Because of interference from pre-existing works, Lotto station is the deepest on Line 5 with an excavated depth of 30 m. The station was built with the aid of reinforced concrete diaphragm walls, both for temporary and permanent use. The considerable hydrostatic pressure (about 15 m) required the use of a hydromill, which enabled the containment of deviation in the verticality of the panels, thereby ensuring the water-tightness of the excavation. The bulkheads were reinforced with both steel cables (for temporary use only) and struts during excavation. In addition, the station was partially constructed using the top down method, which required the casting of the two penultimate slabs during excavation. The water-tightness of the bottom of the excavation was ensured by the installation of a sealing block, which was produced by injecting cement and chemical mixtures. The strong hydraulic counterthrust necessitated the introduction of shear lugs to connect the floor slab with the diaphragm walls so as to prevent the entire structure from floating. The use of tie rods proved to be impossible for more than a third of the perimeter of the excavation due to the presence of the structures of the adjacent M1 Line station; double rows of struts were inserted using tubes with a 90 cm diameter and 23 m length.

In order to reduce construction time, prefabricated beams were used for the roofing slab and the first two intermediate slabs. Because of the good results obtained with the previ-

Per la riduzione dei tempi di costruzione sono state utilizzate travi prefabbricate per la realizzazione del solettone di copertura e delle prime due solette intermedie. Questa tecnologia costruttiva è stata replicata su questa ed altre stazioni della tratta EXPO sulla base dei buoni risultati ottenuti nella tratta precedente. La terza e la quarta soletta intermedia sono state gettate in top down per ottenere il contrasto delle pareti di scavo senza ricorrere a tirantature sotto falda, che sarebbero state di complessa e costosa realizzazione.

Per garantire l'impermeabilità nella fase di ingresso ed uscita della TBM della stazioni sia della tratta 1 che della tratta 2 sono stati realizzati dei tamponi con iniezioni cementizie e chimiche; nel caso in cui a causa di particolari vincoli di superficie, come nel caso della Stazione Lotto, fosse impossibile realizzare un tampone di lunghezza adeguata (e cioè almeno pari alla lunghezza dello scudo in modo da consentire il montaggio di almeno un anello di conci prima dell'uscita della testa della macchina dal tampone) sono stati utilizzati dei falsi tunnel all'interno dell'impronta della stazione.

Queste strutture temporanee vengono costruite all'interno della stazione e consentono alla macchina di avanzare mantenendo la testa ed il backfilling in pressione garantendo l'ingresso o l'uscita della macchina in stazione in condizioni di impermeabilità idraulica.

3 Il progetto della Linea M4

La Linea M4 attraverserà Milano per circa 15 km da ovest ad est lungo viale Lorenteggio, passando a sud del centro sto-

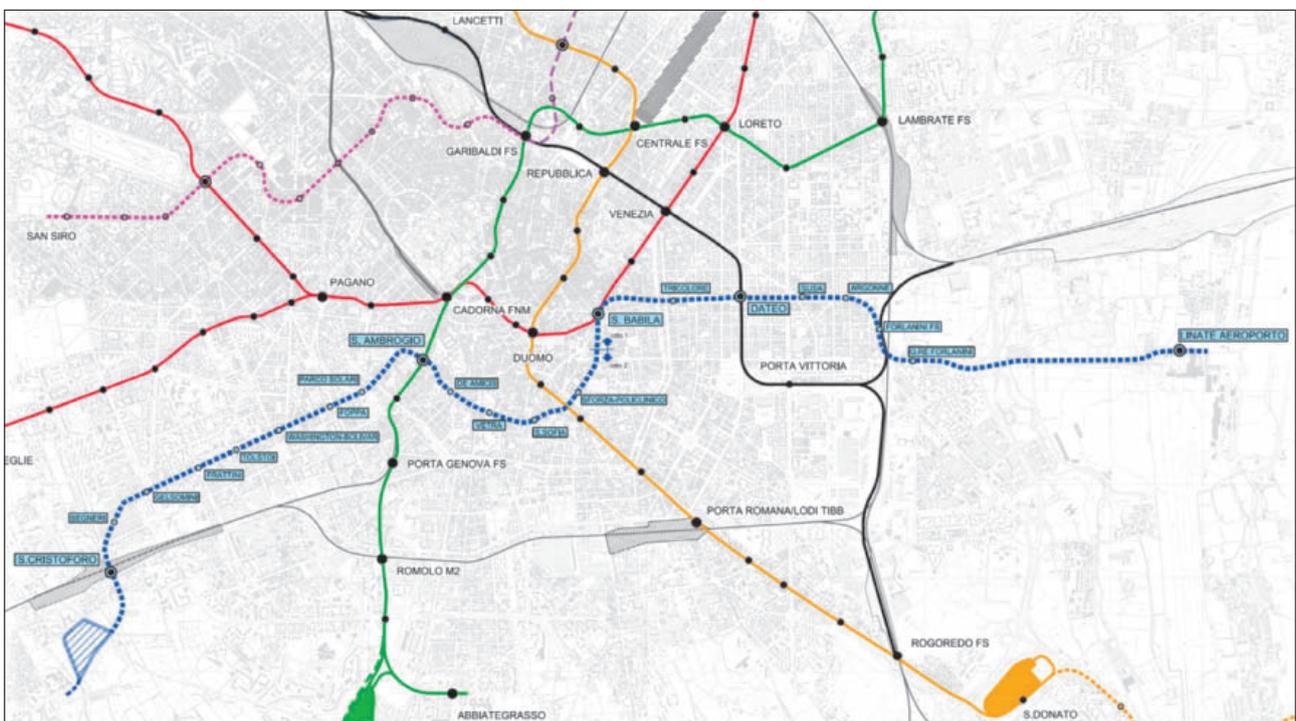
ous section, this construction technology was replicated for this and other stations on the EXPO section.

The third and fourth intermediate slabs were constructed using the top-down method in order to reinforce the tunnel walls without resorting to anchoring below the water table, which would have been both costly and complex.

To ensure water-tightness during the entry and exit of the TBM at the stations, sealing blocks were installed in both Section 1 and Section 2 by injecting cement and chemicals. In cases where specific surface constraints made it impossible to create a block of suitable length (i.e. at least equal to the length of the shield so as to allow the mounting of at least one ring of segments before the cutting head emerged from the block), such as at Lotto station, false tunnels were used inside the station excavation. These temporary structures are built inside the station and allow the machine to move forward while maintaining the head and backfilling under pressure, thus ensuring the entry or exit of the machine into or out of the station under water-tight conditions.

3 The Line M4 Project

Line M4 will cross Milan with a length of about 15 km from west to east along Viale Lorenteggio, passing south of the old town and along the axes of Indipendenza, Argonne and Forlanini up to Linate Airport. The M4 route will optimize city coverage, loading options, and interconnection with the metro and suburban rail network, thereby improving the overall network effect of the entire public transport system in the city.



4 Rete trasporti sotterranei di Milano e tracciato M4
Milan underground transport network and line M4

rico e lungo gli assi Indipendenza, Argonne e Forlanini fino all'Aeroporto di Linate. Il tracciato della M4 ottimizza la copertura della città, le possibilità di carico e l'interconnessione con la rete metropolitana e ferroviaria suburbana, migliorando l'effetto rete complessivo dell'intero sistema di trasporto pubblico della città.

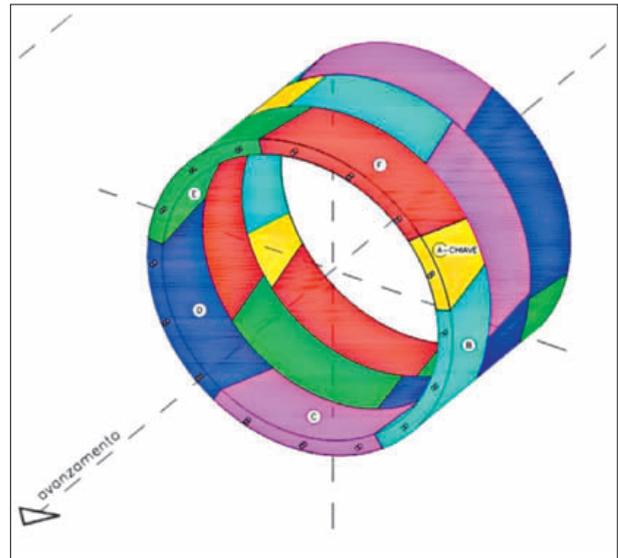
La M4 sarà una "metropolitana leggera ad automatismo integrale": il sistema sarà completamente automatizzato, senza conducenti sui convogli (driverless), con porte automatiche di banchina e sistema di segnalamento CBTC (Communication Based Train Control). I treni avranno una lunghezza di 50 metri, decisamente inferiore a quella dei rotabili oggi in circolazione, così come le stazioni che saranno lunghe solo 50 metri, contro i 110 della M1, M2 e M3. Il dimensionamento relativamente leggero delle strutture, in particolare le stazioni, renderà più agevoli e meno impattanti i lavori di realizzazione della linea. L'automazione del sistema assicurerà frequenze più elevate dei mezzi (90 secondi riducibili teoricamente sino a 75) garantendo la possibilità di portare 24-28 mila passeggeri per ora per direzione. La nuova M4 attraverserà quartieri a elevata densità abitativa. Per questa ragione le metodologie di costruzione sono state concepite in modo da minimizzare gli impatti in superficie e adattarsi a un sottosuolo interessato da numerose infrastrutture e da una significativa presenza di acqua. Il largo impiego dello scudo meccanizzato e la scelta della doppia galleria a singolo binario per le vie di corsa consentono di ottimizzare la flessibilità e l'adattabilità del tracciato, che, fatta salva la zona del Deposito-Officina, si sviluppa interamente in sotterraneo.

Sono previsti due interscambi con le esistenti linee metropolitane, uno con la linea rossa, in corrispondenza della stazione San Babila, ed uno con la linea verde, in corrispondenza della stazione Sant'Ambrogio. Ci saranno poi tre interscambi con le linee ferroviarie suburbane: uno con le linee S5, S6 e S9, in corrispondenza della stazione Forlanini FS, uno con le linee S1, S2, S5, S6, S13, in corrispondenza della stazione Dateo ed uno con la linea S9, in corrispondenza della stazione San Cristoforo, dov'è presente anche la corrispondenza con la ferrovia Milano-Mortara. È previsto infine un interscambio con l'aerostazione di Linate.

La maggior parte dello sviluppo sotterraneo del tracciato sarà realizzato mediante scavo meccanizzato, attraverso l'utilizzo di due geometrie di TBM: una con diametro di scavo pari a 9,15 m e l'altra con diametro di scavo pari a circa 6,36 m.

Le TBM aventi diametro di scavo pari circa a 6,36 m saranno utilizzate per le tratte: dal manufatto Ronchetto, in zona San Cristoforo, alla stazione di Parco Solari; da Linate Aeroporto fino alla Stazione Tricolore.

La TBM con diametro di scavo 9,15 m sarà utilizzata per la tratta: dalla stazione di Parco Solari alla stazione Tricolore.

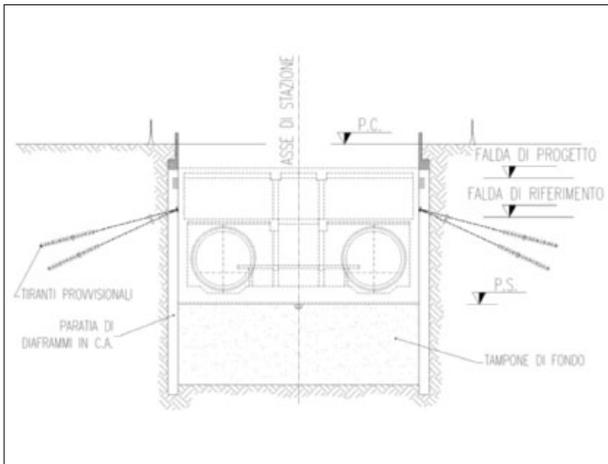


5 Anello universale
Universal ring

Line M4 will be a "fully automated light rail" system, driverless, and with automatic platform doors and a CBTC (Communication Based Train Control) signalling system. The trains will be 50 m long, considerably shorter than rolling stock in circulation today. Likewise, the 50 m long stations will also be shorter than the 110 m stations on lines M1, M2 and M3. The relatively compact dimensioning of the structures, particularly the stations, means that construction work on the line can be carried out more easily and with less impact. The automation of the system will ensure higher frequencies for the vehicles (90 seconds, theoretically reducible down to 75) providing the capacity to transport 24,000 to 28,000 passengers per hour per direction. The new line M4 will pass through neighbourhoods with high population densities, so the construction methods have been planned to minimize impact at the surface and adapt to an underground affected by a great amount of infrastructure and by the presence of a significant amount of water. The extensive use of mechanized tunnelling, and the selection of a single-track twin tunnel layout help maximize the flexibility and adaptability of the route, which is situated entirely underground except for the depot/office area.

There are currently two interchanges with existing Metro lines, one with the red line at San Babila station, and one with the green line at Sant'Ambrogio station. In future there will be three interchanges with suburban railway lines, one with Lines S5, S6 and S9 at Forlanini FS station, one with Lines S1, S2, S5, S6, S13 at Dateo station, and one with Line S9 at San Cristoforo station, where there is also a connection to the Milan-Mortara railway. And lastly, an interchange with Linate airport is planned.

Most of the underground construction on the route will be carried out by mechanized tunnelling with the use of two TBM geometries, one with a bored diameter of 9.15 m and the other with a bored diameter of approximately 6.36 m.



6 Sezione trasversale della stazione tipo a cielo aperto
Cross-section of an open station excavation

Come indicato, l'utilizzo della fresa di diametro di scavo pari a 9,15 m riguarda la tratta in corrispondenza delle stazioni profonde del centro storico, così da consentire di allocare le banchine di stazione direttamente all'interno della sagoma interna della galleria in conci. Questo consente una notevole riduzione dell'impatto sull'esistente, che si avrebbe pensando di realizzare lo scavo delle gallerie di stazione con metodologia in tradizionale, previa esecuzione di consolidamenti.

3.1 Gallerie di linea

Le gallerie di linea della Linea 4 della Metropolitana di Milano saranno tutte costruite a foro cieco con scavo meccanizzato mediante TBM di tipo EPB (Earth Pressure Balance).

Il rivestimento definitivo della galleria sarà realizzato in conci prefabbricati, posti in opera dalla macchina immediatamente dopo lo scavo, ad una ridotta distanza dal fronte.

L'anello per le gallerie da 6,36 m di diametro è costituito da 6 conci (5 + 1 di chiave) dello spessore di 28 cm. Quello delle gallerie da 9,15 m da 7 conci (6 + 1 di chiave) dello spessore di 35 cm.

Il rivestimento definitivo, oltre a svolgere e garantire la normale funzione di sostegno a breve e a lungo termine, deve nel caso specifico fornire la richiesta tenuta idraulica. Per tale motivo i conci sono muniti lungo tutte le superfici di contatto con altri conci di guarnizioni in neoprene a tenuta stagna, disposte in apposite sedi ricavate sulle facce del conco, tali da garantire, con le forze di serraggio previste, la tenuta sotto le pressioni idrostatiche attese.

Per garantire il serraggio tra i conci di anelli contigui, nonché per motivi di sicurezza nelle fasi transitorie di movimentazione e posa in opera dei conci stessi, è previsto il collegamento con connettori meccanici longitudinali (tipo Biblock System o equivalente) disposti ad intervalli regolari lungo la circonferenza.

The TBMs with diameters of approximately 6.36 m will be used for the sections from Manufatto Ronchetto, in the San Cristoforo area, to the Parco Solari station and from Linate Airport to the Tricolore station. The TBM with a diameter of 9.15 m will be used for the section from the Parco Solari to the Tricolore station.

As indicated, the machine with a diameter of 9.15 m will be used in the section through the deep stations in the historic centre in order to enable the installation of the station platforms directly inside the inner contour of the tunnel in segments. This allows a considerable reduction of the impact on existing structures compared to the use of conventional methods of tunnel excavation, after performing consolidation work.

3.1 Running Tunnels

The running tunnels for Line M4 of the Milan Metro will all be constructed using mechanized blind boring with EPB (Earth Pressure Balance) TBMs.

The final lining of the tunnel will be made of precast segments placed by the machine immediately after excavation at a small distance behind the face. The ring for the 6.36 m diameter tunnels is composed of six segments (5 + 1 keystone) with a thickness of 28 cm. That of the 9.15 m tunnel is composed of seven segments (6 + 1 keystone) with a thickness of 35 cm.

The final lining, in addition to performing and ensuring the normal function of support in both the short and long term, must also in this specific case provide the required hydraulic seal. For this reason, the segments are fitted with watertight neoprene seals along all surfaces coming into contact with other segments, and arranged in corresponding housings on the faces of the segment, to ensure the required water-tightness under hydrostatic pressures with the planned clamping forces.

In order to ensure water-tightness between the segments of adjacent rings, as well as for reasons of safety during the transitory phases of handling and laying the segments themselves, connection is provided by means of longitudinal mechanical dowels (Biblock System or equivalent type) arranged at regular intervals around the circumference.

The 6.36 m TBM is equipped with 16 thrust plates arranged in groups of three for each segment plus one for the keystone, or a total of 32 jacks acting in pairs on each plate. The dimensions of the plate are 26 x 70 cm. The maximum thrust that the machine can exert is equal to 42,575 kN or 2,660 kN per thrust group.

The 9.15 m TBM is equipped with 19 thrust plates arranged in groups of three for each segment plus one for the keystone, or a total of 38 jacks acting in pairs on each plate. The dimensions of the plate are 33 x 100 cm. The maximum

Come accennato in precedenza verranno utilizzate due tipologie di TBM:

- diametro di scavo pari a 6,36 m;
- diametro di scavo pari a 9,15 m;

La TBM da 6,36 m è fornita di 16 piastre di spinta disposte a gruppi di tre per ciascun concio, più una per il concio di chiave, a cui corrispondono 32 martinetti agenti in coppia su ciascuna piastra. Le dimensioni di tale piastra sono pari a 26 x 70 cm. La spinta massima esercitabile dalla macchina risulta essere pari a 42575 kN ovvero 2660 kN per gruppo di spinta.

La TBM da 9,15 m è fornita di 19 piastre di spinta disposte a gruppi di tre per ciascun concio, più una per il concio di chiave, a cui corrispondono 38 martinetti agenti in coppia su ciascuna piastra. Le dimensioni di tale piastra sono pari a 33 x 100 cm. La spinta massima esercitabile dalla macchina risulta essere pari a 81 895 kN ovvero 4310 kN per gruppo di spinta.

3.2 Stazioni

Per la realizzazione delle stazioni e dei manufatti si è cercato di ricorrere il più possibile al metodo costruttivo costituito da scavi a cielo aperto sostenuti da diaframmi in ca. (metodo bottom-up aperto), compatibilmente con le viabilità esistenti e le aree di cantiere necessarie per la realizzazione delle opere.

Detta tipologia realizzativa è applicabile sull'asse Linate – San Babila, poiché i corpi di stazione sono realizzati all'interno dei parterre centrali dei viali, interferendo in modo limita-

thrust force that the machine can exert is equal to 81,895 kN or 4,310 kN per thrust group.

3.2 Stations

For the construction of stations and structures, the planners tried to resort as much as possible to the open excavation method supported by reinforced concrete diaphragm walls (open bottom-up method), which is compatible with the existing road network and construction site areas required for the execution of the works.

This type of construction is applicable in the Linate–San Babila axis since the bodies of the stations are manufactured within the central parterre of the boulevards, minimizing interference with road traffic while providing sufficient construction site areas. The same type of construction will also be used for the stations on the San Cristoforo–Parco Solari section, with the exception of Gelsomini and Segneri stations, for which totally or partially closed bottom-up methodology is planned.

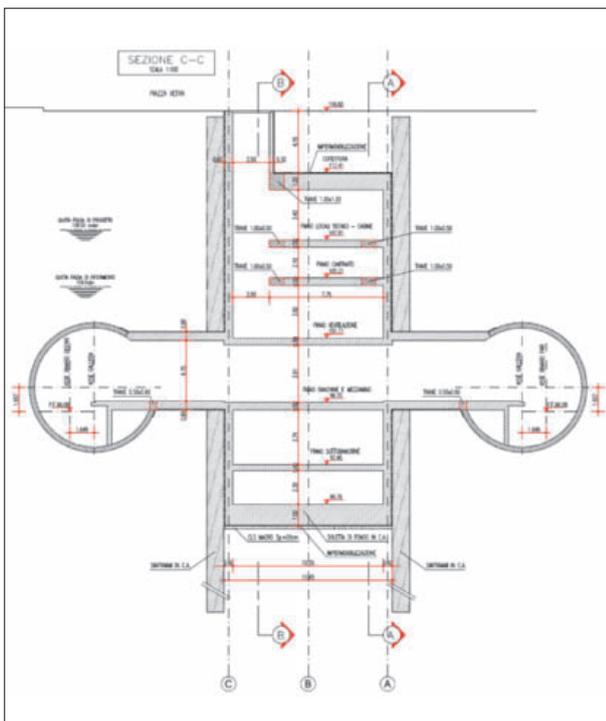
The Line 4 stations, with the exception of those in the central section, generally have a limited depth of about 15 m, through which the two TBMs pass “unloaded”; the level of the floor slab thus remains occupied by the TBM supply site comprising the rails for trains transporting precast segments, conveyor for transporting the muck out of the tunnel, hoses for cooling water and a medium voltage cable for the TBM power supply, for each of the two machines.

The use of semi-prefabricated self-supporting structures is planned for constructing the horizontal elements of the station. The supporting structures for the excavations, bulkheads, tie rods, and bottom sealing blocks, will be installed by means of clamshell excavation and stabilized with bentonite slurry, tied with anchors outside the aquifer and bored without the use of a preventer and bottom buffers in integrated cement injections.

The stations considered as “deep” are Sant’Ambrogio, De Amicis, Vetra, Santa Sofia, Sforza Policlinico and San Babila. The functional installation is composed of a central shaft with an excavation depth up to approximately 30 m and transverse dimensions limited to approximately 10 m. Outside this, running tunnels are constructed using a TBM with 9.15 m diameter, which is sufficient to accommodate the platforms at the stations.

The sealing blocks at the deep stations are pushed to a consistent depth below the bottom of the excavation, up to 16–17 m, bringing the total length of the bulkheads up to approximately 50 m.

The connecting bypass between the station shaft and the platforms will be excavated after the soil has been grouted from ground level with the continual use of cement and silicate mixes.



7 Sezione trasversale della stazione Vetra
Cross-section of Vetra station

to con la viabilità e disponendo parallelamente di sufficienti aree di cantiere. La stessa tipologia è applicabile anche per le stazioni della tratta San Cristoforo – Parco Solari ad eccezione delle stazioni Gelsomini e Segneri in cui è prevista la realizzazione con metodologia bottom-up chiusa totale o parziale, nella quale viene anticipata la realizzazione di gran parte della soletta di copertura.

Le stazioni della linea 4, ad eccezione di quelle presenti nella tratta centrale, hanno generalmente una profondità limitata di circa 15 m, entro i quali le 2 TBM transitano “a vuoto”; il piano del solettone di fondo resta quindi occupato dal cantiere di alimentazione delle TBM costituito, per ciascuna delle due macchine, dai binari per il transito dei treni che trasportano i conci prefabbricati, dal nastro che trasporta lo smarino verso l’imbocco della galleria, dai tubi con l’acqua di raffreddamento, dal cavo di media tensione per l’alimentazione elettrica della TBM.

È stato previsto l’impiego di strutture semi-prefabbricate autoportanti per la realizzazione degli orizzontamenti di stazione.

Le opere di sostegno degli scavi: paratie, tiranti, tamponi di fondo, saranno realizzate con scavi eseguiti con benna mordente e stabilizzati con latte bentonitico, tiranti con ancoraggi fuori falda perforati senza ricorso al preventer e tamponi di fondo in iniezioni cementizie integrate.

Le stazioni cosiddette “profonde” sono le stazioni: Sant’Ambrogio, De Amicis, Vetra, Santa Sofia, Sforza Policlinico e San Babila.

L’impianto funzionale è costituito da un pozzo centrale con profondità di scavo fino a 30 m circa e dimensione trasversale limitata a circa 10 m, all’esterno del quale vengono realizzate le gallerie di linea impiegando, come detto, una TBM con diametro di scavo pari a 9,15 m, sufficiente ad ospitare anche le banchine in corrispondenza delle stazioni.

Nel caso delle stazioni profonde i tamponi di fondo si spingono a profondità consistenti al di sotto del fondo scavo, fino a 16-17 m, portando la lunghezza totale delle paratie fino a circa 50 m.

I bypass di collegamento tra pozzo di stazione e banchine saranno scavati previo trattamento di iniezione del terreno eseguito dal piano campagna utilizzando sempre miscele cementizie e miscele silicatiche.

Nella stesura del progetto si è analizzata l’interferenza tra gli scavi condotti in sotterraneo per la realizzazione delle gallerie di linea della nuova Linea Metropolitana e i fabbricati e manufatti presenti in superficie. È stato eseguito uno studio in cui sono stati valutati in dettaglio i bacini di subsidenza relativi agli scavi e i cedimenti/spostamenti determinati a piana campagna e in corrispondenza dei piani fondazione,

Preparation for the project included an analysis of the interference between the excavations to be performed underground for the construction of the running tunnels of the new Metro Line with the surface buildings and structures. A study was carried out in which the subsidence troughs were evaluated in detail relative to the excavation, and subsidence/displacements were determined at ground level as well as at the level of the foundation, so as to assess the damage class expected for each building.

In subsequent stages of the project, on the one hand, the interference analysis will be more highly developed with numerical analysis methods, and on the other hand, the detailed findings for some of the buildings in the area of the subsidence trough will be completed.

3.3 Monitoring

A fundamental aspect of tunnel construction in urban areas is the control of subsidence induced by excavation, which is directly proportional to volume loss values. The subsidence that occurs at the surface is, in fact, due to the deformation behaviour of the core face and the convergence values at the face, along the shield and in the area in which the precast segments are installed and grouted.

If applied properly, EPB technology can minimize the subsidence induced at ground level in a manner which is compatible with the urban environment and the shallow overburden in some parts of the route.

Controlling pressure at the face and careful construction by means of controlling the grouting pressures and volume of grout mix injected behind the segments are of primary importance in limiting volume loss. Correctly controlled tunnelling thus enables the volume loss during excavation, and hence the predicted subsidence on the surface, to be controlled.

Surface monitoring is primarily concerned with the buildings and their foundations, works of art and their founda-



8 11.11.2014: arrivo TBM binario dispari a Forlanini FS
11.11.2014: arrival of TBM, odd track at Forlanini FS

così da valutare la classe di danno attesa per ciascun fabbricato.

Nelle successive fasi del progetto, da un lato le analisi d'interferenza saranno maggiormente sviluppate con metodologie di analisi numerica, dall'altro verranno completati i rilievi di dettaglio per alcuni degli edifici presenti all'interno del bacino di subsidenza.

3.3 Monitoraggio

Un aspetto fondamentale per la realizzazione di gallerie in contesti urbani risulta essere il controllo dei cedimenti indotti dagli scavi, direttamente correlati ai valori di volume perso. I cedimenti che si verificano in superficie sono, infatti, riconducibili al comportamento deformativo del nucleo-fronte e ai valori di convergenze del cavo, in corrispondenza del fronte, lungo lo scudo e nella zona di posa in opera dei conci prefabbricati e delle iniezioni di riempimento.

La tecnologia EPBS è in grado, se applicata correttamente, di minimizzare i cedimenti indotti a piano campagna, in maniera che risultino compatibili con l'ambiente urbanizzato e le basse coperture presenti in alcuni punti del tracciato.

Il controllo delle pressioni al fronte e una corretta esecuzione, tramite il controllo delle pressioni d'iniezione e del volume di miscela iniettata, dell'intasamento a tergo dei conci risulta di primaria importanza nella limitazione del volume perso. Una corretta performance nell'avanzamento permette quindi un controllo del volume perso allo scavo e di conseguenza dei cedimenti previsti in superficie.

Il monitoraggio in superficie interessa prevalentemente i fabbricati e le loro fondazioni, le opere d'arte e le loro fondazioni, i terreni su cui insistono tali opere e le loro variazioni in termini di caratteristiche geotecniche e caratteristiche idrogeologiche.

Dall'analisi dei cedimenti saranno definiti i valori attesi dei cedimenti, dai quali saranno determinati dei valori di soglia. In particolare s'individuerà una soglia di "attenzione" e una soglia di "allarme".

3.4 Stato di avanzamento del progetto

Lo scavo delle gallerie di linea è iniziato dalla stazione Linate il 4 aprile 2014 per la canna dispari e il 17 maggio 2014 per la canna pari. L'11 novembre 2014 la TBM sul binario dispari ha raggiunto la stazione Forlanini FS, completando il posizionamento di circa 2370 anelli di conci prefabbricati.

Ad oggi, gennaio 2015, la TBM sul binario pari è ferma all'interno del manufatto Forlanini Tangenziali per operazioni di manutenzione alla testa fresante. Sul binario pari sono stati posizionati finora circa 1510 anelli di rivestimento in conci prefabbricati.

zioni, the land on which these works are situated, and their variations in terms of geotechnical and hydrogeological characteristics.

The subsidence analysis is intended to provide a prediction of subsidence values which will be determined by threshold values. In particular, "warning" and "alarm" thresholds are identified.

3.4 Status of the Project

The excavation of the running tunnel was started from Linate station on April 4, 2014 through the even bore. On November 11, 2014, the TBM on the odd track reached the Forlanini FS station, completing the installation of approximately 2370 rings of precast segments.

In January 2015, the TBM on the even track was stopped inside the Forlanini Tangenziali structure for maintenance to the cutting head. Approximately 1510 rings of prefabricated cladding segments have been positioned thus far on the even track.

Bibliografia/References

- [1] Boscardin, M.D., Cording, E.J. (1989) "Building response to excavation-induced settlement. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 1
Cassani, G., Mancinelli, L. (2005), "Monitoring surface subsidence for low overburden TBM tunnel excavation: computational aids for driving tunnels" IACMAG (International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics) Conference on prediction, analysis and design in geomechanical applications – Torino
- [2] D'Alò G. (2010), Nardi G., Testa G., Zorgati E., "La finanza di progetto nella realizzazione di opere in sotterraneo: l'esperienza della linea 5 della metropolitana di Milano", *Gallerie e grandi opere sotterranee – Vol. 95*, 2010.
- [3] Mair, R.J., Taylor, R.N. and Burland, J.B. (1996), "Prediction of ground movements and assessment of risk of building damage due to bored tunnelling
Mancinelli L. (2005), "Evaluation of superficial settlements in low overburden tunnel TBM excavation: numerical approaches" *Geotechnical and geological engineering - Vol. 3*, n. 3
Mancinelli, L., Gatti, M., Cassani, G. (2009) "Numerical simulation of an excavation near buildings", ITA-AITES Congress, Budapest
- [4] Mancinelli L. (2010), Gatti M., Cassani G., "Milan Metro 5th Line", *Proceedings of ITA-AITES Congress*, Vancouver 2010.
O'Really, M.P., New, B.M. (1982), "Settlement above tunnels in the United Kingdom – their magnitude and prediction", *Proceedings of Tunneling Symposium 1982*
Peck, R.B. (1969), "Deep excavations and tunneling in soft ground", *Proceedings of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico City