

Tunnel Urbani

La metropolitana leggera automatica di Brescia

A BRESCIA È IN CORSO DI REALIZZAZIONE UNO DEI PROGETTI PIÙ COMPLESSI E INNOVATIVI DEL PANORAMA NAZIONALE, UNA LINEA DI TRASPORTO PUBBLICO SU FERRO DI CIRCA 14 KM CHE NE SOTTOPASSA IL CENTRO STORICO. OGGI L'APERTURA DI TUTTI I CANTIERI E L'AVANZAMENTO DELLA COSTRUZIONE RAGGIUNTO, PERMETTE DI DELINEARE UN QUADRO GENERALE DELLE PRINCIPALI INIZIATIVE E DEGLI INTERVENTI CHE SONO STATI ATTUATI PER AFFRONTARE LE PROBLEMATICHE DI NATURA TECNICA, SIA IN AMBITO PROGETTUALE CHE DI ESECUZIONE DEI LAVORI, ARCHEOLOGICA, DI IMPATTO AMBIENTALE E DI COMUNICAZIONE ALLA CITTADINANZA.

La città di Brescia (200.000 ab, in un *hinterland* di 400.000), capoluogo di provincia fortemente urbanizzato e nucleo di un importante panorama imprenditoriale, genera un intenso flusso di traffico dal e all'interno del suo nucleo mettendo in crisi il sistema della mobilità urbana. Per delineare uno sviluppo sostenibile del sistema di trasporto compatibile con le esigenze dei cittadini e dei non residenti, l'Azienda dei trasporti municipali della città di Brescia, ASM, fin dal 1986 ha promosso lo sviluppo di uno studio di fattibilità per un sistema integrato di trasporto con obiettivo il raggiungimento di una migliore efficienza trasportistica, garantendo nel contempo una migliore salvaguardia ambientale ed una efficace riduzione dell'inquinamento. Il risultato dello studio ed il confronto con il mercato delle tecnologie di trasporto ha portato ad individuare nei sistemi di trasporto automatici in sede completamente protetta -"sede propria"- la soluzione idonea alla città di Brescia, soluzione già sperimentata con successo in alcune grandi città europee.

Il nuovo sistema di trasporto prescelto, la metropolitana leggera automatica (MLA), si inserisce sia all'interno del contesto del Comune di Brescia sia su di un panorama a carattere provinciale per poter soddisfare la domanda di trasporto dei comuni limitrofi, ed in particolare della valle Trompia.

La lunghezza complessiva della linea, pari a circa 34 km ed i rilevanti investimenti necessari per la sua realizzazione hanno comportato una naturale suddivisione del progetto in differenti lotti ed una pianificazione degli interventi con uno scenario temporale più esteso.

Nell'anno 2000 è stata indetta una gara internazionale con oggetto l'aggiudicazione della prima tratta funzionale del così detto Metrobus di Brescia che si estende dalla fermata Prealpino alla fermata S. Eufemia per un totale di circa 14 km, che è stata aggiudicata ad un raggruppamento di imprese che hanno proposto un sistema di metropolitana automatica simile a quello recentemente realizzato a Copenhagen. Il progetto ha acquisito quindi il cofinanziamento ai sensi

Ignazio Carbone

Ingegnere

Direttore Area Gestione Progetti di Metropolitana Milanese SpA e Coordinatore Generale dei Servizi di Project and Construction Management del Metrobus di Brescia

Mauro Rainieri

Ingegnere

Direttore Corporate and Metrobus di Brescia Mobilità SpA

natura rigenerativa a recupero, ha una buona ottimizzazione per quanto riguarda il consumo energetico.

I veicoli - una flotta iniziale di 18 treni - sono frutto dell'esperienza che le industrie costruttrici hanno acquisito nella fornitura del materiale rotabile in sistemi analoghi (vedi metro di Copenhagen) e ne costituiscono l'up-grade.

Sono veicoli a triplice cassa, di larghezza pari a 2,65 m e di una lunghezza complessiva di 39 m (misure decisamente più contenute rispetto a quelle di una metropolitana tradizionale pari a 2,85 m x 105 m) ed offrono una capacità di circa 425 passeggeri a pieno carico con una velocità massima di 80 km/h.

La frequenza di transito dei treni avrà nell'ora di punta una cadenza pari a 1'30" con una capacità massima oraria per senso di marcia di 17.000 passeggeri/ora permettendo il raggiungimento di una velocità commerciale superiore ai 30 km/h.

Le contenute dimensioni dei veicoli producono come conseguenza positiva la riduzione dei costi globali delle opere civili, consentendo la riduzione del diametro delle gallerie, delle dimensioni delle stazioni nonché una migliore integrazione del tracciato, sotterraneo e superficiale, con il tessuto urbano costruito.

Il fattore dimensionale, insieme con il sistema di armamento fisso biblocco, tipo "Vagneaux" comportano inoltre un minore impatto dell'opera dal punto di vista delle vibrazioni indotte sugli edifici adiacenti e/o soprastanti la linea, nonché un sostanzioso contenimento del rumore rispetto ad una metropolitana "classica". Ulteriori vantaggi di una sistema di MLA sono rappresentati da:

- miglioramento dell'esercizio ed elevata flessibilità, che dipendono dall'automazione globale e quindi dalla mancanza del macchinista a bordo del treno. E' infatti possibile migliorare la frequenza ed adeguare tempestivamente il servizio offerto seguendo la reale domanda di trasporto mediante la regolazione della frequenza del transito dei convogli, ottenendo così sufficienti coefficienti di riempimento dei convogli nell'arco della giornata;
- maggiore attrazione del servizio nei confronti del pubblico, poiché la riduzione della percezione dell'attesa e l'effettiva riduzione dei tempi morti durante il percorso di spostamento producono un incremento della soddisfazione dell'utente.

Un ulteriore elemento che caratterizza le metropolitana leggera automatica di Brescia è la presenza di una copertura della via di corsa che la separa, per motivi di sicurezza, dal corpo di stazione; l'accesso ai treni



avviene dunque tramite le porte di banchina, il cui dispositivo di apertura scatta solo a veicolo fermo, che oltre a garantire un elevato livello di sicurezza riducono i tempi di fermata del treno al suo arrivo in stazione.

LE PRINCIPALI CARATTERISTICHE DELLA LINEA

Il tracciato

Si giunge quindi alla definizione di un tracciato urbano che conta 13,7 km di linea a doppio binario di cui 4,7 km in galleria artificiale, 6 km in galleria naturale, 1,3 km a raso e 1,7 km in viadotto e ben 17 stazioni più un centro di controllo - deposito, con i seguenti standard di linea.

STANDARD DI LINEA

Tracciato:

• Raggio di curvatura minimo	190 m
• Pendenza Max di linea	40 ‰
• Profondità Max del piano del ferro (galleria)	-28 m
• Altezza Max piano del ferro (viadotto)	7,6 m

Ingombri:

• Ingombro Max di galleria a doppio binario (diametro interno galleria naturale)	8,15 m
• Lunghezza delle banchine di stazione	42 m

Le stazioni

Le stazioni che fanno parte del primo lotto in fase di realizzazione sono 17 e, come la linea, possono essere suddivise in 4 tipologie distinte:

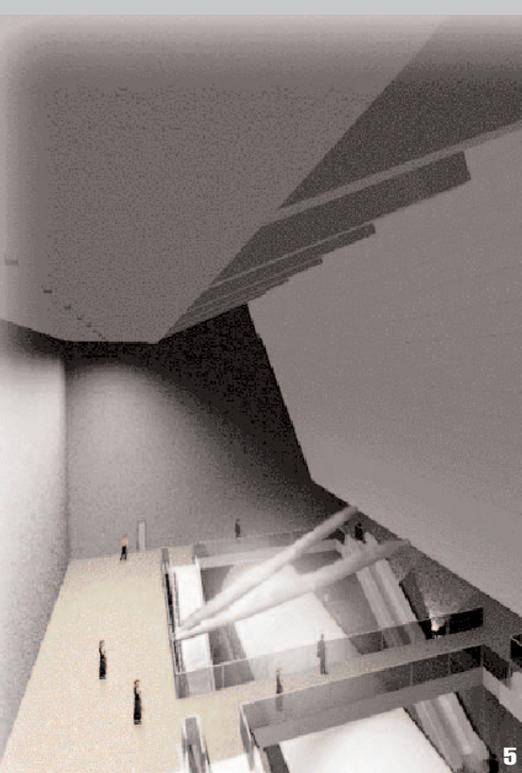
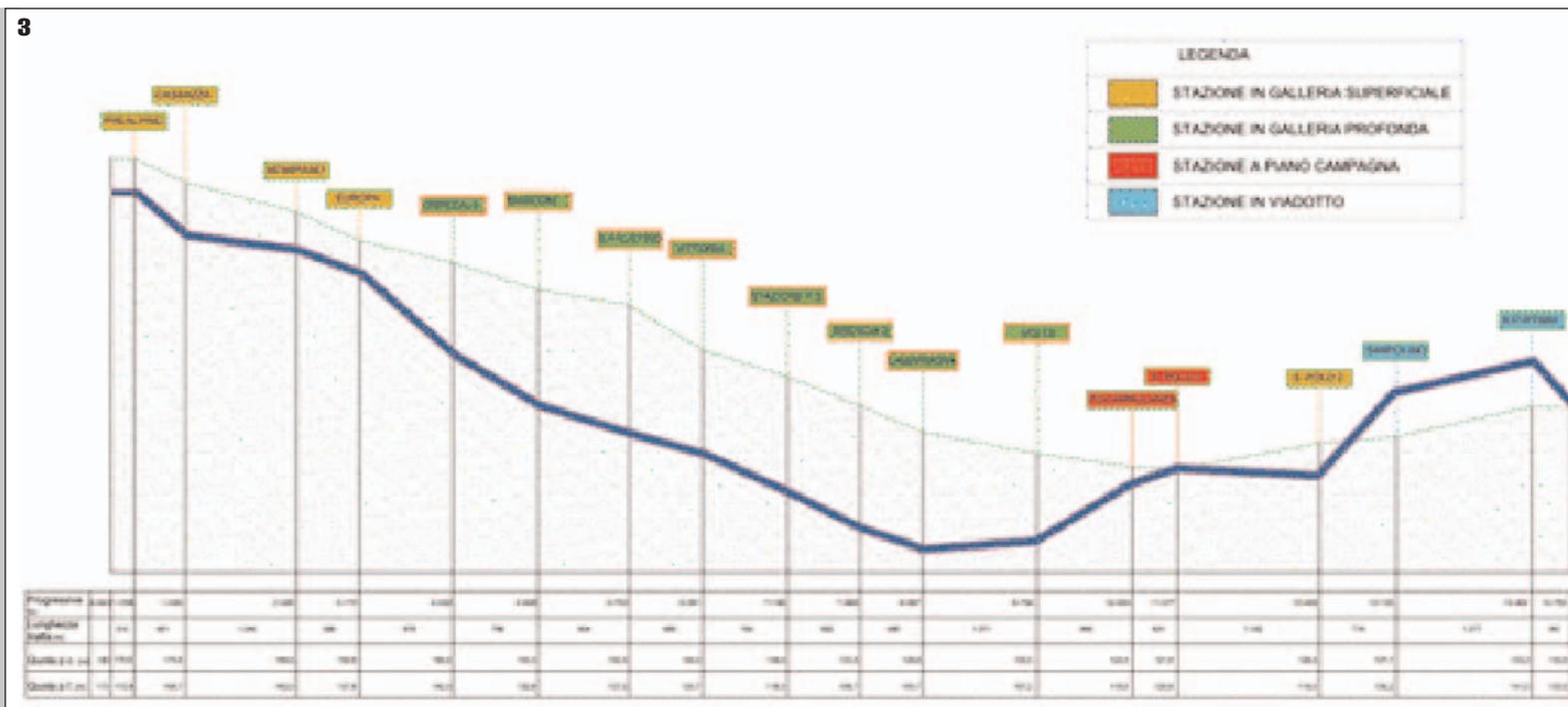
- stazioni superficiali in galleria artificiale (n°5);
- stazioni profonde in galleria naturale (n°8);
- stazioni a piano campagna (n°2);
- stazioni su viadotto (n°2).

La dimensione limitata della metropolitana automatica ha permesso di contenere l'ingombro delle stazioni a circa 60 m di lunghezza e circa 25 m di larghezza.

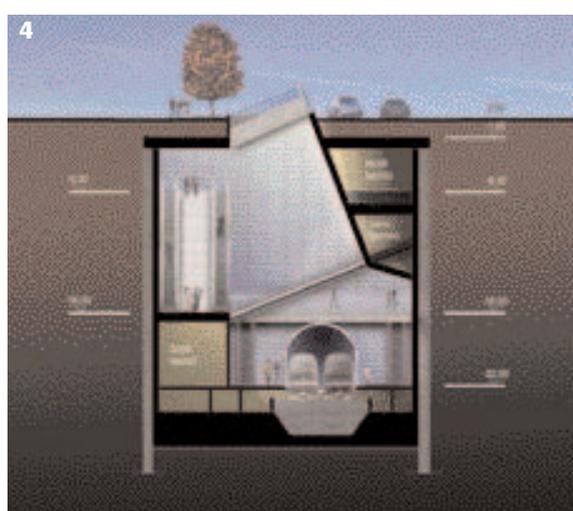
2. Il veicolo

3. Il profilo altimetrico

4. La "stazione tipo" profonda - sezione trasversale



5. L'interno di una "stazione tipo" profonda



4

Nella progettazione delle stazioni, oltre alla dovuta attenzione nella definizione degli aspetti distributivi e funzionali degli ambienti, con un accurato studio dei percorsi per i flussi dei passeggeri e rispetto delle normative vigenti, particolare importanza è stata data all'aspetto architettonico delle medesime, giungendo alla creazione di volumi elementari a tutt'altezza, nei quali gli elementi distributivi (corpi scale, ballatoi, mezzanini) appaiono "appesi" e consentono la lettura degli spazi dalla quota più alta fino al piano banchina. Inoltre, a garantire il costante dialogo interno (la stazione) - esterno (la città) è stata pensata una ritmica presenza di grandi lucernai, impostati a livello del piano campagna che, oltre a garantire l'effetto di luce naturale dall'interno, rappresentano un segno urbanistico riconoscibile nella città.

LA TECNOLOGIA

Nella progettazione della linea Metrobus sono state impiegate le più moderne tecnologie disponibili; infatti il sistema di automazione globale della linea che permette l'esercizio "driver-less", ovvero senza macchinista a bordo, necessita dell'ATC (controllo automatico del treno) che comprende l'ATP (protezione automatica del treno), l'ATO (guida automatica del treno) e l'ATS (supervisione automatica del treno) oltre che un impianto di manovra automatica ai capilinea, un'estensione dell'automazione al piazzale del deposito, ed il controllo della sicurezza nella salita e nella discesa dei passeggeri; tali tecnologie sono affidabili e garantiscono un efficiente sistema di sicurezza per i passeggeri della metropolitana.

Il cuore operativo di queste tecnologie è il centro di controllo per la gestione dell'esercizio (situato nell'edificio "B" nell'area del deposito - officina) che monitora e supervisiona il corretto funzionamento della linea.

Altro aspetto importante nella considerazione dell'elevato standard tecnologico adottato è stata la progettazione del materiale rotabile, sui quali sono stati introdotti materiali con elevate caratteristiche antincendio e antifumo, e degli impianti di sistema e non di sistema che devono interfacciarsi costantemente per offrire al pubblico un adeguato livello di informazione e comunicare con il centro operativo di controllo per analizzare e definire eventuali guasti.



6

6. Il deposito - officina: l'edificio "B" che contiene la sala di controllo

LE TECNICHE COSTRUTTIVE

La cantieristica e l'impatto sulla città

Il sistema Metrobus è un progetto di grande complessità anche perché, oltre alle componenti specialistiche tecnologiche, al materiale rotabile e alla necessaria integrazione con le componenti civili, come descritto, nel suo percorso passa da sede sotterranea a sede su viadotto a seconda del contesto attraversato e degli spazi a disposizione, coinvolgendo numerosi settori tecnici.

Per questa eterogeneità di tipologie di strutture, l'organizzazione della logistica dei cantieri ha rivestito un ruolo determinante nell'avanzamento dei lavori e sul regolare svolgimento delle quotidiane attività della cittadinanza.

Durante la progettazione esecutiva la linea è stata ottimizzata nel tracciato e nella posizione delle stazioni in modo da localizzare i cantieri il più possibile fuori dai tracciati viari. Ciò nonostante il progetto metropolitana, dal punto di vista logistico crea forte impatto sul sistema viabilistico delle grandi e piccole arterie, in modo particolare per la contemporanea apertura di numerosi cantieri lungo la linea che si estende per circa 14 km in direzione Nord-Sud e Sud-Est.

A tal proposito è stata fin dall'origine posta una particolare e costante attenzione da parte della committenza alla comunicazione alla cittadinanza, istituendo un vero e proprio sportello addetto alla informazione e alle relazioni con il pubblico, che promuove assidue campagne di informazione in occasione di modifiche della viabilità, nonché promuove il progetto medesimo verso la cittadinanza con numerose iniziative *marketing*, compresa l'organizzazione di "cantiere aperto", l'evento che apre le porte del cantiere alla cittadinanza in occa-



7

sione dell'arrivo della TBM all'interno delle stazioni scavate.

a) la galleria naturale

Per quanto riguarda la tratta in galleria naturale, realizzata con un unico tunnel a doppio binario scavato a piena sezione mediante l'impiego di una TMB (tunnel Boring Machine) si è resa necessaria l'individuazione e la creazione di due cantieri, l'uno di immissione, l'altro di estrazione della fresa.

In particolare il cantiere di immissione, posizionato in zona sud di Brescia, nelle immediate vicinanze di uno svincolo autostradale, e di considerevoli dimensioni costituisce il campo base delle attività di scavo della TBM, dal quale avviene la fornitura di materiale (conci prefabbricati, schiume, malte, attrezzature ed impianti, ...) per l'avanzamento della galleria e al quale è recapitato e temporaneamente stoccato lo smarino prodotto su tutta la linea, prima di essere trasferito in apposite cave..

Lo scavo della galleria tramite la fresa meccanizzata

7. La stazione profonda "Brescia 2" - copertura provvisoria della via di corsa



8. La realizzazione di paratie nella stazione profonda "Vittoria"

9. La stazione superficiale "Mompiano"

ha l'enorme vantaggio di decentralizzare tutti i cantieri in due aree poste agli estremi della linea non interferendo, se non marginalmente e in situazioni particolari, con le attività in superficie.

b) le stazioni, le gallerie artificiali e i pozzi di accesso per i VVF

Ben più complessi sono stati la definizione ed il dimensionamento, in particolar modo nel centro città e nella tratta Nord, delle aree da asservire e cantierare per la costruzione delle strutture partendo da scavi a cielo aperto e che quindi oltre all'effettivo ingombro delle opere devono considerare lo spazio per la movimentazione di macchine operatrici e mezzi di cantiere. Lo scavo dall'alto, quasi sempre ricadente in aree occupate da sedi stradali e/o aree pubbliche e private limitrofe, necessita nella maggior parte dei casi di una propedeutica risoluzione delle interferenze con le reti di servizi pubblici. Spesso quindi i cantieri sono attivati in subloti e in diverse riprese, in modo da consentire dapprima lo spostamento delle reti e successiva-

mente la realizzazione delle opere della metropolitana.

Considerato il contesto urbano in cui questi cantieri sono inseriti, è stata prevista la sospensione delle attività di esecuzione dei lavori nelle ore notturne per non arrecare disagio agli abitanti delle zone interessate dai cantieri se non per quelle attività che risultavano indispensabili per non pregiudicare la buona riuscita dell'opera stessa.

c) la tratta Sud

La tratta di linea nella zona sud della città attraversa invece un contesto urbano differente, con densità abitativa più contenuta e con aree libere da edificazione più ampie e quindi con la possibilità di mettere a disposizione aree di cantiere più idonee alle attività.

In particolare la costruzione del viadotto non ha presentato le stesse difficoltà delle tratte in galleria, ma anzi proprio il passaggio della linea metropolitana è stato occasione per un piano di sviluppo urbanistico della zona, per altro già in costruzione.

La galleria naturale

Lo scavo della galleria naturale, che avviene con un ricoprimento dal piano campagna che varia tra i 10 ed i 22 m, è effettuato con un sistema di scavo EPB (Earth Pressure Balance) tramite una TBM di 9,15 m di diametro esterno e di 130 m di lunghezza. Gli strumenti di programmazione dell'opera prevedono che la TBM abbia una produzione media pari a 9,00 m di avanzamento al giorno, producendo di conseguenza uno smarino pari a circa 590 m³ al giorno; la massima produzione ad oggi raggiunta dalla macchina durante lo scavo dei primi 2 km è stata di circa 22 m al giorno.

La profondità del tracciato è stata studiata in modo da garantire la riduzione al minimo delle ripercussioni in superficie degli eventuali fenomeni vibrazionali e di assetamento del terreno interessato dallo scavo.

La galleria artificiale

La realizzazione delle linee in galleria artificiale avviene mediante la ben nota tecnica denominata "cut & cover"; tale tecnica permette di contenere i costi rispetto allo scavo tramite TBM, ma necessita di aree di cantiere molto più ampie poiché lo scavo viene effettuato con metodi tradizionali tra paratie interferendo inoltre con la viabilità cittadina.

Il viadotto

Al fine di minimizzare l'impatto ambientale del viadot-

to, inserendolo al meglio nel contesto urbanistico, sono stati adottati i migliori standard qualitativi progettuali per il viadotto, sia sotto l'aspetto strutturale sia sotto l'aspetto architettonico.

In particolare dal punto di vista strutturale il viadotto presenta campate di 30 m incastrate nelle pile centrali ed appoggiate nelle pile laterali.

La tipologia dei terreni attraversati e la falda

Il territorio dell'area urbana di Brescia si trova nel tratto terminale della Val Trompia corrispondente al conoide alluvionale del fiume Mella, formato da depositi prevalentemente grossolani appartenenti alle Alluvioni Antiche e da depositi delle Alluvioni glaciali e fluviali, con una morfologia degradante da poco acclive a pianeggiante.

Di queste alluvioni si sono individuati tre orizzonti temporali che determinano altrettante composizioni granulometriche; si trova così una unità ghiaiosa - sabbiosa appartenente al periodo Pleistocene Sup. - Olocene, una unità para-conglomeratica con intercalazioni limo-argillose appartenente al periodo Pleistocene ed una unità argillosa - limosa contenente lenti ghiaiose - sabbiose del periodo Villafranchiano.

Le opere in sotterraneo che contraddistinguono il Metrobus di Brescia, interessano prevalentemente terreni appartenenti alla prima unità; in particolare Alluvioni fluvio-glaciali, Antiche e recenti, caratterizzate da clasti poligenici di elevata energia di trasporto, sabbie medie ed una piccola percentuale di componente limo - argillosa.

Dal punto di vista idrogeologico il territorio comprende numerosi corsi d'acqua tra i quali i più significativi sono il fiume Mella e il torrente Garza, il quale interseca in più punti il tracciato del Metrobus.

L'acquifero del sottosuolo, alimentato dal bacino imbrifero e idrogeologico della Val Trompia, scorre da Nord a Sud seguendo un gradiente di circa il 2‰; l'andamento della falda che ne consegue presenta un'oscillazione piezometrica che nella tratta a Nord non interessa le strutture della linea metropolitana mentre nella tratta centrale la falda di progetto è stata assunta ad una quota intersecante le strutture profonde della linea.

Parallelamente a queste analisi è stato condotto uno studio per stabilire il grado di "salute" degli edifici interessati dallo scavo per individuare quelle aree che necessitavano di un'accortezza particolare e di eventuali interventi addizionali.

L'attraversamento a vuoto della TBM nelle stazioni profonde



Un approfondimento particolare va dedicato alle stazioni della tratta in galleria naturale, cioè stazioni profonde, che oltre ad essere opere strutturalmente complesse rivestono anche l'importante funzione di area per la manutenzione a cielo aperto della TBM. La tecnologia impiegata per realizzare lo scavo è basata sull'utilizzo di paratie in calcestruzzo tirantate, opere di sostegno in grado di ridurre al minimo la decompressione del terreno conseguente allo scavo, e quindi, i cedimenti in prossimità delle aree limitrofe. Una volta eseguita la struttura interna della stazione, l'azione di contrasto del terreno è fornita dagli orizzontamenti della struttura stessa.

10. Il viadotto e il nuovo quartiere Sanpolino

11. La stazione profonda "FS" - opere propedeutiche al passaggio della TBM

12. La stazione profonda "Volta" - strutture interne in elevazione dopo il passaggio della TBM

I rinvenimenti archeologici

I ritrovamenti archeologici avvenuti fino ad ora riguardano i siti di due stazioni del centro storico, la stazione S. Faustino e la stazione Vittoria. Più precisamente:

S. FAUSTINO: sono stati rinvenuti reperti archeologici risalenti al XIII, XV e XIX secolo costituiti da porzioni delle fondamenta delle mura venete che cingevano la città e da 2 arcate del ponte, posto sopra il fossato che costeggiava le stesse mura, che consentiva l'accesso alla città da Nord.

Ciò ha comportato la definizione di un nuovo schema di stazione che, prevedendo lo scavo dall'alto limitatamente alla porzione di essa in corrispondenza del vecchio fossato e la realizzazione in allargò - cioè scavata da sotto - della restante parte di stazione, rende possibile la conservazione totale dei reperti.



VITTORIA: È stato rinvenuto il basamento di una torre medievale in discreto stato di conservazione che impedisce la realizzazione della stazione secondo le fasi lavorative prestabilite. Al riguardo si è convenuto con le autorità competenti lo smontaggio e il ricollocamento del basamento della torre in altra posizione secondo un progetto in corso di definizione. In questo caso il progetto distributivo della stazione non ha subito modifiche, mentre sono intervenute modifiche in termini di sequenza e modalità operative per la realizzazione della medesima.



13. La stazione profonda "S. Faustino" - ponte ottocentesco e mura venete

14. La stazione profonda "Vittoria" - basamento torre medioevale

Le strutture sono impermeabilizzate tramite la posa di guaine multistrato compartimentate, posizionate tra le paratie ed il successivo getto delle contropareti in calcestruzzo armato. Viene inoltre costruita sul solettone di fondo una "sella" per l'attraversamento a "vuoto" delle stazioni da parte della fresa, durante tale attraversamento, la cui durata è circa 1 mese, si effettuano contemporaneamente tutte le fondamentali operazioni di manutenzione della macchina. Una volta che la macchina riprende le operazioni di scavo, la sella di passaggio viene coperta con un sistema tubolare per evitare interferenze tra il passaggio dei treni di servizio e la prosecuzione delle opere in c.a. all'interno della stazione.

L'avanzamento dei lavori

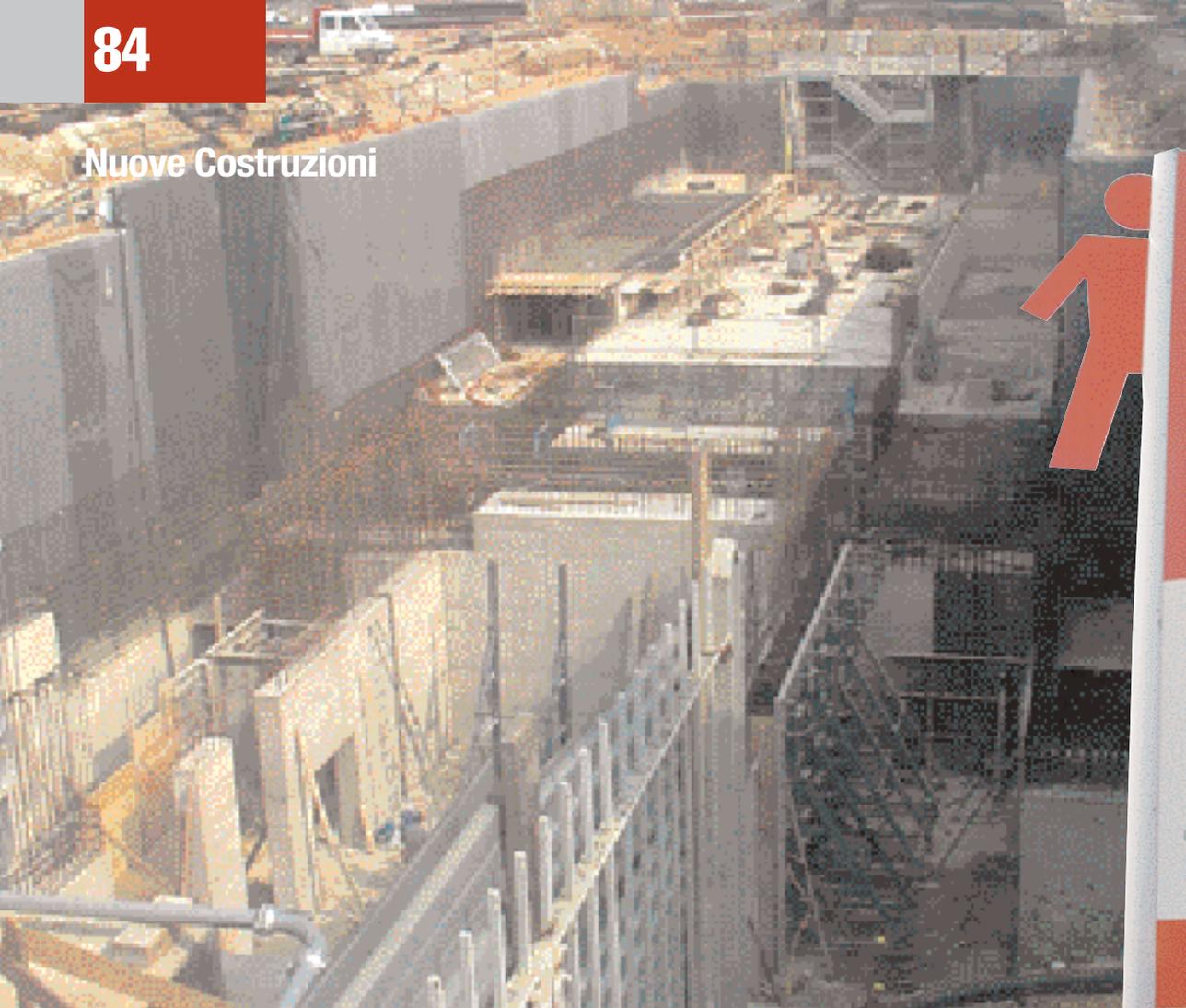
Per quanto riguarda le opere civili, i lavori, come per altro evidenziato nelle varie figure sopra riportate, sono stati avviati lungo tutta la tratta funzionale, sia in termini di linea che di stazioni; più in particolare sono stati scavati circa 2,1 km di galleria naturale nella tratta del centro città, la galleria artificiale nella zona Nord è in avanzata fase di costruzione così come la tratta in viadotto.

Tutte le stazioni sono in fase di lavorazione e risultano ultimati i rustici dei fabbricati del deposito officina. Sono invece in fase di progettazione, e solo parzialmente in fase di realizzazione gli impianti civili e tecnologici di sistema.

Complessivamente i lavori hanno a tutt'oggi raggiunto il 35% di avanzamento. La messa in esercizio commerciale è prevista a partire dal gennaio 2013.

IL COORDINAMENTO GENERALE

In considerazione dell'importanza e della complessità del progetto Metrobus, Brescia Mobilità, società del comune di Brescia incaricata di realizzare l'intervento e di curarne la gestione, riservando per sé la funzione di Alta sorveglianza e di gestione dei rapporti con gli Enti, ha ritenuto necessario avvalersi del supporto di una struttura esterna, costituita da un raggruppamento di Società di Ingegneria, dotata di specifica esperienza nel settore delle costruzioni di infrastrutture analoghe e selezionata mediante una procedura di appalto pubblico per Servizi di Project and Construction Management. Tali servizi consistono nel Controllo della Progettazione Esecutiva predisposta a cura dell'Appaltatore, nella Direzione Lavori, nel Coordinamento della sicurezza in fase di esecuzione e nel Controllo dell'avanzamento dei lavori. ■■



Per **muoversi** in lungo, in largo. E in avanti.

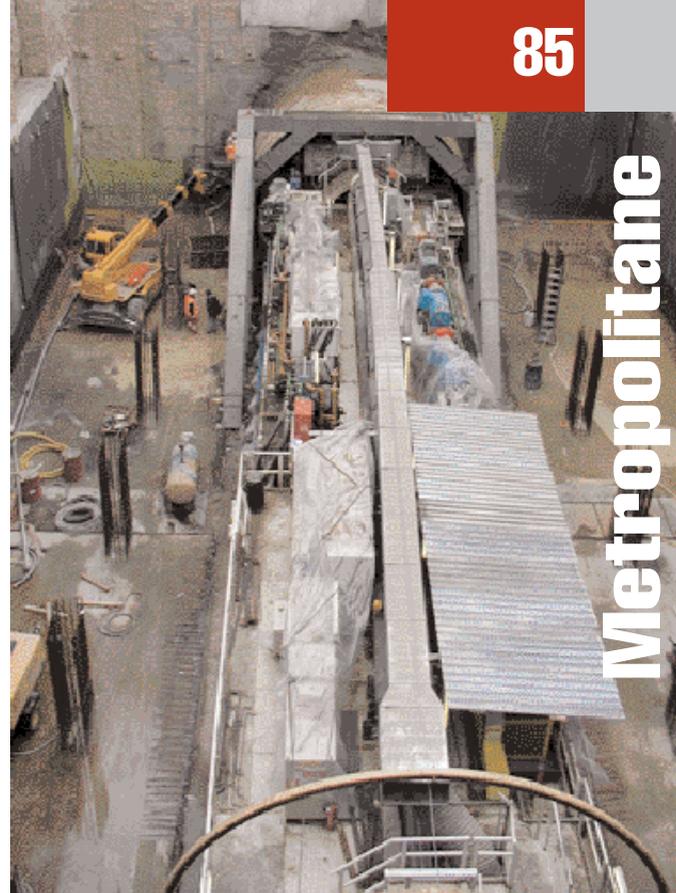
BRESCIA È ANCORA AL CENTRO DELL'ATTENZIONE PER LE NUOVE INFRASTRUTTURE DI TRASPORTO. DOPO LA PRESENTAZIONE DEL PROGETTO METROBUS NEL LUGLIO DEL 2004, LE STRADE È RITORNATA A BRESCIA PER AGGIORNARE I PROPRI LETTORI SULL'ANDAMENTO DEI LAVORI. DOPO TORINO, ANCHE BRESCIA SI ATTIVA IN FORZE PER RISPETTARE LA DATA DI APERTURA DEI PRIMI 13 KM PREVISTI NEL 2010. LE PUNTE DELL'ATTACCO BRESCIANO SONO QUANTO DI MEGLIO OFFRE OGGI L'IMPREDITORIA ITALIANA: ASM COME COMMITTENZA, MM PER LA PROGETTAZIONE E LA DIREZIONE LAVORI, ANSALDO PER LA TECNOLOGIA FERROVIARIA ED ASTALDI PER LE OPERE CIVILI.

Federico Gervaso

Brescia Mobilità è il cliente, nato da una costola di ASM nel dicembre del 2001 per lo studio e l'attuazione dei grandi progetti innovativi di mobilità ed in particolare del Metrobus. Parlare di ASM (Azienda Servizi Municipalizzati di Brescia) è molto facile: nata nel 1908 per la gestione del servizio tramviario e della fabbrica del ghiaccio, si espande di anno in anno per gestire prima i servizi di produzione dell'energia elettrica, poi acquisendo il servizio di nettezza urbana, degli impianti semaforici, delle centrali termiche, dei parcheggi, della depurazione e delle fognature. Dal 1972 anche per l'erogazione di calore ed acqua calda al fine di garantire il teleriscaldamento di una grande fetta della città.

Dal 1998 la ASM gestisce una nuova avanzata centrale di cogenerazione che produce energia elettrica utilizzando i rifiuti come combustibile. Entrata in Borsa nel settore blue chips, nel 2002 incorpora l'azienda di servizi di Bergamo; è di quest'anno il progetto di fusione con l'azienda energetica di Milano, per dare vita ad un colosso tutto lombardo nel campo dei servizi integrati per il cittadino.

Il Metrobus di Brescia è diretta conseguenza di questa politica espansiva ed innovativa. Brescia, con poco più di 200.000 abitanti, con questa iniziativa si pone al vertice della tecnologia nella mobilità su ferro e nel rapporto tra lo sviluppo della rete metropolitana ed i suoi abitanti: un chilometro di linea per ogni 15.000 abitanti a partire dal 2011, contro gli attuali 16.000 di Milano e gli oltre 50.000 di Roma.



LA TECNOLOGIA FERROVIARIA

Ansaldo Trasporti Sistemi Ferroviari, al di là degli importanti numeri ufficiali di fatturato e dipendenti, presenta a Brescia un biglietto da visita di eccezionale valore, la costruzione e la gestione del metrò di Copenhagen. Funziona ormai da cinque anni il sistema di trasporto metropolitano ad automazione integrale della capitale danese, con un indice di affidabilità superiore al 99%. Questa è sicuramente la migliore garanzia per il Committente, che attende un risultato finale al vertice dei valori di affidabilità, efficienza ed economicità.

PCM E DIREZIONE LAVORI

La Metropolitana Milanese, la cui esperienza e capacità progettuale nell'ambito delle linee metropolitane è fuori discussione, è mandataria di un raggruppamento che esprime sia il Project & Construction Management sia la Direzione Lavori. A dispetto dell'aggettivo "milanese", la MM ha progettato numerose strutture di trasporto in Italia ed all'estero, tra cui tutta la linea 1 della Metropolitana di Napoli, ormai in fase di completamento.

IL PARTNER CIVILE

Il terzo partner è Astaldi, che si pone ai vertici delle imprese di costruzioni in Italia. Al suo attivo numerose realizzazioni nel campo delle metropolitane: Roma linea C, Milano linea 3 e Genova linea 1 ed in project financing la linea 6 di Milano.

I REQUISITI DI SISTEMA

Ecco i requisiti contrattuali e progettuali per i parametri di sistema del Metrobus bresciano:

- capacità iniziale prevista: 8.500 passeggeri/ora per senso di marcia
- flotta iniziale: 18 treni di cui 16 in linea
- frequenza nell'ora di punta: 3 minuti
- frequenza normale: da 3 a 6 minuti
- frequenza nelle ore di minor traffico: da 8 a 10 minuti
- velocità massima: 80 km/ora
- velocità commerciale: 30 km/ora
- capacità massima di trasporto: 17.000 passeggeri/ora per senso di marcia
- distanziamento minimo tra i veicoli: 90 secondi.

Ed infine analizziamo il tracciato di progetto per la prima fase di costruzione, da Santa Eufemia ad Est del capoluogo fino a Prealpine all'imbocco della Val Trompia:

- lunghezza: 13,1 km

fresa di diametro 9,15 che utilizza la tecnologia di scavo a pressione bilanciata di terra.

La strategia di Ansaldo si sviluppa su tutto l'arco del sistema: innanzitutto nella realizzazione del cuore del sistema stesso, ovvero il comando ed il controllo automatico della marcia dei treni ed in dettaglio:

- sistema ATO: provvede al funzionamento automatico dei treni; regola le funzioni che si espletano in condizioni di esercizio normale come l'accelerazione, la decelerazione, le fermate alle stazioni di funzionamento delle porte dei veicoli di banchina.
- sistema APP: provvede alla protezione del sistema. Supervisiona velocità eccessive, malfunzionamenti delle porte dei veicoli di banchina, errati instradamenti dei convogli ed altre funzioni che possono compromettere la sicurezza dei passeggeri o del sistema.
- sistema ATS: provvede alla supervisione e controllo dell'intero sistema ed ottimizza le funzioni in base ai



- di cui in viadotto 1700 metri
- a raso 1700 metri
- in trincea coperta 3800 metri
- in galleria profonda 5900 metri
- 17 stazioni di cui 2 in viadotto, 2 a raso, 5 in trincea coperta ed 8 in galleria profonda.

Nella strategia generale, Astaldi non si limita alle opere civili, ma estende le sue attività all'armamento ferroviario ed agli impianti non di sistema quali illuminazione, ascensori e scale mobili, condizionamento ed impianti di ventilazione ed antincendio.

Le quantità più significative si riferiscono ad 1.630.000 mc di scavi e 600.000 mc di calcestruzzo. Fiore all'occhiello è lo scavo della galleria profonda con una

parametri di esercizio stabiliti da parte degli operatori al posto centrale di comando.

A supporto ecco lo SCADA, supervisione controllo ed acquisizione dei dati. Tale sottosistema consente di riportare al posto centrale tutte le funzioni che permettono di monitorare e comandare in tempo reale tutti gli impianti periferici quali gli impianti di alimentazione (sottostazioni elettriche, cabine di trasformazione, gruppi di continuità, sezionatori di linea) e gli impianti ausiliari (luci di emergenza, sistema anti-intrusione e antincendi, ventilazione di stazione e di galleria, condizionamento e pompe di aggettamento, bigliettazione, ascensori e scale mobili).

Le comunicazioni vengono garantite dal sistema



Telecom, un complesso di impianti per l'assistenza audiovisiva degli utenti da parte del posto centrale, ed inoltre per le comunicazioni di servizio tra quest'ultimo ed il personale itinerante e di manutenzione.

Questo sottosistema dotato di impianti fissi garantisce lungo la linea le comunicazioni audio, il monitoraggio audio/video e le comunicazioni visive ed include inoltre un sistema di trasmissione dati via radio per il segnalamento e la diagnostica del veicolo.

Caratteristica infine di tutto il sistema sono le porte automatiche di banchina. Contrariamente alle altre metropolitane, ma in armonia con quelle automatiche leggere in esercizio in molte città francesi ed a Torino, ogni stazione è dotata di porte automatiche di banchina posizionate in modo da garantire la sicurezza dei passeggeri in attesa del veicolo e di separare i locali di stazione dalla galleria di transito del treno. Le porte dei veicoli in posizione di arresto si troveranno in corrispondenza delle porte automatiche, come accade con i nostri ascensori.

Fra le due porte automatiche sono poste le porte di emergenza che permettono l'evacuazione dei passeggeri. Il tempo di apertura delle porte è regolabile singolarmente per ogni fermata.

Il posto centrale, ubicato nell'area del deposito-officina, deve consentire al personale di esercizio di esercitare con il massimo grado di efficienza tutte quelle azioni di sorveglianza, intervento ed assistenza che rendono il sistema sicuro nei confronti dei passeggeri e del pubblico in generale. Le funzioni disponibili per il personale del posto centrale sono:

- supervisione della linea,
- comunicazione con il personale di linea,
- controllo ed assistenza dei passeggeri,
- supervisione e regolazione del traffico,
- supervisione alla manutenzione.

Parte integrante di questa tecnologia innovativa di Ansaldo Trasporti è il sottosistema terza rotaia, costituito da una barra conduttrice in alluminio ed acciaio che corre parallelamente alle rotaie di corsa e che ha lo scopo di fornire l'energia elettrica necessaria alla movimentazione del veicolo ferroviario.

Il veicolo capta la corrente tramite una serie di pattini laterali che strisciano sulla superficie inferiore della terza rotaia. La superficie superiore invece è protetta da una copertura isolante necessaria per evitare contatti diretti.

La scelta della terza rotaia ha il vantaggio di un impatto visivo ambientale notevolmente inferiore alla classica linea di contatto superiore.

ANSALDO BREDA

A Brescia non si vede, ma c'è un quarto partner. E' Ansaldo Breda, che cura la costruzione nella propria officina di Pistoia del materiale rotabile. Si tratta di una fornitura di 18 veicoli formati da tre casse articolate bidirezionali a guida completamente automatica. Tutti gli equipaggiamenti sono sistemati sotto cassa, mentre i gruppi per il condizionamento sono montati sul tetto.

Il banco di manovra per la marcia di emergenza viene posto in apposito vano delle testate anteriore e posteriore ed è protetto da un'opportuna copertura. Come già accennato la capacità di trasporto del convoglio è pari a 72 passeggeri seduti più due postazioni per sedie a rotelle. Il convoglio è inoltre dotato di impianto TV di sorveglianza ed impianto di registrazione, memorizzazione e telecamere a colori. Le prestazioni nel nostro si possono riassumere con i seguenti dati:

- velocità massima: 80 km/ora,
- velocità massima consentita in marcia manuale: 15 km/ora,
- accelerazione: 1.0 m/sec²,
- decelerazione media: 1.1 m/sec²,
- alimentazione mediante terza rotaia: 750 Volt in corrente continua.

I CANTIERI

L'avanzamento del progetto al momento della nostra visita nel mese di gennaio era stimato intorno al 47% con i magisteri di progettazione praticamente completati e quelli di realizzazione delle opere civili e della fornitura degli impianti di sistema valutati entrambi oltre il 50% di avanzamento.

Cuore ed arteria pulsante del sistema Metrobus di Brescia è allo stato attuale la realizzazione delle gallerie a foro cieco nel centro della città.

La fresa, che utilizza la più moderna tecnologia EPB (pressione bilanciata di terra) è stata montata in un camerone di partenza a monte della stazione Volta. La macchina ha già attraversato la stazione omonima ed altre quattro stazioni e si trova attualmente tra la stazione FS e la stazione Vittoria, in pieno centro cittadino.

La fresa percorrerà quindi tutto il rimanente tratto centrale della città da sud verso nord attraversando, anche quelle di San Faustino, di Marconi ed Ospedale, uscendo infine a cielo aperto tra quest'ultima e la stazione Europa. Sei chilometri non scevri di difficoltà dovendosi sottopassare oltre a strade e piazze anche numerosi fabbricati. La fresa ha già percorso felicemente

3.200 metri, quindi oltre la metà del suo percorso.

Il diametro di scavo della TBM Herrenknecht coincidente con il profilo dello scudo in corrispondenza del fronte risulta pari a 9150 mm. Le geometrie dello scudo prevedono una conicità longitudinale per permettere l'avanzamento della macchina senza generare strisciamenti. Il diametro in centro scudo risulta di 9130 mm mentre in coda è pari a 9120, prevedendo pertanto un gap anulare sul raggio tra fronte e coda, pari a 15 mm. L'estradosso dell'anello di rivestimento in conci prefabbricati risulta pari a 8850 mm, cosicché lo spazio anulare da riempire mediante miscela cementizia risulta pari a 150 mm. La massima pressione in camera di scavo risulta di 3 bar, la spinta viene esercitata da 38 martinetti distribuiti in 19 gruppi da 2, con pressione massima di 350 bar, tale da generare una spinta complessiva massima pari a circa 8.000 ton.

In genere nello scavo di una galleria con normali TBM, si individuano due sezioni critiche per quanto attiene il sostegno del terreno del contorno. Una è costituita dal fronte di scavo, ove per effetto dello scavo stesso si genera un naturale rilascio tensionale del terreno che, in presenza soprattutto di materiale incoerente, può anche comportare il rischio di sovrascavi.

L'altra sezione si presenta invece in coda allo scudo, dove sussiste un gap anulare di svariati centimetri causato dallo spessore del mantello dello scudo e dal franco necessario per la fuoriuscita del rivestimento della coda dello stesso.

Quanto più si riesce a contrastare l'allentamento del terreno al contorno in queste sezioni, ovvero quanto più ridotto risulta il volume perso rispetto a quello teorico di scavo, tanto più si riducono gli effetti ed i risentimenti in superficie.

In tal senso la metodologia di scavo di una TBM in modalità EPB risulta molto conservativa: infatti prevede di applicare sul fronte di scavo una contropressione che nel caso in esame può raggiungere i 3 bar.

Tale contropressione, che viene progettualmente determinata in modo da mantenere condizioni al fronte pressoché geostatiche, è ottenuta agendo opportunamente sul bilanciamento del volume di terreno scavato ed estratto della camera di scavo.

Appare quindi molto importante mantenere costantemente in camera di scavo il livello di pressione progettualmente definito lungo tutto il tracciato, in dipendenza dalle situazioni idrogeologiche incontrate, dalle altezze di copertura e dalle preesistenze di superficie. Nella TBM di Brescia è stato quindi introdotto un accorgimento per evitare inopportuni cali di pressione al fronte soprattutto durante i periodi di fermo scavo oppure nelle soste per il montaggio dei conci. Infatti a bordo della TBM è installato un impianto per il pompaggio di bentonite che, comandato da sensori di pressione, provvede in automatico a ripristinare il livello pressorio impostato in camera di scavo. Un sistema di sensori, distribuiti a differenti altezze della camera di scavo, permette inoltre di monitorare costantemente la distribuzione delle pressioni al fronte e di operare tempestivamente correzioni.

La sezione critica in coda scudo viene invece affrontata iniettando su tutta la corona circolare, contestualmente alla fase di spinta e scavo in avanzamento, una miscela a base cementizia in modo che riempia il più possibile rapidamente e con adeguata consistenza il vuoto lunare presenta l'estradosso del rivestimento. Tutto il processo avviene sotto controllo automatico com-



Metropolitane



- guarnizioni in EPDM: disposte circonferenzialmente attorno a ciascun concio su tutte le quattro facce di contatto con altri conci,
- barre guida: posizionate sulle facce di contatto tra conci dello stesso anello.

LE OPERE A FORO CIECO ED IL MONITORAGGIO

Progettista di tutte le opere in sotterraneo è la Stone di Milano, che estende la sua attività anche alla importantissima fase di monitoraggio dell'andamento dello scavo e dei riflessi indotti sulla superficie ed in particolare sui fabbricati.

Il sistema è stato studiato in fase di progettazione ed è in grado di fornire tutti gli elementi necessari ad una corretta valutazione dell'effettiva situazione in corso d'opera e della sua possibile evoluzione, al fine di poter adottare eventuali azioni correttive qualora ci si discosti dalle previsioni progettuali e/o dai limiti prefissati, in termini di effetti sulle interferenze preesistenti e sui fabbricati adiacenti.

L'insieme dei dati raccolti relativi ai parametri di scavo ed agli effetti indotti nel volume i terreno interessato e sui manufatti ubicati in prossimità della linea, potrà essere confrontata con quanto previsto dalla Stone in fase di progetto, al fine di verificare la validità delle ipotesi assunte e dei modelli di calcolo utilizzati. Nell'ambito di questa attività si è predisposta una fitta rete di caposaldi per il controllo dei movimenti.

Al termine della prima fase di monitoraggio tra la stazione Volta e la stazione Lamarmora, si evidenzia un *trend* positivo con produzioni che si attestano sui 5,25 ml/giorno, *trend* che trova riscontro anche in tutti i parametri macchina (pressione al fronte, pressione di iniezione, intasamento a tergo del rivestimento).

I cedimenti in superficie in asse galleria si sono attestati sui 25 mm, valori previsti in fase di progetto: per quanto riguarda gli edifici limitrofi, i cedimenti registrati in questa tratta risultano molto bassi.

Contemporaneamente alle opere a foro cieco sono in esecuzione numerose strutture a cielo aperto: in particolare sono terminate tutte le opere fondazionali della tratta in viadotto e sono in esecuzione le opere in elevazione. Appaiono avanzati anche i lavori per le stazioni realizzate tra paratie a nord del centro di Brescia: in particolare la Stazione Europa, la prima dopo la lunga tratta a foro cieco che attraversa la città.

Nonostante qualche comprensibile difficoltà iniziale, i lavori per la metropolitana di Brescia appaiono ben avviati verso il traguardo finale. ■■

puterizzato, al fine di ridurre al minimo le chiusure del cavo in fase di iniezione ed i volumi persi associati.

La TBM di Brescia è dotata infine di una bilancia posta in corrispondenza del nastro di carico dello smarino, che consente di effettuare in continuo la pesatura del volume di terreno scavato al fronte. La continua registrazione ed elaborazione dei dati permette all'operatore di effettuare una corretta guida in riferimento soprattutto ad eventuali sovrascavi.

Il rivestimento della galleria, posto in opera dalla macchina immediatamente dopo lo scavo, è costituito da anelli in conci prefabbricati in calcestruzzo armato con spessore di 35 cm.

Si è scelto di adottare un anello di tipo universale che consente, mediante la semplice rotazione intorno al proprio asse di un anello rispetto al precedente, di seguire l'andamento planoaltimetrico del tracciato e di apportare le eventuali necessarie correzioni in corso d'opera, senza ricorrere ad elementi speciali.

Le caratteristiche geometriche principali di tale anello sono le seguenti:

- diametro esterno: 885 cm,
- diametro interno: 815 cm,
- spessore: 35 cm,
- larghezza lungo l'asse: 150 cm,
- numero di conci: sette, ovvero 6 più la chiave.

Il sistema di rivestimento è completato dai seguenti inserti:

- connettori longitudinali: tra conci ed anelli continui,
- inserti per presa con erettore tipo Vacuum, posizionato in corrispondenza della mezzera di ogni concio,