



# Tunnel realizzati con TBM-EPB



1. La TBM-Elizabeth presso la London Underground

**LA REALIZZAZIONE DI TUNNEL MEDIANTE SCAVO MECCANIZZATO TBM-EPB, GARANTISCE LA STABILITÀ DEL FRONTE DI SCAVO PER MEZZO DELLO STESSO MATERIALE DI SCAVO MANTENUTO IN PRESSIONE CON LA SPINTA DELLA MACCHINA**

*Massimo Chiarelli\**

In ambiente urbano, la sfida principale è evitare cedimenti in superficie, ovvero evitare fenomeni di subsidenza. Tendenzialmente si cerca di non modificare lo stato tensionale al contorno, durante e dopo lo scavo ma, quando si scava sotto falda, questo sarà causa di un "richiamo" di acqua nel cavo in costruzione proveniente dalla falda intercettata.

L'acqua di venuta nel tunnel espulsa in grande quantità dalla falda è quasi sempre causa di un costipamento del terreno con effetti che si ripercuotono anche in superficie.

Altri problemi possono essere dovuti all'alternanza di strati con caratteristiche meccaniche molto diverse come, ad esempio, sabbie e rocce poco fratturate.

Esistono dei modelli di TBM studiati per far fronte a simili situazioni: sono le EPB (Earth Pressure Balance, l'equilibrio è garantito dallo stesso materiale di scavo mantenuto in pressione al fronte), le BS (Bentonite Slurry, la pressione al fronte è quella idrostatica del fango bentonitico mischiato al materiale scavato) e le CA (ad aria compressa, sono le più antiche e ormai in disuso). Le EPB e le BS sono preferibili allorché si lavori in ambiente urbano.

La realizzazione di gallerie mediante TBM-EPB si basa, quindi, sul principio del sostegno del fronte di scavo con il medesimo materiale scavato, transitante nella "camera di scavo", pressu-



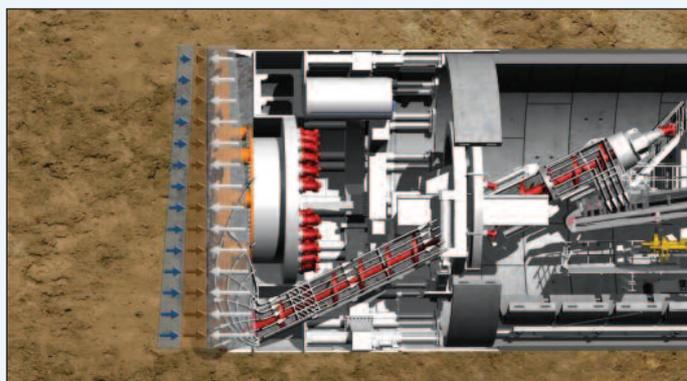
2. L'assemblaggio delle due TBM nella Linea M4 della stazione di Milano Linate



rizzato mediante la spinta della macchina ed un sistema controllato di evacuazione dalla stessa camera di scavo. Il materiale nella camera di scavo è pressurizzato opportunamente in funzione delle condizioni al contorno (caratteristiche geotecniche dei terreni, quota della falda rispetto alla quota dell'asse del tunnel, gradienti idraulici di filtrazione dell'acqua, permeabilità del terreno, eventuale presenza di strutture potenzialmente interferenti, ecc.).

Sotto l'impulso applicato allo scudo della TBM e, quindi, alla testa di scavo in rotazione, il terreno viene asportato dal fronte fluendo nella camera di scavo da cui viene estratto mediante la coclea nei volumi voluti. In questo processo, il materiale riceve costantemente la compressione necessaria tale che la pressione esercitata sia proprio quella necessaria a sostenere il fronte di scavo.

Contemporaneamente allo scavo, lo scudo della TBM si sfilava dall'anello formato da elementi prefabbricati in calcestruzzo (conci) costituente il rivestimento definitivo, precedentemente montato, ed il vuoto anulare tra la superficie di estradosso dell'anello di rivestimento e il profilo naturale del terreno vengono riempiti con iniezioni di malta a pressione fino alla completa saturazione del vuoto anulare anzidetto. Gli ugelli di iniezione della malta sono montati alla fine dello scudo il quale è protetto verso l'interno dal potenziale ingresso della malta, mediante diverse file di spazzole tra le quali è iniettato in continuo grasso con specifiche caratteristiche.



**3.** Lo schema di funzionamento di una TBM-EPB dove l'equilibrio è garantito dal materiale di scavo mantenuto in pressione al fronte

Durante l'avanzamento deve essere estratto il volume di materiale che entra nella camera di scavo, ossia il volume teorico più gli eventuali additivi iniettati sul fronte o nella camera. È fondamentale, pertanto, controllare il volume estratto attraverso la coclea per poter intervenire nel caso in cui si estragga più materiale del teorico (sopra scavo) o meno materiale del teorico (sotto scavo).

### Lo scavo in condizioni normali o anomale

Le configurazioni/condizioni considerate per l'avanzamento dello scavo sono le seguenti:

- ◆ condizioni normali;
- ◆ fermi macchina e ripresa avanzamenti dopo manutenzione;
- ◆ condizioni anomale.

Si considerano condizioni normali di scavo tutte le condizioni che presentano i parametri caratteristici dello scavo con TBM entro i limiti di attenzione.

Tra le condizioni di scavo normali sono comprese anche quelle conseguenti alla ripresa degli avanzamenti dopo interventi di manutenzione nella camera di scavo (per esempio, la sostituzione di cutters).

Si considerano condizioni anomale, invece, quelle di seguito riportate:

- ◆ venute d'acqua in pressione attraverso la coclea di estrazione;
- ◆ oscillazioni improvvise del valore della coppia sulla testa di scavo;
- ◆ blocco della testa di scavo;
- ◆ anomali valori delle pressioni in camera di scavo;
- ◆ improvvise e significative variazioni della densità del materiale presente nella camera di scavo;
- ◆ peso del materiale estratto dalla coclea oltre i limiti di attenzione;
- ◆ mancato raggiungimento della pressione di iniezione e/o del volume di malta iniettata a tergo del rivestimento definitivo in conci prefabbricati.

### I parametri di controllo dello scavo

Attraverso l'esame dei parametri di controllo dello scavo e dei relativi limiti di soglia e di allarme, si verifica se si sta procedendo in una condizione normale o anomala.

I parametri da verificare attraverso sensori e attrezzature di rilevamento sono i seguenti:

- ◆ valore di pressione di controspinta di sostegno del fronte di scavo (pressione del materiale all'interno della camera di scavo);
- ◆ pressione e volume della malta di intasamento del vuoto anulare compreso tra l'estradosso del rivestimento in conci prefabbricati ed il profilo di scavo;
- ◆ peso del materiale estratto con i relativi valori di attenzione e allarme;
- ◆ verifica periodica della taratura della bilancia impiegata per la misura del peso del materiale estratto dalla coclea, affinché i valori misurati siano sempre attendibili.

L'inizio delle operazioni di scavo è, quindi, subordinato alla verifica di eventuali anomalie meccaniche o elettriche e dei dati sopra menzionati.

Se i parametri di controllo dello scavo raggiungono i valori di allarme, lo scavo stesso deve essere arrestato al fine di poter adottare le relative contromisure; analogamente, se nella fase di intasamento a tergo del rivestimento in conci prefabbricati non si dovessero raggiungere le quantità e/o le pressioni stabilite.

### Lo scavo di avanzamento

In condizioni normali le tre principali operazioni che compongono il ciclo produttivo sono:

- ◆ scavo di avanzamento;
- ◆ montaggio dell'anello di rivestimento in conci prefabbricati;
- ◆ intasamento con malta cementizia a tergo del rivestimento (avviene contemporaneamente allo scavo).



In questa situazione, la sequenza delle operazioni preliminari che l'operatore della TBM pone in essere è la seguente:

- ◆ avviamento dei motori elettrici e delle centraline idrauliche;
- ◆ avviamento dell'impianto per l'iniezione di schiume e/o polimero e/o bentonite direttamente sul fronte di scavo e/o nella camera di scavo e/o nella coclea di estrazione;
- ◆ avviamento della testa fresante fino al raggiungimento della velocità di rotazione prevista;
- ◆ messa in pressione dei cilindri di spinta.



4. I cilindri di spinta in pressione sul rivestimento in conci prefabbricati

Con l'avviamento della coclea di estrazione inizia l'evacuazione controllata del materiale dalla camera di scavo.

Il controllo della portata, che avviene tramite regolazione della velocità di rotazione (generalmente variabile da 0 a 20 rpm per una TBM di diametro fino a 10 m ed in relazione al tipo di terreno attraversato), è finalizzato al mantenimento nella camera di scavo della pressione prevista in progetto per il sostegno del fronte di scavo.

L'operatore regolerà la velocità di estrazione della coclea in funzione della velocità di perforazione della TBM, al fine di mantenere la pressione di progetto sul fronte.

Si impone alla TBM direzione e posizione regolando la pressione sui cilindri di spinta. Il sistema di guida della macchina visualizza in continuo, sia graficamente che numericamente, la posizione della TBM (asse geometrico) in relazione all'asse del tracciato del tunnel.

Il sistema di guida fornisce inoltre la posizione assoluta di un punto in asse posto sulla coda dello scudo e di un punto in asse posto in prossimità della testa di scavo, l'inclinazione verticale e orizzontale dell'asse della TBM (relativamente alla posizione teorica dell'asse), nonché la rotazione dello scudo intorno al proprio asse.

Nello specifico, l'operatore può visualizzare, istante per istante, lo scostamento (verticale ed orizzontale) del centro della testa di scavo dal punto dell'asse teorico della galleria su un piano perpendicolare allo stesso.

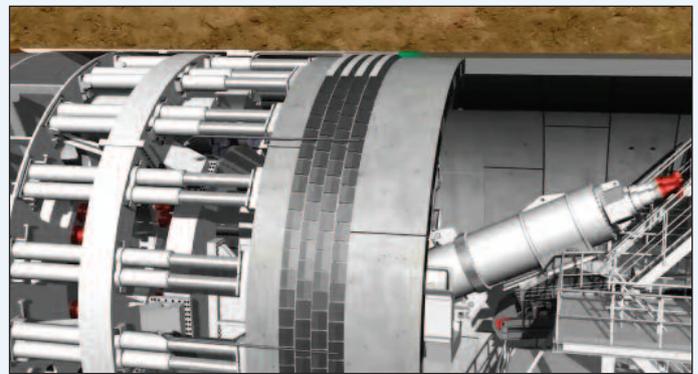
Viene calcolato e visualizzato anche lo scostamento del centro della sezione terminale dello scudo dal centro teorico del tunnel per ogni sezione presa in esame.

In pratica, il sistema di guida visualizza graficamente e numericamente la "tendenza" verticale ed orizzontale della TBM, riferita all'asse teorico, calcolando l'eventuale curva di correzione visualizzando la posizione della TBM relativamente a detta curva.

Nonostante tutte queste informazioni, il controllo dell'asse reale della galleria sarà effettuato mediante periodici rilievi topografici atti a verificare che questo rientri all'interno delle tolleranze stabilite.

## L'intasamento a tergo del rivestimento

Durante l'intera fase di scavo e continuativamente con l'avanzare della TBM, viene iniettata una miscela bicomponente a tergo del rivestimento in conci prefabbricati. Tramite le pompe di iniezione si inietta la miscela attraverso delle linee costituite da tubazioni terminanti, oltre a una serie di spazzole metalliche montate sulla circonferenza dello scudo tra le quali è iniettato con continuità grasso. L'iniezione avviene in corrispondenza dell'estremità dello scudo, direttamente sulla superficie esterna del rivestimento definitivo della galleria. Il controllo dei volumi di malta iniettata a tergo dei conci è fondamentale per il controllo degli assetamenti del terreno in superficie.



5. L'intasamento con malta a tergo del rivestimento definitivo

Il quantitativo di malta iniettata varia in funzione della lunghezza realmente scavata (in genere circa 1,50 m), del tracciato rettilineo o curvilineo, del comportamento del materiale scavato, del consumo dei denti perimetrali montati sulla testa fresante. La variabile più importante può essere il consumo dei denti, che può far variare il consumo teorico di malta; più i denti si consumano e meno consumo teorico di malta si avrà.

A titolo indicativo e per un diametro di scavo della macchina di 9 m (inclusi anche i denti perimetrali), un consumo dei denti di cinque centimetri fa diminuire il consumo teorico di malta di circa 1 m<sup>3</sup> per ogni anello di larghezza 1 m di rivestimento definitivo.

L'iniezione a tergo dei conci prefabbricati si fa usualmente attraverso sei posizioni di iniezione: due poste a ore 12, due a ore 10 e 14 e due a ore 16 e 20.



6. L'area di stoccaggio dei conci prefabbricati

Tubazioni di riserva sono previste in ciascuna posizione nel caso in cui quelle utilizzate normalmente si dovessero ostruire. Il sistema di pompaggio è dotato di una valvola di massima pressione che interrompe il funzionamento della pompa al raggiungimento del valore massimo di sicurezza, mentre non c'è ripresa automatica di pompaggio della malta al calare della pressione.

I valori di pressione minimi e massimi, stabiliti in fase progettuale ed affinati in fase esecutiva, sono disponibili per tratta omogenea e forniti insieme ai valori di pressione di sostegno al fronte. Per l'iniezione della malta di intasamento vengono calcolati e resi disponibili valori di pressione differenziati in funzione della posizione dei punti di iniezione e, quindi, in funzione del carico litostatico ed idraulico (se presente).



7. L'erettore della TBM durante il posizionamento di un concio

### Il rivestimento in conci prefabbricati

Il sistema di guida della TBM è dotato di software che consente di calcolare la posizione ottimale dell'anello da montare, in modo da garantire la corrispondenza dell'asse della galleria all'asse teorico entro le tolleranze di progetto secondo il criterio dell'anello universale.

Il rivestimento definitivo è posto in opera direttamente dalla TBM mediante l'erettore posto all'interno dello scudo. Tale rivestimento, costituito dall'assemblaggio di conci prefabbricati fuori opera svolge le seguenti funzioni:

- ◆ contenimento dei carichi a lungo termine durante la vita dell'opera;
- ◆ contrasto delle azioni transitorie in fase di spinta della macchina;
- ◆ tenuta idraulica;
- ◆ rispetto dell'andamento teorico del tracciato.

La tecnologia generalmente utilizzata detta ad anello universale ha la caratteristica forma dell'anello troncato obliquamente che, non prevedendo pezzi speciali con posizioni prefissate, consente una notevole flessibilità nell'andamento delle differenti condizioni plano-altimetriche del tracciato. Il concetto base sta nella conicità del singolo anello (costituito da più conci) il quale consente, con la scelta di un'opportuna rotazione rispetto a quello già precedentemente installato, di seguire l'andamento del tracciato per successive approssimazioni semplicemente assemblando i diversi anelli nella sequenza di volta in volta più appropriata. Dal punto di vista pratico il tutto si riassume nelle seguenti operazioni:

- ◆ l'operatore inserisce nel computer della TBM i dati che gli consentiranno di valutare la "posizione" con la quale dovrà essere montato l'anello di rivestimento;
- ◆ in output il computer fornisce la posizione del concio di chiave cui corrisponde una data sequenza di montaggio dell'anello;
- ◆ i conci di rivestimento sono posizionati, alla fine dello scavo e secondo la corretta sequenza di montaggio (calcolata dal computer della TBM), attraverso l'erettore;
- ◆ si procede con il montaggio dell'anello con il concio che si trova in posizione opposta alla chiave;



8. Il posizionamento del concio di chiave



- ◆ mediante l'erettore viene agganciato il concio e contemporaneamente vengono retratti i cilindri di spinta in corrispondenza della posizione in cui andrà montato detto concio;
- ◆ il concio è accostato all'anello precedentemente montato nella posizione in cui dovrà essere fissato mediante spinotti di acciaio/bulloni passanti tra anelli consecutivi;
- ◆ i cilindri, precedentemente retratti, vengono riaccostati sul nuovo concio appena montato;
- ◆ con la medesima procedura si esegue il montaggio degli altri conci fissandoli all'anello precedente e tra di loro;
- ◆ come ultimo elemento si monta l'elemento di chiave fissandolo sempre all'anello che lo precede.

## Conclusioni

La possibilità di costruire gallerie in ambiente urbano rappresenta una soluzione estremamente funzionale ai cronici problemi di traffico che affliggono le grandi città. Per far ciò, già dalla fase di realizzazione occorrerà limitare nel tempo l'interruzione del traffico di superficie a causa dei lavori riducendo al minimo le ripercussioni sulla viabilità urbana.

Ciò comporta l'adozione di tecniche meno invasive come lo scavo a foro cieco, che riducono drasticamente l'utilizzo di scavi a cielo aperto annullando, quasi completamente, l'impatto dei cantieri sulla rete viaria.

L'esecuzione dello scavo e le modalità con cui questo viene effettuato generano inevitabilmente dei cedimenti che si propa-

gano anche a grandi distanze e possono avere un impatto a volte anche catastrofico con l'ambiente urbano.

Grazie ai vantaggi offerti dalla meccanizzazione spinta di questi processi costruttivi, è oggi possibile realizzare scavi a piena sezione con TBM-EPB avanzando in condizioni geologico-geotecniche difficili e in presenza di falda conseguendo produzioni in termini di avanzamento eccellenti. ■

*\* Ingegnere esperto in tecniche avanzate di scavo in sotterraneo*

## BIBLIOGRAFIA

- [1]. M. Chiarelli - "L'Arte del costruire gallerie", Editrice Uni Service, Trento, 2009.
- [2]. M. Chiarelli - "Interazione tra gallerie metro e scavi profondi: metodo smartG-DE", "Strade & Autostrade" n° 108, EDI-CEM Srl, Milano.
- [3]. M. Chiarelli - "La costruzione di gallerie in ambiente urbano", "Ingenio" n° 28 e dossier di Geotecnica del 14 Novembre 2014, Imready Srl, RSM.
- [4]. M. Chiarelli - "Tecniche avanzate di scavo in sotterraneo mediante TBM, Microtunneling e Horizontal Directional Drilling", "Ingenio" n° 17, Imready Srl, RSM.
- [5]. M. Chiarelli - "Lo scavo meccanizzato TBM nella realizzazione di Tunnel", atti del Convegno, Fiera Internazionale del Libro, Lingotto Fiere, Torino, 2009.
- [6]. M. Chiarelli - "Le vibrazioni degli edifici indotte dalle ferrovie sotterranee", "Strade & Autostrade" n° 44, EDI-CEM Srl, Milano.



9. Il rivestimento in conci prefabbricati della Linea M4 Milano