

**CONDIZIONAMENTO DI TERRENI A GRANA GROSSA NELLO SCAVO DI
GALLERIE CON TBM-EPB:
IL CASO DELLA LINEA METROPOLITANA M5 DI MILANO**

Diego Sebastiani

Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università di Roma "Sapienza"
ing.diego.sebastiani@gmail.com

Salvatore Miliziano

Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università di Roma "Sapienza"
salvatore.miliziano@uniroma1.it

Enrico Campa

Astaldi spa
e.campa@astaldi.com

Cesare Umiliaco

Astaldi spa
c.umiliaco@astaldi.com

Sommario

Nella nota si analizzano gli effetti dei parametri di condizionamento impiegati durante lo scavo meccanizzato di una tratta della linea metropolitana M5 di Milano, realizzato mediante l'utilizzo di TBM-EPB, sulle performance della macchina. Si tratta dei primi risultati di un più ampio progetto di ricerca che si pone l'obiettivo di individuare i criteri per correlare i parametri che sintetizzano la performance dello scavo associata allo specifico condizionamento con i risultati di appropriate prove di laboratorio eseguite sullo stesso terreno, mediante il sistematico confronto tra i due gruppi di risultati sperimentali. Nel caso in esame le performance dello scavo, rappresentate principalmente dalla velocità di avanzamento e dai valori di coppia impiegati, vengono correlati ai principali parametri di condizionamento (quantità di schiume e di acqua iniettate al fronte) ed individuati i campi di impiego ottimale per i terreni a grana grossa interessati dallo scavo. Interessanti osservazioni sono inoltre riportate sulle modifiche introdotte nel condizionamento al fine di minimizzare gli effetti indotti sull'ambiente circostante.

1. Introduzione

Il progresso delle conoscenze e della tecnologia nell'ambito della realizzazione di gallerie ha visto nel tempo l'affermazione dello scavo meccanizzato mediante l'impiego di TBM (Tunnel Boring Machine). Le TBM consentono l'esecuzione dello scavo, il sostegno del fronte e del cavo, la posa in opera del rivestimento in conci prefabbricati e la rimozione e il trasporto del terreno all'esterno in modo meccanizzato. Si tratta di un sistema di scavo in progressiva evoluzione che oggi è in grado di garantire eccellenti velocità di avanzamento, elevati standard di sicurezza per il personale e ottima capacità di minimizzare gli effetti indotti sull'ambiente circostante. Quest'ultimo aspetto, assieme alla lunghezza generalmente elevata delle opere (che consente l'ammortamento del costo della macchina), rende l'utilizzo delle TBM una scelta quasi obbligata per la realizzazione di gallerie in ambiente urbano. Le TBM-EPB (Earth Pressure Balanced), in particolare, sono sempre più frequentemente impiegate grazie ai differenti contesti geotecnici nei quali possono essere utilizzate (dalle argille alle ghiaie con ciottoli) e alla loro flessibilità di impiego; frequentemente, inoltre, sono preferite alle Slurry Shield (ove impiegabili) in quanto non necessitano degli ingombranti impianti di dissabbiatura della bentonite. La tecnologia EPB prevede la costante applicazione della pressione al fronte mediante

l'utilizzo dello stesso terreno scavato, temporaneamente mantenuto in pressione nella camera di scavo, regolando opportunamente la spinta esercitata dai martinetti, la velocità di rotazione della testa fresante ed i volumi di terreno estratti dalla coclea. Il terreno in camera di scavo viene mantenuto ad una pressione media in grado di bilanciare la pressione dell'acqua di falda e di applicare l'aliquota di tensione efficace orizzontale definita progettualmente. Affinché la terra possa applicare correttamente la pressione al fronte è necessario condizionare il terreno all'interno della camera di scavo mediante l'iniezione al fronte di acqua, schiume e polimeri durante le operazioni di scavo; quando adeguatamente condizionato, il terreno si presenta sottoforma di una pasta morbida e omogenea. Il condizionamento è anche finalizzato a ridurre il peso del terreno presente in camera di scavo e a ridurre l'attrito intergranulare e quello tra il terreno e le parti metalliche della macchina a contatto con il terreno stesso; ciò, infatti, consente di minimizzare l'usura degli utensili, di limitare le temperature e la coppia da applicare alla testa fresante durante l'avanzamento, di ridurre il consumo di energia.

Altri positivi effetti legati al condizionamento del terreno evidenziati da *Quebaud et al., (1998)* sono la riduzione della permeabilità nei terreni a grana grossa, e quindi un miglioramento della gestione di scavi sotto falda minimizzando il rischio di allagamento della TBM e, nei terreni a grana fine, la riduzione della adesività, ovvero della tendenza del terreno ad aderire alle parti metalliche della TBM, con conseguente vantaggio, anche in questo caso, legato alla limitazione di attriti, temperature, sforzi e consumi.

Il presente studio si inserisce in un progetto di ricerca congiunto tra il Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica dell'Università di Roma "Sapienza" e la Società Astaldi, e si pone l'obiettivo di approfondire le conoscenze sul condizionamento mediante il sistematico confronto tra l'analisi dei dati di monitoraggio delle TBM e i risultati provenienti dall'esecuzione di specifiche prove eseguite in laboratorio. Come già evidenziato da diversi autori (tra i quali ad esempio Peña, 2003) queste prove sono particolarmente utili ai fini di una accurata analisi dei fenomeni di interazione tra i terreni a grana grossa e gli agenti condizionanti; inoltre, possono permettere di esplorare le variazioni del comportamento della schiuma a differenti valori di concentrazione C_f e di FER e permettono di acquisire importanti elementi di confronto tra differenti agenti schiumogeni.

La prima sintesi di questa ricerca è oggetto dello studio presentato in questa nota e riguarda l'analisi dei dati di monitoraggio acquisiti durante lo scavo di terreni a grana grossa di una tratta delle gallerie del prolungamento della linea metropolitana M5 di Milano.

2. Il caso di studio: la linea metropolitana M5 di Milano

La linea metropolitana M5 si sviluppa complessivamente per 12.6 km e presenta 19 stazioni; il presente studio fa riferimento alla tratta funzionale compresa tra le stazioni *San Siro* e *Tre Torri*; tale tratta, costituita da due gallerie a singolo binario di circa 3 km di lunghezza, è stata realizzata direttamente da Astaldi mediante scavo meccanizzato con due TBM-EPB gemelle. Le macchine hanno un diametro di 6.70 m e, back-up incluso, una lunghezza di 100 m e un peso di 5300 kN. La potenza installata è pari a 2400 kW.

Il tracciato delle gallerie è caratterizzato da coperture medie di circa 10 m; pertanto, gli scavi hanno interessato esclusivamente la zona più superficiale dei depositi alluvionali quaternari presenti nel sottosuolo di Milano, caratterizzati granulometricamente dalla presenza di ghiaie e sabbie con occasionali lenti limose. I dati analizzati fanno riferimento alle zone in cui lo scavo ha interessato terreni a prevalente grana grossa; inoltre, i dati sono stati suddivisi in due gruppi distinguendo quelli relativi ad un litotipo prevalentemente sabbioso composto mediamente da circa il 50% di sabbia, 32% di ghiaia e il 18% di limo, da quelli relativi ad un litotipo a grana più grossolana (ghiaioso) è mediamente costituito dal 48% di ghiaia e ciottoli, 40% di sabbia e 12% di fino.

Nella tratta oggetto del presente studio la quota della superficie libera della falda si trovava

mediamente alla profondità dell'asse della galleria ad eccezione dei tratti immediatamente precedenti e successivi all'ingresso della stazione "Lotto" in corrispondenza della quale, costituendo il punto di intersezione e scambio con l'esistente linea M1 e trovandosi quindi ad una quota inferiore, ha reso necessario un tratto di discesa precedente e di risalita successivo. I dati relativi a tali tratti, peraltro caratterizzati dalla presenza prevalente di terreni limosi, non sono stati trattati in questa nota.

Per quanto riguarda il sistema di condizionamento, entrambe le TBM-EPB erano equipaggiate con 7 linee di iniezione munite di autonomi generatori di schiuma nei quali veniva fatta confluire aria in pressione e un liquido costituito da acqua premiscelata all'agente condizionante con la concentrazione, C_f , mantenuta costantemente e pari a 2.5%. Durante tutta la durata dello scavo il FER (Foam Expansion Ratio) è stato mantenuto pressoché costante e di valore compreso tra 13 e 15. La configurazione utilizzata durante lo scavo ha previsto l'utilizzo di 2 linee esclusivamente dedicate all'iniezione di acqua e le rimanenti 5 per l'iniezione di schiuma.

I dati sono stati elaborati utilizzando come parametri che definiscono l'intensità del condizionamento il FIR (Foam Injection Ratio) che rappresenta il rapporto percentuale tra il volume di schiuma iniettata e il volume di terreno scavato e w_{agg} (umidità aggiuntiva) che è definita dal rapporto tra il volume di acqua iniettata e il volume di terreno scavato ancora espresso percentualmente.

3. Presentazione e analisi dei dati di monitoraggio

I parametri caratteristici del condizionamento descritti in precedenza sono stati correlati alle performance dello scavo. I parametri impiegati per la valutazione dell'andamento dello scavo sono la velocità di avanzamento, v , la coppia applicata alla testa fresante, M , e la spinta, F , esercitata dai martinetti. A questi parametri, che forniscono una chiara indicazione dello sforzo cui è sottoposta la macchina e, pertanto, dei consumi e dell'usura degli utensili di taglio, è stata aggiunta la differenza di pressione di terra tra la parte superiore e la parte inferiore all'interno della camera di scavo, Δp ; quest'ultimo parametro, infatti, è un indice rappresentativo dell'uniformità della distribuzione delle pressioni di terra applicate al fronte e al suo valore è direttamente correlata l'entità dei cedimenti indotti in superficie (*Anagnostu & Kovari, 1996*).

Il tratto di scavo analizzato è stato suddiviso in segmenti omogenei della lunghezza di alcuni metri in base alle caratteristiche del terreno, ai parametri di scavo e del condizionamento e i risultati sono stati rappresentati sul piano w_{agg} (acqua aggiunta) - FIR (schiuma aggiunta). I dati sperimentali ottenuti per le tratte nelle quali la frazione ghiaiosa è predominante sono riportati in Figura 1a; in Figura 1b sono riportati gli analoghi risultati rilevati per le tratte più francamente sabbiose. I dati sperimentali sono stati rappresentati con simboli differenti e opportunamente raggruppati in base ai valori medi dei 4 parametri v , M , F e Δp individuati per descrivere l'andamento dello scavo.

Per entrambi i litotipi individuati i grafici mostrano l'esistenza di una zona "ottimale" di forma approssimativamente ellittica indicativa dei volumi iniettati di acqua e di schiuma che, con una forza di spinta relativamente modesta, hanno prodotto elevate velocità di avanzamento mantenendo relativamente bassa la coppia applicata alla testa fresante.

In dettaglio, per quanto riguarda il litotipo ghiaioso il condizionamento ottimale va a collocarsi intorno a valori del FIR pari all'80% (70-90%) e dell'acqua aggiunta pari al 3% (2-4%). L'aumento del solo FIR (ottenuto iniettando quindi più schiuma di quella corrispondente all'ottimo), comporta una significativa riduzione della velocità di avanzamento associata all'aumento dei volumi di materiale da estrarre; non si osservano apprezzabili vantaggi nemmeno in termini di coppia, rimasta sostanzialmente invariata, mentre effetti negativi si registrano sul parametro Δp che, probabilmente a causa della presenza di un eccesso di schiuma nella parte alta della camera di scavo e di elementi più grossolani nella parte bassa, tende a peggiorare aumentando il suo valore. Una riduzione della velocità di avanzamento si associa anche ad un aumento prevalente di w_{agg} . In questo caso si osserva una

apprezzabile riduzione della coppia. Infine, la zona caratterizzata da aumenti sia del FIR sia di w_{agg} , allontanandosi dalla zona di ottimo presenta valori progressivamente decrescenti della coppia ma anche della velocità di avanzamento. Si tratta di una situazione nella quale al crescere dei due parametri il terreno condizionato tende a trasformarsi in qualcosa di molto simile ad un liquido; l'eccessiva quantità di schiuma e di acqua additivata non consente di ottenere una pasta omogenea come testimoniato dai valori Δp di eccessivamente elevati; si tratta di un fenomeno verosimilmente legato all'accumulo di materiale grossolano nella parte bassa della camera di scavo.

Sempre nel caso della ghiaia è stata inserita una zona corrispondente a più elevati volumi di acqua immessi rispetto a quelli di ottimo e volumi di schiuma ridotti (Figura 1a). Si osserva una apprezzabile riduzione della velocità di avanzamento associata ad un apprezzabile aumento della coppia; questo risultato indica chiaramente che i benefici effetti della schiuma non possono essere ottenuti con la sola iniezione di acqua.

Considerazioni qualitative del tutto analoghe posso essere fatte analizzando i risultati ottenuti per il litotipo più sabbioso (Figura 1b). In questo caso, la zona ottimale è caratterizzata da valori medi di *FIR* pari al 30% (25-35%) e di w_{agg} pari al 4.5% (3.8-5.3%). La sabbia, pertanto, richiede volumi di schiuma sensibilmente minori rispetto a quelli necessari per ben condizionare la ghiaia e volumi di acqua leggermente maggiori. Si nota, inoltre, che i dati relativi alla ghiaia appaiono maggiormente dispersi rispetto a quelli relativi alla sabbia; ciò suggerisce una maggiore complessità dello scavo e del condizionamento di terreni ghiaiosi rispetto a quanto avviene per le sabbie. La dipendenza dei valori ottimali del condizionamento dalla granulometria è particolarmente chiara. La necessità di maggiori quantità di acqua che è necessario aggiungere al terreno caratterizzato da granulometria più fine è legata alla maggiore superficie specifica e alla funzione dell'acqua di ricoprire la superficie dei granuli in modo da favorire una agevole adesione delle bolle di schiuma. Una volta ricoperto con un velo d'acqua la superficie dei granuli, la quantità di schiuma necessaria ad ottimizzare il trattamento cresce sensibilmente all'aumentare della dimensione dei granuli.

In Figura 1b, infine, è riportata una nuvola di dati sperimentali (crocette) che si colloca a destra e in alto in corrispondenza di elevati valori di w_{agg} e di *FIR*. Si tratta di dati di gestione della macchina in corrispondenza dell'interferenza con un edificio particolarmente sensibile ai cedimenti, che si discostano sensibilmente dall'area in cui la gestione dello scavo è ottimale. In questo caso, essendo lo scopo principale quello di mantenere una corretta applicazione delle pressioni al fronte per minimizzare i cedimenti, alla produzione si è anteposta la corretta applicazione della pressione al fronte, facendo lavorare la macchina sotto sforzo. Si può osservare dai valori dei parametri macchina riportati in figura che lo scavo è stato eseguito aumentando sensibilmente la spinta dei martinetti (da valori ordinari di circa 20 000 kN a quasi 30 000 kN), cui si associa una coppia di poco superiore ai 5 MNm prossima al limite del consentito dalle caratteristiche della TBM impiegata, (sensibilmente maggiore rispetto all'ordinario: 4.5 MNm), a fronte di volumi di schiuma e di acqua iniettati più che doppi rispetto a quelli corrispondenti all'ottimo. Come già accennato in precedenza, l'obiettivo perseguito in questa tratta è stato quello di limitare gli spostamenti indotti in superficie gestendo il tutto in modo da ottenere un valore di differenza di pressione in camera di scavo pari 0.62 bar sensibilmente più basso rispetto ai valori registrati nelle altre tratte in sabbia (0.95-1.17 bar). Valori dell'ordine di 0.6 bar, infatti, tenuto conto della differenza di quota tra le coppie di sensori alti e quelli bassi e tenuto conto del peso di volume del terreno condizionato in camera di scavo, sono in grado di garantire un andamento regolarmente crescente con la profondità della pressione agente sul fronte di scavo.

4. Conclusioni e futuri sviluppi

La tecnologia TBM-EPB è attualmente il sistema di scavo più frequentemente utilizzato in ambiente urbano per lo scavo di gallerie in terra. Le performance delle EPB dipendono in maniera decisiva dalla

gestione del condizionamento del terreno durante le fasi di scavo. La possibilità di correlare le caratteristiche geotecniche dei terreni alle modalità di gestione ottimale del condizionamento costituisce elemento importante in fase di progettazione dei lavori, per poter prevedere i consumi di agenti schiumogeni, l'usura degli utensili, le performance della TBM ed, eventualmente, per poter fornire elementi utili ad effettuare una scelta ragionata dell'agente schiumogeno più adatto.

Tale possibilità è importante anche in fase di esecuzione dei lavori al fine ridurre la durata della fase iniziale di apprendimento e dei rischi legati ad una cattiva gestione del condizionamento. Infine, avere elementi oggettivi di valutazione del condizionamento rispetto alle performance della TBM è elemento d'interesse anche per i produttori di agenti schiumogeni interessati a testare e migliorare determinate caratteristiche dei propri prodotti.

Il presente studio si inserisce in un progetto di ricerca congiunto tra il Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica dell'Università di Roma "Sapienza" e la Società Astaldi, e si pone l'obiettivo di approfondire le conoscenze sul condizionamento mediante il sistematico confronto tra l'analisi dei dati di monitoraggio delle TBM e i risultati provenienti dall'esecuzione di specifiche prove eseguite in laboratorio. La prima sintesi di questa ricerca è oggetto dello studio presentato in questa nota e riguarda l'analisi dei dati di monitoraggio acquisiti durante lo scavo di terreni a grana grossa della tratta compresa tra le stazioni *San Siro* e *Tre Torri* del prolungamento della linea metropolitana M5 di Milano. L'analisi dei dati di scavo ha consentito di individuare i campi di variazione dei valori numerici parametri FIR e w_{agg} , che consentono un condizionamento ottimale, evidenziando le marcate modifiche che è necessario apportare passando da terreni prevalentemente ghiaiosi a terreni francamente sabbiosi. L'analisi dei risultati ha anche consentito di evidenziare come si modificano le performance della macchina modificando i parametri di condizionamento al di fuori del campo di ottimo. Interessanti osservazioni sono state inoltre riportate sulle modifiche introdotte nel condizionamento al fine di minimizzare gli effetti indotti sull'ambiente circostante.

Come sottolineato in precedenza, un passo ulteriore rispetto ai risultati presentati in questa nota sarà rappresentato dall'esecuzione di specifiche prove di laboratorio sugli stessi terreni. Il confronto con quanto sperimentato in cantiere permetterà di valutare le differenze introdotte nello scavo a grandezza naturale dalle disomogeneità del materiale, dalle parti meccaniche della TBM e dalla componente umana relativa alla conduzione dello scavo.

Appare infine opportuno approfondire lo studio degli agenti condizionanti anche dal punto di vista chimico e di compatibilità ambientale essendo il tema della gestione dei terreni di scavo di particolare importanza nell'economia complessiva del progetto di gallerie con TBM-EPB.

Bibliografia

- Quebaud S., Sibai M. and Henry J.P. (1998). Use of chemical foam for improvements in drilling by earth pressure balanced shields in granular soils. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.13, pp.73-80.
- Peña, M. (2003). Soil conditioning for sands. *Tunnels and Tunnelling International*, July, pp. 40-42.
- Anagnostou, G. and Kovari, K. (1996). Face stability conditions with Earth-pressure-balanced Shields. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.11, pp.165-173.

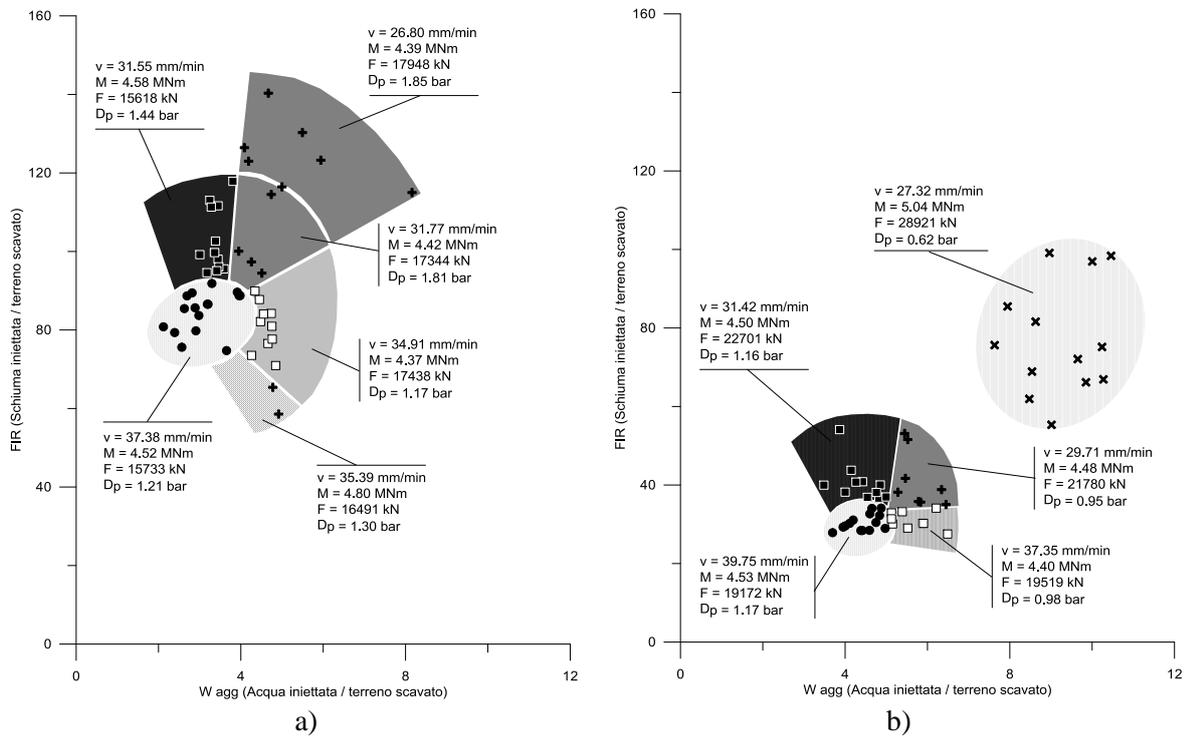


Fig 1. Relazione tra parametri caratteristici del condizionamento e performance della TBM nei tratti di scavo in ghiaia (a) e sabbia (b).