



Lo scavo e l'avanzamento meccanizzato a piena sezione per la costruzione di gallerie per opere infrastrutturali

Dott. Ingg. Norbert CASAGRANDE^(*), Andrea PIGORINI^(**)

1. Cenni storici

La costruzione di gallerie per opere infrastrutturali in Europa ha avuto un forte incremento a partire dalla seconda metà dell'800, determinato soprattutto dallo sviluppo del trasporto ferroviario che richiedeva la necessità di superare i rilievi montuosi, in particolare quelli alpini, con tunnel profondi e lunghi. Tra gli anni '50 e '75 del XIX secolo si assiste a due importanti innovazioni della tecnologia di scavo che consentiranno la realizzazione dei primi valichi alpini e apriranno la strada alla costruzione di gallerie profonde e lunghe. La prima si attua nella costruzione del primo traforo alpino, la galleria a doppio binario del Frejus (1857-71) di 12,2 km, con l'invenzione, da parte dell'italiano G. SOMMELIER, di un carrello dotato di perforatrici ad aria compressa, consentendo quindi la meccanizzazione dello scavo dei fori per l'esplosivo con enorme riduzione, per quell'epoca, dei tempi di realizzazione. La seconda innovazione riguarda la sostituzione della polvere nera con la dinamite, inventata dallo svedese A. NOBEL nel 1875, che fu utilizzata nella costruzione della galleria a doppio binario del S. GOTTARDO (1872-82) di 15 km ca., la cui azione di frantumazione, diversamente dall'azione di spinta della polvere di sparo, risulta più idonea all'abbattimento delle rocce. In quel periodo si sviluppa anche il concetto di eseguire lo scavo integrale per mezzo di una macchina. L'idea della prima macchina di scavo integrale viene sviluppata dall'americano C. WILSON nel 1851 (fig. 1), ma l'applicazione pratica nel 1853 non ebbe successo. Seguirono altri sviluppi e tentativi tra cui quello dell'americano TALBOT nel 1853 (fig. 2), che anticipa il concetto di scavo a piena sezione con testa ruotante armata di picchi.

Nel 1881 gli ufficiali inglesi BEAUMONT e ENGLISH brevettarono e realizzarono una macchina (figg. 3 e 4), per lo scavo di un cunicolo pilota sotto la Manica ad azionamento a vapore. Le due macchine del diametro di 2,13 m

realizzarono 1840 m di galleria sul versante francese e 1850 m sul versante inglese, con punte massime di produzione giornaliera di 25 m; poi i lavori furono interrotti per motivi di sicurezza sollevati dai militari britannici.

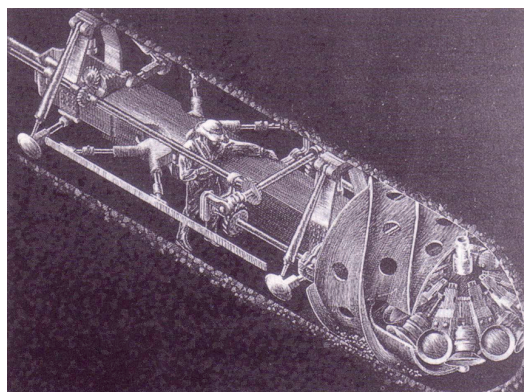


Fig. 1 da [6] – Prima macchina fresante brevettata da C. WILSON per il Tunnel Hoosac (USA) 1853.

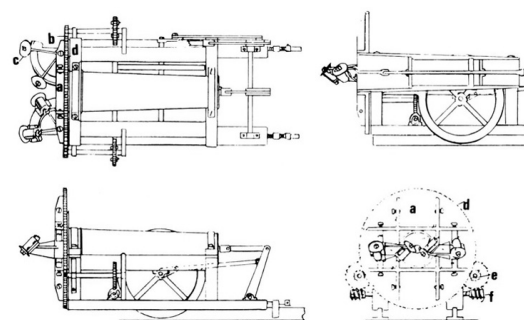


Fig. 2 da [6] – Macchina di scavo non scudata con testa fresante a piena sezione brevettata da E. TALBOT 1853.

Il primo scudo a piena sezione a scavo manuale per affrontare terreni in falda fu ideato da Lord BRUNNEL (fig. 5), ed impiegato per la costruzione della prima galleria sotto il Tamigi. I lavori furono eseguiti con grandi difficoltà tra

(*) Italferr – Direzione Tecnica, U.O. Gallerie, Capo Settore Progetti Scavo Meccanizzato.

(**) Italferr – Direzione Tecnica, Responsabile U.O. Gallerie.

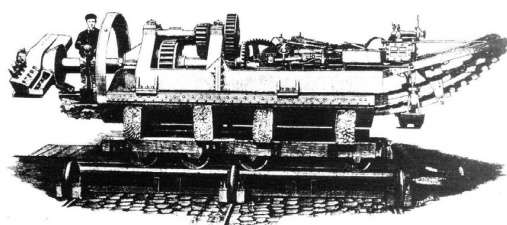


Fig. 3 da [6] - Macchina di BEAUMONT/ENGLISH per lo scavo del cunicolo pilota sotto la Manica, 1882.

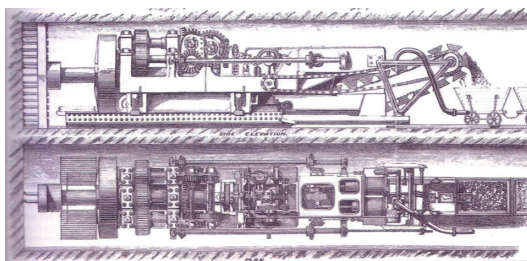


Fig. 4 - Macchina di BEAUMONT/ENGLISH, profilo e pianta.

il 1825-28 e 1835-43 per le numerose venute d'acqua (fig. 6) che causarono gravi allagamenti in galleria. Già allora un collaboratore di BRUNNEL, l'ing. CALLODAN, propose di installare un sistema ad aria compressa per contrastare le venute d'acqua, sistema che BRUNNEL tuttavia rifiutò. Lo scudo a sezione rettangolare consisteva di una struttura metallica con 36 camere di lavoro in avanzamento, distribuite su 3 piani nelle quali lavoravano 36 minatori. Il fronte veniva brandato con tavole di legno contrastate da puntoni. Il sistema di scavo prevedeva, per ciascuna cella di lavoro, l'asportazione di una tavola per volta e lo scavo per una profondità di 6 pollici, quindi di nuovo la chiusura del fronte e l'asportazione della tavola successiva fino a realizzare lo scavo di avanzamento di tutta la cella. L'avanzamento dello scudo avveniva con dei martinetti a vite posti in corrispondenza delle celle che, poggiando direttamente sulla muratura di rivestimento realizzata subito a tergo, per contrasto lo spingevano avanti.

Nel 1869 l'ing. GREATHEAD utilizzò per lo scavo manuale di una galleria pedonale di 400 m di lunghezza sotto il Tamigi, una macchina scudata circolare del diametro di 2,18 m. Il rivestimento era costituito da elementi prefabbricati in ghisa. Lo scavo nelle argille londinesi fu eseguito senza alcuna difficoltà. Questo scudo è considerato l'antesignano delle macchine scudate aperte e sino all'inizio del XX secolo la maggior parte degli scudi a scavo manuale furono costruiti secondo il concetto dello scudo di GREATHEAD. La foto 1 mostra uno dei due scudi di GREATHEAD, del diametro di 9,35 m, utilizzato per la costruzione della galleria Rotherhithe in Inghilterra (1904-1908).

Il primo vero scudo meccanizzato fu brevettato dagli inglesi J. BRUNTON e G. BRUNTON (1876) e costituì il concetto base per il successivo sviluppo di tali macchine (fig. 7).

La prima applicazione sul campo risale al 1897 con lo scudo di PRICE (figg. 8 e 9). La macchina del diametro di 3,87 m fu utilizzata per la costruzione di gallerie nelle argille di Londra. Questa macchina fu la prima a montare una testa fresante a piena sezione, costituita da 6 bracci sui quali erano installati gli utensili di scavo. All'estremità dei bracci erano installati dei raccoglitori a cucchiaio per la raccolta del terreno che, attraverso uno scivolo collocato dietro la testa fresante, cadeva nei carrelli (foto 2). Nel 1906 PRICE migliorò la macchina che ebbe un gran successo. Su 52 km di gallerie metropolitane ben 19 furono realizzati con questo tipo di scudo. La velocità media di avanzamento giornaliero passò dagli iniziali 3 m ai 9 m.

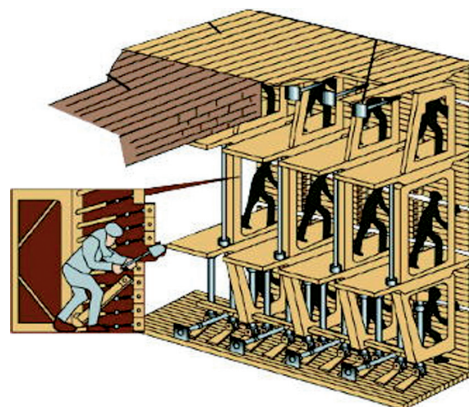


Fig. 5 da [7] - Scudo di Lord M.I. BRUNNEL 1825-43.

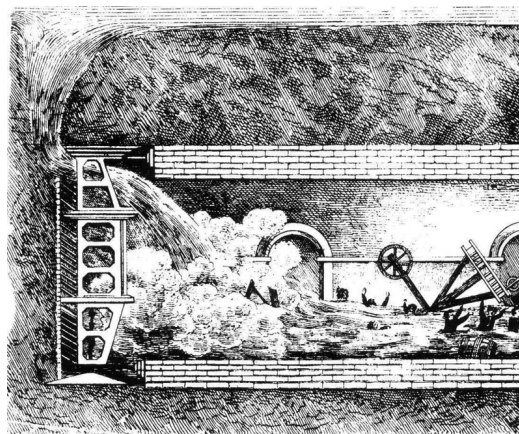


Fig. 6 da [7] - Entrata di acqua durante lo scavo sotto il Tamigi 12.01.1828.

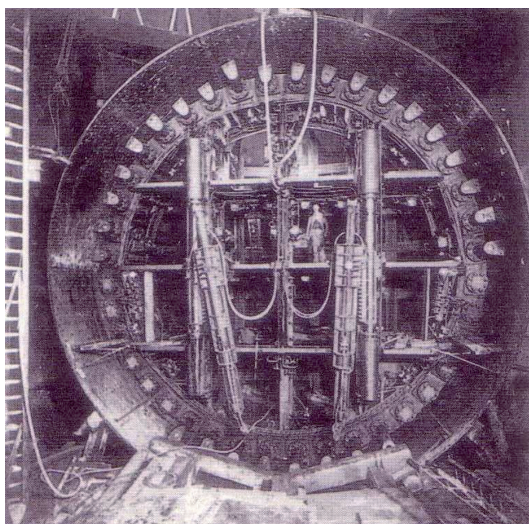


Foto 1 da [7] – Scudo di GREATHEAD ROTHERHITHE tunnel 1904/08.

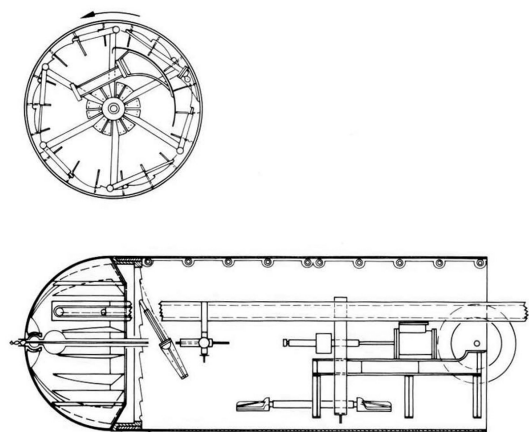


Fig. 7 da [7] – Scudo meccanizzato brevettato da J. BRUNTON e G. BRUNTON 1876.

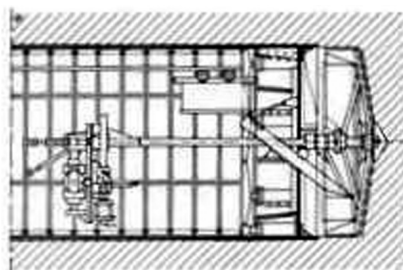


Fig. 8 da [7] – Scudo meccanizzato di PRICE.

Lo studio di tecnologie che permettessero lo scavo in terreni sciolti in falda furono affrontati già verso la fine dell'800. Nel 1874 GREATHEAD brevettò lo scudo con il sostegno idraulico del fronte (fig.10) e un altro modello fu brevettato da HAAG nel 1896 (fig.11).

Tuttavia passò quasi un secolo prima che l'idea trovasse applicazione sul campo. Nel 1967 in Giappone fu impiegato per la prima volta uno scudo a fanghi bentonitici (Slurry) del diametro di 3,35 m per il sostegno attivo del fronte.

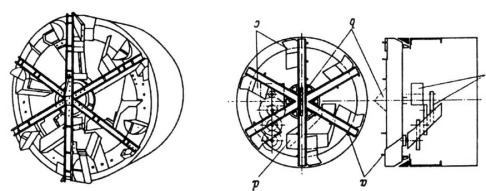


Fig. 9 da [5] – Scudo meccanizzato di PRICE.

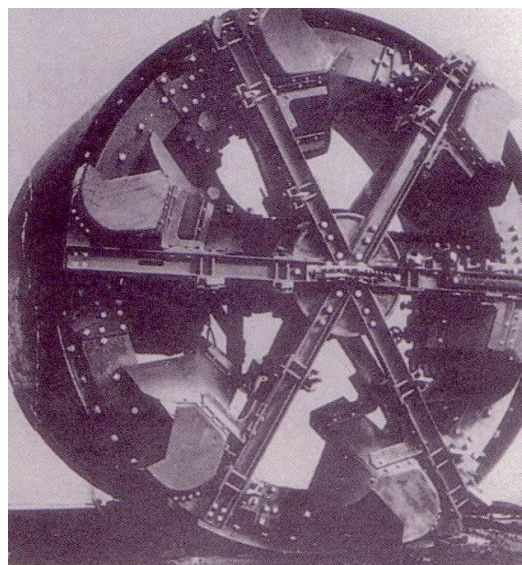


Foto 2 da [7] – Scudo meccanizzato di PRICE 1902.

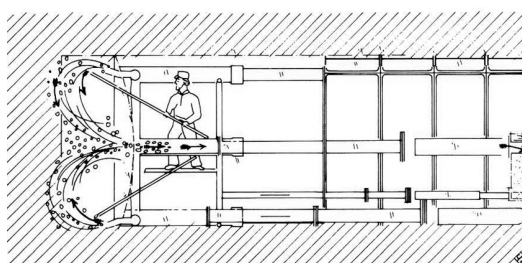


Fig. 10 da [7] – Scudo con sostegno idraulico del fronte brevettato da GREATHEAD 1874.

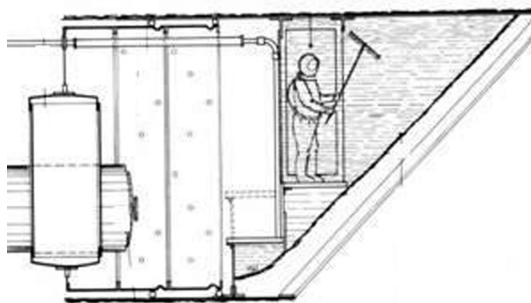


Fig. 11 da [7] – Scudo con sostegno idraulico del fronte brevettato da HAAG 1896.

Nel 1884, per la costruzione della galleria ferroviaria St. Claire di 1,83 km tra Sarnia (Ontario, Canada) e Port Huron (Michigan, USA), fu utilizzato il primo scudo ad aria compressa (fig.12 - diametro di 6,55 m) per contrastare le venute d'acqua. L'avanzamento giornaliero medio dello scudo, che montava un rivestimento in elementi prefabbricati in ghisa, fu dell'ordine di 5,8 m.

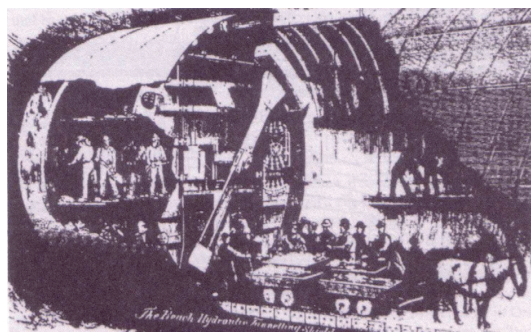


Fig. 12 da [5] – Galleria ferroviaria St. Clair tra Sarnia (Ontario, Canada) e Port Huron (Michigan, USA) 1884-91.

Fu però verso la metà degli anni '50 che James ROBBINS (Seattle) contribuì in maniera determinante all'evoluzione delle macchine di scavo a piena sezione, aumentandone dimensioni e prestazioni, sviluppando in particolare utensili di taglio circolari (cutters) molto più resistenti rispetto a quelli sino ad allora utilizzati. Nel 1955 utilizzerà due frese scudate da roccia di diametro rispettivamente pari a 7,86 e 9,00 m per la realizzazione della centrale idroelettrica Oahe nel Suddakota (foto 3), dando praticamente l'avvio all'impiego su scala industriale dello scavo meccanizzato integrale a piena sezione. Queste macchine ebbero un buon successo con produzioni medie giornaliere rispettivamente di 15 m/g e 12 m/g.

Da allora il progressivo sviluppo tecnologico e progettuale ha contribuito alla realizzazione di macchine, Tunneling Machines (TMs), di diverso tipo adatte alle più diverse geologie e condizioni al contorno, proponendone

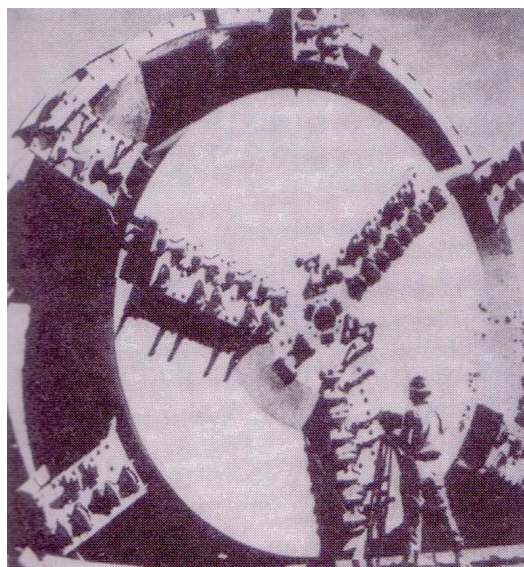


Foto 3 da [6] – Prima macchina ROBBINS, modello 910-101 Oahe - Damm (USA) Ø 7,86 m, 1953.

l'impiego per tutti i tipi di gallerie, dai microtunnel alle gallerie idrauliche, metropolitane, ferroviarie e stradali.

2. Ragioni dello sviluppo

Lo scavo meccanizzato ha subito, a partire dagli anni '70, un forte sviluppo che è andato di pari passo con l'evoluzione di macchine di diametro sempre più grande, più sofisticate ed affidabili, in grado di affrontare lunghe tratte e situazioni geologiche differenti. Parallelamente si sono sviluppati nuovi tipi di rivestimento della galleria mediante la posa in opera di elementi prefabbricati provvisori o definitivi.

Le ragioni dello sviluppo si possono così sintetizzare:

- maggior grado di meccanizzazione con risparmio di mano d'opera e di tempo;
- riduzione dei tempi di costruzione delle opere per le elevate prestazioni rispetto al metodo di scavo convenzionale;
- industrializzazione del processo che permette previsioni più certe in termini di tempi e costi costruttivi;
- migliori condizioni di lavoro e di sicurezza;
- precisione del profilo di scavo;
- minimo disturbo del terreno o roccia circostante la cavità;
- limitazione dei cedimenti indotti dallo scavo in ambito urbano;

- alta qualità di costruzione rappresentata dal rivestimento prefabbricato;
- maggiore longevità della cavità.

3. Limitazioni

Tuttavia lo scavo meccanizzato a piena sezione è un sistema rigido che presenta, rispetto allo scavo tradizionale, delle limitazioni, la principale delle quali è determinata dalla eterogeneità fisica e geotecnica dei materiali attraversati; non presenta cioè possibilità di adattamento a variazioni di sezione e di caratteristiche della roccia. Il sistema presuppone pertanto studi quanto mai accurati dell'ammasso da scavare e ciò non sempre è possibile per gallerie profonde e lunghe, difficili da indagare, in formazioni geologiche complesse. L'impiego di tale tecnica, nonostante l'ampliamento del campo di applicazione entro una certa gamma di terreni, deve essere attentamente valutato in presenza di ammassi dalle caratteristiche eterogenee al fine di non aumentare i rischi connessi con le situazioni impreviste che comportano ritardi e aumento dei costi. Altri svantaggi sono:

- necessità di tempi relativamente lunghi per la progettazione, costruzione e montaggio in cantiere stimabili in circa 12-15 mesi per macchine nuove, in relazione alla tipologia di macchina e alle dimensioni del diametro di scavo;
- difficoltà per l'eventuale successivo riutilizzo della stessa macchina per diametri differenti se non a costi elevati ammortizzabili per tratte relativamente lunghe;
- alti costi di investimento ammortizzabili su lunghe gallerie o comunque su successivi riutilizzi certi. Si può ragionevolmente affermare che l'impiego di una macchina fresante scudata è economicamente sensato a partire da lunghezze superiori a 2 km, salvo casi specifici o particolari legati alle condizioni al contorno e geotecniche.

4. Sviluppo della tecnologia

La macchina di scavo a piena sezione, versatile e universale, in grado di poter operare in contesti geologici e geotecnici differenti, vale a dire in qualunque tipo di terreno e roccia, resta per il momento ancora un miraggio. Generalmente vengono realizzate tipologie di macchine adatte per affrontare specifiche situazioni geologiche, idrogeologiche, geotecniche ed ambientali (condizioni al contorno). Tuttavia per rendere più flessibile l'impiego delle macchine in scenari geologici-geotecnici non omogenei e il riutilizzo in gallerie di dimensioni diverse, la tecnologia si è sviluppata su:

- ampliamento del campo di applicazione delle macchine scudate entro una certa gamma di terreni (macchine combinate o polyshield);

- reimpiego entro una certa gamma di diametri prevedendo, già in fase di progettazione della macchina, la possibilità di effettuare trasformazioni future a costi accettabili mediante sostituzione di alcuni componenti per renderla utilizzabile in condizioni e dimensioni differenti.

Il progresso tecnologico ha poi interessato lo sviluppo di utensili da taglio (foto 4) per lo scavo in rocce molto dure, aumentando sia il diametro dei dischi taglienti o cutters (sino a 43 cm o 19") che la spinta massima sui cutters stessi (sino a 300 KN per taglienti da 19") incrementando quindi l'efficienza dello scavo e le produzioni. Attualmente il progresso tecnologico dei cutters si è temporaneamente fermato in quanto la pressione specifica esercitata dai taglienti ha raggiunto i limiti di resistenza dei materiali con cui sono costruiti gli utensili. All'aumento della spinta applicata è corrisposto anche l'aumento della potenza installata sulla testa fresante e quindi l'impiego di organi meccanici principali (cuscinetti e corone) di dimensioni più grandi, robusti e duraturi.

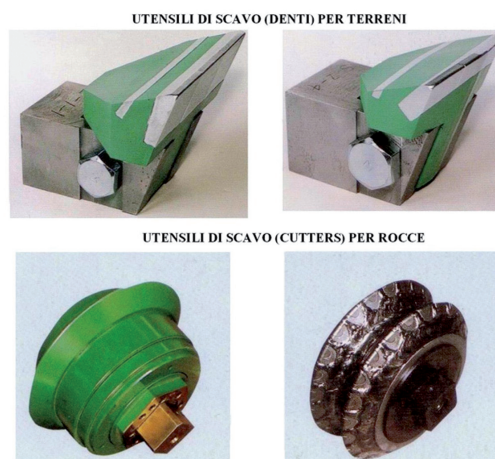
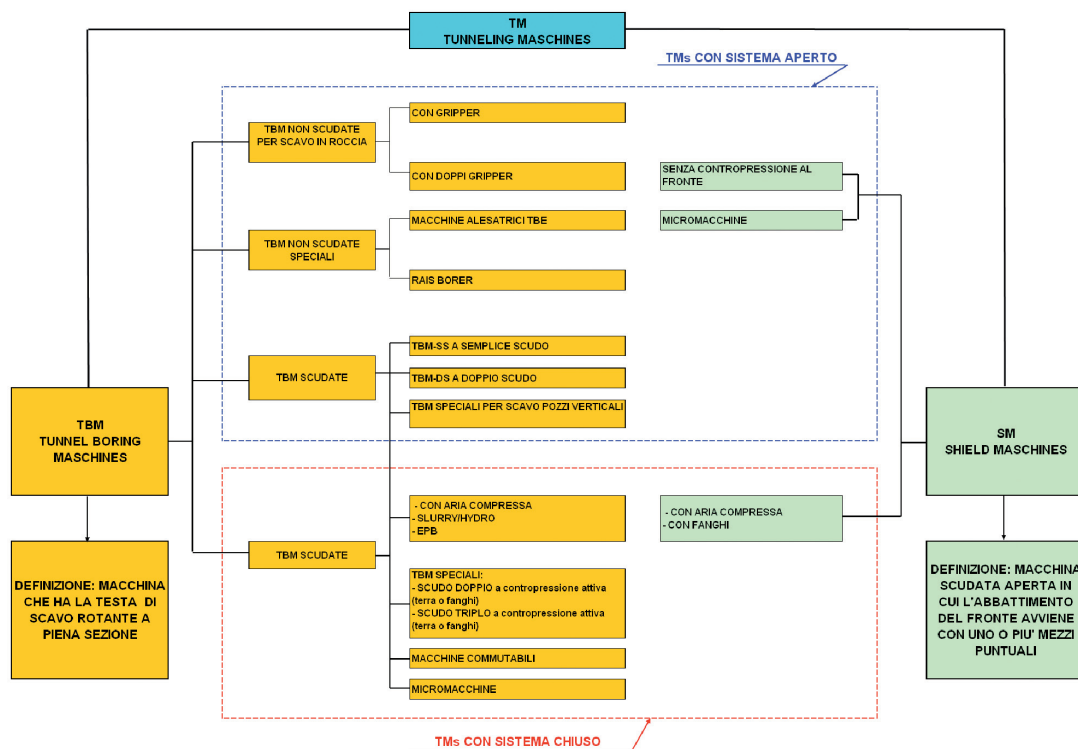


Foto 4 – Tipologia di utensili di scavo.

Di pari passo allo sviluppo delle macchine di scavo si sono sviluppati sia sistemi innovativi di rivestimento della galleria, compatibili con i diversi tipi di macchine, che sistemi di trasporto dello smarino più efficienti (nastri trasportatori, per via idraulica etc.).

5. Principali tipologie di macchine

Nell'ambito della comunità tecnico-scientifica internazionale non esiste ancora una classificazione delle Tunneling Machines (TMs), macchine per lo scavo integrale a piena sezione delle gallerie, tuttavia il gruppo di lavoro dell'ITA/AITES (International Tunneling Association) si sta adoperando da qualche anno in tal senso.



Schema 1 – Schema classificativo tunneling machines.

I paesi che tradizionalmente vantano le principali industrie per la costruzione di tali macchine e una ampia esperienza di scavo di gallerie con il metodo meccanizzato, sia in terreno sciolto che in roccia, hanno adottato ciascuno una propria suddivisione.

Per esempio la JTA (Japan Tunneling Association) suddivide le TMs sulla modalità di scavo a sezione intera o parziale. Un'ulteriore suddivisione deriva dalla presenza o meno di una testa di scavo rotante e del sistema di contrasto per conseguire l'avanzamento (grippers o martinetti longitudinali).

Le associazioni tedesca (DAUB), svizzera (FGU) ed austriaca (OGC) suddividono le TMs sulla base della tipologia di terreno da scavare.

Infine la AFTES (Association Francaise des Travaux en Souterrain) classifica le TMs sulla tipologia di supporto che la macchina è in grado di fornire; si distinguono pertanto le TMs che non contrastano né il fronte né la cavità di scavo (macchine aperte), le TMs che contrastano la cavità di scavo (macchine scudate), e le TMs che contrastano sia la cavità che il fronte di scavo (macchine scudate a contropressione).

Lo schema 1 riporta sinteticamente le varie tipologie di TMs ed è stato ottenuto tenendo conto delle diverse classificazioni sopra citate, senza tuttavia pretendere di fornire una classificazione vera e propria. Lo scopo è semplicemente quello di fornire un'idea sull'ampia gamma di TMs, suddividendole per famiglie tipologiche in relazione al campo d'impiego previsto (condizioni geologiche e caratteristiche geotecniche-geomeccaniche, condizioni progettuali) e descrivendo sinteticamente la loro costituzione ed i principi operativi di funzionamento.

5.1. Terminologia e costituzione delle Tunneling Machines TMs

Con il termine Tunneling Machines (TMs) si intende l'insieme di tutte le macchine per lo scavo a piena sezione di gallerie.

In linea di principio le TMs sono costituite dalle seguenti parti essenziali:

- un sistema di abbattimento meccanico del fronte di scavo;

- un sistema di propulsione e guida per fare avanzare la macchina;
- un sistema per lo sgombero ed allontanamento del materiale di scavo;
- un sistema per realizzare il sostegno immediato dello scavo (rivestimento) che tuttavia può non essere adottato se le buone caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso da attraversare lo permettono (macchine aperte per rocce dure).

5.2. Principali suddivisioni delle TMs

Una possibile suddivisione delle TMs può essere fatta sulla base dei seguenti criteri:

- 1) distinzione del sistema di scavo e abbattimento meccanico del fronte;
- 2) distinzione tra macchine a sistema aperto e macchine a sistema chiuso;
- 3) distinzione tra macchine scudate e non scudate;
- 4) distinzione tra macchine per lo scavo in roccia e nei terreni.

1) *Nel primo caso si distinguono le TBMs (Tunnel Boring Machines) dalle SMs (Shield Machines)*

- le TBMs sono macchine dotate di una testa rotante di scavo a piena sezione. L'avanzamento avviene con un sistema che può essere costituito o da grippers espansi contro la parete di scavo (foto 5), o da martinetti longitudinali che si appoggiano sul rivestimento appena montato, che per contrasto spingono la macchina in avanti. Nel primo caso sono sprovviste di scudo o dotate di tettuccio protettivo di alcune parti della macchina e quindi non è prevista l'immediata posa del rivestimento. Sono macchine che scavano esclusivamente in roccia di consistenza medio-alta. Nel secondo caso invece (foto 6) sono dotate di scudo cilindrico protettivo e necessitano per l'avanzamento del rivestimento su cui si appoggiano i martinetti per effettuare la spinta. Queste macchine possono scavare sia in roccia, di consistenza media-bassa, o in terreno soffice. In presenza di terreno scadente e falda esistono tipo-



Foto 5 – TBM aperta con due coppie di gripper.

logie di TBMs scudate configurate per contrastare il fronte con una contropressione attiva (aria compressa, fanghi o terra).



Foto 6 – TBM scudata da roccia.

- le SMs sono macchine scudate in cui l'abbattimento del fronte e lo scavo avviene con l'impiego di uno o più mezzi puntuali (foto7), operano in rocce tenere, in terreni coerenti e parzialmente coerenti in assenza di falda. L'avanzamento in questo caso è consentito solo con martinetti longitudinali che si poggiano sul rivestimento posto in opera dalla macchina stessa e per contrasto la spingono in avanti.



Foto 7 – SM a sistema aperto con fresa ad attacco puntuale.

In presenza di terreni scadenti con limitata capacità di autosostegno e falda esistono tipologie di SMs configurate per realizzare un sostegno attivo del fronte (con aria compressa o fanghi o terra).

Una tipologia di macchina a parte è rappresentata dalla fresa ad attacco puntuale montata su un carrello cingo-

lato (fig.13). Lo scavo viene eseguito a mezzo di una testa rotante, montata su un braccio, sulla cui superficie sono assemblati utensili di forma conica chiamati picchi per l'abbattimento puntuale del fronte. A seconda del tipo di testa fresante e di picco può scavare nei terreni coesivi (argille), nelle rocce tenere e dure (sino a 150-200 MPa). La macchina è strutturata in modo da effettuare sia lo scavo meccanico della roccia, sia la rimozione del materiale scavato, sollevandolo meccanicamente e quindi caricandolo, mediante trasportatori continui, sui mezzi di trasporto. Rispetto alle precedenti tipologie di macchine, la fresa puntuale cingolata è un mezzo di scavo più flessibile in quanto, qualora si dovessero attraversare zone critiche per le quali risultasse necessario l'impiego di tecniche tradizionali di consolidamento ed avanzamento, rapidamente e facilmente si può allontanarla dal fronte e passare alla tecnica di scavo in tradizionale e altrettanto rapidamente riportarla al fronte al termine dell'intervento. La fresa puntuale offre inoltre la possibilità di adattamento alle variazioni di sezione del profilo di scavo, può lavorare su sezioni parziali o a tutta sezione. Tuttavia la sua applicazione è limitata per scavi di diametro sino a 6-7 metri. La produttività è in genere inferiore rispetto alle TBMs e all'avanzamento con l'esplosivo.

2) Macchine a sistema aperto e macchine a sistema chiuso

Le prime sono tutte quelle macchine che non applicano una contropressione attiva sul fronte e che quindi non sono isolate dal mezzo da scavare. Possono essere sprovviste o dotate di scudo (in questo ultimo caso il confinamento rispetto al mezzo da scavare è parziale e riguarda solo il contorno del cavo). In questa categoria rientrano sia alcune TBMs che alcune SMs, il loro campo di applicazione varia dalle rocce dure ai terreni coesivi (argille).

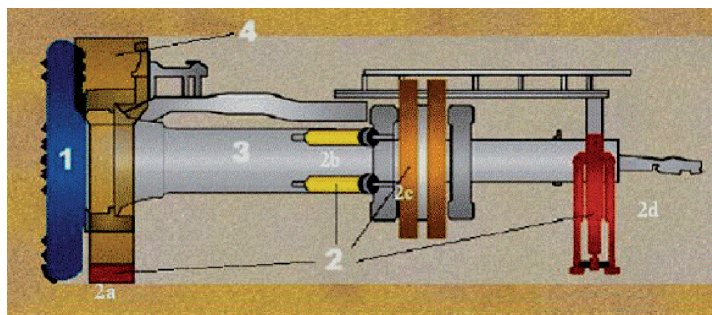


Fig. 14 - 1. Testa fresante - 2a. Scarpa di scorrimento - 2b. Pistoni di spinta - 2c. Gripper - 2d. Sostegno posteriore - 3. Sistema trasporto materiale - 4. Tettuccio di protezione.

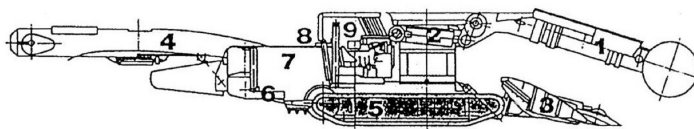


Fig. 13 - 1. Braccio fresatore - 2. Meccanismo di orientamento - 3. Attrezzatura di carico - 4. Trasportatore a catena - 5. Carrello cingolato - 6. Telaio - 7. Apparato elettrico - 8. Apparato idraulico - 9. Posto di guida.

Nella seconda categoria rientrano tutte le TBMs scudate (sia TBMs che SMs) a confinamento totale rispetto al mezzo in cui devono scavare e che esercitano una contropressione attiva al fronte (area tratteggiata in rosso dello schema). Il loro campo di applicazione è generalmente quello dei terreni incoerenti in falda. Tuttavia lo sviluppo della tecnologia ha consentito di realizzare TBMs, chiamate Mixshield, Polyshield o frese commutabili, in grado di operare, pur con dei limiti, anche in presenza di alternanze di ammassi rocciosi da buoni a scadenti e in terreni sotfofaldati.

3) Macchine non scudate e macchine scudate

• Macchine non scudate

Appartengono a questa famiglia solo le TBMs aperte, cioè sprovviste di scudo. L'avanzamento avviene utilizzando la reazione di grippers espansi contro le pareti in roccia dello scavo (fig.14).

Queste macchine sono costituite essenzialmente da:

- una testa fresante armata con cutters;
- un sistema principale di trasporto dell'abbattuto;
- un elemento di contrasto stazionario denominato gripper;
- un elemento traslante costituito da una trave di appoggio e da cilindri di spinta assiali;
- una serie di carri trainati, chiamata back-up, che contiene tutte le attrezzature ausiliarie (impianti elettrico, oleodinamico, di raffreddamento, di depolverizzazione, pompe, nastro trasportatore secondario, eventuale erettore di centine, sistema di gunitura del cavo, bullonatrice etc.).

Il ciclo di lavoro è discontinuo e comprende:

- scavo e avanzamento per una lunghezza pari alla corsa effettiva dei pistoni; contemporaneamente si effettua l'allontanamento del materiale abbattuto;

- riposizionamento dei gripper;
- ripresa dell'avanzamento.

Nella fig.15 è rappresentato schematicamente il ciclo di lavoro di una fresa con doppi gripper.

• Macchine scudate

Il campo di applicazione è molto ampio, dalla roccia dura ai terreni instabili sotto falda.

Si distinguono in macchine monoscudate e doppie scudate.

Monoscudate

Sono costituite da un cilindro di acciaio (scudo) collegato ad una serie di carri di servizio (back-up). Lo scudo può essere monolitico, a forma leggermente tronco-conica, o articolato per affrontare meglio le curve di tracciato.

All'interno dello scudo si trovano:

- il sistema di scavo e abbattimento (che può essere costituito da una testa fresante a piena sezione o da uno o più mezzi ad attacco puntuale come escavatori o teste fresanti) e raccolta del materiale scavato, ubicato nella parte anteriore del cilindro;
- il sistema di propulsione per l'avanzamento dello scudo, costituito da martinetti idraulici longitudinali che, poggiandosi sull'ultimo anello di rivestimento messo in opera, per contrasto lo spingono in avanti, è ubicato nella parte intermedia chiamato "tronco" ove trovano alloggiamento anche eventuali altri equipaggiamenti come motorizzazioni, cabina di guida o macchinari speciali (per es. per il sostegno del fronte);
- il sistema di montaggio del rivestimento costituito da un braccio meccanico, chiamato erettore, azionato con radiocomando che scorre su un ponte longitudinale e provvede alla posa del rivestimento costituito da elementi prefabbricati realizzati in calcestruzzo ar-

mato. Il montaggio dell'anello di rivestimento avviene nella parte terminale dello scudo o "coda"; infatti il diametro dello scudo è superiore a quello dell'estradosso del rivestimento proprio per consentire il montaggio del medesimo. L'intercapedine tra il profilo di scavo realizzato dallo scudo e l'estradosso del rivestimento viene riempito con materiale drenante e/o con malta cementizia, secondo modalità di iniezione che variano in relazione alla tipologia di macchina utilizzata e all'ammasso da attraversare, allo scopo di fissare definitivamente l'anello al terreno e ripristinare le condizioni di equilibrio precedenti lo scavo. La coda è la parte meno spessa dell'involucro in quanto, proprio per la funzione a cui è destinata, non può essere adeguatamente rinforzata come le altre parti. La lunghezza della coda è determinata dalla larghezza degli anelli di rivestimento prefabbricati, in genere all'interno della coda trovano posto 1 anello e mezzo;

- dietro lo scudo è agganciato il treno del back-up costituito da più carri su cui sono alloggiate tutte le attrezzature del sistema di scavo ed avanzamento, come i motori dei vari componenti dello scudo, i trasformatori e i quadri elettrici, il sistema di ventilazione, la cabina comando, il sistema di allontanamento del materiale di scavo (con nastro trasportatore o per via idraulica), il sistema di traslazione dei conci prefabbricati, l'impianto di iniezione a tergo ed altri impianti supplementari in relazione alla tipologia di macchina.

Il ciclo di lavoro è discontinuo e comprende:

- scavo e avanzamento per una lunghezza pari alla corsa effettiva dei martinetti di spinta; contemporaneamente si effettua il riempimento dell'intercapedine a tergo dell'ultimo anello, che viene sfilato parzialmente fuori dalla "coda", e l'allontanamento del materiale abbattuto;
- posa del nuovo anello di rivestimento;
- ripresa dell'avanzamento.

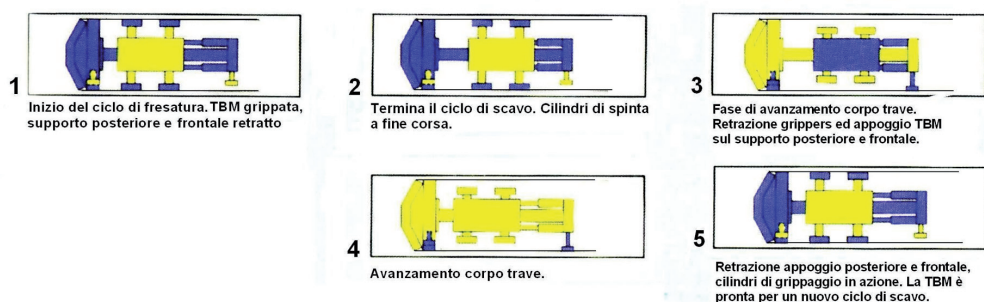


Fig. 15 da [1] - Ciclo di lavoro di una fresa con doppi gripper.

Doppioscudate

Queste macchine (foto 8 e fig.16) offrono la possibilità di effettuare il ciclo di lavoro continuo grazie alla capacità di scavare simultaneamente all'erezione dei conci, il che permette di abbassare notevolmente il tempo del ciclo di scavo ed aumentare l'avanzamento.



Foto 8 – TBM doppioscudata.

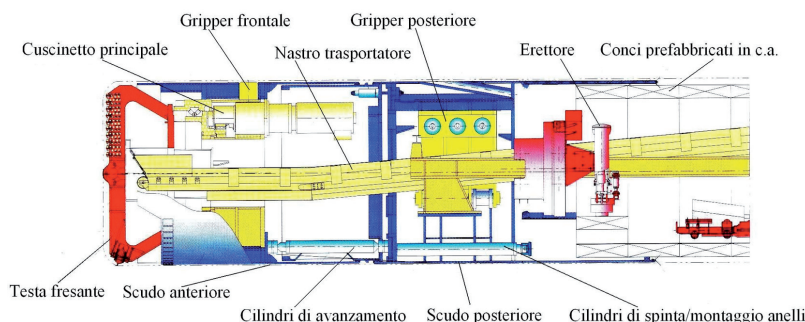


Fig.16 – Schema TBM doppioscudata.

4) Macchine per lo scavo in roccia e macchine per lo scavo nei terreni sciolti

- Alla prima categoria appartengono le TBM non scudate, le TBM-SS monoscudate e le TBM-DS doppioscudate impiegate per lo scavo in rocce di resistenza medio alta con coperture da moderate ad elevate e in buone condizioni di stabilità. La testa fresante è armata con utensili a disco (cutters).
- Alla seconda categoria appartengono le SM aperte per i terreni teneri mentre nei terreni sciolti in falda sono impiegate le TBM e le SM che realizzano una pressione di sostegno attiva al fronte.

6. Descrizione di alcune tipologie di macchine

Sulla base dello schema classificativo sopra riportato si descrivono sinteticamente le principali caratteristiche di alcune TMs.

TBM (Tunnel Boring Machines)

Si suddividono in due principali categorie:

1. TBM per lo scavo di gallerie in roccia.
2. TBM per lo scavo di gallerie in terreni sciolti.

1. TBM per lo scavo di gallerie in roccia

Si suddividono in:

a) TBM aperte (non scudate)

Adatte allo scavo in ammassi rocciosi con caratteristiche meccaniche da ottime a discrete, stabili e con un tempo di autoportanza da medio ad alto. Essendo aperte, cioè sprovviste di scudo o mantello di protezione, non richiedono l'installazione continua di un rivestimento in elementi prefabbricati a cui appoggiarsi per la spinta e per la coppia occorrenti per lo scavo. L'avanzamento avviene utilizzando la reazione di grippers espansi contro le pareti dello scavo. All'occorrenza, in presenza di locali instabilità, possono montare sostegni di tipo tradizionale (centine, bulloni, spritz beton) a pochi metri dal fronte per realizzare un sufficiente contrasto ai grippers. In presenza di ammassi instabili e acqua possono entrare in crisi venendo a

mancare un contrasto laterale efficace per i grippers e per l'inefficienza della testa allo scavo in tali terreni. La testa fresante è normalmente armata con taglienti a disco in grado di affrontare rocce con resistenza alla compressione monoassiale sino a 300 MPa. Le prestazioni, in termini di velocità di avanzamento, in condizioni ideali (rocce dure e stabili, assenza di acqua), possono essere elevate; recentemente una TBM aperta del diametro di scavo di 8 m, utilizzata in Islanda per lo scavo di gallerie idrauliche, ha raggiunto il record di avanzamento giornaliero di 92 m. Le TBM aperte, a seconda dei modelli, possono essere dotate di una coppia (fig.17) o due coppie di grippers (fig.18).

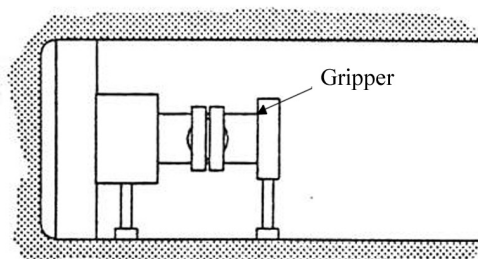


Fig. 17 da [2] – TBM aperta con una coppia di gripper.

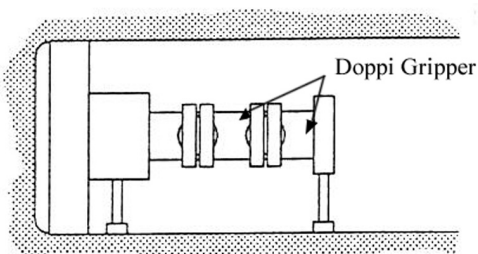


Fig. 18 da [2] – TBM aperta con due coppie di gripper.

b) TBM non scudate speciali

b1) Alesatrici (Reaming Boring Machines – RBMs)

Sono macchine che permettono l'allargare (alesaggio) di un foro realizzato in precedenza con una piccola TBM.

Il principio operativo su cui si basa è identico al principio operativo di una TBM non scudata dotata di grippers di fissaggio (fig.19, foto 9).

Il dispositivo di allargare è essenzialmente costituito da:

- l'elemento di lavoro traslante costituito dalla testa di alesaggio, sulla quale sono localizzati gli utensili di scavo (dischi, denti, picchi, coltelli) e dal sistema di smarino costituito da un nastro trasportatore;
- un elemento stazionario localizzato all'interno del foro da allargare in posizione antistante la testa di alesaggio, che contrasta i martinetti di tiro della testa attraverso due coppie di gripper; tale elemento oltre a supportare l'intero peso della macchina costituisce l'elemento di reazione alla spinta ed alla coppia necessaria allo scavo;
- un corpo posteriore contenente i motori, gli organi di guida e gli elementi di servizio.

Direttamente dietro l'alesatrice segue il dispositivo per il montaggio del nuovo rivestimento in elementi prefabbricati. Tale dispositivo è essenzialmente costituito da uno scudo aperto dotato di:

- camicia metallica, di diametro pari al diametro dell'alesatore, all'interno della quale viene montato l'anello in conci prefabbricati e sono alloggiati i martinetti di spinta;
- erettore per il montaggio degli elementi prefabbricati;
- back-up costituito da una serie di carri dove sono alloggiati i motori del sistema di spinta, gli organi di guida, il sistema di traslazione dei conci, le pompe per l'iniezione a tergo e gli elementi di servizio.

Alesatrice e scudo con back-up avanzano parallelamente. Mano a mano che il dispositivo di scavo compie una sezione di avanzamento nella galleria esistente, pari alla corsa dei martinetti dell'elemento stazionario, lo scudo avanza della stessa lunghezza nel tratto già allargato e monta l'anello di rivestimento.

Lo spazio tra l'estradosso del rivestimento e il profilo di scavo viene riempito con idonee miscele attive o inerti attraverso i conci o tramite un sistema integrato nello scudo, in modo da solidarizzare definitivamente l'anello di rivestimento al terreno.

Campo di applicazione: ammassi rocciosi di caratteristiche da ottime a discrete con un tempo di autoportanza da medio ad alto.

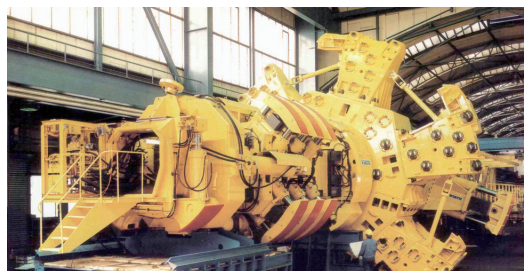


Foto 9 - TBM alesatrice.

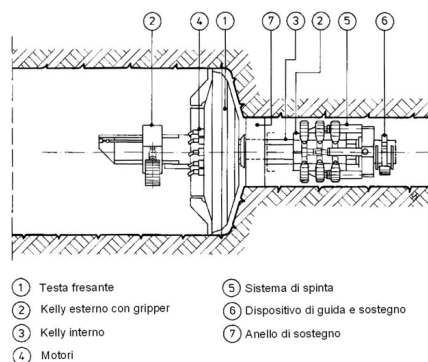


Fig.19 da [6] – TBM alesatrice.

b2) Rais Borer

Sono macchine per lo scavo di pozzi verticali o inclinati (fig.20) e che permettono l'alesaggio a partire dal basso verso l'alto di un foro pilota realizzato con batteria di perforazione.

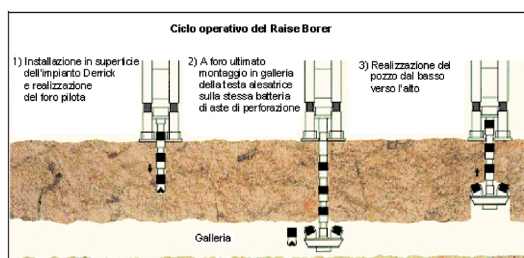


Fig. 20 – Rais Borer.

Principio operativo: una testa di scavo rotante attorno ad un asse coincidente con l'asse del pozzo in realizzazione, viene tirata contro il fronte di scavo attraverso una batteria di aste guidate attraverso un foro pilota. Gli utensili provocano la formazione delle scaglie attraverso lo stesso meccanismo illustrato per la TBM non scudata. I detriti cadono naturalmente alla base del pozzo in realizzazione dove vengono raccolti ed evacuati.

Costituzione della macchina

- testa di scavo portautensili (cutters);
- batteria di aste che trasmette la coppia;
- un corpo, alloggiato all'esterno del pozzo (Derrick), che fornisce alla batteria di aste la coppia ed il tiro necessario per lo scavo.

Campo di applicazione: ammasso roccioso di caratteristiche da ottime a scadenti.

c) TBM monoscudate (TBMs-SS)(fig.21)

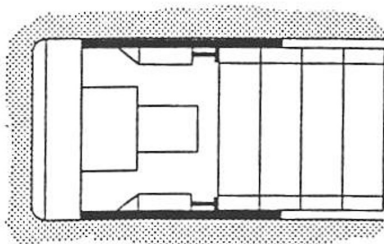


Fig. 21 da [2] – TBM monoscudata.

Principale campo d'applicazione: è più ampio di quello delle TBM aperte, potendo operare anche in rocce tenere e/o fessurate oltre che in rocce dure. La necessità tuttavia

di montare un rivestimento in conci prefabbricati, che avviene in fase alterna allo scavo, riduce la produttività rispetto alle TBM aperte.

Costituzione della macchina:

- testa di scavo rotante armata con cutters, scudo che può essere monolitico (guida della macchina attraverso il sistema di spinta e/o la testa porta utensili), oppure articolato (guida della macchina attraverso il sistema di spinta e/o l'articolazione dello scudo)

Principio operativo: quello delle macchine scudate.

d) TBM doppioscudate (TBMs-DS) (fig.22)

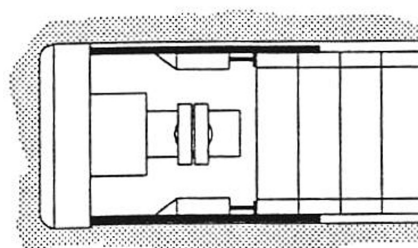


Fig. 22 da [2] – TBM doppioscudata.

Principale campo d'applicazione: analogo a quello delle monoscudate;

Principio operativo e costituzione della macchina:

- testa di scavo rotante armata con cutters;
- scudo telescopico dotato di un doppio sistema di spinta, costituito dai grippers posti all'interno della parte anteriore dello scudo e dai martinetti idraulici longitudinali posti all'interno della parte centrale dello scudo, che permette l'avanzamento continuo. In relazione alle caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso roccioso attraversato può essere usato uno o l'altro dei sistemi di spinta e conseguentemente può essere o meno applicato il rivestimento prefabbricato. In presenza di roccia con caratteristiche meccaniche da ottime a discrete, l'avanzamento può avvenire solo con i grippers mentre viene montato il rivestimento in conci prefabbricati utilizzando i martinetti di spinta orizzontali solo per accostare il nuovo anello a quello precedente. Oppure può essere prevista solo una chiodatura radiale e la successiva posa di prerivestimento in spritz-beton ed eventualmente con centine. In presenza invece di terreno scadente, dove i grippers non troverebbero impiego, l'avanzamento avviene in fase alterna al montaggio del rivestimento, come nella monoscudata;
- back-up con tutte le attrezzature ausiliarie.

2. TBM per lo scavo di gallerie in terreni sciolti

Principale campo d'applicazione: terreni soffici scarsamente autoportanti, in falda. Tuttavia possono anche operare in ammassi rocciosi in falda, nel qual caso la testa fresante deve essere configurata per installare cutters da roccia.

Principio operativo:

- quello delle macchine scudate;
- creano una contropressione attiva sul fronte. Per ottenere ciò un setto d'acciaio isola ermeticamente la camera di scavo dal resto dello scudo. L'accesso nella camera di lavoro per ispezioni, riparazioni e sostituzione degli utensili di scavo, avviene attraverso una camera iperbarica.

Costituzione delle macchine: scudate, testa rotante portautensili. Gli utensili sono generalmente costituiti da denti, all'occorrenza anche da cutters, è possibile una configurazione mista denti e cutters in funzione delle caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso roccioso. La configurazione della testa rotante può presentarsi molto aperta, oppure parzialmente chiusa o completamente chiusa. Possono eventualmente essere equipaggiate con portelloni di brandaggio metallici, a scomparsa fissati sulle razze della fresa, per realizzare un supporto meccanico del fronte da adottare a macchina ferma per gli interventi in camera di scavo.

Si suddividono in:

a) TBM chiusa ad aria compressa (fig.23)

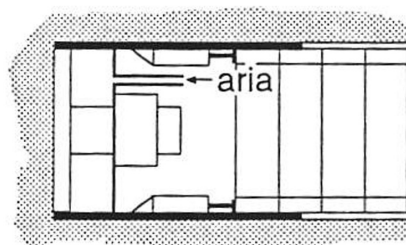


Fig. 23 da [2] – TBM chiusa ad aria compressa.

Il campo di applicazione è quello dei terreni non autoportanti (sabbie, limi) a permeabilità medio-bassa e in presenza di falda idrica.

La tecnica di scavo sotto falda consiste nel tenere l'aria nella camera di scavo ad una pressione che sia superiore a quella idrostatica in modo da impedire che l'acqua invada la camera stessa (fig.24). Il materiale fresato viene estratto dalla camera di scavo pressurizzata attraverso una valvola sferica rotativa e da qui convogliato verso il sistema di smarino primario. E' una tecnica, adoperata in passato anche nelle gallerie in scavo tradizionale, che oggi è sempre

meno utilizzata. Uno dei principali inconvenienti si presenta nelle gallerie di grande diametro con basse coperture. In tali circostanze esiste una notevole differenza tra la pressione idrostatica alla sommità e alla base della galleria e risulta difficile trovare una pressione ideale per l'aria in quanto pressioni troppo elevate non risulterebbero bilanciate in sommità e potrebbero dar luogo a fughe d'aria entrando nel tunnel dal lato della coda, mentre pressioni più basse potrebbero determinare venute d'acqua al piede.

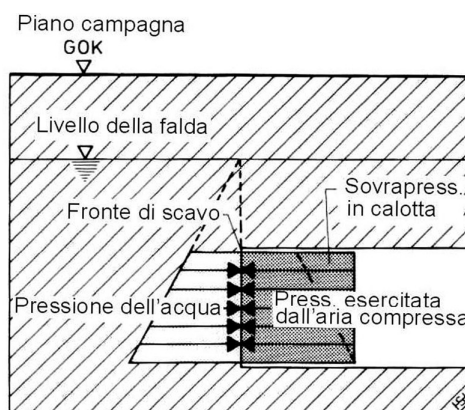


Fig. 24 da [2] – Principio della contropressione al fronte con aria compressa.

b) TBM chiuse a contropressione di fango (Slurry shield-SS e Hydroshield-HS) (figg. 25 e 26)

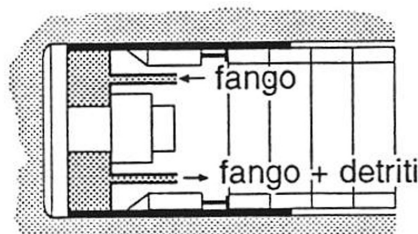


Fig. 25 da [2] – TBM Slurry.

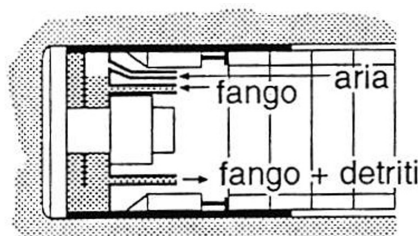


Fig. 26 da [2] – TBM Hydroshield.

Sono particolarmente adatte per terreni sciolti, dai banchi di sabbia fine alle ghiaie a grana grossa con alta permeabilità all'acqua. I limiti di applicazione si raggiungono in terreni argillosi, con comportamento coesivo, dove la tendenza al ri-addensamento crea un incremento della coppia necessaria alla rotazione della testa.

Entrambe le macchine si basano sull'uso di una sospensione di bentonite o argilla in acqua che riempie una camera di lavoro pressurizzata penetrando nel terreno a formare il filter-cake ovvero la membrana impermeabile che garantisce il trasferimento della contropressione al fronte di scavo (fig.27).

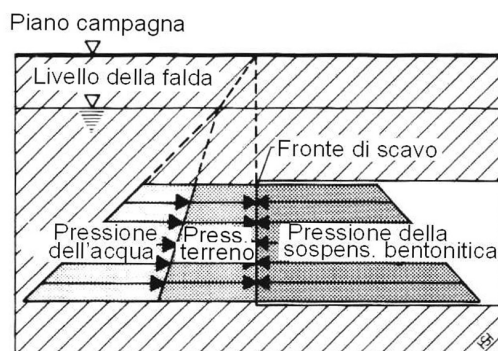


Fig. 27 da [7] - Principio della contropressione al fronte con fango bentonitico.

La ruota fresante scava il terreno e miscchia simultaneamente il materiale fresato al fronte con la sospensione di bentonite che viene pompato tramite una condotta fino ad un impianto di separazione posto all'esterno del tunnel (fig.28). Qui viene separato dalla sospensione che poi viene immessa nuovamente nel circuito tramite una condotta di alimentazione. La sospensione di bentonite quindi oltre a svolgere la funzione stabilizzante è anche un mezzo di convogliamento del materiale scavato. Davanti al tu-

bo di aspirazione dello smarino, collocato nella parte inferiore della camera di scavo, può essere necessaria l'installazione di una griglia metallica, per escludere i blocchi fuori misura, e di un frantumatore idraulico per ridurre le dimensioni dei massi a misure idonee per passare attraverso la condotta.

Il principio operativo delle due macchine è analogo, la differenza consiste nella diversa modalità di trasferimento della contropressione al fronte.

Nello Slurry la contropressione di fango è regolata con la variazione delle portate delle pompe di mandata e di smarino del circuito idraulico dei fanghi.

Nell'Hydroshield è presente nella camera di scavo una seconda paratia, sommersa, posta davanti a quella stagna, che crea una camera parzialmente riempita d'aria, collegata ad un compressore, che esercita la pressione sui fanghi e quindi sul fronte in modo indipendente rispetto al circuito idraulico dei fanghi. In tal modo è possibile regolare la pressione con maggior precisione rispetto allo slurry. La presenza del cuscino d'aria per il mantenimento della pressione al fronte durante lo scavo migliora la sensibilità e la rapidità di intervento soprattutto nei casi di cambiamento di condizioni al fronte (la risposta del fluido di perforazione, condizionata dalle pompe, è sicuramente più lenta di quella dell'aria compressa contenuta nei serbatoi).

Per permettere l'accesso al fronte tramite la camera iperbarica il fango bentonitico viene estratto mediante la pompa di smarino mentre il fronte stesso, impermeabilizzato da uno strato di bentonite, viene sostenuto dall'aria compressa.

c) *TBM a contropressione di terra (Earth Pressure Balance Shield EPBS) (fig.29)*

Il campo di impiego è costituito dai terreni con un'alta percentuale di argilla o limo e bassa permeabilità all'acqua. Nei terreni incoerenti all'interno della camera di scavo deve essere prodotta una pressione allo scopo di con-

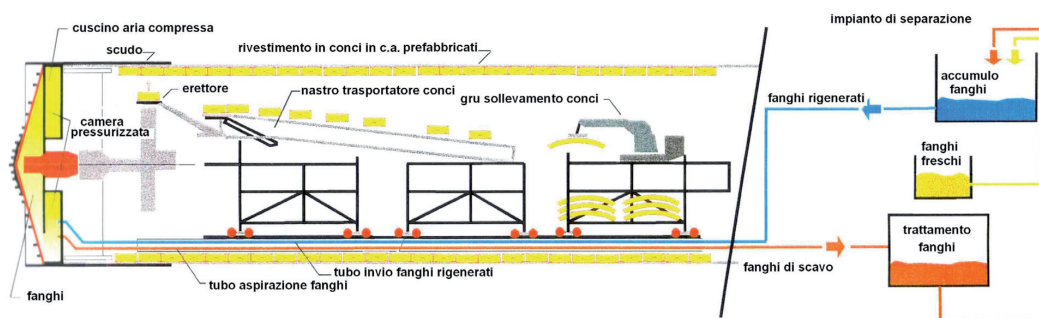


Fig. 28 – Schematizzazione sistema Hydroshield.

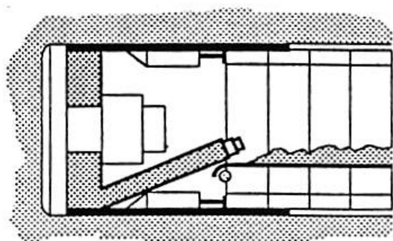


Fig. 29 da [2] – TBM a contropressione di terra EPB.

trastare la pressione del terreno e dell'acqua di falda. Il sostegno del fronte avviene per mezzo dello stesso terreno scavato (fig.30) che è mantenuto in pressione all'interno della camera di scavo attraverso i martinetti di spinta dello scudo che trasferiscono la pressione al diaframma di se-

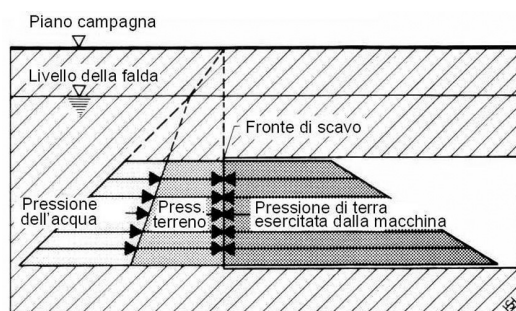


Fig. 30 da [7] – Principio della contropressione di terra con l'EPB.

parazione tra scudo e camera di scavo e quindi al terreno scavato. Durante lo scavo vengono iniettati, attraverso degli ugelli posti sul diaframma e sulla testa fresante, degli additivi quali bentonite o schiume per realizzare una membrana impermeabile sul fronte di scavo e rendere plastico il terreno scavato (fig. 31). L'estrazione del terreno avviene per mezzo di una coclea che permette la riduzione progressiva della pressione da dove prosegue su nastri trasportatori, oppure su vagoncini su rotaia o su autocarri.

Differenze – Vantaggi e svantaggi tra EPB e Slurry

L'E.P.B. dovendo impastare materiale più solido rispetto allo Slurry/Hydroshield ha più potenza installata sulla testa fresante, ciò comporta:

- maggior peso;

- maggiori consumi;
- maggiori dimensioni del cuscinetto;
- maggiori difficoltà di accesso al fronte.

Per contro è una macchina più robusta e fa fronte più facilmente a terreni più duri eventualmente incontrati.

L'Hydroshield offre i seguenti vantaggi rispetto all'EPB:

- più rapido ed efficace mantenimento della pressione al fronte tramite il cuscino di aria compressa;
- possibilità di pulizia rapida del fronte tramite la pompa di smarino per permettere l'accesso al personale.

Ha lo svantaggio di dover lavorare con un impianto trattamento dei fanghi di smarino che condiziona la capacità produttiva dello scudo soprattutto in presenza di terreno coesivo (argille) e richiede una superficie di ingombro abbastanza ampia.

Nel grafico seguente (fig.32) sono riportati i campi di applicazione delle macchine con fronte in pressione in funzione della curva granulometrica dei terreni.

TBM's combinate

Sono macchine che si possono adattare alle variabilità geologiche dell'ammasso, che peraltro devono essere già note in fase di progettazione, modificando opportunamente alcuni sistemi principali (ad es. il sistema di supporto del fronte, gli utensili di scavo, il sistema di estrazione del marino).

Le diverse combinazioni possibili sono riportate nello schema di fig. 33.

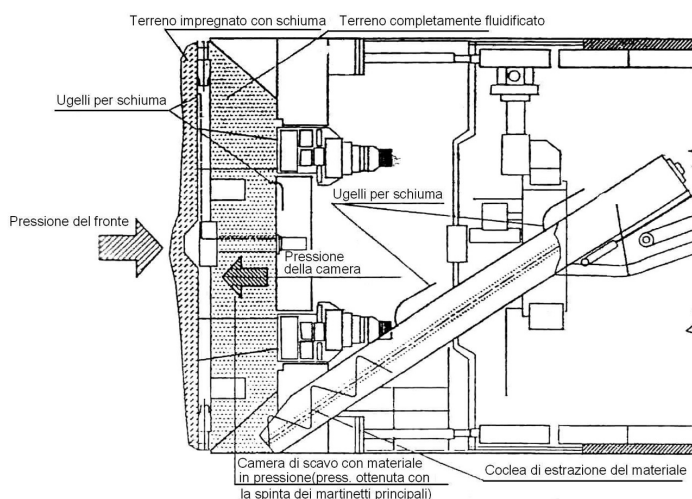


Fig. 31 - Sistema funzionamento EPB.

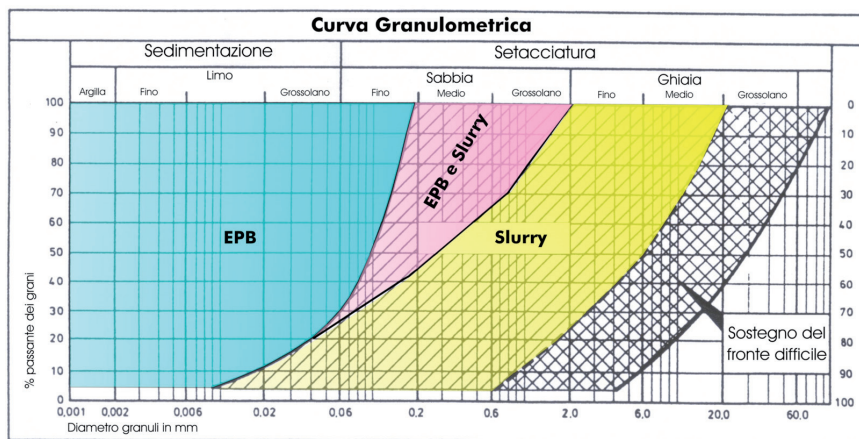


Fig. 32 – Campi di applicazione delle macchine con fronte in pressione.

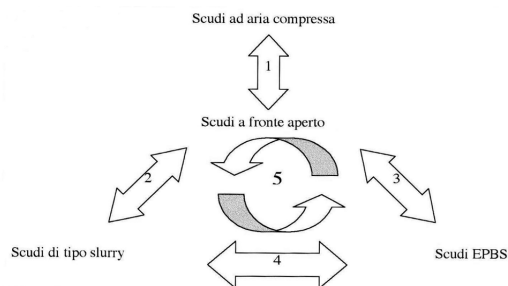


Fig. 33 da [1] – Possibili combinazioni di macchine.

E' evidente che l'adozione di uno scudo combinato presuppone una approfondita conoscenza delle condizioni geologiche e geotecniche dei terreni da attraversare al fine di orientare correttamente la progettazione della macchina per determinare i tempi operativi per la conversione, in corso d'opera, da una modalità all'altra. In ogni caso questo tipo di scelta comporta compromessi tra le diverse modalità indivi-

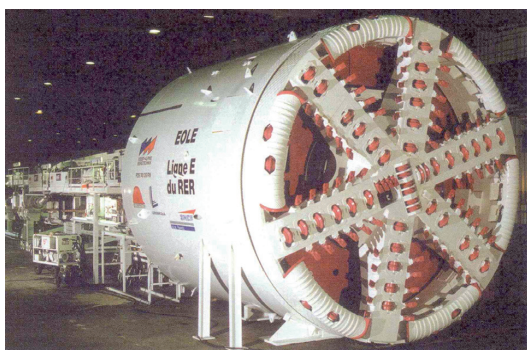


Foto 10 – Polyshield del progetto Eole – Parigi.

duate a svantaggio talvolta delle prestazioni.

Inizialmente la conversione ha riguardato macchine chiuse del tipo EPB o HS che venivano convertite in macchine aperte per lavorare in roccia, senza quindi l'applicazione di una pressione attiva al fronte, o viceversa. Le modifiche quindi riguardavano prevalentemente la configurazione della testa fresante e degli utensili di scavo oltre al sistema di smarino primario. Nel caso di funzionamento in modalità EPB e HS deve essere già prevista la predisposizione di due sistemi di evacuazione del materiale dal fronte dalla camera di scavo, nonché lungo la galleria.

Nelle figg. 34 a-b-c è riportata un'interessante soluzione di scudo combinato, chiamato Polyshield (foto 10), predisposto per poter lavorare in modalità HS, EPB e come TBM da roccia. La macchina tuttavia è sempre stata adoperata in modalità HS.

Nella fig. 35 è invece rappresentato uno scudo combinato realizzato per lo scavo della galleria Socatop a Parigi dove effettivamente ha lavorato sia in modalità EPB che in modalità HS, condizione necessaria per la complessa situazione geologica presente lungo il tracciato. Tale conversione tuttavia non ha riguardato la testa fresante. Le modifiche sono state eseguite con fermi relativamente brevi dell'ordine di qualche giorno. Altri casi hanno riguardato la conversione di HS in macchine da roccia come nel caso delle gallerie del Grauholz e di Thalwill in Svizzera.

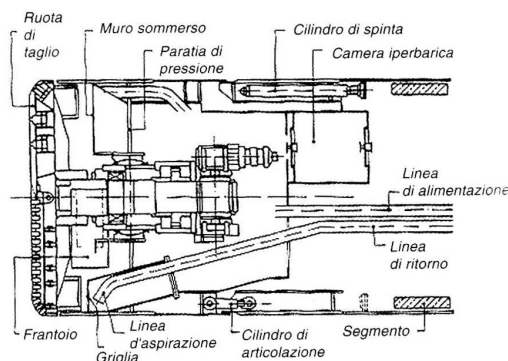


Fig.34 a da [7] – Schema Polyshield progetto Eole in modalità Hydroschild.

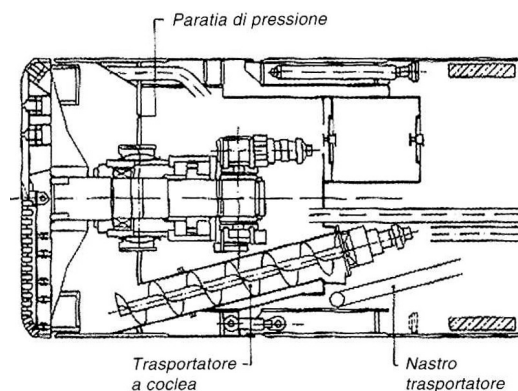


Fig. 34 b da [7] - Schema Polyshield progetto Eole in modalità EPB.

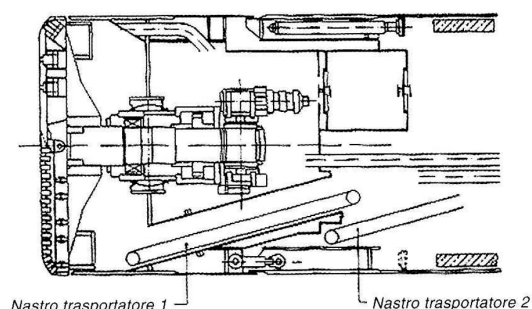


Fig. 34 c da [7] - Schema Polyshield progetto Eole in modalità TBM da roccia.

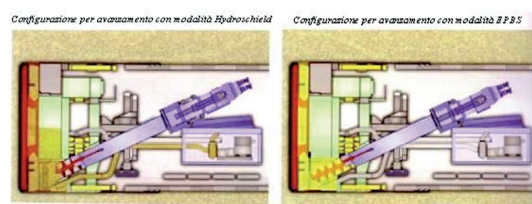


Fig. 35 da [1] - Socatop Parigi.

SMs (Shield Machines)

Si distinguono in SMs a sistema aperto e in SMs a sistema chiuso.

1. SMs a sistema aperto (fig. 36)

a) Scudi aperti

Costituzione delle macchine: come le macchine scudate

Principio operativo: lo scavo avviene con mezzi puntuali come escavatori o frese puntuali montati anche su più livelli e con un sistema di scarico e smarino automatico.

Principale campo d'applicazione: ammassi rocciosi scendenti, terreni coerenti o terreni autoportanti in genere.

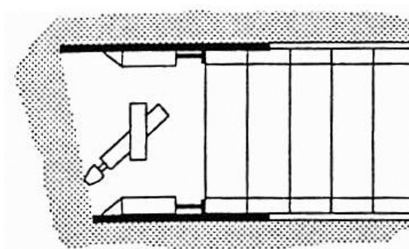


Fig. 36 da [2] - SM a sistema aperto.

b) Scudi aperti a supporto meccanico del fronte (fig. 37)

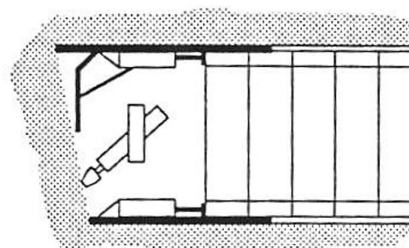


Fig. 37 da [2] - SM aperto con portelloni di brandaggio.

Sono analoghi agli scudi aperti, ma sono dotati di piastre metalliche, collocate nella parte superiore del tagliante dello scudo, per sostenere il fronte.

Principale campo d'applicazione: rocce deboli, terreni coerenti o parzialmente coerenti, terreni autoportanti in genere, assenza di falda idrica.

2. SM a sistema chiuso

a) Scudi aperti ad aria compressa (fig. 38)

Principio operativo: come gli scudi chiusi ad aria compressa.

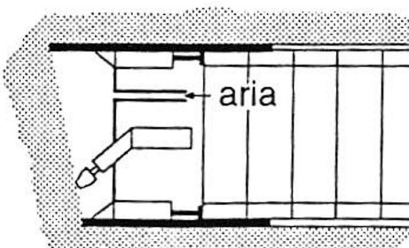


Fig. 38 da [2] - SM aperta ad aria compressa.

Lo scavo avviene invece con mezzi puntuali come escavatori o frese puntuali. Lo smarino viene estratto dalla camera di scavo pressurizzata per mezzo di una valvola.

Principale campo d'applicazione: come per gli scudi chiusi ad aria compressa

Anche questa tecnica è in via di abbandono per gli stessi inconvenienti riscontrati negli scudi chiusi ad aria compressa.

b) *Scudi aperti a contropressione di fango* (fig. 39)

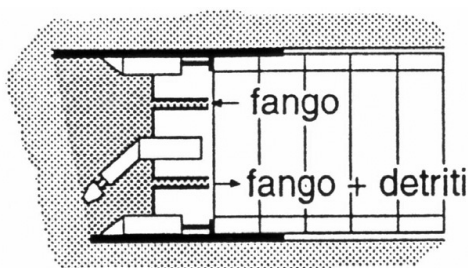


Fig. 39 da [2] – SM aperta a contropressione di fango.

Principio operativo: come quello degli scudi chiusi a fanghi. L'abbattimento è eseguito con mezzi puntuali (scavatori o frese puntuali). L'evacuazione dello smarino è analogo a quello degli scudi chiusi a fanghi. Necessita di impianto di separazione collocato all'esterno.

Principale campo d'applicazione: come per gli scudi chiusi a fanghi.

7. Sistemi di sostegno degli scavi

Nello scavo di gallerie con il metodo meccanizzato a piena sezione possono essere adottati diversi sistemi di sostegno del cavo, con funzioni sia provvisorie che definitive. Si possono distinguere:

1. sistemi di sostegno di tipo tradizionale, come bulloni, centine e spritz-beton con funzione di pririvestimento provvisorio;
2. rivestimenti prefabbricati in c.a. con funzione di pririvestimento o di rivestimento definitivo;
3. rivestimenti in calcestruzzo estrusio con funzione di pririvestimento.

L'applicazione di tali sistemi è strettamente correlata alle caratteristiche di stabilità dell'ammasso roccioso o dei terreni e alla tipologia delle TMs.

1. Il primo tipo viene impiegato con le TBM aperte, sprovviste cioè di scudo, quando si presentano locali situazioni di instabilità della roccia. Le attrezzature per l'applicazione dei bulloni e dello spritz-beton sono normalmente collocate sul back-up, ad una distanza di 20-25 m dal fronte. In casi eccezionali tuttavia può rendersi necessaria la posa dei bulloni e dello spritz-beton a pochi metri dal fronte, situazione che rallenta molto le prestazioni della fresa. La posa delle centine, invece, avviene immediatamente dietro il supporto della testa fresante per permettere l'impiego dei grippers. Il completamento del rivestimento della galleria mediante getto in opera può avvenire invece ad una certa distanza dal back-up per mezzo di un'attrezzatura indipendente. Nella foto 11 è rappresentata una TBM aperta utilizzata per la realizzazione della galleria del S. Gottardo.

2. Il rivestimento in anelli di conci prefabbricati in cemento armato (fig. 40 e foto 12) adottato per le macchine scudate, che lo utilizzano come forma di contrasto per la spinta di scavo, è oggi il più diffuso. Il miglioramento della qualità di confezionamento (grazie allo sviluppo delle tecniche di vibrazione, maturazione a vapore e di controllo delle composizioni) ha permesso notevoli riduzioni dei costi rispetto ai rivestimenti in ghisa o in acciaio strutturale, adottati inizialmente e oramai abbandonati. Può essere utilizzato sia come rivestimento definitivo sia come pririvestimento, in tal caso segue a distanza dal back-up, con attrezzatura a parte, la posa dell'impermeabilizzazione e del rivestimento definitivo eseguito con getto in opera oppure con un secondo anello coassiale in elementi prefabbricati.

I maggiori vantaggi di un rivestimento in elementi prefabbricati in cemento armato, montato all'interno dello scudo, si possono così riassumere:

- immediata capacità portante;
- sicurezza per il personale;



Foto 11 – S. Gottardo – TBM aperta da roccia.

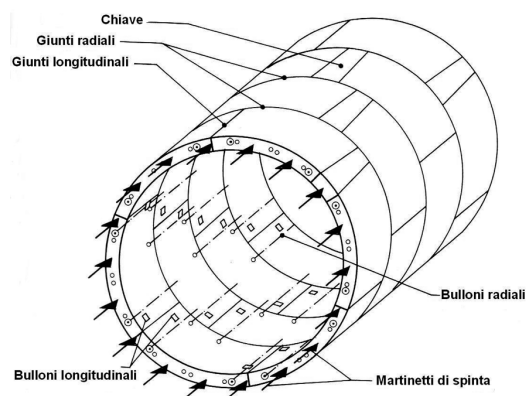


Fig. 40 da [6] – Rivestimento in conci prefabbricati in cemento armato.



Foto 12 – Interno di una galleria con rivestimento in conci prefabbricati.

- riduzione dei tempi di costruzione della galleria se il rivestimento è definitivo non essendoci bisogno di una fase successiva per il getto in opera;
- certezza delle quantità di materiale e dei costi di costruzione;
- maggiore controllo e qualità del prodotto realizzato in stabilimento;
- maggiore durabilità dell'opera.

Tra gli svantaggi, a prescindere dall'elevato costo d'impianto, è da segnalare la necessità di standardizzare lo spessore del rivestimento per lunghe tratte di gallerie che lo rende quindi poco flessibile a rispondere alle differenti condizioni geologiche, sicché talvolta l'opera può risultare sovradimensionata.

Il rivestimento è costituito da una serie di segmenti, chiamati conci, in calcestruzzo armato che uniti formano un anello di determinato spessore e lunghezza.

La lunghezza può variare da 60 cm, adottata per gallerie con curve di raggio molto piccolo, sino a 2 metri. I conci possono avere varie forme e dimensioni. In curva il rivestimento può essere realizzato mediante anelli obliqui (o a fetta di salame), utilizzabili anche in tratti rettilinei disponendo gli anelli con il lato più spesso alternativamente da una parte e dall'altra. L'introduzione sul mercato dell'anello universale, cioè l'impiego di un solo tipo di anello che al variare della posizione della chiave varia lo spessore del lato consentendo di affrontare sia tratti rettilinei che in curva, ha comportato vantaggi in termini di ottimizzazione della produzione in stabilimento e di facilitazione delle operazioni per l'approvvigionamento in galleria.

Generalmente nelle gallerie per le infrastrutture viarie (ferrovie, strade, metropolitane) è richiesta l'impermeabilità dell'opera, sino alle pressioni idrauliche previste in progetto, che viene garantita da guarnizioni speciali, solitamente in neoprene, incollate sul perimetro esterno di ciascun concio.

I conci di ogni singolo anello collegati con bulloni radiali sono, a loro volta, collegati ai conci dell'anello contiguo per mezzo di bulloni longitudinali. La bullonatura deve garantire la chiusura ermetica dei giunti e il raggiungimento dei requisiti di impermeabilità delle guarnizioni perimetrali dei conci. I bulloni generalmente vengono tolti ad una certa distanza dal fronte e nuovamente riutilizzati per il montaggio degli anelli successivi.

Un miglioramento del collegamento tra anello e anello è rappresentato dall'accoppiamento con elementi speciali in plastica che vengono pre-inseriti in appositi alloggiamenti del concio in fase di montaggio e trovano riscontro nell'ultimo anello posato in identici alloggiamenti; i pistoncini di spinta completano l'inserimento forzato. In tal modo si raggiunge una maggiore precisione di allineamento dei conci stessi in quanto si riducono gli scalini che si formano spesso tra un elemento e l'altro. Inoltre vengono eliminate le tasche che sono invece richieste dai bulloni e che costituiscono un elemento di indebolimento della struttura.

3. I rivestimenti in calcestruzzo estrusione (fig.41) vengono messi in opera pompando calcestruzzo fluido, a volte con fibre d'acciaio per aumentarne le caratteristiche di resistenza, direttamente dietro l'apparecchiatura di avanzamento del condotto mediante apposite aperture posizionate in un'armatura frontale. Essa è delimitata nella parte anteriore dall'armatura avanzante ed avanza nello spazio anulare delimitato superiormente dall'armatura dello scudo. La pressione nel calcestruzzo liquido viene mantenuta costante in modo tale da esercitare una efficace tensione stabilizzatrice radiale sul terreno circostante. In tal modo risulta possibile apporre il rivestimento direttamente in via definitiva anche per terreni incoerenti e sotto la pressione dell'acqua di falda eventualmente presente.

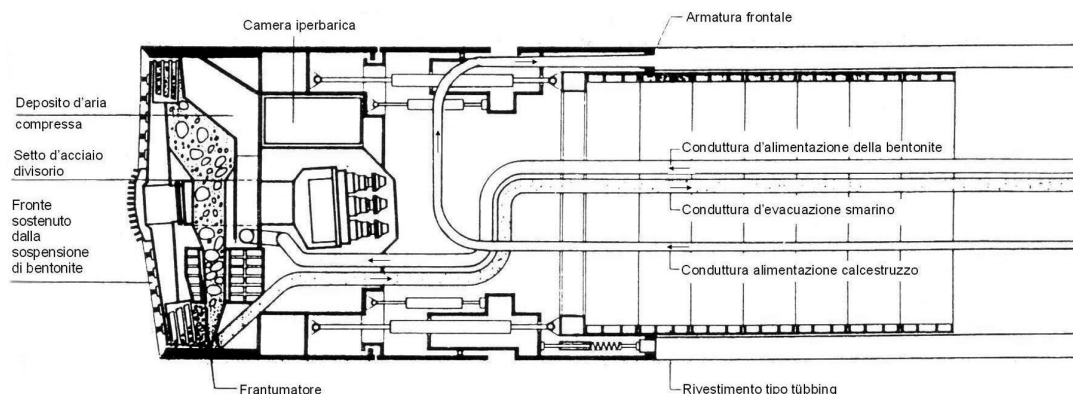


Fig. 41 da [8] - Rivestimento di calcestruzzo estrusato con fibra d'acciaio dietro idroscudo.

Tale sistema offre il vantaggio di assenza di giunti e dell'eliminazione della fase di riempimento con malta dei vuoti tra terreno e rivestimento necessario invece con i conci.

8. Considerazioni degli autori su alcune principali tipologie di macchine

La TBM, cioè la macchina dotata di una testa fresante a piena sezione, è probabilmente la tipologia di macchina più diffusa per lo scavo meccanizzato delle gallerie. Tale tipologia può essere raggruppata in due principali categorie:

- TBM per scavo in roccia, che può essere scudata e non (cosiddetta aperta);
- TBM scudata per lo scavo in terreni sciolti, che esercita una contropressione di sostegno attiva sul fronte.

Nel primo gruppo la scelta tra TBM scudata e aperta dipende principalmente dalle condizioni geologiche e idrogeologiche dell'ammasso attraversato. Tale scelta presuppone quindi una conoscenza approfondita dei parametri geomeccanici della roccia, che per gallerie lunghe e profonde non sempre è possibile ottenere.

TBM aperta

L'impiego di TBM aperta è previsto in ammassi rocciosi dotati di caratteristiche meccaniche da ottime a discrete, con tempo di autoportanza da medio ad alto. Di conseguenza non occorre che i sostegni di prima fase (bulloni, centine, spriz-beton) debbono essere montati a brevissima distanza del fronte, ma è possibile installarli sino anche a 30 m di distanza. Il rivestimento definitivo viene eseguito con getto in opera in un secondo momento, a distanza anche di un centinaio di metri dal fronte. In condizioni geologiche favorevoli tale TBM fornisce ottime prestazioni e avanzamenti rapidi, dell'ordine di 20-25 m/g, anche per scavi di grande diametro (maggiori di 10 m).

Nell'attraversamento di ammassi rocciosi con scadenti caratteristiche geomeccaniche ed in presenza di acqua, la TBM aperta presenta limiti notevoli. L'avanzamento diventa difficoltoso, per esempio quando si verificano fenomeni naturali di instabilità del fronte e delle pareti, che limitano, se non addirittura impediscono, l'azione della testa e dei grippers. Le produzioni in tal caso si riducono notevolmente e l'avanzamento può essere del tutto impedito. In casi del genere occorre intervenire mediante consolidamenti al fronte e alle pareti, per cercare di migliorare le caratteristiche meccaniche dell'ammasso. È importante che la macchina sia equipaggiata per eseguire gli interventi di consolidamento radiali, al fronte e per profondità adeguate. Nel caso la macchina resti bloccata, si deve intervenire con metodi tradizionali, scavando un by-pass per superare la macchina, e realizzare interventi di consolidamento al contorno per consentire la ripartenza della TBM.

L'aumento del diametro di scavo in rocce instabili incrementa i problemi di avanzamento. L'impiego di TBM aperte per grandi diametri, superiori agli 8 metri è consigliabile in ammassi rocciosi stabili e compatti.

In Italia l'applicazione di TBM aperte è stata limitata a piccoli diametri. La ragione è riconducibile alle particolari caratteristiche del nostro sottosuolo, che presenta terreni eterogenei in cui lo scavo si svolge in condizioni geotecniche difficili. Per questo motivo sono state utilizzate, in prevalenza, TBM scudate da roccia.

Una sfida importante si presenta a breve nel panorama italiano per la progettazione e costruzione della galleria ferroviaria di base del Brennero, dove la lunghezza dell'opera richiederebbe l'impiego dello scavo meccanizzato per ridurre i tempi di realizzazione. La presenza di coperture importanti, maggiori di 1000 m, e l'eterogeneità della roccia attraversata, comportano la necessità di una approfondita conoscenza degli ammassi da attraversare e di una corretta valutazione dei suoi principali parametri al fine di ridurre eventuali rischi di natura geologica. A que-

sto scopo è stato previsto un cunicolo esplorativo, attualmente in corso di realizzazione mediante fresa doppioscudata da roccia, collocato parallelamente alle gallerie principali. Una volta espletata la sua funzione per le indagini geognostiche verrà utilizzato come cunicolo di servizio, sia durante i lavori che nella fase di esercizio. I risultati acquisiti consentiranno di avere una più ampia informazione di carattere geognostico dell'ammasso e potranno indirizzare la scelta sulla tipologia di macchina da adottare. Sarà di tipo aperto o scudata? Che scenari si potranno prevedere? Che previsioni si potranno fare sui fenomeni di deformazione, pressione e spinta dell'ammasso? Questo è il difficile compito che attende il progettista a cui spetta, tra le altre cose, di ottimizzare la scelta della macchina.

Un riferimento a opere simili sono i valichi alpini realizzati e in corso di realizzazione in Svizzera, cioè le gallerie ferroviarie rispettivamente del Lötschberg, di circa 36 km, e del S.Gottardo, di circa 54 km che presentano coperture maggiori di 2000 m. Per entrambe le gallerie l'applicazione di TBM aperte di grande diametro, maggiore di 9 m, è stato possibile per circa il 40% di tracciato. Le prestazioni sono risultate eccellenti, nonostante l'attraversamento di zone tettoniche che sono state superate con interventi preventivi di consolidamento eseguiti da bordo macchina.

Anche per la galleria di base Torino-Lione le previsioni di progetto indicano la presenza di roccia omogenea, idonea all'uso della fresa, per ampi tratti di tracciato. Pure per questo progetto, analogamente alla galleria del Brennero, è previsto un cunicolo geognostico di circa 8 km di lunghezza, da realizzarsi con TBM aperta all'interno degli gneiss del massiccio d'Ambin a partire dal versante italiano, che dovrà fornire le indicazioni per la progettazione delle macchine del tunnel di base.

TBM scudata da roccia

L'impiego di TBM da roccia, monoscudo o doppioscudo, trova applicazione in rocce tenere, dove l'avanzamento è veloce e dove è necessario, per la scarsa autoportanza del terreno, la posa sistematica di un rivestimento prefabbricato all'interno dello scudo. Tuttavia l'impiego di tale TBM anche in rocce compatte e di elevata resistenza può essere possibile progettando opportunamente la testa fresante con idonei dischi per lo scavo della roccia. La TBM scudata offre, rispetto alla TBM aperta, un maggior grado di sicurezza per gli addetti ai lavori per la posa immediata del rivestimento prefabbricato. Per contro però, in condizioni geologiche analoghe, la sua velocità di avanzamento è inferiore alla TBM con grippers, per la sosta necessaria al montaggio dell'anello di rivestimento. Un vantaggio si ottiene con la TBM doppioscudata che permette una produzione maggiore, considerando avanzamento e montaggio rivestimento, fino al 70%.

In presenza di terreni spingenti o dove la deformazione e le spinte dell'ammasso assumono aspetti rilevanti, la

TBM scudata potrebbe incontrare notevoli difficoltà. Se la deformazione dell'ammasso si sviluppa rapidamente, determinando alte convergenze e spinte, lo scudo può restare bloccato per attrito e l'avanzamento impedito. La corretta previsione delle conoscenze geologiche dell'ammasso da attraversare è fondamentale per indirizzare il progettista sulla metodologia di scavo più idonea da adottare. Se la scelta cade sul meccanizzato, anziché sullo scavo in tradizionale, la TBM dovrà essere progettata prevedendo per esempio, in presenza di terreni particolarmente spingenti, la possibilità di eseguire un maggiore extra-scavo, tale da consentire alla macchina di avanzare prima che la contrazione del cavo possa bloccarla. Inoltre, sempre considerando lo stesso scenario, è opportuno progettare uno scudo tronco conico più accentuato rispetto agli standard e di lunghezza più corta possibile per ridurre gli attriti col terreno.

TBM scudate per terreni sciolti

I terreni sciolti sotto falda in pressione costituiscono il campo di applicazione del secondo gruppo di TBM, cioè le macchine che esercitano una contropressione attiva di sostegno al fronte. Rientrano in questa categoria l'Hydroshield, lo Slurry e l'EPB. In ambito urbano e in presenza di basse coperture, la scelta di tale tipologia di macchina risulta obbligata. Ed è consigliabile anche in terreni stabili, adeguando in tal caso la testa fresante con idonei utensili di scavo per affrontare ammassi lapidei. La scelta su un tipo o l'altro di TBM (Hydroshield o EPB) è funzione delle caratteristiche dei terreni. L'esperienza italiana negli ultimi dieci anni, si è indirizzata verso la tipologia EPB che risulta essere più semplice e più facilmente gestibile rispetto all'Hydroshield; l'EPB può coprire, grazie ai metodi di condizionamento del materiale di scavo, una ampia gamma di terreni. In condizioni geologiche favorevoli tale TBM fornisce buone prestazioni in termini di avanzamento dell'ordine di 10-15 m/g, anche per scavi di grande diametro (maggiori di 10 m).

Va comunque tenuto presente che nella progettazione di una galleria in ambito urbano, coi numerosi vincoli di natura antropica al contorno e la necessità di ridurre al minimo i disturbi arrecati in superficie, in termini di cedimenti, la sola scelta della macchina a sostegno del fronte, come risoluzione di tutte le problematiche, appare riduttiva. Ogni progetto ovviamente fa storia a sé, ma se per esempio la galleria passa a pochi metri dalle fondazioni dei fabbricati o a pochi metri da un'arteria stradale/ferroviaria, il problema cambia e di molto. In tali casi la pressione di sostegno al fronte potrebbe non essere sufficiente a garantire il sottoattraversamento in condizioni di sicurezza. E' pertanto fondamentale nella progettazione una visione d'insieme di tutti i vincoli e criticità presenti lungo il tracciato, sia in superficie che in sotterraneo. Ciò al fine di prevedere eventuali consolidamenti in anticipo rispetto all'arrivo della macchina, eseguiti da superficie o pozzi appositamente scavati. La possibilità di eseguire consolidamenti dall'interno della macchina è un input

progettuale oramai consolidato. Ma non è certamente la panacea per superare particolari criticità, sia per le difficoltà operative e i tempi lunghi occorrenti. Inoltre i risultati non sempre sono soddisfacenti. Possono risultare utili invece per modesti interventi e per effettuare indagini geognostiche in avanzamento.

9. Grandezze in gioco e prestazioni delle TBM

Lo sviluppo tecnologico ha consentito di realizzare TBM sempre più affidabili e di grandi dimensioni, con incremento delle prestazioni produttive. Tra le principali innovazioni si possono ricordare:

- il sistema automatico per l'iniezione a tergo del rivestimento di malta cementizia in pressione, di fondamentale importanza per limitare i cedimenti in superficie, soprattutto in presenza di basse coperture ed in ambito urbano. Nei primi scudi l'iniezione veniva spesso eseguita disgiuntamente dall'avanzamento, attraverso dei fori praticati nei conci. In tal modo la funzione di contrasto al terreno era ritardata con evidenti ripercussioni negative in superficie. Spesso erano necessari dei fermi per completare l'intasamento. Oggi invece il riempimento a tergo dei conci viene effettuato attraverso canne inserite nella coda dello scudo e si svolge contemporaneamente all'avanzamento. In tal modo si riesce a contrastare efficacemente e immediatamente il terreno attorno all'anello;
- i connettori longitudinali a pressione, che hanno sostituito i bulloni provvisori di collegamento tra i conci degli anelli, restano definitivamente nel rivestimento. Tale innovazione ha ridotto il tempo per il montaggio dell'anello e la manodopera occorrente a vantaggio di una maggiore qualità della produzione;
- teste fresanti coassiali per ottenere elevati valori di coppia per grandi diametri e permettere, nel caso dell'EPB, il mescolamento di grandi masse di materiale condizionato con opportuni additivi (schiume e polimeri) per renderlo plastico;
- nell'ambito dei valori delle principali caratteristiche meccaniche delle macchine, coppia e forza assiale, si è assistito, nel corso dell'ultimo decennio, ad un decisivo incremento delle relative potenze in funzione dei maggiori diametri di scavo, degli ammassi rocciosi e del tipo di macchina. A tali incrementi hanno corrisposto eccellenti prestazioni delle macchine in termini di elevate produzioni in situazioni geologiche favorevoli;
- il raggiungimento di alti valori di coppia, ottenuto anche mediante la realizzazione di frese coassiali come spiegato al paragrafo 10 e rappresentato nella fig. 47, ha interessato soprattutto le macchine EPB. In tal modo è stato possibile affrontare scavi di grande diametro, maggiore di 9 metri, e movimentare all'interno della camera di lavoro grandi volumi e masse di terreno scavato. A titolo indicativo si è passati da valori di

coppia di 4000-5000 kNm per diametri di 5-6 m a 25.000-30.000 kNm per diametri di 10-11 m, sino a 125.000 kNm per diametri di 15 m;

- nell'Hydroshield il mescolamento in camera di scavo interessa una massa di fango e di detriti, di peso specifico inferiore (circa 1,1-1,2 t/m³) rispetto al materiale mescolato dall'EPB (p.sp. circa 1,5-1,6 t/m³), per cui la coppia occorrente risulta inferiore. Si può stimare approssimativamente che la coppia, volendo fare un confronto con l'EPB, oscilla intorno a valori del 60-70% rispetto a quest'ultima, anche se ovviamente dipende sempre dalle caratteristiche geologiche dei terreni;
- nelle macchine da roccia i valori di coppia non raggiungono quelli dell'EPB, il concetto per tali macchine è legato più alla penetrazione e frantumazione della roccia, che alla movimentazione del materiale. E' la spinta esercitata dalla testa fresante il parametro principale, che dipende dal numero dei cutters montati e quindi dalla massima spinta che gli utensili possono sopportare. Come si è visto al paragrafo 4 il valore di spinta massima sopportabile dai cutters è pari a 300 kN, pertanto la spinta totale è determinata dal prodotto di tale valore per il numero dei cutters applicati.

Un'idea rappresentativa sugli ordini di grandezza in gioco, delle produzioni e dell'organizzazione di un cantiere per la realizzazione di una galleria in scavo meccanizzato può essere fornita dai dati relativi alla costruzione delle gallerie del passante ferroviario di Bologna ultimate nel 2006 (foto 13). Di seguito sinteticamente alcune delle principali caratteristiche:

Dati geometrici:

- due gallerie parallele di circa 5,9 km di lunghezza;
- diametro di scavo m 9,40;
- coperture variabili da 5 a 15 m.

Terreni:

- natura alluvionale parzialmente in falda.

Tipologia e caratteristiche delle macchine:

- macchine di scavo tipo EPB Lovat;
- lunghezza scudo m10,70;
- max pressione operativa 3,5 bar;
- max velocità di avanzamento cm/min 8;
- spinta totale max kN 100.000;
- coppia testa di scavo max kNm 20.000.

Rivestimento:

- anelli di calcestruzzo in elementi prefabbricati;
- numero elementi: 6 + la chiave;
- spessore cm 40;
- lunghezza anello m 1,50.

Produzioni:

- media giornaliera m 10;
 - max giornaliera m 36;
 - max settimanale m 200;
 - max mensile m 640.
- Periodo di scavo:*
- inizio luglio 2003;
 - fine maggio 2006.
- Dimensioni cantiere:*
- area complessiva m² 55.000 circa di cui:
 - per area pozzo di partenza m² 4.000 circa;
 - per area stoccaggio conci m² 40.000 circa;
 - per area intermodale (carico smarino su treni) m² 11.000.
- Organizzazione di cantiere:*
- attività di scavo per sette giorni a settimana su tre turni di 8 ore ciascuno;
 - personale addetto alle operazioni di galleria:
 - galleria frese addetti 152;
 - supporto esterno e logistico (piazzale, officine, magazzino, manovra treni) addetti 48.



Foto 13 – TBM-EPB per lo scavo delle gallerie ferroviarie del nodo di Bologna.

10. Lo scavo meccanizzato in Italia

Il processo di modernizzazione avviato nel nostro paese negli anni '60 ha interessato anche il campo delle infrastrutture di trasporto rendendo necessaria la realizzazione di collegamenti sempre più efficienti. In tale contesto si è assistito ad un incremento dei lavori in sotterraneo con la costruzione di metropolitane, gallerie stradali e ferroviarie sempre più lunghe realizzate anche in ambiti geologici difficili che caratterizzano il nostro sottosuolo. Tale

necessità ha stimolato lo sviluppo delle tecnologie nello scavo in sotterraneo aventi diverse finalità, come la riduzione dei tempi e dei costi, l'industrializzazione delle fasi operative, l'aumento delle condizioni di sicurezza per gli addetti ai lavori. Ma mentre l'incremento della costruzione di gallerie in scavo tradizionale è stato molto forte, grazie allo sviluppo di tecniche di consolidamento del fronte e del cavo, di cui l'Italia si può considerare uno dei principali leader nel campo, non così è stato per lo scavo meccanizzato, come invece è avvenuto negli altri paesi industrializzati, se si eccettua il campo delle gallerie di piccolo-medio diametro.

Nel nostro paese sino agli inizi degli anni '90 la tecnica dello scavo meccanizzato per grandi diametri è stata limitata a poche applicazioni, talvolta utilizzata in via eccezionale là dove fallivano le tecniche di scavo in tradizionale (per es. per la galleria ferroviaria Paola - Cosenza, le gallerie ferroviarie della cintura di Roma e la galleria ferroviaria S. Vito Chietino sull'Adriatica), incontrando tuttavia grandi difficoltà durante la realizzazione (galleria Paola - Cosenza) o addirittura fallimenti (galleria S. Donato sulla direttissima RM-FI).

Anche nel campo delle gallerie metropolitane l'impiego è stato limitato a qualche prolungamento di linea (linee A e B della metropolitana di Roma), privilegiando invece altre tecniche di scavo come il "cut and cover".

Infine nel campo delle gallerie stradali l'unico esempio di applicazione di una macchina scudata è avvenuta per la costruzione della galleria S. Pellegrino, dove peraltro la macchina ha eseguito l'allargo del cunicolo pilota anch'esso realizzato in scavo meccanizzato.

Una delle principali ragioni del modesto utilizzo di tale tecnica può essere spiegata, come accennato al paragrafo 8, con il fatto che il nostro paese possiede caratteristiche geomorfologiche particolari. I terreni presentano infatti una eterogeneità molto ampia e problematiche di particolare complessità tali da privilegiare, per la realizzazione di opere in sotterraneo, lo scavo in tradizionale, ritenuto più flessibile e adattabile agli eventuali cambiamenti delle condizioni geotecniche, rispetto allo scavo meccanizzato considerato, allora, ancora in fase sperimentale.

A questa limitazione si aggiungevano gli importanti investimenti che tale tecnica richiedeva, la difficoltà da parte del Committente di riconoscere un equo compenso dello scavo meccanizzato che invece veniva assimilato ad un qualsiasi altro mezzo impiegato dall'Appaltatore, l'assunzione di rischi solo da parte dell'Impresa difficilmente valutabili in via preventiva e talvolta ritenuti eccessivi per cui la scelta di utilizzare la macchina veniva talvolta considerata un azzardo. Inoltre l'approccio progettuale si basava su scarsi approfondimenti geognostici, talvolta affidandosi all'esperienza e alla sensibilità dei minatori, senza cioè un adeguato studio geologico-geotecnico in grado di definire il comportamento dell'ammasso roccioso e quindi le condizioni di lavoro della macchina, per cui non

erano infrequenti gli insuccessi che determinavano pesanti aggravii finanziari per l'Impresa oltre che divenire oggetto di lunghi contenziosi tra Committente ed Appaltatore. Inoltre c'è da dire che all'epoca la scelta della macchina veniva fatta spesso dall'Appaltatore, che talvolta arrivava a tale decisione solo di fronte a grandi difficoltà di avanzamento riscontrate durante i lavori in scavo tradizionale, a parte i lavori per le gallerie metropolitane per le quali la scelta della macchina avveniva già in fase progettuale per la necessità di sottopassare edifici e ridurre al minimo i fenomeni di subsidenza in superficie.

Come già accennato nel campo dei piccoli-medi diametri invece lo scavo meccanizzato trova, già a partire dagli anni '70, applicazione su larga scala e con buon successo per la costruzione di gallerie idrauliche, di servizio e cunicoli esplorativi, realizzati prevalentemente in ammassi rocciosi idonei per l'impiego di frese da roccia. Solo per conto dell'Enel, che ha il merito di aver introdotto per prima in Italia l'uso di TBM (galleria Suviana-Brasimone), sono stati realizzati, in quel periodo, oltre 100 km di gallerie con frese.

Negli anni '90 la necessità di migliorare ed incrementare le infrastrutture viarie per far fronte alla forte crescita della domanda di trasporto, di persone e merci, porta allo sviluppo di nuovi progetti di metropolitane e di linee ferroviarie, dove le opere sotterranee assumono un rilievo importante.

E' in questi anni che si assiste ad un risveglio dell'interesse per lo scavo meccanizzato da parte dei principali attori del processo produttivo e cioè Committente, Progettista e Impresa.

Tale linea di cambiamento porta allo sviluppo di numerosi progetti in cui si prevede l'impiego di macchine di grande diametro.

L'incremento di tale metodo a partire dal 1990 è evidenziato nel grafico (fig. 42) che riporta i km di gallerie per infrastrutture viarie realizzate con scavo meccanizzato a partire dagli anni '70 sino agli inizi degli anni '90 e nel periodo successivo sino ad oggi.

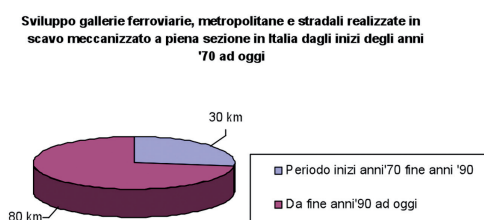


Fig. 42 – Km di gallerie realizzate in scavo meccanizzato a piena sezione.

Dal 1999 ad oggi sono stati realizzati o sono in corso di realizzazione circa 80 km di gallerie con TBM scudate, di cui più di 40 km sono gallerie ferroviarie.

Nelle due tabelle successive sono riportate le principali opere realizzate rispettivamente nei due periodi presi in esame.

Le principali ragioni di tale evoluzione sono:

- progresso della tecnologia dello scavo meccanizzato da parte dell'industria del settore che ha sviluppato: macchine sempre più grandi, potenti e affidabili per lo scavo sia in roccia che nei terreni sciolti in falda, macchine di tipo combinato in grado di operare in un più ampio campo di situazioni geologiche e di diametri;
- miglioramento delle prestazioni delle macchine e quindi riduzione dei tempi e dei costi di costruzione che rendono il sistema competitivo rispetto allo scavo in tradizionale;
- miglioramento dell'approccio progettuale mediante il coinvolgimento di più figure specialistiche, dal geologo al geotecnico, dall'esperto di macchine allo strutturista e lo sviluppo di metodiche progettuali nel campo della geotecnica e geomeccanica atte a definire i comportamenti dei terreni e degli ammassi rocciosi;
- miglioramento della capacità di indagine geognostica preventiva mediante indagini dirette ed indirette;
- nuove norme legislative e regolamentari che hanno modificato il sistema di appalto delle opere pubbliche e nelle quali assume importanza centrale il ruolo del progettista a garanzia della buona esecuzione del progetto.

Si assiste in particolare ad un maggiore coinvolgimento ed attenzione delle Committenze nella predisposizione dei progetti fino anche ad arrivare, per le opere in sotterraneo, all'individuazione del metodo di scavo più idoneo e, per quanto riguarda lo scavo meccanizzato, alla definizione del tipo di macchina, delle specifiche tecniche e dei requisiti principali. Altri elementi innovativi di questo nuovo approccio sono una distribuzione più equilibrata tra Committente e Appaltatore dei rischi connessi alla scelta sulla metodologia di scavo. Il tutto finalizzato a realizzare le opere nei tempi e nei costi prefissati e con il minor motivo di contenzioso.

11. L'esperienza ferroviaria in Italia

Significativo appare in tal senso l'impulso dato dalle Ferrovie per la progettazione diretta e l'appalto di gallerie ferroviarie previste con la tecnica dello scavo meccanizzato a piena sezione con fronte "pressurizzato" o "aperto".

A partire dal 1988 le Ferrovie hanno progettato, appaltato e "realizzato" numerose opere in sotterraneo previste con tale modalità di scavo per circa 30 km. In tali progetti, redatti a livello sia definitivo sia esecutivo, vengono tra l'altro individuate le tipologie di macchine da adottare in relazione sia alle condizioni ambientali che alle caratteristiche geologiche-geotecniche dei terreni da attraversare, vengono indicati i requisiti e le specifiche tecniche minime delle macchine stesse, le tipologie di monitoraggio per il controllo della subsidenza, i parametri principali di

GALLERIE REALIZZATE IN SCAVO MECCANIZZATO - PERIODO ANNI '70-'90

TABELLA 1

<p>A) Gallerie ferroviarie</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Castiglione in Teverina – direttissima FI-RO 2. Santomarco – Linea Paola – Cosenza 3. Cintura di Roma (Aurelia, Pamphjli, Maccarese, Smistamento – primo scudo Hydroschild a grande diametro in Italia) 4. Passante ferroviario di Milano (primo utilizzo di EPB in Italia) <p>B) Gallerie metropolitane</p> <ol style="list-style-type: none"> 5. Roma: linea A tratte Colli Albani-Termini e P. le Flaminio - Termini 6. Roma: linea B tratto Termini - Rebibbia

TABELLA 2
GALLERIE IN SCAVO MECCANIZZATO REALIZZATE E IN CORSO DI REALIZZAZIONE A PARTIRE DAGLI ANNI '90 AD OGGI

<p>Realizzate</p> <p>A) Gallerie ferroviarie</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. S. Giovanni (CH)- linea adriatica con TBM Hydroschild 2. Ginori (Sesto Fiorentino) - galleria di servizio della galleria ferroviaria del Vaglia con TBM-DS da roccia 3. Monte Zucco (Calalzo -BL) con TBM-EPB da roccia 4. Quattro Venti (Roma) con TBM-EPB 5. Passante ferroviario AV (BO) – con due TBM-EPB 6. Lamezia Terme - Catanzaro Lido: n. 2 gallerie a singolo binario realizzate con l'impiego di una TBM-EPB 7. Castellanza (MI) con TBM-EPB <p>B) Gallerie metropolitane</p> <ol style="list-style-type: none"> 8. Roma: prolungamento linea A tratto Battistini -Valle Aurelia con TBM- Hydroschild 9. Genova: realizzazione gallerie profonde con l'impiego di una TBM-EPB 10. Torino: realizzazione gallerie profonde con l'impiego di 3 TBM-EPB 11. Milano: prolungamento linea 1 da Rho fiera a Pero con l'impiego di una TBM-EPB <p>C) Gallerie stradali</p> <ol style="list-style-type: none"> 12. Brescia: allargo foro pilota per la realizzazione galleria stradale con TBM-SS da roccia 13. Trento: galleria stradale provinciale Martignano a doppia canna con una TBM-SS da roccia <p>In corso di realizzazione</p> <p>A) Gallerie ferroviarie</p> <ol style="list-style-type: none"> 14. S. Lorenzo – Andora : n. 5 gallerie a doppio binario per il raddoppio della linea GE-Ventimiglia con l'impiego di una TBM-SS da roccia 15. Fortezza (BZ): cunicolo esplorativo per la futura galleria di base del Brennero con TBM-DS da roccia <p>B) Gallerie metropolitane</p> <ol style="list-style-type: none"> 16. Napoli: gallerie profonde con l'impiego di 2 TBM-EPB 17. Brescia: gallerie profonde con l'impiego di una TBM-EPB 18. Roma: gallerie profonde per la realizzazione delle linee B1 e C con, al momento, 4 TBM-EPB 19. Milano: linea 5 con l'impiego di una TBM-EPB 20. Torino: prolungamento metropolitana con l'impiego di una TBM-EPB

macchina da tenere sotto controllo e le prescrizioni minime da rispettare per una corretta modalità di scavo.

Tra i progetti realizzati e/o in corso di esecuzione si ricordano:

- galleria dei Quattro Venti (realizzata);
- gallerie del nodo di Bologna (realizzate);
- gallerie Lamezia Terme-Catanzaro Lido (realizzate);
- galleria di Monte Zucco (realizzata);
- raddoppio Genova-Ventimiglia (in corso di realizzazione);
- nodo di Palermo (appaltata).

Fra i progetti definitivi, che a breve dovrebbero andare in fase esecutiva o in fase di gara, meritano attenzione il passante ferroviario di Firenze dove sono previste due gallerie parallele di ca. 5 km di lunghezza da realizzarsi con due scudi con fronte pressurizzato e la galleria di Cefalù di circa 6 km di estensione e diametro esterno di 12,50 m prevista in scavo meccanizzato con una EPB/roccia dual-mode.

Infine nell'ambito della legge obiettivo sono state progettate, a livello di Progettazione Preliminare, numerose opere sotterranee dove l'impiego di tale tecnica è prevista per complessivi 150 km circa.

Le Ferrovie, dunque, sono state senz'altro tra le prime Committenti in Italia ad impegnarsi fortemente nello sviluppo di opere in sotterraneo, prevedendo in particolare l'impiego dello scavo meccanizzato a piena sezione su larga scala, maturando importanti e significative esperienze sul campo.

12. Lo stato dell'arte oggi (lo sviluppo della tecnologia)

Negli ultimi anni si possono distinguere due linee di sviluppo della tecnologia dello scavo a piena sezione con TBM, una europea indirizzata verso le TBM scudate a grande diametro e le macchine combinate e l'altra giapponese indirizzata verso tipologie speciali di TBM.

TBM grandi diametri

Per quanto riguarda le dimensioni dei tunnel realizzati con TBM si è assistito, a partire dalla metà degli anni '90, ad una vera e propria corsa al "gigantismo" raggiungendo diametri sino ad ieri impensabili. Ciò era legato ai limiti tecnologici per le dimensioni massime degli organi principali (cuscinetto e corona) ed ai fenomeni di instabilità e convergenza che aumentano di intensità all'aumentare del diametro.

Fino a 20 anni fa il limite superiore di scavo era di 10-11 m. I primi scudi di quest'ordine di grandezza sono stati gli Slurry e gli Hydroshield in quanto per questo tipo di macchine le potenze di coppia richieste sono generalmente inferiori rispetto alle altre tipologie di scudi. Infatti mentre per gli Slurry la testa fresante deve mescolare una miscela di detriti e fanghi la cui densità media non supera 1,2 t/mc, negli EPB la testa deve mescolare una vera e propria pasta che raggiunge densità dell'ordine di 1,5-1,6 t/mc.

Successivamente sono state sviluppate TBM scudate da roccia sino a 12 m di diametro o poco più. In particolare in Svizzera si è assistito, a partire dagli anni '90 in poi, ad un diffuso impiego di TBM da roccia di grande diametro per la realizzazione di numerose gallerie ferroviarie e stradali in ammassi rocciosi prevalentemente omogenei.

Nel 1996 in Giappone per la costruzione della galleria stradale subalvea nella baia di Tokio, progetto Aqualine (fig. 43), composta da due tunnel paralleli di circa 10 km di lunghezza, furono impiegati ben 8 Slurry da 14,14 m (foto 14). Fu l'avvio dell'era dei tunnel di grande diametro realizzati con TBM scudate, e in particolare in Europa si è assistito ad un intenso sviluppo e applicazione in tal senso. Infatti a partire dal 1997 sono state realizzate in Europa alcune gallerie stradali e ferroviarie del diametro di 14

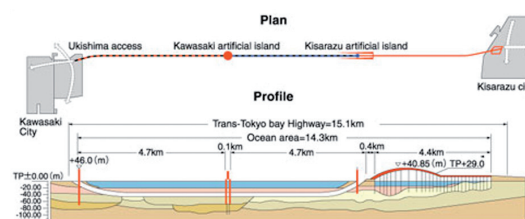


Fig.43 da [13] – Pianta e profilo progetto Aqualine.

m con TBM Hydroshield. Tra le opere più significative si ricordano il quarto tunnel stradale sotto l'Elba, eseguito con un HS di 14,17 m dotato di doppia fresa coassiale (foto 15), poi riutilizzato per la galleria Lefortovo a Mosca, e la galleria ferroviaria a doppio binario Grone Hart in Olanda (foto 16). In seguito sono state sviluppate anche macchine EPB di diametro via via sempre più grande sino a raggiungere i 12,50 delle macchine per la realizzazione della metropolitana di Barcellona.

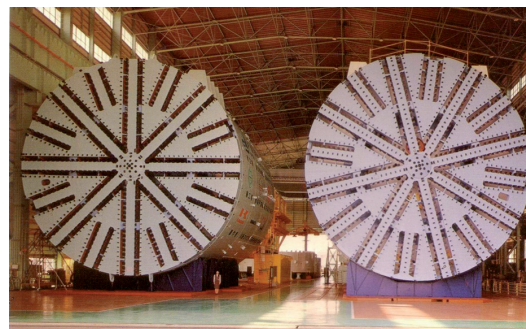


Foto 14 – Slurry Ø 14,14 m per lo scavo dell'Aqualinetunnel (Baia di Tokyo-Giappone).

Recentemente è stato superato il limite dei 15 m sia per macchine del tipo EPB (15,20 m) che del tipo Hydroshield (15,43 m).

Le prime sono state impiegate per la realizzazione di due gallerie parallele, di circa 4,2 km, di un raccordo autostradale nella città di Madrid. Si tratta di due EPB di 15,20 m di diametro, una del costruttore di scudi Herrenknecht (Germania), foto 17, e l'altra del costruttore di scudi Mitsubishi-Duro Felguera (Giappone - Spagna). La sezione interna dei



Foto 15 - Hydroschild Ø 14,14 m per lo scavo dell'Elbtunnel (Amburgo-Germania).



Foto 16 - Hydroschild Ø 14,87 m per lo scavo della galleria Groene Hart (Olanda).

tunnel, del diametro utile di 13,45 m, permette di ospitare una strada a 3 corsie di marcia; le due canne sono connesse da by-pass pedonali ogni 200 m e da by-pass carrabili ogni 600 m. La zona interessata dalle gallerie è intensamente urbanizzata, circa il 45% del tunnel è ubicato sotto i fabbricati ed il resto sotto un'importante viabilità stradale.

Le coperture variano da 25 a 75 m. Entrambe le gallerie sono terminate.

Interessanti le caratteristiche tecniche della macchina tedesca che presenta alcune soluzioni tecniche innovative, in particolare:

- due teste coassiali rotanti a velocità diverse e in senso

contrario l'una rispetto all'altra (ma all'occorrenza possono girare entrambe nello stesso senso) per compensare gli elevati valori di coppia occorrenti, difficilmente raggiungibili con un'unica testa fresante. La testa fresante più piccola può traslare longitudinalmente in avanti per 40 cm;

- tre coclee per l'estrazione del materiale di scavo, di cui due a servizio della testa più grande, per garantire elevate produzioni di scavo.



Foto 17 - Madrid EPB Ø 15,20 m.

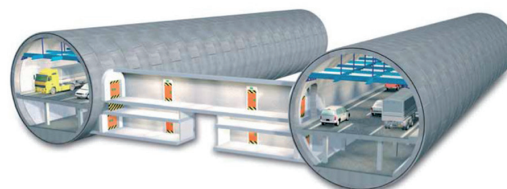


Fig.44 - Madrid sez. trasversale delle gallerie.



Fig. 45 - Grandezze e potenze in gioco.

La configurazione a doppia testa fresante coassiale, tipica della filosofia Herrenknecht per scudi di grande diametro, deriva dalla necessità di frazionare gli elevati valori di coppia occorrenti, per i quali, qualora si utilizzasse un'unica testa fresante, servirebbero motori di potenza

molto elevata e in numero e dimensioni tali da non essere compatibili con gli spazi disponibili, a prescindere poi dalle dimensioni e caratteristiche eccezionali del cuscinetto principale. Tale configurazione permette inoltre un migliore controllo e correzione del rollo dello scudo.

La determinazione della “Coppia necessaria” è difficile da calcolare e si basa essenzialmente sull’esperienza diretta acquisita dai costruttori di macchine nel corso della realizzazione di vari progetti. Formule approssimate si possono dedurre dalla letteratura secondo la relazione (Krause) $M_t = \alpha D^3$ (evidenziato nel grafico di fig. 46) tra momento torcente e diametro dello scudo elevato al cubo, dove α è un fattore che tiene conto delle condizioni geologiche presenti.

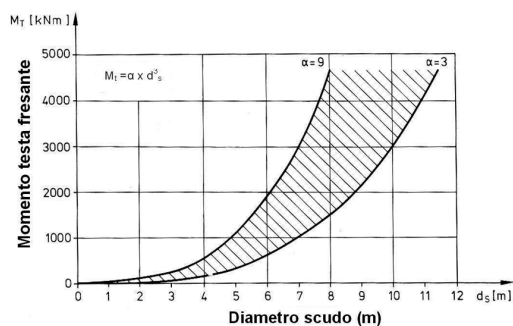


Fig. 46 da [7] - Grafico di Krause.

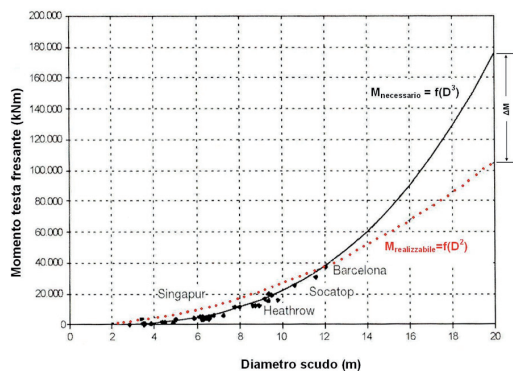


Fig. 47 - Sviluppo del momento torcente per EPB.

Secondo il costruttore HERRENKNECHT, la tecnologia attuale permette di realizzare valori di coppia (“Coppia realizzabile”) funzione solo del quadrato del diametro di scavo, per cui incrementando il diametro da un certo valore in poi (~12 m) i valori di “Coppia necessaria” superano quelli tecnicamente realizzabili (nel grafico di fig. 47 è evidenziato tale aspetto). Tale limitazione tecnica viene quindi superata con l’adozione di teste fresanti coassiali.

Le dimensioni e i valori prestazionali di alcuni componenti della macchina di Madrid sono effettivamente gigan-

tesche. Tuttavia non bisogna dimenticarsi che ogni nuovo progetto pone nuove problematiche per il superamento di nuove soglie tecniche, nel caso in questione legate all’incertezza del comportamento della TBM di fronte a dimensioni di scavo così ampie in contesti difficili e alla consapevolezza di possibili rischi che l’esecuzione di questo tipo di opere comporta. Per cui la scelta può portare, oltre all’adozione di soluzioni sperimentali, anche al sovradimensionamento dei principali componenti della macchina. Anche l’impegno finanziario per l’acquisto di tali macchine è elevato, dell’ordine di 40 mil. di € e può essere giustificato solo da un ampio programma di investimenti da parte della Committenza che garantisca la possibilità di riutilizzo dello scudo per molti km ancora. Nel caso in esame è stato infatti previsto il loro riutilizzo per altri 6 km di galleria.

A Hong Kong sono terminati gli scavi per la costruzione di due tunnel paralleli. Per la realizzazione di tali tunnel sono stati utilizzati due Hydroshield di 15,43 m di diametro (foto 18) della soc. Herrenknecht che al momento risultano essere gli scudi più grandi del mondo.



Foto 18 - Hydroshield Ø 15,43 m Hong Kong.

Infine anche per le macchine aperte non scudate è stato superato il limite dei 14 m per mezzo di una macchina Robbins da 14,4 m per roccia dura per lo scavo di una galleria idraulica a Niagara Falls (foto 19).



Foto 19 da [12] - TBM aperta da roccia Ø 14 m Niagara Falls.

TBM speciali

Se l'America ha dato l'avvio all'industrializzazione degli scavi con TBM prevalentemente da roccia, spetta al Giappone il merito di aver sviluppato la tecnologia delle TBM scudate con il supporto del fronte attivo. La tecnologia degli Slurry prima e degli EPB dopo è stata infatti introdotta dal Giappone, la tecnologia dell'Hydroshield invece è stata sviluppata dai tedeschi. Il Giappone rimane tuttavia il paese che vanta il maggiore progresso tecnologico nel campo dello sviluppo delle varie tipologie di TBM. A prescindere dall'elevata automazione raggiunta nelle TBM e dall'elevato numero di macchine fabbricate, di gran lunga maggiore di quelle costruite nell'area occidentale, Europa ed America, è nell'innovazione tecnologica e sperimentazione di nuovi modelli di TBM che il Giappone si pone all'avanguardia.

Di seguito sono brevemente illustrate alcune tipologie di TBM speciali prodotte dall'industria giapponese.

Scudi Multicircolari (Multi circular Face Shield Method)

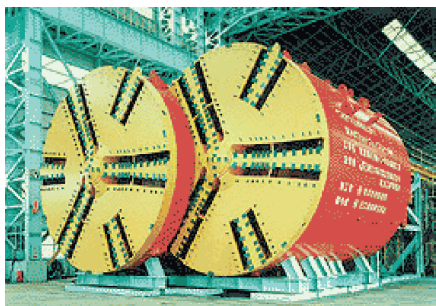


Foto 20 da [11] – Metropolitana di Keyo – Kyobashi Tunnel.



Foto 21 da [11] – Kyobashi Tunnel sez. 12.19m x 7.12m.

Scudo doppio (DOT Shield)

Si tratta di due scudi circolari operanti o a contropressione di fanghi o a contropressione di terra parzialmente compenetrati (foto 20 e 21) che operano contemporaneamente sullo stesso piano realizzando una galleria a binocolo (foto 22 e 23).

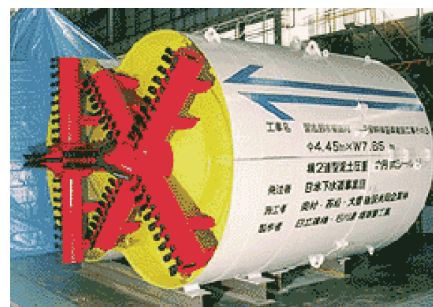


Foto 22 da [11] - Metropolitana di Hiroshima.

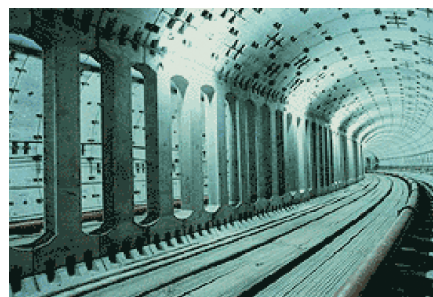


Foto 23 da [11] - Metropolitana di Hiroshima: Lung. 850 m; Coperture: da 8.3 a 5.0 m; Terreni: limi sabbiosi, limi e argille; sez. 10.69m x 6.09m.

Scudo triplo (Triple Circular Face Shield Tunnel)

Si tratta di tre scudi circolari parzialmente compenetrati (foto 24), operanti o a contropressione di terra o a contropressione di fango, che operano contemporaneamente sullo stesso piano realizzando grandi sezioni di scavo come quelle per es. necessarie per le stazioni della metropolitana (foto 25).



Foto 24 da [11] - Scudo triplo.



Foto 25 da [11] – Stazione di Osaka Business Park - Sezione 17.44 m di larghezza x 8.85 m di altezza.

Scudo multiplo a sezione rettangolare (Wagging Cutter Shield Tunneling Methode)

Si tratta di scudi multipli a contropressione di terra per la realizzazione di gallerie a binocolo di sezione rettangolare (foto 26).

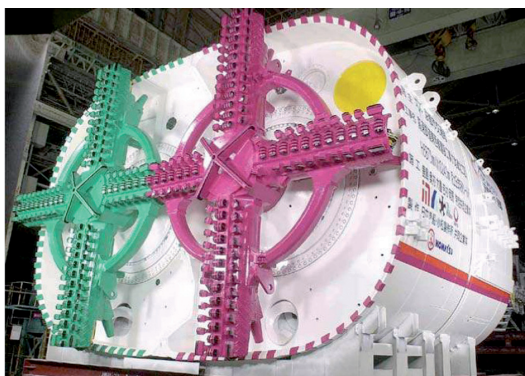


Foto 26 da [11] - Kyoto: linea metropolitana; sezione 9.9m x 6,5 m; scudo EPB: lunghezza: 120 m; massima copertura: 7.0 m.

Scudi multicircolare per sezioni verticali e orizzontali (Horizontal e Vertical Variation Shield Method)

Si tratta di scudi circolari a contropressione di fango o terra per la realizzazione simultanea di tunnel multipli paralleli sullo stesso piano (orizzontali) o sovrapposti (verticali) (fig. 48a e 48b e foto 27-28), che si possono separare e continuare lo scavo su tracciati differenti (fig.49).

DPLEX Shield Method (Developing Parallel Excavating Shield Method)

Scudi a contropressione di terra per lo scavo di gallerie per sezioni di qualsiasi forma mediante l'impiego di teste frentanti con movimentazione eccentrica (foto 29-30-31, fig.50).

Scudo Ellittico (Elliptical Excavation Face Shield Method)

Si tratta di uno scudo a contropressione di terra (foto 32-33 e fig.51-52) in cui l'azione combinata di una fresa

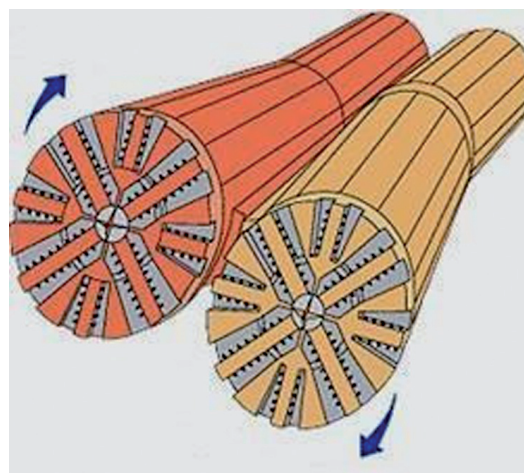


Fig. 48a da [11] – Tunnel paralleli sullo stesso piano.

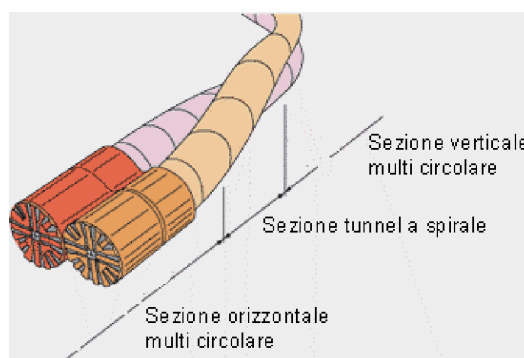


Fig.48b da [11] – Tunnel paralleli sovrapposti.

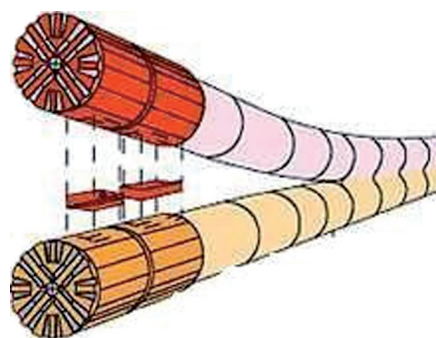


Fig.49 da [11] – Separazione tra i due scudi.

circolare e di utensili supplementari permette lo scavo di una sezione ellittica.



Foto 27 da [11] - Costruzione collettore fognario di Minami-dai. Lunghezza: 154 m; Diametro scudi: Scudo superiore: 3,29 m; Scudo inferiore: 2,89 m; Tipologia scudi: Slurry.



Foto 28 da [11] - Costruzione della stazione metropolitana di Roppongi linea n. 12 - Lunghezza: 118 m; Diametro scudi: Scudi destro e sinistro: 6,56 m; Scudi inf. e sup.: 1,72 m; Dimensioni sistema: 13,18 x 7,06; Tipologia scudi: Slurry.

Scudi a giunto sferico (Rotative Shield Method)

- *Continuous vertical-to-horizontal shield machine*

Si tratta di una TBM a contropressione di fango che è costituita da uno scudo principale, per la realizzazione di un pozzo, che contiene un giunto sferico in cui è alloggiato uno scudo secondario (foto 34-35). Quando lo scudo principale ha raggiunto la profondità prevista, il giunto sferico viene ruotato di 90° e lo scudo secondario inizia la realizzazione della galleria (fig.53). Tale configurazione può anche essere usata per la realizzazione di tunnel che si intersecano tra loro ad angolo retto.

- *Spherical Shield TBM*

Si tratta di una TBM Slurry con testa fresante incorporata in un giunto sferico alloggiato all'interno del mantello (fig.54 e foto 36a e 36b). Il sistema consente la rotazione a

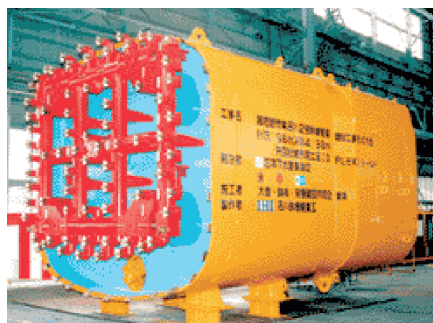


Foto 29 da [11] - Narashino: Costruzione del tunnel canale Kikutagawa. Scudo EPB rettangolare dimensioni: 4,38 m x 3,98 m.



Foto 30 da [11] - Tokio: ricostruzione di canalizzazioni; diametro: 3,48 m.



Foto 31 da [11] - Tokio: Costruzione linea metropolitana n. 11: diametro: 9,6 m.

180° della testa fresante all'interno del mantello per effettuare gli interventi di manutenzione, riparazione e sostituzione degli utensili di scavo. In tal modo si assicurano condizioni di lavoro in massima sicurezza evitando di operare nella camera di scavo in condizioni iperbariche.

Fase 1: Avanzamento dello scudo

Fase 2: Configurazione di manutenzione. I bracci telescopici delle razze della testa fresante vengono retratti per

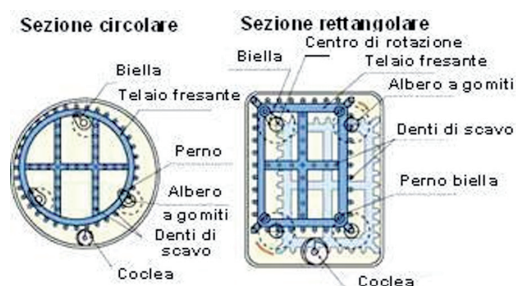


Fig. 50 da [11] - Tipologia di sezioni di scavo circolari e rettangolari che si possono realizzare con il DPLEX Method.



Foto 32 da [11] - Scudo articolato dims. 4.66 m x 3.16 m.



Foto 33 da [11] - Shin-ohmori: Condotta fognaria L=565 m, raggio di curvatura = 20 m.

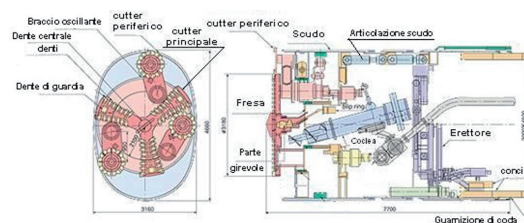


Fig. 51 da [11] - Schema cinematico testa fresante e sezione longitudinale dello scudo.

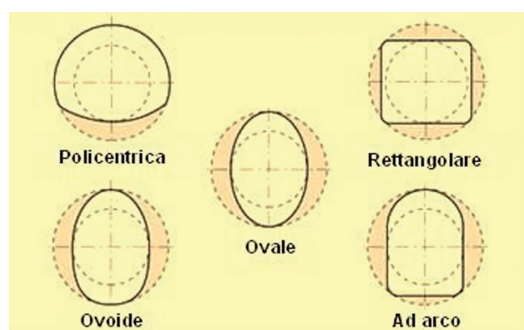


Fig. 52 da [11] - Possibilità di realizzare varie sezioni di scavo non circolari.

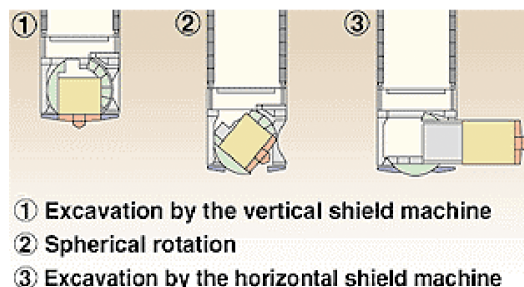


Fig. 53 da [11] - Schema impiego scudo a giunto sferico per realizzare pozzi verticali e tratti orizzontali in continuità.

consentire la rotazione di 180° del sistema testa-sfera all'interno dello scudo. La testa fresante, alloggiata all'interno della sfera, risulta in tal modo completamente isolata dal fronte e pertanto tutte le lavorazioni possono essere eseguite in sicurezza a pressione atmosferica.

Scudi per l'ampliamento di gallerie (Enlargement Shield Tunneling Method)

Si tratta di scudi speciali di tipo Slurry per realizzare sezioni allargate in corrispondenza delle stazioni interrate della metropolitana o aree di emergenza nelle gallerie stradali. Nelle figg. 55-56 è riportato il principio di applicazione del sistema di allargo.



Foto 34 da [11] - Costruzione condotta fognaria di Bandai-Hannan (Vertical-to-horizontal shield machine). Scudo verticale Slurry shield: Ø 5.90 m; Scudo orizzontale EPB: Ø 4.20 m.

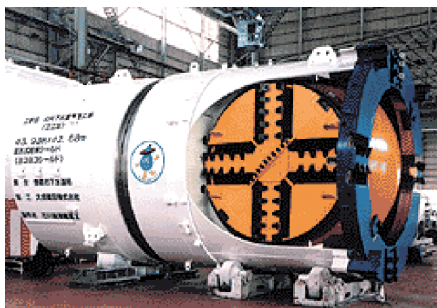


Foto 35 da [11] - Costruzione condotta fognaria di Shimoji (Horizontal-to-horizontal shield machine). Diametro scudo principale: 3.93 m; Diametro scudo piccolo: 2.68 m; Scudo Slurry.

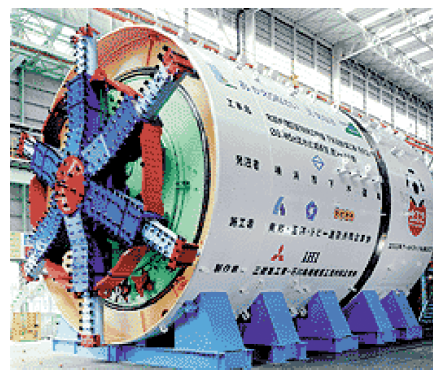


Foto 36a da [11] - Scudo sferico.

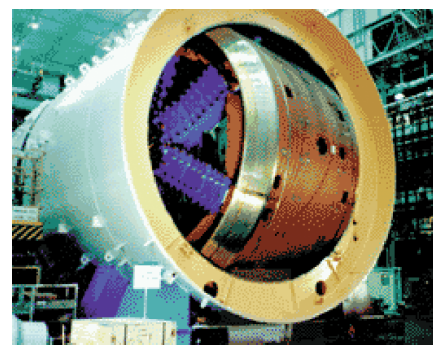


Foto 36b da [11] - Scudo sferico per la costruz. della condotta fognaria di Nippa Suehiro; lunghezza tunnel 4435 m; Tipologia Slurry; Diametro scudo 9.45 m.

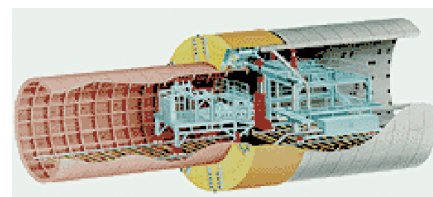


Fig. 55 da [11] - Scudo slurry per l'ampliamento di gallerie.

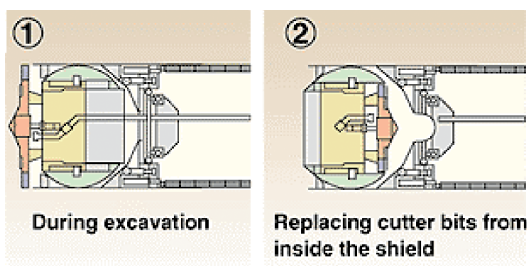
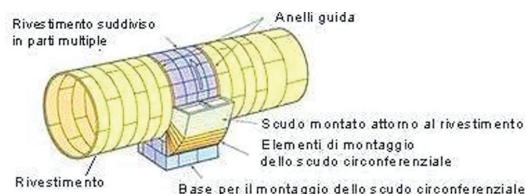


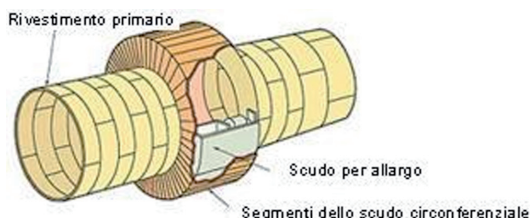
Fig. 54 da [11] - Fasi.

13. Conclusioni

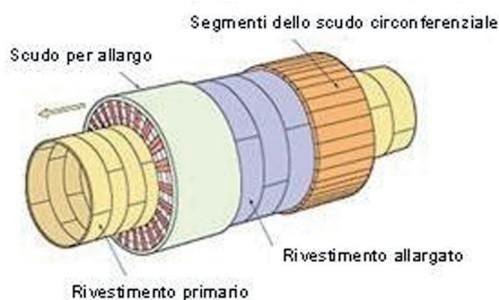
Come si è visto l'industria offre oggi un'ampia gamma di macchine a piena sezione per lo scavo delle gallerie in grado di soddisfare in gran parte i requisiti richiesti dai progettisti e imprese. Pur ancora in presenza di alcuni limiti tecnologici che dipendono principalmente dal mezzo in cui si opera, non sempre omogeneo e prevedibile nel suo comportamento, la potenzialità di applicazione della tecnologia di scavo con macchine a piena sezione si è enormemente accresciuta in questi ultimi anni rendendo questa metodo-



Fase 1 – Scavo a tergo, previo consolidamento del terreno, per il montaggio dello scudo speciale. (Costruzione sotto l'arco rovescio di una base per il montaggio dello scudo speciale attorno al rivestimento della galleria corrente).



Fase 2 - Assemblaggio dello scudo speciale per l'allargamento della galleria.



Fase 3 – Ampliamento galleria con scudo speciale.

Fig. 56 da [11] - Fasi di allargamento.

logia frequentemente preferibile ai metodi tradizionali, consentendo la realizzazione di importanti infrastrutture viarie in sottoterraneo. Si pensi ai grandi progetti come il tunnel sotto la Manica, realizzato interamente con macchine scudate, o le gallerie del Loetschberg (36 km) e del S. Gotardo (52 km) in Svizzera realizzate per circa il 40% della loro lunghezza con macchine da roccia non scudate. Tale risultato è frutto soprattutto di un approccio progettuale che privilegia un'attenta analisi sia del mezzo in cui si opera sia delle condizioni al contorno, che permette di definire correttamente la metodologia di scavo più idonea e che,

nell'eventualità di scelta di scavo meccanizzato, permette di definire i requisiti tecnici da rispettare nella costruzione di macchine scudate per lo scavo a piena sezione di gallerie.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M. BRINGIOTTI – “Guida al Tunnelling - L'evoluzione e la sfida”, pp. 128-186, Edizioni PEI, II edizione 2003.
- [2] G. CARRIERI – “Linee guida per la scelta delle TBM – Convegno su scavo meccanizzato integrale di gallerie”, pp. 1-10, Roma, 13-14-15 maggio 1997.
- [3] R. GRANDORI – “La TBM universale alle soglie del 2000 – Aspetti tecnici ed imprenditoriali”, Rivista Gallerie e grandi opere in Sottoterraneo n. 50.
- [4] C. GRANDORI, R. GRANDORI – “Progettazione ed esecuzione di gallerie di grande diametro a piena sezione – Tipologie di macchine disponibili e campo di applicazione – Interazione delle scelte tecnologiche con la progettazione dell'opera”, pp. 108-114, Società Italiana Gallerie, Giornata di studio sullo scavo meccanizzato integrale delle gallerie progettazione integrata e criteri di scelta delle macchine, Atti, Roma 22 giugno 1995.
- [5] M.A.M. HERZOG – “Elementare Tunnelbemessung”, pp. 1-18, Werner Verlag 1999 GmbH - Düsseldorf.
- [6] B. MAIDL, L. SCHMID, W. RITZ, M. HERRENKNECHT “Tunnelbohrmaschinen im Hartgestein”, pp. 2-12, 2001 Ernst & Sohn Verlag GmbH Berlin.
- [7] B. MAIDL, M. HERRENKNECHT, L. ANHEUSER – “Maschineller Tunnelbau im Schildvortrieb”, pp. 12-36 – 1995 Ernst & Sohn Verlag GmbH Berlin.
- [8] A. PASSARO, L. DE LIETO – “Attrezzature e cantieri per la costruzione di gallerie” pp. 255-268 – Liguori Editore S.r.l. 1992.
- [9] N. INNAURATO, P.P. ORESTE – “Esercitazione: calcolo prestazioni con macchina TBM”, Master in scavo meccanizzato delle gallerie (2003/2004) – Politecnico di Torino.
- [10] S. PELLIZZA – “Macchine e problemi nella costruzione delle gallerie con macchine di scavo a piena sezione”, pp. 3-9, Società Italiana Gallerie - Giornata di studio su scavo meccanizzato integrale delle macchine-progettazione integrata e criteri di scelta delle macchine, Atti, Roma 22 giugno 1995.
- [11] JTA- Shield Tunneling Association of Japan, Shield Method – Internet.
- [12] Tunnelbuilder, Internet.