

MAURIZIO TANZINI

**SCAVO MECCANIZZATO
DI OPERE SOTTERRANEE E GALLERIE**



SERVIZI GRATUITI ON LINE

Questo libro dispone dei seguenti servizi gratuiti disponibili on line:

- filodiretto con gli autori
- le risposte degli autori a quesiti precedenti.

L'indirizzo per accedere ai servizi è: www.darioflaccovio.it/scheda/?codice=DF7381

INDICE

Prefazione	Pag.	9
1 Introduzione	»	11
2 Scavo meccanizzato con TBM a piena sezione in ammassi rocciosi	»	13
2.1. TBM aperta a semplice schema di grippers	»	13
2.2. TBM aperta a doppio schema di grippers	»	14
2.3. TBM monoscudo	»	14
2.4. TBM a doppio scudo	»	15
2.5. Le TBM della Robbins	»	16
2.6. TBM della Herrenknecht per rocce dure	»	18
2.7. Sistema di backup	»	19
2.8. Utensili di scavo	»	21
2.9. Terminologia	»	26
3 Scavo meccanizzato con TBM a piena sezione nei terreni	»	29
3.1. Tipi di macchine	»	29
3.2. Scelta fra scudi a contropressione di fango (STMS) e a contropressione di terra (EPBS)	»	36
4 Progettazione delle TBM in ammassi rocciosi	»	39
4.1. Modelli di previsione della prestazione di frese a piena sezione	»	39
4.2. Sistemi di sostegno e rinforzo	»	52
4.3. Indagini in corso d'opera	»	57
5 Progettazione delle TBM in terreni	»	63
6 Progettazione delle TBM in rocce spingenti e collassanti	»	73
6.1. Schematizzazione del fenomeno del rilascio di materiale (loosening)	»	73
6.2. Schematizzazione del comportamento spingente (squeezing) dei terreni e delle rocce	»	76
7 Esempi di scavi con TBM	»	79
7.1. Lo scavo della galleria di Evinos-Mornos	»	79
7.2. La galleria idraulica della Val Viola	»	83
7.3. La galleria ferroviaria di Abdalasis	»	87
8 Scavi meccanizzati per sottoservizi (tecnologie Trenchless o Nodig)	»	93
8.1. Perforazione guidata (HDD = Horizontal Directional Drilling)	»	93
8.2. Microtunneling, spingitubo	»	94
BIBLIOGRAFIA	»	97
APPENDICE A – La galleria di base del San Gottardo		
A.1. Introduzione	»	99
A.2. L'iter progettuale	»	100

A.3.	Aspetti e problematiche di cantierizzazione.....	»	103
A.4.	Problematiche di scavo.....	»	104
A.4.1.	Organizzazione del lavoro.....	»	104
A.4.2.	Soluzioni progettuali.....	»	105
A.4.3.	La sicurezza in galleria.....	»	106
A.4.4.	Rispetto dell'ambiente.....	»	107
A.5.	Stato di avanzamento dei lavori.....	»	109
APPENDICE B – Interazione tra gallerie e versanti			
B.1.	Considerazioni generali.....	»	110
B.2.	Interazione fra gallerie e frane.....	»	116
B.3.	Riferimenti bibliografici.....	»	120
APPENDICE C – Scavi profondi a cielo aperto per gallerie artificiali e opere in sotterraneo			
C.1.	Introduzione.....	»	121
C.2.	Metodi costruttivi.....	»	123
C.3.	Tecnologie costruttive.....	»	125
C.3.1.	Diaframmi continui.....	»	125
C.3.1.1.	Generalità e attrezzature di scavo.....	»	125
C.3.1.2.	Il fango da perforazione.....	»	135
C.3.1.3.	Esecuzione del getto.....	»	135
C.3.1.4.	I giunti.....	»	137
C.3.1.5.	Pareti gettate prefabbricate.....	»	138
C.3.2.	Paratie di pali.....	»	147
C.3.3.	Paratie di micropali.....	»	150
C.3.4.	Paratia in jet-grouting.....	»	150
C.3.5.	Paratia con palancole.....	»	153
C.4.	Controllo della falda.....	»	153
C.5.	Riferimenti bibliografici.....	»	155
APPENDICE D – Progetto e verifica dei rivestimenti			
D.1.	Introduzione.....	»	156
D.2.	Determinazione della pressione agente sul rivestimento mediante formule di tipo empirico.....	»	158
D.2.1.	Determinazione del carico attivo verticale.....	»	158
D.2.2.	Determinazione della forza di sollevamento in arco rovescio.....	»	162
D.2.3.	Determinazione del carico attivo orizzontale.....	»	162
D.3.	Determinazione dello stato di sollecitazione del rivestimento.....	»	164
D.3.1.	Soluzioni analitiche in forma chiusa.....	»	164
D.3.2.	Metodo delle reazioni iperstatiche.....	»	171
D.4.	Richiami di scienza e tecnica delle costruzioni.....	»	174
D.4.1.	Geometria delle masse, momento statico e momenti del secondo ordine.....	»	174
D.4.2.	Flessione semplice, compressione o trazione e flessione.....	»	177
D.4.3.	Metodo delle tensioni ammissibili.....	»	181
D.4.4.	Stati limite ultimi e di esercizio.....	»	183

D.5. Verifiche strutturali delle sezioni	»	192
D.5.1. Prerivestimento	»	192
D.5.2. Rivestimento definitivo	»	197
D.6. Analisi del rivestimento in condizioni sismiche	»	205
D.7. Calcestruzzi e calcestruzzi proiettati per i rivestimenti delle gallerie	»	208
D.7.1. Rivestimenti in calcestruzzo	»	208
D.7.1.1. Cementi.....	»	208
D.7.1.2. Inerti	»	210
D.7.1.3. Acqua, armatura e impasti	»	211
D.7.1.4. Consistenza (slump test).....	»	211
D.7.1.5. Caratteristiche di resistenza	»	212
D.7.1.6. Prescrizioni per la durabilità dei calcestruzzi.....	»	214
D.7.1.6.1. Classi di esposizione ambientale	»	214
D.7.1.6.2. Requisiti minimi delle miscele in funzione del loro campo di impiego....	»	214
D.7.1.6.3. Copriferro	»	214
D.7.1.6.4. Calcestruzzi esposti ad attacco chimico (resistenza al dilavamento)	»	216
D.7.1.6.4.1. Attacco chimico da parte dei solfati	»	217
D.7.1.6.4.2. Reazioni alcali-aggregato	»	217
D.7.1.7. Esempio di specifica tecnica per rivestimenti in calcestruzzo.....	»	220
D.7.2. Calcestruzzo proiettato	»	220
D.8. Riferimenti bibliografici	»	224

PREFAZIONE

Com'è noto per quanto concerne le infrastrutture di trasporto, la situazione nella quale versa la nostra Unione Europea è particolarmente critica e alle carenze, che in alcuni paesi sono particolarmente accentuate, diventa sempre più impellente porre rimedio.

Il libro bianco della Commissione Europea del settembre 2001 sullo "Sviluppo futuro della politica comune dei trasporti" forniva dati chiari e tuttora attuali sulla congestione e saturazione dell'attuale sistema dei trasporti nell'Unione. Vengono individuate numerose cause, tra le quali è sottolineato, nell'ampio tracciato di connessione transeuropea, il ritardo nella realizzazione di infrastrutture alternative al trasporto stradale. Col risultato che sulle strade dell'Unione nel 1999 si sono avuti più di 40.000 morti accertati, il che significa la scomparsa, ogni anno, dell'equivalente di abitanti di città come Bayonne o Lodi.

Si tratterà quindi di realizzare opere di grande respiro, soprattutto nel campo ferroviario e per l'integrazione della rete idro-fluviale esistente, per le quali si renderà necessario realizzare centinaia di chilometri di gallerie. Ma anche il miglioramento e l'integrazione dell'attuale rete stradale comporterà la realizzazione di parecchie decine di chilometri di attraversamento in sotterraneo.

In quest'ottica, si dovrà perseguire un ulteriore sviluppo nella realizzazione degli scavi in sotterraneo, mediante macchine fresatrici a piena sezione (TBM = *Tunnel Boring Machine*), come peraltro già è avvenuto negli ultimi anni, nel corso dei quali si sono sviluppate tecnologie sempre più avanzate per poter affrontare scavi in terreni di diversa natura, con dimensioni e lunghezze sempre più elevate e condizioni geologiche e idrogeologiche sempre più critiche.

Lo sviluppo dello scavo meccanizzato che si è registrato negli ultimi anni rende di fatto superato e obsoleto, nella maggior parte dei casi, il tradizionale scavo con esplosivo o con mezzi meccanici.

Già nelle prime applicazioni dello scavo di gallerie a piena sezione con TBM, si manifestò la necessità di sviluppare il progetto di queste macchine per ampliarne il campo economico di applicazione a un largo spettro di condizioni geologiche e di tipologie di progetti. L'ultima generazione di TBM si avvicina pertanto alla cosiddetta TBM universale, ovvero ad una TBM basata sulle seguenti caratteristiche:

- capacità di avanzare nella più vasta gamma di condizioni geologiche possibili e di fronteggiare con minimi ritardi e/o fermi di produzione le situazioni straordinarie;
- capacità di variare il proprio diametro di scavo in tutto lo spettro che il mercato richiede;
- capacità di montare qualsiasi tipo di supporto e/o di rivestimento prefabbricato.

I rischi da individuare preventivamente sono i seguenti:

- rischio geologico, legato all'adeguatezza delle informazioni ottenute attraverso le indagini, alla capacità di riconoscere il comportamento del mezzo e di prevederne le singolarità, tenendo presente che le gallerie lunghe e profonde sono particolarmente vulnerabili a questo tipo di rischio;
- rischio progettuale, legato alle difficoltà del progetto di adattarsi alle condizioni geotecniche realmente incontrate, a difetti di costruzione, all'esperienza del progettista e a vincoli contrattuali;
- rischio costruttivo, legato alla scelta di tecniche costruttive non adatte, all'occorrenza di instabilità, all'esperienza dell'impresa e a vincoli contrattuali;
- rischio operativo legato a difetti di funzionalità delle attrezzature, a cattiva organizzazione del cantiere, alla manutenzione, ad incidenti, a problemi ambientali e a conflitti con parti terze;
- rischio finanziario legato a fattori sociali e politici, alla non chiara assunzione di responsabilità tra i vari attori, ai contenziosi sulla sicurezza delle maestranze.

Una volta che sono stati individuati correttamente, la scelta di realizzare lo scavo con una opportuna macchina fresatrice a piena sezione (TBM) può permettere di raggiungere, nella costruzione delle gallerie, quella certezza di tempi e di costi che rappresenta l'obiettivo primario sia dell'investitore sia dell'imprenditore.

Lo scavo di gallerie con TBM tecnologicamente avanzate comporta un approccio interdisciplinare coinvolgendo molti specialisti appartenenti al campo dell'ingegneria civile, geotecnica e delle scienze geologiche. La tecnologia dello scavo meccanizzato con TBM è anche e sempre di più una branca dell'ingegneria industriale e come tale deve essere gestita. È però vero che, essendo il mezzo (le formazioni geologiche) in cui si costruiscono le gallerie assai poco omogeneo e prevedibile nel suo comportamento, le capacità delle macchine devono sempre essere integrate dall'esperienza dell'uomo e dalla sua capacità di interpretare le situazioni e di conseguenza di operare il mezzo meccanico.

Già oggi le potenzialità delle TBM sono tali da rendere il loro impiego più sicuro rispetto ai metodi tradizionali in quasi tutte le applicazioni. L'occasione che si pone in Italia e nell'Unione Europea, che deve dotarsi nei prossimi anni di infrastrutture che principalmente si svilupperanno in galleria, è unica per acquisire e sviluppare una tecnologia che potrebbe consentirle di realizzare tali infrastrutture in tempi brevi e con costi contenuti. Si avrebbe inoltre il vantaggio di dotare il sistema delle imprese di mezzi tecnici e *know-how* per competere a livello mondiale. Purtroppo spesso la spinta all'innovazione è frenata dalla prudenza di progettisti, imprese e committenti che non trovano il coraggio e la volontà per intraprendere con più decisione la strada della meccanizzazione.

La presente pubblicazione si prefigge di illustrare tutte le diverse TBM oggi disponibili per lo scavo sia in roccia sia in terreni, illustrando gli aspetti fondamentali per la loro corretta scelta, sulla base delle condizioni geologiche, idrogeologiche e delle proprietà geotecniche dei materiali.

Sono poi analizzati tutti gli aspetti critici per la progettazione di una TBM in ammassi rocciosi, incluse le formazioni spingenti, e nei terreni con particolare riferimento agli scavi nelle aree metropolitane caratterizzate da basse coperture e dalla necessità di non arrecare alcun danno strutturale agli edifici e ai manufatti presenti in superficie.

Vengono infine riportati alcuni interessanti esempi di opere realizzate mediante macchine fresatrici a piena sezione e, in una apposita appendice, una descrizione dei lavori di realizzazione della galleria di base del San Gottardo che con i suoi 57 km, una volta terminata la costruzione, sarà la galleria ferroviaria più lunga al mondo. Tale costruzione costituisce un esempio di come deve essere impostato l'iter progettuale di un'opera in sotterraneo per ottenere il necessario consenso delle comunità locali, per la corretta gestione dell'appalto e della costruzione, da parte del Committente, e per il conseguente rispetto dei tempi e dei costi di costruzione.

1

Introduzione

La necessità di adeguare le infrastrutture alle future esigenze, in modo particolare per quanto concerne la futura rete ferroviaria, fa sì che le gallerie e le opere sotterranee acquisiscano sempre maggiore importanza nello sviluppo di tali infrastrutture sia nei centri urbani, sia nei lunghi tracciati stradali e ferroviari, permettendo la riduzione dei tempi di percorrenza e l'incremento delle capacità di trasporto.

Nell'ambito delle gallerie lo scavo meccanizzato, particolarmente ideale e competitivo rispetto allo scavo in tradizionale per gallerie di lunghezza superiore ai 2-3 km, ha compiuto dei prodigiosi progressi con la messa a punto di una vera e propria nuova generazione di TBM (Tunnel Boring Machine) che permettono di adattarsi a condizioni di terreno e di roccia assai variabili presenti lungo il tracciato della galleria.

Sono stati ad esempio messi a punto degli scudi che permettono di eseguire contemporaneamente lo scavo e la messa in opera del rivestimento definitivo in conci prefabbricati, come per la TBM riportata in figura 1.1.

Altra importante innovazione è rappresentata dalle frese di tipo *dual*, con la possibilità di estrarre il materiale dalla camera di scavo sia con un nastro trasportatore (operando pertanto alla pressione

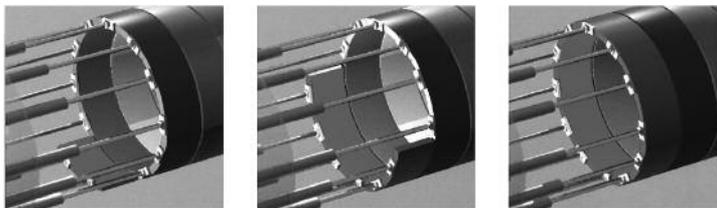


Figura 1.1. Esempio di TBM

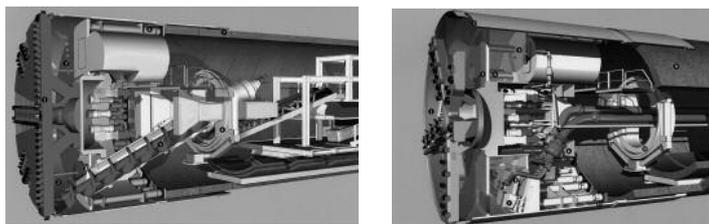
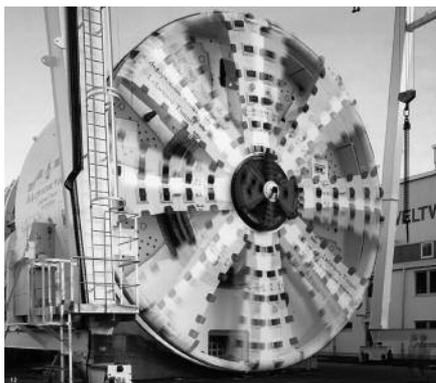


Figura 1.2. Esempio di macchina duale

atmosfera) sia con coclea d'estrazione con la camera conseguentemente pressurizzata tipica di uno scudo a contropressione di terra. L'utilizzo di una macchina duale, di cui viene riportato un esempio in figura 1.2, permette di adeguarsi a condizioni geologiche estremamente variabili con tratte di ammasso roccioso integro alternate a tratte con ammassi rocciosi fortemente fratturati e, ad esempio, milonitizzati, il cui comportamento è assimilabile più a quello di un terreno che a quello di una roccia.

Si hanno inoltre nuovi tipi di TBM il cui funzionamento è assimilabile a quello delle frese del tipo aperto con *grippers* in roccia dura, con la possibilità, tuttavia, di mettere in opera dei rivestimenti in conci prefabbricati se necessario; un esempio di tale macchina è riportato in figura 1.3.



Figura 1.3. TBM con grippers

Infine si sono raggiunti dei diametri di scavo sempre più grandi con l'attuale record di 15.43 m per la costruzione di una galleria autostradale a Shanghai (Cina).

Ciò premesso, la presente pubblicazione si prefigge di fornire indicazioni utili relativamente alle problematiche assai complesse e articolate che sono alla base della scelta e progettazione di uno scavo meccanizzato.

Nella prima appendice, A, del libro viene descritto uno straordinario esempio di come si può gestire nei confronti delle comunità locali la progettazione e costruzione di gallerie che essendo localizzate interamente in sottoterraneo hanno un impatto pressochè trascurabile sull'ambiente circostante.

Nelle restanti tre appendici vengono discussi alcuni aspetti particolari che hanno rilevanza nella progettazione di uno scavo in sottoterraneo: nell'appendice B vengono discusse le problematiche relative all'interazione fra gallerie e versanti; nell'appendice C le problematiche degli scavi profondi a cielo aperto che si rendono spesso necessari per la costruzione delle gallerie artificiali di approccio alle gallerie naturali o per la costruzione dei pozzi indispensabili per l'inizio dello scavo meccanizzato; infine, nell'appendice D vengono analizzati gli aspetti relativi al progetto e alla verifica dei rivestimenti delle gallerie.

2

Scavo meccanizzato con TBM a piena sezione in ammassi rocciosi

Il metodo di scavo delle gallerie con fresa meccanica a piena sezione è indicato con la sigla inglese TBM (Tunnel Boring Machine), la stessa metodologia nello scavo di pozzi è indicata con la sigla SBM (Shaft Boring Machine) o RBM (Raise Boring Machine). Una TBM consiste di una testa rotante di scavo o testa fresante sulla quale sono montati utensili di taglio o taglienti che effettuano l'azione di scavo vera e propria. La testa rotante di scavo è forzata contro il fronte di scavo; per tale operazione occorre che delle apposite scarpe di ancoraggio (*grippers*) siano spinte idraulicamente contro le pareti della galleria. Una semplice corsa di scavo è sufficiente a creare uno scavo a forma circolare o ellittica (ovverosia uno scavo a piena sezione). Nella zona periferica vengono assemblate delle tazze di raccolta aventi la funzione di convogliare il materiale scavato in una parte interna della testa di taglio sul nastro trasportatore atto allo smaltimento dello smarino. Non appena i cilindri di spinta sono a fine corsa, si interrompe lo scavo e si ritraggono le scarpe dei grippers dalle pareti della galleria; si avanzano i grippers stessi di una lunghezza pari alla corsa recuperando i cilindri di spinta, si espandono nuovamente i grippers nella nuova posizione contro le pareti dello scavo e si comincia una nuova corsa di scavo della TBM.

Già nel 1856, negli Stati Uniti, Herman Haupt fece un primo tentativo di impiegare una fresa a piena sezione, tuttavia successivamente per circa un secolo non si ebbe più alcun tentativo. Nel 1952 James Robbins pose una pietra miliare nella storia delle TBM con la costruzione della prima vera e propria fresa meccanica a piena sezione, del diametro di 8 m, per lo scavo della galleria di deviazione della diga di Oahe.

A partire da quella prima realizzazione, la sola Robbins ha scavato più di 3500 km nell'ambito di più di 700 progetti in tutto il mondo con diametri di scavo compresi fra 1.6 m e 12 m. Numerose e qualificate società si occupano della costruzione di TBM, le quattro principali sono la Robbins, la Wirth, la Lovat e la Herrenknecht. Tali società costruttrici sono impegnate nello sforzo di migliorare sempre di più la tecnologia disponibile in modo da:

- ottenere delle velocità di avanzamento sempre maggiori senza limiti pratici di automazione;
- ottenere una produzione costante (senza se possibile alcuna interruzione);
- operare in assolute condizioni di sicurezza.

Di seguito si descrivono le diverse TBM a partire da quelle utilizzate per lo scavo in rocce dure allo scopo di comprendere i principi basilari di funzionamento e le attrezzature necessarie.

2.1. TBM APERTA A SEMPLICE SCHEMA DI GRIPPERS

La caratteristica principale della TBM a semplice schema di grippers è che la spinta per l'avanzamento viene contrastata da una singola coppia di scarpe di ancoraggio, di grandi dimensioni, espanse contro le pareti dello scavo in un unico piano di ancoraggio. Con riferimento alla figura 2.1, la trasmissione della spinta dalle scarpe di ancoraggio al supporto della testa fresante avviene a mezzo di cilindri idraulici di spinta. Il supporto della testa fresante di scavo è contenuto in uno scudo, di dimensioni longitudinali limitate, espandibile anch'esso idraulicamente contro la roccia.

La fresa avanza sostenuta posteriormente dalla coppia di scarpe di ancoraggio ed anteriormente dallo scavo stesso, su cui poggia lo scudo che contiene il supporto della testa.

L'asse di avanzamento della fresa non è quindi fissato rigidamente durante la corsa di scavo ma segue l'andamento dello stesso scavo.

Per poter avanzare in rocce instabili tale fresa deve essere predisposta per l'installazione di sostegni

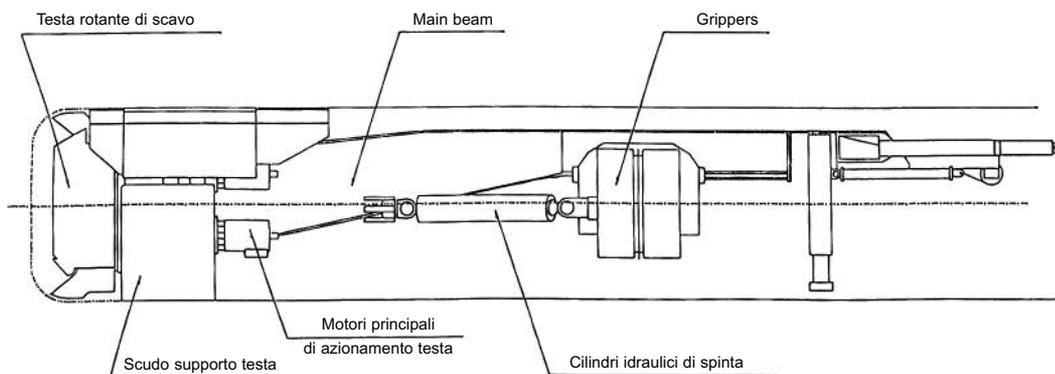


Figura 2.1. Fresa aperta a semplice sistema di grippers

immediatamente a tergo del supporto della testa fresante. Tali sostegni devono essere posti ad un interasse determinato in modo da non interferire con le scarpe di ancoraggio.

2.2. TBM APERTA A DOPPIO SCHEMA DI GRIPPERS

Nella TBM aperta a doppio schema di grippers la spinta di avanzamento è contrastata da due crociere di scarpe di ancoraggio poste a qualche metro di distanza tra di loro. Le due crociere individuano i due piani di ancoraggio che fissano nello spazio il cosiddetto *gripper carrier* cioè quella struttura all'interno della quale è guidato l'albero principale della TBM.

L'asse di avanzamento della fresa è quindi fisso durante la corsa di scavo e la guida della fresa avviene riposizionando tale asse all'inizio di ogni corsa.

Per poter avanzare in zone instabili anche questo tipo di fresa deve essere predisposta per l'installazione di sostegni immediatamente dietro il supporto della testa fresante. I sostegni devono essere inoltre posizionati in modo da non interferire con le scarpe di ancoraggio.

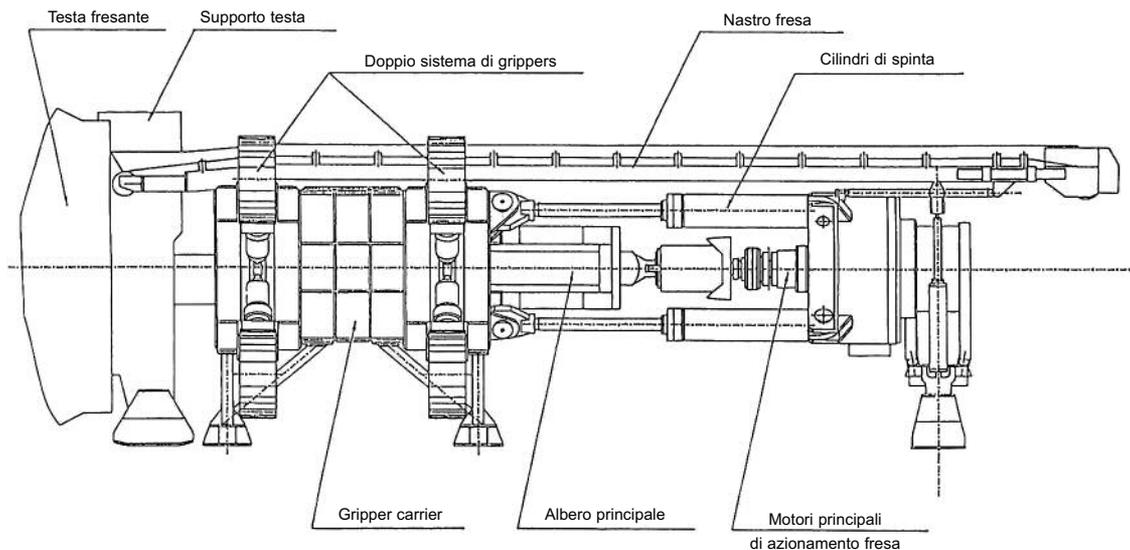


Figura 2.2. Fresa aperta a doppio sistema di grippers

2.3. TBM MONOSCUDO

Con riferimento alla figura 2.3, la TBM monoscudo è costituita da: una testa fresante e uno scudo che contiene il supporto della testa fresante e nella cui coda sono montati, obbligatoriamente, i rivesti-

menti prefabbricati. La testa fresante è normalmente articolata rispetto allo scudo per controllare meglio la guida della macchina, che avviene in forma continua. Non ci sono grippers a contrastare la spinta di scavo ma i cilindri di spinta si spingono direttamente contro i rivestimenti prefabbricati, che devono essere montati in fase alterna al rivestimento. Lo svantaggio maggiore delle TBM a scudo semplice sta nel fatto che per poter compiere un normale ciclo di scavo la macchina si deve fermare per tutto il tempo necessario all'erezione di un anello prefabbricato. La TBM doppio scudata è stata concepita per eliminare questo grosso svantaggio.

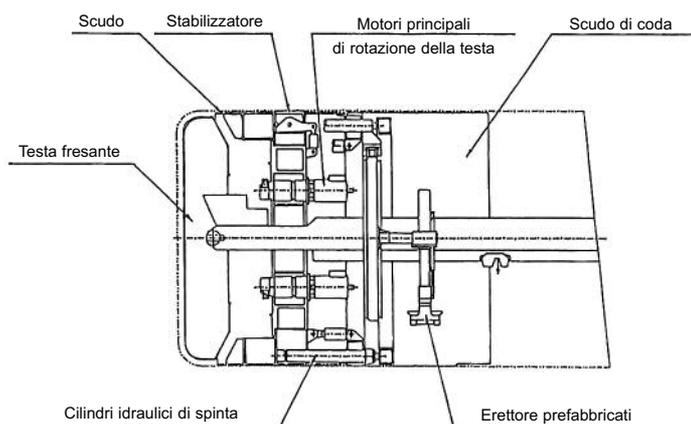


Figura 2.3. Fresa monoscudo

2.4. TBM A DOPPIO SCUDO

La fresa a doppio scudo, messa a punto per scavare in rocce fratturate, possiede la capacità di scavare simultaneamente all'erezione dei conci, abbreviando notevolmente il ciclo di scavo. È costituita da: uno scudo anteriore che contiene il supporto della testa e che avanza insieme alla testa fresante, uno scudo posteriore che contiene i grippers e nella cui coda sono montati (se e dove necessario) i supporti o i rivestimenti prefabbricati, un sistema di scudi telescopici di collegamento fra i due scudi principali.

Le caratteristiche funzionali di questo tipo di fresa sono:

- possibilità di avanzare in roccia dura e stabile spingendosi sui grippers senza montare supporti o rivestimenti;
- possibilità di montare all'occorrenza i supporti o rivestimenti prefabbricati in contemporanea allo scavo della galleria;

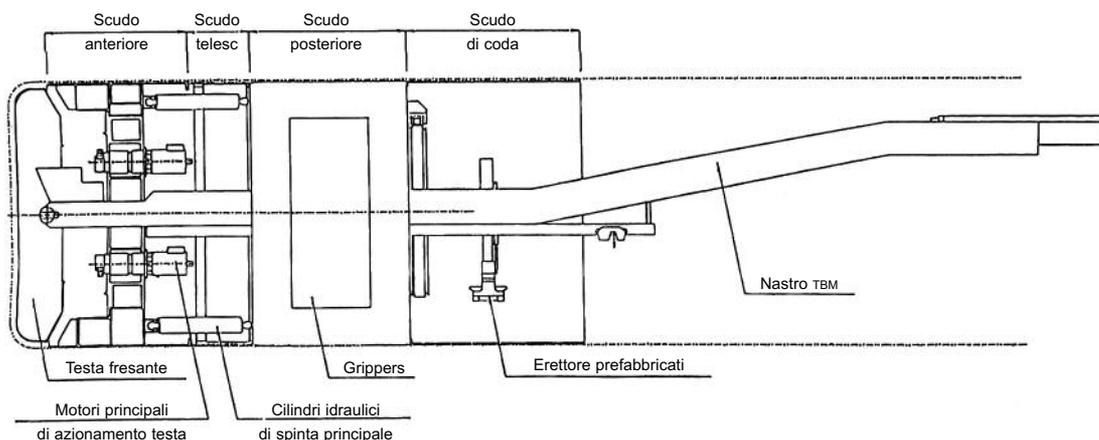


Figura 2.4. Fresa doppio scudo "ereuttore prefabbricato"

- possibilità di avanzare, dove le condizioni della roccia non consentano l'ancoraggio dei grippers, spingendosi sui supporti o rivestimenti montati nello scudo, in questo caso in fasi alterne con lo scavo.

La guida di questo tipo di macchina avviene in forma continua durante la corsa di scavo.

2.5. LE TBM DELLA ROBBINS

La Robbins ha prodotto TBM adatte per ogni condizione geologica e geomeccanica. Sono disponibili sia frese aperte sia frese monoscudo o doppio scudo.

Le TBM Robbins per roccia sono essenzialmente nate per lavorare in rocce da mediamente dure a dure, competenti, ovvero con una notevole capacità di autosostentamento.

Esse consistono in tre parti principali assemblate:

- la testa tagliante (*cutterhead*);
- il suo supporto con la trave principale (*main beam*);
- i grippers e i componenti di spinta.

Questi componenti principali comprendono:

- motori elettrici con gli ingranaggi riduttori;
- il cuscinetto principale per la rotazione della testa tagliante;
- le cosiddette pale (*muck buckets*) per il recupero del materiale fresato;
- il nastro trasportatore dove viene scaricato il materiale fuoriuscente dai *buckets*;
- molti altri componenti ausiliari per il controllo della macchina e della polvere che si forma in fase di scavo.

Le scarpe di ancoraggio (grippers) e il sistema di spinta formano la sezione di ancoraggio della macchina (*anchoring section*). Quando il sistema è attivo la macchina viene assicurata alla galleria mediante le scarpe di ancoraggio che sopportano il peso agente nella parte posteriore della macchina e trasmettono la spinta necessaria alla perforazione della roccia e al conseguente avanzamento della testa tagliante.

La parte rimanente della macchina è la cosiddetta *sezione di lavoro* (*working section*), la quale alimenta e fa muovere la macchina durante la corsa di perforazione.

Le componenti principali di tipiche macchine Robbins per roccia dura sono mostrate nella fotografia di figura 2.5. Queste TBM possono essere equipaggiate con attrezzature ausiliarie quali:

- erettore idraulico per centine;
- perforatrici per bullonature in calotta;
- argano idraulico per il sollevamento di archi di centine (montato sulla trave principale della TBM);
- sistemi ausiliari di spinta;
- sistemi idraulici ed elettrici per operare in sicurezza in condizioni di presenza di gas;
- cabine per gli operatori isolate acusticamente con l'aria condizionata e ogni altro comfort;
- telecamere e monitor per la gestione automatizzata di tutte le operazioni.

Alcuni esempi sono mostrati nelle figure 2.6 ÷ 2.8.

Le TBM con doppio scudo della Robbins sono anche chiamate *TBM a scudo telescopico* e sono state concepite con l'idea di lavorare sia in rocce dure compatte sia in ammassi rocciosi piuttosto fratturati ed alterati che richiedono la messa in opera immediata del rivestimento che può essere convenientemente costituito da una struttura a conci prefabbricati messi in opera subito a tergo dello scudo posteriore senza che la sua composizione influenzi l'avanzamento della macchina.

Viene perciò associata la capacità di scavare rocce dure o intensamente fratturate, nella piena sicurezza garantita dagli scudi, alla potenzialità di una elevata produzione.

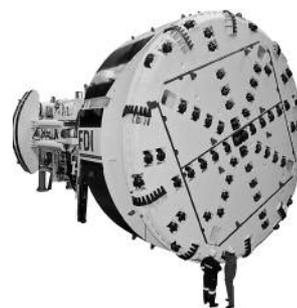


Figura 2.5. Esempio di fresa aperta costruito dalla Robbins

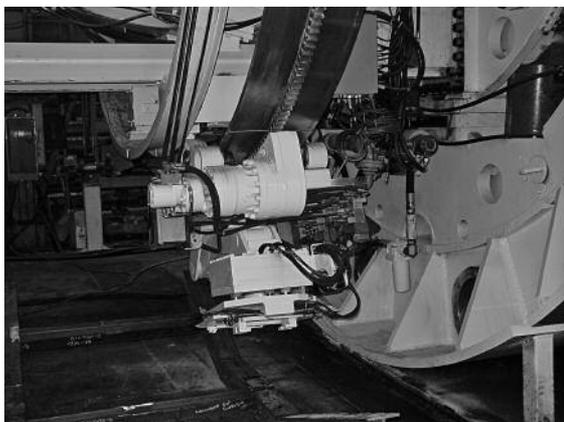


Figura 2.6. TBM Robbins, particolare di erettore idraulico per centine



Figura 2.7. TBM Robbins, esempio di sollevamento centine mediante erettore idraulico



Figura 2.8. TBM Robbins, particolare cabina di comando

Le TBM con doppio scudo sono costituite da quattro parti principali assemblate:

- la testa tagliante (*cutterhead*);
- lo scudo anteriore con il supporto della testa fresante;
- lo scudo posteriore con i grippers e i componenti di spinta;
- il sistema di smarino.

Queste componenti principali comprendono:

- motori elettrici con gli ingranaggi riduttori;
- gli ingranaggi anulari e il cuscinetto principale per la rotazione della testa tagliante;
- le pale per il recupero del materiale fresato;
- il nastro trasportatore dove viene scaricato il materiale fuoriuscente dalle pale;
- molti altri componenti ausiliari per il controllo della macchina e della polvere che si forma in fase di scavo.

Lo scudo posteriore costituisce la sezione stazionaria della macchina che, una volta attivata, trasmette la spinta necessaria alla sezione semoven-

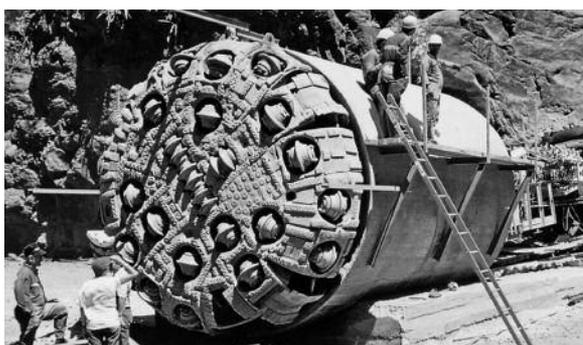


Figura 2.9. TBM Robbins scudate



te della TBM dove è posta la testa di scavo, reagendo sui grippers o, se installato, sul rivestimento dietro lo scudo posteriore.

Eccetto i grippers e il sistema di spinta, tutte le altre componenti della macchina si trovano nella sua sezione semovente che costituisce la parte della TBM che effettivamente lavora, ricevendo l'alimentazione di energia ed essendo mossa in avanti durante l'operazione di scavo. Le fotografie della figura 2.9 mostrano esempi di TBM Robbins doppio scudate.

La tabella 2.1 riepiloga le caratteristiche delle TBM Robbins sia aperte sia con doppio scudo.

Tabella 2.1. Caratteristiche principali delle TBM Robbins aperte e con doppio scudo per i modelli più piccoli, intermedi e più grandi

TBM	SERIE	DIAMETRO (m)	POTENZA ALLA TESTA (kW)	MOMENTO TORCENTE (kNm)	MASSIMA SPINTA SULLA TESTA (kN)	SPINTA DELLO SCUDO (kN)	SPINTA AUSILIARIA (kN)
Aperta	340	9 – 12	3465	7330	20215	-	
	200	5 – 7	2205	2820	12000		
	100	2.5 – 3	1000	560	6120		
Doppio scudata	340	9 – 12	3500	13400	20215	51000	102000
	140	3.5 – 5	1500	2400	9300	18600	37200
	80	1.6 – 2.5	520	750	2600	5200	10400

2.6. TBM DELLA HERRENKNECHT PER ROCCE DURE

Per quanto riguarda le TBM aperte la Herrenknecht contempla due tipologie: quella a semplice schema di grippers per la quale la spinta per l'avanzamento viene contrastata da una singola coppia di grippers e quella a doppio schema di grippers nella quale la spinta di avanzamento è contrastata da due crociere di grippers poste a qualche metro di distanza tra di loro.

Occorre menzionare che nelle due gallerie ferroviarie più lunghe al mondo attualmente in costruzione in Svizzera: la galleria del Gottardo (57 km) e la galleria di base del Loetschberg (37 km), quest'ultima in realtà terminata nel giugno 2007, si stanno utilizzando sei frese aperte a semplice schema di grippers equipaggiate con attrezzature ausiliarie per la messa in opera di sostegni.

Le prestazioni di una TBM aperta dipendono dal tempo richiesto per la messa in opera degli interventi di stabilizzazione. Per mettere in sicurezza la roccia sono utilizzati metodi convenzionali quali chiodature, reti elettrosaldate e calcestruzzo proiettato o pannelli prefabbricati. Gli interventi di stabilizzazione sono messi in opera il più possibile vicino alla testa fresante, in genere ad una distanza di circa 4 ÷ 5 m. La fresa a semplice schema di grippers permette una più tempestiva installazione degli interventi di sostegno immediatamente dietro la testa rotante di scavo.

La tabella 2.2 riporta le caratteristiche principali di alcune frese aperte Herrenknecht a semplice sistema di grippers.

Tabella 2.2. Caratteristiche principali delle TBM Herrenknecht aperte

CARATTERISTICHE	TBM			
	STEG/RARON (LOETSCHBERG)	BODIO (GOTTARDO)	FAIDO (GOTTARDO)	AMSTEG (GOTTARDO)
Diametro testa fresante [m]	9.43	8.83	9.33/9.63	9.58
Numero di utensili di taglio (cutters)	60	58	62	62
Diametro degli utensili di taglio [m]	0.431	0.431	0.431	0.431
Potenza alla testa [kW]	3500	3500	3500	3500
Massima spinta sulla testa [kN]	22800	27488	27488	27488
Massima forza sui gripper [kN]	63334	72142	72142	72142
Momento torcente [kNm]	14216	13627	13627	13627

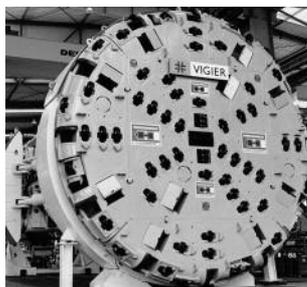


Figura 2.10. TBM aperta Herrenknecht a semplice sistema di grippers utilizzata a Tschärner (diametro 9.53 m)

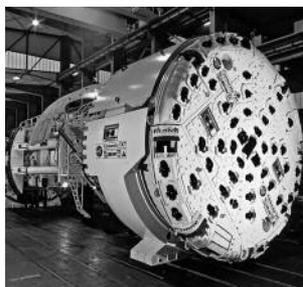


Figura 2.11. TBM aperta Herrenknecht a semplice sistema di grippers utilizzata negli scavi della galleria ferroviaria del Gottardo

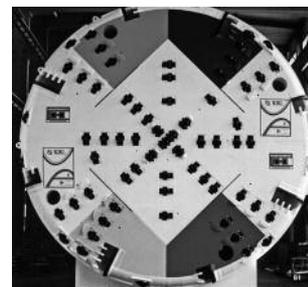


Figura 2.12. TBM monoscudo Herrenknecht S-251 del diametro di 12.055 m utilizzata negli scavi di due canne stradali in prossimità della città di Trento

Ad esempio, nella costruzione della galleria del Loetschberg allo scopo di installare dei sostegni, le frese di tipo aperto a semplice sistema di grippers sono state installate con due perforatrici per le bullonature in calotta, un erettore idraulico per le centine e un erettore per la messa in opera della rete elettrosaldata. La messa in opera di pannelli e del calcestruzzo proiettato viene eseguita nell'area di backup.

La TBM a semplice schema di grippers del diametro di 9.53 m usata in Svizzera nel cantiere di Tschärner (figura 2.10) è sostenuta nella parte retrostante mediante due grippers spinti contro la roccia. Essa ha il vantaggio di rendere disponibile un'ampia area di lavoro per l'installazione dei sostegni in L1 (si veda la figura 2.22).

La figura 2.11 mostra una delle TBM aperte a semplice sistema di grippers attualmente impiegata negli scavi della galleria ferroviaria del Gottardo.

Le frese aperte a doppio sistema di grippers hanno un totale di quattro scarpe di ancoraggio a funzionamento idraulico e in confronto a quelle a semplice sistema di grippers hanno meno spazio disponibile per la messa in opera dei sostegni.

La figura 2.12 mostra inoltre una fresa monoscudo Herrenknecht S-251 utilizzata per realizzare la circonvallazione della città di Trento mediante una galleria a doppia canna della lunghezza di 2760 m ciascuna.

2.7. SISTEMA DI BACKUP

Il sistema di backup è costituito da slitte in carpenteria metallica che assolvono il compito di contenere tutti i servizi annessi alla fresa quali:

- centrali idrauliche TBM;
- trasformatori e quadri elettrici;
- nastri trasportatori;
- impianti per la movimentazione dei supporti dello scavo e/o dei conci prefabbricati;
- impianto di depurazione aria;
- impianto di ripresa ventilazione;
- impianti per la posa dei sostegni di scavo (bulloni e calcestruzzo proiettato);
- pompe di aggettamento;
- impianto dell'acqua industriale ed aria compressa;
- sistema di scambio e carico dei treni di smarino o di estensione dei nastri trasportatori di galleria;
- impianti per l'igiene e la sicurezza del personale;
- impianti per l'estensione delle linee di galleria (binari, tubazioni, cavi);
- impianti di illuminazione e telefonico;

- altri impianti specifici richiesti dalla TBM o dal sistema di supporto e rivestimento adottato;
- sistema di monitoraggio del gas metano con sensori posti:
 - nella camera della testa della TBM;
 - in corrispondenza dell'aspirazione dell'aria viziata;
 - in altri punti eventualmente critici dell'impianto.

Il back-up a spazi discreti (SDBU), mostrato in figura 2.13, è stato inventato da SELI Tecnologie nel 1999 per incrementare la sicurezza e l'efficienza dei sistemi di backup per le TBM di piccolo e medio diametro. L'ideazione di questo nuovo tipo di backup mira soprattutto a:

- migliorare la sicurezza sia sul backup che lungo la galleria;
- migliorare l'efficienza dell'impianto di scavo nel suo complesso;
- aumentare la produttività dell'impianto di scavo nel suo complesso;
- ridurre la manodopera necessaria per il suo funzionamento;
- ridurre i tempi e i costi di assemblaggio e smontaggio;
- ridurre i costi di trasporto;
- poter lavorare con sistemi di evacuazione dello smarino con vagoni o con nastro.

L'idea principale del sistema SDBU consiste nella divisione della sezione del tunnel in spazi separati, ciascuno dedicato ad un servizio o una funzione specifica.

In particolare all'interno della sezione del tunnel sono stati creati i seguenti spazi separati:

- spazio per le strutture del backup;
- spazio per le passerelle e le piattaforme di lavoro;
- spazio per il treno di smarino;
- spazi per le linee di servizi di galleria.

Ciascuno di questi è tenuto separato dagli altri per evitare interferenze e aumentare il livello di sicurezza e di efficienza del sistema.

Il binario di galleria con questo tipo di backup è disassato rispetto all'asse della galleria e ciò consente di lasciare lungo tutto il tunnel uno spazio libero sufficiente per il transito degli operai.

Il binario montato lateralmente consente inoltre di installare una tubazione di ventilazione di diametro maggiore di quanto possibile con altri schemi di backup.

Per il backup delle TBM di grande diametro, la SELI ha ideato il concetto di *spazio modulare*, basato sulle seguenti idee e soluzioni:

- tutte le piattaforme di supporto si compongono di elementi tra loro imbullonati per semplificarne lo smontaggio e il trasporto da e verso il cantiere;
- ogni attrezzatura del backup viene montata e installata su un telaio separato e quindi posizionata sulla piattaforma del backup (concetto modulare); in questo modo, si semplificano le operazioni di assemblaggio e smontaggio;
- tutte le attrezzature della TBM (centraline idrauliche, quadri elettrici e consolle dell'operatore, trasformatori, impianti di lubrificazione, ecc.) vengono installate sulle prime piattaforme dietro la TBM per facilitare il collegamento alla TBM stessa, il collaudo ed il funzionamento;
- il funzionamento del backup è completamente meccanizzato senza necessità di intervento manuale; il progetto nella sua globalità e nei dettagli mira soprattutto a:
 - migliorare la sicurezza del lavoro;
 - migliorare l'efficienza;
 - aumentare la produttività;



Figura 2.13. Il backup a spazi discreti della SELI



Figura 2.14. Esempio di backup modulari per TBM di grande diametro