

Frese scudate di grande diametro per scavo in roccia, confronto produzioni e criteri di scelta al variare del diametro e della geologia

Remo GRANDORI
SELI Overseas - Presidente

Negli ultimi 15 anni il progresso tecnologico e l'innovazione progettuale ha migliorato significativamente la produttività delle TBM scudate e la loro capacità di affrontare geologie difficili.

Partendo dallo stato dell'arte delle due tipologie di TBM scudate oggi disponibili, quella a Singolo Scudo (SS) e quella Doppio Scudo nella sua versione Universale (DSU), nel seguito si confrontano, al variare del diametro di scavo e della fresabilità dell'ammasso, i cicli di scavo e le produttività orarie caratteristiche delle due tipologie di TBM.

I risultati di questo confronto sono poi utilizzati, tenendo in conto le diverse efficienze caratteristiche dei due sistemi, per valutare gli avanzamenti giornalieri tipici. L'analisi è quindi completata da un confronto qualitativo della loro diversa attitudine a superare le situazioni geologiche critiche che spesso si presentano nello scavo dei lunghi tunnels di valico.

1. Introduzione

Lo scavo dei grandi trafori per i collegamenti ferroviari transazionali in Europa, Nord e Sud America pone nuove problematiche nel progetto delle TBM, per lo più scudate, che stanno realizzando o dovranno realizzare queste importanti opere e nei criteri da adottare per la scelta tra le due tipologie oggi disponibili: quella delle frese a semplice scudo e quella delle frese a doppio scudo.

In linea generale queste lunghe gallerie di valico sono caratterizzate da grande lunghezza, geologia variabile, grandi coperture e presenza locale di criticità geologiche, non sempre individuabili preventivamente seppure ricorrendo a indagini geognostiche approfondite.

Questo richiede di privilegiare nella scelta le tipologie di TBM che garantiscono le maggiori produttività per un vasto range di geologie, essendo in grado di affrontare al

miglior sia i fenomeni tenso-deformativi legati alle grandi coperture sia, in generale, le criticità geologiche.

È quindi importante avere cognizione della produttività oraria che è lecito attendersi dalle diverse tipologie di TBM, semplici o doppio scudate, al variare del diametro di scavo e della fresabilità dell'ammasso.

2. Parametri di base assunti per l'analisi delle produttività

Per un'analisi di confronto della produttività oraria delle due tipologie di TBMs per diametri compresi tra 9 e 16 siamo partiti da alcune assunzioni di base riportate nella tabella 1.

Alcune assunzioni di cui sopra possono essere modificate, tra queste: il numero di giri della testa fresante, la spinta massima per cutter, la lunghezza dell'anello, il numero di concetti che lo compongono, il suo tempo di montaggio.

Tuttavia i valori assunti rappresentano lo stato dell'arte del momento e piccole modifiche degli stessi non cambiano di molto i risultati che saranno presentati nel seguito dell'articolo.

È possibile comunque modificare i valori di input onde determinare le produzioni attese per casi specifici.

3. Cicli e velocità d'avanzamento

Anche i muri nel nostro settore sanno che la differenza principale da un punto di vista operativo di ciclo di avanzamento tra TBM DS e SS risiede, per le TBM DS, nella concomitanza del montaggio del rivestimento prefabbricato con la fase di scavo, montaggio del rivestimento che invece nelle TBM a semplice scudo è in sequenza a quella di scavo. È logico quindi che il ciclo di avanzamento di una TBM DS sia più breve di quello di una TBM SS, pur dovendosi tenere conto che nella prima al termine dello scavo è necessario eseguire il *regripping*, non previsto nelle TBM SS.

Il vantaggio delle TBM DS nel ciclo d'avanzamento, e quindi nella velocità d'avanzamento oraria, è tuttavia variabile in funzione di alcuni parametri, i principali dei quali sono la velocità di penetrazione della TBM e il tempo di montaggio del rivestimento. Nella tabella 2 (a pagina 43) sono riassunte le velocità d'avanzamento calcolate, partendo dai parametri assunti di cui alla Tabella 1 del capitolo precedente, per diversi diametri di scavo.

Approfondendo il confronto per le diverse tipologie di resistenza della roccia si ricavano i grafici delle figure 1 e 2:

Tab. 1 - Assunzioni di base per il calcolo delle produttività delle TBM.

DATI DELLE TBM			DATI DEI RIVESTIMENTI PREFABRICATI			VELOCITÀ DI PENETRAZIONE TIPICHE PER DIVERSE FRESABILITÀ DELL'AMMASSO				DURATA REGRIP
TBM DIAM.	CHD RPM	SPINTA PER CUTTER	N° CONCI PER ANELLO (TIPICO)	LUNHEZZA ANELLO (TIPIUCA)	TEMPO MEDIO MONTAGGIO ANELLO	ROCCIA MOLTO DURA (3 mm/rev)	ROCCIA DURA (5 mm/rev)	ROCCIA MEDIA RESISTENZA (8 mm/rev)	ROCCIA TENERA (12 mm/rev)	TEMPO REGRIP TBM DS
m		KN	n	m	min	m/h	m/h	m/h	m/h	min
9	6,4	345	7	1,8	24,5	1,1	1,9	3,1	4,6	5
10	5,7	345	7	1,8	24,5	1,0	1,7	2,8	4,1	5
11	5,2	345	8	2,0	28,0	0,9	1,6	2,5	3,8	6
12	4,8	345	8	2,0	28,0	0,9	1,4	2,3	3,4	6
13	4,4	345	9	2,2	31,5	0,8	1,3	2,1	3,2	7
14	4,1	345	9	2,2	31,5	0,7	1,2	2,0	2,9	7
15	3,8	345	10	2,4	35,0	0,7	1,1	1,8	2,8	8
16	3,6	345	10	2,4	35,0	0,6	1,1	1,7	2,6	8

Rocce molto dure (UCS > 200 Mpa - Rocce sane con resistenza altissime: Graniti, Basalti, Quarziti)

In rocce durissime, sane e con resistenze estreme i tempi di scavo sono molto im-

portanti in assoluto e in relazione ai tempi di montaggio anello.

Il vantaggio delle TBM DS in queste formazioni è modesto e decresce all'aumentare del diametro.

Fino a diametri di circa 12 metri il vantaggio è comunque significativo (15-20%) mentre oltre tali diametri si riduce a tal punto da rendere non conveniente l'impiego di una DS, per via del suo maggior costo e complessità.

Rocce dure (120 < UCS < 200 Mpa) - Rocce dure e sane con resistenze alte ma non altissime: Graniti, Basalti, Calcari e Arenarie Dure, ecc.).

In rocce dure e sane e con resistenze elevate i tempi di scavo si riducono leggermente ed il tempo di montaggio anello comincia a pesare di più.

Il vantaggio delle TBM DS in queste formazioni è importante, pur sempre decrescendo all'aumentare del diametro.

Fino a diametri di circa 13 metri il vantaggio è importante (20-40%) per poi ridursi ai diametri più estremi, tanto da rendere indifferente l'impiego di una o l'altra tipologia di TBM.

Rocce di media resistenza (60 < UCS > 120 Mpa - Rocce media resistenza: Calcari, Arenarie, Scisti, altri).

In rocce di media resistenza i tempi di scavo si riducono ulteriormente e il montaggio anello, eseguito dalle TBM SS in fase successiva allo scavo, penalizza fortemente gli avanzamenti di questo tipo di TBM:

Il vantaggio delle TBM DS in queste formazioni è molto elevato in tutto il range di diametri, variando dal 50% ai massimi diametri di 15-16 m.

Rocce tenere (UCS < 60 Mpa - Rocce te-

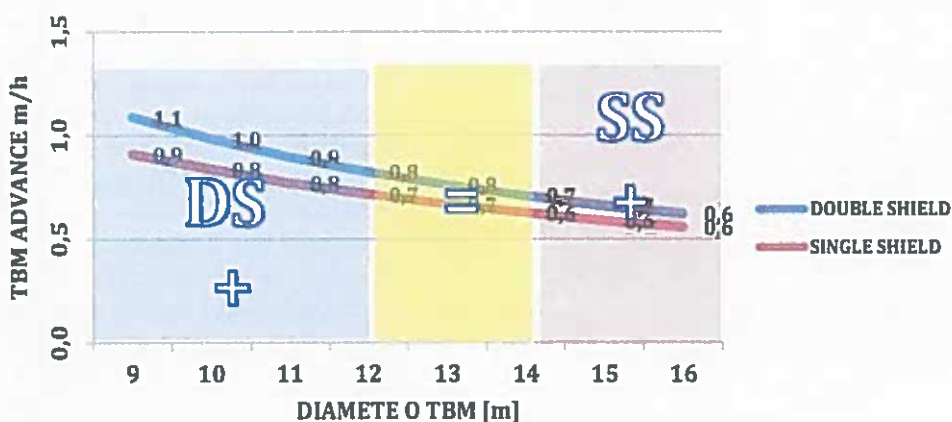


Fig. 1 - Confronto avanzamenti orari in roccia molto dura.

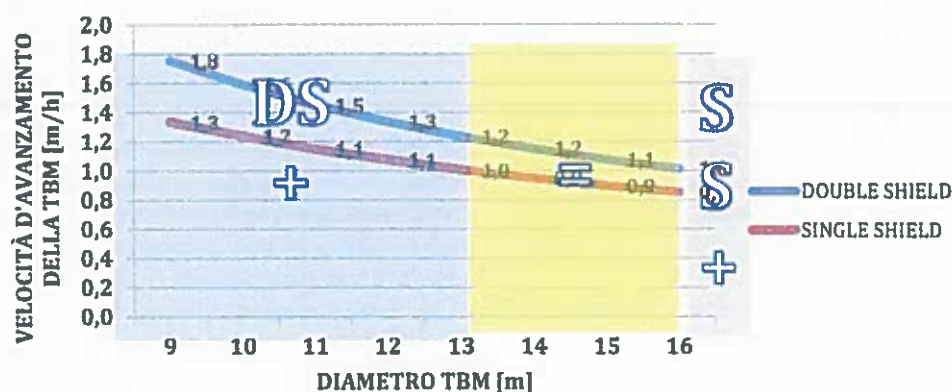


Fig. 2 - Confronto avanzamenti orari in roccia dura.

Tab. 2 - Avanzamento orario delle due tipologie di TBM al variare delle resistenze e fresabilità dell'ammasso.

TBM DIAM.	AVANZAMENTO ORARIO TBM A DOPPIO SCUDO				AVANZAMENTO ORARIO TBM A SEMPLICE SCUDO			
	ROCCIA MOLTO DURA	ROCCIA DURA	ROCCIA MEDIA RESISTENZA	ROCCIA TENERA	ROCCIA MOLTO DURA	ROCCIA DURA	ROCCIA MEDIA RESISTENZA	ROCCIA TENERA
m	m/h	m/h	m/h	m/h	m/h	m/h	m/h	m/h
9	1,1	1,8	2,7	3,7	0,9	1,3	1,8	2,2
10	1,0	1,6	2,4	3,5	0,8	1,2	1,7	2,1
11	0,9	1,5	2,2	3,2	0,8	1,1	1,6	2,0
12	0,8	1,3	2,1	2,9	0,7	1,1	1,5	1,9
13	0,8	1,2	1,9	2,7	0,7	1,0	1,4	1,8
14	0,7	1,2	1,8	2,5	0,6	0,9	1,3	1,7
15	0,7	1,1	1,7	2,4	0,6	0,9	1,3	1,6
16	0,6	1,0	1,6	2,3	0,6	0,9	1,2	1,6

nere: Marne, Arenarie e Calcari a bassa resistenza, altre)

In rocce a bassa resistenza il vantaggio delle DS è massimo e varia dal 68% ai diametri di 9-10 m al 44% ai massimi diametri di 15-16 m.

Analizzando ora una TBM del diametro di 10 m, dal grafico seguente si osserva come il vantaggio delle DS parte subito dalle rocce più dure per poi aumentare molto fortemente al diminuire della resistenza della roccia.

Prendendo invece in considerazione una TBM da 15 m di diametro si osserva che il vantaggio delle TBM DS per rocce ad altissima resistenza è modesto, mentre aumenta e diventa significativo mano a mano che la resistenza diminuisce.

Dall'analisi risulta che, in termini di avanzamento orario, le TBM DS hanno generalmente un vantaggio importante, salvo che per rocce estremamente dure e massimi diametri.

Il vantaggio in termini di avanzamenti orari non si traduce tuttavia automaticamente in un corrispondente vantaggio in termini di avanzamenti giornalieri medi, che scontano la diversa efficienza delle due tipologie di TBM.

4. Avanzamenti medi giornalieri

Le TBM DS scontano una minore efficienza delle TBM SS per via della loro maggiore complessità e della contemporaneità operativa delle fasi di scavo e posa conchio.

In base all'esperienza questa differenza si può mediamente valutare in un 15% di maggiore tempo di produzione con TBM SS. Nella Tabella 3 a pagina seguente sono riportate le efficienze tipiche, intese come percentuale delle 24 ore in cui la TBM

compie il suo ciclo produttivo (scavo e posa conchi + eventuale regripping), delle due tipologie di TBMs al variare della resistenza della roccia.

In generale le efficienze diminuiscono al diminuire della resistenza della roccia in

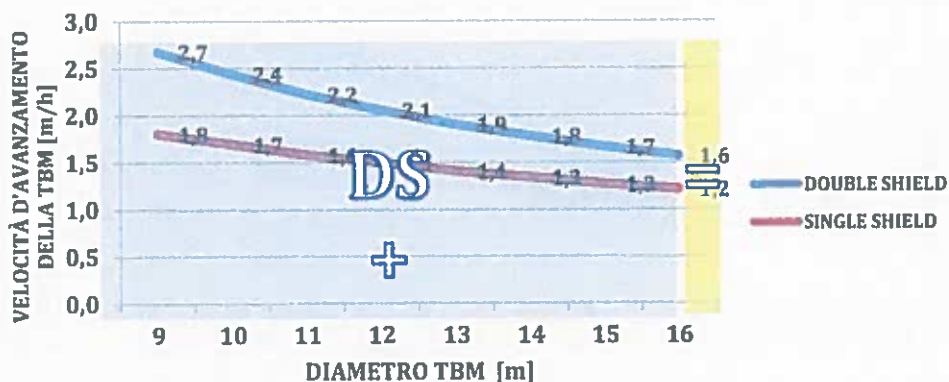


Fig. 3 - Confronto avanzamenti orari in roccia di media resistenza.

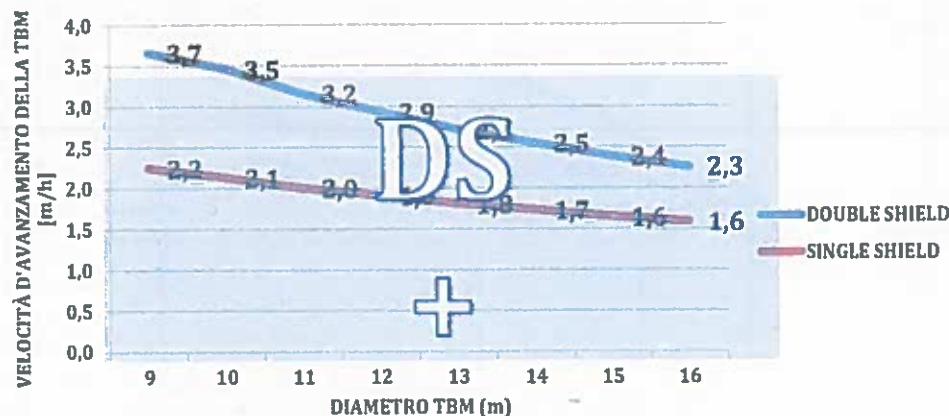


Fig. 4 - Confronto avanzamenti orari in roccia tenera.

Tab. 3 - Confronto efficienza.

ROCCIA	DOPPIO SCUDO	SEMPLICE SCUDO
MOLTO DURA	50,0 %	57,5 %
DURA	45,0 %	51,8 %
MEDIA	40,0 %	46,0 %
TENERA	35,0 %	40,3 %

quanto i cicli di avanzamento si accorciano e acquistano più rilevanza i tempi morti, i guasti e gli altri fermi di produzione. Tenendo conto di queste efficienze e degli avanzamenti orari di cui al capitolo precedente nelle figure 5, 6, 7 e 8 vengono comparati gli avanzamenti medi giornalieri di una TBM di 10 m.

Come si osserva la minore efficienza delle TBM DS riduce solo parzialmente il van-

taggio della loro utilizzazione in termini di avanzamenti medi giornalieri. Le differenze si mantengono infatti molto elevate in tutto il range di resistenze ad esclusione delle rocce estremamente dure, con resistenza superiore ai 200 Mpa. In particolare in rocce dure il vantaggio aumenta dal 7 al 22 % per poi salire progressivamente fino al 40% nelle rocce di media resistenza.

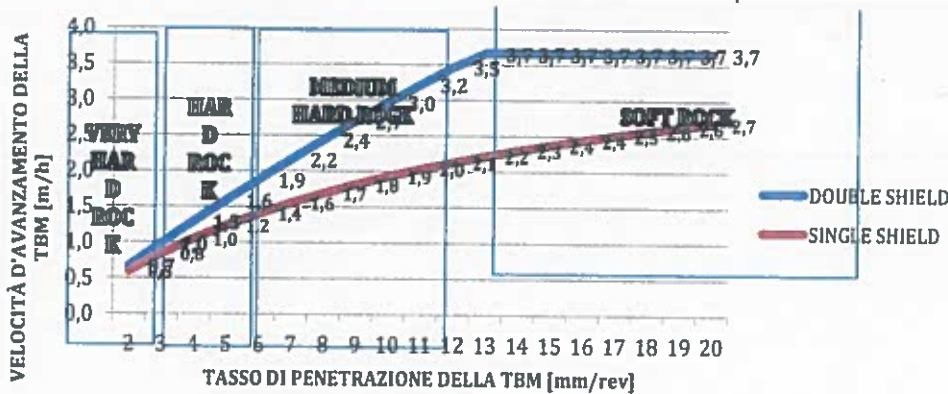


Fig. 5 - Confronto avanzamenti orari con TBM 10 m diametro.

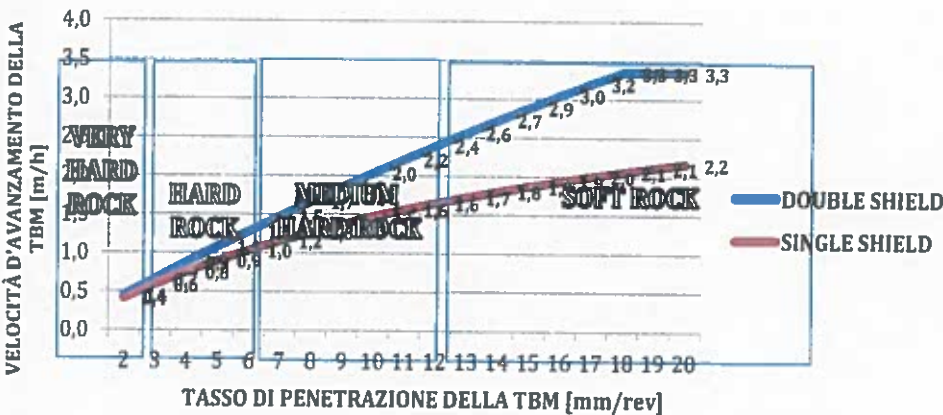


Fig. 6 - Confronto avanzamenti orari con TBM 15 m diametro.

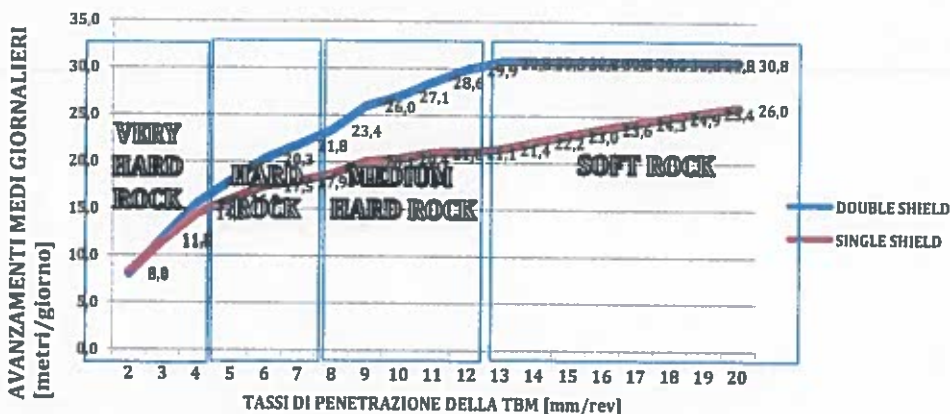


Fig. 7 - Confronto avanzamenti medi giornalieri per TBM da 10 m.

In rocce di bassa resistenza il vantaggio decresce progressivamente dal 40% al 18%. Passiamo ora ad un analogo grafico di confronto per una TBM di 15 metri di diametro. Per questo diametro maggiore si osserva che i vantaggi delle TBM DS in termini di avanzamento medio giornaliero sono nulli o trascurabili in rocce ad elevatissima ed alta esistenza, mentre rimangono molto rilevanti per rocce di medio alta, media e bassa resistenza, aumentando progressivamente dal 10% ad oltre il 40%.

5. Criticità geologiche

I confronti di cui alle analisi precedenti riguardano rocce di resistenza e fresabilità variabile ma comunque sostanzialmente stabili.

Nello scavo di lunghi tunnel di valico tuttavia sono quasi sempre presenti condizioni locali critiche che possono mettere in difficoltà l'avanzamento di una TBM di grande diametro.

Il confronto tra le due tipologie di TBMs deve essere fatto quindi anche nei riguardi del loro comportamento in presenza di criticità geologiche.

In particolare:

a) Rocce convergenti e spingenti

Le TBM DS di tipo universale hanno una serie di accorgimenti (scudi fortemente conici, scudi corti, elevate spinta principale ed ausiliaria, overcutting) specifici che le rendono particolarmente adatte allo scavo in terreni convergenti e spingenti.

Le TBM SS soffrono molto di più queste condizioni per via dello scudo poco conico, lungo e delle limitate capacità di overcutting. Questo oltre alle difficoltà di guida in presenza di spinte sugli scudi non omogenee.

b) Rocce a bassissima resistenza

In questo tipo di rocce le TBM SS per roccia, molto pesanti nella parte anteriore,

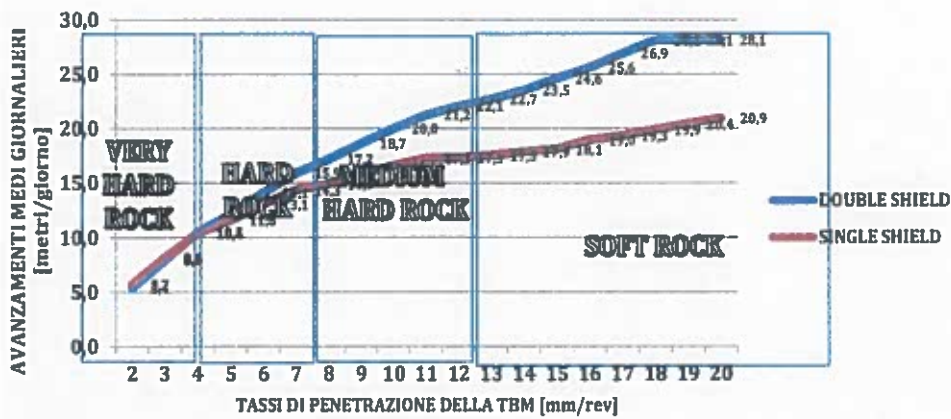


Fig. 8 - Confronto avanzamenti medi giornalieri per TBM da 15 m.

possono avere problemi a mantenere lo scavo in asse e perdere quota, con la difficoltà di contrastare questa tendenza con la spinta passiva sui concetti.

Le TBM DS, avendo un sistema di guida attivo che si contrasta sullo scudo posteriore, sono in grado di mantenere l'allineamento anche in condizioni estreme.

c) Fronti Instabili

In presenza di fronti instabili è importante poter arretrare la testa ed eventualmente gli scudi dopo aver trattato il fronte onde riavviare la testa di scavo.

Con le TBM a DS questa operazione è pos-

sibile teoricamente senza limiti, tanto che in alcuni casi si è dovuto arretrare anche diversi metri contro fronti instabili e spingenti.

Le TBM SS, anche quelle con testa articolata, hanno possibilità molto limitate di arretrare per consentire la messa in rotazione della testa ovvero limitare la spinta del fronte.

6. Considerazioni conclusive

Le TBM di grande diametro consentono di avanzare con velocità molto elevate, para-

gonabili e in alcune circostanze superiori a quelle ottenibili con TBM di piccolo e medio diametro.

Il vantaggio in termini di produttività delle TBM DS è importante in quasi tutte le condizioni geologiche salvo che per i diametri oltre i 15 m per rocce molto dure e dure e, per tutti i diametri, per rocce di elevatissima resistenza, sopra i 200 Mpa. In queste condizioni estreme il tempo di scavo è talmente lungo che le differenze di ciclo tra le due tipologie di TBM sono molto ridotte e compensate dalla differente efficienza delle due tipologie di TBM.

Per raggiungere queste produzioni occorre tuttavia dimensionare opportunamente gli impianti ausiliari e di trasporto, sia all'interno che all'esterno della galleria.

Bibliografia

ITA/AITES WG 2 (2004). *Guidelines for tunneling risk management*. Tunnel and Underground Space Technology, n. 19.

Grandori R. (1996). *The universal TBM in the year 2000*. Technical aspects and contractor consideration. Gallerie e Grandi Opere Sotterranee, n. 50.

Summary of:

Large diameter single shield TBMs for rock excavation: comparison of productions and selection criteria for different diameters and geology

R. GRANDORI
SELI Overseas - Presidente

Over the past 15 years, technological progress and design innovation have significantly improved the productivity of the shielded TBMs and their ability to deal with difficult geological context.

Starting from the state of the art of the two types of shielded TBMs available today, one equipped with Single Shield (SS) and the

other equipped with Double Shield in its Universal version (DSU), below the excavation cycles and the hourly productivity characteristics of these two types of TBMs are compared, by varying the excavation diameter and the fresability characteristics of the rock mass.

The results of this comparison are then

used, taking into account the different performance characteristics of the two systems, to evaluate the typical daily advances. The analysis is completed by a qualitative comparison of their different attitude to overcome critical geological situations, that often occur in the excavation of long pass tunnels.