

Prospettive e rischi del metodo di scavo con fresa puntuale in particolare considerazione delle esperienze fornite dall'avanzamento della galleria Castel Badia

Ralf J. PLINNINGER

Dipl.-Geol. Dr.rer.nat Ralf J. Plinninger, Dr. Plinninger Geotechnik, Bernried Germania

Reinhold PALLA

Dott.-Ing. Reinhold Palla, hbpm Ingegneri, Bressanone

In particolare per gallerie e cunicoli in ambito urbano le macchine per scavo con fresa puntuale rappresentano un'alternativa interessante ai metodi tradizionali con esplosivo. Siccome le vibrazioni prodotte sono molto limitate, possono venir realizzate quelle opere per le quali a causa di infrastrutture sensibili, a priori si può escludere l'avanzamento con esplosivi o che sarebbero soggette a considerevoli penalizzazioni della produttività. Poiché le macchine con fresa puntuale reagiscono in modo nettamente più sensibile nei confronti delle caratteristiche dell'ammasso roccioso (in particolare resistenza, grado di fratturazione e tenacità) rispetto all'avanzamento con esplosivo, i rischi correlati devono essere considerati preliminarmente alla realizzazione dell'opera e le caratteristiche essenziali dell'ammasso devono essere esaminate e rappresentate in modo adeguato. Il presente articolo riporta in particolare, oltre a ampie esperienze generiche, il progetto Galleria Castel Badia a San Lorenzo / Provincia di Bolzano, che per quanto riguarda prospettive e rischi di questo metodo rappresenta un caso esemplare.

1. Introduzione

1.1. Principi tecnici del metodo

Caratteristica essenziale dell'avanzamento con fresa puntuale è che lo scavo dell'ammasso avviene in diverse fasi con l'impiego di una fresa rotante orientabile. Con il termine "fresa puntuale" si identificano propriamente attrezzature di avanzamento autonome, per le quali i processi di frantumazione dell'ammasso e di deposito possono venir portati a compimento in un ciclo di lavoro. A causa del continuo svolgimento ciclico dei lavori di avanzamento, questo procedimento è annoverato tra i metodi convenzionali e non tra i metodi meccanici.

In base alla potenza della testa fresante e del peso si distinguono macchine, secondo quanto riportato in Tabella 1, da "leggere" fino a "superpesanti".

La testa fresante seconda la forma si distingue nella cosiddetta "Testa rotante conica" (Asse di rotazione sull'asse longitudinale del braccio meccanico) e nella "Testa rotante a tamburo" (Asse di rotazione orto-

gonale all'asse longitudinale del braccio meccanico) (si veda Fig. 1).

Tab. 1 – Classi di potenza e peso per macchine con fresa puntuale (secondo [4]).

Classe	Potenza testa fresa	Peso
leggera	50 - 170 kW	8 - 40 t
media	160 - 230 kW	40 - 70 t
pesante	250 - 300 kW	70 - 110 t
super pesante	350 - 400 kW	> 100 t

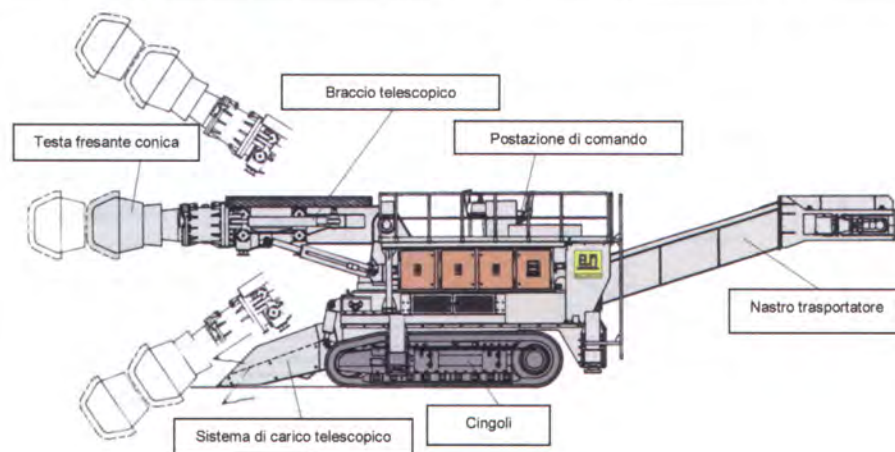


Fig. 1 – Esempio di una fresa puntuale pesante con testa fresante conica, tipo WIRTH T3:20 (300 kW) impiegata per lo scavo della galleria di Castel Badia.

Macchine con fresa puntuale vengono prevalentemente impiegate per lo scavo in rocce con bassa fino a media resistenza. Il metodo ha fornito buone prove di sé soprattutto nelle regioni costituite da successioni più o meno omogenee di rocce sedimentarie non metamorfiche, come ad es. successioni di argilliti, siltiti, marne o arenarie così pure per l'estrazione di gesso, salgemma, sali di potassio.

1.2. Classificazione della fresabilità

Per descrivere e classificare la fresabilità dell'ammasso con fresa puntuale vengono impiegati secondo l'attuale stato della tecnica (si veda [11] per un quadro riassuntivo) i seguenti parametri:

1. **“Prestazione netta di fresatura”:** La prestazione netta di fresatura [m^3 compatto/h], denominata anche come “Prestazione netta di taglio” o “Net Cutting Rate” (NCR), è ottenuta come rapporto tra il volume del corpo compatto scavato e la durata netta della fresatura. La durata netta di fresatura comprende esclusivamente il tempo in cui la testa della fresa è in azione sull’ammasso, senza considerare i movimenti a vuoto del braccio della fresa, carico, deposito, spostamento della macchina, tempi di approntamento, ecc. La prestazione netta di fresatura rappresenta così un valore prevalentemente influenzato dalle condizioni geologiche d’impiego.
2. **“Prestazione lorda di fresatura”:** La prestazione lorda di fresatura [m^3 compatto/h] è ottenuta come rapporto tra il volume del corpo compatto scavato e la durata lorda di fresatura. Sono quindi considerati spostamenti a vuoto, tempi di carico ecc. nella prestazione della fresa, che è determinata in base ai protocolli dei turni di lavoro. Essa rappresenta perciò un valore che oltre dalle condizioni geologiche è influenzato in particolare anche da fattori logistici e di gestione.
3. **“Fattore lordo/netto”:** Il “fattore lordo/netto” [] è calcolato come rapporto tra la prestazione lorda della fresa e la prestazione netta della fresa ed è co-

si una misura dell’influsso della logistica e della gestione sull’avanzamento della fresa. Il fattore lordo/netto è sempre maggiore di 1,0, un rapporto lordo/netto pari a 1,0 significherebbe un (ipotetico) avanzamento della fresa libero da qualsiasi lavoro accessorio.

4. **“Consumo specifico di utensili (picchi)”:** Il consumo specifico di utensili [picchi/m^3], definito anche come “usura quantitativa di utensili”, si calcola dal consumo di picchi (arrotondamento) per metro cubo di roccia compatta disagregata. Il valore descrive la durata d’impiego dell’attrezzo, misurata partendo dall’utilizzo di un utensile nuovo di fabbrica fino alla sostituzione dell’utensile logoro in funzione del volume scavato.

Per valutare sinteticamente la fresabilità si è affermato il sistema di classificazione sviluppato da Thuro (si veda [11]), basato sulla prestazione della fresa e sul consumo di picchi. Anche qui si deve impiegare per le diverse classi di potenza delle macchine reperibili sul mercato il corrispondente diagramma di classificazione. Il diagramma in figura 2 mostra i valori di riferimento per la classe standard di potenza di 300 kW per differenti tipi di roccia ossia per i corrispettivi tipi di ammasso con le loro relative, spesso caratteristiche formazioni. In questo diagramma confluiscono valori relativi a 5 differenti gallerie.

Entrambe le classificazioni, consumo specifico di utensili (usura; logaritmica) e prestazio-

ne della fresa (velocità di fresatura; lineare) definiscono una matrice, che consente tutte le combinazioni di entrambe le grandezze. I limiti delle aree di seguito riportate hanno dato buoni risultati nella pratica. Ad esempio si hanno fresabilità normali non solo per “elevate” prestazioni della fresa a bassa usura ma anche per “molto elevate” prestazioni della fresa con un’usura “media” e altrettanto per una “media” prestazione della fresa con una “molto bassa” usura dell’utensile.

Inoltre è illustrata la linea di correlazione che indica una tendenza dei parametri, la quale di regola significa che ad elevata usura è collegata una modesta prestazione della fresa e bassa usura è associata a elevata prestazione della fresa. Sebbene ci siano tendenze per rocce difficilmente fresabili, la maggior parte dei gruppi di rocce scavate non può essere definita in generale come difficile o facile da fresare. Questo dipende piuttosto dalle proprietà geotecniche delle rocce, che anche all’interno di uno stesso ammasso roccioso possono essere molto differenti.

2. Vantaggi del metodo di scavo con fresa puntuale

2.1. Riduzione delle vibrazioni

In particolare, per progetti in ambito urbano, l’emissione molto bassa di vibrazioni di un avanzamento con fresa puntuale è stata

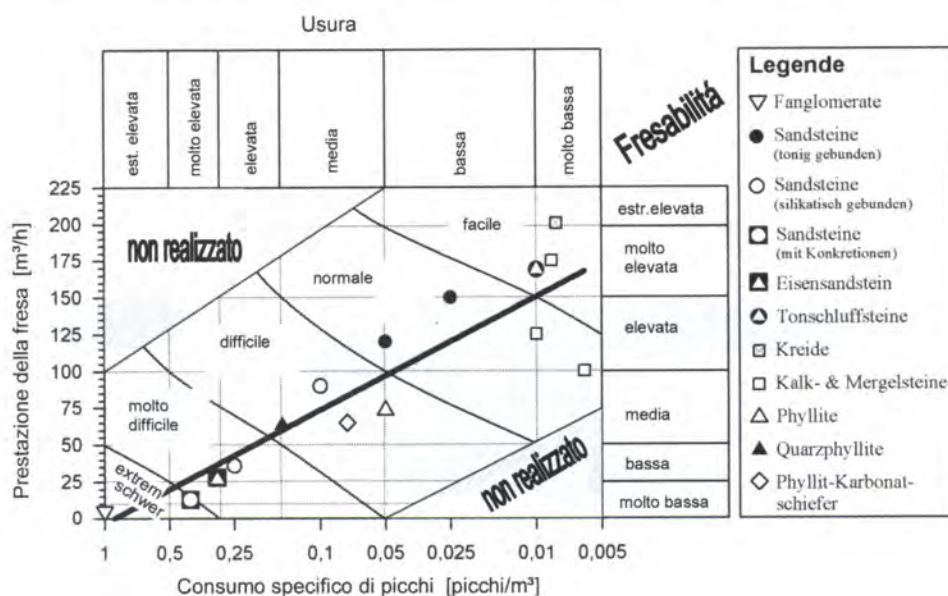


Fig. 2 – Esempio di un diagramma di classificazione della fresabilità per frese puntuali pesanti con potenza pari a 300kW (da [11], figura 3, p. 68).

Legende - Legenda	
Fanglomerate	
Sandsteine (tonig gebunden) = Arenarie (matrice argillosa)	
Sandsteine (silikatisch gebunden) = Arenarie (matrice silicatica)	
Sandsteine (mit Konkretionen) = Arenarie (con concrezioni)	
Eisensandstein = „iron sandstone“	
Tonschluffsteine = Argilliti - siltiti	
Kreide = Gesso	
Kalk- & Mergelsteine = Marne e marne calcaree	
Phyllite = Fillade	
Quarzphyllite = Fillade quarzifera	
Phyllit-Karbonatschiefer = Fillade - Calcarei scistosi	

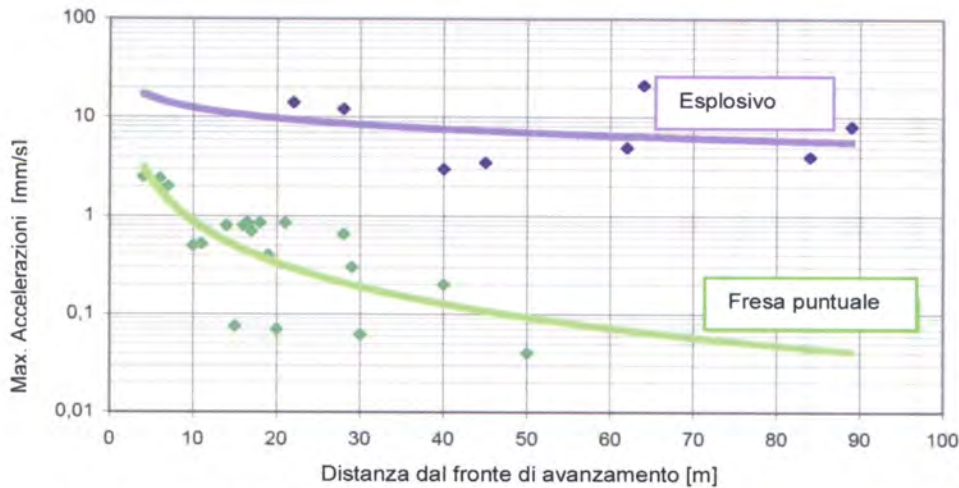


Fig. 3 – Confronto dei valori di vibrazioni misurati per avanzamento con fresa puntuale e con esplosivo secondo misure della ditta SANDVIK.

decisiva nella scelta del metodo di scavo. Spesso con questo metodo sono state realizzate delle gallerie per le quali a causa di danni, obblighi e/o limitazioni (tra cui limiti delle vibrazioni non rispettabili, divieto notturno di eseguire esplosioni o altri) un avanzamento con esplosivo non era possibile, in quanto escluso fin dall'inizio o soggetto a forti penalizzazioni della produttività. Recente esempio di un tale progetto è l'avanzamento con successo della fresa puntuale per la galleria Castel Badia / San Lorenzo / Provincia di Bolzano, che viene illustrato più in dettaglio nel paragrafo 4. Motivo di queste ridotte vibrazioni è che con la fresa puntuale l'energia per indurre un distacco viene fornita tramite la testa fresante e i picchi in modo puntuale e in un lungo intervallo di tempo (diverse ore), mentre nel caso di esplosivo l'intera energia necessaria per un distacco viene applicata in pochi millisecondi.

Nella seguente figura sono riportati i valori misurati dal costruttore SANDVIK durante gli avanzamenti e prove a Pozzano, Milchbuckeltunnel (Zurigo), Metro Sydney, Metro Montreal e Erzberg, essi mostrano in modo impressionante le significativamente minori accelerazioni con l'impiego di una fresa puntuale pesante nei confronti di un avanzamento con esplosivo.

2.2 Miglior mantenimento del profilo di scavo

Il mantenimento del profilo di scavo nell'avanzamento è tecnicamente rilevante, poi-

ché governa in modo significativo il tempo necessario per l'esecuzione del rivestimento e così pure il consumo di calcestruzzo proiettato. I giunti e il grado di fatturazione dell'ammasso roccioso così pure il metodo di avanzamento impiegato hanno particolare importanza sul mantenimento del profilo di scavo ossia sul sovra profilo.

Poiché fresando con fresa puntuale, pochissima energia è trasmessa all'esterno della zona di avanzamento nell'ammasso roccioso, ne consegue nessun ulteriore (artificiale) ampliamento delle superfici di separazione e nessuna ulteriore riduzione dell'attrito e coesione lungo le superfici di discontinuità preesistenti. Il profilo della

galleria può perciò con una fresa puntuale fondamentalmente essere realizzato in modo più preciso rispetto a quello realizzabile con esplosivo. In particolare con l'impiego di sistemi di guida e controllo geodetici possono essere realizzate in modo tecnicamente più agevole precisioni del profilo di circa ± 5 cm. Sebbene questa tendenza di base sia nota da tempo, non si ha a disposizione finora nessun risultato sistematico per la quantificazione di questo effetto.

Nell'ambito di una tesi di laurea presso l'Università di Bochum (Germania) (Ruhr-Universität Bochum) nel 2006 sono stati analizzati i dati misurati con laserscan del profilo (System DIBIT®) di una galleria stradale nei depositi alpini "Molasse" (Molassefolgen) per valutare la precisione del profilo [5]. Siccome in questo progetto erano previsti sia dei tratti con fresa puntuale sia tratti in TBM e con esplosivo, è stato possibile valutare gli influssi sia di carattere geologico sia tecnico e quantificare l'effetto dei diversi fattori.

Accanto all'influsso della stratigrafia e della distanza tra le superfici di discontinuità sul sovra profilo condizionato dalla geologia, è stato possibile valutare una significativa influenza del metodo di avanzamento (figura 4). Nella successione di marne argillose e in quella di arenarie, in base alle specifiche circostanze di questo progetto, è stato possibile determinare uno scavo eccedente di circa 1,5 fino a 2,3 volte più elevato nel caso di avanzamento con esplosivo.

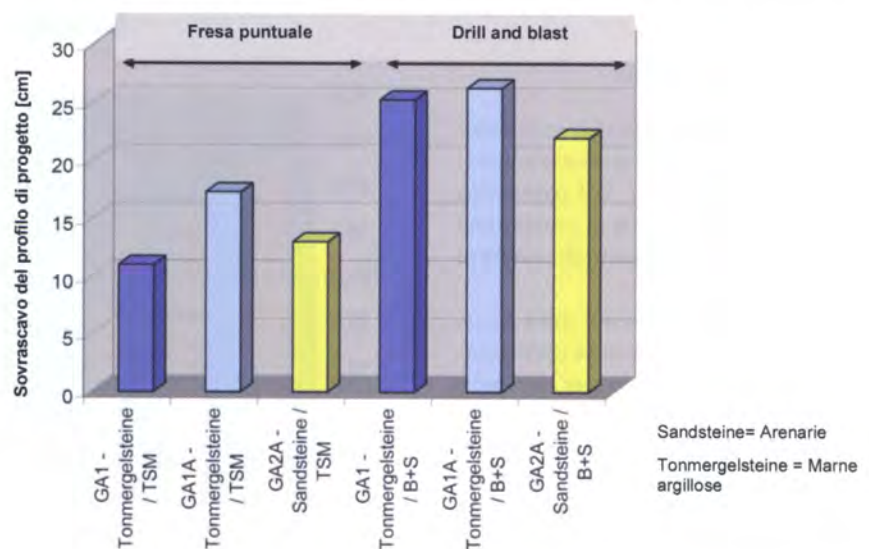


Fig. 4 – Confronto dello scavo eccedente specifico per avanzamento con fresa puntuale (sinistra) e con esplosivo (destra) nelle identiche formazioni di marna argillosa e arenaria (da [7], Fig. 3, p. 141).

3. Limiti e rischi di impiego

Il meccanismo di disaggregazione descritto finora implica, che le frese puntuali reagiscano in modo molto sensibile alle caratteristiche dell'ammasso da disaggregare. Poiché le quantità di energia a disposizione (potenza della fresa), diversamente dall'avanzamento con esplosivo, non può essere aumentata, l'impiego della fresa puntuale a seconda della potenza è sottoposto a limiti tecnici e economici.

L'economicità dell'avanzamento con fresa puntuale in condizioni di progetto regolari si ha, se la durata dell'avanzamento incluso smarino del materiale non necessita di un tempo maggiore di quello per l'esecuzione dei fori di mina – disposizione delle cariche – esplosione e smarino per il metodo tradizionale. In queste circostanze e in concorrenza ai moderni avanzamenti con esplosivo il limite dell'economicità secondo GIRMSCHEID [3] si ha quando la prestazione netta della fresa è circa tra 15 - 20 m³/h per sezioni di cunicolo fino ad una superficie di 20 m² e di ca. 25 - 30 m³/h per sezioni di gallerie fino a 50 m².

Stime errate delle condizioni geologiche d'impiego possono portare a gravi penalizzazioni della produttività, problemi di rispetto del programma lavori e riserve economiche da parte della ditta esecutrice. Nei paragrafi seguenti si tratterà quindi dei fattori geologici e geotecnici determinanti e le loro corrispondenti ripercussioni sul metodo.

3.1. Resistenza della roccia

La resistenza della roccia intatta, usualmente determinata come resistenza a compressione monoassiale (UCS), è il parametro che influenza maggiormente la prestazione e l'usura dell'utensile tagliente di una fresa puntuale.

I diagrammi della prestazione della fresa, elaborati per la valutazione delle corrispondenti prestazioni della fresa per differenti produttori e tipi di macchina, mostrano in modo evidente la più che proporzionale riduzione delle prestazioni della fresa all'aumentare della resistenza (Figura 5) e in dipendenza della potenza della macchina. A causa della forte dipendenza non lineare tra la resistenza a compressione della roccia e la prestazione della fresa è possibile

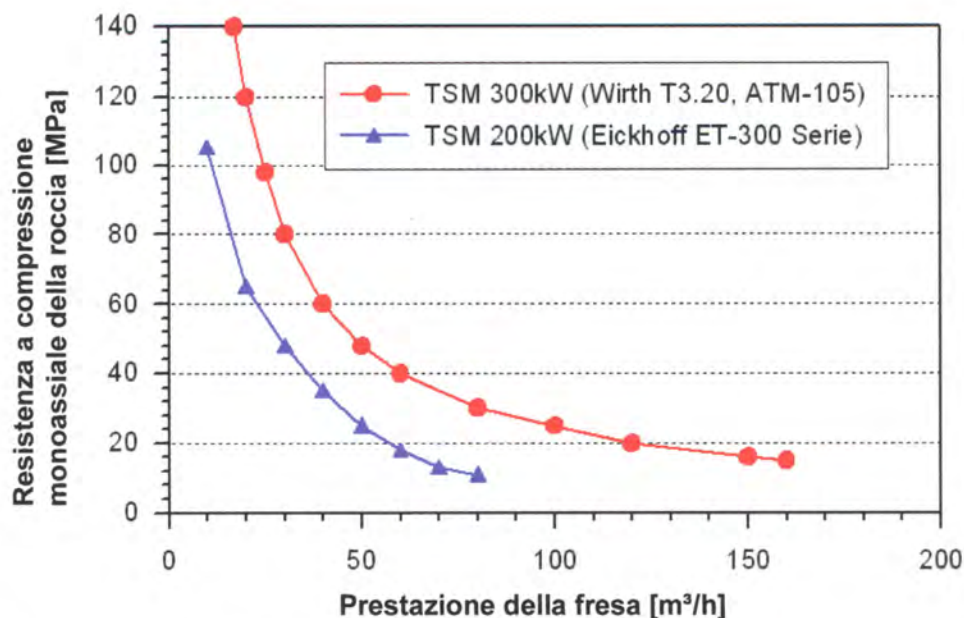


Fig. 5 – Esempio di una cosiddetta "Curva di prestazione della fresa", dipendenza della prestazione netta della fresa dalla resistenza a compressione monoassiale della roccia [MPa] per alcune frese puntuali mediamente pesanti e pesanti.

comprendere i problemi tecnici causati da una caratterizzazione della resistenza della roccia non adeguata o insufficiente. Esperienze in merito sono riportate ad esempio in THURO & PLUNNINGER [9].

L'impiego di frese puntuali pertanto richiede specialmente una sufficiente estensione delle prove e una particolare attenzione alla rappresentatività delle prove nei confronti dell'ammasso. Per favorire l'ampliamento dei dati raccolti si è affermato nel passato anche l'impiego di metodi di prova indiretti,

come ad es. il Point Load Test. La rappresentazione dei risultati di prova in forma di istogramma (Figura 6), la quale mostra la distribuzione di frequenza dei valori rilevati, facilita la stima della resistenza determinante e del suo range di variabilità in corso dell'elaborazione d'offerta.

3.2. Grado di fatturazione dell'ammasso

La mancanza di superfici di discontinuità meccanicamente attivabili, come superfici

Istogramma UCS / Marne

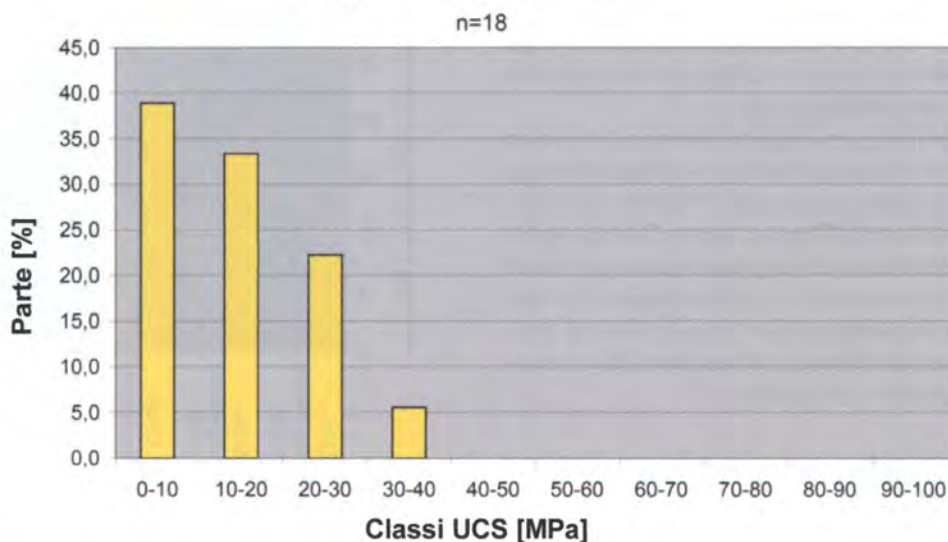


Fig. 6 – Esempio di rappresentazione di valori di resistenza in forma di istogramma.

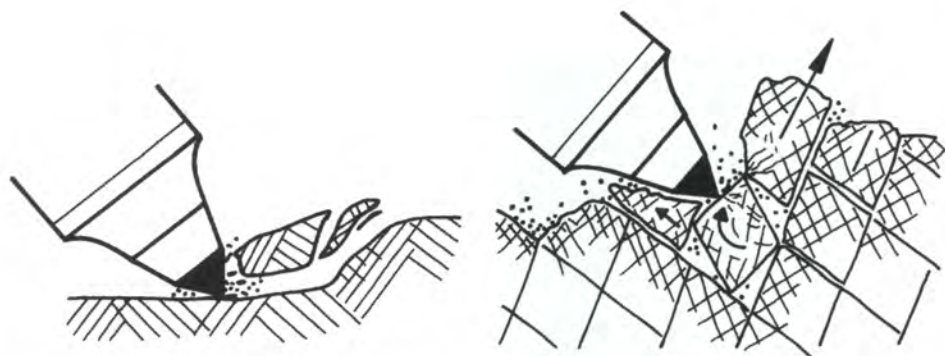


Fig. 7 - Rappresentazione schematica della "scalfitura" ("chipping") di un ammasso intatto attraverso uno scalpello arrotondato (sinistra) e la "fratturazione" ("ripping") di una roccia con discontinuità meccanicamente attivabili (destra; da [6]).

di frattura (diaciasi), stratificazioni, scistosità, rappresenta il caso più sfavorevole per la disaggregazione dell'ammasso con fresa puntuale. In questo caso l'intero volume roccioso deve essere fratturato in piccoli pezzi ("Chips"). Nel caso di fratturazione di un ammasso con superfici di discontinuità meccanicamente attivabili con interasse < ca. 20 cm la fresa può invece, con un'adeguata disposizione delle discontinuità, distaccare interi corpi rocciosi lungo le zone preferenziali di frattura (si veda schema in figura 7). L'influsso di questo effetto sulla prestazione della fresa è rilevante e può a seconda del grado specifico di discontinuità dell'ammasso, portare ad un aumento della prestazione della fresa da circa 200 fino a 260% rispetto all'avanzamento in un ammasso compatto (figura 8).

Tuttavia è essenziale per il positivo influsso delle discontinuità sull'avanzamento di una fresa puntuale che la struttura in questione sia anche di fatto attivabile. Siccome molte scistosità, stratificazioni o fratture chiuse rientrano nel senso geologico tradizionale nella definizione di discontinuità, ma tuttavia non hanno influenza sulla fresabilità dell'ammasso, si fa utilizzo del termine discontinuità "meccanicamente attivabili".

La richiesta di un'adeguata valutazione delle discontinuità meccanicamente attivabili è assai problematica, poiché questo fattore nel corso delle comuni campagne geognostiche (principalmente perforazioni di sondaggio) è di difficile quantificazione. Errori di valutazione sono derivanti anche dalla metodica utilizzata, come ad es. una

non riconosciuta disaggregazione artificiale causata dalla perforazione oppure una rottura o sfogliatura di rocce compatte alterate dopo la messa allo scoperto, questi possono avere notevoli conseguenze sulla stima della fresabilità.

3.3. Tenacità della roccia

La tenacità di una roccia descrive la sua capacità per elevata resistenza di assorbire elevate

deformazioni in zona di pre-failure e post-failure. Questo comportamento è energeticamente sfavorevole per la fresabilità dell'ammasso rispetto al caso di avanzamento con esplosivo, per il quale le rocce reagiscono con frattura fragile dopo esigue deformazioni.

Come parametro per descrivere la tenacità delle rocce si è ampiamente diffuso il coefficiente di tenacità Z , calcolato come rapporto tra la resistenza a compressione monoassiale e la resistenza a trazione determinata in modo indiretto con prova brasiliana ($Z = UCS/SPZ$). Rocce "normalmente" reagenti presentano di solito Z tra 8-13, rocce "fragili" un coefficiente più elevato, rocce "tenaci" più bassi coefficienti.

L'influsso della tenacità sulla prestazione della fresa puntuale diviene pari a circa $\pm 20\%$, in riferimento alla prestazione in un ammasso "normalmente" duttile ($Z=10$) (si veda figura 9). Quindi la tenacità della roccia rappresenta un ulteriore fattore geologico che è soprattutto rilevante per quanto riguarda la produttività.

Poiché la determinazione di valori rappresentativi per la tenacità di solito non sono oggetto delle ordinarie campagne geognostiche, questa proprietà dell'ammasso nel caso di impiego di fresa puntuale dovrebbe avere una maggiore importanza ad esempio tramite la determinazione della resistenza a trazione.

3.4. Condizioni Mixed-face

Condizioni, per le quali all'interno di un singolo fronte di scavo una o diverse rocce presentano differenze molto elevate di resistenza, vengono definite come condizioni "mixed-face".

Condizioni di questo tipo possono presentarsi ad esempio in depositi stratificati di gesso e arenarie con marne o nel caso di presenza di concrezioni e depositi compatti. Esempi concreti sono forniti ad esempio dall'orizzonte "Karneoldolomit" trovato nello scavo della galleria Meister / Bad Wildbad (Germania) (si veda THURO & PLINNINGER, [9]) oppure le frequenti concrezioni carbonatiche o depositi di marna compatti nelle arenarie del triassico superiore (Progetto U2 Nord / Norimberga, si veda PLINNINGER & THURO, [9]). Poiché fenomeni di questo tipo in rocce sedimentarie non sono atipici, meritano particolare

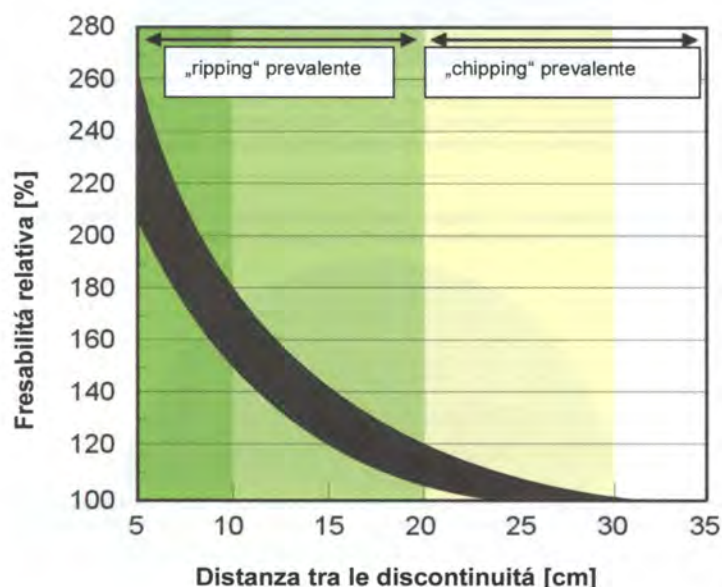


Fig. 8 - Influenza della spaziatura delle discontinuità sulla fresabilità (da [3], Fig. 7.14-4, p. 151).

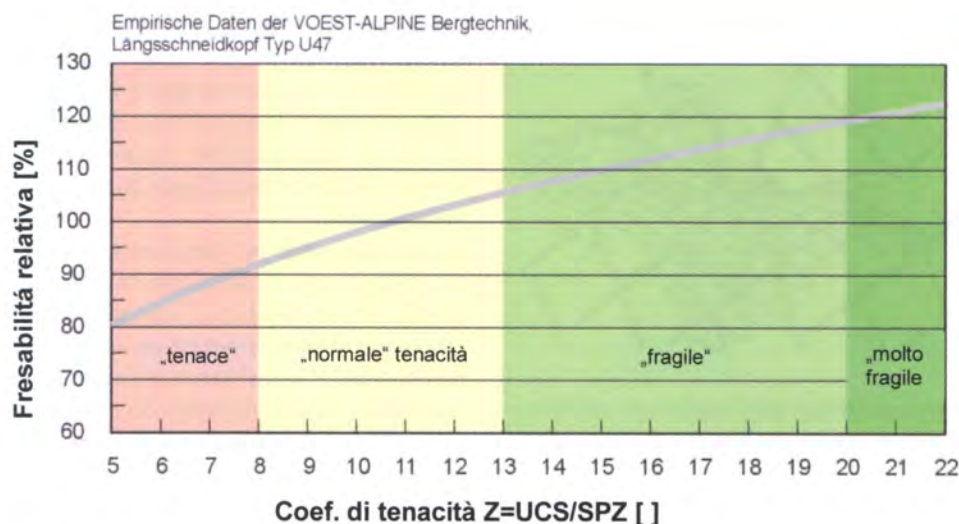


Fig. 9 – Influenza della tenacità della roccia (caratterizzata tramite il coef. di tenacità "Z") sulla fresabilità (secondo [3], Fig. 7.14-3, p. 151).

attenzione in riferimento all'impiego di fresa puntuale.

Nelle seguenti 4 schematizzazioni si riporta un esempio di stratificazione di marne con fresabilità buona e di calcari estremamente difficili da fresare o non fresabili (Fig. 10) e

viene illustrato come le percentuali variabili e le potenze di orizzonti difficilmente fresabili possano influenzare l'avanzamento con fresa puntuale.

Per la determinazione analitica del valore medio della prestazione netta della fresa

nel caso di condizioni "mixed-face" con due tipi di rocce si può adottare in via semplificativa:

$$P = A_A \cdot P_A + A_B \cdot P_B \quad (1)$$

con:

P – Valore medio della prestazione netta della fresa [$m \geq /h$]

A_A – Superficie percentuale roccia A [superficie -%]

P_A – Prestazione netta della fresa roccia A [$m \geq /h$]

A_B – Superficie percentuale roccia B [superficie -%]

P_B – Prestazione netta della fresa roccia B [$m \geq /h$]

Corrispondentemente si può adottare in via semplificativa per la determinazione del valore medio del consumo specifico di utensile nel caso di due tipi di roccia:

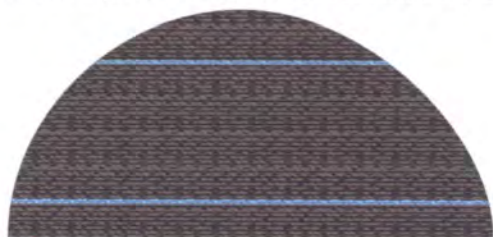
$$W = A_A \cdot W_A + A_B \cdot W_B \quad (2)$$

con:

W – Consumo medio di utensili [picchi/ m^3]

A_A – Superficie percentuale roccia A [superficie -%]

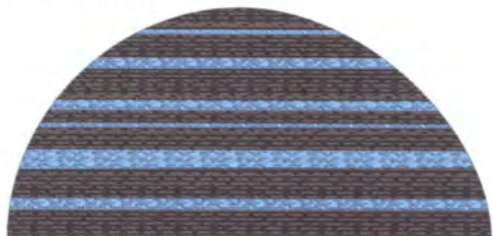
Mixed-Face-Situazione 1: Prevalgono marne, i calcari sono solo molto sporadici (< 5 % della superficie) e con esigue potenze in corrispondenza del fronte di avanzamento.



Fresabilità: La fresabilità con fresa puntuale non è influenzata o solo in modo non significativo dai banchi di calcare.

Buona prestazione della fresa e basso consumo dell'utensile.

Mixed-Face-Situazione 3: Prevalgono come prima marne, ma i depositi di calcare sono coinvolti in modo considerevole nell'abbattimento del fronte (superficie percentuale > 20 %, < 50 %) o presentano grandi potenze (>> 20cm).



Fresabilità: La fresabilità con fresa puntuale è negativamente influenzata dai banchi di calcare in modo persistente. I banchi non possono essere più demoliti separandoli, la fresabilità è sensibilmente pregiudicata. L'usura dei picchi è in particolare aumentata dalla maggiore difficoltà di abbattimento.

L'eventuale supporto tramite impiego puntuale di un martellone idraulico oppure di esplosioni di allentamento risulta essere sensato.

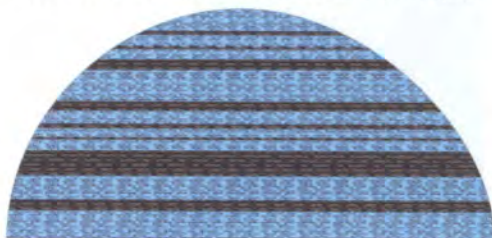
Mixed-Face-Situazione 2: Prevalgono marne, i calcari si presentano in modo evidente ma disposti in modo distribuito (< ca. 20 % della superficie) e con basse potenze (< 20 cm).



Fresabilità: La fresabilità con fresa puntuale è sì negativamente influenzata dai banchi di calcare ma l'avanzamento è possibile ancora con la sola fresa. Singoli banchi di calcare al fronte possono essere eventualmente isolati e il tutto può essere demolito.

Ancora buona prestazione della fresa ed eventualmente consumo dell'utensile leggermente aumentato.

Mixed-Face-Situazione 4: Prevalgono spessi banchi di calcare (> 50 %), gli strati di marne intercalanti sono secondariamente coinvolti nell'abbattimento del fronte.



Fresabilità: Le prestazioni nette della fresa puntuale scendono sotto il limite economico, un avanzamento esclusivamente con fresa puntuale non è più economicamente possibile.

L'impiego di un martellone idraulico o eventualmente l'abbattimento con esplosivo diviene necessario.

Fig. 10 – Esempi di differenti situazioni di mixed-face al fronte scavo con banchi di marne (in marrone) di buona fresabilità e banchi di calcari (in blu) molto difficilmente fresabili, con variabili quantità e potenze dei banchi e la loro rispettiva fresabilità (secondo: [7], p. 144).

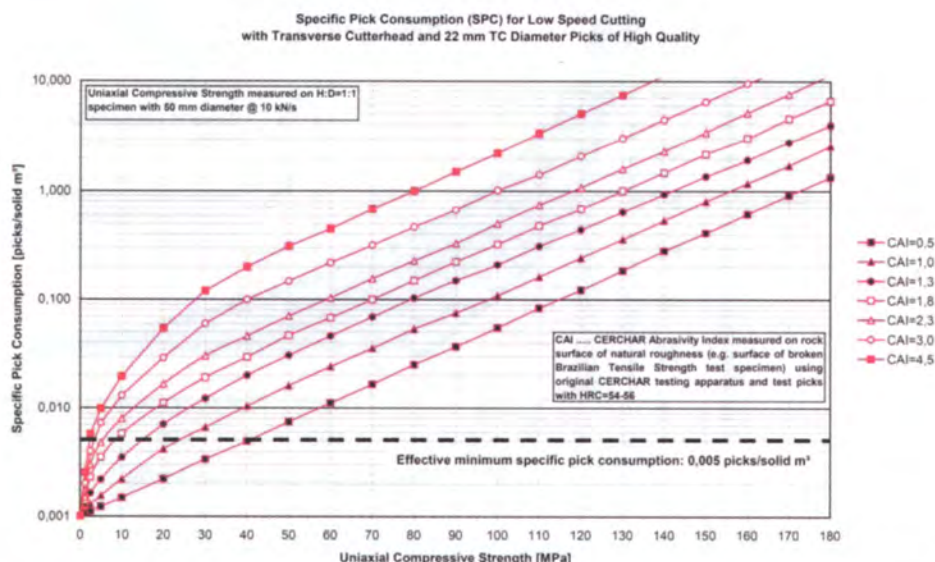


Fig. 11 – Esempio di correlazione empirica tra indice UCS, CAI e il consumo specifico dei picchi per arrotondamento a 22mm. (da: [8], Fig. 7, p. 65).

W_A – Consumo specifico di utensili roccia A [picchi/m³]

A_B – Superficie percentuale roccia B [superficie-%]

W_B – Consumo specifico di utensili roccia B [picchi/m³]

3.5. Abrasività della roccia

Per quanto riguarda l'usura dell'utensile usualmente indicata come consumo per arrotondamento dei picchi [picchi/m] in aggiunta ai fattori finora esposti, è importante anche l'abrasività delle rocce riscontrate, la quale è definita come parametro totale di tutte le proprietà geologiche che influenzano l'usura [6].

Per l'analisi e la determinazione dell'abrasività di una roccia si hanno numerosi approcci, tra i quali si sono affermati le "Prove indice" e i procedimenti mineralogici-petrografici (per un quadro attuale si veda PLINNINGER & RESTNER, [8]).

Tra le prove indice prima fra tutte trova applicazione la prova di abrasività secondo le raccomandazioni di prova CERCHAR. Questa prova si basa su un puntale di prova di geometria e durezza definite il quale in condizione di carico costante viene trascinato per 10 mm sul corpo di prova. L'indice di abrasività CERCHAR (CAI) è calcolato come valore medio tra 2-5 singole prove, in base alla larghezza di utensile tagliante

conico rimanente sul puntale. Per passare al consumo specifico dei picchi esistono dei diagrammi empirici, come ad esempio il diagramma della ditta SANDVIK riportato nella seguente Figura 11.

Il fatto, che accanto all'indice di abrasività CAI nella valutazione dell'usura dei picchi rientri anche la resistenza a compressione monoassiale, sebbene questa influenzi già in modo rilevante la determinazione del CAI, mostra come già accennato al paragrafo 3.1 l'importanza di questo parametro e sottolinea le indicazioni fornite in merito

alla determinazione e rappresentazione di questo parametro.

4. Caso esemplificativo Galleria Castel Badia

4.1. Descrizione del progetto

La Galleria Castel Badia costituisce un tratto dell'ampliamento della strada statale SS49 della Pusteria realizzato dalla Provincia Autonoma di Bolzano. L'intero tratto di intervento presenta una lunghezza di circa 1,7 km lungo la sinistra idrografica della val Pusteria presso San Lorenzo di Sebato, esso consiste nella realizzazione di una strada a due corsie con velocità di 70-80 km/h. Nel corso dei lavori erano da realizzare 2 tratti di galleria con scavo tradizionale di lunghezza rispettivamente di 310 m e 105 m. L'opera in oggetto si trova nella zona della cosiddetta formazione "sud alpina". Sotto a una coltre prevalentemente esigua di sedimenti quaternari si estende la successione metamorfica della cosiddetta "Fillade quarzifera di Bressanone" (Ordoviciano, età ca. 450-500 milioni di anni). Nella fillade quarzifera sono presenti strati secondari di Paragneis e filoni di rocce intrusive (tra cui diorite ricca di quarzo). Particolarmente importante per i lavori di avanzamento è la presenza, direttamente sopra al tracciato della galleria, della fortificazione Castel Badia, risalente intorno all'anno 1000 d.C., la quale è monumento



Fig. 12 – Fortificazione Castel Badia, vista dal portale est in asse alla galleria (Foto: Plinninger).

posto sotto tutela (Figura 12). Dopo 800 anni scarsi di utilizzo come convento benedettino, la fortificazione fu utilizzata come ospedale militare durante la Lotta Tirolese di Liberazione dall'occupazione Napoleonica – Bavarese (1797–1813), successivamente come ricovero per i poveri. Attualmente la fortificazione è adibita ad Hotel. Il sottopasso di quest'opera altamente sensibile con coperture di circa 50 m e il contemporaneo esercizio della struttura alberghiera ha rappresentato una sfida sia per la progettazione sia per l'esecuzione della galleria con metodo tradizionale.

4.2. Situazione nella primavera 2009

Il consorzio fra le ditte Oberosler Cav. Pietro s.p.a., Trento e Wipptaler Bau, Vipiteno è stato incaricato di eseguire nel settembre 2009 la Galleria Castel Badia. Il concetto di scavo originario prevedeva l'avanzamento con esplosivo. Si è presupposto che attraverso l'adattamento del procedimento di esplosione potessero essere rispettati i valori limite fissati per legge e quelli specifici di progetto, e che potessero essere così evitati danni alla fortificazione Castel Badia. Tuttavia sebbene le vibrazioni erano tenute continuamente sotto controllo e le accelerazioni causate dalle esplosioni rientravano nei limiti, ad un avanzamento posto a circa 30 m dal portale ovest furono accertati danni alla fortezza e tutti i lavori furono interrotti il 16.09.2009. La costruzione della galleria stava così al centro dell'interesse dei media. Il consorzio costruttore della galleria incaricò il consorzio costituito dallo studio di ingegneria Dr. Plinninger Geotechnik, Bernried e hbpm Ingegneri, Bressanone della redazione di uno studio di fattibilità in merito all'impiego di avanzamento con fresa puntuale [1].

Nell'ambito dello studio di fattibilità furono valutati tutti i dati di carattere geologico - geomeccanico allora a disposizione ed elaborato un concetto d'impiego della fresa. Le pronosticate prestazioni e consumo dell'utensile (si veda Figura 13) lasciavano concludere, che l'avanzamento con una fresa pesante secondo le classificazioni tradizionali era antieconomico, ma sarebbe stato però ancora nei limiti tecnici di fattibilità. Tuttavia i valori delle vibrazioni finora sperimentati indicavano in modo chiaro l'impiego del sistema con fresa.

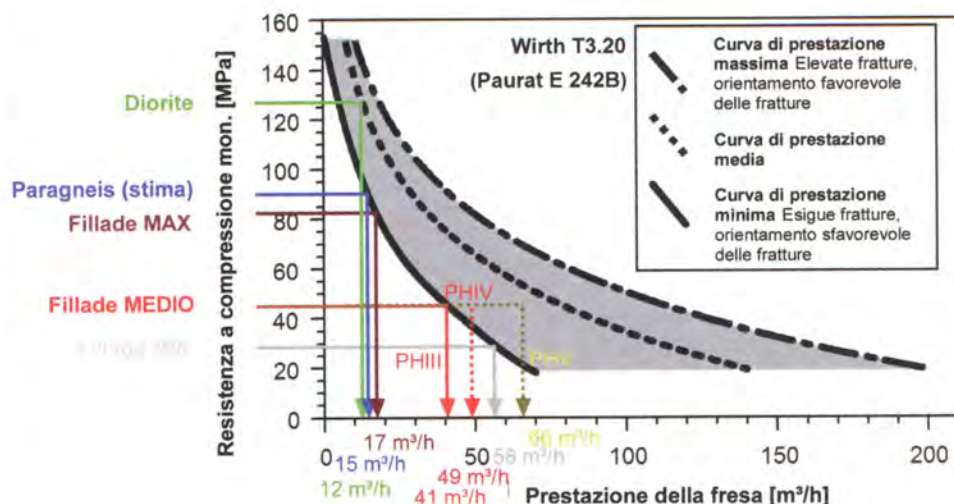


Fig. 13 – Prestazioni della fresa previste con l'impiego della macchina WIRTH T3.20 secondo la curva specifica fornita dal produttore e in riferimento a tutte le stime in merito alla tenacità, resistenza e configurazione delle superfici di separazione (secondo: [1]).

4.3. Avanzamento con fresa puntuale sotto Castel Badia

Il 04.03.2010 è stato ripreso l'avanzamento sotto Castel Badia con l'utilizzo di una fresa puntuale. L'avanzamento è avvenuto in 2 sezioni parziali – calotta e strozzo - da ovest verso est. L'abbattimento della calotta è stato completato il 18.05.2010 al portale est, senza che si presentassero né vibrazioni misurabili né danni alla fortezza.

4.4. Piano di utilizzo della macchina e piano di avanzamento

Il consorzio esecutore dei lavori ha organizzato l'impiego di una fresa puntuale pesante del tipo WIRTH T3.20 (Figura 1). Con una potenza della fresa di 300 kW e un peso di circa 120 t questa macchina rientra nella classe delle cosiddette "fresche pesanti". Per evitare l'eccessiva diffusione di polveri la testa della fresa è stata attrezzata durante la fresatura con un sistema di abbattimento delle polveri a getto nebulizzato alimentato ad acqua, le restanti polveri sono state abbattute manualmente con spruzzi d'acqua. La ventilazione è stata garantita da una condotta di aspirazione con filtro antipolvere. Il materiale di smarino è stato raccolto dal sistema di carico della macchina e riversato, attraverso un nastro trasportatore, su un autocarro. La sicurezza della cavità scavata è stata garantita secondo i principi del Nuovo Metodo Austriaco NATM con un rivestimento

armato in calcestruzzo proiettato e un sistema di ancoraggio con ancoraggi per roccia SWELLEX.

4.5. Documentazione geotecnica / tecnica

Per garantire un'equa distribuzione del rischio riguardante l'avanzamento, il quale era stato valutato al limite tecnico di fattibilità, è stato concordato già preliminarmente alla fase di avanzamento un modello di remunerazione, il quale prevedeva che il compenso fosse suddiviso in 5 classi di fresabilità. Queste classi sono state definite durante l'avanzamento in funzione delle più importanti caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso riscontrato.

Presupposto per l'attuazione di questo modello di remunerazione era tuttavia un'intensiva assistenza geologica-geotecnica all'avanzamento, che è stata condotta secondo il principio del contraddittorio dall'ufficio Geoproject di Bolzano, incaricato dalla committenza, e dal consorzio per l'assistenza ai lavori della galleria Castel Badia costituito da Dr. Plinninger Geotechnik, Bernried – hbpm Ingegneri, Bressanone su incarico del consorzio esecutore dei lavori. Nell'ambito dell'assistenza è stato condotto un singolare programma, per un progetto di queste dimensioni, costituito da un significativo prelievo di provini, prove di laboratorio geomeccaniche e documentazione delle prestazioni e dell'usura dell'utensile (Figura 14).



Dobrosier		Galleria Castel Badia	100 hbm
Documentazione tempi di fresatura			
Turno	Sezione	Quota	Data
Turno giornaliero □ Turno notturno	Quota □ Strada □ Area rocciosa	27	09 / 2010
Preparazione: cronometro, orologio, modulo, otoprotettore, mascherina			
Cronometraggio		Annotazioni:	
1) Inizio fresatura	07:27 h		
2) Tempo netto di fresatura cronometrato:	216 min 16 sec	corrispondente a 4,77 h	
3) Fine fresatura	15:41 h		
4) Fine smarrimento	16:20 h		
Lavori accessori:			
5) Tempo movimentazione trivella e smontaggio, da:	39 min	sec	
6) Tempo spostamento fresa puntale, da:	20 min	sec	
7) Altre interruzioni, da:	108 min	sec	
Determinazione del volume freato			
8) Area sezione scavo:		Sezione poligonale - sezione da pagina 548 - progetto 542	
9) Lunghezza avanzamento:			
Calcoli/valutazione risultati:			
10) Volume di scavo:	$= [8] \times [9] =$	165,00 m³ (scavo)	simbolo
11) Tempo lordo di fresatura:	$= [2] - [1] =$	8:22 h	
12) Prestazione lorda di fresatura:	$= [10] : [11] =$	20,02 m³/(scavo)h	
13) Prestazione netta di fresatura:	$= [10] : [2] =$	64,59 m³/(scavo)h	
14) Fattore lordo/ netto:	$= [11] : [2] =$	1,32	
15) Smarrimento dopo fine fresatura:	$= [4] - [3] =$	0:58 h	
Note esplicative:			
ad 1) corrisponde all'intervallo netto della fresatura, senza avanzamenti, inestensione ecc.			
ad 2) somma variabili, cronometrato			
ad 3) corrisponde al fine della fresatura, in presenza dopo la fresatura sono documentati separatamente			
ad 4-7) parzialmente da cronometro, altrimenti da orologio			
ad 8) quota di 3 m (quadrato) (quadrato, quadrato, quadrato, quadrato)			
Stefano Corbelli Responsabile P.O. 100			

Fig. 14 – Esempio di documentazione della prestazione della fresa in corso di avanzamento: Ingegnere al fronte di avanzamento (sinistra) e modulo utilizzato (destra).

Per consentire una valutazione della resistenza monoassiale, pronta e idonea al cantiere, sono stati condotti sul posto dei Point Load Test (metodo di prova indiretto). Attraverso il campionamento concordato e la prova secondo il principio del contraddittorio è stato assicurato, che per ogni abbattimento fossero determinati i valori rappresentativi dei parametri. I valori medi della resistenza a compressione monoassiale ammontano a circa 70 MPa, in alcuni casi si sono raggiunti anche valori di punta superiori a circa 175 MPa.

A completamento dei Point Load Test sono state condotte in laboratorio delle prove brasiliane, le quali in combinazione con i valori di resistenza a compressione consentono la valutazione della tenacità della roccia attraverso il "coefficiente di tenacità" Z definito come rapporto tra la resistenza a compressione e la resistenza a trazione da prova brasiliana. La fillade quarzifera rinvenuta ha presentato un comportamento tenace.

Per la valutazione dell'abrasività della roccia sono state condotte dal consorzio di assistenza ai lavori complessivamente 25 prove indice secondo il metodo CERCHAR. Essendo il valore medio dell'indice di abrasività CERCHAR CAI pari a 3,0, la fillade quarzifera rinvenuta è da classificare come "molto abrasiva". Analisi dei filoni di quarzo hanno fornito, come ci si aspettava, valori estremamente elevati del parametro CAI fino a 5,5.

Inoltre nella fillade era presente una scistosità interna prevalentemente scagliosa fino a laminare (mm-cm), che però solo in certe zone era attivabile dalla fresa. Durante la documentazione dei lavori di fresatura è stato possibile osservare, che l'ammasso doveva venir in prevalenza scalfito (Figura 15). Solo parzialmente era possibile frattu-



Fig. 15 – Avanzamento con fresa puntale pesante nella fillade quarzifera. A causa della ridotta fatturazione dell'ammasso sono chiaramente riconoscibili le tracce lasciate da ogni picco sul fronte (foto: Plinninger).

rare apprezzabili porzioni di ammasso lungo le superfici di discontinuità.

4.6. Prestazioni della fresa e dell'avanzamento

I dati di base per la valutazione della fresabilità dell'ammasso sono stati ottenuti dalle dettagliate relazioni dei singoli turni di lavoro elaborate dalla ditta esecutrice così pure dalla regolare documentazione dei singoli avanzamenti della fresa, che è stata condotta dal consorzio per l'assistenza ai lavori circa tre volte alla settimana e che comprende la documentazione delle singole fasi di lavoro con precisione del secondo. Da questi dati è stato possibile ricavare tra l'altro il trend della prestazione e del consumo di utensile (Figura 16), che confermano le esperienze poste alla base del modello di remunerazione.

Così ad esempio nella Figura 16 è chiaramente riconoscibile la correlazione negativa fra l'usura dell'utensile e la prestazione della fresa, ossia in zone di roccia compatta sono state ottenute modeste prestazioni della fresa con contemporanea elevata usura dell'utensile e viceversa.

Le prestazioni lorde della fresa, documentate dalle relazioni relative ai turni di lavoro, ammontano tra ca. 5 m³/h e ca. 41 m³/h,

Entwicklung Fräsleistung und Verschleiß / Sviluppo delle prestazioni e dell'usura

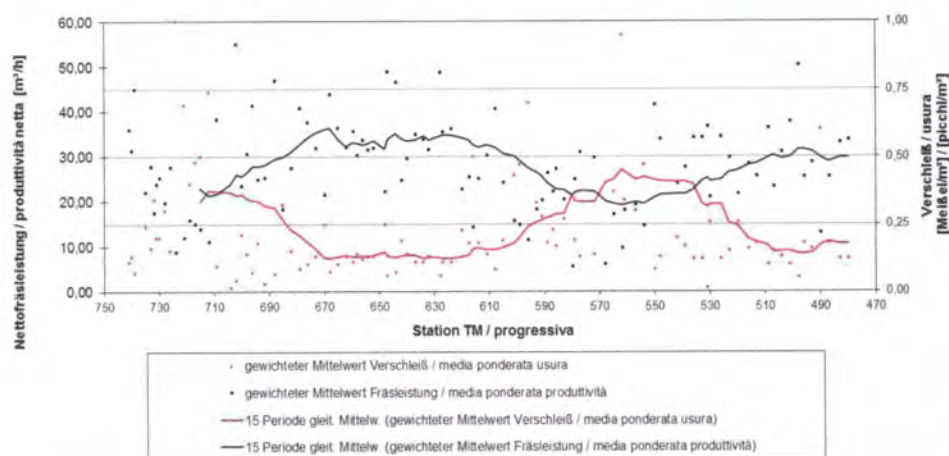


Fig. 16 – Andamento del consumo specifico dell'utensile (rosso) e della prestazione netta della fresa (nero) per l'avanzamento della galleria Castel Badia (da [2]).

con una media di 19 m³/h. Tuttavia per consentire la correlazione con i parametri dell'ammasso è notevolmente più rilevante la prestazione netta raggiunta, la quale considera esclusivamente il tempo di lavoro nel quale la testa della fresa è in azione nell'ammasso, al netto di qualsiasi lavoro accessorio e tempi morti. È stata raggiunta in media una prestazione di circa 28 m³/h (netto), che secondo la classificazione riportata in [11] è annoverabile come "modesta" prestazione.

Con queste prestazioni della fresa è stato possibile ottenere un avanzamento di circa 4 m per giorno lavorativo, le migliori prestazioni settimanali si attestavano a circa 26 m per settimana lavorativa.

4.7. Usura dell'utensile

Sulla base delle difficili condizioni di utilizzo attese è stato impiegato dal consorzio esecutore dei lavori un sistema di picchi a fusto piatto di 38 mm con forma tarchiata e puntale massiccio in carburo metallico Ø22 mm, il quale si è dimostrato valido. Il cambio dei picchi della testa fresante è stato annotato dalla ditta esecutrice nelle relazioni dei turni di lavoro. Nel complesso sono stati sostituiti 3.153 picchi, in media 34 pezzi per turno di lavoro. Il valore medio del consumo specifico dei picchi si è attestato a 0,28 picchi/m³ (Figura 16). Quest'usura è da classificarsi come "molto elevata". In particolari zone con elevata resistenza ed elevato contenuto di quarzo, sono stati rag-

giunti anche valori di usura "estremamente elevati" fino a sopra 1,0 picchi/m³.

Le forme specifiche di usura dei picchi sono state analizzate più in dettaglio dal consorzio di assistenza ai lavori nell'ambito di quattro conteggi distribuiti durante i lavori. Analisi statistiche di questo tipo rappresentano un importante aiuto per la determinazione indiretta delle cause dell'usura e per la valutazione di possibilità di ottimizzare l'attrezzatura. Con una percentuale ogni volta di circa il 30 % l'usura asimmetrica e rotture a scaglie del puntale in carburo metallico rappresentano di gran lunga le cause più frequenti della sostituzione dell'attrezzo. Forme di usura, le quali sono da ricondursi a usura

da abrasività, sono proporzionalmente minori rispetto alle forme citate in precedenza (Figura 17). Su alcuni picchi si è potuto osservare inoltre parziali colorazioni blu-violacee, le quali sono indice che le temperature sull'attrezzo possono essere valutate fino a circa 300 °C.

La distribuzione rilevata delle forme di usura è da valutare in considerazione del tipo di picco massivo come ulteriore indicazione delle elevate abrasività e resistenza dell'ammasso, che ha condotto a frequenti rotture fragili dei puntali in carburo e interruzioni.

5. Conclusioni / Raccomandazioni

In particolare per progetti in ambito urbano l'impiego di una fresa puntuale rappresenta un'alternativa interessante al metodo di avanzamento tradizionale con esplosivo, a causa delle sue favorevolissime caratteristiche in merito alle emissioni. Spesso possono essere così realizzati quei progetti, per i quali a causa di strutture sensibili nelle vicinanze, l'avanzamento con esplosivo sarebbe da escludere e/o limitare (rispetto dei limiti delle vibrazioni, divieti notturni di esplosione, ecc...) oppure soggetto a importanti penalizzazioni. D'altra parte la sensibilità di una fresa puntuale nei confronti delle caratteristiche geologiche e ingegneristiche dell'ammasso, tra cui resistenza, tenacità, grado di discontinuità e abrasività

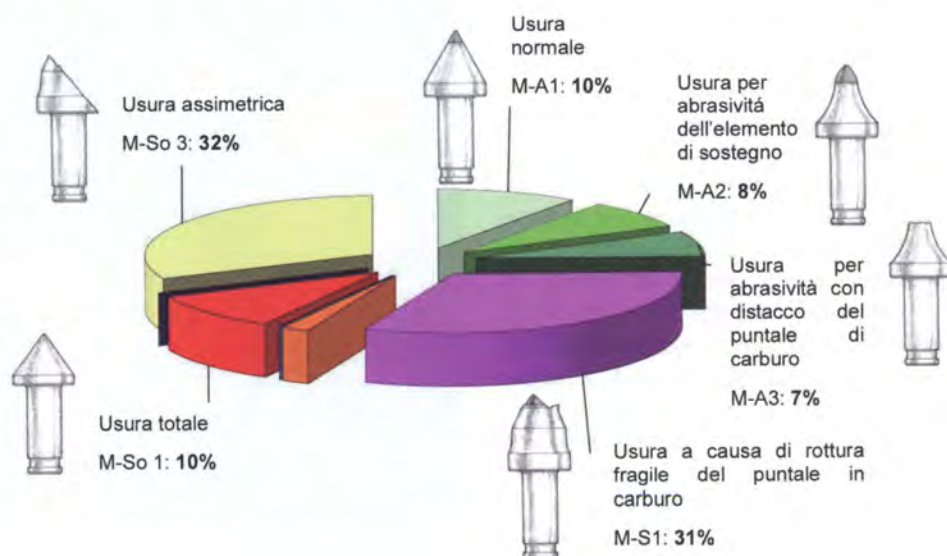


Fig. 17 – Distribuzione delle forme rilevate di usura dell'utensile (secondo la classificazione Plinninger, [6]).

rappresenta un rischio, la cui non idonea considerazione può portare a importanti perdite di prestazione, dispute contrattuali o addirittura al fallimento del sistema.

Il progetto qui presentato rappresenta sicuramente un esempio particolare per questi aspetti e mostra come i problemi emersi nella realizzazione della galleria sono stati infine risolti attraverso la collaborazione interdisciplinare di tutte le figure coinvolte nei lavori. Sebbene le condizioni geologiche, formazioni rocciose cristalline con resistenza a compressione monoassiale fino a circa 150 MPa, non inducessero a prevedere fin dall'inizio un avanzamento con fresa puntuale, l'avanzamento per la galleria Castel Badia è stato condotto con una fresa puntuale pesante del tipo WIRTH T3.20 con esigue vibrazioni alla sovrastante fortificazione. La logistica e l'attrezzatura impiegate dalla ditta esecutrice hanno dato buoni risultati in condizioni difficili.

Hanno fornito buona prova di sé anche i modelli impiegati nel corso dello studio di fattibilità per la determinazione delle correlazioni tra resistenza, superfici di discontinuità, tenacità dell'ammasso e prestazione netta della fresa da una parte e dall'altra tra resistenza, abrasività e usura dell'utensile. Questi modelli hanno contribuito, come

strumento fondamentale, alla valutazione del rischio, alla stima realistica delle possibilità e all'impiego di un equilibrato modello contrattuale.

Bibliografia

- [1] ATI "ASSISTENZA TECNICA GALLERIA CASTEL BADIA" DR. PLINNINGER GEOTECHNIK – HBPM INGEGNERI (2009) – Progetto di sistemazione della strada della Pusteria SS49 tra km 27+300 e 29+000: Galleria Castel Badia / San Lorenzo – Presa di posizione 2008_D_0032-1: Presa di posizione in merito alla fresabilità dell'ammasso, 47 pagine, 22 tabelle, 22 figure, 7 allegati, Bernried/Bressanone, 14.01.2010.
- [2] ATI "ASSISTENZA TECNICA GALLERIA CASTEL BADIA" DR. PLINNINGER GEOTECHNIK – HBPM INGEGNERI (2010) – Relazione geotecnica finale Galleria Castel Badia, 30 pagine, 8 allegati, Bernried/Bressanone, 30.08.2010.
- [3] GIRMSCHEID, G. (2008) – Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau, 694 S., Berlin (Ernst & Sohn).
- [4] LAMMER E., GEHRING K. (1998) – Verbesserung von Schneidwerkzeugen und Schneidsystemen von Teilschnittmaschinen.- Felsbau, 16: 348-356, Essen (Glückauf).
- [5] LENZE P. (2006) – Mehrausbruch am Achsraintunnel L200 neu, Dornbirn Nord-Schwarz-
- achtobel, unveröffentlichte Diplomarbeit, Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Geowissenschaften
- [6] PLINNINGER R.J. (2002) – Klassifizierung und Prognose von Werkzeugverschleiß bei konventionellen Gebirgslösungsverfahren im Festgestein.- Münchner Geologische Hefte, Reihe B, 17 - Angewandte Geologie, XI + 146 S., 99 Abb., 36 Tab, München (Hieronymus).
- [7] PLINNINGER R.J. (2011) – Teilschnittmaschinen als alternatives Vortriebsverfahren im innerstädtischen Tunnelbau – Chancen und Risiken.- in: Tiedemann, J. (Hrsg., 2011): Veröffentlichungen zur 18. Tagung für Ingenieurgeologie und zum Forum für junge Ingenieurgeologen, Berlin, 16.-19. März 2011: S. 139-145 (Berlin).
- [8] PLINNINGER R.J.; RESTNER U. (2008) – Abrasiveness testing, quo vadis? - a commented overview of abrasivity testing methods.- Geomechanik und Tunnelbau: 2008, 1: 61-70 (Ernst und Sohn).
- [9] PLINNINGER R.J.; THURO K. (2001) – Erfahrungen bei Fräsvortrieben im Nürnberger U-Bahn-Bau. - Felsbau 19,1: 1-8, Essen (Glückauf).
- [10] THURO K.; PLINNINGER R.J. (1998) – Geologisch-geotechnische Grenzfälle beim Einsatz von Teilschnittmaschinen. - Felsbau 16: 358-366.
- [11] THURO K., PLINNINGER R.J. (2003) – Klassifizierung und Prognose von Leistungs- und Verschleißparametern im Tunnelbau.- in: DGGT (Hrsg.): Taschenbuch für den Tunnelbau 2003, 27: 62-126, Essen (Glückauf).

Summari of:

Chances and risks for roadheader application taking into account the experiences of the Castelbadia tunnel project

Ralf J. PLINNINGER

Dr. Plinninger Geotechnik

Reinhold PALLA

hbpm Ingegneri s.r.l.

Especially in urban tunnelling the use of roadheaders presents an interesting alternative to conventional drill and blast excavation. The very low vibration emissions caused by a roadheader can effectively contribute to projects with sensible infrastructure where blasting might be prohibited or

significantly limited. However, the susceptibility of roadheader operation to geological and geotechnical influences (especially rock strength, rock toughness, weathering and rock mass fracturing) implies a significant risk potential to the application of this method. In order to limit the risks regarding low excavation performance and high tool wear rates, the most important rock mass features have to be investigated care-

fully in the course of the preliminary site investigations. This paper is intended to present basic experiences with roadheader application, important influencing factors and their impact on roadheader excavation. Additionally the Castelbadia tunnel project, located near San Lorenzo di Sebato in the province of Alto Adige / Italy is presented as an example for the practical opportunities and risks of this procedure.