



FOCUS ON

GALLERIE: SCAVO CON I MARTELLI DEMOLITORI IDRAULICI

Guida ragionata sulle metodologie,
gli strumenti e i vantaggi

FOCUS ON

GALLERIE: SCAVO CON I MARTELLI DEMOLITORI IDRAULICI

**Guida ragionata sulle metodologie,
gli strumenti e i vantaggi**

FOCUS ON

è una collana tecnica realizzata dalla Indeco Ind. Spa

Coordinamento editoriale:

Lucio Garofalo

Comitato di redazione:

Mauro Amato, Alessandro Ciccolella, Nicola Colaluca,
Lucio Garofalo, Alessandro Reina

Progetto grafico, impaginazione:

CaruccieChiurazzi

Fotografie:

Archivio Indeco, Lucio Garofalo e altri

Traduzioni:

Inglese a cura di Amy Stover

Francese a cura di Claude Albanese

Coordinatore traduzioni lingua francese Anthony Green



Indeco Ind. Spa

Italia 70132 Bari - ZI Viale Lindemann, 10

T +39 080 531 33 70 - F +39 080 537 79 76

info@indec.it - www.indec.it

INDICE

6	Introduzione La nostra esperienza nello scavo di gallerie con il martello	37	Capitolo 3 Martello, metodo di scavo, consolidamento
9	Capitolo 1 Cenni sulle caratteristiche geologiche dell'ammasso roccioso e sulla scelta del metodo di scavo	38	Cenni sullo stato dell'arte del martello demolitore
10	Premessa	39	La demolizione
11	Il profilo geomeccanico e il rilievo sulla scelta del metodo di scavo L'importanza dell'RQD	40	Un criterio di produttività
15	La scelta del metodo di scavo	46	I principali metodi di scavo di gallerie con il martello demolitore
19	Capitolo 2 Metodo semplificato per la scelta del sistema di scavo	50	Il consolidamento del cavo
20	Premessa	51	- Il pre-consolidamento del nucleo-fronte
21	Il concetto di excavability	52	- Il rivestimento prima fase
22	- La resistenza a compressione	53	- Bullonatura e chiodatura
23	- Deformabilità		- Lo scavo e il getto dell'arco rovescio
24	- Il livello di fratturazione e la discontinuità	54	La scelta del martello demolitore per lo scavo in galleria
25	Il metodo di scelta: l'analisi multiobiettivi AHP e i criteri di scelta	55	L'allestimento del martello per applicazioni in galleria
26	- Produzione oraria	59	Capitolo 4 Alcuni casi di scavo di gallerie con il martello demolitore
28	- RMR (Rock Mass Rating)	60	SGC E 78 - La Galleria Greppoli
29	- Geometrie e variabili	62	AUTOSTRADA A3 - La Galleria Serra Rotonda
29	- Matrice dei criteri		Casi storici
30	- Analisi dei costi	66	Alta Velocità Bologna - Firenze
	Esempi	68	La nuova metropolitana di Losanna
35	Considerazioni sul metodo semplificato	70	Variante di Valico
		73	Autori

LA NOSTRA ESPERIENZA NELLO SCAVO DI GALLERIE CON IL MARTELLO

Da tempo valutavamo l'ipotesi di organizzare, sintetizzare e condividere, sotto forma di "guide ragionate", le esperienze Indeco accumulate in quasi quarant'anni di attività nel settore. Del resto molto spesso le aziende, nella rincorsa giornaliera al raggiungimento dei loro obiettivi, non trovano il tempo di fare una "riflessione ordinata" sulle conoscenze accumulate nel corso del tempo, sull'utilizzo giornaliero, sul campo, dei propri prodotti.

I lavori di scavo, di demolizione e di riciclaggio, nei settori delle costruzioni e del movimento terra, in utilizzi specifici come il "trenching", o la demolizione primaria e secondaria nelle cave e miniere, il tunnelling.

Da qui nasce l'idea di dedicare a questi specifici settori d'utilizzo delle nostre attrezzature, dei vademecum, delle guide ragionate, che possano essere di utilità a tutti gli operatori interessati, dai committenti ai progettisti, dalle imprese di costruzione ai capicantiere. La scintilla, il "casus belli", che ha provocato, in me in particolare, quella reazione d'orgoglio che ci ha portato ad elaborare questa pubblicazione, si è verificato qualche anno fa a Berlino, durante la riunione annuale degli associati CECE (Committee for European Construction Equipment). In quell'occasione, nel bel mezzo di una crisi mondiale del settore ed al cospetto di una platea di impensieriti manager ed imprenditori, tra le presentazioni dei relatori, ci fu un'imbarazzante esibizione autoreferenziale di una azienda tedesca, leader nella produzione di TBM (Tunnel Boring Machine), dove venivano esaltate la presenza nel mondo e le prestazioni di queste macchine. Nulla da dire su quanto affermato dallo speaker, molto invece sull'idea, innanzitutto errata sul piano tecnico, che le frese a tutta sezione siano sempre e comunque il sistema più efficiente per scavare gallerie.

Ma c'è di più. Quel concetto, così assoluto, cozzava anche con la realtà di decine di gallerie che Indeco ha contribuito a scavare grazie ad una tecnologia affidabile ed efficace, affinata in anni di costante investimento in ricerca e sviluppo.

L'Italia del resto, per via del suo territorio e delle sue complesse formazioni geologiche, può vantare molte imprese che sono riconosciute a livello internazionale per lo scavo di gallerie. Non è dunque un caso se, da sempre, i nostri progettisti e i nostri tecnici, si siano cimentati con problematiche che raramente, per tipologia e quantità, si riscontrano in altri paesi, e l'abbiano fatto spesso ricorrendo a nuove soluzioni, come appunto lo scavo con il martello. Un metodo utilizzabile anche grazie alla messa punto di nuovi sistemi di consolidamento in ammassi rocciosi molto problematici, e oggi "esportato" all'estero.

Tutto questo, oltretutto, avveniva nonostante le limitazioni e i rischi connessi all'utilizzo dell'esplosivo, che continuava comunque a rappresentare una scelta apparentemente obbligatoria e vantaggiosa. La nostra esperienza di mercato, che da decenni è davvero il mondo, ci ha però insegnato che non in tutti paesi si conoscono a fondo le esperienze, le tecniche esecutive, le scelte progettuali, i vantaggi economici e la "flessibilità" dello scavo in galleria con i martelli demolitori idraulici, i quali possono appunto essere alternativi o complementari all'esplosivo.

In nessun'altra attività del mondo delle costruzioni come nel tunnelling, l'incertezza, la problematica inaspettata e "lo scontro/incontro" con la natura richiedono un approccio più che mai flessibile. Una considerazione ancora più importante alla luce dei numerosi problemi che negli anni (e anche mentre ci apprestiamo a

pubblicare questa guida) sono stati legati all'impiego quasi fideistico della TBM; problemi che senz'altro non sono comparabili ai successi in termini numerici, ma comunque rimarchevoli da un punto di vista dei ritardi sulla tempistica dei lavori e dell'impatto economico sui costi delle opere.

Quello che in ogni caso risulta più evidente è che l'alea di una campagna geognostica non esauriente o corrispondente solo in parte alla realtà, è così grande da poter inficiare, in itinere, realizzazioni infrastrutturali di enorme impegno. Elevare un particolare sistema di scavo e avanzamento ad unica soluzione vincente, non è quindi solo intrinsecamente sbagliato, ma rischioso e probabilmente anche risibile.

Più avanti, in questa guida, saranno descritte le più frequenti variabili che possono influenzare la scelta di un metodo di scavo rispetto ad un altro, per la realizzazione di gallerie naturali. La nostra tesi, in sostanza, è che in condizioni di incertezza solo un approccio "flessibile", quale quello offerto dal martello (in certi casi anche in combinazione con l'esplosivo), consente vie di uscita attraverso "piani B".

Per concludere colgo dunque l'occasione per annunciare che questa, sarà la prima di una collana di pubblicazioni dedicate a specifici settori e campi di utilizzo del martello idraulico demolitore quali: la coltivazione cave di inerti e la riduzione volumetrica primaria e secondaria, le demolizioni speciali e abbattimenti di manufatti di diverso materiale con martelli demolitori e silent demolition tools; e così via. Un' "iniziativa editoriale" che non ha la pretesa di essere un compendio di esaustivi studi, ma piuttosto la raccolta di soluzioni essenzialmente basate su tecniche ed esperienze consolidate e, possibilmente, anche sulla messa a punto di nuovi approcci alle varie

problematiche. Il nostro sarà inoltre un work in progress che, sfruttando tutti i mezzi multimediali e della rete, ci permetterà di aggiornare costantemente le guide con esempi, nuove considerazioni tecniche, job report e tutti gli altri contributi che ci consentiranno di fare di queste pubblicazioni uno strumento di lavoro per gli utilizzatori dei nostri martelli... e anche per tutti quelli che ancora non lo sono.

Un'impostazione generale quindi pienamente riflessa in questa prima pubblicazione, che, appunto, non vuole essere uno studio esaustivo sulle metodologie di scavo, né tanto meno ha la pretesa di ergersi a innovazione epocale, ma intende piuttosto essere una guida in grado di suggerire riflessioni e offrire indicazioni. Quello che con certezza questa pubblicazione vuole essere è un riconoscimento al prodotto martello demolitore idraulico, alle imprese che da anni utilizzano questa attrezzatura per la realizzazione di scavi in galleria in tutto il mondo, ai criteri di economicità, efficienza e flessibilità connessi all'utilizzo di questa tecnica, così come all'impegno puntuale e costante che, nel corso degli anni, Indeco ha posto a livello globale nel soddisfare le esigenze dei propri clienti.

Michele Vitulano

Marketing e Commercial Manager
Indeco Ind.SpA



- Premessa
- Il profilo geomeccanico e il rilievo sulla scelta del metodo di scavo
- L'importanza dell'RQD
- La scelta del metodo di scavo

CENNI SULLE CARATTERISTICHE GEOLOGICHE DELL'AMMASSO ROCCIOSO E SULLA SCELTA DEL METODO DI SCAVO

CENNI SULLE CARATTERISTICHE GEOLOGICHE DELL'AMMASSO ROCCIOSO E LA SCELTA DEL METODO DI SCAVO

Premessa



(Rimina25 & Twice25_CC BY-SA)

Da un punto di vista costruttivo le gallerie naturali sono indubbiamente fra le opere di più complessa realizzazione per via dei rischi intrinseci posti dalla geologia (a certe condizioni, persino riconosciuti nei capitoli alla voce “incerto geologico”) e delle difficoltà logistiche connesse alle operazioni di scavo, di consolidamento e di smarino. Non è dunque un caso se le gallerie naturali siano quasi sempre di più lunga e costosa realizzazione, se paragonate agli altri interventi necessari al completamento di viabilità stradali e ferroviarie.

Fin dalla fase progettuale, la costruzione di queste opere in sotterraneo pone peraltro i committenti, i progettisti e le imprese appaltatrici davanti a scelte che, se non consone alle reali condizioni poi rilevate in situ, possono portare a ritardi, a perdite ingenti sul piano economico e, nei casi peggiori, persino a situazioni di pericolo per gli addetti che operano in cantiere. Il tracciato e la geologia che lo caratterizza, il progetto esecutivo, la geometria delle varie sezioni tipo e le condizioni geografiche e di accessibilità del sito sono fattori fondamentali per l'impresa appaltatrice, che deve definire e stimare a priori l'impegno necessario per realizzare l'opera.

È tuttavia evidente che gli elementi di più alto rilievo, quelli cioè su cui si “gioca la partita” della buona riuscita del cantiere e della redditività, sono la correttezza e l'affidabilità dei dati forniti dalla geognostica.

Se infatti durante la progressione dei lavori si verifica, come sovente accade, un discostamento totale o parziale dell'assetto geomeccanico dei vari ammassi rocciosi rispetto a quanto presunto, ciò inevitabilmente determina conseguenze, anche pesanti, sulla progressione del lavoro, specie per quanto concerne l'efficacia e la produttività dei sistemi di scavo e di consolidamento prescelti.

Una condizione questa in cui risiedono, appunto, le difficoltà e i rischi connessi alla costruzione delle gallerie naturali, ma alla quale si può in parte rispondere adottando sistemi di scavo e di consolidamento che permettano il rapido e non oneroso adattamento al mutare delle caratteristiche dell'ammasso roccioso.



Crollo a Ganzhou, est Cina (www.xinhuanet.com)

IL PROFILO GEOMECCANICO E IL RILIEVO SULLA SCELTA DEL METODO DI SCAVO

Come già accennato, in un quadro operativo che dipende strettamente dalle caratteristiche geomeccaniche degli ammassi rocciosi che si devono attraversare, la geognostica ha ovviamente un valore di fondamentale importanza per stimare le condizioni di lavoro e l'effettiva produzione. Deve essere tuttavia chiarito che i dati delle varie prospezioni, posto che riflettano in pieno o con buona approssimazione la reale situazione, non sono mirati, quantomeno in prima battuta, a stabilire le modalità di scavo. La caratterizzazione del profilo, e quindi delle varie tipologie di ammasso, fornita dalle varie campagne geognostiche che portano poi alla definizione dei valori RMR, RQD, GSI ecc. è infatti necessaria alla definizione de:



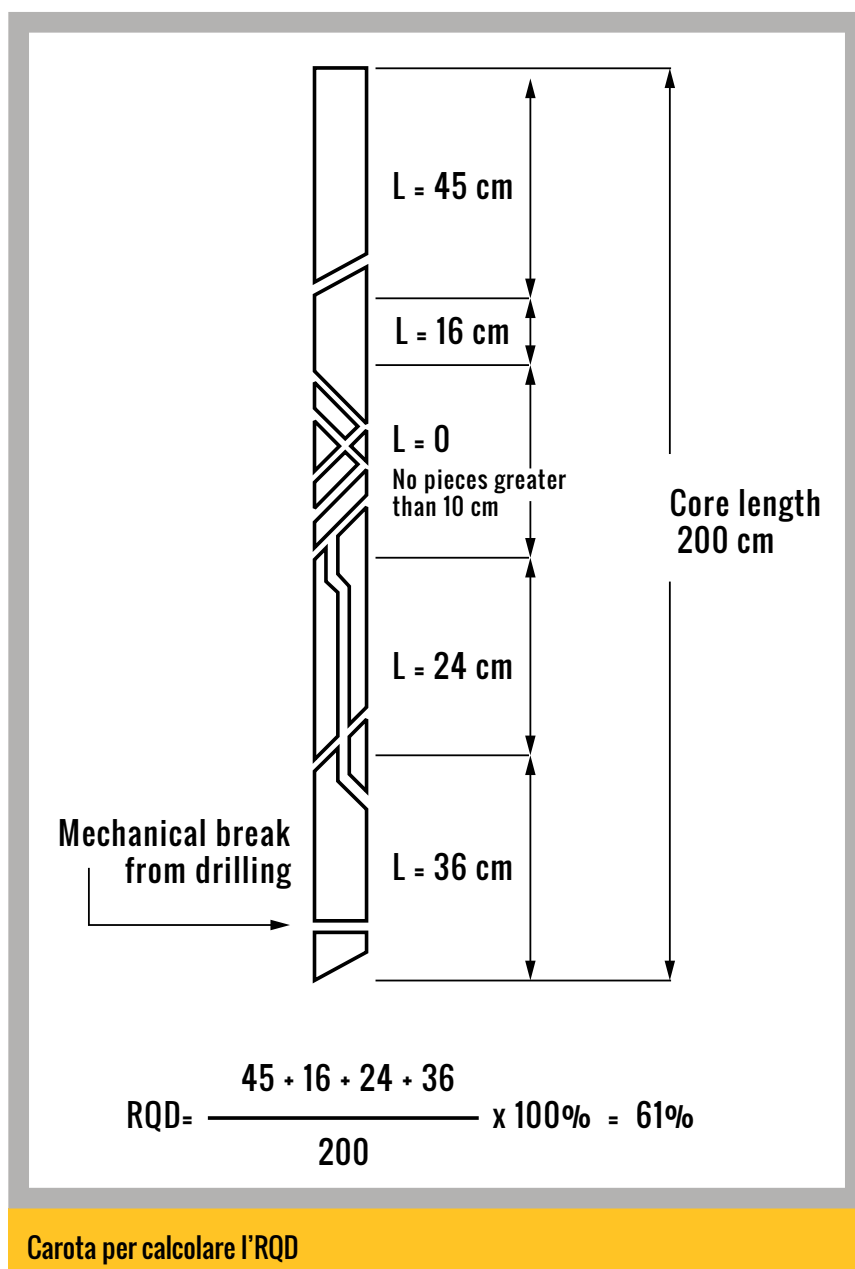
- 1) Le caratteristiche geomeccaniche dei diversi ammassi rocciosi e del loro stato tensionale
- 2) L'assetto dello schema idrogeologico sotterraneo e dell'accertamento della presenza di gas
- 3) Le caratteristiche geologico-strutturali che potrebbero avere un rilievo sulla distribuzione delle tensioni al contorno della galleria, durante e dopo lo scavo

Le indagini geognostiche non hanno, appunto, come scopo precipuo quello di mettere in luce il miglior metodo di scavo (che è invece una conseguenza delle loro conclusioni), ma piuttosto quello di definire con precisione le condizioni degli ammassi rocciosi ai fini del progetto e, soprattutto, della più efficace tipologia di consolidamento da adottare durante l'avanzamento.

Fra i metodi di valutazione utilizzati e comunemente riportati anche sui profili geomeccanici utilizzati in cantiere, ci sono i criteri quantitativi e qualitativi espressi da Beniaowski nel 1974 e sintetizzati dai valori di RMR (Rock Mass Rating) e quelli qualitativi frutto degli studi eseguiti da Ladislaus Von Rabcewicz e da Franz Pacher tra il 1957 e il 1965 in Austria e che hanno generato il metodo NATM (New Austrian Tunneling Method). Un contributo importante alla valutazione per il metodo qualitativo è stato apportato dal Q system messo a punto da Barton, Liene e Lunde dell'Istituto norvegese di geotecnica nel 1974. Basandosi sulla valutazione dei dati di oltre 200 tunnel, il metodo Q prende in considerazione diversi parametri (RQD, il livello di alterazione e numero dei giunti la rugosità della superficie delle discontinuità, il grado di alterazione delle discontinuità, la presenza di acqua e il fattore di riduzione dello sforzo) che consentono di determinare un fattore rappresentativo della struttura dell'ammasso roccioso e della dimensione dei blocchi, la resistenza al taglio che questi sviluppano e la condizione di sforzo presente nell'ammasso.

L'IMPORTANZA DELL'RQD

L'RQD (Rock Quality Designation), classificazione sviluppata nel 1964 da D.U Deere specificamente per lo scavo di gallerie, è un parametro che è stato assorbito all'interno di altri sistemi qualitativi dell'ammasso, quali l'RMR di Beniaowski e il Q system di Barton. L'indice si basa sulla valutazione percentuale di frammenti di lunghezza maggiore di 10 cm recuperati in ogni carotaggio realizzato e permette quindi di avere un'indicazione di massima per quanto riguarda



il grado di fratturazione dell'ammasso. La classificazione RQD è espressa in percentuale da 0 a 100% ed è determinante ai fini dell'indicazione della qualità degli ammassi, specie se questa è bassa. Presa singolarmente non è sufficiente a definire in modo completo tutti gli aspetti geomeccanici dell'ammasso, come fanno i più complessi parametri forniti da Beniaowski (di cui appunto i valori RQD sono solo un elemento) o dal metodo NATM, ma è senz'altro un criterio immediato di valutazione ai meri fini dello scavo che può quindi orientare sulla scelta del metodo più efficace. Più è alto il valore dell'indice RQD (in percentuale), tanto più l'ammasso roccioso sarà da considerarsi compatto e poco fratturato; al contrario, l'elevato numero di sezioni di carota "piccole" indicano una forte fratturazione dell'ammasso.

La classificazione di Beniaowski (RMR o Rock Mass Rating) in sostanza considera e assegna valori a:

- 1) Resistenza a compressione uniassiale
- 2) Rock Quality Designation Index (Indice RQD)
- 3) Spaziatura delle discontinuità
- 4) Condizioni delle discontinuità
- 5) Condizioni idrauliche
- 6) Orientamento delle discontinuità

Nell'utilizzare i valori espressi dall'RMR per determinare il metodo di scavo (e in particolare per l'utilizzo del martello) si deve porre attenzione a quelli che indicano le discontinuità (fratturazione) e la resistenza caratteristica espressa in MPa. La discontinuità è un dato importante perché è sempre indice di fratturazione e di "debolezza" dell'ammasso roccioso, che ha quindi caratteristiche (cioè una resistenza e una deformabilità) inferiori rispetto all'ammasso integro e tali da modificarne il comportamento meccanico.

Attraverso l'analisi delle discontinuità e dei loro parametri caratteristici è possibile dunque effettuare una valutazione dello stato di fratturazione dell'ammasso roccioso e, appunto, definire la conseguente classificazione dello stesso.

Le classi espresse da Beniaowski sono accompagnate da valori da 0 a 100 che considerano e riflettono anche la resistenza in MPa della roccia (peraltro sempre e comunque indicata separatamente nel profilo geomeccanico).

Tipicamente i valori assegnati all'ammasso e le relative classi sono :

RMR (Rock Mass Rating)

Classe I	RMR 81-100	Molto buono
Classe II	RMR 61 - 80	Buono
Classe III	RMR 41 - 60	Mediocre
Classe IV	RMR 21 - 40	Scadente
Classe V	RMR < 20	Molto scadente

Il metodo NATM (New Austrian Tunnelling Method) mira invece a stabilire la capacità di autosostentamento dell'ammasso roccioso attraverso il controllo e la redistribuzione delle forze nell'anello di roccia al contorno dello scavo. In rapporto ai dati rilevati, il metodo conseguentemente indica la tipologia di opere di sostegno che devono integrare un'eventuale insufficiente capacità di autosostentamento. Principio fondamentale del metodo NATM è dunque che i sistemi di sostegno e di rinforzo del terreno dipendono dalla misurazione delle deformazioni e devono essere quindi costantemente adattati alle condizioni rilevate durante l'avanzamento. Per determinare la tipologia di ammasso e la sua capacità di auto sostentamento, la classificazione NATM utilizza le seguenti classi e descrizioni:

Classe I stabile
Roccia non fratturata e massiva: lo scavo si auto sostiene e le tensioni al contorno non superano la resistenza della roccia, è possibile quindi uno scavo a tutta sezione con tempi di autosostegno di alcuni giorni in calotta e illimitato in parete.
Classe II leggermente fratturata
Roccia stratificata e leggermente fratturata: si possono verificare distacchi in calotta e si rendono dunque necessarie opere di sostegno, mentre le pareti verticali sono stabili (salvo distacchi locali) con tempi di auto sostegno di giorni in calotta e settimane in parete; possibile quindi uno scavo a tutta sezione.
Classe III fratturata e classe III B molto fratturata
Rocce da fratturate a molto fratturate poco spingenti: il limite di resistenza viene raggiunto in parete e superato in calotta con conseguenti distacchi; lo scavo a tutta sezione è possibile, ma con sistemi di infilaggi che garantiscano la tenuta del fronte.
Classe IV spingente
Roccia alterata, scistosa, fagliata: la resistenza della roccia è superata su tutto il contorno dello scavo e si rendono quindi necessarie opere specifiche di consolidamento quali l'arco rovescio e la protezione intensiva (infilaggi) del fronte di scavo.

Classe Va molto spingente

Roccia molto alterata completamente milonitizzata (l'apertura dello scavo provoca l'insorgere di forti pressioni in tutte le direzioni e l'anello di roccia intorno allo scavo è completamente plasticizzato e deformandosi tende a estringere la sezione scavata); con tempi di autosostegno nullo in calotta e di poche ore in parete e sul fronte.

Classe Vb materiale sciolto

(Terreni sciolti, franosi): lo scavo non può essere affrontato con metodi convenzionali e si regola in funzione dei metodi di sostegno con tempo di autosostegno praticamente nullo.

Per quanto riguarda le opere di consolidamento, queste variano, non solo in relazione alla classe d'appartenenza, ma anche in rapporto alla loro posizione (calotta, fronte e arco rovescio). Come per le classi Beniaowski anche quelle del metodo NATM offrono indirettamente elementi importanti per l'individuazione del metodo di scavo specie per quanto concerne lo stato di fratturazione della roccia e la relativa classe.

Di più recente messa a punto è invece l'indice GSI (Geological Strength Index di Hoek, Kaiser e Bawden, 1995 e altri) che partendo dalla stima della resistenza a compressione uniassiale della roccia intatta, accorpa la valutazione delle caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso roccioso e quelle relative alle caratteristiche delle discontinuità.

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000)	
From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. <u>Note that the table does not apply to structurally controlled failures.</u> Where weak planar structural planes are present in an unfavorable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.	
STRUCTURE	SURFACE CONDITIONS
 INTACT OR MASSIVE Intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surface
 BLOCKY Well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical formed by three intersecting discontinuity sets	GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces
 VERY BLOCKY Interlocked, partially disturbed mass with multi-faced angular blocks formed by 4 or more joint sets	FAIR Smooth, moderately weathered and altered surface
 BLOCKY/DISTURBED/SEAMY Folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity	POOR Slackensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments
 DISINTEGRATED Poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock places	VERY POOR Slackensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
 LAMINATED/SHEARED Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	

DECREASING INTERLOCKINGS OF ROCK PIECES		DECREASING SURFACE QUALITY	
	90		
	80		
		70	
		60	
			50
			40
			30
			20
			10
N/A	N/A		

Diagramma generale per stimare il GSI partendo da osservazioni geologiche

Fonte: Marinos V., Marinos P., Hoek E.: The geological strength index: applications and limitations: Bell Eng Geol Environ: 2005

LA SCELTA DEL METODO DI SCAVO

La scelta del metodo di scavo, pur ovviamente incentrata sulle considerazioni di tipo geomeccanico (esprese dai valori RMR, RQD, GSI, ecc.) adeguatamente interpretate, presuppone anche valutazioni di natura logistica ed economica, che hanno particolare rilievo sulla redditività del cantiere e sul rispetto dei tempi di esecuzione richiesti dal committente; si può quindi affermare che la scelta del miglior metodo di scavo è dunque “costruita” da diversi fattori (scopo appunto a cui mira il metodo AHP descritto nel capitolo successivo).

La sua definizione nasce appunto dall'analisi dei profili geomeccanici, senz'altro essenziali per comprendere quali siano le reali difficoltà dell'avanzamento (inteso come ciclo scavo-smarino-consolidamento), ma anche dalle valutazioni di produttività e redditività che devono considerare il numero di addetti, quello delle macchine e attrezzature, l'accessibilità del cantiere, i vincoli di carattere ambientale, ecc. È bene sottolineare che quando si parla di scavo, si fa riferimento a quello a tutta sezione. Sebbene in alcuni paesi si adotti ancora occasionalmente lo scavo parzializzato, oggi lo scavo delle gallerie è quasi sempre realizzato a tutta sezione.

Una più ampia interpretazione dei principi del metodo NATM, l'impiego di una combinazione di sistemi di supporto di prima fase (centine, spritz, chiodi ecc.), le tecniche di consolidamento del fronte per evitarne l'estrusione secondo il metodo ADECO RS (Analysis of Controlled Deformation in Rocks and Soil messo a punto da Lunardi), così come l'utilizzo diffuso delle TBM, hanno infatti reso lo scavo parzializzato quasi desueto e relegato a casi particolari.

Oggi vengono comunemente adottati due metodi per lo scavo a tutta sezione:

- a) Il cosiddetto sistema tradizionale (esplosivo e martello idraulico per il disaggio e per lo scavo dell'arco rovescio)
- b) Il sistema meccanizzato (fresa a tutta sezione o TBM, fresa ad attacco puntuale e martello idraulico)

Obbiettivo di questa guida è appunto quello di mettere in luce i vantaggi che, a certe condizioni, derivano dallo scavo meccanizzato mediante l'impiego del martello demolitore idraulico rispetto al metodo tradizionale che prevede invece l'esplosivo.

In questa analisi non si fa volutamente riferimento alla fresa ad attacco puntuale (peraltro solo raramente utilizzata per completare l'opera come unico metodo di scavo) e solo in parte (cioè nelle valutazioni del metodo AHP proposte nel capitolo successivo) alla TBM. Bisogna notare infatti che, laddove esistano le condizioni di carattere geomeccanico, progettuale, logistico ed economico, la fresa a tutta sezione (TBM) garantisce produzioni che non sono comparabili a nessun altro metodo o tecnica, in termini di scavo e avanzamento su base giornaliera. È tuttavia necessario sottolineare come gli enormi progressi in produttività e affidabilità delle TBM abbiano fatto ritenere (specie in alcuni mercati) che questa sia, sempre e comunque, la scelta più vantaggiosa e tecnologicamente più avanzata perseguibile, senza in realtà considerare svantaggi e limiti.



Fresa ad attacco puntuale

Questa enfasi sulla fresa a tutta sezione anche quando le condizioni geomeccaniche dell'ammasso si discostavano da quelle reali, in più di un caso ha creato enormi problemi all'impresa che l'ha adottata e naturalmente al committente, il quale ha così visto aumentare tempi e costi di realizzazione dell'opera. Numerosi gli esempi nel mondo in cui la TBM è incorsa in problemi o si è bloccata e, in certi casi, non è stato addirittura possibile recuperarla. La fresa a tutta sezione non può infatti essere presa in considerazione, o comunque non risulta la scelta più adatta sul piano operativo ed economico:

- 1) Quando la geognostica e i sondaggi non riescono a garantire dati sufficienti circa l'omogeneità dell'ammasso lungo tutto il tracciato
- 2) Quando l'ammasso o gli ammassi rocciosi presentano un elevato livello di fratturazione e si riscontrano condizioni idrogeologiche particolarmente critiche
- 3) In gallerie naturali (specie se caratterizzate dalle considerazioni del punto 2) che abbiano una lunghezza inferiore ai due chilometri in quanto il suo impiego risulterebbe diseconomico
- 4) Quando il tracciato richiede raggi di curvatura particolarmente accentuati
- 5) Quando il progetto richiede una sezione policentrica (la fresa opera sempre formando un cerchio perfetto)
- 6) Quando le condizioni logistiche al contorno non rendono facile il suo montaggio/smontaggio (mancanza di spazio, o la presenza di opere quali ponti e viadotti in entrata o in uscita dalla galleria)

La TBM, inoltre, non consente il cambio di metodo di scavo a fronte delle mutate caratteristiche dell'ammasso, rispetto a quelle messe a fuoco dal profilo geomeccanico. Un "ripensamento" in corso d'opera imporrebbe infatti condizioni di carattere logistico ed economico proibitive, che di fatto comprometterebbero i tempi e, probabilmente, anche la riuscita stessa del lavoro.

Il sistema tradizionale o lo scavo meccanizzato con il martello idraulico, pur ovviamente non garantendo produzioni giornaliere neanche comparabili a quelle della TBM, offrono però migliori garanzie di riuscita quando si devono attraversare ammassi difficili che impongono un costante adattamento del metodo di scavo alle mutate condizioni.

A seconda della tipologia degli ammassi, i due sistemi di scavo (appunto esplosivo e martello) possono essere alternativi o, come spesso accade, anche complementari. Ma va notato che il martello idraulico è in ogni caso sempre presente in cantiere, in quanto disaggio ed arco rovescio sono sempre realizzati con questa insostituibile attrezzatura.

La coesistenza dei due metodi di scavo nella stessa opera risulta particolarmente risolutiva quando:



Utilizzo TBM nel progetto idrico Lesotho Highlands (Tambo_CC BY-SA)



- 1) Il profilo geomeccanico dell'opera evidenzia una forte variabilità degli ammassi interessati allo scavo con prevalenza di quelli molto fratturati (caratterizzati ad esempio da rocce fratturate o molto fratturate poco spingenti della classe III e III B della classificazione NATM, da quelle che rientrano nella classe III o IV secondo l'indice RMR, o quelle definite blocky, disturbed, seamy secondo l'indice GSI)
- 2) Esiste un'alternanza ripetitiva su brevi lunghezze di ammassi compatti ed incoerenti

Proprio questi motivi hanno visto il martello trovare ampia applicazione in Italia, uno fra i paesi al mondo che può vantare un alto numero di gallerie di vario genere e dove esiste quindi una consolidata esperienza progettuale e costruttiva che trova le sue radici storiche in opere quali il tunnel ferroviario del Frejus (di 13,6 km, aperto al traffico nel 1871) o quello del Sempione (di 19,8 km, aperto al traffico nel 1905). Oltre che in una lunga tradizione, il motivo di questo know how va però ricercato anche nella necessità di realizzare gallerie naturali in un territorio, che, se (in parte) si escludono le Alpi, è caratterizzato da ammassi in cui scavo e consolidamento sono particolarmente complessi.

Testimonianza di queste difficoltà e della capacità di progettisti e delle imprese italiane di realizzare gallerie naturali in presenza di ammassi "difficili" è la linea ad Alta Velocità Bologna-Firenze che, con i suoi circa 73 km di tunnel su un tracciato di 78, attraversa le "insidiose" formazioni dell'Appennino Tosco-Emiliano.





- Premessa
- Il concetto di excavability
 - La resistenza a compressione
 - Deformabilità
 - Il livello di fratturazione e la discontinuità
- Il metodo di scelta: l'analisi multiobiettivi AHP e i criteri di scelta
 - Produzione oraria
 - RMR (Rock Mass Rating)
 - Geometrie e variabili
 - Matrice dei criteri
 - Analisi dei costi
- Esempi
- Considerazioni sul metodo semplificato

METODO SEMPLIFICATO PER LA SCELTA DEL SISTEMA DI SCAVO

METODO SEMPLIFICATO PER LA SCELTA DEL SISTEMA DI SCAVO

Premessa

La scelta del mezzo e della tipologia di scavo per la realizzazione di una galleria naturale è un processo decisionale complesso, che come in parte accennato nel capitolo precedente, impone considerazioni più ampie rispetto a quelle legate ai soli dati relativi alla geomeccanica degli ammassi rocciosi che si devono attraversare.

In questo capitolo viene presentato un metodo di valutazione “a matrice di criteri” che consente di prendere in considerazione tutti i fattori che entrano nella corretta valutazione per la scelta del mezzo di scavo.

I sistemi di scavo presi in analisi e confrontati sono:

- Scavo con l'utilizzo di martelli demolitori
- Scavo con TBM (Tunnel Boring Machine)
- Scavo con l'utilizzo di esplosivo

I parametri considerati nell'analisi possono essere suddivisi in diverse famiglie:

- Parametri caratteristici dell'ammasso roccioso e della geometria dello scavo
 - Carico di rottura a compressione della roccia UCS (Unconfined Compressive Strength)
 - Grado di compattazione della roccia RQD (Rock Quality Designation)
 - Indice di classificazione degli ammassi rocciosi come l'RMR di Beniaowski (Rock Mass Rating)
 - Indice di taglio dell'ammasso roccioso RMCI (Rock Mass Cuttability Index)
 - Geometria dello scavo (lunghezza, sezione, etc.)
- Parametri caratteristici del mezzo di scavo
 - Potenza richiesta dalla macchina e/o impianto
 - Costo della macchina e/o dell'impianto, costo orario
 - Produzione oraria espressa in m^3/h calcolata per tipo di mezzo di scavo e in relazione all'indice RMCI dell'ammasso roccioso.

La complessità della scelta del mezzo ottimale per lo scavo di gallerie naturali deriva dunque dalla presenza di molteplici parametri di diversa natura, tra loro interconnessi e non interconnessi. Per un'analisi di questo tipo esistono già degli approcci decisionali multi obiettivo come l'**Analytic Hierarchy Process** (AHP).

L'AHP, sviluppato a inizio degli anni '70 dal dott. T. L. Saaty presso la Pittsburgh University, consente di mettere tra loro in collegamento proprietà e caratteristiche che non hanno la stessa scala di riferimento e pertanto non sarebbero confrontabili tra loro.

Il principio fondamentale che guida questo metodo è la destrutturazione del problema: si definiscono i criteri progettuali determinanti per la scelta del mezzo ottimale di scavo:

Es. Indice RMR, Produzione oraria, Costo di impianto, ecc. si assegna a ciascun criterio un peso relativo, tramite la comparazione a coppie:

- Es. Produzione oraria: Costo impianto 2:1
- Es. Produzione oraria: Indice RMR 1:3
- ...e così via.

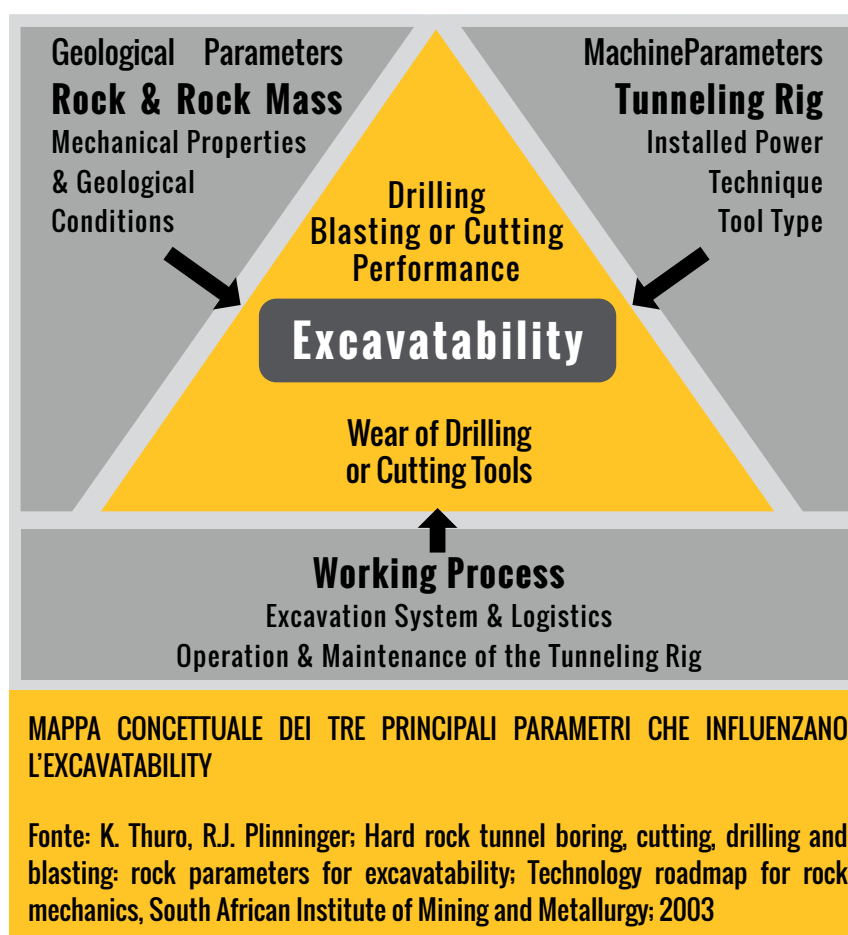
Si costruisce quindi la “matrice dei criteri” che permette di individuare quali sono i criteri di maggiore importanza in base ai pesi assegnati, e si calcolano i criteri per ogni tipologia di mezzo di scavo (per ogni criterio ci sarà un mezzo di scavo preferenziale e sarà possibile definire la “matrice delle preferenze”). Si definisce la “matrice dei confronti” che mette in relazione la “matrice dei criteri” con la “matrice delle preferenze”, fornendo la soluzione migliore al problema in base al valore assegnato a ciascun criterio e ai relativi valori calcolati per ogni singolo mezzo di scavo preso in analisi. Risulta quindi chiaro che la scelta dei criteri e la definizione dei valori da assegnare ai parametri di progetto indicano al progettista la soluzione migliore al problema. Se ad esempio il più alto viene assegnato alla velocità di realizzazione dello scavo, non è detto che questo faccia cadere la scelta sul mezzo di scavo più economico. Il metodo AHP non è quindi una scatola chiusa in cui bisogna immettere dati per ottenere una soluzione, ma piuttosto un sistema aperto che lascia ampio spazio alle capacità e all’esperienza del progettista. Grazie al metodo AHP il progettista, nel momento in cui determina le preferenze tra i sistemi di scavo presi in considerazione (appunto martello esplosivo e TBM) dispone dunque di un procedimento quanto più vicino all’opera da realizzare e alle sue condizioni al contorno.

IL CONCETTO DI EXCAVABILITY

Tutte le opere in sotterraneo impongono un’attenta valutazione degli aspetti geologici (cioè di caratterizzazione) del sito interessato alla loro realizzazione; una considerazione che naturalmente assume un valore di ulteriore importanza quando si tratta di realizzare gallerie naturali.

Le indagini geognostiche svolgono inoltre un ruolo rilevante non solo per comprendere il comportamento geomeccanico degli ammassi attraversati, ma anche per determinare, sia pur quasi sempre con un grado di approssimazione piuttosto variabile, quale sia il miglior metodo di scavo e di consolidamento.

Nell’ambito dello scavo di una galleria naturale si possono del resto incrociare diverse tipologie di ammassi rocciosi, o lo



stesso ammasso roccioso con caratteristiche geomeccaniche diverse. Inoltre il profilo geomeccanico prodotto dalle indagini geognostiche può segnalare continuità e discontinuità che rendono difficile, e a volte impossibile, l'adozione di una soluzione univoca per lo scavo della galleria in tutta la sua lunghezza. In questo senso "il grado di scavabilità" di uno o più ammassi rocciosi che si incontrano nell'ambito di un stesso profilo geomeccanico è dunque determinato da parametri sintetizzati del concetto di "excavatability".

L'exavatability si può definire in sintesi l'elemento per tenere insieme tutti i parametri che influenzano lo scavo di gallerie naturali, in particolare i fattori che determinano il livello di performance dello scavo con riferimento ai tempi di esecuzione. I parametri da prendere in analisi definiscono: il mezzo scavante (potenza, tecnica di scavo, tipo di utensile utilizzato), il processo produttivo (smarino e sistema di avanzamento, sistema logistico per allontanare il materiale e consentire il lavoro continuo del cantiere, opere di consolidamento del cavo in fase di avanzamento) e le caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso.

Quello delle prove e delle indagini è, tra l'altro, un campo in continua espansione e spesso fonte di dibattito tra gli addetti ai lavori, ma di sicuro la giusta scelta dei sistemi di indagini e di quelli di valutazione dell'ammasso roccioso è centrale per la buona riuscita della progettazione e dell'esecuzione dell'opera. Come descritto nel capitolo precedente, le indagini e i rispettivi indici che hanno particolare rilievo per la realizzazione di gallerie naturali sono: l'indice RQD calcolato rispetto a carote estratte dall'ammasso, l'indice RMR della classificazione di Bieniawski, il Q-System della classificazione di Barton, il Geological Strength Index (GSI) e la classificazione di Rabcewicz-Pacher alla base del metodo NATM. A queste si devono poi aggiungere i valori di resistenza a compressione della matrice rocciosa, il grado di deformabilità dell'ammasso, la descrizione delle discontinuità che lo attraversano.

La resistenza a compressione

La resistenza a compressione di una roccia è la sua capacità di resistere a un carico di compressione. È una tensione limite, per cui si misura in Pa o derivati. È abbastanza intuitivo capire come la resistenza a compressione della roccia presente all'interno dell'ammasso attraverso il quale si deve scavare sia uno dei fattori che influenza direttamente le operazioni di scavo, in quanto l'azione degli utensili delle macchine operatrici è prima di tutto un'operazione di tipo battente che stressa la roccia e ne mette a dura prova la resistenza. Questo parametro è ricavabile da prove di laboratorio e prove in sito. Le prove di laboratorio che si possono utilizzare per valutare questo parametro sono:

- 1) La prova di compressione monoassiale
- 2) La prova di compressione triassiale
- 3) La prova di punzonamento
- 4) La prova di resistenza a taglio

La prova di compressione monoassiale si effettua su provini di forma cilindrica e consiste nel sottoporre il materiale a un carico di compressione graduale fino al raggiungimento della rottura del provino; il carico raggiunto in corrispondenza di questo evento corrisponde al carico unitario di rottura.

La prova di compressione triassiale consente di sottoporre il provino di roccia a un carico assiale crescente tramite una pressa e di imporre un carico di confinamento costante tramite un apparecchio oleodinamico da cui è possibile ricavare una curva sforzi-deformazione del materiale funzione di τ/σ o di σ_1/σ_3 .

La prova di punzonamento, eseguibile anche in sito grazie all'esiguità delle dimensioni dell'apparecchio di prova, determina un indice di resistenza (Point Load Strength Index) correlabile con buona approssimazione alla resistenza monoassiale della roccia. La prova di resistenza a taglio sulla matrice ha un funzionamento simile alla prova di taglio diretto sulle terre, per cui consente di ricavare i parametri meccanici di resistenza della roccia ϕ (angolo di attrito interno) e c (coesione) e quindi di ottenere il valore di resistenza a compressione del materiale in qualunque condizione di carico e confinamento per mezzo dei criteri di resistenza. Ripetendo la prova più volte, è possibile ricavare i valori di angolo di attrito interno e coesione della roccia esaminata.

Studi (Goktan R. M., Gunes N., 2004) hanno dimostrato come la relazione, che lega i metri cubi scavati per ora da martelli demolitori, sia lineare con la resistenza a compressione della roccia. Questi studi relazionano il rapporto netto di taglio (NCR) con i risultati della prova del martello di Schmidt (RN), tra le più usate e le più facili da realizzare direttamente in sito, e il valore di RQD della verticale indagata.

$$\begin{aligned} \text{RQD} < 25\%: & \quad \text{NCR} = -0,2\text{RN} + 26,1; \\ 25\% < \text{RQD} < 49\%: & \quad \text{NCR} = -1,05\text{RN} + 70,1; \\ 50\% < \text{RQD} < 75\%: & \quad \text{NCR} = -1,18\text{RN} + 76,8. \end{aligned}$$

Dunque se è vero che all'aumentare dei colpi RN registrati con il martello di Schmidt diminuisce la capacità dell'utensile di rompere la roccia, non si può non notare come all'aumentare del RQD, e quindi dell'integrità dell'ammasso, l'inversa proporzionalità diviene via via più marcata. Appare dunque subito chiaro che non è possibile analizzare solo una scala di problemi, ma la roccia va sempre considerata come parte del sistema ammasso roccioso su cui si va a operare.

Deformabilità

Conoscere la deformabilità di un ammasso roccioso, intesa come attitudine del materiale a cambiare forma o volume, è fondamentale nella realizzazione della galleria. Le operazioni di scavo sono sostanzialmente operazioni di disturbo all'interno dell'ammasso roccioso in termini sia tensionali che deformativi. Ciò significa che parte consistente della progettazione e della realizzazione risiede nel progetto e nella posa in opera delle tecniche di consolidamento, le quali servono proprio a minimizzare gli effetti che lo scavo (rilascio di tensioni lungo il bordo del cavo) ha sull'ammasso. Inoltre l'anisotropia del comportamento tenso-deformativo del cavo determina la scelta del metodo di scavo più appropriato quando utilizziamo metodi di scavo puntuali (martelli demolitori e frese ad attacco puntuale). Dunque, prevedere come si comporta il cavo significa progettare i giusti interventi di consolidamento da mettere in atto (migliorativi o conservativi) e scegliere il metodo di scavo appropriato. Sono numerose le prove per giudicare la deformabilità di un ammasso: la prova dilatometrica, il martinetto piatto, la prova di carico su piastra, la camera idraulica in pressione.

Queste prove servono per ricavare il modulo di **Young "E"** dell'ammasso (che differisce da quello della roccia intatta, ricavabile da prove di laboratorio) o in alternativa il **Bulk Modulus "K"**, il **modulo di Poisson "v"** e il **modulo di taglio "G"**, sempre riferiti all'insieme roccia più discontinuità e non solo alla sola matrice rocciosa. La prova dilatometrica consiste nel misurare la pressione che permette la dilatazione di una sonda piatta infissa nella roccia, e oltre a determinare dunque le caratteristiche di deformabilità dell'ammasso consente anche di misurare lo stato tensionale esistente sulla superficie dell'ammasso roccioso. La prova di carico su piastra consiste nel misurare gli spostamenti indotti sulla roccia da una piastra rigida. Noto il carico applicato e misurati gli spostamenti è facile individuare i parametri di deformabilità per cui si indaga. È una prova in sito su un mezzo considerato (per come si

sviluppa la prova) elastico e isotropo. Per ottenere questi valori è necessario eseguire la prova con piastre di dimensioni diverse in quanto il cedimento indotto dipende dall'area su cui agisce il carico.

La camera idraulica in pressione, invece, si effettua su provini di roccia di grandi dimensioni tramite speciali estensimetri multibase radiali posti nella sezione centrale della camera che misura la deformazione indotta così da permettere (tramite la teoria dell'elasticità) di ricavare i parametri di deformabilità dell'ammasso in cui si sta operando la misurazione.

Il livello di fratturazione e la discontinuità

Un ammasso roccioso ha un comportamento essenzialmente determinato dalle due componenti che lo caratterizzano: la matrice rocciosa e le discontinuità. Ciò vuol dire che è importante conoscere oltre al comportamento tenso-deformativo della roccia, anche quello delle discontinuità, determinato da alcune loro caratteristiche come la giacitura, la spaziatura, le condizioni delle pareti del giunto, la persistenza, la terminazione, l'apertura, il riempimento e la scabrezza. Individuare tutte queste specificità delle discontinuità che percorrono l'ammasso permette di classificarlo (attraverso ad esempio il Rock Mass Rating), così da poter assegnare dei parametri di resistenza più efficaci rispetto a quelli che daremmo alla roccia se l'ammasso fosse omogeneo isotropo.

D'altro canto, a causa dell'elevata eterogeneità delle discontinuità all'interno dell'ammasso, è difficile e laborioso avere un quadro completo dell'ammasso da queste classificazioni. Valutare dunque in prima analisi il grado di spaziatura (da estremamente stretta a estremamente larga), di persistenza (da molto bassa a molto larga) e di apertura dà una prima utile indicazione della risposta dell'ammasso all'azione del mezzo escavatore e della resistenza delle pareti del cavo. Prima di procedere a qualsiasi classificazione è importante però saper riconoscere le discontinuità e il ruolo che hanno nella determinazione della stabilità dell'ammasso.

È possibile dividere i piani di discontinuità in 3 categorie: piani di stratificazione, piani di scistosità e fratture.

Le caratteristiche dei piani di stratificazione, tipici delle rocce sedimentarie, dipendono dal periodo di sedimentazione e dagli eventi che hanno caratterizzato l'ammasso nel corso della sua vita. Questi piani possono essere aperti (non c'è contatto continuo tra due strati consecutivi), chiusi (contatto continuo senza compenetrazione tra gli strati), colorati (giunti riempiti di argilla), levigati a causa del movimento di attrito delle rocce, riempiti da materiale grossolano o cementati. A seconda della loro spaziatura (solitamente misurata in centimetri) l'ammasso può avere aspetto massivo o stratificato.

I piani di scistosità sono tipici delle rocce metamorfiche e sono anch'essi piani di debolezza per l'ammasso. A differenza dei piani di sedimentazione, sono ruvidi e ondulati e la loro formazione dipende dalla percentuale di mica contenuta nell'ammasso. Rilassamenti nell'ammasso o attività tettonica possono avere aperto questi piani che dunque possono essersi riempiti di altro materiale (spesso quarzo, carbonati più raramente).

Le fratture sono importanti per descrivere il quadro completo delle discontinuità che attraversano un ammasso, in quanto non sono sistematiche come le altre discontinuità, ma alla stessa maniera sono punti deboli dell'ammasso, cosa ancora più vera se si tiene conto della loro anisotropia nello sviluppo interno.

Esistono poi metodi empirici che consentono, attraverso una semplice indagine visiva, di avere delle indicazioni specifiche sulle caratteristiche del mezzo nella zona che si sta osservando. Uno di questi è dato dalla formula di Manev che ricava il carico ammissibile su un ammasso dalla resistenza della matrice rocciosa a carico monoassiale (σ_r) e dal numero di discontinuità per metro lineare (i): $\sigma_c = \sigma_r 0.114 e^{0.48(i-2)} + 0.02$

IL METODO DI SCELTA: L'ANALISI MULTIOBIETTIVI AHP E I CRITERI DI SCELTA

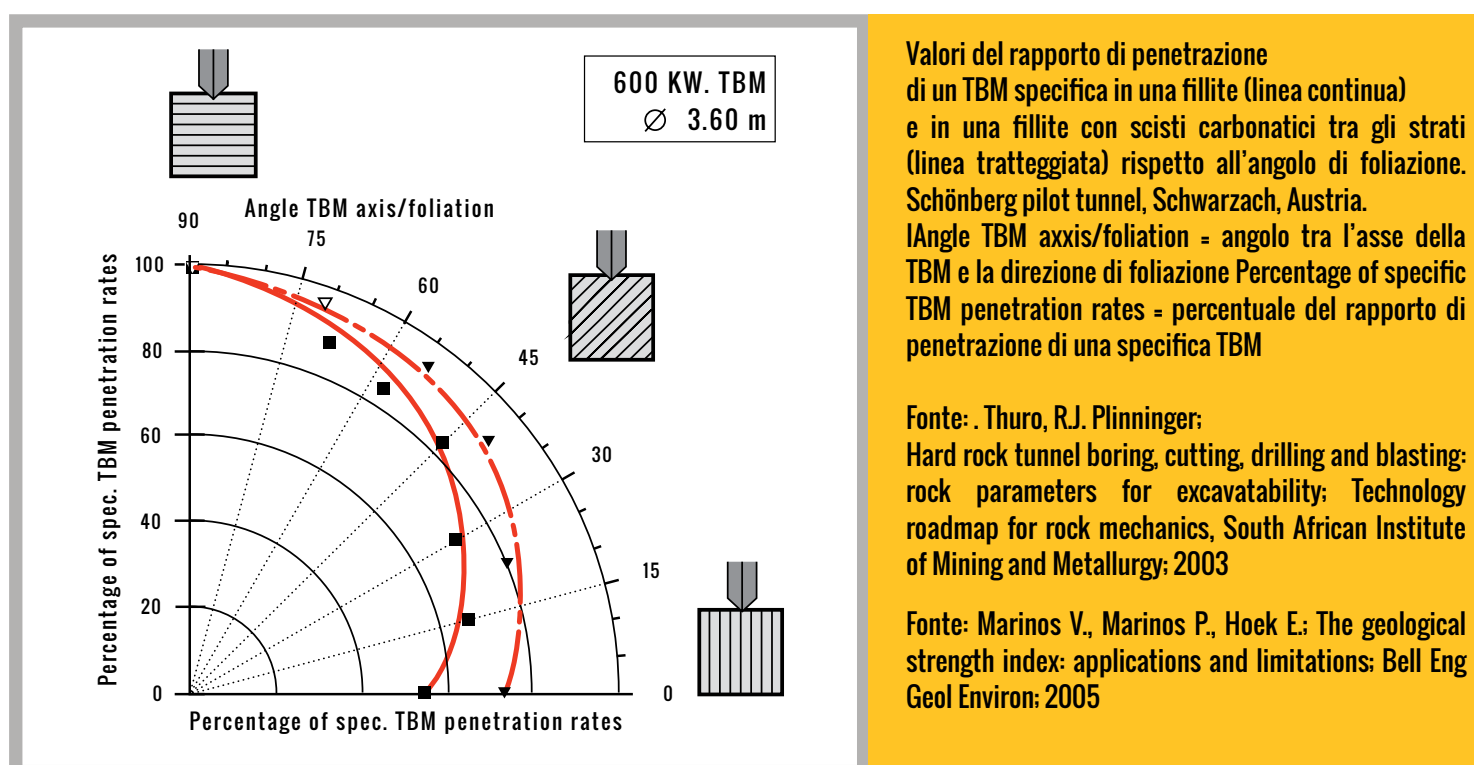
Come già sottolineato, la scelta del metodo di scavo di una galleria naturale è un processo decisionale complesso, in cui interagiscono svariati fattori che non sarebbero tutti analizzabili con una semplice analisi costi-benefici.

L'Analytic Hierarchy Process (AHP) è un approccio decisionale che consente di scegliere, attraverso la comparazione a coppie, la migliore tra le alternative possibili per la risoluzione di problemi di più svariata natura. Il principio fondamentale che guida questo metodo è la destrutturazione del problema: si individuano i criteri che differenziano il problema secondo le alternative disponibili (nel nostro caso scavo con martelli demolitori, con Tunnel Boring Machine, con frese ad attacco puntuale o con esplosivi), poi si assegna a ciascun criterio il relativo peso rispetto agli altri e tramite la comparazione a coppie è possibile costruire la "matrice dei criteri" il cui autovettore con le proprie componenti permette di individuare quali sono i criteri con peso maggiore. Assegnati i pesi, bisogna determinare le preferenze di ogni alternativa rispetto a ogni altra attraverso il confronto a coppie. Infine basta effettuare il prodotto tra la matrice ottenuta tramite le preferenze alle alternative (matrice dei confronti) e l'autovettore della matrice dei criteri (vettore delle priorità) per ottenere la scala dei criteri che fornisce l'alternativa migliore tra quelle proposte.

Il metodo consente di ottenere una graduatoria di preferibilità tra le varie opzioni, così da poterle analizzare e comparare tutte quante nel corso della realizzazione del progetto. Ciò sta a significare che se, dopo aver scelto la soluzione più conveniente, si riscontrano, come nel caso che a noi interessa, difficoltà tecniche o economiche, che in prima analisi non si erano considerate, e che renderebbero la soluzione inutilizzabile, è possibile scalare la scelta senza dover riproporre per intero l'analisi.

L'utilità del metodo AHP nel progetto della realizzazione di una galleria naturale si palesa nel momento in cui il progettista apprende che per determinare i tempi di realizzazione dell'opera non occorre conoscere solamente la quantità di roccia scavata nell'unità di tempo, ma anche le variabilità geometriche e geologiche dell'ammasso e del tunnel.

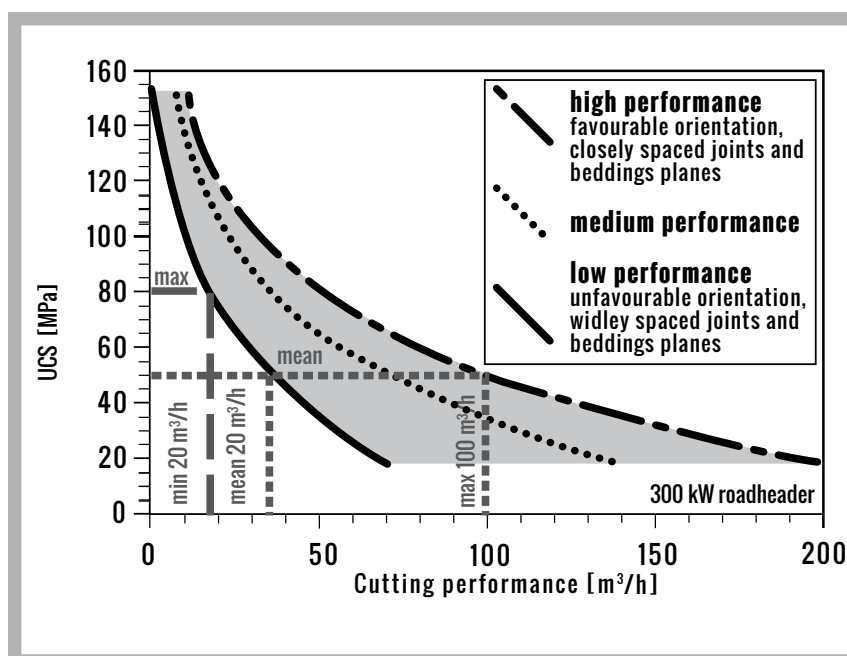
I parametri individuati sono: l'avanzamento dello scavo in un ammasso omogeneo (produzione oraria misurata in $[m^3/h]$)



calcolata tramite l'ICR o IBR a seconda del sistema di scavo utilizzato), la stabilità dell'avanzamento dovuto allo stato delle discontinuità dell'ammasso (per mezzo del Rock Mass Rating) e la necessità di avere un mezzo di scavo versatile rispetto alle dimensioni del tunnel e alla variabilità di forme geologiche riscontrabili nel corso dell'avanzamento dello scavo del tunnel. In questo tipo di scelta non va dimenticato che lo scavo va rivestito e che difficilmente il rivestimento adatto sarà sempre lo stesso lungo tutto lo sviluppo del tunnel. Nella scelta del mezzo di scavo ci si dovrà dunque ricordare che utilizzare un mezzo di scavo "aperto" rispetto a uno "chiuso" mette al riparo l'impresa da eventuali cambi di situazione geologica repentina in termini di rivestimento adatto a sostenere il cavo.

Produzione oraria

Con questo parametro si intende riassumere sia la resistenza opposta dalla roccia allo scavo che la risposta tenso-deformativa del cavo in un ammasso che consideriamo, in prima approssimazione, come se fosse un mezzo omogeneo e isotropo. Molti studi sono stati eseguiti per ricavare la produzione oraria sia quando si usano i martelli demolitori che nei casi in cui si usa la TBM.



EFFICIENZA DI TAGLIO DI UNA FRESA DA 300 KW IN FUNZIONE DELLA RESISTENZA A COMPRESSIONE (UCS) DELLA ROCCIA.

UCS [Mpa] = UCS [Mpa]; Cutting performance [m³/h] = efficienza di taglio [m³/h]
 high performance = alto rendimento
 favourable orientation, closely spaced joints and bedding planes = orientazione favorevole, spaziatura dei giunti e dei piani di scivolamento ridotta
 medium performance = medio rendimento
 low performance = basso rendimento
 unfavourable orientation, widely spaced joints and bedding planes = orientazione sfavorevole, spaziatura dei giunti e dei piani di scivolamento elevata

Fonte: K. Thuro, R.J. Plinninger; Geological limits in roadheader excavation - Fuor case studies; 8th International IAEG Congress; 1998



Per determinare la stima di questo parametro, per i martelli demolitori, è necessario conoscere la resistenza a compressione della roccia (Unconfined Compressive Strength, **UCS**, determinabile in prima approssimazione dalla prova con il martello di Schmidt o ricavata da prove di laboratorio a rottura tramite la tensione principale massima a rottura σ_c), l'indice **RQD** (Rock Quality Designation) e l'indice **RMCI** (Rock Mass Cuttability Index). Nel caso in cui si voglia fare una previsione dell'avanzamento dello scavo eseguito con

una Tunnel Boring Machine bisogna conoscere la potenza attesa della macchina e l'energia specifica ottimale che rappresenta l'energia necessaria per scavare l'unità di volume di roccia.

La produzione oraria è pari ai m³/h medi che il mezzo è capace di scavare nell'ammasso, a questo però vanno aggiunte penalizzazioni all'efficienza dell'escavatore dovute alla stabilizzazione del cavo e allo smarino (per i martelloni) o ai tempi di down time dovuti alla TBM che dopo un certo numero di metri di avanzamento si ferma per riportare il corpo della macchina a ridosso del fronte di scavo.

Nel nostro caso è importante predire i metri di avanzamento per ora, così da dare giusto peso alle alternative rispetto al primo criterio individuato.

Per i martelli demolitori è possibile usare la seguente relazione:

$$IBR = 4,24 P (RMCI)^{-0,567} [m^3/h]$$

[N. BILGIN, C. Balci]

Nel caso in cui s'utilizzino frese ad attacco puntuale:

$$ICR = 0,28 P (0,974)^{RMCI} [m^3/h]$$

[N. BILGIN, C. Balci]

dove in entrambi i casi:

P = Potenza del martello demolitore o della fresa ad attacco puntuale [Hp]

RMCI = indice di taglio dell'ammasso roccioso = $\sigma_c (RQD/100)^{2/3}$ [MPa]

Mentre nel caso di uso di TBM è possibile utilizzare la formula empirica:

$$ICR = k P / SE [m^3/h]$$

[N. BILGIN, C. Balci]

dove:

k = coefficiente di trasmissione energetica, pari a circa 0,75;

P = potenza attesa della macchina (kW);

SE = energia specifica ottimale (kWh/m³), è funzione del rapporto tra la distanza tra due utensili consecutivi e la loro profondità di incisione nella roccia ed è un valore ricavabile da prove in laboratorio.

In particolare:

$$P = 2\pi NT, \text{ dove } N \text{ sono i giri al minuto della testa rotante e } T \text{ è la coppia agente totale}$$

Per quanto riguarda l'uso di esplosivi invece, ricavare un valore di volume di roccia abbattuto a ora è più complesso, in quanto entrano in gioco più fattori nel dimensionamento delle volate, quali la carica dell'esplosivo scelto, la percentuale di riempimento dei fori o la pezzatura desiderata dei detriti. Si rimanda dunque a test dedicati per il calcolo del carico di roccia interessato nelle singole volate.

Di seguito indicheremo con l'acronimo ICR (Instantaneous Cutting Rate) la produzione oraria espressa in [m³/h] per i diversi mezzi di scavo.

Verranno utilizzate le formule sopra riportate per i martelli demolitori, per la TBM e per l'esplosivo. Infatti i valori di produzione oraria così calcolati, forniscono risultati omogenei e tra loro confrontabili.

RMR (Rock Mass Rating)

Fondamentale per capire la risposta di un ammasso roccioso alle sollecitazioni indotte dalla realizzazione della galleria è conoscere le caratteristiche delle rocce che la costituiscono e delle discontinuità che la attraversano, sia a livello qualitativo (cioè la conoscenza dei parametri meccanici di resistenza) che quantitativo (numero delle discontinuità). Come parametro per descrivere queste caratteristiche dell'ammasso si è scelto l'indice RMR di Bieniawski e la classificazione che ne deriva. È di facile intuizione che i martelli demolitori sono il mezzo che meglio si presta in caso di ammassi fortemente fratturati, perché non risentono dell'anisotropia della distribuzione delle discontinuità dell'ammasso e della loro diffusione. Allo stesso tempo in questo tipo di ammassi si hanno difficoltà nel caso si opti per gli esplosivi per valutare le giuste posizioni delle cariche per il corretto rilascio di energia, così come le TBM possono andare in difficoltà perché rischiano di non trovare il giusto appoggio per fare contrasto e avanzare.

Se quindi da un lato abbiamo frese ad attacco puntuale e martelli che sono favoriti da un ammasso con un basso valore di RMR, dall'altro abbiamo esplosivi e TBM che invece non rendono al meglio.

È necessario dunque quantificare quanto detto tramite una relazione semplice che indichi quanto l'uso di martelli demolitori e frese ad attacco puntuale sia più conveniente rispetto a quello di esplosivi e TBM e viceversa. Si può ipotizzare che il martello o le frese ad attacco puntuale siano più vantaggiose rispetto all'uso di esplosivi o TBM con $RMR < 60$ (roccia di bassa qualità secondo Bieniawski) e più svantaggiose con $RMR > 60$. Pertanto si può definire il parametro $60/RMR$ che assume questo significato: $60/RMR > 1$ il martello è più vantaggioso, $60/RMR < 1$ il martello è più svantaggioso.

Ad esempio se $RMR = 20$, $60/RMR = 3$, avremo che l'uso del martello è 3 volte più vantaggioso rispetto alla TBM.

Geometrie e variabili

Nella progettazione di uno scavo di galleria naturale non si può prescindere dall'analisi delle dimensioni di progetto in rapporto al mezzo scelto per lo scavo. In linea di massima, e prescindendo dalle condizioni geomeccaniche dell'ammasso roccioso, si può affermare che mobilitare un sistema di scavo come la TBM non è credibile per gallerie di lunghezza contenuta e di ampia sezione. Al contrario, qualora esistano le condizioni di carattere geomeccanico ideali per la TBM, gli altri sistemi meccanici e l'esplosivo offrono una minore produttività in termini di avanzamento in tunnel di lunghezza superiore ai due chilometri. Nella scelta inoltre non si può trascurare che il trasporto di mezzi molto grandi può presentare difficoltà. Mentre macchine come gli escavatori dotati di martelli demolitori o i sistemi di perforazione per l'esplosivo possono essere portati e resi operativi (quasi) ovunque, macchinari imponenti come le TBM, che possono raggiungere e anche superare i 100 m di lunghezza, presentano notevoli difficoltà logistiche nel loro trasporto e assemblaggio, specie se questo deve essere realizzato in aree remote e prive di infrastrutture adeguate.

Bisogna inoltre e soprattutto considerare che una delle principali difficoltà del realizzare gallerie naturali risiede nella conoscenza approfondita delle caratteristiche degli ammassi che si dovranno attraversare e dell'evoluzione delle sue caratteristiche lungo tutto l'asse del tracciato. Sebbene la geognostica moderna abbia ormai contenuto il margine di errore, questo, in certi casi, continua ad essere piuttosto elevato. Per le prospezioni preliminari ci sono poi limiti dovuti alle ristrettezze dei budget, limiti logistici dei mezzi usati (sondaggi, prospezioni sismiche, georadar, ecc.) per descrivere completamente l'ammasso in cui si deve operare. Tutte queste considerazioni devono dunque far riflettere sulla reale versatilità del sistema di scavo: un determinato sistema di scavo può infatti risultare più versatile allorché, indipendentemente dalle scelte fatte dal progettista, le condizioni al contorno cambiano. Ad esempio, se aumentano

i valori di resistenza della roccia, una fresa ad attacco puntuale o un martello demolitore possono andare in difficoltà, così come non ha senso usare esplosivi se ci si trova davanti a strati di roccia sciolta. Un ammasso troppo fratturato può d'altra parte rallentare o fermare una TBM, creando una serie di problemi logistici di non facile soluzione. Riassumendo, l'AHP ci propone dunque una semplice formula che consente di esprimere quanto un sistema (nel nostro caso appunto quello di scavo) sia più conveniente di un altro. Poniamo due chilometri come lunghezza rispetto cui tutte le scelte sono sicuramente credibili, si prova a tradurre il giudizio della convenienza di un sistema che utilizza macchinari meno ingombranti rispetto a un altro:

$(2/\text{lunghezza tunnel}) \times A$, con A = probabilità di trovare differenze (non previste) nella composizione dell'ammasso roccioso durante l'avanzamento dello scavo, variabile tra 1 (probabilità minima) e 3 (probabilità massima).

Il parametro A andrà calibrato di volta in volta a seconda dei sistemi di scavo che il progettista tiene in considerazione e dell'ammasso che si va a realizzare. Ciò vuol dire che, ad esempio nel caso di comparazione tra esplosivi e frese ad attacco puntuale, se il progettista sospetta di trovare ammassi caratterizzati da rocce con valori di resistenza di quanto risulta dalle prova di laboratorio dovrà assegnare al termine A un valore maggiore di quanto non farebbe per lo stesso sito nel caso di scelta tra esplosivi e TBM. Parimenti nel caso in cui debba scegliere tra martelli demolitori e frese ad attacco puntuale, è evidente come il parametro A debba far propendere la scelta per i martelli demolitori (più versatili), mentre l'aliquota dovuta alla lunghezza (e quindi all'ingombro) perde di importanza e si assume pari all'unità.

Matrice dei criteri

Definiti i criteri sui quali si fonda il metodo, è possibile ora assegnare il peso di ognuno rispetto agli altri e ordinarli nella matrice dei criteri. Nel nostro caso imponiamo che l'ICR sia 1,3 volte più importante (ai fini dell'analisi in questione) del valore di RMR dell'ammasso e 2,25 più importante della geometria e delle variabili del tracciato e che il valore di RMR sia 1,75 volte più importante della geometria e delle variabili riscontrabili. Ciò detto apparirà dunque esposto in maniera ordinato nella matrice dei criteri:

MATRICE DEI CRITERI	ICR	RMR	Geometria
ICR	1	1,3	2,25
RMR	0,77	1	1,75
Geometria	0,45	0,57	1

Fondamentale per poter adoperare questo metodo è calcolare l'autovettore ricavabile dalla matrice dei criteri, una volta calcolato l'autovalore principale della matrice stessa. L'autovettore (detto **vettore delle priorità**) associato all'autovalore $\lambda = 3$ ha per componenti **(0,84; 0,47; 0,27)**.

Queste componenti sono indice del peso dei criteri individuati nell'analisi, per cui è chiaro che si è data maggiore importanza all'ICR rispetto a RMR e alla geometria del tunnel. In seguito basta costruire la matrice delle preferenze tra le alternative di mezzo di scavo per ogni criterio, assegnando cioè a ogni alternativa quante volte è più favorevole dell'altra e così ricavare l'autovettore corrispondente all'autovalore principale (λ_{max}).

Ottenuti gli autovettori per ogni criterio è possibile costruire una matrice che abbia per colonne questi ultimi, così da poter compiere un semplice prodotto matriciale tra la matrice così costruita e l'autovettore della matrice dei criteri. Risultato sarà un vettore a 3 dimensioni, le cui componenti indicano il vantaggio a usare la prima o la seconda alternativa. È ovvio che la componente maggiore indica una maggiore convenienza dell'alternativa associata.

Analisi dei costi

L'analisi però non termina in questo modo. Non è possibile infatti tralasciare l'aspetto economico della scelta, senza il quale l'applicabilità del metodo sarebbe limitata e non avrebbe un'effettiva utilità nelle scelte di progettazione. L'analisi dei costi è un'attività imprescindibile e deve valutare tutte le attività finalizzate alla realizzazione dell'opera e cioè bisognerà valutare costo/affitto macchinari per scavo, costo/affitto macchinari per smarino, costi materiali e macchinari per il consolidamento e il rivestimento della galleria, carburante per alimentare i macchinari. Ricavati i costi per ogni alternativa, questi saranno confrontati con le componenti di scelta ottenute con il metodo AHP. Dividere le componenti per i costi corrispondenti permette di ottenere un reale valore di convenienza nella scelta di un metodo di scavo.

Esempi

Di seguito riportiamo alcuni esempi che illustrano quanto il metodo può essere utilizzato per mostrare come la scelta suggerita per il mezzo di scavo vari in rapporto alle condizioni geomeccaniche che caratterizzano il tracciato dell'opera.

Caso A

Supponiamo di trovarci a dover decidere il metodo di scavo da utilizzare per realizzare una galleria lunga 4 km, il cui tracciato si sviluppa all'interno di un ammasso con variabilità litologica medio-bassa (o, in altre parole, un ammasso di cui è sufficientemente nota la litologia lungo tutto il suo sviluppo). Ci si ponga nel caso in cui la scelta sul mezzo di scavo debba ricadere sui martelli demolitori (Alternativa 1), sulla TBM (Alternativa 2) o sull'esplosivo (Alternativa 3).

Criterio 1

In prima analisi dobbiamo valutare gli indici ICR propri dei martelli e della TBM scelti con le formule proposte nei paragrafi precedenti.

È compito di chi deve scegliere il mezzo per realizzare lo scavo avere nozione della resistenza media a compressione della roccia (σ_c), del valore di RQD dell'ammasso e della potenza del martello a disposizione.

Ipotizziamo di avere i seguenti dati di partenza:

$$\sigma_c = 245 \text{ MPa}$$

$$\text{RQD} = 70\%$$

$$P = 95 \text{ HP}$$

Noti σ_c e RQD, come già visto, è facile ottenere il valore di RMCI dell'ammasso, così da avere a disposizione tutti i dati per ricavare il valore di ICR corrispondente.

$$\text{RMCI} = \sigma_c (\text{RQD}/100)^{2/3} = 193 \text{ MPa}$$

$$\text{ICR} = 4,24 P \text{ RMCI}^{-0.567} = 20,3 \text{ m}^3/\text{h}$$

Passando al calcolo dell'ICR della TBM, ipotizziamo di avere una macchina il cui coefficiente k di trasmissione energetica è 0,80, la cui potenza attesa è pari a 160 kW e la cui energia specifica è pari a 2,1 kWh/m³.

$$\text{ICR} = k P / SE = 61 \text{ m}^3/\text{h}$$

Ipotizziamo poi una produzione media con uso di esplosivo pari a 30 m³/h. Possiamo dunque costruire la matrice delle preferenze relativa al primo criterio.

CRITERIO 1	Martello	TBM	Esplosivo
Martello	1,00	0,33	0,68
TBM	3,00	1,00	2,03
Esplosivo	1,48	0,49	1,00

L'autovettore associato a questa matrice ha per componenti (0,42; 0,86; 0,28).

Criterio 2

Si passa ora alla valutazione dell'indice RMR dell'ammasso oggetto dello scavo. Se la resistenza della matrice rocciosa è pari a 200 MPa, l'indice RQD al 70%, la spaziatura media tra le discontinuità nel tratto meno favorevole alla sicurezza è compresa tra 6 cm e 20 cm, le superfici delle discontinuità sono uniformemente consumate, l'ammasso, relativamente alle condizioni idrauliche, è da definirsi "wet" e l'inclinazione dei piani di discontinuità è sfavorevole alla stabilità del cavo, allora è possibile affermare che l'ammasso ha un punteggio di 40 punti secondo la classificazione di Beniaowski (RMR=12+13+8+10+7-10=40).

Resistenza della roccia intatta	PLSI (Mpa)	>10	4-10	2-4	1-2	Usare UCS
	UCS (MPa)	>250	100 - 250	50 - 100	25 - 50	5 - 25
R1	Rating	15	12	7	4	0
RQD	%	90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	<25
R2	Rating	20	17	13	8	5
Spaziatura discontinuità		>2 m	0,6 - 2 m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	<60 mm
	Rating	20	15	10	8	5
Condizione delle discontinuità		Molto ruvide	Lievemente irregolari	Lievemente irregolari	Lisce internamente o incavate <5 mm	Incavate >5 mm
		Discontinue senza separazioni	Separazione <1 mm	Separazione <1 mm		Separazione > 5mm
		Non alterate	Lievemente alterate	Molto alterate	Continue	
R4	Rating	30	25	20	10	0
Condizioni idrauliche		Completam. secco	Poco umido	Umido	Molto umido	Presenza di flusso
	Rating	15	10	7	4	0
Attacco e angolo dei giunti	Tunnel	Molto favorev.	Favorevole	Indifferente	Sfavorevole	Molto sfavorev.
	Rating	0	- 2	- 5	-10	-12

Applicando la formula suggerita nel paragrafo relativo all'utilizzo del valore del RMR all'interno del metodo proposto, risulta che secondo questo criterio l'utilizzo del martello idraulico è 1,5 volte più vantaggioso dell'uso della TBM. Passando poi a confrontare l'uso dei martelli demolitori con quello dell'esplosivo rispetto al valore di RMR dell'ammasso, è possibile affermare che in un ammasso di medio-scarso qualità l'uso del martello è sicuramente favorito in quanto le esplosioni possono mettere in crisi la stabilità del cavo durante le successive operazioni di scavo.

Quantifichiamo quanto detto affermando che l'uso del martello, per questo criterio è 2,5 volte più vantaggioso dell'esplosivo. Confrontando infine il comportamento di una TBM con quello degli esplosivi è altrettanto vero che, in misura minore rispetto al caso precedente, la TBM è 1,2 volte più vantaggiosa dell'esplosivo.

CRITERIO 2	Martello	TBM	Esplosivo
Martello	1,000	1,500	2,500
TBM	0,667	1,000	1,200
Esplosivo	0,400	0,833	1,000

L'autovettore associato a questa matrice ha per componenti (0,79; 0,48; 0,35).

Criterio 3

Posto che il progetto in questione preveda la realizzazione di un tunnel lungo 4 km e che la probabilità di trovare differenze inaspettate nelle litologie presenti dell'ammasso roccioso pari a 1,2 (valore compreso tra il minimo suggerito 1 e il massimo 3), risulta che secondo questo criterio l'uso dei martelli è 0,6 volte più vantaggioso dell'uso della TBM (è dunque meno vantaggioso). Confrontando martelli e esplosivo, considerando tali lunghezze e variabilità litologica, possiamo ipotizzare un leggero vantaggio a favore dell'esplosivo, non tanto per differenze dovute alla lunghezza del tracciato, quanto per il fatto che una bassa incertezza nella variabilità geologica metterebbe al riparo da rischi di tratti inaspettati in cui l'esplosivo potrebbe risultare inutilizzabile. Si indica quindi un vantaggio per l'uso dell'esplosivo 1,25 volte superiore a quello del martello. Confrontando infine TBM ed esplosivo, l'utilizzo della fresa meccanica a piena sezione è sicuramente più adatto. Pertanto la TBM è 1,5 volte più performante rispetto all'esplosivo.

CRITERIO 3	Martello	TBM	Esplosivo
Martello	1,000	0,600	0,800
TBM	1,667	1,000	1,250
Esplosivo	0,667	1,250	1,000

L'autovettore associato a questa matrice ha per componenti (0,42; 0,73; 0,55)

Raccogliendo in un'unica matrice gli autovettori ricavati finora dalle matrici delle preferenze, otteniamo:

0,42	0,79	0,42
0,86	0,48	0,73
0,28	0,35	0,55

Moltiplicando questa matrice per il vettore delle priorità (0,84; 0,47; 0,27) otteniamo dunque il vettore delle preferenze, le cui componenti sono (0,84; 1,15; 0,55). Considerando che il primo termine corrisponde alla convenienza dell'uso dei martelli demolitori, mentre il secondo si riferisce alla TBM e il terzo all'uso di esplosivi, possiamo affermare che nel caso A l'uso della TBM è più conveniente dell'uso dei martelli demolitori, che a sua volta è preferibile all'uso dell'esplosivo.

Caso B

Si considera ora il progetto di una galleria lunga un chilometro, il cui tracciato si sviluppa all'interno di un ammasso roccioso con una discreta variabilità litologica, che le indagini geognostiche non hanno permesso di ricostruire con estrema precisione. Ancora una volta ci poniamo nel caso in cui la scelta sul mezzo scavante debba ricadere sui martelli demolitori (Alternativa 1), sulla TBM (Alternativa 2) o sull'esplosivo (Alternativa 3).

Criterio 1

In prima analisi dobbiamo valutare gli indici ICR propri dei martelli e della TBM scelti con le formule proposte nei paragrafi precedenti. È compito del decisore avere nozione della resistenza media a compressione della roccia (σ_c), del valore di RQD dell'ammasso e la potenza del martello a disposizione.

Ipotizziamo di avere i seguenti dati di partenza:

$$\sigma_c = 100 \text{ MPa}$$

$$\text{RQD} = 40\%$$

$$P = 120 \text{ HP}$$

Noti σ_c e RQD, come già visto, è facile ottenere il valore di RMCI dell'ammasso, così da avere a disposizione tutti i dati per ricavare il valore di ICR corrispondente.

$$\text{RMCI} = \sigma_c (\text{RQD}/100)^{2/3} = 54,3 \text{ MPa}$$

$$\text{ICR} = 4,24 P \text{ RMCI}^{-0.567} = 52,84 \text{ m}^3/\text{h}$$

Passando al calcolo dell'ICR della TBM, ipotizziamo di avere una macchina il cui coefficiente k di trasmissione energetica è 0,80, la cui potenza attesa è pari a 160 kW e la cui energia specifica è pari a 2,1 kWh/m³.

$$\text{ICR} = k P / \text{SE} = 61 \text{ m}^3/\text{h}$$

Ipotizziamo poi una produzione media con uso di esplosivo pari a 45V m³/h.

Possiamo dunque costruire la matrice delle preferenze relativa al primo criterio.

CRITERIO 1	Martello	TBM	Esplosivo
Martello	1,00	0,87	1,17,
TBM	1,15	1,00	1,36
Esplosivo	0,85	0,74	1,00

L'autovettore associato a questa matrice ha per componenti (0,57; 0,66; 0,49).

Criterio 2

Si passa ora alla valutazione dell'indice RMR dell'ammasso oggetto dello scavo.

Se la resistenza della matrice rocciosa è pari a 100 MPa, l'indice RQD al 40%, la spaziatura media tra le discontinuità nel tratto meno favorevole alla sicurezza è compresa tra 6 cm e 20 cm, le superfici delle discontinuità sono uniformemente consumate, l'ammasso, relativamente alle condizioni idrauliche, è da definirsi "dripping" e l'inclinazione dei piani di

discontinuità è molto sfavorevole alla stabilità del cavo, allora è possibile affermare che l'ammasso ha un punteggio di 26 punti secondo la classificazione di Beniaowski ($RMR=10+8+8+7+5-12=26$).

Resistenza della roccia intatta	PLSI (Mpa)	>10	4-10	2-4	1-2	Usare UCS
	UCS (MPa)	>250	100 - 250	50 - 100	25 - 50	5 - 25
R1	Rating	15	12	7	4	0
RQD	%	90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	<25
R2	Rating	20	17	13	8	5
Spaziatura discontinuità		>2 m	0,6 - 2 m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	<60 mm
R3	Rating	20	15	10	8	5
Condizione delle discontinuità		Molto ruvide	Lievemente irregolari	Lievemente irregolari	Lisce internamente o incavate <5 mm	Incavate >5 mm
		Discontinue senza separazioni	Separazione <1 mm	Separazione <1 mm		Separazione >5 mm
		Non alterate	Lievemente alterate	Molto alterate	Continue	
R4	Rating	30	25	20	10	0
Condizioni idrauliche		Completa. secco	Poco umido	Umido	Molto umido	Presenza di flusso
R5	Rating	15	10	7	4	0
Attacco e angolo dei giunti	Tunnel	Molto favorev.	Favorevole	Indifferente	Sfavorevole	Molto sfavorev.
	Rating	0	- 2	- 5	-10	-12

Applicando la formula suggerita nel paragrafo relativo all'utilizzo del valore del RMR all'interno del metodo proposto nel confronto tra TBM ed esplosivo, risulta che secondo questo criterio l'utilizzo dei martelli idraulici è 2,4 volte più vantaggioso rispetto all'uso della TBM.

Passando poi a confrontare l'uso dei martelli demolitori con quello dell'esplosivo rispetto al valore di RMR dell'ammasso, è possibile affermare che in un ammasso di scarsa qualità l'uso del martello è sicuramente favorito in quanto le esplosioni possono mettere in crisi la stabilità del cavo durante le successive operazioni di scavo. Quantifichiamo quanto detto affermando che l'uso del martello, per questo criterio è 3 volte più vantaggioso dell'esplosivo.

Confrontando infine il comportamento di una TBM con quello degli esplosivi è altrettanto vero che, la TBM è 1,5 volte più vantaggiosa.

CRITERIO 2	Martello	TBM	Esplosivo
Martello	1	2,400	3,000
TBM	0,417	1,000	1,500
Esplosivo	0,333	0,667	1

L'autovettore associato a questa matrice ha per componenti (0,86; 0,39; 0,27).

Criterio 3

Posto che il progetto in questione preveda la realizzazione di un tunnel lungo 1 km e che la probabilità di trovare differenze inaspettate nelle litologie presenti dell'ammasso roccioso pari a 1,5 (valore compreso tra il minimo suggerito 1 e il massimo suggerito 3), risulta che secondo questo criterio l'uso dei martelli è 3 volte più vantaggioso dell'uso della TBM.

Confrontando martelli e esplosivo, considerando tali lunghezza e variabilità litologica, possiamo ipotizzare un leggero vantaggio a favore dell'esplosivo, non tanto per differenze dovute alla lunghezza del tracciato, quanto per il fatto che una bassa incertezza nella variabilità geologica metterebbe al riparo da rischi di tratti inaspettati in cui l'esplosivo potrebbe risultare inutilizzabile. Si indica quindi un vantaggio per l'uso dell'esplosivo 1,3 volte superiore a quello del martello.

Confrontando infine TBM e esplosivo, l'utilizzo della fresa a piena sezione è sicuramente meno adatta a causa delle sue dimensioni. Pertanto l'esplosivo è 1,2 volte più performante rispetto alla TBM. L'autovettore associato a questa matrice ha per componenti (0,72; 0,35; 0,62).

CRITERIO 3	Martello	TBM	Esplosivo
Martello	1,000	3,000	0,769
TBM	0,333	1,000	0,833
Esplosivo	1,300	1,200	1,000

Raccogliendo in un'unica matrice gli autovettori ricavati finora dalle matrici delle preferenze, otteniamo:

0,57	0,86	0,72
0,66	0,39	0,35
0,49	0,27	0,62

Moltiplicando questa matrice per l'autovettore associato alla matrice dei criteri (0,84; 0,47; 0,27), otteniamo il vettore delle preferenze che avrà per componenti (1,08; 0,83; 0,71). Considerando che il primo termine corrisponde alla convenienza dell'uso dei martelli demolitori, mentre il secondo si riferisce alla TBM, possiamo affermare che nel caso B l'uso dei martelli demolitori è più conveniente dell'uso della TBM. Ecco esposto come variando solo le caratteristiche dei sistemi di scavo, l'analisi subisce sensibili variazioni anche a parità di condizioni geotecniche e geometriche.

CONSIDERAZIONI SUL METODO SEMPLIFICATO

Questa proposta di metodo semplificato per la scelta del mezzo di scavo di gallerie naturali parte da un presupposto ben preciso: porre l'attenzione sulle caratteristiche del sistema che si vuole adottare e del sito in cui si deve operare. Il metodo AHP è in sostanza uno strumento semplice (rispetto alla complessità del problema) per consentire al progettista un primo attendibile criterio di valutazione sulla migliore scelta del metodo di scavo; a questo ovviamente ne vanno aggiunti altri che inevitabilmente concorrono alla realizzazione di opere intrinsecamente complesse, quali appunto le gallerie naturali.



- Cenni sullo stato dell'arte del martello demolitore
- La demolizione
- Un criterio di produttività
- I principali metodi di scavo di gallerie con il martello demolitore
- Il consolidamento del cavo
 - Il pre-consolidamento del nucleo-fronte
 - Il rivestimento prima fase
 - Bullonatura e chiodatura
 - Lo scavo e il getto dell'arco rovescio
- La scelta del martello demolitore per lo scavo in galleria
- L'allestimento del martello per applicazioni in galleria



MARTELLO, METODO DI SCAVO, CONSOLIDAMENTO

MARTELLLO, METODO DI SCAVO, CONSOLIDAMENTO

CENNI SULLO STATO DELL'ARTE DEL MARTELLLO DEMOLITORE

Il martello demolitore è una macchina che ha la funzione di trasformare l'energia di un fluido in pressione in energia meccanica (moto alternato di una massa battente) al fine di portare a rottura del materiale con comportamento fragile, costituito generalmente da roccia, cemento o simili. La massa battente può avere un peso che va da pochi kg fino a circa una tonnellata e le velocità d'impatto possono raggiungere tranquillamente i 10 m/sec. L'impatto tra la massa battente e l'utensile trasforma l'energia cinetica della massa in movimento in energia d'impatto che attraversando l'utensile stesso viene trasferita al materiale da demolire. Lo stato dell'arte dei demolitori idraulici individua due principali categorie di martelli suddivise in base al principio di funzionamento:

a) Martelli a spinta di olio:

Sono caratterizzati da un pistone che è spinto nella discesa dalla pressione idraulica sulla testa del pistone e "velocizzato" dalla carica olio-gas dell'accumulatore. Il sistema Indeco sposa questa tecnologia. I principali vantaggi del sistema a spinta di olio:

- 1) costanza della carica di gas e dell'energia per colpo
- 2) bassa usura ed alto valore residuo dell'usato
- 3) bassa dipendenza dell'efficienza dagli sbalzi termici
- 4) idraulicamente ammortizzati non stressano bracci e ralle degli escavatori
- 5) non sollecitano oltremodo le tubazioni di mandata e di ritorno
- 6) manutenzione ridotta e quindi minori costi (numero ridotto di guarnizioni, non necessitano di guarnizioni dinamiche gas/olio poco affidabili e caratterizzate da un inevitabile trafilamento nel tempo)

b) Martelli a spinta di gas:

Sono caratterizzati da una camera a gas (solitamente azoto precaricato) che interessa la parte superiore del pistone. La pressione del gas aumenta quando il pistone si muove verso l'alto spinto dall'olio, tale pressione spinge successivamente il pistone nella corsa di discesa fino all'urto con l'utensile. I martelli a gas hanno le seguenti caratteristiche: nel tempo riducono l'energia per colpo, hanno un numero elevato di guarnizioni, hanno la necessità di utilizzare guarnizioni dinamiche gas/olio poco affidabili e caratterizzate da un inevitabile trafilamento nel tempo.

- 1) alto grado di invecchiamento e usura precoce
- 2) alta dipendenza dell'efficienza dagli sbalzi termici
- 3) valore residuo dell'usato basso
- 4) forte stress delle pompe degli escavatori
- 5) stressano bracci e ralle degli escavatori
- 6) il sistema idraulico più rigido sollecita le tubazioni di mandata e di ritorno

LA DEMOLIZIONE

I martelli idraulici lavorano principalmente in due differenti modalità denominate **demolizione per penetrazione** e **demolizione da impatto**. La demolizione per penetrazione consiste nel frantumare materiali rocciosi per mezzo della combinazione di onde di stress (livello di stress elevato che agisce in un tempo molto breve) e dell'effetto cuneo generato dalla particolare conformazione dell'utensile utilizzato. In un'applicazione tipica della demolizione per penetrazione vengono utilizzati utensili a scalpello o doppio cono per frantumare cemento, asfalto o altri materiali soffici.

In questo tipo di demolizione l'affilatura e la forma dell'utensile utilizzato sono fondamentali al fine di ottenere una buona produttività del martello. Grazie alla lunga esperienza nel campo delle demolizioni gravose in galleria Indeco ha sviluppato diverse tipologie di utensili con lo scopo di ottenere la migliore performance in qualsiasi condizione di utilizzo. La forma a cuneo dello scalpello o

la speciale conformazione a doppio cuneo dell'utensile Indeco Cobra assicurano una grande penetrazione nella roccia; generalmente il valore della penetrazione diminuisce però man mano che il cuneo avanza nella roccia e fino quasi a fermarsi.

La riduzione della penetrazione è molto rapida e, una volta che il cuneo ha penetrato la roccia, a causa del forte effetto d'attrito tra il corpo dell'utensile subito dietro il cuneo e la roccia stessa, viene dispersa una notevole quantità di energia. La speciale conformazione degli utensili Indeco permette di ridurre l'effetto di attrito con la roccia e favorisce la penetrazione anche del corpo dell'utensile sito subito dopo il cuneo. Questo design enfatizza l'effetto di frantumazione della roccia anche in caso di elevati valori di penetrazione. L'esperienza dell'operatore in questi casi è fondamentale per cambiare posizione di lavoro ed evitare dispersione inutile di energia; il tempo di battuta nel medesimo punto non dovrebbe eccedere i 45" dopodiché l'operatore per massimizzare la produttività dovrebbe riposizionare l'utensile spostandosi di circa 20 centimetri dal punto di battuta precedente.

La **demolizione da impatto** è caratterizzata dal fatto di generare la frattura del materiale per mezzo delle sole onde di stress con una minima compartecipazione della penetrazione, infatti, la migliore trasmissione delle onde di stress si verifica con l'utilizzo di utensili piatti. Tipiche applicazioni risultano essere la demolizione di blocchi e massi di grandi dimensione, strutture in cemento pesantemente armato, scorie generate nella produzione dell'acciaio.

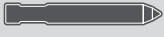
La scelta **dell'utensile** adatto è un fattore determinante per ottenere dal martello demolitore idraulico Indeco la massima produttività. Pertanto, la geometria dell'utensile dovrà essere adeguata sia alla tipologia di materiale da demolire, sia al tipo di lavoro da eseguire.

Gli utensili Indeco sono progettati e realizzati in conformità alle varie esigenze di demolizione e affinché svolgano con la massima efficacia il loro ruolo, è necessario osservare alcune norme relative alla scelta della punta più idonea, al corretto uso e alla manutenzione. Le preferenze degli operatori, il tipo di macchina e le condizioni particolari di lavoro possono influenzare la scelta più idonea.



Martello Indeco sul fronte di scavo

Di seguito riportiamo brevemente le tipologie più diffuse di utensili da demolizione:

	1) Utensile a scalpello: adatto a tutti i lavori di sbancamento o scavi a sezione ristretta su rocce da medie a dure stratificate.
	2) Utensile a doppio cono: adatto per lavori di rottura di cemento o rocce di durezza media non stratificate. Demolizione secondaria: blocchi medi, duri e durissimi.
	3) Utensile tagliasfalto: per lavori di tagliasfalto, rotture di pavimentazione, pareti, muri in mattoni o tufo.
	4) Utensile battipalo: per lavori di palificazione o presso piegati di sostegno per guardrail, ecc.
	6) Utensile a piramide: per demolire pavimentazioni in cemento armato duro e materiale di sedimentazione.
	6) Utensile a cobra: adatto a tutti i lavori di sbancamento su rocce da medio-dure a dure, non stratificate o tendenti a polverizzarsi durante la fase di rottura, puddinghe.
	7) Utensile piatto: adatto per lavori di rottura di blocchi di qualsiasi durezza o per ottenere piccole pezzature del materiale demolito.

UN CRITERIO DI PRODUTTIVITÀ

Il martello idraulico rappresenta indubbiamente una soluzione ideale per lo scavo di gallerie caratterizzate da profili geomeccanici e da dimensionamenti tali da rendere difficile, o diseconomico, l'esplosivo.

Come già sottolineato nel primo capitolo, sebbene la fresa a tutta sezione (o TBM) sia oggi considerata il metodo di scavo in assoluto più efficiente, esistono non poche situazioni (dimensionamenti e posizionamento della galleria, raggi di curvatura, difficoltà logistiche, ecc.) in cui il suo impiego non è possibile o consigliabile, per via dei costi o dei rischi che ciò comporterebbe. In alternativa l'esplosivo, metodo tradizionale di scavo, garantisce produzioni interessanti, a patto però che l'ammasso roccioso presenti caratteristiche di compattezza che gli consentano di fornire un'adeguata efficacia. Il martello idraulico assicura invece una buona produttività proprio quando l'ammasso roccioso presenta caratteristiche di limitata durezza (solitamente sotto i 50 MPa) e soprattutto di fratturazione, per cui l'esplosivo non riesce a garantire valori di produzione soddisfacenti. Da questo punto di vista martello ed esplosivo possono peraltro essere considerati metodi complementari di scavo e, al contrario di quanto avviene con la fresa a tutta sezione (metodo univoco per via dei costi e tempi che il cambiamento comporterebbe), possono essere appunto alternati, tutte le volte che il profilo geomeccanico sia caratterizzato da ammassi che oscillano tra una forte compattezza e durezza ed una

maggiore fratturazione con livelli di durezza più contenuti. Ovviamente questo cambiamento non è immune da costi e comporta comunque un tempo, ancorché minimo, di sospensione dei lavori, che però non è appunto comparabile con quanto avverrebbe se si dovesse arrivare al cambio di tecnica di scavo dopo aver impostato il cantiere per il lavoro della TBM. Quando utilizzato nell'ambito più appropriato, il martello idraulico ha poi un rilievo anche sulla logistica del cantiere, in quanto permette di diminuire il numero degli addetti e dei mezzi necessari allo scavo (non richiede infatti le squadre addette alla perforazione e al piazzamento delle cariche, né le perforatrici) con ricadute positive sulla redditività dell'impresa. Anche le tempistiche di lavoro beneficiano dell'utilizzo del martello poiché, come già dimostrato, quando le dimensioni della galleria lo consentono, l'utilizzo di questo metodo permette che le operazioni di scavo e di smarino avvengano contemporaneamente.

Sull'utilizzo del martello per la coltivazione di cave esistono molti documenti e relazioni di carattere tecnico, più rare quelle che ne identificano le capacità produttive quando questa attrezzatura è invece impiegata per lo scavo di gallerie. Uno dei riferimenti più riconosciuti è quello espresso dallo studio **Performance Prediction of Mechanical Excavators in Tunnels** redatto dagli ingegneri turchi Nuh Bilgin e Cemal Balci nel 2005. Lo studio, tra l'altro, contiene un criterio di calcolo che consente di giungere, o comunque di istituire, parametri necessari alla determinazione della produttività del martello utilizzato per lo scavo in galleria. La previsione di capacità di rottura netta, ottenuta secondo quanto formulato da Bilgin&Balci con un equazione empirica, è stata definita grazie alla raccolta di dati in diversi tunnel dove si è utilizzato il martello, ed è calcolata come segue:

PREVISIONE DI CAPACITÀ DI ROTTURA NETTA DEL MARTELLO AD URTO

La seguente equazione empirica è stata ottenuta utilizzando un database relativo all'applicazione dei martelli ad urto in diverse applicazioni.

$$IBR = 4,24P(RMCI)^{-0.567}$$

$$RMCI = \sigma_c(RQD/100)^{-2/3}$$

dove:

IBR è la capacità di rottura netta del martello espressa in m³/h

P è la potenza del martello espressa in HP

RMCI è l'indice di rottura dell'ammasso espresso in MPa

σ_c è la resistenza a compressione uniassiale espressa in MPa

RQD è l'indice di qualità della roccia espresso in percentuale

Performance prediction of mechanical excavators in tunnels by Bilgin, N & Balci, C.

La **produttività** dei martelli dipende anche da diversi fattori come l'energia d'impatto e la frequenza, la resistenza e la tenacità dell'ammasso roccioso, le capacità dell'operatore, dalle tecniche di scavo, dalle condizioni dell'escavatore, dalla logistica del sito di scavo ed infine dall'entità del carico esercitato sul martello da parte dell'escavatore.

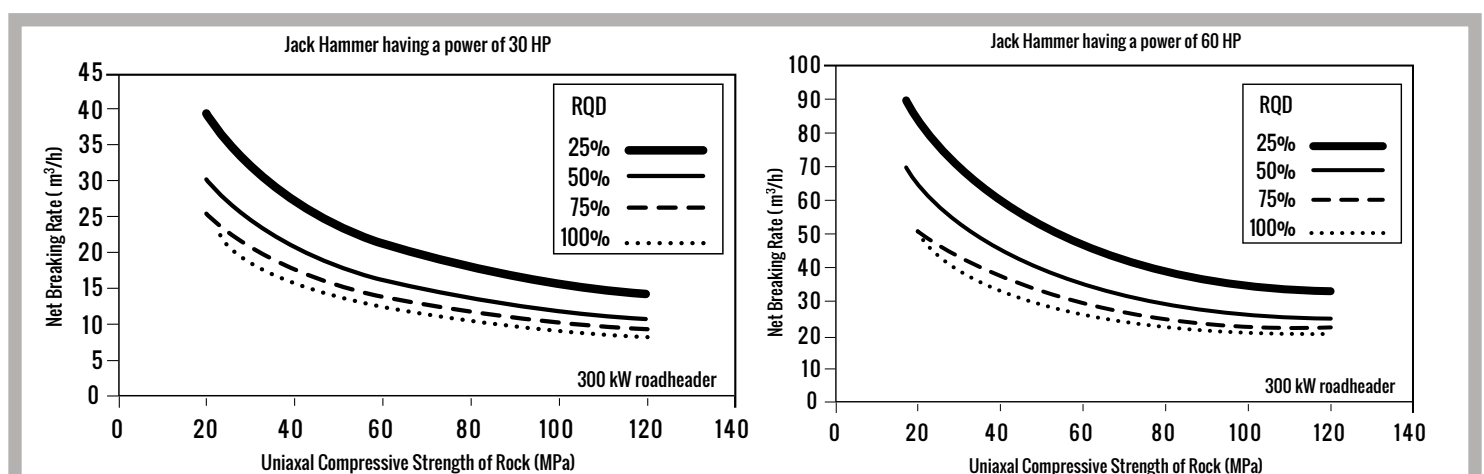
Proprio il carico esercitato sul martello da parte dell'escavatore risulta essere essenziale nel processo di trasmissione dell'energia dal martello alla roccia. Se questo carico risulta insufficiente, parte dell'energia generata dal martello non viene trasferita all'ammasso roccioso ma genera un movimento indesiderato della punta, il cosiddetto saltellamento, e la formazione di cuscinetti di polvere tra l'utensile e il materiale. La conseguenza è una bassa efficienza di rottura, rapida usura dell'utensile e forti vibrazioni del corpo martello e del braccio dell'escavatore. Il cuscinetto di polvere assorbe l'energia dell'utensile con una significativa riduzione della produttività e pertanto il rapido riposizionamento

dell'utensile è necessario per evitare questo problema. Il sistema di smorzamento progettato da Indeco isola il corpo martello dalla carcassa assorbendo la maggior parte di queste vibrazioni indesiderate e preservando l'escavatore da eventuali danni e l'operatore dal rischio di essere sottoposto a forti vibrazioni.

Un carico generato dall'escavatore troppo elevato potrebbe causare la precoce usura del martello e elevatissime sollecitazioni da urto all'escavatore quando l'ammasso crolla. La potenza lavoro resa per un demolitore idraulico è data dal prodotto dell'energia d'urto e la frequenza. Il valore ottimale della frequenza d'impatto dipende dal materiale che si va a demolire. Un materiale **debole** caratterizzato da elevata penetrazione necessita di un valore alto di frequenza di battuta. Se il materiale da demolire è molto **duro** una frequenza di battuta più bassa e caratterizzata da un'energia per colpo più elevata favorisce la frantumazione della roccia. Una frequenza di battuta più bassa riduce inoltre il riscaldamento della punta, evita la riduzione di durezza del tagliente a causa del calore e ne riduce notevolmente l'usura. Come si può dedurre il martello ideale dovrebbe consentire **l'automatico adattamento dei parametri** di lavoro come la frequenza e l'energia di battuta in funzione delle caratteristiche della roccia al fine di massimizzare la produttività in qualunque condizione di lavoro.

Nella demolizione con il martello la rottura del materiale avviene generalmente dopo un numero di colpi elevato circa 2-200 colpi. Durante la **rottura per penetrazione**, il valore della penetrazione dell'utensile nella roccia si riduce considerevolmente man mano che l'utensile penetra nella roccia.

Nella demolizione di roccia molto dura invece non si nota alcuna penetrazione fino a quando questi cedono di schianto. È noto che i valori ottimali di energia d'impatto dipendono dalla durezza e dalla fessurazione del materiale da demolire. Se la roccia è penetrata o gli ammassi vengono fratturati con un numero di colpi molto basso (2-5 colpi), ciò significa che l'energia del colpo è troppo elevata per l'applicazione. In questo caso una percentuale elevata di energia dei colpi può danneggiare il martello (colpi a vuoto) e una possibile riduzione dell'energia d'impatto non influenza la produttività.

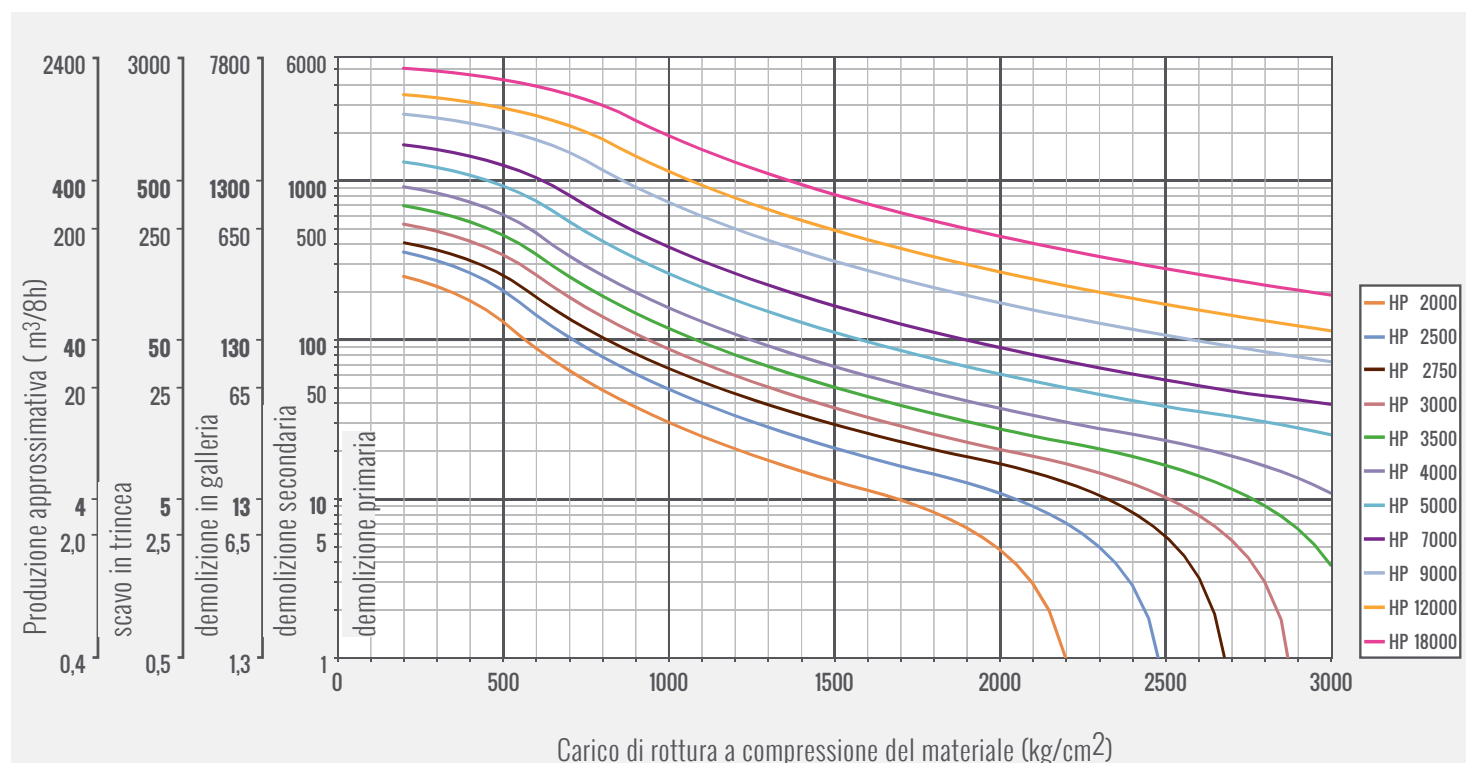


Relazione tra la resistenza a compressione uniassiale della roccia σ_c (MPa) e la produzione oraria del martello (m^3/h) in funzione di diversi valori dell'indice di qualità della roccia RQD (25-50-75-100%) e della potenza del martello (30-60HP); dati rilevati su base statistica.
Jack Hammer: Martello Idraulico

A tal proposito l'efficiente sistema ABF (Anti Blank Firing - anti colpi a vuoto) inserito su tutti i martelli Indeco di medie e grandi dimensioni, elimina i colpi a vuoto dell'utensile, disattivando il ciclo di percussione del demolitore se l'utensile

non poggia stabilmente sulla superficie da demolire. In questo modo, il sistema allunga la vita delle parti di usura e riduce gli stress trasmessi al corpo del martello e al braccio dell'escavatore.

Nel caso in cui l'ammasso sia molto duro il funzionamento ideale del martello presuppone una frequenza di battuta ridotta e un'energia per colpo elevata per permettere il massimo trasferimento di energia dall'utensile alla roccia e consentirne la frantumazione. I demolitori Indeco, grazie al loro speciale sistema idraulico intelligente, sono in grado di variare automaticamente energia e frequenza dei colpi in funzione della durezza del materiale da demolire. Viene così ottimizzata la potenza idraulica erogata dalla macchina a vantaggio della produttività, ottenendo un rendimento globale più elevato.



Produzione indicativa ($m^3/8h$) dei martelli Indeco in funzione del carico di rottura della roccia e del tipo di demolizione effettuata.

In base all'esperienza maturata e a misurazioni effettuate direttamente sul campo è stato possibile ricavare un grafico empirico del valore indicativo della produttività ($m^3/8h$) del martello demolitore idraulico Indeco;

Come si può notare **l'andamento iperbolico dei grafici** mostra chiaramente che:

- 1) la produttività si riduce considerevolmente all'aumentare del carico di compressione della roccia da demolire riportato sulle ascisse;
- 2) la dimensione del martello (proporzionale alla sua energia d'urto) comporta una traslazione verso l'alto della curva di produttività e quindi contribuisce proporzionalmente all'incremento del volume di materiale demolito.

La produttività è fortemente legata alla tipologia di lavoro di demolizione a parità di martello utilizzato; lavori gravosi come lo scavo di gallerie e lo scavo di trincea dove il fronte di scavo è chiuso portano ad una riduzione della produttività se comparati a lavori meno gravosi su fronte aperto, come la demolizione primaria o demolizione secondaria di massi.

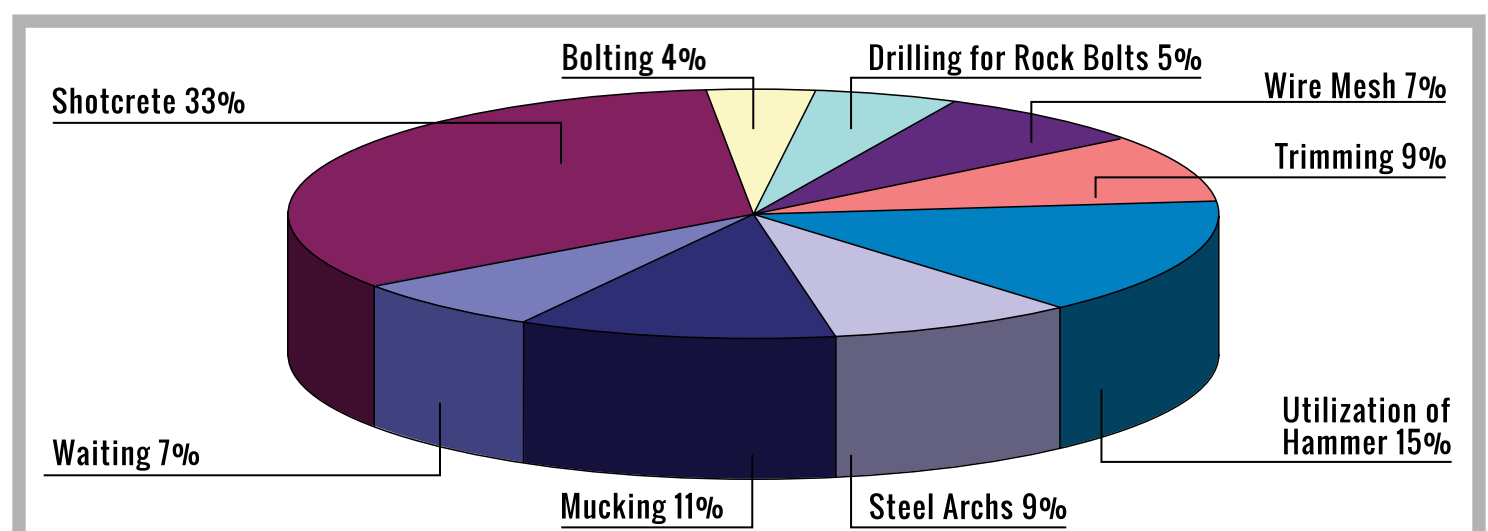
In base ai diversi **utilizzi del martello demolitore idraulico** è possibile identificare quattro principali applicazioni di lavoro come la demolizione primaria, lo scavo di gallerie, scavi a sezione obbligata e demolizione secondaria di massi.

Nella **demolizione primaria**, nei casi in cui l'uso dell'esplosivo è stato difficile o vietato, i martelli idraulici, specialmente di grandi dimensioni, si sono dimostrati una valida alternativa sia dal punto di vista della produttività che principalmente dell'economicità.

Significativi valori di produttività (m^3/h) si registrano in presenza di roccia lievemente o fortemente fratturata (RQD 25-50%). Come è ormai noto dalla classificazione GSI l'utilizzo del martello può essere anche complementare a quello dell'esplosivo e copre un range di utilizzo molto ampio andando da strutture della roccia dura e leggermente fratturata (come porfidi e dolomia) fino a roccia più soffice, fratturata e stratificata (come calcare, arenaria e micascisto).

La demolizione primaria utilizzando il martello idraulico (che sia in galleria o in cava) è caratterizzata da:

- 1) basso costo d'investimento
- 2) utilizzo non necessario di bracci idraulici statici sul frantoio in quanto la pezzatura della roccia viene realizzata con il martello stesso
- 3) buon controllo del sito di lavoro: essendo il martello uno strumento di demolizione preciso e puntuale consente lo scavo selettivo durante il disgaggio
- 4) demolizione secondaria non necessaria
- 5) possibilità di lavorare con due diversi martelli e due escavatori se le dimensioni della galleria o del sito lo consentono
- 6) abbattimento dei tempi di avanzamento, effettuando lo smarino anche durante le operazioni di scavo (cosa non possibile utilizzando l'esplosivo)
- 7) maggiore sicurezza del sito di lavoro se paragonato ai rischi dell'esplosivo
- 8) basso valore di vibrazioni al suolo riduzione rispetto all'utilizzo dell'esplosivo
- 9) basso rumore, utilizzando le versioni silenziate Indeco Whisper
- 10) migliore distribuzione degli aggregati scavati (con riduzione delle polveri prodotte dallo scavo)
- 11) meno interruzioni nell'area di lavoro circostante



Prestazioni complessive di scavo mediante martello, Istanbul metro tunnel

Se comparata alla demolizione tramite perforazione ed esplosivo, lo scavo di galleria utilizzando i martelli idraulici Indeco, ha dimostrato la sua efficacia ed economicità soprattutto in Europa e nel continente asiatico dove si è rivelato un successo nel caso in cui la struttura fratturata dell'ammasso ha reso difficile l'utilizzo dell'esplosivo. In casi invece in cui è stato necessario utilizzare entrambi i sistemi il martello si è rivelata l'attrezzatura più adatta ad essere complementare all'esplosivo, flessibile, economica e comunque sempre necessaria (disgaggio, profilatura delle sezioni, scavo dell'arco rovescio).

L'utilizzo del martello per lo scavo di gallerie richiede solo poche fasi di lavoro e meno forza lavoro specializzata rispetto alla perforazione e all'uso dell'esplosivo. Rispetto al metodo TBM inoltre, l'utilizzo del martello implica poi costi per investimenti molto più bassi e la possibilità di realizzare tunnel delle forme più svariate.

La valutazione dell'economicità dello scavo di gallerie utilizzando i martelli idraulici dipende da vari fattori quali:

- 1) tipo di roccia
- 2) lunghezza del tunnel
- 3) sezione del tunnel (circolare, policentrica, arco rovescio)
- 4) posizione del tunnel (in luoghi poco accessibili ed in prossimità dei viadotti)
- 5) tempistica di realizzazione
- 6) disponibilità delle attrezzature
- 7) formazione della forza lavoro

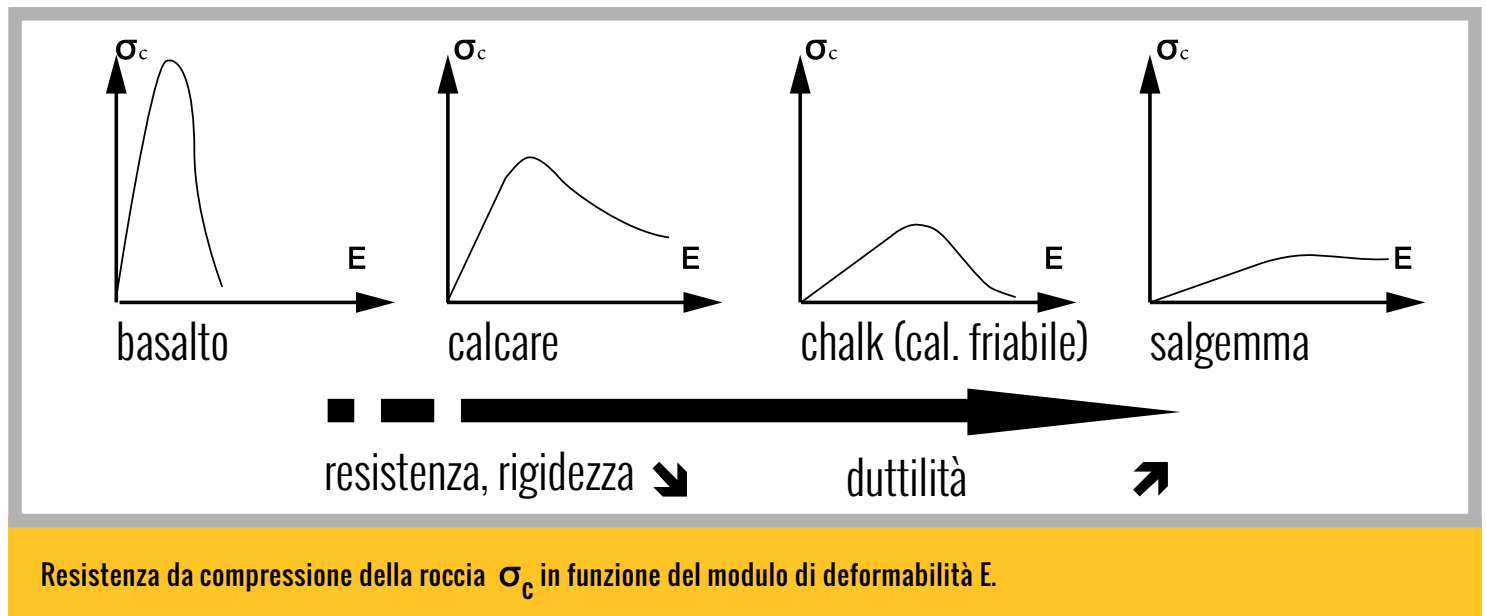
In base alle **dimensioni della galleria** gli escavatori utilizzati vanno dalle 20 alle 50 tonnellate con martelli in configurazione galleria da 1500 kg fino a 4000 kg; gli utensili più utilizzati sono lo scalpello e il cobra e nel caso in cui il materiale risulti essere molto abrasivo Indeco fornisce utensili speciali Silver ad elevata durezza. In un'applicazione tipica di scavo galleria utilizzando i martelli idraulici, i principali vantaggi rispetto agli altri metodi di scavo sono:

- 1) il basso costo dell'investimento
- 2) il basso costo della forza lavoro
- 3) un sito di lavoro più sicuro (senza esplosivo)
- 4) la migliore precisione di scavo, con significativa riduzione dei costi dovuti al disgaggio e alla profilatura come nel caso dell'esplosivo

Affinché lo scavo con il martello Idraulico risulti essere economico è richiesto un ragionevole indice di produttività.

La **tipologia di roccia** che meglio si presta alla demolizione per mezzo del martello dovrebbe avere:

- 1) una struttura dell'ammasso sconnessa, con discontinuità e fratture da 30-50 cm
- 2) RQD < 40-50%
- 3) compattezza e durezza (500-1500 kg/cm²) tali da permettere un'adeguata produttività da penetrazione dell'utensile
- 4) resistenza, grado di abrasione e tenacità influenzano la produttività



Le rocce con una bassa tenacità (richiedono elevata energia per colpo e minore frequenza di lavoro) meglio si prestano alla rottura da impatto; rocce più tenaci assorbono meglio l'energia dell'utensile (richiedono bassa energia per colpo e maggiore frequenza di lavoro) e collassano a causa della rottura per penetrazione, come del resto gli ammassi stratificati e discontinui. Trovare roccia omogenea e poco fratturata nella realizzazione di un tunnel molto lungo è un evento particolarmente raro. L'uso dell'esplosivo come mezzo di scavo complementare al martello nel caso in cui l'ammasso fosse particolarmente duro e compatto è sempre possibile, soprattutto nella parte inferiore della sezione di scavo. L'utilizzo del martello nello scavo delle gallerie genera inoltre un livello di vibrazioni ammissibili al suolo inferiore del 5-10% rispetto al metodo di scavo mediante perforazione ed esplosivo, e questo è un fattore decisivo nella scelta del metodo di scavo nelle vicinanze di strutture o centri abitati che richiedono limitazioni del livello di vibrazioni.

I PRINCIPALI METODI DI SCAVO DI GALLERIE CON IL MARTELLI DEMOLITORE

Il metodo di scavo della galleria con martello demolitore è dettato dall'area in sezione e dalla lunghezza del tunnel. Per ragioni logistiche e dimensionali lo scavo per mezzo di martelli idraulici è appropriato per tunnel con una sezione minima di 30 m², per dimensioni inferiori saranno richiesti martelli del peso inferiore ai 2000 kg e relativi escavatori <20-25 tonnellate. In gallerie con altezza della sezione inferiore a 7-10 m e area di 30-70 m² sarà possibile posizionare sul fronte di scavo solo un escavatore con martello demolitore. Le fasi di lavoro generalmente sono le seguenti:

- 1) Scavo al fronte per mezzo del martello demolitore idraulico ed eventuale disaggio;
- 2) Trasporto del materiale scavato, smarino;
- 3) Rinforzo e consolidamento del cavo;
- 4) Eventuale realizzazione dell'arco rovescio con conseguenti operazioni di smarino.

Mediamente durante un normale turno di lavoro di 8 h la durata delle operazioni di scavo sono circa:

- il 20-25% (1,5 - 2 ore) scavo mediante l'utilizzo del martello;
- il 15-20% (1,2 - 1,5 ore) per lo smarino;
- il 10-15% (0,8 - 1,2 ore) per l'eventuale disaggio e trasporto del materiale di risulta;
- il 40-55% (3,2 - 4,4 ore) per le operazioni di consolidamento del cavo.



Scavo parziale di allargamento galleria, A3 SARC Normanno, HP 7000 su Hitachi 470

L'applicazione in assoluto più diffusa, in gallerie con area maggiore di 70 m^2 , è quella con un solo escavatore dotato di martello operante sul fronte di scavo; con questa configurazione sarà possibile effettuare lo scavo e lo smarino simultaneamente e le fasi di lavoro si riducono alle seguenti:

- scavo mediante l'utilizzo del martello e smarino mediante pala gommata;
- operazioni di consolidamento del cavo.

La maggiore area di lavoro consente la rimozione del materiale simultaneamente alle operazioni di scavo ed è possibile posizionare in prossimità del fronte l'escavatore dotato di martello, la pala gommata per lo smarino e l'autocarro o il dumper articolato per il trasporto del materiale di risulta. Le fasi di scavo e trasporto in realtà si completano a vicenda; quando infatti il materiale è stato scavato da un lato del fronte, il martello può essere trasferito sul lato opposto ed il materiale scavato viene immediatamente rimosso. La rimozione immediata del materiale di risulta migliora anche la visibilità dell'operatore nelle operazioni successive di scavo. Nel caso in cui la sezione della galleria lo consenta è anche possibile sdoppiare le operazioni di scavo in due fasi o scavo parzializzato (questa tecnica è attualmente poco diffusa; fig. scavo parzializzato con martelli sfasati).

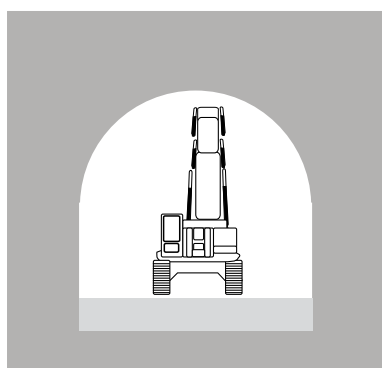
- scavo principale del fronte per mezzo di un escavatore dotato di martello idraulico;
- scavo secondario a seguire mediante un secondo escavatore che rimuove l'ammasso sottostante.

Più diffuso rispetto allo scavo parzializzato è lo scavo tradizionale con due escavatori in posizione sfasata rispetto al fronte, qualora le dimensioni della galleria lo consentano, e l'utilizzo di due martelli demolitori operanti sullo stesso fronte di scavo (fig. scavo mediante due martelli). Non è invece inusuale utilizzare escavatori e martelli di dimensioni

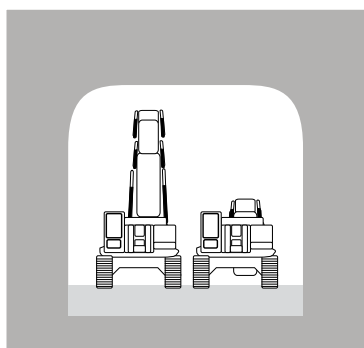
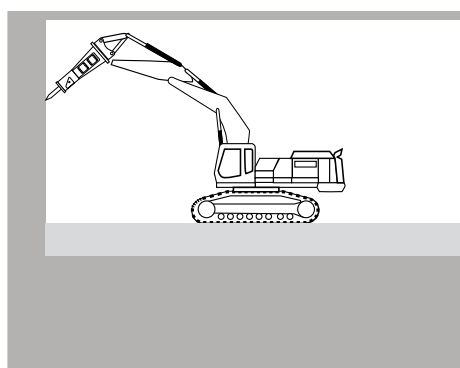
più contenute per consentire la massima sicurezza delle operazioni di scavo e l'accesso al fronte delle macchine operatrici per lo smarino ed il trasporto del materiale scavato. Questa tipologia di applicazione consente un notevole incremento della produttività dovuta al lavoro contemporaneo di due martelli ed assicura la continuità dello scavo di un lato del fronte mentre dall'altro si procede con lo smarino.

Lo scavo per mezzo di martello idraulico ed escavatore non necessita di personale altamente specializzato come nel caso dell'utilizzo dell'esplosivo ed inoltre risulta essere un processo continuo, senza le lunghe interruzioni necessarie per la messa in sicurezza del fronte e la preparazione delle volate.

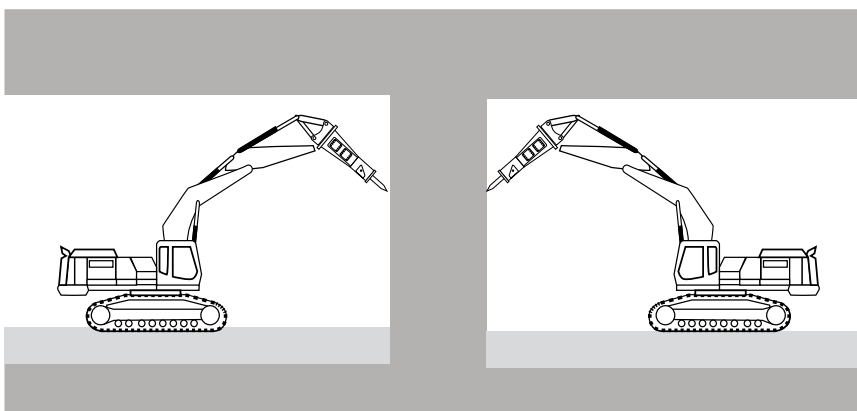
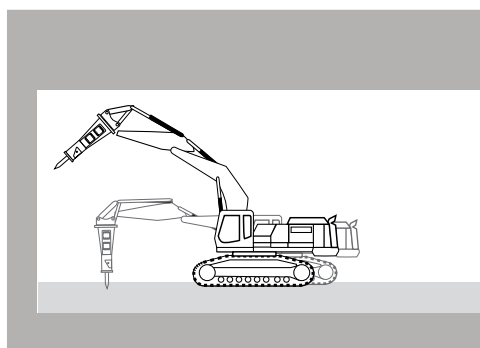
Nel caso in cui il tunnel da realizzare fosse particolarmente lungo (fig. scavo con martelli su entrambi i lati) risulta



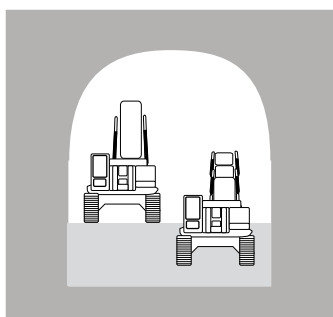
Scavo di galleria con martello



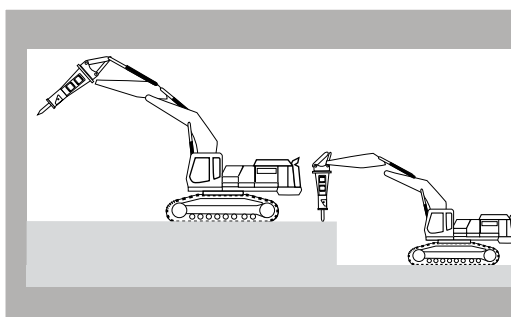
Scavo mediante due martelli



Scavo tunnel lungo con martelli su entrambi i lati



Scavo parzializzato con martelli sfasati



vantaggioso avviare le operazioni di scavo mediante martello demolitore da entrambi i lati o in base alle risorse di scavo e consolidamento a disposizione si potrebbe alternare lo scavo da un lato ed il consolidamento dall'altro e una volta terminate le operazioni per ogni lato invertire le fasi di lavoro. Il metodo di scavo generalmente (fig. sequenza di scavo) utilizzato consiste nell'avviare lo scavo al centro della sezione di galleria ad un'altezza di circa 1-1.5 metri (pos.1) realizzando una nicchia con una profondità di circa 1.2-2 metri. Lo scavo proseguirà lateralmente rispetto alla prima nicchia con una larghezza quasi pari all'intera larghezza della galleria (pos.2). Completata questa fase lo scavo proseguirà con la stessa logica (pos.3 e pos.4) dalla base della galleria fino alla massima altezza.

Le nicchie di scavo posizionate più in alto (pos.7-8-9-10) raggiungeranno larghezze diverse a seconda della particolare forma di progetto della galleria.

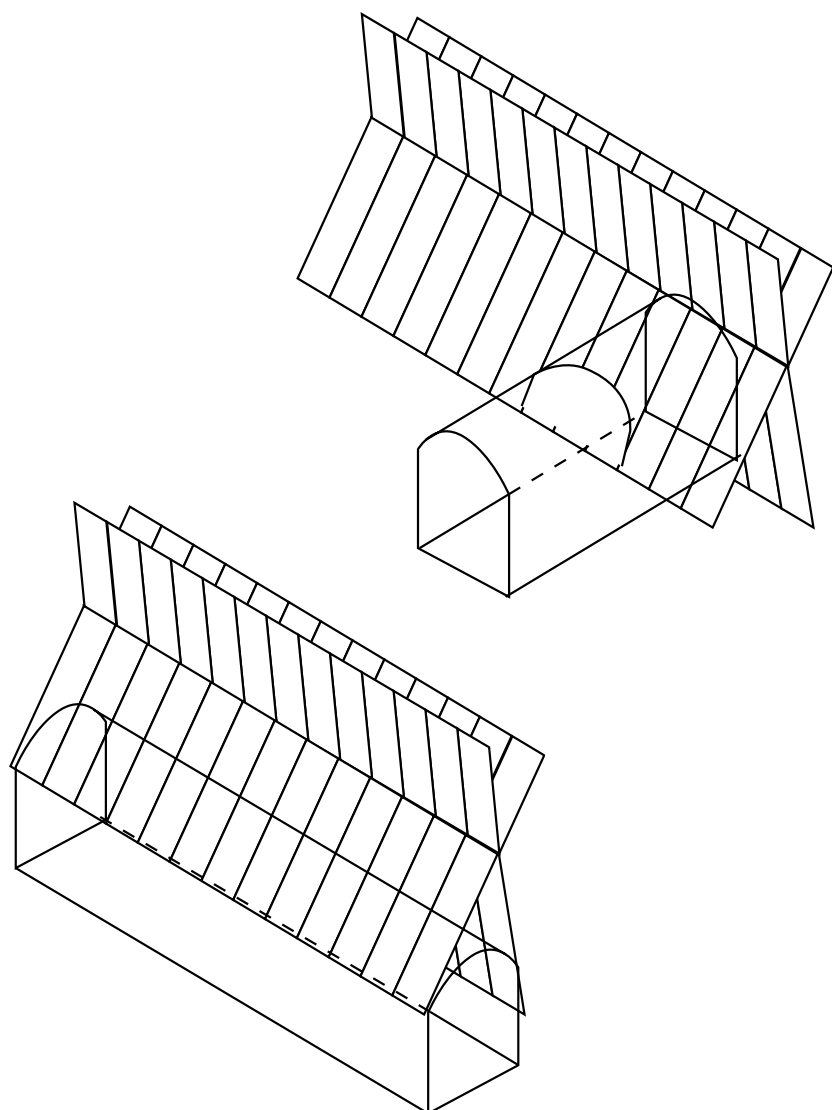
Completate tutte le nicchie di scavo si procederà con le operazioni di eventuale disgaggio e smarino del materiale di risulta. Nel caso in cui la roccia del fronte di scavo presenti dei piani (fig. Piani di taglio della faglia) e giunti, le sequenze di scavo dovrebbero seguire i piani di taglio della faglia sempre partendo dalla

base della sezione fino ad arrivare alla massima altezza. In questo modo sfruttando i punti di debolezza naturali della roccia si può massimizzare la produttività del martello idraulico (fig. Effetto dell'orientamento di scavo in relazione ai piani di discontinuità).

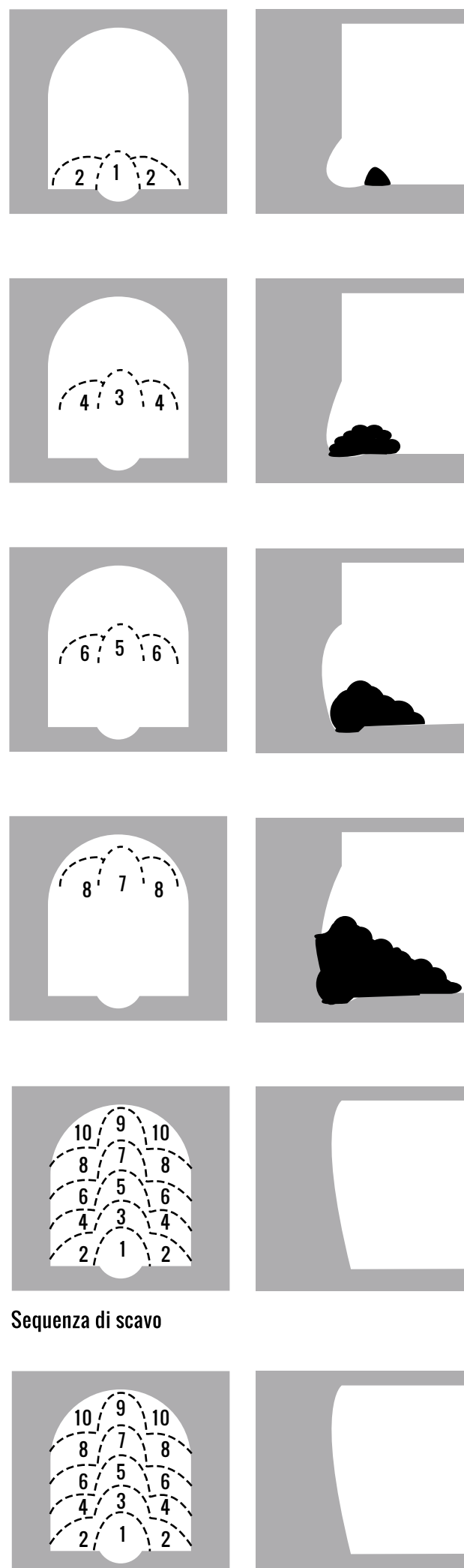
L'esecuzione di uno scavo in galleria è uno tra i lavori più impegnativi in cui un martello può operare.

I tempi di battuta del martello sono lunghi e gravosi e possono arrivare anche fino all'80% del tempo/escavatore (mentre nelle applicazioni di demolizioni primaria in cava è circa il 30-50%).

La forza che applica l'escavatore al martello in posizione suborizzontale risulta essere molto più alta rispetto al caso di lavoro in posizione verticale e proprio a causa di queste condizioni estreme di lavoro la frequente manutenzione preventiva e periodica è essenziale per la continuità e la produttività del lavoro di scavo (manutenzione programmata del martello è consigliabile). Quando la produzione ininterrotta è critica ed i tempi di realizzazione dello scavo ristretti, un sistema che utilizza due martelli al lavoro e uno in stand-by è la soluzione ideale.



Effetto dell'orientamento di scavo in relazione ai piani di discontinuità



Sequenza di scavo

Piani di taglio della faglia

IL CONSOLIDAMENTO DEL CAVO

Come accennato nel capitolo precedente, il consolidamento del cavo è un aspetto imprescindibile della costruzione delle gallerie con scavo realizzato in tradizionale o con il martello idraulico e richiede lavorazioni che hanno un impatto marcato sui tempi dell'avanzamento. Entrambe i metodi implicano infatti che si provveda al consolidamento del cavo prima di giungere alla creazione del rivestimento definitivo. Da questo punto di vista, le differenze sostanziali sono infatti di natura logistica ed economica. Come peraltro già sottolineato, l'utilizzo del martello presenta un doppio vantaggio rispetto all'esplosivo. Con adeguate condizioni dimensionali, quali quelle relative a fronti con una superficie di circa 140 metri quadrati tipica delle gallerie delle viabilità autostradali, l'impiego del martello permette infatti che scavo e smarino avvengano contemporaneamente. Inoltre il martello non necessita delle operazioni di disaggio, come invece è sempre necessario con l'esplosivo, in quanto è in grado di profilare la sezione con precisione già durante lo scavo. Per ciò che riguarda invece il consolidamento, le differenze sono pressoché inesistenti per le fasi di realizzazione del rivestimento di prima fase, e minime per quanto concerne la tempistica. Per tutti e due i metodi di scavo, le operazioni di consolidamento incidono infatti in modo sostanziale sulla tempistica dell'avanzamento (inteso come scavo, rivestimento di prima fase, impermeabilizzazione, scavo e getto dell'arco rovescio, getto del rivestimento di seconda fase o definitivo). In ogni caso il consolidamento è un aspetto imprescindibile per la costruzione delle gallerie naturali realizzate con l'esplosivo o con il martello, in quanto ha funzione di opporsi alle possibili deformazioni del cavo, e deve essere quindi posto in opera immediatamente dopo lo scavo e il più vicino possibile al fronte. Lo scavo risulta dunque solo uno degli aspetti dell'avanzamento e ciò spesso genera confusione quando si comparano i due metodi di lavoro. Il fatto che l'esplosivo permetta di far progredire lo scavo in una sola volata anche di quattro o cinque metri non significa che la costruzione della galleria, nella sua interezza, stia avanzando. Ecco perché paragonare la maggiore rapidità di scavo dell'esplosivo a quella del martello è improprio: quando si usa l'esplosivo, infatti, i tempi di preparazione della volata e quelli di smarino sono decisamente lunghi, e quindi determinano un avanzamento della costruzione dell'opera uguale e, a volte, più lento rispetto a quando si utilizza il martello, specie se la superficie del fronte permette che scavo e smarino avvengano contemporaneamente. Nell'ordine le operazioni necessarie all'avanzamento sono:

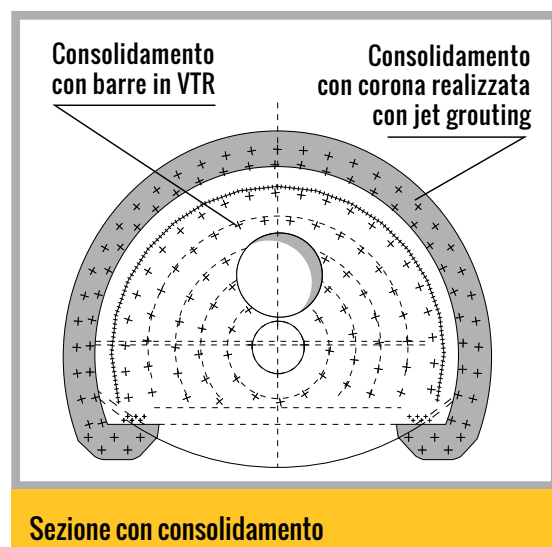


- 1) Preconsolidamento del nucleo (quando necessario)
- 2) Scavo
- 3) Posa delle centine e/o bullonatura e chiodatura
- 4) Applicazione del calcestruzzo proiettato e fibro-rinforzato (spritz beton)
- 5) Scavo dell'arco rovescio
- 6) Getto dell'arco rovescio e delle murette
- 7) Posa rivestimento in PVC
- 8) Getto del rivestimento finale

Fra la fase 2 e la fase 3, in certi casi viene anche posata una rete a maglia larga di rinforzo dello spritz beton che, in questo caso non viene però fibro-rinforzato.

Il pre-consolidamento del nucleo-fronte

L'utilizzo del martello per lo scavo a tutta sezione spesso implica che se l'ammasso è particolarmente instabile si possano innescare fenomeni di estrusione del fronte-nucleo, come ad esempio avviene quando si attraversano tratti argillosi, sciolti e incoerenti. La tecnica è ben definita dal metodo ADECO RS (Analisi delle Deformazioni Controllate nelle Rocce e nei Suoli messo a punto da Lunardi) che ha permesso di lavorare a tutta sezione anche in terreni particolarmente inconsistenti, senza necessità di fare ricorso allo scavo parzializzato, così come previsto dal metodo NATM, che in questi casi era prima l'unico possibile per affrontare condizioni particolarmente difficili. ADECO RS è stato messo a punto in Italia, per attraversare appunto formazioni particolarmente instabili, come il cosiddetto "caotico" dell'Appennino tosco-emiliano, dove, negli anni Novanta sono state realizzate la nuova linea Alta Velocità



e, successivamente, anche la variante di valico dell'autostrada A1 tra Bologna e Firenze. L'estrema variabilità e inaffidabilità degli amassi, specie lungo la tratta ferroviaria dell'Alta Velocità dove sono stati realizzati nel complesso oltre 100 chilometri di gallerie fra principali (oltre 73 chilometri), secondarie e di servizio, non aveva infatti permesso di adottare lo scavo a tutta sezione seguendo il metodo NATM e solo in un paio di casi le tecnologie di scavo totalmente meccanizzato (TBM scudata). Il metodo è stato utilizzato anche in altri paesi, come la Francia, dove si è dimostrato particolarmente risolutivo per la galleria Tartaguille sulla linea Marsiglia-Lione. In sostanza questa tecnica di consolidamento consente di operare a

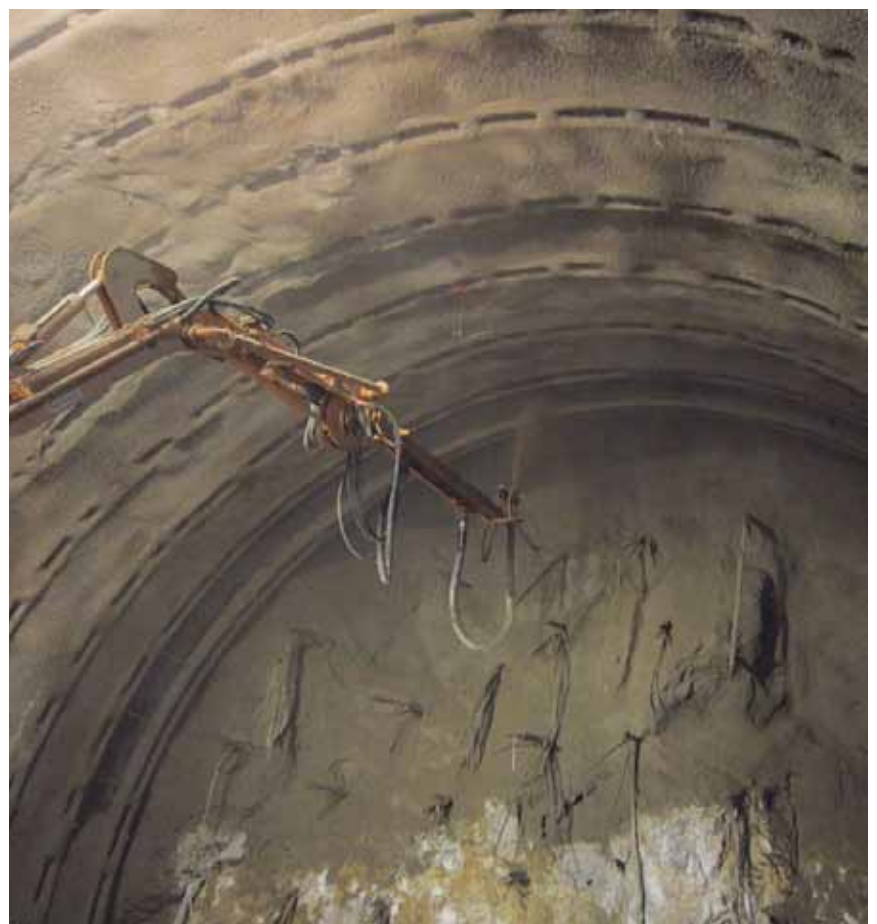
tutta sezione perchè crea una sorta di “chiodatura temporanea” del fronte-nucleo che ne assicura la stabilità e, durante le operazioni di scavo, ne contrasta anche le spinte, evitando così che si innestino pericolosi fenomeni di estrusione. La lunghezza degli elementi strutturali in VTR e il loro numero variano a seconda della geologia dell'ammasso, ma questi elementi possono raggiungere i 18 metri, e sui fronti di scavo più grandi, superare le 100 unità. Le barre, che solitamente hanno un diametro di 60 millimetri, sono cave all'interno e possono essere iniettate con speciali malte. Una volta installati gli elementi strutturali in VTR si procede allo scavo fino a che, dopo avere eseguito vari cicli di rivestimento di prima fase (a seconda dei casi tra 0,50 e 1,50 metri), si arriva a circa un 1/3 della loro lunghezza. Le barre in VTR sono infatti facilmente distrutte dall'azione di scavo e non creano alcun problema al martello. Lo scavo viene quindi sospeso e vengono installate nuove barre in VTR, in modo che il fronte sia sempre consolidato ed in sicurezza. Nei casi di forte instabilità viene inoltre costruita una corona esterna permanente con infilaggi realizzati con jet grouting, a creare un arco di presostegno e di consolidamento anche al contorno, così da alleviare ulteriormente il fronte-nucleo da spinte che possano contribuire alla sua estrusione.

Da un punto di vista della tempistica, le operazioni di preconsolidamento del fronte-nucleo sono direttamente legate al numero di barre in VTR che devono essere posizionate, dalla loro lunghezza e dalla procedura per iniettarle, se questo si rende necessario. Solitamente le operazioni richiedono un tempo medio che varia da due e tre giorni, ma può giungere a cinque giorni di lavoro, se si deve provvedere anche alla realizzazione della corona di jet grouting. Immaginando un avanzamento (scavo, smarino, posa delle centine e spritz) di un metro al giorno e volendo formulare un esempio da un punto di vista della tempistica, si potrebbe dire che, a fronte di una lunghezza delle barre di 18 metri, prima di procedere ulteriormente allo scavo (considerato che due terzi della lunghezza devono essere sempre “in presa”) il preconsolidamento del fronte deve essere eseguito ogni sei giorni.

Il rivestimento prima fase

Il rivestimento di prima fase è essenziale per il conseguimento di un consolidamento a breve/medio termine del cavo, ed è ottenuto mediante la posa di centine e l'applicazione di calcestruzzo proiettato (spritz beton) che può essere anche armato con rete elettrosaldata, oppure rinforzato con fibre in acciaio, o in materiale polimerico.

Una volta completate le operazioni di smarino e prima di porre in opera le centine, si procede con la stabilizzazione del fronte mediante l'applicazione di uno strato di spritz beton fibro-rinforzato. Quindi, nel caso la rete di armatura non sia necessaria, eseguita la messa in sicurezza del fronte, si provvede all'assemblaggio a terra della centina, che viene poi eretta in posizione, centrata ed assicurata a quella precedente,



mediante delle catene (connettori rigidi), che sono agganciate in apposite asole predisposte sulle centine. La frequenza delle centine, che solitamente può variare da 1,50 metri a 50 cm, è determinata dal progetto in funzione delle caratteristiche di stabilità dell'ammasso. L'operazione di assemblaggio e posa della centina, unitamente a quella dell'applicazione di uno strato (da 5 a 10 centimetri di spritz beton fibro-rinforzato) è valutabile in un tempo medio che, per una galleria con un fronte di 120/130 metri quadrati, si aggira su 4/5 ore.

Bullonatura e chiodatura

A seconda del tipo di ammasso, il rivestimento di prima fase può implicare anche la chiodatura o bullonatura. La differenza principale fra le due tecniche risiede nel fatto che mentre il chiodo sollecita il materiale per forzarne il movimento così da ottenerne un adeguato bloccaggio, il secondo, agendo in modo simile ad un tirante permanente, mira a attraverso il contrasto ad evitare che questo nel tempo possa essere soggetto a movimenti. A seconda dei casi, entrambi i sistemi possono essere integrati con la posa di rete metallica e di spritz beton. Molto variabile è il tempo necessario per la realizzazione di questa fase del consolidamento. Se infatti il sistema di bullonatura/chiodatura interessa solo la calotta i tempi possono essere contenuti entro le quattro ore. Se invece l'intervento richiede un posizionamento "a corona" con spaziature ridotte si devono prendere in considerazione tempi più lunghi che possono arrivare fino alle 24 ore.

Lo scavo ed il getto dell'arco rovescio

L'arco rovescio è un elemento strutturale imprescindibile per contenere e controllare i fenomeni deformativi nelle gallerie. Strutturalmente (in termini di geometrie atte a creare un contrasto alle azioni dell'ammasso roccioso attraversato) l'arco rovescio si collega ai piedritti, sia nelle sezioni circolari che in quelle policentriche.

La realizzazione dell'arco rovescio è dunque parte integrante dello scavo della galleria. Peraltro, a meno che ci si trovi in presenza di materiale particolarmente fratturato e sciolto, l'arco rovescio è realizzato con il martello anche quando lo scavo del cavo è realizzato con l'esplosivo. In via teorica l'arco rovescio, che non necessita di rivestimento di prima fase ma solo di quello definitivo, potrebbe essere realizzato successivamente ad ogni campo scavato sul fronte (pari al diametro della galleria), ma i vincoli di produzione e le considerazioni di natura logistica fanno sì che, laddove le condizioni dell'ammasso lo permettano, ci si mantenga su un rapporto di quattro campi rispetto al fronte di scavo; in presenza di ammassi particolarmente instabili tale proporzione si riduce tuttavia a due. L'esecuzione dell'arco rovescio comporta una serie di fasi (scavo, casseratura, armatura, maturazione, scasseratura), che incidono fortemente



sulla logistica del cantiere, in quanto la sua realizzazione e lo scavo non possono avvenire contemporaneamente. Ipotizzando un campo di 10 metri in presenza di materiale caratterizzato da resistenze intorno ai 45 MPa si avranno così sei/sette ore per lo scavo, un giorno (24 ore di lavoro) fra posa dell'armatura preassemblata e getto, e circa 8 ore per consentire la maturazione del getto e la scasseratura.

LA SCELTA DEL MARTELLLO DEMOLITORE PER LO SCAVO IN GALLERIA

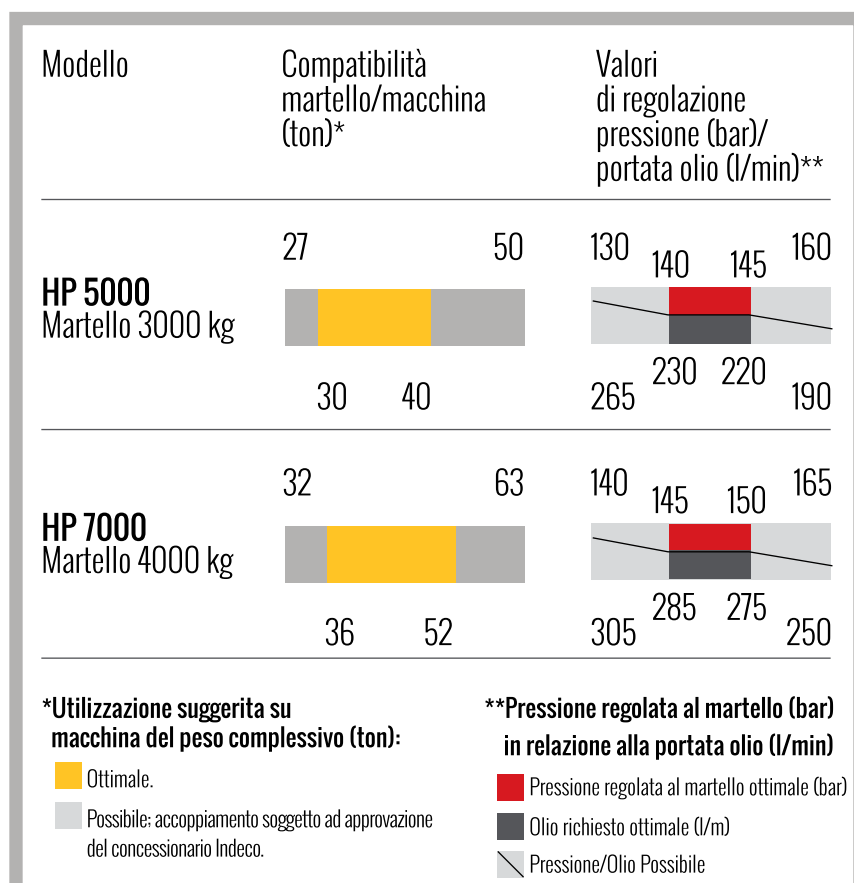
Come già sottolineato, la scelta del martello dipende principalmente dalla sezione della stessa che detta le dimensioni dell'escavatore. Generalmente si sceglie il martello più grande possibile che realizzi il miglior accoppiamento martello-escavatore. Tendenzialmente adoperare un escavatore con allestimento galleria (con avambraccio corto e carro maggiorato), consente l'installazione di un martello di maggior peso e quindi capace di una maggiore produttività; incrementando le dimensioni del martello e riducendo le dimensioni dell'escavatore (sempre che siano verificati i criteri di accoppiamento quali la stabilità della macchina e la potenza idraulica generata) si ottiene un accoppiamento martello-escavatore più efficiente riducendo i costi dell'escavatore in funzione della quantità di materiale scavato. Generalmente i martelli vengono classificati in base al peso operativo e al diametro dell'utensile, entrambi parametri che danno l'idea della dimensione e della potenza (parametro legato alla produttività, ma non sempre maggiore potenza significa maggiore produttività) del demolitore.

I martelli maggiormente utilizzati per lo scavo in galleria hanno un peso compreso tra i 3000 kg e i 4000 kg (73-84 Kw) con diametri dell'utensile da 160 mm a 180 mm e rispettivamente gli escavatori più adatti a questa tipologia di lavoro hanno un peso operativo che va da 30 tonnellate a 50 tonnellate (potenze da 180 Kw a 280 Kw).

In base all'esperienza maturata sul campo il produttore di martelli fornisce informazioni circa l'accoppiamento possibile ed ottimale tra martello ed escavatore come riportato in figura (fig. Compatibilità macchina/martello e parametri di regolazione); l'accoppiamento ottimale per un martello da 3000 kg si ottiene installando lo stesso su escavatori da 30-40 tonnellate, l'accoppiamento possibile invece si ottiene con escavatori da 27 tonnellate fino a 50 tonnellate. Supponendo di voler utilizzare un martello da 3000 chili per uno scavo in galleria, l'utilizzo di un escavatore da 50 tonnellate (che realizza un accoppiamento possibile) anziché uno da 35 tonnellate (che realizza un accoppiamento ideale) presuppone:

- 1) un maggior costo d'investimento per l'escavatore
- 2) un maggior costo di manutenzione escavatore
- 3) un maggior costo di utilizzo
- 4) la difficoltà di movimentazione a causa dell'ingombro
- 5) una produttività di scavo pressoché invariata in quanto dettata dalle performance del martello installato

Con i suoi numerosi modelli, suddivisi nelle classi grandi, medi e piccoli e disponibili in diverse versioni, Indeco vanta la gamma di demolitori più estesa in assoluto. Questo consente agli utilizzatori un'ampia possibilità di scelta per ottenere l'accoppiamento martello/macchina ideale.



Compatibilità macchina/martello e parametri di regolazione

L'ALLESTIMENTO DEL MARTELLO PER APPLICAZIONI IN GALLERIA

Come già anticipato l'esecuzione di uno scavo in galleria è uno tra i lavori più duri che un martello demolitore può fare. I tempi di battuta del martello sono lunghi e gravosi e possono arrivare anche fino all'80% del tempo escavatore. È necessario adottare delle particolari precauzioni nell'allestimento del martello in galleria per assicurare la massima affidabilità di esercizio e la sicurezza del fronte di scavo in termini di concentrazione di polveri nell'aria e di visibilità. Di seguito elencheremo alcune caratteristiche tecniche che un martello operante in galleria dovrebbe avere:



1) Piastra di attacco speciale tra martello ed escavatore per ottenere la massima angolazione nel lavoro detto Sottotesta



2) Kit di abbattimento polveri e sistema di nebulizzazione di acqua ad elevata pressione (150 bar) per ridurre la quantità di polveri nella zona operativa del martello e assicurare la piena sicurezza e visibilità delle operazioni di scavo



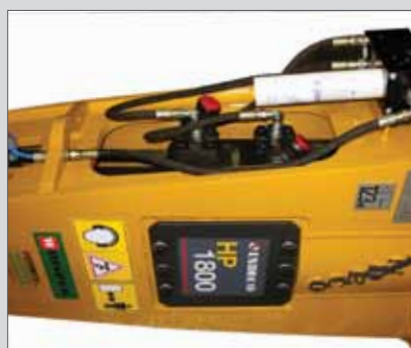
3) Kit parapolvere al martello demolitore, riduce notevolmente l'ingresso e la presenza di polveri nella zona boccole e di conseguenza nella zona d'impatto fra il pistone massa e l'utensile



4) Kit pressurizzazione interna del martello tramite aria compressa per neutralizzare l'ingresso della polvere all'interno del demolitore evitando la precoce usura delle componenti di scorrimento ed il danneggiamento dell'impianto di percussione del martello stesso



5) Sistema per l'eliminazione dei colpi a vuoto. Nei demolitori dotati di tale apparato il ciclo di percussione del pistone sull'utensile non sarà attivato se l'utensile non poggerà e presserà stabilmente sulla superficie del materiale da demolire. Questo sistema riduce l'usura ed incrementa l'affidabilità del demolitore



6) Kit di lubrificazione centralizzata automatica, assicura in qualunque condizione di lavoro la perfetta lubrificazione delle boccole di scorrimento e dell'utensile riducendo considerevolmente l'usura delle boccole e preservando l'utensile da indesiderate rotture.

In particolare il sistema di ingrassaggio centralizzato permette di mantenere lubrificate le parti di scorrimento anche quando il martello opera in posizione orizzontale



7) Kit compressore aria/acqua da installare sulla cabina dell'escavatore per la produzione dell'aria compressa necessaria alla pressurizzazione (7-10 bar) e dell'acqua in pressione (150 bar) necessaria all'impianto di nebulizzazione del martello per abbattere le polveri prodotte durante la demolizione



8) Carcassa del martello silenziata dotata di rivestimenti interni in materiale fonoassorbente, vernice antirombo e boccole fonoassorbenti nella zona dell'utensile al fine di ridurre considerevolmente il livello di emissione sonora

Fonti

1. Dowding C. H., Blast vibration monitoring and control, Prentice - Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ. 07632, 1985.
2. Oy Forcit Ab, Explosives, Hanko 1987.
3. Gustafsson R., Blasting technique, Dynamit Nobel Wien, 1981.
4. ICI, Blasting Practice, Second edition, Birmingham 1956.
5. Langefors U., Kihlström B., The modern technique of rock blasting. Almqvist & Wiksells, Uppsala 1967.
6. L'ADECO-RS quale garanzia di rispetto di tempi e costi nella realizzazione di opere in sotterraneo Pietro Lunardi Rocksoil Spa. Olofsson S. O., Applied explosives technology for construction and mining, Ärla 1988.
7. Persson P.-A., Holmberg R., Lee J., Rock blasting and explosives engineering, CRC Press Inc., 1994.
8. Saari K., Large rock caverns, Proceedings of the international symposium Helsinki 25-28 august 1986, volume 2, Pergamon Press 1986.
9. Tamrock Oy Handbook of underground drilling, Second edition, Tampere 1986.
10. R. Berardi, Università di Genova, Meccanica delle rocce
11. Tamrock Oy, Surface drilling and blasting, 1995.
12. U.S. Department of Transportation, Rock Blasting and Overbreak Control, NHI Course No. 13211, 1991.
13. Vihtavuori Oy, Blasting explosives - we take you through, Blasting explosives unit, FIN-41330 Vihtavuori, 1994.
14. Vuolio R., Blast vibration: Threshold values and vibration control, The Finnish Academy of Technology, 1990.
15. Vuolio R., Räjätystyöt 1991, Forssa 1991.
16. University of Trondheim, Tunnel drift, Ventilasjon, Prosjektrapport 17-91, Trondheim 1991.
17. RIL 154-2. Tunneli- ja kalliorakennus, Espoo 1987.
18. Tamrock Oy, Underground drilling and loading handbook, Tampere 1997.
19. Kivialan ammattioppi 2, Kivilohkareiden louhintä, Opetushallitus, Helsinki 1989.
20. TKK IGE-B19, Rakennuskivet ja niiden hyödyntäminen, Espoo 1995.
21. INDECO Ind. SpA USER MANUAL, 2009
22. INDECO Ind. SpA Inform and Technical Specification, 2008





- SGC E 78 - La Galleria Greppoli
- AUTOSTRADA A3 - La Galleria Serra Rotonda

Casi storici

- Alta Velocità Bologna - Firenze
- La nuova metropolitana di Losanna
- Variante di Valico

ALCUNI CASI DI SCAVO DI GALLERIE CON IL MARTELLO DEMOLITORE

In questo capitolo sono presentati alcuni fra i molti casi in cui i martelli Indeco sono stati utilizzati per scavare gallerie: oltre a due lavori recenti, sono stati inclusi alcuni esempi storici. I lavori descritti di seguito sono stati scelti a supporto dei concetti precedentemente esposti nel testo (impossibilità di usare la TBM, complementarietà del martello con l'esplosivo, profili geomeccanici costituiti da ammassi rocciosi inaffidabili, ecc.).

Questa rimane comunque la parte di questo manuale “aperta”, quella cioè che sarà più soggetta ad aggiornamenti e sarà quindi arricchita tutte le volte che un martello Indeco sarà impegnato nel mondo nello scavo di una galleria.

SGC E 78 - LA GALLERIA GREPPOLI



Il martello HP 7000 e un HP 5000 sono stati impiegati per lo scavo di una galleria di piccole dimensioni dove l'esplosivo non avrebbe potuto essere impiegato in quanto l'opera si trovava adiacente a una viabilità in esercizio.

Nel marzo 2014 si sono conclusi i lavori di scavo della galleria "Greppoli" che si trova tra Grosseto e Siena, nel tratto che interessa il Comune di Civitella Paganico sulla SGC E 78, detta anche "autostrada dei due mari", in quanto collegherà la costa tirrenica con quella adriatica. L'arteria è un'autostrada di categoria A che una volta completata, in parte potenziando un tracciato esistente e in parte realizzandone un nuovo, conetterà, con orientamento sud-ovest/nord-est, Grosseto a Fano. La galleria "Greppoli", lunga 100 metri, è una delle tante opere previste nel macrolotto Civitella Paganico (GR)-Monticiano (SI). Considerato il profilo geomeccanico, la contenuta lunghezza dell'opera e il fatto che in quel particolare tratto la viabilità esistente oggetto di potenziamento correva pressoché parallela alla nuova galleria, si è scartato l'impiego dell'esplosivo, optando per lo scavo con il martello idraulico. L'opera è infatti stata realizzata con martelli Indeco HP 7000 e (in alcuni brevi tratti anche con un HP 5000) utilizzati dall'impresa Strabag, che ha operato nell'ambito del consorzio Nuova F.A.R.M.A. Scarl, cui sono affidati i lavori del nuovo macrolotto. Fra questi è inclusa anche un'altra galleria (Casal di Pari) di maggiori dimensioni, sempre scavata con martelli

Indeco, e ancora in fase di realizzazione al momento della pubblicazione di questa guida.

Il profilo geomeccanico

Dai dati ottenuti dalle varie campagne geognostiche risultava che l'ammasso attraversato dalla galleria era caratterizzato in massima parte da calcare cavernoso con caratteristiche meccaniche medio-scadenti riconducibili alle classi RMR III-IV, con fronte stabile a breve termine e cavo stabile. Durante le fasi di scavo si è tuttavia evidenziato un andamento eterogeneo della roccia dall'imbocco sud, da cui è stato aperto il fronte di scavo; questo si è infatti



presentato con calcare e calcare dolomitico microcristallino compatto, omogeneo, resistente all'azione di scavo. La resistenza a compressione, valutata mediante prove con sclerometro (martello di Schmidt tipo L), è in quel tratto risultata variabile tra $JCS=39\div44$ MPa.

Avanzando con lo scavo dall'imbocco, posto a sud, verso nord l'ammasso ha subito però un progressivo deterioramento dello stato di qualità ed ha prevalentemente mostrato la presenza di porzioni più alterate della formazione, costituite da roccia calcarea a struttura brecciata con clasti dolomitici a granulometria variabile generalmente grossolana a cemento calcareo, da alterata a molto alterata, poco fratturata, mediamente resistente all'azione di scavo. La resistenza a compressione di questo tratto, valutata mediante prove con sclerometro (martello di Schmidt tipo L), è invece risultata variabile tra $JCS=28\div33$ MPa. La discontinuità e la marcata fratturazione dell'ammasso hanno indotto i progettisti a prevedere il consolidamento del fronte stabile a breve termine con tubi in vetroresina iniettati ed infilaggi suborizzontali (sistema Adeco RS). L'opera di consolidamento del fronte ha avuto un rilievo sulla tempistica dei lavori, ma si è reso necessario per garantire la sua stabilità a medio termine, che risultava appunto compromessa dalle caratteristiche dell'ammasso.

Lo scavo

Come già sottolineato, la galleria misurava poco più di 100 metri e, a seconda della sezione, aveva un fronte di scavo con una superficie che variava da 136 a 143 metri quadrati (carreggiata a due



corsie più emergenza). Inizialmente, a causa della durezza e compattezza della roccia caratterizzata da calcare e calcare dolomitico microcristallino compatto, lo scavo ha portato a produzioni relativamente basse e a un'usura delle punte superiore alla media. Con l'adozione però di punte tipo "cobra" a doppio scalpello e, successivamente, al raggiungimento del materiale più fatturato, la produzione si è stabilizzata su una media di scavo di circa 14 metri cubi ora, corrispondente a una media di avanzamento di due metri lineari giorno, considerati anche i tempi necessari per il prespritz e per il rivestimento di prima fase (spritz, assemblaggio e posa della centina). Sempre con il martello è stato inoltre realizzato l'arco rovescio; i lavori, incominciati agli inizi di novembre 2013, si sono conclusi nei primi giorni di marzo 2014.



AUTOSTRADA A3 - LA GALLERIA SERRA ROTONDA



Esplosivo e martello si alternano e collaborano per scavare attraverso ammassi difficili. Due HP 7000 hanno contribuito in modo significativo allo scavo della Galleria Serra Rotonda sulla autostrada Salerno-Reggio Calabria.

L'Autostrada A3

L'autostrada A3 Salerno-Reggio Calabria, che è gestita dall'ANAS senza pedaggio, si estende per 442,9 chilometri.

L'infrastruttura è stata costruita tra il 1966 e il 1974, in un territorio fra i più difficili al mondo per il passaggio di un'arteria di quel genere, in quanto a orografia, geologia e, in certi tratti, anche a livelli di sismicità.

Dal 2001 l'A3 è oggetto di un vero e proprio rifacimento secondo un progetto che ha previsto in parte l'inglobamento e potenziamento del vecchio tracciato e in parte la definizione di uno nuovo e parallelo. Ad oggi sono stati completati con successo 339 chilometri, mentre i rimanenti 68,5 chilometri sono in via di costruzione.

La Galleria Serra Rotonda

La galleria a due canne Serra Rotonda fa parte del macro lotto 3 parte 1 del nuovo tracciato dell'A3 realizzato dall'impresa GLF Spa. L'opera si trova nella regione Basilicata in corrispondenza del comune di Lauria. La canna nord ha una lunghezza di 3.725,50 metri, a cui si aggiungono un tratto di 135,86 metri in artificiale al portale nord ed un tratto in artificiale al portale sud

di 7,10 metri. La canna sud ha invece una lunghezza complessiva di 3.740,00 metri a cui si aggiunge un tratto di 128,65 metri in artificiale al portale nord, ed uno di 7,10 metri al portale sud.

Il profilo geomeccanico

Nei primi 600 metri circa dopo il portale nord, la galleria naturale, attraversa i cosiddetti depositi di "Lagonegro". Questi si compongono di alternanze di marne silicee, argilliti e calcilutiti di scarse caratteristiche geotecniche e danno origine in superficie ad uno scoscendimento o frana di precaria stabilità. In questo tratto è stato quindi necessario disporre di sezioni di scavo adeguate per contrastare le spinte delle terre.

Il restante tratto si sviluppa interamente all'interno delle formazioni dell'unità carbonatica di Monte Pollino, consistenti in calcari e calcareniti gradate e in calcari dolomitici, con coperture massime di circa 430 metri.

Nella zona centrale si è invece verificato il previsto passaggio in calcari dolomitici e dolomie intensamente fratturate, in cui si è manifestata anche la presenza di formazioni carsiche.



Il lato sud, da cui peraltro sono cominciati i lavori, è interessato da calcari e calcareniti e da alcune faglie ed è in condizioni di parietalità. Dalle indagini effettuate preventivamente lungo il tracciato, si è appurato che il livello della falda sarebbe sempre stato inferiore alla quota di progetto della galleria. Il variare del profilo geologico ha imposto che fossero utilizzate sette diverse sezioni tipo, studiate in funzione dello stato tensionale dell'ammasso.

Lo scavo

Per lo scavo si è optato per l'esplosivo ed il martello, sia per le caratteristiche e la disomogeneità del profilo geologico, sia perché in direzione sud entrambe le canne sarebbero sboccate direttamente su un viadotto in fase di costruzione; una condizione già di per sé sufficiente per rendere comunque impossibile l'impiego della TBM.

Lo scavo è del resto iniziato proprio dall'imbocco sud (lato Reggio Calabria) ed è stato realizzato col martello in canna nord per una lunghezza di 2.424 metri; mentre in canna sud per una lunghezza di 2.357 metri. L'ammasso non ha dunque sempre mostrato livelli di fratturazione e durezza che hanno permesso lo scavo con martello.

In particolare, la produzione (con valore medio pari a 4 metri al giorno, con picchi di 6-7 metri al giorno) è progressivamente calata fino ad arrivare a livelli inferiori al metro al giorno, allorché l'avanzamento ha raggiunto la zona caratterizzata dalla presenza di calcari e calcareniti gradate e di calcari dolomitici, poco fratturati e con pronunciati fenomeni carsici con valori intorno ai 70 MPa. A quel punto si è deciso di



sospendere l'impiego del martello, optando per lo scavo con esplosivo. Per un breve tratto la produzione in canna sud è continuata secondo una tecnica che si potrebbe definire "ibrida", in quanto l'esplosivo non riusciva ad essere completamente risolutivo, per via delle caratteristiche di fratturazione dell'ammasso.

Il martello per meno di cinquanta metri è infatti stato utilizzato per completare le operazioni di vero e proprio scavo e profilatura e non solo di semplice disgaggio, mentre ha invece continuato ad essere impiegato per lo scavo dei bypass carrabili che consentiranno di transitare dalla canna nord alla canna sud e viceversa.

Alla progressiva 2795,00S è stata aperta una finestra da cui l'impresa Castellano SpA (subappaltatore incaricato dello scavo) ha effettuato gli avanzamenti sia in direzione SA che RC, per entrambe le canne, al fine di velocizzare gli avanzamenti. I martelli Indeco HP 7000 sono stati utilizzati dall'impresa Castellano dalla finestra in canna nord per 1.156 metri, mentre nel restante tratto di

circa 806 metri si è proceduto con esplosivo; dalla finestra in canna sud si è invece utilizzato il martello per 1.064 metri, mentre il restante tratto di 753 metri è stato scavato con l'esplosivo, fino a quando l'ammasso (appunto caratterizzato da alternanze di marne silicee, argilliti e calcilutiti di scarse caratteristiche geotecniche) ha richiesto il consolidamento del fronte con infilaggi ed elementi strutturali in VTR suborizzontali con il sistema ADECO RS.

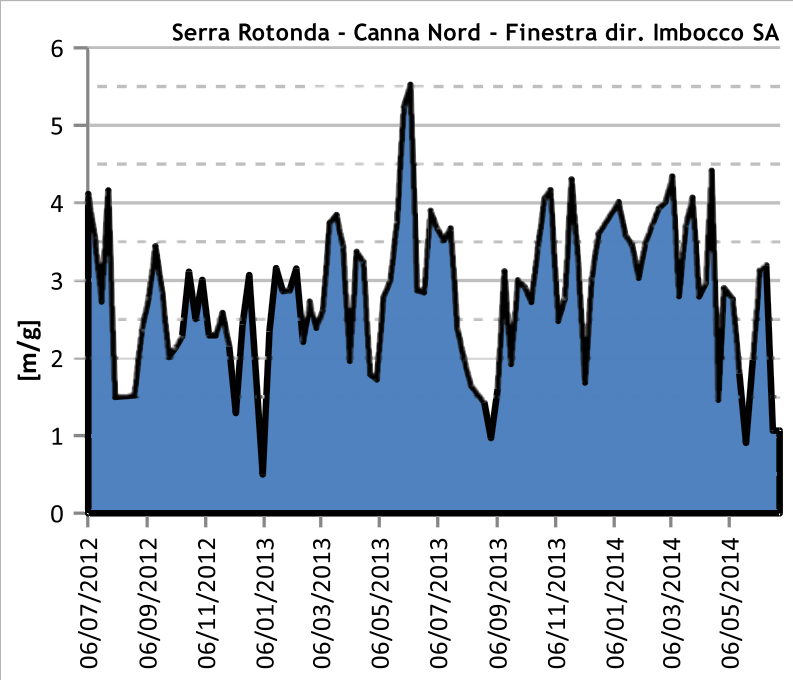
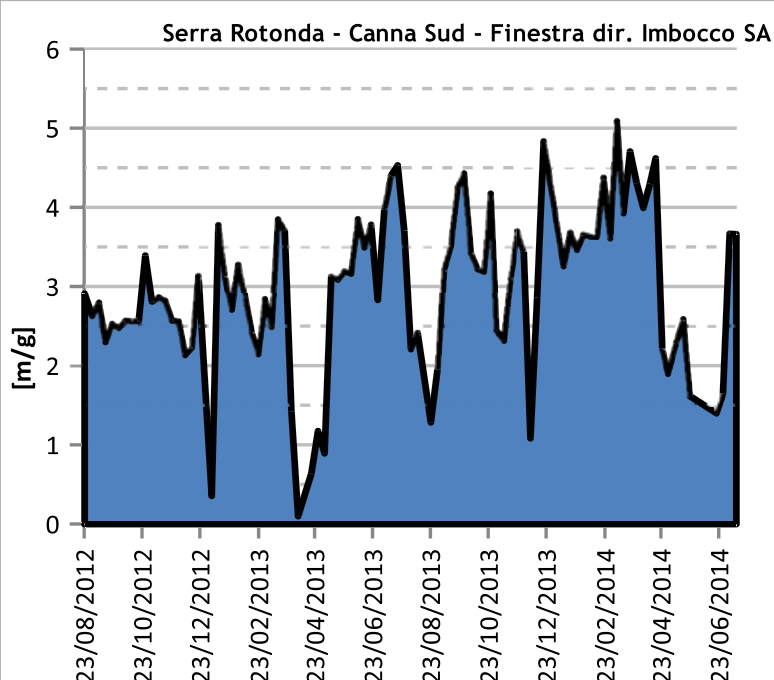
In questa zona si era peraltro riscontrata, già in fase di rilevamento geognostico, la presenza di gas metano che avrebbe potuto presentarsi in quantità tale, da rientrare nel rapporto stechiometrico pericoloso per le operazioni di scavo (quello cioè compreso fra il 5 e il 16%).

La direzione lavori ha dunque richiesto l'impiego di speciali escavatori dotati di protezioni antideflagranti, che sono stati forniti dall'impresa Technoscavi.

Il subappaltatore ha utilizzato anche in questo caso martelli Indeco HP 7000 per un tratto di 344 metri in canna nord e per 401 metri in canna sud. Anche a fronte

di materiale minimamente coesivo e molto fratturato, con valori in alcuni casi inferiori agli 8 Mpa, il martello si è dunque dimostrato un ottimo metodo di scavo, indipendentemente dalla presenza di gas, che ovviamente lo ha reso imprescindibile. L'esplosivo a fronte di materiale disomogeneo, molto fratturato e poco coeso avrebbe infatti offerto produzioni troppo basse, con tempi di preparazione, volata e smarino che sarebbero rimasti pressoché identici a quelli tipici di amassi più compatti e consistenti.

Come si deduce dai grafici riferiti alla produzione mensile, dove più intenso è stato l'impiego del martello, si sono ottenuti interessanti risultati. Questo è stato possibile grazie a condizioni ideali create da un ammasso molto fratturato con RMR pari a 36 corretto (CLASSE IV Benjawski), caratterizzato da valori GSI compresi tra 33 e 3 e una resistenza a compressione uniassiale compresa tra 15-40 MPa.





CASI STORICI

ALTA VELOCITÀ BOLOGNA-FIRENZE



La linea ad Alta Velocità Bologna-Firenze, che fa parte della tratta AV Milano-Napoli, è lunga 78,50 chilometri e si articola su 73,31 chilometri in sotterraneo (divisi in nove differenti gallerie) con un diametro di 11,50 metri. La velocità di progetto è di 300 km/h, con un raggio minimo di 5.500 metri e una pendenza massima del 15 per mille. I primi cantieri per la costruzione furono aperti nel 1996 e la linea, entrata in esercizio nel 2009, è oggi una delle più trafficate della rete italiana ed europea. L'opera è stata frutto di un intenso lavoro: in otto anni, tra il 1996 e il 2004, sono infatti stati scavati oltre 100 km di tunnel. Oltre alle succitate nove gallerie di linea con un diametro di scavo compreso fra i 13 e 14 metri e da 140 metri quadrati di sezione si devono infatti considerare varie gallerie d'accesso e di servizio, utilizzabili come vie di soccorso, fuga e manutenzione della linea. A queste si deve inoltre aggiungere una lunga galleria di servizio di 10 km (in larga parte parallela al tratto finale del tunnel di Vaglia). La costruzione delle gallerie principali e di quelle secondarie ha richiesto in totale la rimozione di oltre 12 milioni di metri cubi di materiale. Come il nuovo tracciato dell'Autostrada A1 (la cosiddetta Variante di Valico) che si snoda lungo un tracciato che pure attraversa l'appennino tosco-emiliano e l'A3 Salerno-Reggio Calabria, anche quest'opera è stata realizzata in un contesto geologico tra i più

difficili e complessi al mondo e ha richiesto un notevole sforzo logistico e organizzativo. Per costruirla sono infatti state approntate trentuno aree di cantiere, sono stati costruiti dieci campi base per ospitare il personale, si è operato in 21 cantieri industriali al servizio della produzione e sono state impegnate quotidianamente (sette giorni su sette per ventiquattro ore al giorno), oltre 3.500 persone. Come sottolineato, l'opera attraversa un territorio caratterizzato da una geologia complessa, che presenta una notevole variabilità e inconsistenza delle formazioni. La tratta Bologna-Firenze è stata realizzata con la collaborazione di alcune tra le più importanti imprese italiane gestite da un unico appaltatore generale (general contractor), denominato consorzio Cavet. Il notevole sviluppo in galleria della tratta (appunto oltre 73 chilometri) e le difficili condizioni geologiche, hanno reso necessario che per lo scavo si adottasse una pluralità di metodi, con prevalenza di esplosivo e martello demolitore, anche se in alcuni casi è stata utilizzata la fresa attacco puntuale e una speciale TBM progettata appositamente per una galleria di servizio di sezione minore (6,5 metri) lunga 9.259 metri in parte parallela alla galleria Vaglia. L'impiego del martello in molti lotti ha trovato il favore di progettisti e appaltatori perché, in genere, ha assicurato una migliore flessibilità, ha garantito migliori produzioni e condizioni logistiche rispetto

all'esplosivo, e in particolare perché ha concesso la possibilità di eseguire lo smarino contemporaneamente allo scavo. Indeco ha contribuito alla realizzazione di questa importante opera con martelli che hanno lavorato in diverse tratte del tracciato.

Le gallerie Monte Bibele e Raticosa

Le gallerie Monte Bibele Sud (9.243 metri) e Raticosa Nord (10.450 metri), su cui furono aperti più fronti scavo, sono tra le più lunghe della tratta Bologna-Firenze. Al consorzio Trevi-Adanti (la seconda oggi assorbita dall'austriaca Strabag), fu affidato un lotto che prevedeva lo scavo della Galleria Monte Bibele dall'imbocco sud per 2.772 metri e della Galleria Raticosa dall'imbocco nord per 1.552 metri. Nonostante non fossero distanti tra loro, le due gallerie naturali attraversavano formazioni geologiche diverse, che imponevano tecniche di scavo e di consolidamento che differivano l'una dall'altra. Dall'imbocco sud della galleria Monte Bibele, il martello fu utilizzato per lo scavo del fronte, mentre nell'imbocco nord della galleria Raticosa il martello fu impiegato nell'ambito delle lavorazioni per lo scavo dell'arco rovescio; lo scavo fu infatti realizzato con il ripper in quanto il tracciato intersecava argille scagliose intensamente fratturate e tettonizzate, di scarsa qualità geomeccanica. La galleria Monte Bibele Sud si sviluppa attraverso i flysch di Monghidoro in una fitta alternanza di argilliti, marne argillose, calcari e calcareniti fortemente tettonizzate, con evidenti piegature alla scala del fronte e intensamente fratturate. Inizialmente lo scavo era stato previsto con l'impiego

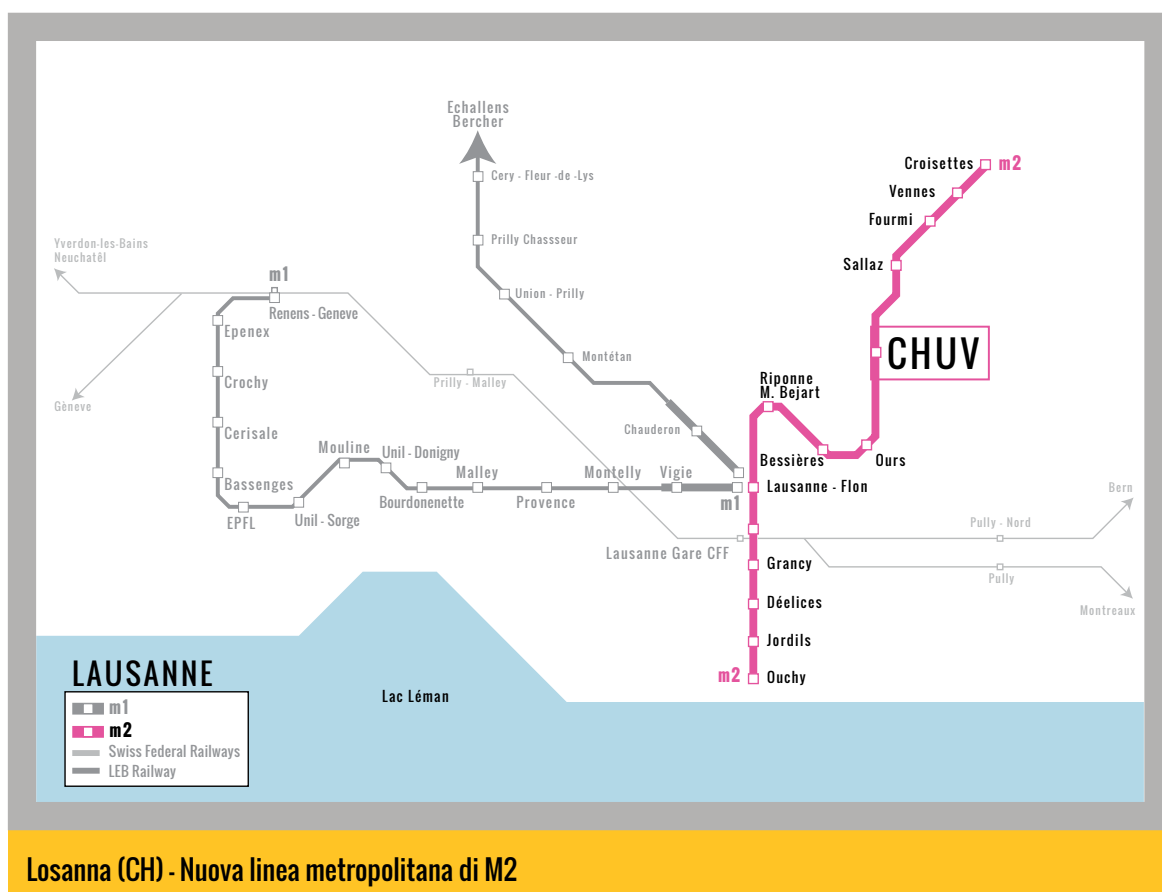
dell'esplosivo, ma il manifestarsi di una stratificazione con materiali interposti molto deboli e fratturati suggerì di abbandonare questa tecnica. La presenza di ammassi anche consistenti (con valori che variavano tra 8 e 40 MPa), alternati ad argille, trovò una risposta adeguata nell'utilizzo del martello demolitore, che garantì un'elevata produttività (da 2,5 metri/giorno nelle zone sane a 1 metro/giorno nelle zone argillitiche) e permise di eseguire con precisione il contorno del cavo. Nella galleria Monte Bibele venne utilizzato un martello Indeco HP 7000 montato su escavatore Fiat-Hitachi FH 450: una soluzione rivelatasi perfettamente adeguata alle necessità produttive del cantiere e che dette ottimi risultati anche per la realizzazione dell'appoggio del piede della centina. Il martello fu sottoposto ad un utilizzo a gravoso, in cui dette prova delle sue doti di affidabilità e robustezza costruttiva. In entrambe le gallerie naturali lo scavo a tutta sezione fu possibile grazie all'adozione del metodo ADECO RS che si dimostrò un'efficace scelta progettuale.



CASI STORICI

LA NUOVA METROPOLITANA DI LOSANNA

Il martello si dimostra risolutivo in un'area urbana dove l'esplosivo non avrebbe potuto essere impiegato



a eliminare circa seimila veicoli che quotidianamente impegnano la viabilità cittadina, a tutto vantaggio del traffico e dei livelli di inquinamento.

Caratteristica della linea è quella di collegare la parte alta e la parte bassa della città, superando un dislivello di ben 375 metri e salendo con una pendenza che si stabilizza su una media del 5,7%, con punte massime che raggiungono il 12%.

Perché i convogli riescano a superare questa pendenza a velocità adeguata alle esigenze di movimentazione dei passeggeri, sono stati impiegati speciali treni su gomma di due soli vagoni, che hanno altissima frequenza e sono completamente automatizzati, cioè privi di conduttore.

Un'opera impegnativa

La realizzazione della linea M2 ha posto delle difficoltà sul piano costruttivo; le maggiori problematiche sono riconducibili soprattutto al tipo di tracciato che, attraversando il cuore della città, si snoda attraverso le più importanti viabilità e lambisce edifici pubblici e privati. In alcune stazioni si è dovuti ricorrere anche allo scavo a sezione parziale, un procedimento graduale e lento effettuato in quattro fasi.

Entrata in esercizio nel 2008, la linea M2 di Losanna fa parte di un più vasto piano di potenziamento della rete metropolitana della città, mirato a trasformare, migliorandolo, il trasporto pubblico locale. Il tracciato di 6 chilometri si sviluppa in sotterraneo per 4,5 chilometri, dalla stazione di Ouchy sul lungo lago (quasi in corrispondenza del Museo Olimpico), fino alla stazione di Croisettes, situata in collina. In quel punto la linea si interconnette con i trasporti cantonali ed interregionali. L'importante infrastruttura ha portato



Proprio questa caratteristica ha reso particolarmente complessa la realizzazione dello scavo e ha comportato non pochi problemi d'ordine logistico e costruttivo, culminati nel febbraio 2005 con il cedimento della calotta in corrispondenza della scavo sotto la piazza Saint-Laurent, con il conseguente cedimento dello scavo con più di 500 metri di materiale che aprirono una voragine in superficie di quindici metri e il danneggiamento di un edificio. I progettisti hanno dunque dovuto considerare attentamente tutti gli aspetti relativi al consolidamento e alle sottomurazioni in prossimità degli edifici adiacenti al tracciato.

La geologia dell'area attraversata dalla linea M2 è caratterizzata da formazioni di molassa grigia, marne e arenarie.

La galleria di Chuv

Situata a circa metà del tracciato, la stazione di Chuv faceva parte di un lotto particolarmente problematico. La fermata lambisce infatti il più importante polo ospedaliero di Losanna e si trova in un tratto curvilineo caratterizzato da una pendenza significativa. La stazione è stata costruita su una trincea aperta di 94 metri, situata fra gli imbocchi di due tunnel. Quello sud, cioè in direzione del lago, misura 500 metri, è stato scavato interamente con il martello (un Indeco HP 4000), ed ha implicato la rimozione di un volume pari a circa 35.000 metri cubi.

L'opera, affidata ad un consorzio di appaltatori (JPF Construction, Induni, Evequoz and Getra) ha visto nell'impresa



Incidente di Place Saint-Laurent (www.dwill.ch)

JPF quella cui era stata demandata la realizzazione dello scavo e delle relative opere di consolidamento. Il materiale del sottosuolo delle gallerie della fermate di Chuv è costituito in massima parte da ammassi di arenarie che, a seconda della posizione, si presentano di bassa o media durezza (tra circa 10 e 35 MPa). Escluso l'esplosivo per l'alta densità urbana e la fresa ad attacco puntuale impiegata in altri lotti proprio per via delle caratteristiche dell'ammasso, si è optato per il martello. Con le sue due tonnellate e mezzo di peso, una classe di energia di 5.650 joule e un numero di colpi al minuto compreso fra 370 e 820, il martello Indeco si è infatti perfettamente prestato ad essere montato sull'escavatore a braccio orientabile Liebherr 934 garantendo gli adeguati livelli di produzione.



CASI STORICI

VARIANTE DI VALICO



Il martello si è dimostrato ancora una volta efficace per attraversare gli insidiosi ammassi dell'Appennino Tosco-Emiliano

La Variante di Valico, oggi completata e in via di totale apertura al traffico, si sviluppa tra il casello di Sasso Marconi e quello di Barberino di Mugello ed è parte di un più ambizioso progetto mirato a potenziare e migliorare il tratto appenninico dell'A1 tra Bologna e Firenze, uno dei più trafficati e pericolosi dell'intero sistema autostradale italiano. L'opera, che nel suo primo tratto in direzione sud interseca ed affianca l'attuale viabilità storica in esercizio da più di cinquant'anni, è caratterizzata da un tracciato che si distingue per le limitate pendenze e l'ampio numero di viadotti e gallerie. Lunga 59 km, la Variante di Valico è costituita da 23 viadotti e 22 gallerie.

Il progetto era del resto mirato a realizzare un'infrastruttura caratterizzata da minori pendenze rispetto alla viabilità storica, così da assorbire il traffico pesante.

In termini costruttivi questa corretta impostazione progettuale si è scontrata però con l'attraversamento di uno dei territori più difficili di tutta la Penisola con caratteristiche analoghe, se non simili, a quelle del tracciato della linea ad Alta Velocità Bologna-Firenze. Queste infatti hanno imposto diverse tecniche di scavo e consolidamento delle opere in sotterraneo. Il lato toscano, in particolare, presentava le maggiori difficoltà, perché interessato

da rilievi costituiti da formazioni incoerenti che erano, tra l'altro, caratterizzate da una diffusa presenza di gas naturale e di acqua. Come per la costruzione della linea Alta Velocità Bologna-Firenze, le gallerie sono state realizzate con un pluralità di metodi, con prevalenza dell'esplosivo e del martello idraulico. La galleria Sparvo (due canne di 2,5 chilometri ciascuna) è stata scavata con la TBM EPB di maggior diametro (15,62 metri e area di scavo 192 metri quadrati) mai utilizzata in Europa e costata oltre 52 milioni di Euro. Nonostante un'incerta fase di avviamento e alcuni problemi durante le fasi di scavo che avevano portato a produzioni inizialmente scarse, la fresa ha poi dimostrato produzioni decisamente interessanti, che però non riflettono i tempi necessari all'assemblaggio, alle manutenzioni, ai fermi per guasti e quelli per l'approntamento della logistica del cantiere.

La galleria Monte Mario

La galleria, aperta alla circolazione nel 2006, è stata la prima della Variante di Valico in sotterraneo ad essere scavata in direzione sud. L'opera si trova a cavallo tra le valli del fiume Setta e del fiume Reno che confluiscono proprio in prossimità del vecchio casello autostradale, oggi



soppresso. Il rilievo di origine sedimentaria è caratterizzato da formazioni di marne e argille sovraconsolidate, che però differiscono per consistenza e distribuzione nell'imbocco in direzione Bologna (nord) e in quello in direzione Firenze (sud).

L'opera è costituita da due canne (rispettivamente di 2.266 e 2.209 metri) separate da un setto di spessore che varia tra un minimo di 35 e un massimo di 64 metri. Le due canne hanno assi divergenti e sono impostate per avere livellette in ascesa dallo 0,7% all'1% nel lato nord e viceversa in discesa dallo 0,7% all'1% nel lato sud.

Le canne avevano una sezione ciascuna di 145 metri quadrati e hanno intersecato formazioni risalenti al Pliocene inferiore, caratterizzate da notevole inconsistenza, (marne/argille sovraconsolidate grigio-azzurre) e al Pliocene Superiore (sabbie grigio-giallastre con banchi arenacei) che si distinguono invece per una relativa maggiore coesività. Le diverse caratteristiche delle formazioni e la loro ubicazione rispetto al tracciato ha fatto sì che si utilizzassero due diverse tecniche di consolidamento per ciascuna canna.

Due martelli Indeco per l'imbocco Nord

La natura delle formazioni geologiche aveva indotto i progettisti a indicare nel martello idraulico il metodo più adatto allo scavo per via dell'alto livello di fratturazione. Fatta eccezione per un tratto iniziale di circa 700 metri particolarmente critico, per via della presenza di litoidi caratterizzati da durezza superiori ai 50 MPa che hanno richiesto l'impiego di esplosivo, lo scavo dell'imbocco Nord è sempre avvenuto grazie all'impiego

di due martelli Indeco UP 7000 W silenziati e dotati di sistemi di abbattimento della polvere. La maggior parte dell'avanzamento, cioè più di 1.800 metri, è stato realizzato con il martello che, anche in questo caso, si è dimostrato un metodo complementare e alternativo rispetto all'esplosivo e che nel cambio di tecnica di scavo non ha richiesto tempi particolarmente lunghi o costi gravosi. L'affidabilità e capacità di lavoro dei martelli ha comunque garantito una produzione compresa tra 1,5 e 2 metri al giorno.





Mauro Amato

Alessandro Ciccolella

Nicola Colaluca

Lucio Garofalo

Alessandro Reina

AUTORI



Mauro Amato

Ingegnere Meccanico laureato presso il Politecnico di Bari, dal 2003 lavora con Indeco. Entrato nell'ufficio R&D è poi passato all'ingegnerizzazione di prodotto e alla valutazione e selezione di materiali e componenti per la linea martelli, di cui è anche Production Manager.

Alessandro Ciccolella

Ingegnere Meccanico laureato presso il Politecnico di Bari, dal 2007 lavora con Indeco. Opera nell'ufficio R&D occupandosi della progettazione e lo sviluppo di nuovi prodotti di demolizione, nel 2008 è diventato After Sales Manager e dal 2011 è Project Manager per gli handling complementari, quali le cesoie, i bracci idraulici e le pinze selezionatrici; segue inoltre il mercato per il Regno Unito, l'Australia e il Nord America.

Nicola Colaluce

Ingegnere civile laureato presso il Politecnico di Bari con tesi sulla valutazione del tracciato di infrastrutture lineari che prevedano la realizzazione di scavi in roccia. Attualmente è impegnato con Astaldi con il ruolo di Field Engineer presso l'Autostrada Arad-Nadlac Lotto 1 e 2 (Romania) all'interno del progetto "Manager del Futuro".

Lucio Garofalo

Giornalista specializzato nelle costruzioni, corrisponde con le più importanti riviste tecniche italiane e internazionali e collabora con gli uffici comunicazione di diverse aziende e imprese del settore.

Oltre a numerosi articoli e reportage, Lucio Garofalo è autore di pubblicazioni, video tecnici e di alcuni documentari. Da più di vent'anni collabora con Indeco.

Alessandro Reina

Docente di Geologia Tecnica e Geologia Territoriale per i corsi di Ingegneria dei Sistemi Edilizi e di Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio e ricercatore di Geologia Stratigrafica e Sedimentologica presso il Dipartimento di Ingegneria Civile Ambiente e Territorio, Edile e Chimica del Politecnico di Bari (DICATECh).

Alessandro Reina è inoltre Dottore di Ricerca e rilevatore nell'ambito del Progetto CARG 88 della Carta Geologica d'Italia, è stato consulente per società petrolifere italiane e straniere collaborando a progetti di esplorazione petrolifera.

È anche autore di numerose pubblicazioni nel campo della stratigrafia dei carbonati, della geologia applicata, del recupero delle attività estrattive, della geotermia a bassa entalpia.

Ringraziamenti

Indeco desidera ringraziare per la cortese collaborazione:

Geom. Carmine Castellano
Geom. Salvatore Castellano
Geom. Orazio Castellano
Geom. Silvano Castellano
Rag. Carmine Pichiarallo
Castellano Spa

Dott. Ing. Pasquale Esposito
Dott. Ing. Gustavo Ciano
Grandi Lavori Fincosit

Geom. Giulio Misconel
Rag. Luca Misconel
Geom. Franco Piazzi
Misconel Srl

Geom. Marco Orsetti
Strabag Spa

Geom. Achille Sbaraglia
Technoscavi Srl

Dott. Piergiorgio Balestra
Trevi Group

Si ringrazia inoltre :

Michele Stellacci
Responsabile della Filiale di Milano, Indeco Ind. Spa

Giuseppe Rutigliano
Responsabile Commerciale Sud Italia, Indeco Ind. Spa

Vincenzo Ratti
Responsabile Assistenza Tecnica, Indeco Ind. Spa

FOCUS ON

è una collana tecnica realizzata da



YOUR PARTNERS IN DEMOLITION

www.indeco.it