



16° CICLO
DI CONFERENZE
DI MECCANICA
E INGEGNERIA
DELLE ROCCE



POLITECNICO
DI TORINO



**INNOVAZIONI
NELLA PROGETTAZIONE
REALIZZAZIONE E GESTIONE
DELLE OPERE
IN SOTTERRANEO**



Celid

TORINO
16-17 febbraio 2017

Innovazioni delle tecnologie di scavo meccanizzato in ammassi rocciosi caratterizzati da roccia dura con distacchi in calotta e alte coperture

P. Padovese, A. Berti
CMC Ravenna

E. Baldovin, A. De Paola, G.L. Morelli, L. Buraschi
Geotecna Progetti s.r.l. – Milano

G. Ascari
Akron s.r.l. – Milano

TBM, alte coperture, sistema di presostegno, rockburst, monitoraggio microsismico

1. Introduzione

Il presente contributo riferisce sulle metodologie di scavo e di sostegno utilizzate per la costruzione del Cunicolo Esplorativo de La Maddalena, opera propedeutica alla progettazione della Galleria di base per il nuovo collegamento ferroviario transalpino Torino-Lione.

La stazione appaltante è la Società TELT (Tunnel Euralpin Lyon Turin) in qualità di promotore pubblico responsabile della realizzazione e della gestione della sezione transfrontaliera della futura linea Torino-Lione. L'Appaltatore a cui è stata affidata la progettazione e la costruzione dell'opera è l'ATI tra le imprese CMC di Ravenna (Mandataria), Strabag, Cogeis e la società di ingegneria Geotecna Progetti di Milano.

Il Cunicolo presenta una lunghezza complessiva di circa 7500 m e raggiunge nella tratta terminale coperture elevate dell'ordine dei 2000 m. Esso attraversa, per la quasi totalità del suo sviluppo, il basamento cristallino appartenente all'unità tettonostratigrafica dell'Ambin.

Lo scavo è iniziato nel mese di Gennaio del 2013. Alla fine del 2016 ha raggiunto la progressiva circa 6500 m, di cui una breve tratta di circa 200 m all'imbocco è stata eseguita con modalità tradizionale, per poi proseguire con metodologia meccanizzata utilizzando una TBM di tipo "aperto". Per fronteggiare le diverse condizioni geomeccaniche previste lungo il tracciato, in fase di progettazione esecutiva è stata studiata un'ampia gamma di sezioni tipo. In particolare sono state adottate sezioni con bullonatura occasionale e sistematica e con pannellature leggeri e pesanti e con consolidamento e/o impermeabilizzazione del contorno del cavo. Infine sono state concepite sezioni specifiche per contrastare gli eventuali fenomeni di rockburst, costituite da bulloni ad alta duttilità del tipo yielding.

Durante il corso dei lavori sono state riscontrate diverse criticità che hanno inciso negativamente sulla produzione. In particolare nella prima tratta di scavo la roccia ha presentato un'elevata resistenza meccanica e abrasività, che ne ha reso molto difficoltosa la penetrabilità. Inoltre, dopo i primi 1600 m di Cunicolo, e per la gran parte dello scavo a seguire, nonostante le buone caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso, si è manifestato un fenomeno inatteso, consistente nel distacco ripetuto di blocchi di roccia in calotta nei primi metri dietro il fronte di scavo, che non permetteva di mettere in opera, dalla prima postazione di lavoro, le bullonature previste in progetto, se non previo il sistematico disgiungimento e la riduzione del volume dei blocchi.

Al fine di limitare le ricadute negative sulla velocità di scavo è stato studiato e messo in opera in tempi ristrettissimi un innovativo sistema di avanzamento e di sostegno della calotta, che ha comportato la modifica della macchina ed il concepimento di nuove sezioni di scavo e consolidamento.

In fase di sperimentazione risulta inoltre l'innovativo sistema di monitoraggio microsismico messo a punto allo scopo di studiare i possibili fenomeni di decompressione violenta ed improvvisa dell'ammasso che si dovessero manifestare sotto le coperture più elevate durante l'avanzamento

dell'opera. Il medesimo monitoraggio permette altresì lo studio delle caratteristiche dell'ammasso in prossimità del fronte di scavo.

2. Inquadramento generale dell'opera

Il Cunicolo Esplorativo de La Maddalena è costituito da una Galleria Naturale realizzata in località La Maddalena, nel territorio del Comune di Chiomonte (TO). Lo scavo è stato effettuato in tradizionale fino a p.k. 0.+198, progressiva a partire dalla quale è stato eseguito con metodologia meccanizzata, utilizzando una TBM di tipo "aperto". Il Progetto Esecutivo prevede che il Cunicolo si sviluppi fino alla p.k. 7+541.56. La quota del Cunicolo in corrispondenza dell'imbocco è circa 673 m s.m. Il diametro di scavo della TBM è pari a 6,30 m in condizioni normali, ma può essere aumentato fino a 6,50 m in condizioni di emergenza. Le sagome di scavo sono state definite per garantire un diametro netto interno minimo pari a 5,8 m dopo la posa dei sostegni e lo sviluppo totale delle deformazioni. Le geometrie interne della galleria sono state determinate in sede di progetto tenendo in considerazione le necessità emergenti durante lo scavo del cunicolo e con riferimento alle fasi successive di costruzione e di esercizio dell'opera principale.

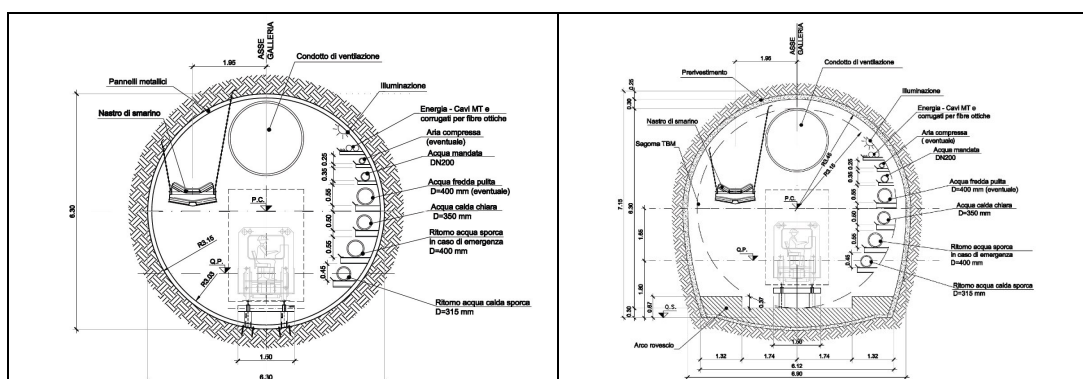


Figura 1. Sezione trasversale in fase operativa - Tratto meccanizzato (a) e in tradizionale (b)

All'interno del Cunicolo, in cameroni laterali, sono ubicate, rispettivamente alla p.k. 4+091 e alla p.k. 2+805, una vasca di accumulo ed una di rilancio delle acque intercettate durante lo scavo. Il profilo altimetrico del cunicolo presenta un primo tratto in salita per circa 1500 m, con una pendenza pari allo 0,34 %, per poi discendere con pendenza massima del 3,32% per circa 1600 m. Negli ultimi 3500 m circa il tracciato è in salita con pendenza massima circa 1,118 %.

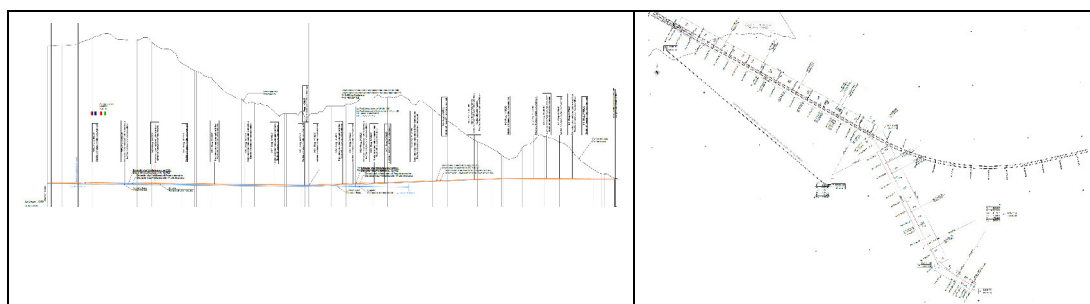


Figura 2. Profilo altimetrico (a) e tracciato planimetrico (b) del Cunicolo

Dal punto di vista planimetrico, il Cunicolo presenta inizialmente un rettilineo di 300 metri, seguito da una curva di raggio pari a 1500 metri, quindi un altro tratto rettilineo di circa 1600 metri ed un'altra curva di raggio pari a 1000 metri, per poi proseguire in rettilineo fino alla fine. A partire dalla

3. Inquadramento geologico, idrogeologico e geomeccanico

Solo per una limitata estensione, in prossimità dell'imbocco, approssimativamente per circa i primi 120 metri, lo scavo ha interessato depositi quaternari di versante (depositi fluvio-glaciali e depositi glaciali indifferenziati) e successivamente, fino a pk 0+198, una successione di litotipi classificabili come carniole (ca), dolomie con intercalazioni di talco e talcoscisti (do) e scisti carbonatici-filladici, micascisti a clorite (GCC). A partire dalla pk. 0+198 si è poi inoltrato nell'unità d'Ambin, attraversando dapprima gneiss aplitici (AMC) a giadeite (fino a pk. 1+148) e, a seguire, gneiss albitici e micascisti quarzoso-conglomeratici appartenenti al Complesso di Ambin (AMD). Nella successiva tratta, da pk. 1+350 fino a fine scavo (pk. 7+541), lo scavo ha interessato esclusivamente l'unità geometricamente e strutturalmente più profonda del Massiccio d'Ambin, ovvero il Complesso di Clarea (CLR), omogeneamente caratterizzato da gneiss minuti e micascisti a biotite, mica bianca, glaucofane, granato, quarzo e albite di colore grigio-bluastro con struttura listata per la presenza di lenti e livelli stirati di quarzo metamorfico (Figura 3).

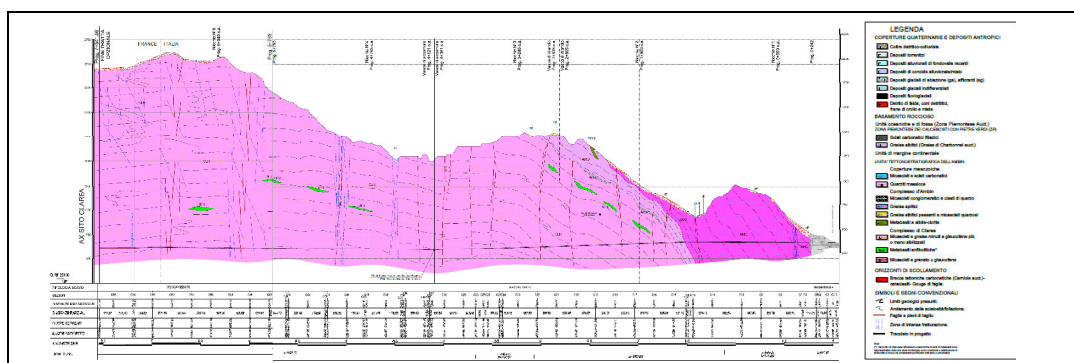


Figura 3. Profilo geologico e geomeccanico del Cunicolo

Dal punto di vista delle caratteristiche geomeccaniche, gli ammassi rocciosi attraversati sono risultati ovunque di qualità geomeccanica buona-discreta (classi II-III RMR), mostrando locali scadimenti solo in corrispondenza di brevi passaggi in zone di faglia o di fratturazione intensa (classe IV RMR). Nella figura seguente è riportato l'andamento dell'indice RMR rilevato durante l'avanzamento del Cunicolo nella tratta di scavo in meccanizzato e le relative sezioni tipo di scavo messe in opera (descritte nel seguito).

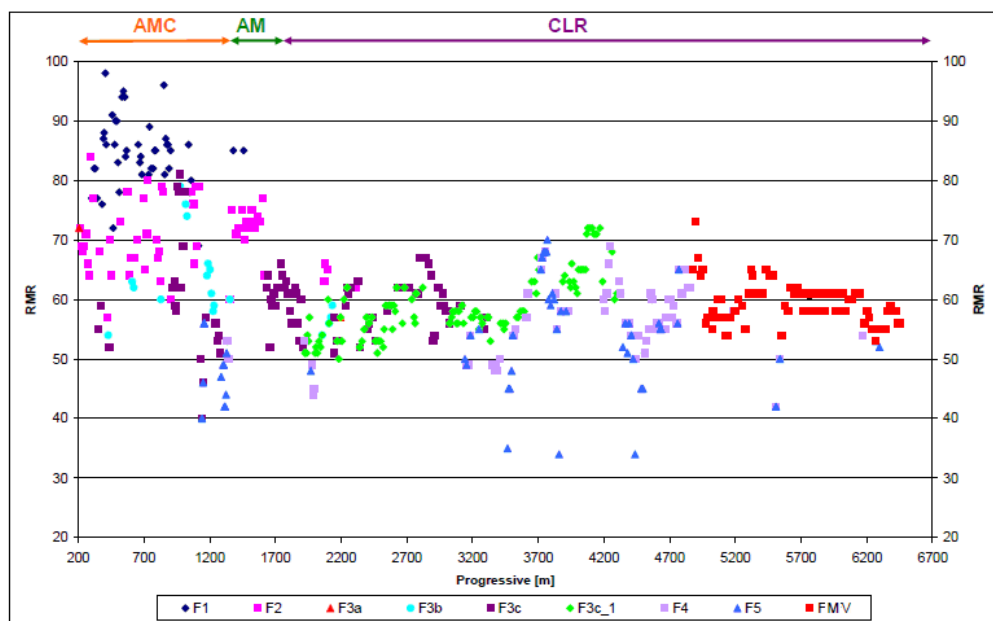


Figura 4. RMR rilevati e sezioni tipo messe in opera (p.k. 0+198÷p.k 6+500)

La tratta in gneiss aplitici (AMC) ha fatto registrare i valori di RMR più elevati di tutto il tracciato, con indici massimi eccezionalmente prossimi a 100 (classe I RMR). La resistenza a compressione uniassiale della roccia è risultata particolarmente elevata per gli gneiss AMC (media $\sigma_c = 184$ MPa), per i quali è stato conseguentemente riscontrato, anche in relazione all'elevata abrasività, un accentuato tasso di consumo dei cutters della macchina. I micascisti del Complesso di Clarea (CLR) hanno mostrato resistenze mediamente più basse (media $\sigma_c = 103$ MPa) rispetto agli gneiss, peraltro accompagnate da una più accentuata anisotropia meccanica dovuta alla tipica tessitura marcatamente scistosa del litotipo.

4. Caratteristiche della TBM

La macchina di scavo del Cunicolo è stata progettata in funzione delle particolari condizioni geologiche attese e delle molteplici lavorazioni e attività richieste a fini geognostici, investigativi e di consolidamento del cavo e per l'ottenimento di alte produttività anche in situazioni sfavorevoli.

La TBM impiegata appartiene alla famiglia di macchine ad "elevate prestazioni in formazioni rocciose dure"; essa può essere schematizzata nei tre principali componenti strutturali:

- sezione operativa (testa fresante, supporto della testa e trave principale);
- sezione ancorante (sistema di spinta e ancoraggio);
- sezione motrice (motori elettrici con riduttori, corona e cuscinetto principale, pale di raccolta sulla testa e nastro trasportatore).

La possibile presenza di materiali scadenti, di caratteristiche diverse e quindi con problematiche differenti ha influito sul dimensionamento della macchina in termini di potenza disponibile alla testa e sulla strutturazione e l'allestimento nel suo complesso: ciò ha portato alla creazione di due zone di lavoro principali nelle quali poter eseguire consolidamenti mirati e indagini geognostiche, il più vicino possibile alla testa. La macchina è stata pertanto progettata prevedendo due zone di lavoro distinte, denominate L1 ed L2, che verranno descritte di seguito. La distanza tra fronte di scavo e zona di installazione dei sostegni ha determinato le scelte progettuali in merito alle sezioni di scavo.

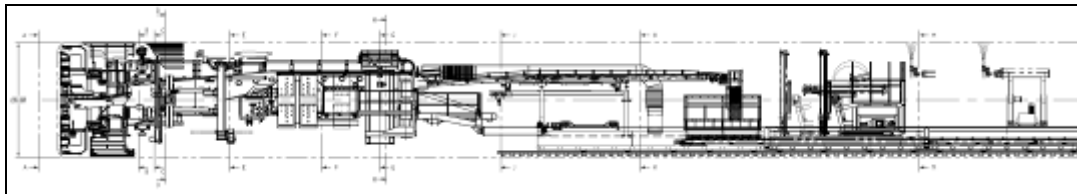


Figura. 5. Schema del layout della TBM

4.1 Testa fresante

La struttura della testa prevede una superficie di esposizione minima alla periferia per minimizzare gli attriti in roccia fratturata. Tutte le parti esposte sono facili da sostituire o ricoperte con materiali anti-usura. La struttura della testa, progettata per ottenere la massima rigidità e resistenza, è costruita in cinque pezzi, un elemento centrale e quattro segmenti esterni; presenta una superficie di esposizione minima alla periferia per ridurre il più possibile le forze di attrito in caso di roccia fratturata. La testa è attrezzata per l'esecuzione di un extrascavo di 10 cm sul diametro (ottenendo un diametro massimo di scavo di 6,40 m) tramite estrusione dei taglienti periferici, effettuata mediante l'utilizzo di spessori e l'innalzamento del supporto testa. In caso di emergenza è inoltre possibile operare un ulteriore extrascavo di 10 cm (totale 20 cm sul diametro), per alcuni brevi tratti di galleria. Le caratteristiche principali della testa fresante sono riassunte nella seguente tabella.

Tabella 1. Caratteristiche principali della testa fresante

<u>Testa fresante</u>		<u>Caratteristiche tecniche</u>	
Diametro di scavo	6,30 m	Max spinta di esercizio	13.667 kN
Numero taglienti	43	Max capacità di spinta	14.200 kN
		Numero motori	7
		Potenza della testa	2.205 kW
		Velocità di rotazione testa	0 – 9.3 giri/min.
		Corsa cilindri di spinta	1.830 mm
		Pressione raccomandata nella testa	310 bar
		Pressione nominale del sistema	345 bar

La possibilità di overboring ha permesso lo sviluppo di soluzioni progettuali atte a mitigare gli effetti conseguenti ad eventuali fenomeni di rockburst, così come sarà descritto nel seguito.

4.2 Registrazione dei parametri di scavo

La registrazione dei parametri di scavo avviene mediante un Sistema Automatico di Rilevazione e Registrazione Dati che può leggere, visualizzare e raccogliere i parametri di scavo più significativi. I dati raccolti sono estratti dal sistema automatico per poi essere costantemente registrati, monitorati, elaborati e confrontati con i dati provenienti dalle indagini e dai monitoraggi.

4.3 Sistema di spinta e ancoraggio

Il sistema di spinta e ancoraggio è formato da una struttura portante, dal gruppo gripper e dai cilindri di spinta. I gripper possono sviluppare una forza totale di ancoraggio di circa 36.400 kN; alla loro estremità sono incernierate due "scarpe" la cui superficie di appoggio è sufficientemente ampia da eliminare la possibilità di deformazioni locali del terreno. I cilindri gripper e il loro supporto sono collegati tramite i cilindri del "torque" che contrastano il momento torcente trasmesso dalla testa, permettendo di correggere l'angolo di rollio della macchina e di impostarne la direzione nel piano verticale.

4.4 Caratteristiche del back-up e logistica

Il back-up è composto da piattaforme di lavoro su binario e piattaforme del tipo ferroviario traslanti sul binario di galleria, che serve inoltre al trasporto all'interno del tunnel del personale e dei materiali che serviranno per le lavorazioni al fronte. Le piattaforme di lavoro sono installate subito dietro la fresa. Le piattaforme di lavoro (denominata "Zona L2") sono montate su ruote ferroviarie a scartamento largo 1300 mm, mentre le piattaforme di back-up utilizzano ruote del tipo ferroviario a scartamento ridotto 900 mm traslanti lungo il binario della galleria. Il back-up è stato realizzato e progettato per lo scarico ed il trasporto dell'abbattuto, tramite nastri convogliatori dal fronte scavo, su apposito nastro trasportatore continuo assemblato a parete sulla parte sinistra del tunnel. Il minerale all'esterno del cunicolo è trasportato per mezzo di un nastro alle piazzole per la caratterizzazione chimico-fisica del materiale estratto. Il sistema di movimentazione materiali e trasporto personale in galleria prevede l'utilizzo di piattine ferroviarie per il trasporto del personale e l'alimentazione della macchina con i materiali di supporto: pannelli prefabbricati, rete, bulloni, cemento e materiali vari.

4.5 Attrezzature TBM

Le dotazioni speciali della TBM sono ubicate in due distinte zone di lavoro: la prima, a breve distanza dal fronte di scavo (zona di lavoro L1), nella quale sono collocati due imbullonatori idraulici (chiodatrici) ed un erettore. E' presente, sopra la macchina, anche una sonda per l'esecuzione di fori di prospezione in grado di operare sia in rotoperussione che in sola rotazione (fori a distruzione o carotati), utilizzabile anche per gli eventuali interventi di consolidamento dell'ammasso. Nel caso di venute d'acqua con alte pressioni è possibile installare un preventer per le attività di consolidamento e/o impermeabilizzazione degli ammassi maggiormente fratturati e delle zone di faglia. La zona di lavoro L2, che si trova ad una distanza di circa 41 m dal fronte, è predisposta per eseguire bullonature radiali, spritz-beton e indagini geognostiche, grazie alla presenza di una stazione di perforazione equipaggiata sia per la rotoperussione che per il carotaggio. Le apparecchiature sono installate su una piattaforma scorrevole su un binario che permette di svolgere le attività sopra menzionate senza sospendere l'avanzamento della TBM.

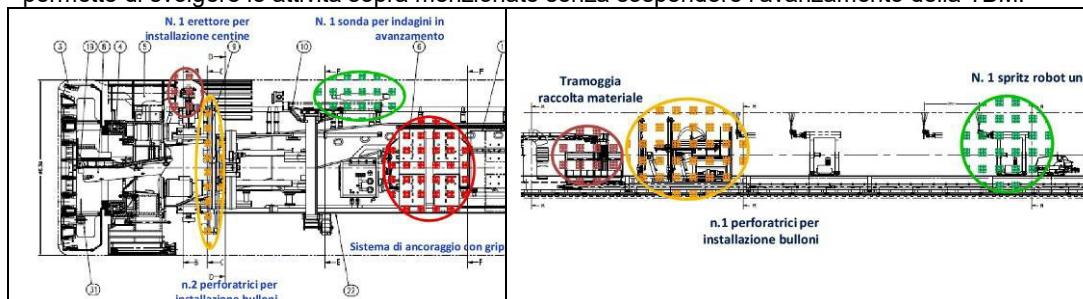


Figura 6. Zona di lavoro L1 (a) e L2 (b)

L'installazione dei pannelli metallici (centine) avviene tramite l'erettore costituito da un telaio metallico mobile longitudinalmente e scorrevole lungo una ghiera circolare, dotato di un sistema idraulico di presa e sollevamento degli anelli, comandato da radio controllo. La TBM inizialmente era attrezzata per installare bulloni di lunghezza pari a 3 m immediatamente a tergo dello scudo (zona di lavoro L1) tramite n.2 perforatori comandati da un apposito pannello di controllo. Nella zona di lavoro L2 si possono eseguire ulteriori interventi di bullonatura di lunghezza 2,70 metri tramite una specifica perforatrice. In corrispondenza della zona di lavoro L1 inizialmente era allestita una stazione per l'applicazione manuale di una miscela a secco di spritz-beton. In corrispondenza della zona L2 era invece installata una lancia robotizzata per la posa dello stesso. Tale attrezzatura è stata rimossa per poter installare un depolverizzatore con filtri a maniche.

Tale accorgimento ha determinato una riduzione sostanziale della silice aerodispersa nei luoghi di lavoro.



Figura 7. Erettore e perforatrice (a), sonda (b), gripper e cilindri di spinta (c)

5. Caratteristiche delle sezioni tipologiche di scavo e consolidamento previste in progetto

Lo studio geologico e geomeccanico dell'ammasso roccioso oggetto dello scavo, eseguito in fase di progettazione, ha permesso di definire una serie di sezioni di scavo e consolidamento applicabili nei diversi scenari individuabili in funzione dell'indice RMR e della copertura sulla galleria (criterio di applicazione delle sezioni tipo).

5.1 Sezioni con bullonature occasionali

Le sezioni F1 e F2, riferibili ai migliori contesti geomeccanici previsti lungo lo sviluppo del cunicolo con valori di RMR maggiori di 60, prevedono interventi di bullonatura occasionale per la stabilizzazione dei cunei di roccia, eseguiti dalla zona di lavoro L1 tramite elementi di tipo Swellex di lunghezza pari a 3m. Le due sezioni tipo differiscono per il numero e la spaziatura dei bulloni.

5.2 Sezioni con bullonatura sistematica

Le sezioni F3a, F3b e F3c, riferibili a contesti geomeccanici intermedi con valori di RMR compresi tra 51 e 60, comportano interventi di bullonatura sistematica per la stabilizzazione dei cunei di roccia, eseguiti sia dalla zona di lavoro L1 che dalla zona di lavoro L2. Nei casi in cui l'ammasso si presenti maggiormente fratturato (spaziatura dei giunti da centimetrica a decimetrica), si prevede anche la messa in opera di fogli di rete elettrosaldata Φ 8 10cm x 10cm (sezioni tipo F3b, F3c). La sezione tipo F3c si distingue per la presenza di interventi di bullonatura anche in corrispondenza dei piedritti, per far fronte a condizioni geostrukturali particolarmente sfavorevoli.

5.3 Sezioni con pannellature leggere e pesanti

Le sezioni tipo F4 e F5 sono applicate nei contesti geomeccanici più scadenti con valori di RMR inferiori a 51, nei quali la presenza di un grado di fratturazione elevato nell'ammasso e di deformazioni plastiche più evidenti rende necessaria l'installazione sistematica di pannelli metallici, costituiti da profilati circolari in acciaio HEB120 accoppiati, ad interasse rispettivamente pari a 1,40 m (F4) e 0,50 m (F5). È prevista, inoltre, la messa in opera di fogli di rete elettrosaldata Φ 8 10 x 10, ancorati ai pannelli, atta a contrastare fenomeni di crollo/svuotamento che potrebbero manifestarsi in presenza di materiale poco coerente.

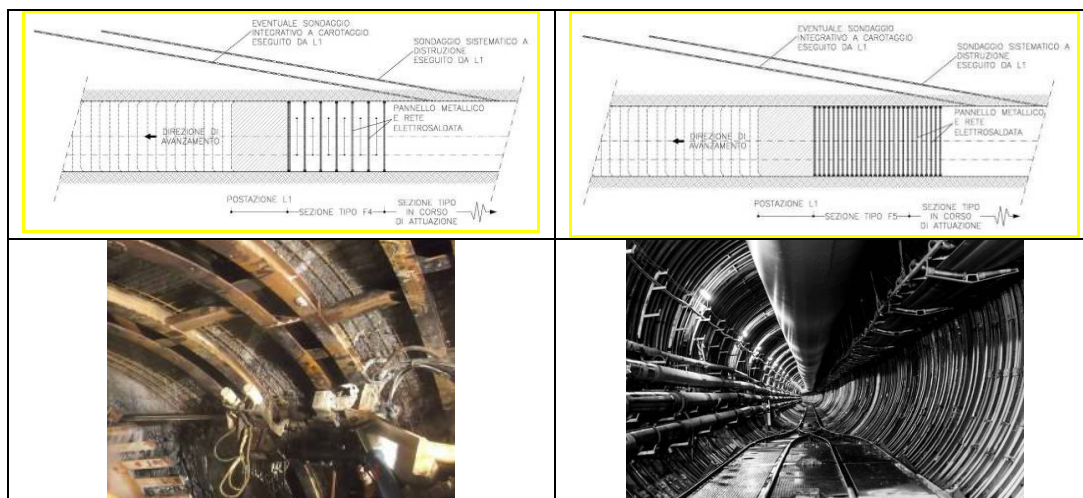


Figura 8. Pannellatura leggera tipo F4 (a) e pesante tipo F5 (b)

5.4 Sezioni con pannellature e iniezioni di consolidamento e/o impermeabilizzazione contorno

Le sezioni tipo F5a, F5b, F5c sono da utilizzare negli eventuali attraversamenti di tratte di ammasso fratturato e spingente (zone tettonizzate) e/o interessate da eventuale circolazione idrica con importanti venute d'acqua permanenti. Tali sezioni prevedono l'esecuzione di drenaggi in avanzamento, iniezioni di impermeabilizzazione a mezzo tubi in PVC valvolati e, nel caso l'ammasso presentasse condizioni di alterazione tali da generare fenomeni spingenti importanti ed evidenti condizioni di instabilità a breve termine, iniezioni di consolidamento preventivo in avanzamento mediante tubi in vetroresina predisposti per iniezioni a pressione. Per entrambe le sezioni è prevista l'installazione sistematica di pannelli metallici costituiti da profilati circolari in acciaio HEB120 accoppiati, posti ad interasse pari a 0,50 m.

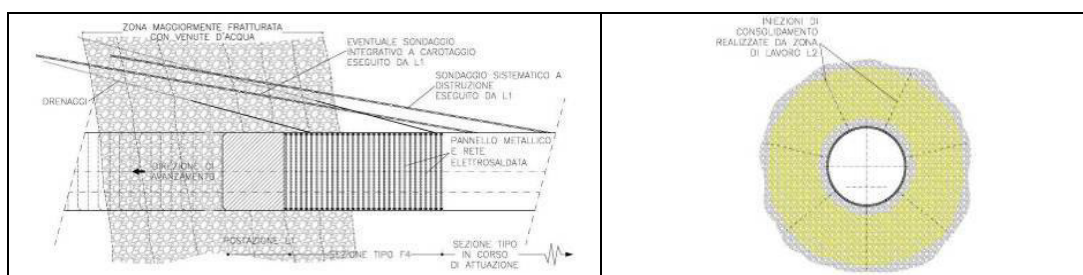


Figura 9. Sezione tipo F5a – Interventi – Profilo longitudinale (a) e sezione trasversale (b)

5.5 Sezioni speciali per rockburst

Le sezioni tipo F3d e F3e sono caratterizzate da interventi idonei a fronteggiare fenomeni di rockburst, che potrebbero manifestarsi in particolari contesti geomeccanici (RMR elevato ed alte coperture). Esse prevedono l'utilizzo di bulloni Yielding di lunghezza pari a 3 m ad elevata deformabilità e capacità di assorbimento energetico e da un doppio strato di spritz-beton armato con rete elettrosaldata Φ 8 10cm x 10cm.

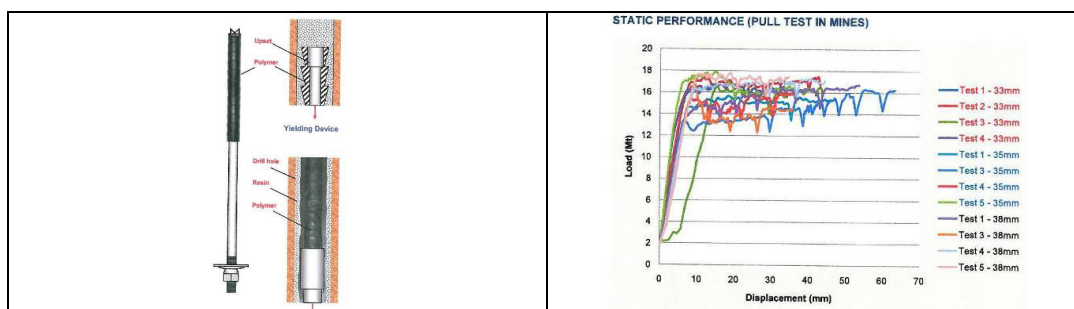


Figura. 10 Tipologia di bulloni Yielding (a) e grafico carico/deformazioni da prove di laboratorio (b)

In corso d'opera sono stati eseguiti alcuni campi prova per testare in situ tale dispositivo. In particolare sono state testate quattro barre a p.k. 3+680. I risultati ottenuti sono in linea con i requisiti di progetto.

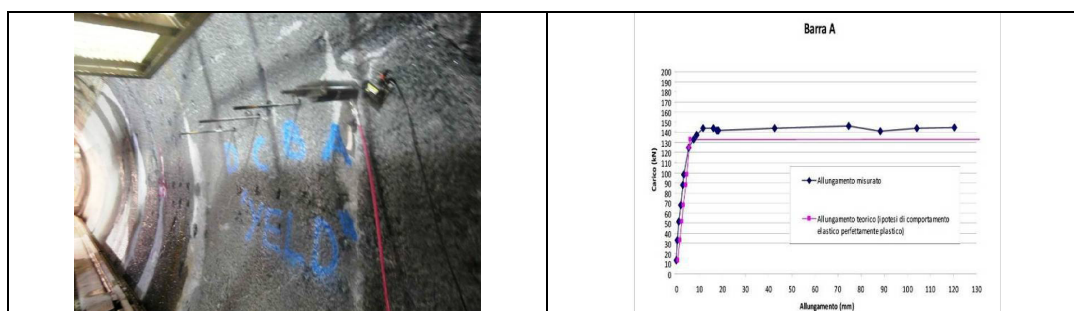


Figura 11. Campo prova in situ su bulloni Yielding (a) e grafico carico/deformazioni di una barra testata (b)

6. Criticità geomeccaniche emerse durante l'avanzamento

Le principali criticità geomeccaniche manifestatesi durante l'avanzamento degli scavi sono riconducibili a quattro tipologie:

1. estrema durezza ed abrasività degli Gneiss aplitici (AMC) incontrati nella tratta iniziale del cunicolo, tra le pk. 0+198 e pk. 1+000 circa;
2. occorrenza di ripetuti distacchi, specie in calotta, di blocchi e frammenti di roccia a ridosso del fronte, riconducibili agli effetti di rilascio tensionale al contorno del cavo associati ad un assetto geostrutturale dell'ammasso predisponente la formazione di elementi di roccia "rimovibili" in calotta;
3. zone tettonizzate di intensa fratturazione e di faglia;
4. evento impulsivo di rockburst manifestatosi il 21/12/2015, circa tra le progressive 4+190 e 4+200.

6.1 Durezza ed abrasività degli Gneiss aplitici (AMC)

Gli Gneiss Aplitici attraversati nella tratta iniziale del cunicolo scavato con TBM hanno mostrato una tessitura sostanzialmente isotropa ed una qualità geomeccanica d'ammasso eccezionalmente elevata, con prevalenza delle classi RMR I e II (40% e 50%). La resistenza a compressione della roccia intatta, valutata con prove in corso d'opera su carote, è risultata anch'essa elevata, mediamente pari a 184 MPa, con variabilità tra 155 MPa e 198 MPa. L'elevata durezza (media pari

a 781 pts Cerchar) e l'estrema abrasività del litotipo (indice CAI medio uguale a 5) hanno determinato, nel tratto in gneiss, basse velocità di penetrazione della macchina di scavo, con intensa usura degli strumenti di taglio e conseguenti frequenti fermi per manutenzione.

6.2 Distacchi di blocchi e frammenti di roccia a ridosso del fronte

Durante l'avanzamento si sono manifestati molteplici fenomeni di distacco di blocchi di roccia di dimensioni anche significativi (fino a circa 1 m^3), soprattutto in calotta immediatamente a ridosso del fronte, la cui occorrenza ha determinato forti ripercussioni negative sulla velocità di avanzamento della macchina in quanto direttamente gravanti sullo scudo. Tale fenomenologia si è osservata dapprima per una tratta relativamente breve tra p.k. 1+600 e p.k. 2+000 circa, per poi riproporsi con elevata frequenza a partire da p.k. 3+200 circa.

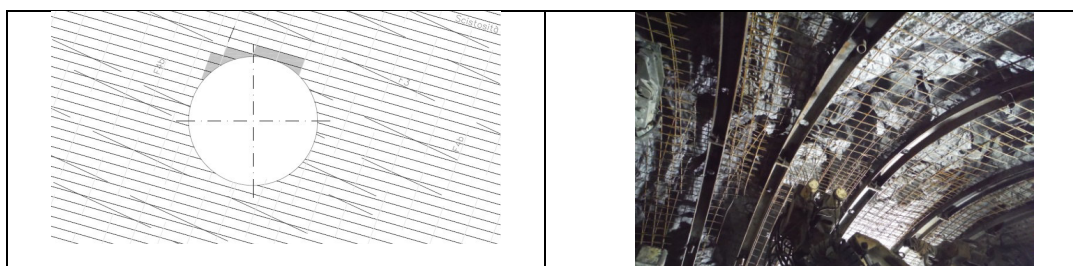


Figura 12. Schema dell'assetto geostrutturale predisponente il distacco di cunei e blocchi in calotta (a) e foto di un settore di calotta soggetto al fenomeno (b)

In pratica, i tempi di autosostegno del cavo senza supporti sono risultati significativamente inferiori a quelli prevedibili attraverso le usuali teorie riferite a distacchi di tipo gravitativo (Bieniawski, 1989). Nel caso in esame, tale non corrispondenza è spiegabile considerando la forte influenza esercitata su dette instabilità dal rilascio tensionale sul contorno del cavo, che ha prodotto, al crescere della copertura e con il concorso di un assetto geostrutturale dell'ammasso predisponente la formazione di cunei e blocchi in calotta (Figura 12), il ripetersi dei distacchi e lo sviluppo di fratture di neo formazione nella roccia al fronte. Le rotture fragili si sono manifestate pressoché sistematicamente, ancorché con intensità sempre modesta, già nelle tratte di cunicolo scavate sotto coperture prossime ai 1000 m, con episodi localmente segnalati anche in tratte con coperture inferiori, incrementandosi in frequenza ed entità al crescere del carico litostatico. I rilasci, che hanno interessato principalmente la calotta ed in subordine le parti basse dei paramenti, ed i fenomeni di fratturazione del fronte hanno comportato, a parità di velocità di penetrazione della macchina, una riduzione dell'energia di scavo ed una maggiore sollecitazione, con conseguenti rotture e necessità di interventi per manutenzione, degli utensili di scavo e del nastro trasportatore. In definitiva, dette instabilità hanno avuto un evidente impatto negativo sulla percentuale di utilizzo della macchina TBM ed hanno richiesto la tempestiva messa allo studio di idonei accorgimenti operativi e tecnologici per contenere tali rilasci e garantire una migliore efficienza e sicurezza dello scavo.

6.3 Zone tettonizzate di intensa fatturazione e di faglia

Lungo il tracciato del Cunicolo sono state incontrate otto zone di intensa fratturazione e faglia, ubicate alle p.k. 1+150, 1+320, 1+950, 3+150, 3+465, 3+780, 3+860, 4+440 e 5+530 circa, caratterizzate da valori di RMR compresi tra circa 35 e 45. Per il superamento di tali settori è stata messa in opera la sezione tipo con pannellatura pesante (F5) a cui, in diversi casi, è stato associato il consolidamento del contorno dello scavo mediante resine bicomponenti e spritz beton.

6.4 Evento impulsivo di rockburst del 21/12/2015

Il 21/12/2015 tra le progressive 4+190 e 4+200 del Cunicolo (copertura ≈ 950 m), in corrispondenza di una tratta di ammasso classificato con $RMR = 63$ e caratterizzato da discontinuità subverticali aperte o con riempimenti carbonatici e scistosità suborizzontale, si è manifestato l'unico evento di rottura fragile con caratteristiche chiaramente impulsive ed accompagnato da emissioni acustiche avvertite fino all'esterno del cunicolo. Detto fenomeno ha prodotto elevate deformazioni delle centine UPN 120 e della rete elettrosaldata già messe in opera (sezione F3c_1), a dimostrazione che i sostegni hanno lavorato in un range di sforzi e deformazioni che va ben oltre le caratteristiche lineari del materiale, verosimilmente prossimo ai valori di rottura degli stessi (Fig.13). Per valutare l'energia e la velocità di espulsione associati a tale evento si è analizzato il comportamento della sezione tipo effettivamente messa in opera mediante la predisposizione di modelli di calcolo agli Elementi Finiti, a partire dai quali sono state eseguite specifiche back analysis. In prima battuta, sulla base dell'effettivo stato di sforzo misurato lungo il Cunicolo mediante specifiche prove tensionali CSIRO e con martinetto piatto, si è calcolata la profondità di danno associata all'evento, che è risultata dell'ordine di 1-1,5 m. Si è poi simulato l'effettivo comportamento del rivestimento mediante analisi non lineari che hanno permesso di calcolare lo stato di sforzo nel rivestimento e le relative deformazioni rispettivamente per il raggiungimento delle resistenze a snervamento e a rottura dei materiali.

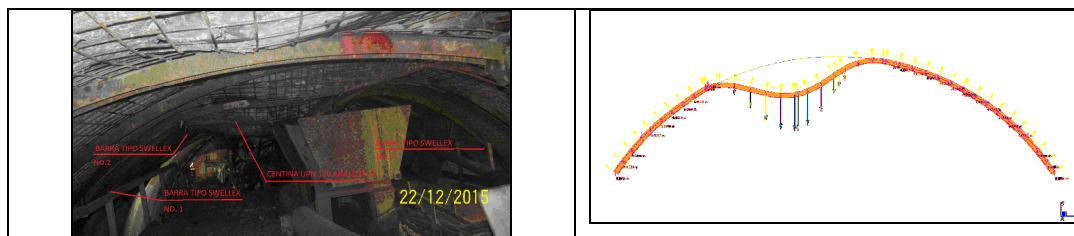


Figura 13. Rivestimento deformato a seguito dell'evento di rottura fragile del 21/12/2015 (a) ed esempio di deformata calcolata mediante il modello ad elementi finiti (b)

Ne è risultato che l'energia di rilascio da attribuire al fenomeno è dell'ordine dei $3\div5$ kJ/m². Tale range di energia è apparso peraltro confermato dal potenziale di dissipazione associabile alla rete elettrosaldata ($\phi 6$ con maglia 10cm x 10cm), ubicata in calotta tra due centine successive, che ha evidenziato elevate deformazioni a seguito dell'evento. Considerando un'energia di $3\div5$ kJ/m² ed una profondità di danno al contorno del cavo di 1÷1,5 m, risultano velocità di espulsione del blocco dell'ordine di 1÷1,5 m/s, in linea con i valori riportati in letteratura per fenomeni di lieve media-entità (Tabella 2).

Tabella 2. Relazione tra Intensità del Rockburst e energia (Kaiser et al., 1996)

Intensità	Energia (kJ/m ²)	Velocità (m/s)
Lieve	<5	<1.5
Media	5-10	1.5-3
Alta	10-25	3-5
Molto alta	25-50	5-8
Estrema	>50	>8

7. Modifiche apportate alla TBM in corso d'opera

Le principali criticità geomeccaniche riscontrate in corso d'opera hanno avuto ripercussioni sull'equipaggiamento della TBM, che è stato opportunamente modificato ed integrato in più parti al

fine di fronteggiare con maggiore efficacia le reali condizioni geologiche/geomeccaniche e, più in generale, le mutate esigenze operative.

7.1 Sistema di presostegno in avanzamento

Una delle criticità riscontrate che ha maggiormente condizionato le attività di scavo è stato il fenomeno di distacco di blocchi di roccia di dimensioni rilevanti (fino a circa 1 m^3), concentrato soprattutto in calotta ma anche al fronte di scavo, con conseguenti forti ripercussioni negative sulla velocità di avanzamento della macchina. L'innovativa soluzione implementata, che ha portato poi alla definizione della nuova sezione di scavo FMV abbinata a tale sistema di avanzamento, consiste nel saldare delle tasche metalliche all'intradosso dei finger su un arco di 120° (operazione completata in un turno di lavoro) nelle quali inserire, man mano che la macchina avanza, dei pannelli costituiti da n.3 barre $\Phi 12 \text{ mm}$ di acciaio ad aderenza migliorata saldate tra loro, aventi lunghezza adeguata a garantire le necessarie sovrapposizioni. Tale presostegno della calotta è a sua volta sostenuto con centine singole HEB120 a passo 135 cm. Il passo delle centine è stato studiato in funzione della geometria e delle dimensioni delle scarpe dei gripper, così che gli stessi non andassero a schiacciare le centine in fase di avanzamento della macchina. Per poter saldare le tasche sotto il roof si è dovuto procedere allo scavo in configurazione «overboring». Tale sistema è stato, inoltre, messo in opera in affiancamento alla sezione F4. Questa soluzione operativa si è dimostrata molto efficace nel contenimento di blocchi di dimensioni da piccole fino a medio-grandi.

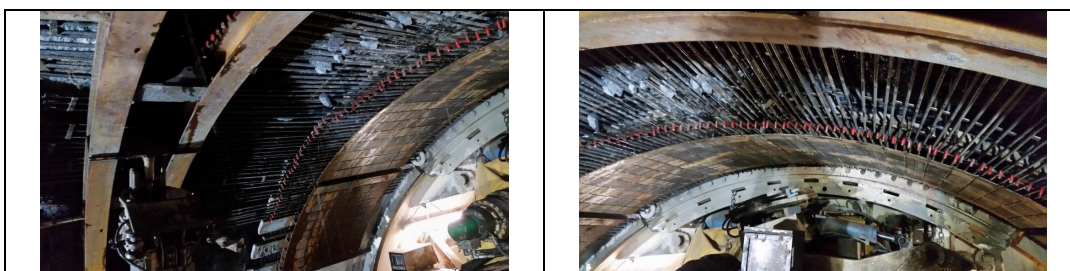


Figura 14. Sistema di presostegno in calotta

7.2 Sistema di vibrovaglio e frantoio in L2

Il distacco di blocchi dal fronte di scavo ha più volte provocato la rottura del nastro trasportatore, in quanto gli utensili di testa non sempre erano in grado di ridurre la pezzatura del marino. Per risolvere il problema è stato installato un frantoio in tramoggia. Ciò ha consentito di ridurre di molto gli interventi di manutenzione straordinaria sul nastro.

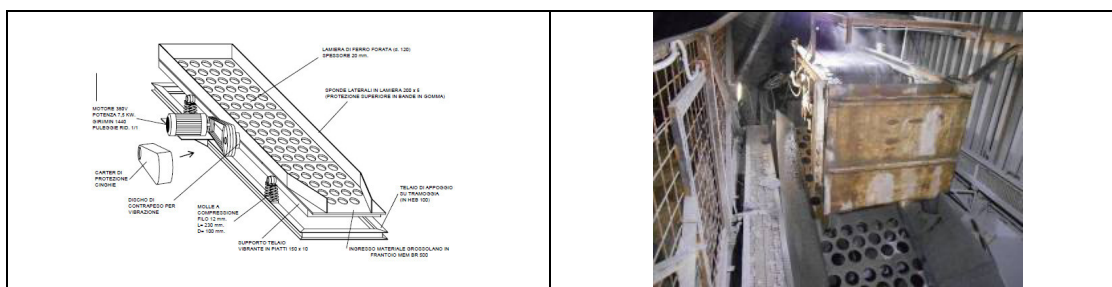


Figura 15. Schema vibrovaglio (a) e vibrovaglio e frantoio in tramoggia L2 (b)

7.3 Problematica alte temperature. Copertura e temperatura ammasso

Date le elevate coperture alla profondità di scavo del Cunicolo (oltre i 2000 metri) ed in funzione del gradiente geotermico sono state raggiunte temperature della roccia oltre i 45°C (a pk 6+500 46,2°C) e delle acque di falda, in media, di circa 2°C inferiori. Ciò ha imposto l'installazione di un sistema di raffreddamento dell'ambiente costituito da un'unità esterna ed una interna entrambe dotate di chiller e scambiatore termico ad acqua. Per il benessere termo-igrometrico sono stati studiati e messi in opera sistemi di distribuzione per diffondere uniformemente l'aria al fronte ed in tutte le postazioni di lavoro.

7.4 Miglioramento zona di lavoro L1

In corso d'opera, considerando i buoni risultati ottenuti con il sistema di presostegno sopra esposto ed al fine di migliorare le condizioni di sicurezza delle maestranze che lavorano in avanzamento, sono state eliminate le due perforatrici in L1 ed è stata montata una passerella traslante sulle medesime slitte delle due perforatrici, modifica effettuata in tempi brevi tra il 23 ed il 27 giugno 2016.

8. Sezioni tipo di scavo e consolidamento concepite durante il corso d'opera

Le condizioni geomeccaniche realmente riscontrate durante lo sviluppo dei lavori hanno indotto l'ATI alla formulazione di nuove sezioni tipo di scavo e consolidamento per fornire un'adeguata risposta a condizioni dell'ammasso roccioso non previste durante le fasi progettuali.

8.1 Sezione tipo F3c_1

La sezione tipo denominata F3c_1 è stata implementata quando lo scavo del Cunicolo ha raggiunto la pk 1+265 circa, a partire dalla quale hanno iniziato a manifestarsi distacchi e splaccamenti, legati principalmente all'assetto a basso angolo della scistosità rilevata nella tratta, e la formazione di cunei rocciosi non intercettabili dalla sezione tipo di progetto F3c.

La nuova sezione adotta un passo longitudinale dei bulloni, realizzati nella zona di lavoro L1, pari a 0,90 m in luogo di 1,80 m delle altre sezione tipo di consolidamento con bullonatura di progetto. Inoltre, considerando le condizioni generali di media fessurazione dell'ammasso in cui è stata eseguita, a vantaggio di sicurezza ogni 1,80 m è stata installata una centina leggera UPN 120, avente lo scopo di ridistribuire su più chiodi l'eventuale carico dei cunei.

8.2 Sezioni tipo FMV, FE e FK

Le tre sezioni tipo denominate FMV, FE, FK sono state messe a punto per far fronte ai descritti fenomeni di distacco di blocchi di roccia di dimensioni anche importanti (fino a circa 1 m³), soprattutto in calotta immediatamente a ridosso del fronte. Durante l'avanzamento, a partire circa da p.k. 3+200, l'ammasso, pur presentando un buon indice di qualità RMR, è apparso interessato da famiglie di discontinuità (F4b) che, associate all'elevato carico geostatico ed alla scistosità a basso angolo e direzione sub parallela all'andamento del Cunicolo, sono risultate la principale causa di numerosi ed estesi distacchi di roccia che hanno coinvolto buona parte della calotta ed in alcuni casi il settore superiore dei paramenti. Inizialmente l'avanzamento è avvenuto mettendo in opera pannelli di centina (2HEB 120/50 cm) posizionati con interasse longitudinale variabile da 50 cm (Sezione tipo F5) a 100 cm (Sezione tipo F4). Il montaggio di dette pannellature su tutto il contorno della galleria ha implicato velocità medie di avanzamento modeste e conseguenti ricadute negative sul cronoprogramma dei lavori. Sono state quindi definite nuove sezioni tipologiche con lo scopo di contrastare efficacemente i fenomeni di distacco di roccia in calotta, con tempistiche di messa in opera minori rispetto alle sezioni con pannellature, mantenendo al contempo adeguati margini di sicurezza per le maestranze. La sezione tipo che ha dato i risultati migliori e che è stata impiegata per la quasi totalità dello scavo a partire circa da p.k. 4+800 è la FMV. Come riportato al

paragrafo 8.1, essa è costituita da centine circolari HEB 120 ubicate su tutto il contorno del cavo a passo 1,35 m ed è associata al sistema di presostegno della calotta costituito da barre metalliche inserite in apposite tasche saldate al di sotto dello scudino .

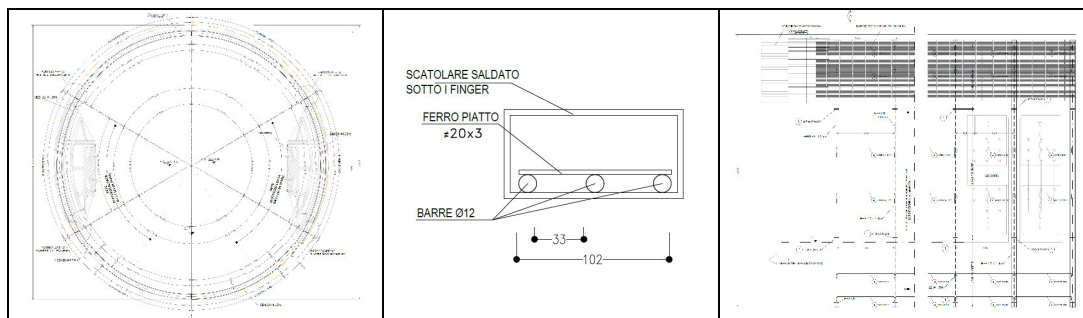


Figura 16. Sezione tipo FMV – Sezione trasversale (a), particolare sistema di presostegno del cavo (b) e sezione longitudinale (c)

In aggiunta alla sezione FMV sono state progettate due ulteriori sezioni tipo “linear plate”, denominate FE e FK, costituite da pannelli metallici messi in opera solamente nel settore di calotta, ove sono attesi i fenomeni di instabilità. Nello specifico la sezione FE è impiegabile in un contesto di scavo con calotta generalmente instabile, mentre l'applicazione della sezione FK è prevista in un contesto di locale instabilità in calotta che non coinvolga i settori superiori dei paramenti. Entrambe le suddette sezioni tipo sono costituite da tre pannelli metallici di larghezza 0,9 m e altezza 0,08 m a coprire un arco di calotta pari a circa 120°. E' previsto che i pannelli per la sezione tipo FE siano supportati da centine chiuse HEB 120 con passo longitudinale 1,35 m, mentre per la sezione tipo FK siano ancorati alle reni mediante bulloni Swellex.

8.3 Sezioni tipo F4_1 e F5_1 per contrastare fenomeni di rockburst

Le due sezioni tipo denominate F4_1 e F5_1 sono state definite per essere messe in opera in un contesto geomeccanico potenzialmente suscettibile di rockburst. In Progetto Esecutivo per l'avanzamento nelle suddette condizioni si erano previste delle sezioni tipologiche che prevedevano la messa in opera dalla postazione L1 della fresa di bulloni di tipo Yielding, caratterizzati da elevata deformabilità e capacità di assorbimento energetico. Durante l'avanzamento dello scavo per ragioni di sicurezza delle maestranze sono state smontate le bullonatrici presenti in zona di lavoro L1. Tale circostanza ha reso inapplicabili le sezioni con bullonatura, comportando la necessità di valutare ed individuare sezioni alternative per contrastare gli eventuali fenomeni di decompressione violenta che si dovessero verificare in galleria. Si è pertanto proceduto a studiare e verificare delle nuove sezioni tipo per contrastare i suddetti fenomeni violenti, che non contemplino la messa in opera di bulloni, ma che garantiscano prestazioni comparabili con le sezioni tipo di progetto sopra richiamate. Sono state quindi dimensionate le sezioni tipo denominate F4_1 e F5_1, che riprendono le geometrie ed il passo dei pannelli di centina che compongono le sezioni tipo F4 e F5, già previste in progetto, costituiti da due centine HEB 120/0,5 m, adattandole alle specifiche esigenze dettate dall'impiego in contesti potenzialmente soggetti a fenomeni di decompressione violenta. In particolare sono stati rinforzati i nodi di contatto tra i pannelli e saldati elementi di irrobustimento in diversi punti lungo lo sviluppo del pannello. Inoltre, il diametro delle barre in acciaio ubicate in calotta è stato aumentato da 12 mm a 16 mm. Le sezioni F4_1 e F5_1 risultano applicabili rispettivamente in un contesto di decompressione violenta lieve e medio/intensa. La seguente tabella riassume, per le sezioni tipo in oggetto, l'entità dei fenomeni (con relativo indice di danno), il range di copertura in cui essi sono attesi, le velocità di espulsione dei blocchi (nei due scenari previsti in progetto) e l'energia dei fenomeni attesi.

Tabella 3. Sezioni tipo F4_1 e F5_1 – Tabella riepilogativa dei dati progettuali

Entità del fenomeno atteso	Indice di danno Di (σ_{max}/σ_{ci})	RMR	Altezza di copertura H (m)	Velocità di espulsione blocchi v (m/s)	Velocità di espulsione blocchi v (m/s)	Energia associata all'evento E (kJ/m ²)	Sezione tipo conseguente
				Scenario Progetto	Scenario Sfavorevole		
Lieve	0.25 - 0.5	61-70	≤ 2000	1	1.5	< 5	F4_1
Medio	0.5 - 0.75	>70	1100 – 1700	2	3	5 - 10	-
Intenso	0.75 - 1	>70	> 1700	3	5	10 - 25	F5_1

Le pannellature sono state verificate mediante modelli di calcolo agli Elementi Finiti non lineari, in cui i carichi sono stati determinati sulla base delle energie associate all'evento riportate nella precedente tabella. Le due figure seguenti riportano rispettivamente un esempio dei risultati ottenuti dalle analisi in termini di sollecitazioni nelle centine metalliche e un grafico in cui, sulla curva sforzi-deformazioni dell'acciaio utilizzato, sono riportate le massime tensioni nelle centine per diversi valori di energia associata all'evento di decompressione violenta.

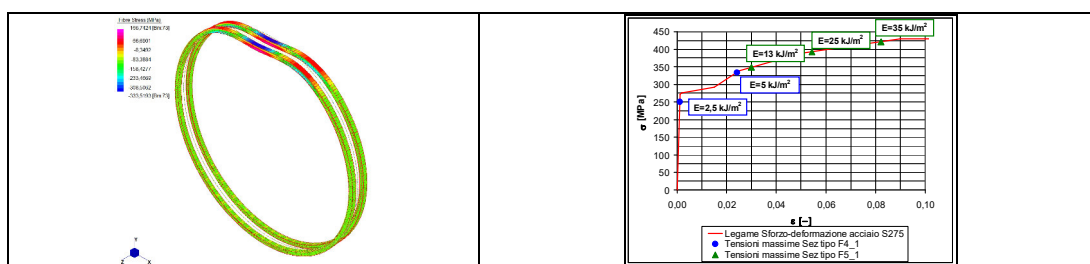


Figura 17. Sezione tipo F4_1 e F5_1 – Esempio di risultati delle analisi – Stato di sforzo (a), grafico sforzo deformazione (b)

Per illustrare le caratteristiche prestazionali in termini energetici delle sezioni tipo in oggetto, nel diagramma richiamato in Figura 18 sono riportate le energie complessive per metro quadrato di superficie del cavo per gli scenari di progetto e per tutte le condizioni analizzate. Allo scopo sono riportate le curve velocità di espulsione-energia rilasciata per diversi spessori del blocco di roccia soggetto a fenomeni tensionali (0,2 m ÷ 1,6 m), a cui sono associate le massime energie assorbibili per metro quadrato da ciascuna delle sezioni tipo. Nei diagrammi l'entità dei fenomeni viene classificata in accordo con quanto proposto da Kaiser et al., 1996.

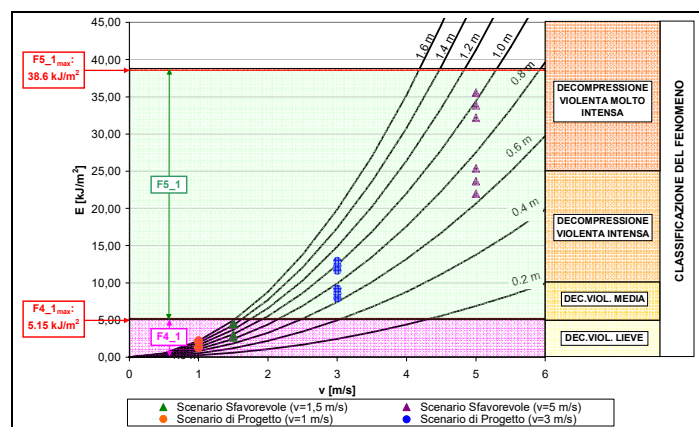


Figura 18. Sezioni tipo F4_1 e F5_1 - Scenari di Progetto e Sfavorevole - Curve velocità di espulsione/energia rilasciata.

9. Sistema di monitoraggio microsismico

Il monitoraggio microsismico nella fase di scavo del Cunicolo sotto coperture superiori ai 1.000 m ha come scopo principale l'individuazione degli eventuali fenomeni di rockbursting. L'impianto di monitoraggio è consistito inizialmente in accelerometri triassiali a paramento con interdistanza pari a 50 m. L'acquisizione dati è in continuo, con l'analisi e la rappresentazione dell'accelerazione di picco ogni 5 minuti, sia per singolo asse installato che per vettori risultanti per ogni posizione di installazione. Durante le fasi di scavo, a seguito del verificarsi del fenomeno di rockburst del 21/12/2015 (misurato dall'impianto microsismico a oltre 1.500 m di distanza dal punto di rilascio violento), sono state introdotte, come descritto nei paragrafi seguenti, diverse implementazioni volte sia ad una migliore comprensione dei fenomeni relativi ai microtremori, sia all'analisi dell'energia generata dalla testa fresante ed alle interazioni con l'ammasso roccioso (ovvero alla caratterizzazione della rigidità dell'ammasso stesso).

9.1 Layout di impianto

Il layout originale dell'impianto (Fig.19_a) ha comportato l'installazione di accelerometri triassiali a paramento ogni 50 m fino a progressiva 5700 m circa, per poi essere incrementato a 25 m nella tratta successiva con coperture superiori ai 1700 m. A partire dal mese di giugno 2016, in una prima fase (Fig.19_b) sono state installate n.2 sezioni di misura mobili, poste a 15 e 30 m circa di distanza dal fronte di scavo, costituite da 3 accelerometri triassiali ciascuna (paramenti dx e sx e calotta). Una ulteriore implementazione (Fig.19_c) ha previsto, dal mese di novembre 2016, l'installazione di una sezione di misura posta immediatamente a tergo dello scudo (ovvero a circa 7 m dal fronte) costituita da due accelerometri triassiali installati sui due paramenti.

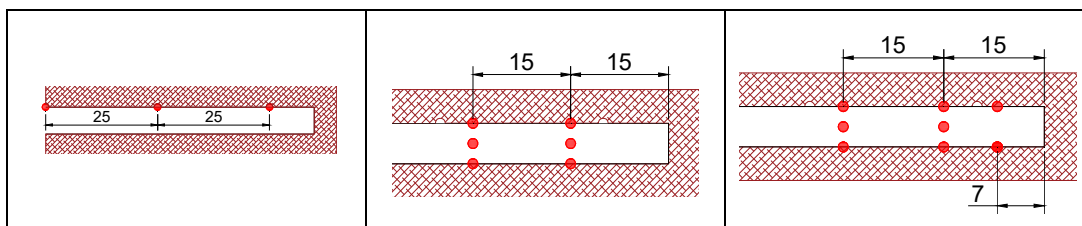


Figura 19: Layout dell'impianto – Originale (a), giugno 2016 (b), novembre 2016 (c)

L'impianto prevede unità di acquisizione dati ad elevata dinamica e capacità di campionamento, mediante unità standard, installate ogni 8 accelerometri a paramento, ed un'unità dedicata per acquisizione dati al fronte di scavo installata all'esterno della cabina della TBM. Gli accelerometri (a larga banda a partire dalla DC) sono collegati alle unità di acquisizione mediante cavi schermati e connessioni di tipo militare al fine di garantire il miglior signal/noise ratio. Le unità di acquisizione provvedono sia alla digitalizzazione del dato, sia alla fase di preprocessing (analisi statistica nel dominio temporale e delle frequenze). Tutte le unità sono connesse alla rete di trasmissione dati presente nel Cunicolo mediante switch lan/fibra ottica. Le unità di acquisizione dati poste al fronte sono connesse alla rete dati mediante antenne wireless. I risultati del pre-processing eseguito direttamente on board vengono automaticamente trasmessi ogni ora su server esterno (FTP) e tutte le unità di acquisizione sono direttamente gestibili da remoto con possibilità di download delle complete time-history di acquisizione. Le ulteriori fasi di processing sono successivamente gestite da server esterno collegato al medesimo server FTP.

9.2 Analisi su mappe spettrali continue

L'analisi dei dati relativi all'evento del Dicembre 2015 ha evidenziato che durante le fasi di scavo è possibile identificare:

- una componente spettrale “tonale primaria” pressoché costante legata all’energia impressa dalla testa fresante all’ammasso roccioso (Fig.20_a);
- componenti tonali secondarie a frequenze superiori alla componente primaria relative a emissioni acustiche precedenti l’innesco di fenomeni di rilascio di energia (Fig.20_b);
- componenti a frequenza variabile generate dall’energia riflessa da discontinuità oltre il fronte di scavo (Fig.20_c).

Nella Figura 20_b è ben visibile come a partire da circa 12 ore prima dell’evento di rilascio tensionale del 21/12/2015 si sia sviluppata una componente tonale a frequenza maggiore rispetto a quella generata dalla testa fresante.

Tale tipo di analisi, al di là dei possibili sviluppi in termini predittivi, risulta ovviamente maggiormente caratterizzante rispetto alle più semplicistiche analisi in termini di numeri di eventi nell’unità di tempo. L’analisi in termini spettrali permette infatti una disamina più completa sugli effettivi contenuti energetici dei fenomeni vibratorii acquisiti in un ambito fortemente caratterizzato da vibrazioni di origine antropica (azione della testa fresante, vibrazioni della TBM e tutte le altre operazioni correlate alla fase di scavo). La finalizzazione del monitoraggio microsismico in termini di analisi e gestione del rischio ha previsto quindi il processing in near real time tramite refresh dell’evoluzione delle mappe spettrali ogni 5 minuti, che permette la continua analisi dell’ammasso nei primi 5 diametri dal fronte di scavo (zona di maggior rischio per i rilasci tensionali). La visualizzazione di componenti tonali secondarie continue in alta frequenza durante le fasi di scavo è visualizzata, tramite monitor dedicato, all’operatore in cabina TBM e su postazioni remote.

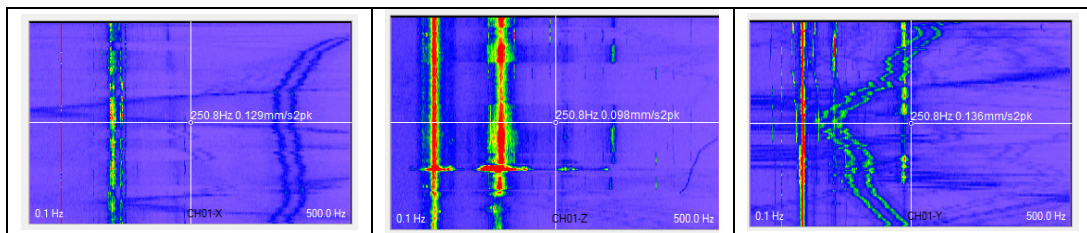


Figura 20: Analisi dei dati – Componente spettrale “tonale primaria” (a), componenti tonali secondarie a frequenze superiori (b), componenti a frequenza variabile (c)

9.3 Analisi dei fenomeni di attenuazione dell’energia generata dalla testa fresante

Da ultimo è stata implementata l’analisi dei dati acquisiti dagli accelerometri al fronte di scavo mediante il calcolo dell’accelerazione root mean square (A_{rms}) e dei valori di rapporto di tale parametro tra accelerometri omologhi (stessa posizione relativamente alla sezione di scavo) posti a distanze crescenti dal fronte di scavo (terne al fronte e coppia prossima alla posizione dello scudo). Il parametro accelerazione RMS su singole finestre di acquisizione adiacenti (nel presente caso di durata pari a 5 minuti) restituisce l’evoluzione nel tempo del contenuto energetico della vibrazione.

L’attenuazione del parametro A_{rms} risulta essere funzione della rigidità dell’ammasso: tanto più l’ammasso è rigido e tanto più l’energia applicata all’ammasso dalla testa fresante si trasmette senza attenuazioni lungo la galleria già scavata. Non essendo per motivi logistici possibile quantificare l’energia alla sorgente (interna alla camera di scavo), viene calcolata l’attenuazione del fenomeno vibratorio indotto dalla testa fresante come rapporto tra i valori di A_{rms} misurati dalle 3 sezioni costituite da accelerometri installati a differenti distanze dalla sorgente.

Il parametro così ottenuto fornisce indicazioni in tempo reale sulla rigidità dell’ammasso, ossia sulla capacità dell’ammasso di attenuare o meno le perturbazioni vibrazionali indotte dallo scavo. Tanto maggiore è l’energia trasmessa con la distanza, tanto più rigido è l’ammasso scavato, che risulta quindi potenzialmente più soggetto a fenomeni di decompressione violenta. Pertanto tale parametro, correlato con i dati geomeccanici e quelli caratteristici di resistenza meccanica della roccia, fornisce indicazioni sulla maggiore o minore suscettibilità dell’ammasso stesso a fenomeni di rockburst.

10. Produzioni di scavo

Le attività propedeutiche allo scavo del Cunicolo hanno avuto inizio il 16 aprile 2012. Lo scavo è cominciato il 22 gennaio 2013 ed è proseguito fino alla pk 0+198 con sistema tradizionale. Nell'ottobre 2013, terminato il montaggio in cantiere della TBM, la macchina è stata tralata all'interno della tratta già eseguita.

Il 14 novembre 2013 ha avuto inizio lo scavo meccanizzato.

Nei primi 6/7 mesi di lavori (novembre 2013 – luglio 2014) le produzioni sono state piuttosto limitate a causa delle difficoltà di scavo derivanti dall'elevata resistenza ed abrasività dell'ammasso (Gneiss Aplitici).

Tra ottobre 2014 e aprile 2015 si sono avute discrete produzioni mensili (raggiungimento della progressiva Pk 3+050 circa il 30/04/15), in particolare tra febbraio 2015 ed aprile 2015 si sono registrati massimi avanzamenti mensili pari a oltre 300 m. Tra luglio 2015 e marzo 2016 sono state riscontrate difficoltà in avanzamento sostanzialmente derivanti dai continui rilasci di blocchi di roccia in calotta ed al fronte, che hanno costretto ad applicare supporti con centine metalliche a sezione completa (raggiungimento della progressiva Pk 4+640 circa il 31/03/16). Dall'aprile 2016 sino alla fine di novembre 2016 la produzione è aumentata (raggiungimento della Pk 6+512 il 30/11/16) per il miglioramento delle caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso scavato e la conseguente applicazione di sezioni di supporto più "leggere" e quindi più veloci da mettere in opera. Oltre a quanto sopra riportato si richiamano alcune implementazioni che si sono rese necessarie nel corso dell'avanzamento e che hanno influito sui tempi di scavo a causa del necessario fermo macchina, come la fornitura e posa del sistema di rilancio (booster) del nastro alla Pk 4+000 circa ed il potenziamento dell'impianto di ventilazione e climatizzazione della galleria (temperatura della roccia nella stazione termometrica a pk 6+450 pari a 45°C). Di seguito è riportato il grafico in cui è indicata, mese per mese, la percentuale di utilizzo della TBM (intesa come rapporto tra il tempo effettivamente dedicato allo scavo ed il tempo totale a disposizione) dall'inizio dei lavori al mese di ottobre 2016.

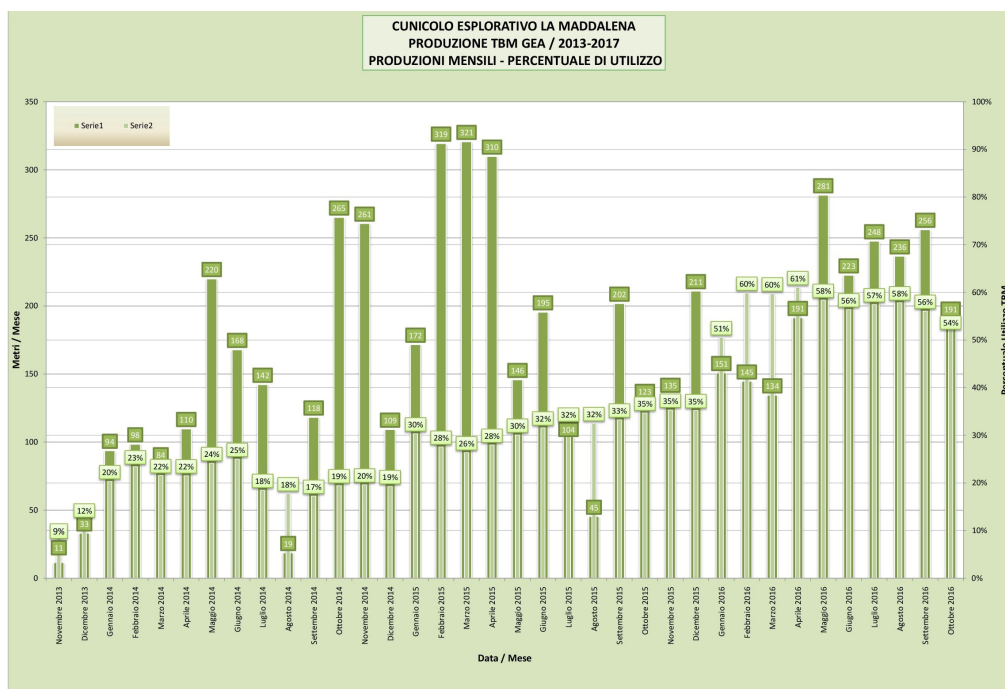


Figura 21: Percentuale di utilizzo della TBM tra Novembre 2013 e Ottobre 2016

In generale, come precedentemente esposto, si è osservato, fin da coperture relativamente modeste, il distacco di blocchi in calotta che giungevano già dislocati prima di poter mettere in opera i sostegni dalla prima postazione di lavoro. Ciò ha imposto, almeno fino all'ideazione ed alla piena operatività del nuovo sistema di presostegno (barre longitudinali in avanzamento e sezione FMV), il sistematico disgaggio, la riduzione di volume dei blocchi in arco rovescio a mezzo martello demolitore ed il trasporto all'esterno del materiale così prodotto.

Mentre dette problematiche hanno interessato principalmente la calotta, al crescere delle coperture si sono verificati altresì fenomeni di fratturazione del fronte che hanno comportato, a parità di penetrazione, una riduzione dell'energia di scavo ed una maggiore sollecitazione, con conseguenti rotture e necessità di interventi per manutenzione, degli utensili di scavo e del nastro trasportatore. I fenomeni di instabilità descritti hanno avuto un evidente impatto negativo sulla percentuale di utilizzo della macchina e, dunque, sull'avanzamento dello scavo ed hanno imposto la ricerca e l'applicazione di interventi tecnologici volti all'eliminazione o alla riduzione di tali criticità (nuove sezioni di scavo, frantoio con vibrovaglio in postazione L2, ..), oltre all'introduzione del 4° turno di scavo a partire da gennaio 2016.

Tali contromisure hanno nettamente incrementato la percentuale di utilizzo della macchina.

11. Conclusioni

Nel presente contributo sono state presentate le principali attrezzature e le metodologie di scavo e di sostegno adottate per la costruzione del Cunicolo Esplorativo de La Maddalena.

Durante l'avanzamento dell'opera sono state riscontrate alcune criticità che hanno condizionato l'andamento degli scavi con conseguenti ricadute negative sulla produttività del cantiere. Al fine di superare tali criticità si sono apportate alcune modifiche alla macchina di scavo e, conseguentemente, ottimizzate le sezioni tipo di consolidamento. Inoltre, allo scopo di identificare fenomeni relativi al possibile innesco di rockbursting e di caratterizzazione dinamica dell'ammasso in prossimità del fronte di scavo, durante l'avanzamento dell'opera, è stato integrato e potenziato il sistema di monitoraggio microsismico originale, sia in termini di modalità e geometrie di acquisizione dati, sia di processing near real time.

In particolare, per mitigare il fenomeno inatteso del distacco continuo di blocchi di roccia nei primi metri dietro il fronte di scavo, che non permetteva di mettere in opera i sostegni con bullonature dalla prima postazione di lavoro, è stato ideato un sistema di avanzamento che prevede la realizzazione di tasche metalliche all'intradosso dei finger della macchina di scavo, all'interno delle quali inserire, a mano, a mano che la macchina avanza, dei pannelli costituiti da barre metalliche saldate tra loro, accoppiati con specifiche sezioni di consolidamento del contorno.

Con riferimento ai possibili fenomeni di decompressione violenta al contorno del cavo, che dai riscontri in corso d'opera finora acquisiti si profilano comunque di intensità lieve o al più media, si è optato, anche per questioni di sicurezza delle maestranze, per l'applicazione di sezioni tipo che, in luogo delle chiodature yielding, prevedono pannellature metalliche opportunamente rinforzate in corrispondenza dei nodi di contatto tra pannelli ed irrobustite con elementi appositi in diversi punti lungo lo sviluppo del pannello.

Detta soluzione, operativamente più semplice e quindi di più rapida messa in opera, è ritenuta particolarmente valida per garantire, nello specifico contesto geomeccanico del Cunicolo Maddalena ed in relazione alla tipologia di TBM in uso, prestazioni soddisfacenti in termini di contrasto dei possibili fenomeni violenti e, conseguentemente, assicurare adeguate condizioni di sicurezza in fase di scavo.

L'insieme di tali implementazioni, nate da una virtuosa sinergia tra i tecnici delle Imprese Costruttrici e del Gruppo di Progettazione, si è dimostrato molto efficace ed ha permesso importanti miglie in termini sia di produzioni di scavo, sia della sicurezza per le maestranze.

12. References

- A.F.T.E.S. Association Francaise Travaux Souterrains. 1993. Recommandations relatives a la Caracterisation des massifs rocheux utile a l'etude et a la realisation des ouvrages souterrains. Tunnel et Ouvrages Souterrains n.177.
- Bieniawski Z.T. 1984. Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling. Balkema, Rotterdam, pag. 272.
- Bieniawski Z.T. 1989. Engineering Rock Mass Classification, John Wiley & Son.
- Carranza-Torres C. 2004. Elasto-plastic solution of tunnel problems using the Generalized form of the Hoek-Brown failure criterion. Tunneling and Underground Space Technology, Vol.15, n°2, pag 187-213.
- Castelli A., Petrini F. 2015. Identificazione strutturale del comportamento sperimentale di centine innovative per gallerie, IF CRASC '15 III Convegno di Ingegneria Forense – VI Convegno su Crolli, Affidabilità Strutturale, Consolidamento, Sapienza Università di Roma.
- Diederichs M, Kaiser P.K. and Eberhard K.E. 2004. Damage initiation and propagation in hard rock and the influence of tunnelling induced stress rotation. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol.41 n°5, pag 785-812.
- Diederichs M. 2007. Mechanistic interpretation and practical application of damage and spalling prediction criteria for deep tunnelling. Canadian Geotechnical Journal, Vol.44.
- Hoek E. and Brown E.T. 1980. Underground Excavations in Rock. The Institution of Mining and Metallurgy, London, pag.527.
- Hoek E. and Brown E.T. 1997. Practical estimates of rock mass strength. Submitted for publication to the Int. J. Rock Mech. Min. Sc.& Geomech. Abst.
- Hoek E. and Diederichs M. 2006. Empirical estimation of rock mass modulus. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science.
- Hoek E., Carranza-Torres C. and Corkum B. (2002)
Hoek-Brown failure criterion – 2002 Edition. Proc.North American Rock Mechanics Society.
- Hoek E., Kaiser P.K. and Bawden W.F. 1995. Support of Underground Excavations in Hard Rock. Balkema, Rotterdam, pag. 215.
- Kaiser P.K. (1993)
Support of tunnels in burst-prone ground – Toward a rational design methodology. In Rockbursts and Seismicity in Mines, ed. Young, Balkema pag. 13 – 27.
- Kaiser P.K., McCreath D.F., Tannant, D.D. 1996. Canadian rockburst support handbook. Geomechanics Research Centre, Laurentian University, Sudbury.
- Kaiser P.K. Maloney M. Scaling. 1998. Laws for the Design of Rock Support. In Seismicity Associated with Mines, Reservoir and Fluid Injections, ed. Shahriar Talebi, Basel, Boston, Berlin, Birkhäuser Verlag, pag. 415-434.
- Potvin Y and Wesseloo J. 2013. Towards an understanding of dynamic demand on ground support. The Journal of The Southern African Institute of Mining and metallurgy. Vol. 113.
- Paolo Padovese, Andrea Berti, Ivo Pavan, Simone Pavan, Stefano Fiori, Fabio Belotti, Paolo Nava, Achille Sorlini, Mario Patrucco, Davide Labagnara, Claudio Agnese. Atti 33° Congresso Nazionale di Igiene Industriale e Ambientale (2016). Ipotesi di correlazione tra l'esposizione a particolato aerodisperso e silice libera cristallina di addetti allo scavo meccanico di una galleria e dati microclimatici, geologico-geomeccanici e prestazionali di una TBM, ai fini della riduzione del rischio