

Novità nel campo della perforazione computerizzata in sottosuolo

M. Bringiotti⁽¹⁾, H. Neyrand⁽²⁾, F. Vernerey⁽²⁾,

⁽¹⁾GeoTunnel S.r.l., Genoa, Italia

⁽²⁾Robodrill S.A., Genas-Lyon, Francia

ABSTRACT: la Galleria di Base del Brennero è il tunnel che collegherà Innsbruck a Fortezza e consiste nella costruzione di un traforo ferroviario lungo 55 km con copertura massima di 1.600 m. I metodi di scavo utilizzati vanno dal tradizionale al meccanizzato, passando per l'impiego di esplosivo. L'utilizzo di jumbi robotizzati in varie fasi di scavo della Galleria di Base del Brennero sta portando vantaggi immediati nella realizzazione di quest'opera; efficienza e velocità con un limitato intervento dell'uomo durante la fase di perforazione e riduzione dei costi dovuti alla grande precisione dell'operazione sono quelli più evidenti. L'uso di un computer, in una lavorazione ove in precedenza era presente, fondamentalmente, una tecnologia meccanica approssimativa, ora può apportare al progetto un notevole beneficio, che si allinea con le tecnologie moderne e con le sfide del XXI Secolo. USB, Memory card e TCP/IP sono le nuove opzioni con le quali vengono attrezzati i jumbi moderni; queste tecnologie rappresentano lo strumento per chi vuole trarre vantaggi da esse, vantaggi significativi quali rapporti in tempo reale, direzione globale del progetto ed assistenza remota.

1 Introduzione

Dall'introduzione, negli anni '80, della prima attrezzatura computerizzata da perforazione Montabert, progettata per le miniere di carbone, l'uso di macchine automatiche è diventato uno standard in ogni progetto nel quale una galleria sotterranea (e la condizione della consistente lunghezza non è essenziale) deve essere scavata usando la tecnica del “drill & blast”.

I vantaggi immediati, sfruttando l'utilizzo della robotica nel campo del tunnelling, sono:

- Efficienza e velocità con un limitato intervento dell'uomo durante la fase di perforazione.
- Riduzione dei costi dovuti alla grande precisione dell'operazione.

L'uso di un computer, in una lavorazione ove in precedenza era presente, fondamentalmente, una tecnologia meccanica approssimativa, ora può apportare alle Imprese ed ai Responsabili di progetto un notevole beneficio, che si allinea con le tecnologie moderne e con le sfide del XXI Secolo.

Agli inizi degli anni '90 la multinazionale Americana Ingersoll Rand acquisì il controllo della società Montabert; nello stesso periodo la Divisione di Perforazione Computerizzata (prima Montabert e successivamente I.R.) fu venduta ad una nuova Società avente il fine di sviluppare in autonomia tale settore: la Robodrill.

La missione di questa nuova Società è diventata principalmente:

- La progettazione e lo sviluppo di macchine ed impianti dedicati alla perforazione computerizzata di fori da mina.
- La costruzione di tali attrezzature e la fornitura di parti di ricambio e materiale di perforazione.
- La realizzazione di macchine speciali, dedicate a progetti particolari (ad. esempio attrezzature di perforazione in verticale per grandi pozzi atti allo stoccaggio di gas naturali, ecc.).
- Il “service” al parco attrezzature di perforazione da galleria costruite da Montabert prima e da Robodrill dopo.
- Il noleggio di jumbi di perforazione, convenzionali e robotizzati di varie tipologie (ca. 100 unità).
- La conduzione delle macchine noleggiate, essendo in carico alla Robodrill una vasta squadra di operatori e meccanici dedicati a tale funzione (ca. 60 Tecnici operativi, tra operatori e meccanici; solo che 10 ingegneri lavorano nell'ufficio tecnico e R&D).

In Italia sono stati eseguiti diversi lavori quali: la galleria di Morgeux, Prè St. Didier e M.te Bianco per la RAV, Naturno, Stava, Val d'Ega, S. Croce di Badia, Bressanone ed Ora per la Provincia Autonoma di Bolzano, le gallerie autostradali di Bolzaneto, tutte quelle della Catania-Siracusa, varie sulla Salerno-Reggio Calabria, altre gallerie stradali quali Tortolì, Trieste, Trento, Faver, Fabriano, Claviere, Castelnuovo di Garfagnana e gallerie ferroviarie quali il Frejus ed Imperia.

Sono stati eseguiti anche vari lavori all'estero con Società italiane quali ad esempio: la stazione ferroviaria di Montecarlo, le gallerie francesi di Uriol e Petit Brion, una centrale idroelettrica nelle Filippine, la Torino-Lione lato francese, Rabat in Marocco, Faido per il Loetschberg in Svizzera, San Salvador, Ingula in Sud Africa (**Fig. 1**),



Figura 1. Jumbo robotizzato bibraccio cingolato al lavoro per la realizzazione di una galleria in rimonta per il progetto di Ingula in Sud Africa (CMC & IMPREGILO)

Venticinque anni dopo il passo in avanti di Montabert, USB, Memory card e TCP/IP sono le nuove opzioni con le quali vengono attrezzati i jumbi moderni; queste tecnologie rappresentano lo strumento per chi vuole trarre vantaggi da esse, vantaggi significativi quali:

- rapporti in tempo reale,
- direzione globale del progetto ed
- assistenza remota.

2 La genesi delle macchine da perforazione computerizzate

Quando Montabert iniziò lo sviluppo della sua prima macchina da perforazione automatica, l'informatica industriale non aveva niente a che fare con quanto noi conosciamo correntemente.

Il primo Robofore aveva un concetto di computer basato su "un modello di apprendimento sul luogo", ove semplicemente la macchina "imparava" ciò che avrebbe dovuto ripetere nella tappa successiva. Praticamente, l'operatore doveva fare un completo giro di perforazione, muovendo i bracci in ogni posizione del ciclo reale, così il computer era in grado di memorizzare l'intero processo di perforazione, per poi ripeterlo in seguito per ogni ciclo produttivo di scavo. Il foro tracciato manualmente al fronte era necessario solo durante la prima volata, cioè quando la macchina presentava la necessità di memorizzare le corrette posizioni di perforazione. Per la prima volta un operatore era in grado di lavorare muovendo e controllando efficientemente 2 bracci di perforazione contemporaneamente. Malgrado la semplicità di tale operazione, lo sviluppo di questa primordiale tecnologia automatica è stata realmente innovativa nel campo del tunnelling; la mancanza di flessibilità del primo sistema dovette in seguito, chiaramente, richiedere ancora un perfezionamento per varie fasi, al fine di costruire una macchina moderna di perforazione e di successo.

Nel 1990, Montabert presentò la sua seconda generazione di ROBOFORE avente un sistema automatico di controllo dei calcoli. I modelli predefiniti di perforazione furono trasferiti al computer e la macchina divenne in grado di calcolare la posizione di perforazione per ogni braccio.

Il primo Robofore a 3 bracci per la perforazione di gallerie è stato usato nel tunnel alpino di Chamoise in Francia nel 1992. Attrezzato con un'interfaccia grafica e con particolari sensori per i bracci, questo Robofore diede risultati impressionanti tanto che suscitò l'invidia dei Concorrenti che a quel tempo non si erano ancora lanciati in questa nuova avventura tecnologica.

Il sovra spessore medio fu inferiore a 15 cm per un tunnel di sezione di 98 mq (**Fig. 2**), un record pensando alle dimensioni della sezione di scavo ed al fatto che era più di 20 anni fa!

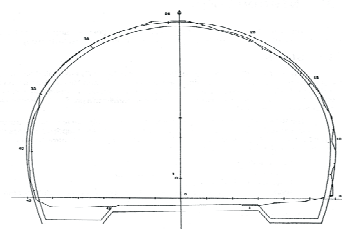
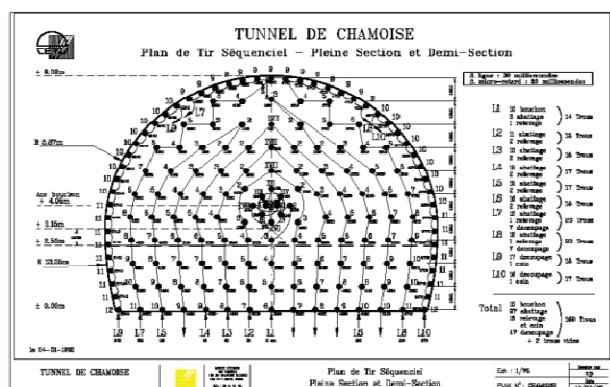


Figura 2. Tipica disposizione dei fori di perforazione e rendering del profilo sparato con indicazioni del sovrascavo

3 La moderna macchina da perforazione computerizzata

Il passo in avanti di Montabert verso la computerizzazione fu conseguente allo sviluppo della Società norvegese Bever Control, la quale testò un innovativo sistema di controllo su di una macchina AMV.

Il sistema di controllo Bever è ancora frequentemente usato da AMV, da North American, dalla società americana specializzata in macchine da perforazione per miniera Reedrill e da Tamrock. Atlas Copco entrò in gioco più tardi, usò anch'essa il Bever ma attualmente sfrutta un sistema ingegnerizzato in casa propria.

La Società Robodrill ha portato avanti lo sviluppo del Robofore, sfruttando l'intero bagaglio tecnico maturato durante gli anni precedenti in Montabert. Tale sistema robotizzato è arrivato oggi alla quinta generazione, raggiungendo elevati standard tecnologici e mostrando ottime doti di sofisticazione, semplicità di utilizzo ed affidabilità, coniugando le esperienze maturate in centinaia di km di gallerie scavate in D&B.

In aggiunta allo specifico hardware di bordo, l'attrezzatura comprende un PC industriale basato su una unità centrale e può essere controllato e gestito anche via Tablet; le macchine da perforazione Robofore sono attrezzate di appositi bracci di perforazione estremamente rigidi ove vengono installati vari sensori di posizione (sui 3 piani di lavoro) ed interfacce Can Bus (**Fig. 3**).

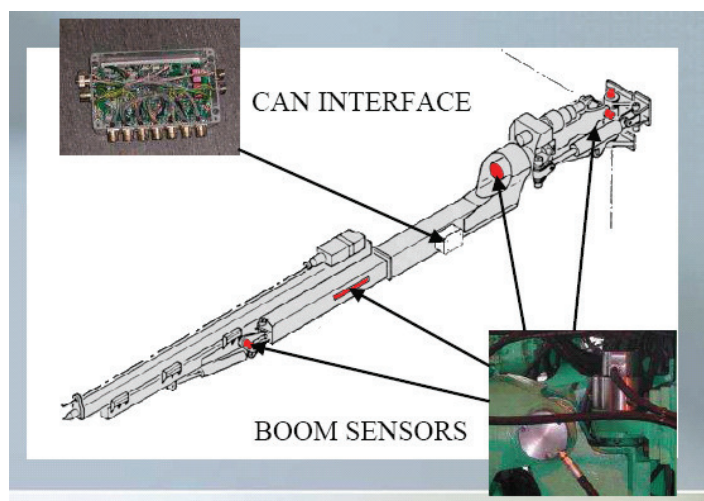


Figura 3. Braccio di perforazione con disposizione dei sensori di posizione e sistema di interfaccia e trasmissione dati Can Bus

La robotica della macchina include anche un software di disegno dei fori di volata, in ambiente WinTP, ed una interfaccia grafica HMI in grado di fornire all'operatore del jumbo un'informazione visiva sulla posizione dei bracci, sull'avanzamento della perforazione, sui tempi di perforazione e su vari dati aggiuntivi quali le pressioni o la velocità di rotazione di ogni perforatrice.

Un notevole vantaggio di tale software è dovuto al fatto che lo stesso è compatibile con Microsoft Window; ciò significa che può essere utilizzato anche tramite un computer standard (**Fig. 4**).

Basandosi sui rapporti geologici, sull'esperienza e sui dati storici, i Tecnici di cantiere possono preparare, controllare e valutare la tipologia di volata e trasferire tutti i dati di input sul jumbo tramite una semplice memory card.

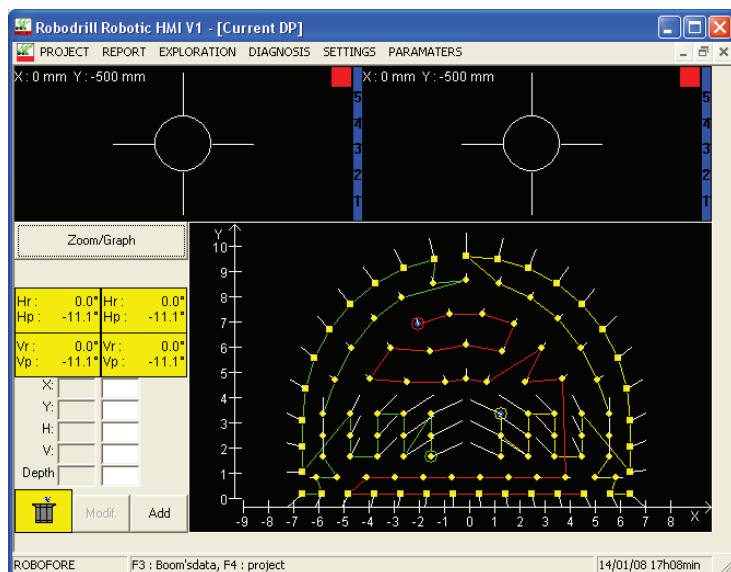
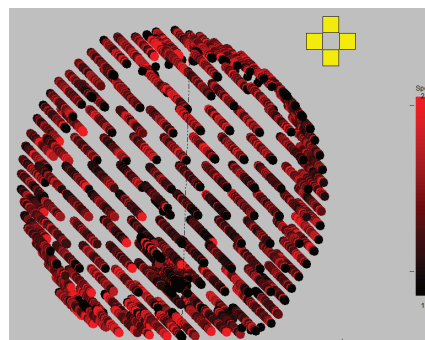


Figura 4. Interfaccia Uomo-Macchina (WinTP) come vista dall'Operatore all'interno della cabina durante la fase di perforazione e rendering 3D della volata eseguita parametrizzata ai dati di resistenza della roccia



4 Gestione della perforazione e reportistica

Per ottenere i migliori risultati dalla fase di perforazione è indispensabile analizzare, e tenere a memoria, il maggior numero di dati possibili e questa funzione ci viene fornita tramite l'utilizzo di un moderno jumbo computerizzato. Il Cliente finale e l'Utilizzatore di tali attrezzature si aspettano da esse non solo la semplice e sola capacità di perforare; anche la macchina deve essere uno strumento integrato attrezzato per un lavoro globale e per la sua amministrazione (Fig. 5).

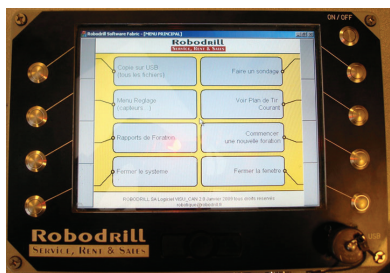


Figura 5. Moderno, semplice e robusto hardware di comunicazione e controllo della macchina di perforazione

Per questa ragione il sistema automatico deve offrire anche varie altre opzioni, quali:

- Un efficiente raccogliitore di dati geologici ed un software specificatamente dedicato all'analisi dei dati geomeccanici.
- Un software di perforazione automatica ed un sistema di anti-collisione dei bracci in grado di permettere l'utilizzo del jumbo anche da parte degli operatori meno esperti.
- Un software di gestione ed amministrazione della macchina, finalizzato all'ottimizzazione dell'uso del materiale di perforazione.
- Un sistema di assistenza remota che può collegarsi direttamente alla Casa Madre, ove i Tecnici sono in grado di risolvere le problematiche in tempo reale.
- Un vero e proprio sistema integrato di "Global Project Management" (Fig. 6).

Da sottolineare anche il fatto che tramite i più evoluti sistemi è possibile registrare e controllare vari parametri relativi al ciclo produttivo, quali:

- velocità istantanee di perforazione,
- pressioni e portate del circuito idraulico,
- inclinazione dei fori eseguiti e

restituire graficamente report, anche tridimensionali, dell'intera "storia" di ogni volata.

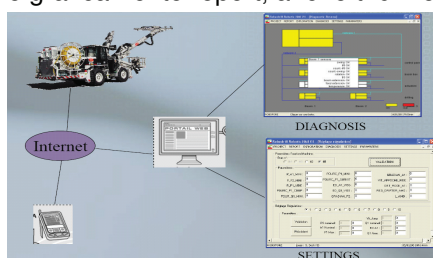


Figura 6. L'assistenza remota è in grado di migliorare notevolmente l'affidabilità del jumbo

5 La tecnologia del drill & split

Nei progetti “urbani”, in presenza di materiali particolarmente resistenti, non sono infrequenti le problematiche legate al metodo di esecuzione dello scavo. Può essere che l'utilizzo di martelli idraulici demolitori o di frese puntuali sia una metodologia inefficiente, così come improponibile l'utilizzo di TBM da roccia a causa delle limitate lunghezze di scavo o delle geometrie variabili. Nel caso, frequente, che l'unico sistema possibile sia il drill & blast, problematiche di vibrazioni indotte da tale metodologia potrebbero impedire l'utilizzo.

Da questa considerazione si è sviluppata una tecnica combinata che prevede l'utilizzo di jumbi di perforazione robotizzati in grado di eseguire efficacemente perforazioni di fori ravvicinati (a volte secanti) paralleli tra di loro in modo da realizzare sia un pretaglio al contorno del profilo da demolire che un alleggerimento del corpo centrale che dovrà essere rimosso.

Può venir in seguito utilizzato un sistema denominato “rock splitter” che prevede l'inserimento all'interno dei fori realizzati, tramite un'ideale macchina, di un cuneo che è spinto idraulicamente in modo da spezzare la roccia al contorno del foro eseguito; tale operazione eseguita ciclicamente permette di demolire l'ammasso roccioso senza l'utilizzo dell'esplosivo. Questo ciclo di lavoro non è affatto banale, dovendosi garantire precisione assoluta di perforazione, secondo un schema ben definito, e velocità di esecuzione.

Robodrill ha sviluppato tale tecnica progettando un braccio speciale, corredato dei cinematismi e degli automatismi e controlli necessari, in grado di coniugare in automatico sia la fase di perforazione che, se richiesta, quella di “rock splitting”. Tale sistema viene installato sia su jumbi gommati che cingolati, ed è stato utilizzato con successo in progetti particolari, ad esempio nello scavo degli imbocco in pozzo (**Fig. 7**) o per gallerie di linea come nel caso del down town di Montecarlo (**Fig. 8**).



Figura 7. Utilizzo del rock splitter in pozzo



Figura 8. Doppia perforatrice assemblata su Robofore per l'esecuzione di fori ravvicinati

I vantaggi di tale sistema, rispetto all'esecuzione di questa lavorazione con un jumbo convenzionale combinato ad un escavatore atto alla gestione del rock splitter, sono:

- utilizzo di un solo mezzo in galleria, limitando i costi ma soprattutto le problematiche che potrebbero insorgere in presenza di sezioni ristrette ove il fattore “spazio di lavoro” riveste un'importanza fondamentale,
- possibilità di utilizzo di macchine molto limitate in larghezza,
- è possibile operare contemporaneamente con 2 rock splitter (sfruttando almeno 2 dei bracci di perforazione),
- grazie ai bracci telescopici ed ai loro cinematismi di rotazione è possibile raggiungere tutte posizioni di lavoro necessarie (a volte impossibile con un escavatore convenzionale).

6 Le perforatrici super veloci

Ulteriore innovazione tecnologica nella perforazione per D&B è stata l'introduzione sul mercato di una nuova serie di perforatrici, chiamate ad “alta frequenza” di battuta e/o “super veloci”.

Montabert ha ingegnerizzato un particolare modello, chiamato HC 110, in grado di generare potenze di impatto da 30 a 66 kW, con portate da 100 a 160 l/min e pressioni a 160/200 bar. La velocità di rotazione è variabile nel range 0-340 rpm con frequenza anche superiori ai 74 Hz, con un peso della macchina di 200 kg.

Le velocità di perforazione in granito possono raggiungere i 3,5 m/minuto, con bit da 51 mm (**Fig. 9**), ed 1,6 m/min con bit da 89 mm e questi dati sono stati confermati da varie esperienze in Cantiere.

Esempi di velocità istantanee di perforazione misurate sono:

- Tunnel Violay, Francia, roccia eterogenea da soffice a dura, 150-250 MPa, 2,8-3,2 m/min
- Tunnel De la Croix Rousse, roccia da soffice a dura, 150-250 MPa, 2,8-4,0 m/min
- Hong Kong MTR C821, granito compatto, 150-200 MPa, 2,5-2,8 m/min
- Miniera El Teniente, Cile, roccia dura, 200 MPa, 2,4-2,8 m/min; in quest'ultimo progetto, in una sezione da 9 x 8 m, il tempo medio di perforazione per 124 fori profondi 5,8 m è di ca. 2 h e 20 min.

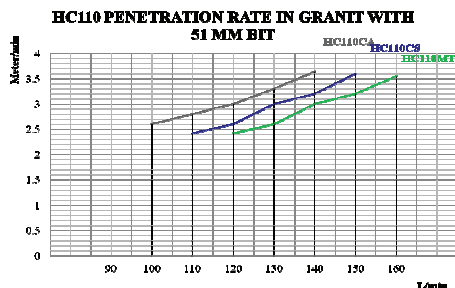


Figura 9. Velocità di perforazione in granito

Lo sviluppo di tali perforatrici, in combinazione all'evoluzione della meccanica e dell'elettronica applicata alle macchine di perforazione moderne, riesce oggi giorno a garantire performance operative e qualitative veramente impensabili anni or sono.

7 Il progetto Gautrain a Johannesburg, Sud Africa

Il sistema di trasporto ferroviario pubblico del Sudafrica è oggetto di un ampio ammodernamento; il collegamento AV del Gautrain è il progetto più importante; è così ora possibile coprire gli 80 km tra Pretoria e Johannesburg in meno di 40 minuti, ad una velocità di 160 km/h.

Il progetto Gautrain, valore di ca. 1,5 di Euro, ha due importanti rami: uno Nord-Sud tra Johannesburg e Pretoria ed uno Est-Ovest tra la zona industriale di Sandton e l'aeroporto internazionale di OR Tambo (**Fig. 10**). L'opera comprende 16 km di tunnel, a singolo ed a doppio binario, tra le stazioni di Marlboro e Johannesburg. Lungo il tracciato, oltre alle tre principali stazioni di Johannesburg, OR Tambo e Pretoria, troviamo altre sette stazioni. Tre sono in sotterraneo, quattro in superficie e le rimanenti sopraelevate.

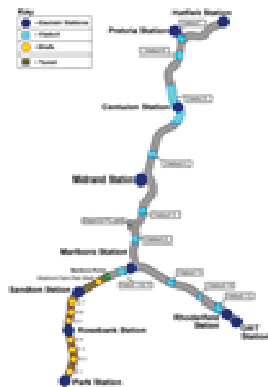


Figura 10. Lay out dell'intero progetto

La costruzione di Gautrain è iniziata a Settembre 2006. Due settimane prima del campionato del Mondo di Calcio FIFA, che è iniziato l'11 Giugno 2010, è stata aperta la tratta tra l'aeroporto di OR Tambo e la stazione di Sandton, comprese le due stazioni al suo interno ed il centro operativo di Midrand. La durata dei lavori per la prima fase è stata di 45 mesi.

Questa è una tratta importantissima per l'intera opera, infatti la maggior parte dei tifosi di calcio che ha visitato il paese è arrivata all'aeroporto di OR Tambo e da qui si è diretta verso gli alberghi. La costruzione della seconda fase, comprendente le tratte Sandton-Johannesburg centro e Pretoria-Midrand, è terminata nel 2011.

Il progetto Gautrain è un'ATI in PPP tra il governo della provincia di Gauteng e la concessionaria Bombela, composta da Bombardier Transportation, Bouygues Travaux Publics, Murray & Roberts e Strategic Partners Group. L'ATI Bombela Civils (CJV) è incaricata della costruzione del progetto ed è composta da Bouygues TP (45%), Murray & Roberts (45%) e Strategic Partnership Group (10%).

7.1 Geologia ed idrogeologia

L'estremità meridionale del tunnel si trova a Johannesburg ed è situata in una sequenza di terreni sedimentari (formazione di Witwatersrand, dove si trova l'oro in Sud Africa) formata da uno strato spesso e inclinato di scisti, quarziti e conglomerati, che caratterizza 2.900 m di tunnel e costituisce il 18% del materiale scavato. Il livello di falda è a 10-40 m sopra la calotta del tunnel. Le altre gallerie si trovano in un complesso granitico che forma un affioramento quasi circolare tra Johannesburg e Pretoria. A seconda della profondità si trova granito alterato altamente o completamente disgregato nella zona di Rosebank e moderatamente disgregato o sano nei dintorni di Sandton e Marlboro. Nel granito il livello di falda è a 10-30 m sopra la volta. Localmente, l'idrogeologia viene modificata da faglie e varie strutture tettoniche, generalmente associate a grandi venute d'acqua come nella zona di Sandton o come tra Park ed il pozzo di emergenza E2.

7.2 Metodologie applicate e D&B

La maggior parte degli scavi viene effettuata tramite drill & blast, tranne in una tratta di 3 km, con terreni sciolti e saturi d'acqua, dove si è utilizzata una TBM ed in una tratta di 1 km, con rocce disgregate, ove si sono impiegati infilaggi.

La lunghezza totale dei tunnel, escluse le stazioni e le tratte in cut & cover, è di 16.172 m, di cui 13.295 m scavati con drill & blast (5.864 m a doppio binario e 7.431 m a singolo binario) e con una sezione a ferro di cavallo. Il tunnel a singolo binario ha una dimensione di 6 x 6 m (altezza) con una sezione media di scavo pari a 35 m² ed è dotato di un passaggio pedonale laterale. Il tunnel a doppio binario ha una dimensione di 10,8 x 6,2 m (altezza) con un muro centrale di divisione ed un passaggio pedonale su entrambi i lati.

I tunnel si sono scavati, nella parte iniziale del progetto, da nove diversi punti di accesso, al fine di rispettare il cronoprogramma che prevedeva l'apertura della tratta tra Sandton e l'aeroporto prima della Coppa del Mondo di calcio nel 2010 e della parte restante di linea l'anno successivo. La sezione in sotterraneo comprende tre stazioni in profondità (Park, Rosebank e Sandton), sette pozzi di emergenza (a 16-85 m di profondità) ed un pozzo principale temporaneo di costruzione (Mushroom Farm Park). La copertura sopra la volta del tunnel varia tra 15 m e 100 m.

In totale, all'inizio, sono stati 12 i fronti di scavo dei tunnel da realizzare con metodo drill & blast. La procedura operativa ha previsto che le vibrazioni dovute alle esplosioni ed i cedimenti intorno agli edifici ed ai cantieri fossero monitorati 24 ore su 24.

Per quanto riguarda i tunnel a binario singolo, ogni fronte è stato dotato del proprio parco macchine, comprendente un jumbo classe Robofore completamente computerizzato (**Fig. 11**), dotato di due bracci per la perforazione di 4 m al fronte e per la fase di bullonatura.

Nei tunnel a doppio binario sono stati invece utilizzati jumbi della classe Robofore, completamente computerizzati a tre braccia, per eseguire perforazioni sino a 6 m di profondità al fronte, e jumbi convenzionali della classe Pantofore a due braccia (**Fig. 12**) sfruttati sia per perforazioni a 4 m di profondità che per l'esecuzione delle fasi di bullonatura.

Per gli altri lavori, come lo scavo dei pozzi, sono stati forniti vari jumbi della classe Pantofore mono-braccio, aventi cinematismo particolari studiati appositamente per le operazioni in geometrie particolarmente ristrette.

Figura 11. Jumbo Robofore 3 b

Figura 12. Jumbo convenzionale 2 b con cestello



L'avanzamento medio di scavo in drill & blast è stato molto alto (40-45 m/settimana nei tunnel a doppio binario e 30-35 m/settimana nei tunnel a binario singolo).

In tali condizioni abbastanza gravose, causate da lavorazioni di carattere urbano (con accessi da pozzo o in ambienti fortemente urbanizzati) ed in materiali eterogenei ma particolarmente duri ed abrasivi, nei primi 2 anni di lavoro sono stati realizzati 10 km di gallerie interamente scavati in D&B.

7.3 Difficoltà incontrate

La dimensione del progetto e la serrata programmazione per aprire la linea tra le stazioni OR Tambo e Sandton, a soli 45 mesi dall'inizio dei lavori della prima fase, sono state le principali sfide del Gautrain. L'ATI Bombela ha deciso di aumentare la propria capacità, impiegando equipaggiamenti supplementari ed aprendo pozzi aggiuntivi, in modo da rispettare il cronoprogramma per l'apertura al traffico del progetto, malgrado alcuni ritardi. Tra i motivi di ritardo, l'evidente difficoltà di gestire 43 cantieri aperti contemporaneamente, l'aver trovato un fiume sotterraneo vicino alla stazione Park, la geologia complessa ed articolata del Sud Africa e la difficoltà di reperire personale qualificato locale.

Un'ulteriore problematica è stata causata dal fatto che la sezione del tunnel a singolo binario fosse troppo piccola per utilizzare le attrezzature disponibili normalmente sul mercato, essendo queste ultime larghe almeno 2 m e per la maggior parte fabbricate su ordinazione.

Ulteriore tema da considerare sono state le condizioni difficili del terreno. Lo scavo è avanzato molto lentamente nelle zone con bassa copertura ed in granito duro, abrasivo ma completamente decomposto sotto il livello di falda del Rosebank settentrionale.

I principali problemi si sono incontrati nei pressi della stazione Sandton, con terreni molto poveri e con infiltrazioni di acqua, oppure molto duri (sino a 400 MPa).

7.4 Stazioni in sotterraneo

La costruzione delle due stazioni in sotterraneo di Park e Rosebank è stata eseguita a cielo aperto; le strutture di contenimento dello scavo sono state realizzate con paratie chiodate (**Fig. 13**) e rivestite a spritz beton a Park ed all'interno di pareti di pali a Rosebank.



Figura 13. Sistema di perforazione automatico Robodrill CPA, assemblato su escavatore CAT 320, adibito alla chiodatura delle paratie di realizzazione delle stazioni in sotterraneo. L'attrezzatura presenta anche un depolverizzatore ed è insonorizzata; sta funzionando con gestione tramite operatore a terra.

I due binari del treno e le piattaforme dedicate ai passeggeri si trovano al piano inferiore. Le sale macchine, l'atrio adibito agli utenti e la struttura della biglietteria sono state posizionate all'entrata. Un importante solaio realizzato al terzo piano chiude la "scatola" della stazione ed è stata coperto con 2-5 m di materiale idoneo al fine di ripristinare le strade ed il livello del terreno come erano prima della costruzione.

Le due stazioni misurano 165 m x 20 m e sono entrambe collegate al tunnel tramite tratte in cut & cover; vicino alle stazioni sono stati inoltre costruiti parcheggi per le auto a Park (8 piani) ed a Rosebank (3 piani).

La stazione di Sandton è una stazione sotterranea con tre binari e tre piattaforme per i passeggeri. La sua costruzione è avvenuta tramite due pozzi principali: il pozzo sud, 22 m x 20 m x 55 m di profondità, ed il pozzo nord 60 m x 22 m x 50 m di profondità. Entrambi i pozzi sono collegati tramite una caverna di 10 m x 10 m x 85 m che comprende due binari con 5 m di altezza. Un'altra caverna a singolo binario, misure 8 m x 8 m, è collegata alla caverna principale tramite 5 by-pass. Il pozzo nord è stato utilizzato per l'entrata passeggeri ed il pozzo sud come sala macchine. Di fianco alla stazione è stato progettato un parcheggio sotterraneo.

7.5 Pozzi

Per ragioni di sicurezza, nel tratto a binario unico, il tunnel è collegato alla superficie ogni chilometro tramite i pozzi di emergenza (da E1 a E7); quasi tutti i pozzi sono stati scavati mediante attrezzature speciali di perforazione (**Fig. 14**) atte ad essere calate all'interno degli stessi ed a lavorare in ambienti con geometrie particolarmente complesse e ristrette.

Il pozzo meridionale E1 presenta un diametro finito di 5,25 m, una profondità di 80 m ed è realizzato con metodo drill & blast in scisti e quarziti.

Il pozzo E2 è stato allargato sino a 9 m di diametro per consentire le operazioni di perforazione del tunnel. E' profondo 50 m ed è stato scavato con centine e piastre di acciaio nella sezione superiore di terreni sciolti e con il metodo drill & blast nella sezione inferiore di quarzite.

I pozzi E3 ed E4 sono collegati al tunnel scavato con TBM. Hanno 9,5 m di diametro e sono profondi rispettivamente 21 m e 16 m. Sono scavati in granito decomposto e sotto il livello di faglia nel caso di E3. Per la costruzione del pozzo E3 è stato necessario abbassare il livello della falda freatica.

Il pozzo E5, come l'E2, è stato allargato sino a 9 m di diametro per consentirne lo scavo. E' profondo 60 m e viene scavato con metodo drill & blast nel granito.



Figura 14. Jumbo speciale con cinematismi a ginocchiera per il calaggio all'interno del pozzo, idoneo ad eseguire perforazioni a geometrie variabili in ambienti ristretti

Il pozzo E6 ha 6 m di diametro, è profondo 73 m ed è scavato nel granito con il metodo raise boring.

Il pozzo E7, come l'E2 e l'E5, è stato allargato sino a 9 m di diametro (per le operazioni di scavo) ed è profondo 66 m. E' realizzato con il metodo drill & blast nel granito.

Mushroom è un pozzo temporaneo rettangolare (12,60 m x 22 m x 38 m di profondità) per lo scavo verso Sandton e Marlboro ed è stato riempito a lavori terminati.

Il portale di Marlboro è collegato ad una sezione in cut & cover lunga 78 m ed ospita le sale impianti e di ventilazione.

8 Hong Kong

L'utilizzo della tecnologia del drill & split è stata ampiamente comprovata nell'esecuzione di alcuni lavori nel centro della metropoli di Hong Kong.

Per esempio, nel progetto C901, in sezioni da 36 m², tipicamente sono stati necessari 200 fori ($i=400$ mm) della lunghezza di ca. 1,5 m, eseguiti con un jumbo computerizzato a 2 braccia in 6 h (in granito); il doppio rock splitter ha garantito una produttività di ciclo medio pari a 1 m/g in tale ristretta sezione. Sono stati eseguiti pertanto sia pozzi che perforazioni di gallerie di linea che di banchina ed in allargo: nella **Fig. 15** è possibile vedere il lay out dimensionale della procedura operativa con coppie di macchine dedicate alla perforazione ed allo "splitting".

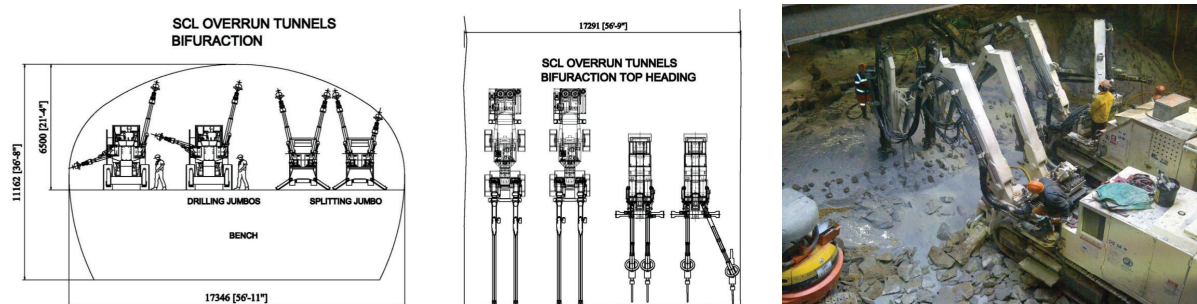


Figura 15. Lay out operativo della perforazione in sezione di allargo e l'operatività in pozzo

9 Il Trentino Alto Adige ed i progetti di miglioramento della sua viabilità

Il Trentino Alto Adige ha adottato una attiva politica per garantire un accesso stradale più sicuro a valli famose come la Val d'Ega e la Val Badia e ad una viabilità meno impattante come con la Trento Nord-Rocchetta, tratto Zambana Vecchia-Svincolo sulla SS 43 per Fai della Paganella (**Fig. 16**). Le numerose strade e gallerie in costruzione sottolineano l'importanza delle nuove infrastrutture per la popolazione ma anche per l'economia ed il turismo. Le maggiori novità sono state (o sono in partenza) sulla SS12 e sulla SS241 in Val d'Ega così come sono stati programmati futuri progetti sulla SS38 a Merano (per non parlare della realizzazione della Tangenziale di Merano completata a fine 2013).

9.1 La circonvallazione di Bressanone

La circonvallazione di Bressanone tra il km 477+390 e 479+900 della SS 12 dell'Abetone e del Brennero, comprende la galleria Sud di 1.225 m e la galleria Nord di 770 m. La sezione di scavo circolare è pari a 127 m², quella rettangolare è di 92 m². Per la galleria Sud è stata prevista la realizzazione di un cunicolo pilota (lunghezza 600 m, diametro 3,80 m), 2 finestre (lunghezza 78 m e 85,5 m), un camino di ventilazione alto 62 m ed un pozzo, da utilizzarsi come via di fuga. Per la galleria Nord sono invece stati realizzati un camino di ventilazione alto 15 m ed una via di fuga, direttamente all'aperto.

La geologia consiste in materiali sciolti su tutto il tracciato, tranne alcuni brevi tratti in ammasso roccioso. Sui 4 fronti di scavo, l'avanzamento è stato a piena sezione con mezzi meccanici o con esplosivi nei tratti rocciosi dove l'Impresa PAC ha utilizzato con successo un Jumbo Robodrill a due braccia serie Robofore (**Fig. 17**).

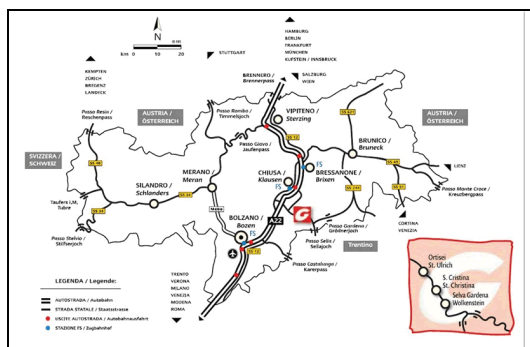


Figura 16. La nuova viabilità in Trentino



Fig. 17. Robofore 2b

9.2 SS 241 in val d'Ega

Il secondo lotto della SS 241 per la val d'Ega, nella provincia di Bolzano, comprende la galleria Campegnio che serve a mettere in sicurezza la seconda parte della strada. La lunghezza totale del lotto è di circa 1.600 m. Dal portale del tunnel Cornedo (1.148 m), già costruito ed in esercizio da circa un decennio, poi l'attuale tracciato all'aperto è stato protetto da una galleria paramassi lunga 36 m; è stato anche previsto un ponte di collegamento con il portale nord del tunnel, avente una lunghezza di 1.427 metri che comprende un cunicolo di fuga (questo è lungo 118 m, sezione circolare allungata nel senso verticale, dimensioni scavo di circa 5,3 x 5,3 m). Alla fine del tunnel il progetto prevede la costruzione di un altro ponte molto più corto (circa 13 m) con galleria paramassi per una lunghezza complessiva di 100 metri misurati dal portale della galleria naturale. La galleria artificiale corre nei primi 13 m sopra il ponte, poi poggia sul terreno.

Il tracciato della galleria passa attraverso ignimbriti della piattaforma porfirica altoatesina. La roccia presenta una fessurazione regolare nel senso verticale ed una più irregolare nel senso orizzontale. Ciò nonostante, la qualità della roccia può definirsi buona. I lavori sono stati eseguiti dall'ATI tra la PAC e la Gasser.

Lo scavo è iniziato il 5 Aprile 2006 con la prima volata di esplosivo del portale a monte. Lo scavo presenta una sezione a ferro di cavallo (larghezza massima/diametro di circa 12 m ed altezza in chiave di circa 8 m), con utilizzo del metodo NATM (New Austrian Tunneling Method) cioè in sezione divisa (calotta e poi strozzo). Lo scavo è avvenuto su tre fronti (da uno degli imbocchi e su due fronti utilizzando la via di fuga come accesso); è stato utilizzato un jumbo robotizzato a 3 braccia classe Robofore ed un jumbo Pantofore a 2 braccia.

9.3 Il collegamento Trento Nord – Rocchetta e la galleria di Mezzolombardo

Il collegamento viario Trento Nord-Rocchetta rappresenta un nuovo asse viabilistico che si sviluppa in destra orografica della valle dell'Adige tra Trento e Mezzolombardo con la funzione di sgravare la SS 12, che corre invece in sinistra orografica della valle attraversando gli abitati e che risulta quotidianamente congestionata dal traffico. La concretizzazione di questo asse viario avviene mediante la realizzazione di tre lotti funzionali denominati:

- A. Lotto 1 - Collegamento della zona industriale di Lavis con l'autostrada del Brennero e l'interporto doganale di Trento.
- B. Lotto 2 - Collegamento stradale Trento Nord-Rocchetta, tratto Lavis-Zambana Vecchia lungo circa 2,6 km con tre ponti sul fiume Adige, sul fiume Noce e sulla Fossa Maestra.
- C. Lotto 3 - Collegamento stradale Trento Nord-Rocchetta, tratto Zambana Vecchia-Svincolo sulla SS 43 per Fai della Paganella.

L'opera è oggi praticamente terminata nella sua globalità. L'appalto del lotto 3 era stato aggiudicato nel 2006 all'ATI composta dalla mandataria Collini e dalla mandante Cossi Costruzioni, che aveva redatto il progetto esecutivo. L'importo complessivo del progetto aggiornato è di circa 126 milioni di Euro, di cui 89,5 milioni per i lavori. L'importo dei lavori di scavo e del rivestimento di prima fase ammonta a 23,44 milioni di Euro.

Il tratto di 8,8 km mette in collegamento la nuova rotatoria, in prossimità del Ponte Zambana Vecchia del lotto 2, con la SS 43 della Val di Non, all'altezza dello svincolo per la SP 64 di Fai della Paganella, bypassando l'abitato di Mezzolombardo con una serie di opere, tra cui la galleria Rupe Rocchetta sotto il Monte Corno è la più importante. Il lotto 3, per i primi 3.400 metri, segue l'argine sinistro del fiume Noce, quindi inizia la grande curva che, attraverso il ponte Ululone, permette il superamento del fiume Noce in corrispondenza del Biotopo "La Rupe" e porta poi all'imbocco Sud della nuova galleria naturale, in corrispondenza del quale la strada diventa a quattro corsie, due per senso di marcia. L'imbocco Sud della galleria si trova ai margini della zona industriale, mentre l'imbocco lato Nord è in vicinanza dell'incrocio della SP 63 di Fai della Paganella con la SS 43 della Val di Non. All'uscita Nord della galleria, la strada torna a due corsie e va a collegarsi direttamente con la SS 43 della Val di Non. Ai lati di tale tratto è stato ricavato uno svincolo a servizio delle correnti veicolari dirette e provenienti dalla zona nord di Mezzolombardo e dall'Altopiano della Paganella.

A Marzo 2001, l'ATI composta da Giolai Costruzioni e De.Mo.Ter, su progetto dello Studio Geingegneria, aveva realizzato un foro pilota per le indagini geologiche utilizzando una TBM Wirth. La geologia lungo il tracciato della galleria Rupe Rocchetta è composta da dolomie Ladine per i primi 500 m, da argille per 400 m, da dolomie di Raibl per 350 m ed infine dalle dolomie principali per 2.460 m.

La galleria Rupe Rocchetta è a doppio fornice a traffico unidirezionale ed è progettata per sopportare un carico di oltre 20 mila veicoli al giorno. Lo scavo, a sezione piena, è stato avviato su due fronti, nord e sud. I lavori ai due imbocchi lato Trento, ove il materiale era fortemente degradato, sono stati di competenza di Collini, mentre quelli agli imbocchi opposti di Cossi.

Quando il progetto fu modificato prevedendo la seconda canna, si decise di utilizzare la perforazione del tunnel esplorativo, che avrebbe dovuto fungere da galleria di emergenza, come canna Sud.

La lunghezza della canna Nord (in direzione della SS 43) è di 3.633 m in naturale più 71,90 m in artificiale, mentre la canna Sud (in direzione Trento) presenta una lunghezza complessiva di 3.655 m in naturale, più 72 m in artificiale. In entrambe le canne la pendenza massima è del 1,63%.

Le due canne sono collegate da tre by-pass carrabili e 11 pedonali, con funzione di vie di fuga in caso di necessità. I by-pass pedonali sono interdistanziati di 250 m, quelli carrabili di 1.000 m. Ogni 600 m sono state realizzate le piazzole di emergenza, 10 per ogni senso di marcia. La larghezza della piattaforma stradale in galleria unidirezionale è pari a 8 m. Il diametro di scavo libero è di 11 m.

In questo progetto Robodrill ha fornito nel cantiere di Cossi n° 2 jumbi robotizzati della classe Robofore a 3 braccia; il servizio ha anche compreso l'addestramento continuo di 2 operatori jumbisti, la presenza di un meccanico fisso in cantiere, la supervisione del cantiere 24 h al giorno, 7 giorni alla settimana occupandosi anche di gestire l'intera ricambistica e l'approvvigionamento del materiale di perforazione per l'intero progetto.

Sono stati scavati ca. 2 x 2,4 km di galleria in 10 mesi, comprensivi di by pass e cameroni, con una media di ca. 400-500 m di galleria realizzata al mese, produzione che sono assimilabili allo scavo di una TBM molto performante (soprattutto pensando alla sezione di scavo di quasi 100 m²). E' stato veramente un successo!

10 Galleria di Base del Brennero: il cunicolo esplorativo Periadriatica e le opere propedeutiche nell'ambito di Mules

Questo importante lavoro, commissionato da BBT, è stato vinto dal Consorzio Brennero 2011, costituito da PAC, Obersoler, COGEIS ed Implanzia; è partito a regime alla fine del 2011.

Si sta lavorando per attraversare la faglia Periadriatica (dove si incontrano la placca tettonica europea e quella africana) lunga circa 400 m, costruendo una serie di gallerie, caverne (trattasi di cameroni di grandi dimensioni ove verranno assemblate le TBM per lo scavo della galleria di linea, **Fig. 18**) e cunicoli, con funzioni principalmente logistiche e di sicurezza, in cui si articola il Posto Multifunzionale di Trens, per un totale di ca. 4,2 km. Tutte le lavorazioni partono dalla discenderia di Mules.

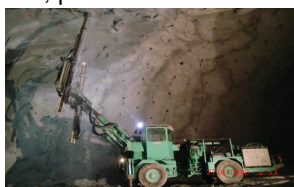


Figura 18. Chiodatura del camerone di lancio delle TBM; l'esecuzione dello scavo avviene per fasi parzializzate

Gli scavi dei cunicoli e delle gallerie vengono eseguiti di norma a sezione piena. In alcuni casi, quando previsto dal progetto o durante l'esecuzione per motivi attinenti alle condizioni geomeccaniche dei terreni attraversati dallo scavo, l'avanzamento viene realizzato a sezione parzializzata e l'Impresa procede al completamento della sezione ricorrendo allo scavo preliminare a campioni dei piedritti, quindi dello strozzo ed infine dell'arco rovescio.

La scavo dei cameroni è stato previsto con sezione parzializzata.

Nella zona di faglia, in presenza di materiali scadenti, si è proceduto ad eseguire perforazioni in avanzamento con inserimento di "lance" suborizzontali, eseguite con barre autoperforanti, ed eventuali rinforzi del nucleo tramite barre iniettate in VTR.

In **Fig. 19** e **20** sono visibili i tracciati ed i jumbi robotizzati previsti in fase operativa.

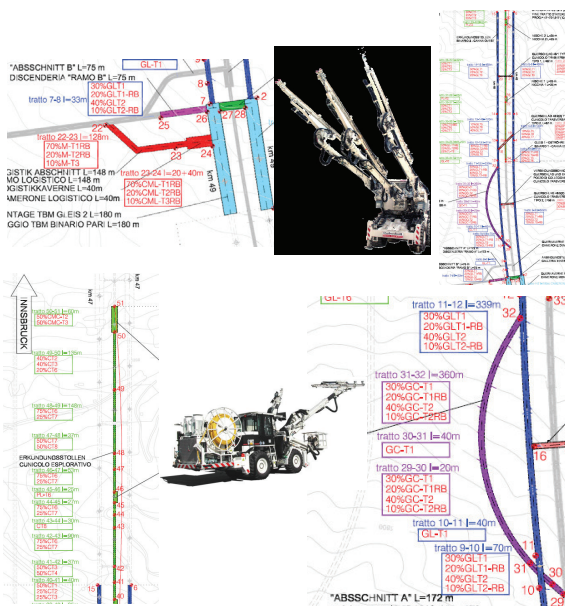


Figura 19. Robofore 3b in discenderia Ramo B (rosa - 11x9 m), galleria di innesto (verde - 14,5x12,6 m), camerone di montaggio TBM (azzurro - 22x18 m), camerone logistico (rosso - 20x18 m), ramo logistico (rosso - 11x9,5 m) e sezione di linea (blu - 8,5x8 m)

Figura 20. Robofore 2b in cunicolo esplorativo (verde - 6x6 m), cunicolo trasversale di collegamento (vedi schema sopra, salmone - 8x6 e 4,3x5 m) e galleria di collegamento cunicolo canna ovest (porpora - 8x5,5 m)

11 Bibliografia

- Bringiotti M., *Perforazione completamente robotizzata*, Quarry & Construction, Apr. '98, Edizioni Pei, Parma
- Bringiotti M., Bringiotti G., Frisell R., *Advanced tunnelling in rock: accurate round drilling in underground excavation using fully computerized AMV jumbos*, Aites-Ita 2001 World Tunnelling Congress, Patron, Bologna
- Bringiotti M., *Guida al Tunnelling, l'evoluzione e la sfida*, 2003, Edizioni PEI, Parma
- De Villeneuve F., Chanclou J.B., Bringiotti M., Parodi GP., *Robodrill: perforazione automatica e sua gestione. Alcune esperienze in Italia ed all'estero*, Convegno "Le gallerie stradali ed autostradali - Innovazione e tradizione", SIG, Bolzano, Viatic 05/03/2009
- Bringiotti M., De Villeneuve F., *La perforazione automatica ieri e oggi*, Quarry & Construction Dic. '09, Edizioni Pei,