

Evidenze raccolte durante lo scavo della prima canna della Galleria Sparvo, mediante “Martina” la TBM-EPB più grande al mondo

Pietro LUNARDI
Giovanna CASSANI
Martino GATTI
Rocksoil SpA

Nell'ambito dei lavori di realizzazione della “Variante di Valico” dell'Autostrada Al Milano-Napoli, nel tratto tra Sasso Marconi (Bologna) e Barberino del Mugello (Firenze), la costruzione della galleria “Sparvo” rappresenta una sfida unica nel mondo del sotterraneo, sia per il difficile contesto geologico-geomeccanico da affrontare, sia per l'ampiezza dello scavo che si sta realizzando utilizzando per la prima volta al mondo una TBM EPB da oltre 15 m e mezzo di diametro. L'articolo che segue, nel quale gli autori illustrano con ricchezza di dati e preziose informazioni l'esperienza sin qui maturata nello scavo della galleria, è la naturale prosecuzione di quanto già pubblicato nel n. 98.

Il difficile contesto geologico-geomeccanico da affrontare, specialmente nei tratti interessati dalle Argille a Palombini (APA) e dai depositi di versante, e le conseguenti incertezze riguardo alla regolarità e ai valori di produzione ottenibili, hanno spinto l'Impresa TOTO, esecutrice dei lavori, in accordo con la Committente “Autostrade per l'Italia”, a considerare la modalità di scavo meccanizzato mediante impiego di una TBM del tipo EPB.

Tale scelta, in considerazione dell'alta probabilità del verificarsi di fenomeni di “squeezing” nel tratto ad alte coperture delle APA, con ricoprimenti fino a 100-120 m, ha indotto, in fase progettuale, ad un dimensionamento conservativo delle caratteristiche tecniche e dei parametri operativi della macchina, attraverso una accurata analisi delle condizioni tenso-deformative nell'ammasso durante le fasi di scavo, in accordo con l'approccio ADECO-RS (Lunardi 2008). In particolare, il valore di spinta massima esercitabile dalla TBM è stato determinato, nell'ambito di un'analisi di rischio, con l'obiettivo di evi-

tare il blocco della macchina a causa delle pressioni esercitate dall'ammasso scavato, anche in condizioni geotecniche particolarmente severe (Gatti 2011). Si è provveduto ad una attenta caratterizzazione geotecnica delle APA, mediante indagini in situ e prove di laboratorio, e si è presa in considerazione, attraverso simulazioni numeriche, anche una possibile riduzione dei parametri di resistenza e di deformabilità degli ammassi per tenere conto di aspetti difficilmente schematizzabili in fase progettuale, connessi alla possibile presenza, lungo il tracciato, di zone di faglia o scorrimento caratterizzate da scadenti condizioni geomeccaniche, di condizioni anisotrope locali o di stress tettonici. L'insieme di queste analisi progettuali ha consentito da un lato di definire valori appropriati per i principali parametri operativi della TBM, quali la pressione in camera di scavo e la conseguente spinta in avanzamento in funzione dei vari contesti geotecnici attraversati, dall'altro di attrezzare la TBM in modo da potere fare fronte anche a situazioni particolarmente gravose, vo-

lendo garantire un avanzamento continuo senza interruzioni.

Sebbene gli approfondimenti condotti in fase di progetto consentissero di affrontare lo scavo della galleria con estrema fiducia, nella primavera 2011, durante l'allestimento per la partenza della TBM, cresceva l'aspettativa per quale sarebbe stato l'andamento delle attività di scavo, quali problematiche si sarebbero manifestate in corso d'opera e, soprattutto la curiosità di sapere se “Martina” avrebbe mantenuto la promessa di produzioni medie di 10-12 m / giorno, che l'aveva fatta preferire alla modalità di scavo in tradizionale. L'avvio della TBM è avvenuta nel mese di agosto 2011 attraverso un tratto di galleria artificiale ed un breve tratto di galleria pre-scavata in tradizionale, avendo programmato di iniziare lo scavo della prima canna della galleria nel mese di settembre 2011 e concluderlo il 27 luglio 2012. Nel seguito, dopo una breve descrizione delle principali caratteristiche della galleria Sparvo e del contesto geologico attraversato, si illustreranno in dettaglio l'andamento degli avanzamenti e le principali evidenze raccolte in fase di scavo, in termini di parametri operativi e di risposta deformativa rilevata dal sistema di monitoraggio predisposto.

1. Inquadramento del progetto e contesto geologico-geomeccanico

Ad inquadramento del progetto, si riporta che la galleria Sparvo presenta una lunghezza di circa 2600 m, con pendenze

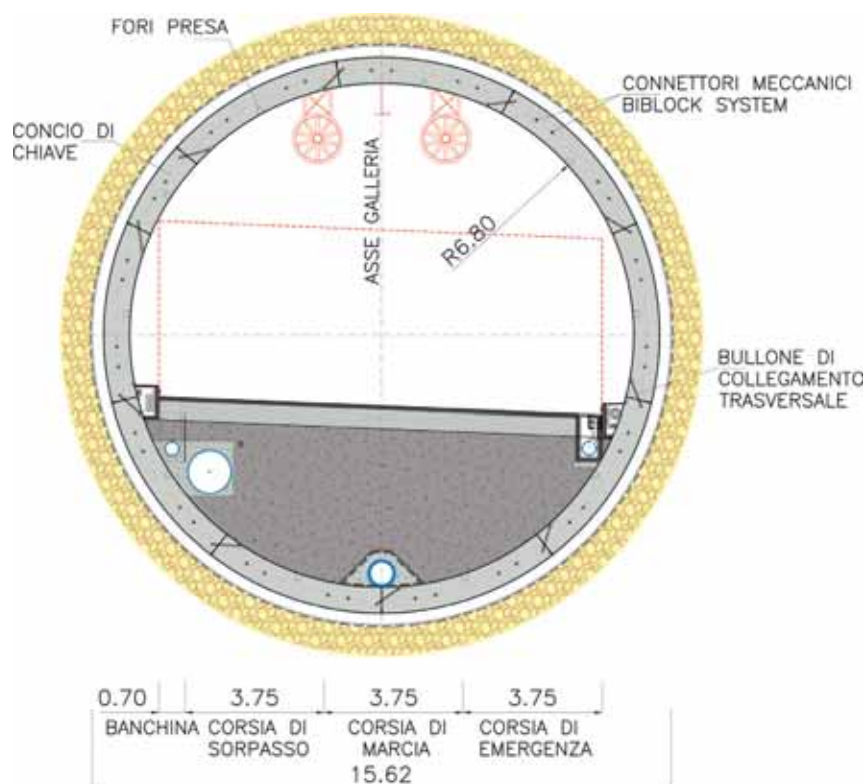


Fig. 1 - Schema sezione trasversale.

altimetriche inferiori al 4% e raggi di curvatura planimetrici tra i 1400 ed i 3000 m. E' costituita da due canne, poste ad interasse variabile tra un minimo di 30 m ed un massimo di 70 m. Ciascuna canna ha un diametro interno netto di 13.60 m, in grado di ospitare una carreggiata autostradale costituita da 2 corsie di marcia da 3.75 m ed una corsia di emergenza, anch'essa di 3.75 m, più banchine laterali di 0.25 m in destra e 0.70 m in sinistra e marciapiedi di 0.60 m. Le due canne sono collegate da by-pass pedonali ogni 300 m e by-pass carrabili ogni 900 m; gli apprestamenti per la sicurezza sono completati da nicchie di

sicurezza ogni 150 m poste sul lato destro della carreggiata. Il rivestimento definitivo viene realizzato mediante anelli in conci prefabbricati (9 più la chiave) di profondità pari a 2.0 m e spessore pari a 0.70 m, realizzati in calcestruzzo con armatura ordinaria. La tenuta idraulica del rivestimento è fornita da guarnizioni in EPDM, disposte lungo l'intero perimetro dei conci, in grado di garantire una tenuta fino a 10 bar in presenza di un offset di 20 mm. I collegamenti tra i conci sono costituiti da 2 bulloni metallici posti lungo i giunti longitudinali, e da 4 connettori ubicati lungo i giunti trasversali, tra due anelli contigui.

L'allineamento dei conci, in fase di montaggio, è inoltre favorito dalla presenza di una barra guida. Il gap anulare tra l'estradosso dei conci, di diametro pari a 15.0 m, ed il diametro di scavo, pari a 15.62 m (area di scavo pari a circa 190 m²) viene riempito, in fase di avanzamento della TBM, mediante miscela bicomponente con accelerante di presa. In **Figura 1** si riporta uno schema della sezione trasversale della galleria, con indicazione della tipologia di rivestimento. Da un punto di vista geologico, a partire dall'imbocco sud, lato Firenze, la galleria naturale attraversa dapprima un versante poco acclive, caratterizzato da depositi di natura argilloso-limoso, di spessore mediamente superiore ai 10 m, per poi interessare il substrato costituito dalla Formazione delle "Argille a Palombini" (APA) fino a coperture di 30-35 m; si tratta di argille ed argilliti, intensamente deformate, con inclusi calcarei (rapporto C/A <<1) o arenacei, in strati sottili. Il passaggio alla Formazione delle "Arenarie dello Scabiazza" (SCA) avviene per contatto tettonico; tale formazione è costituita da arenarie con interstrati di siltiti ed argilliti. Una serie di contatti tettonici determinano dapprima il passaggio alla Formazione delle "Brecce Argillose Poligeniche" (BAP), costituite da argille con clasti di varia natura litologica, poi nuovamente alle "Arenarie dello Scabiazza" ed alle "Argille a Palombini". In questo secondo settore di galleria ove sono presenti le APA, i ricoprimenti raggiungono i 120 m e sono presenti abbondanti corpi, da metrici ad ettometrici, di "Ofoliti" con vario grado di fatturazione, costituiti da Brecce di Basalti, Gabbri e Serpentiniti; in questa zona sono inoltre presenti in superficie, fino a profondità di 30-50 m, i depositi della frana di Sparvo. Infine, sempre un contatto per faglia porta alla Formazione di "Monte Venere" (MOV), costituita da un'alternanza di arenarie con

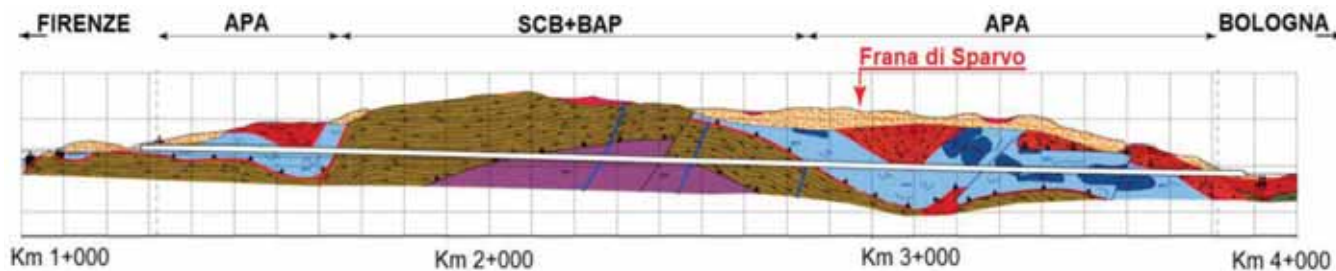


Fig. 2 - Galleria Sparvo - Profilo geomeccanico.

interstrati costituiti da argilliti, siltiti, marne argillose, fino a 25 m dall'imbocco nord, lato Bologna, dove, lungo un versante mediamente acclive, sono presenti depositi detritici di natura limoso sabbiosa. La ricostruzione del profilo stratigrafico (Fig. 2) è stata effettuata sulla base delle evidenze raccolte in diverse campagne geognostiche, dal 1985 ad oggi, per un totale di più di 70 sondaggi e indagini sismiche. Non si è rilevata la presenza di una falda continua lungo la galleria, anche se alcuni campioni di APA hanno evidenziato un importante contenuto d'acqua; locali venute d'acqua sono state rilevate in particolare nei contatti inter-formazionali.

2. Evidenze geologiche raccolte in fase di scavo

La verifica delle condizioni geologiche lungo il tracciato della galleria è stata condotta, in corso d'opera, in modo diretto attraverso il controllo continuativo del materiale estratto transitante sul nastro di smarino ed attraverso ispezioni periodiche in camera di scavo, condotte in concomitanza di fermi per la verifica dello stato di usura degli utensili di scavo e per la loro sostituzione. Si è impiegato inoltre il sistema diagnostico "BEAM System", che si è rilevato un utile strumento di indagine in avanzamento. Tale sistema consente la rilevazione indiretta delle caratteristiche fisico-meccaniche dei materiali attraversati, mediante investigazioni di tipo geoelettrico impiegando elettrodi collocati in corrispondenza della testa fresante. Il "BEAM System", tramite emissioni di impulsi elettrici, fornisce dati relativamente a due parametri: il valore di resistività dei terreni, misurata in Ωm , ed il valore di porosità efficace, espressa in %, indicativa della percentuale di vuoti rispetto al volume del terreno analizzato. Questi dati, raccolti in avanzamento, hanno principalmente consentito di verificare in anticipo la posizione dei contatti tra le principali formazioni incontrate dalla TBM, in particolare modo tra le APA e le formazioni flyschiodi, specie le SCB. La prima formazione, infatti, è caratterizzata da elevata saturazione e scarsa permeabilità (APA), mentre la seconda (SCB) da valori di permeabilità secondaria medio-alta (derivante dal grado di fratturazione dell'ammasso) e

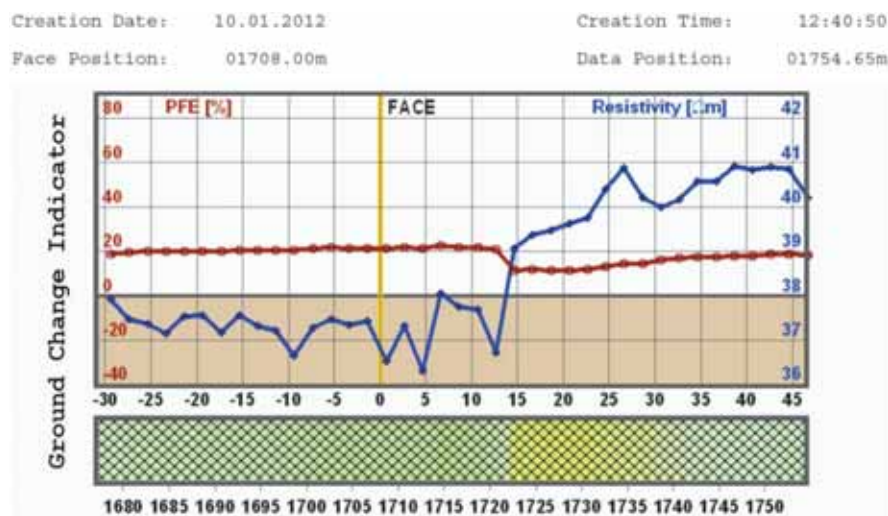


Fig. 3 - Registrazione del "BEAM System" (Km 1+708).

da consistenza lapidea. I valori di resistività e porosità efficace, registrati dal "BEAM System", indicativi appunto della permeabilità e saturazione dell'ammasso attraversato, hanno mostrato pertanto variazioni anche consistenti in corrispondenza dei principali cambi litologico previsti dal profilo geologico di previsione.

Ad esempio, in **Figura 3** si riporta la registrazione del "BEAM System" a Progr. Km. 1+708, relativa alle indagini condotte sui terreni posti a 45 m oltre il fronte di scavo (in ascissa si riportano le distanze dal fronte della TBM); si noti come sia evidente un repentino incremento del valore della resi-

stività (linea blu, da 37 a 41 Ωm) ad una distanza di 15-20 m dal fronte di scavo, in corrispondenza del contatto tra APA e SCA individuato dal profilo geologico alla progr. Km. 1+720 circa. Sempre mediante il "BEAM System" si sono inoltre potute osservare, con sufficiente approssimazione, alcune differenze intraformazionali all'interno delle SCB: i settori a maggiore resistività sono da assimilare ad ammassi a maggiore consistenza lapidea, mentre le minori resistività sono indice della presenza di interstrati limoso-argillosi, con possibile ristagno d'acqua. In generale i riscontri raccolti durante lo scavo hanno mostrato un'ottima corri-



Fig. 4 - Fronte all'interno della formazione delle APA (pk 1+525).

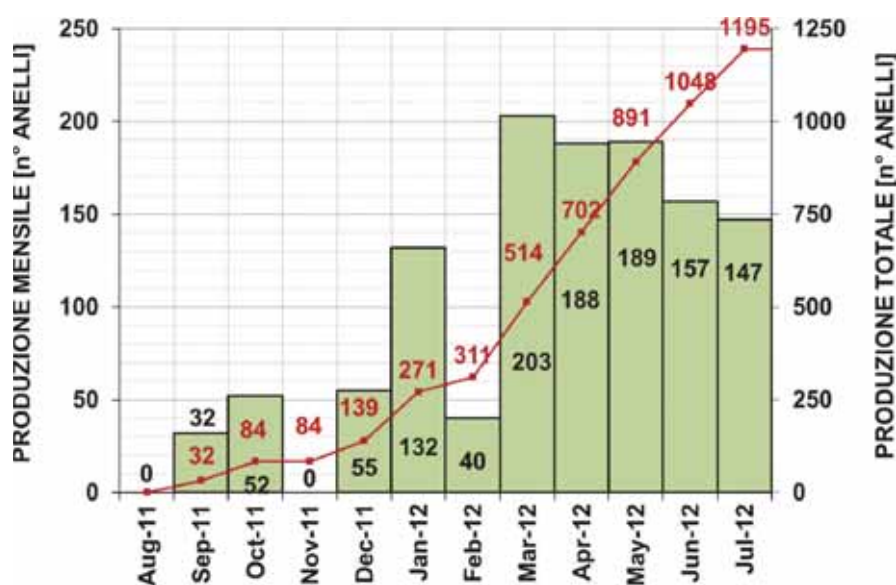


Fig. 5 - Produzione mensile (in anelli).

spondenza con quanto previsto in sede progettuale; per i primi 1400 m circa del tracciato in sotterraneo, i limiti stratigrafici e tettonici tra le formazioni previste hanno trovato conferma nei rilievi in avanzamento. Nel settore finale, in corrispondenza del contatto tettonico SCB-APA, si è osservata una leggera traslazione verso nord (di circa 30-40 m) di tutti i limiti stratigrafici e tettonici, sebbene senza variazioni dei rapporti geometrici tra le formazioni; in particolare si è riscontrata la presenza della sinclinale in MOV, presente all'interno delle APA, nell'intervallo tra anelli 850-890, traslata anch'essa di alcune decine di metri rispetto al profilo di previsione, probabilmente imputabile ad un minor rigetto del sovrascorimento delle SCB sulle APA.

Gli ingressi in camera di scavo, condotti in condizioni normobariche, hanno consentito di effettuare, localmente, rilievi geomeccanici degli ammassi al fronte, esaminandone il grado di compattezza ed i sistemi di discontinuità presenti. In generale le APA, costituite da argille ed argilliti nerastre fissili, si sono mostrate al fronte di buona consistenza, pur mostrando deformazioni di tipo duttile e notevoli variazioni volumetriche se soggette al detensionamento generato dallo scavo. In **Figura 4** si può osservare una visione parziale del fronte in APA alla Progr. 1+525, attraverso le aperture della testa fresante. L'esame degli ammassi appartenenti alla SCB ha mostrato condizioni sostanzialmente litoidi,

con prevalente presenza della facies arenacea e porzioni pelitiche minoritarie; anche per la formazione delle BAP si sono osservati ammassi coesivi, pseudo-litoidi, caratterizzati da una matrice argillosa grigiastra a sostenere uno scheletro composto da clasti di varia origine: calcarea, arenitica ed argillitica.

3. Analisi dei dati di produzione

In **figura 5** si riportano le produzioni mensili, in termini di numero di anelli montati,

operate dalla EPB-TBM "Martina" a partire dall'agosto 2011 fino al completamento della realizzazione della prima canna della galleria, avvenuto nel luglio 2012. Dall'esame della figura appaiono evidenti tre fasi principali inerenti la produttività della TBM. In una prima fase, da agosto a dicembre 2011, si sono registrate produzioni molto basse, non solo a causa dell'usuale periodo di apprendimento necessario per la messa a punto dei principali parametri operativi di avanzamento e per l'addestramento delle squadre di lavoro, ma principalmente per il lungo fermo, di circa 60 giorni, a causa di un guasto meccanico in corrispondenza del circuito idraulico del "main drive"; si è di fatto lavorato soli 35 giorni su 109, quindi poco più di un 30%, con produzioni medie, se valutate sui giorni lavorativi, di 4.8 m al giorno. Nella seconda fase, da dicembre a febbraio 2012, si è migliorata decisamente la produzione, con numerose giornate in cui si sono posati 7-8 anelli (14-16 m al giorno), ma senza una considerevole continuità produttiva a causa di un fermo per un infortunio sul lavoro e per una sosta di sostituzione degli utensili; si è lavorato 42 giorni su 71, circa il 60%, con produzioni medie valutate sui giorni lavorativi di 10.7 m al giorno (6.4 m/giorno se valutate sull'intero periodo). La terza fase, compresa tra marzo e luglio 2012, presenta le migliori performance della macchina, sia in termini di produzioni di picco giornaliere (fino a 11 anelli al giorno, ovvero 22 m/giorno), sia in

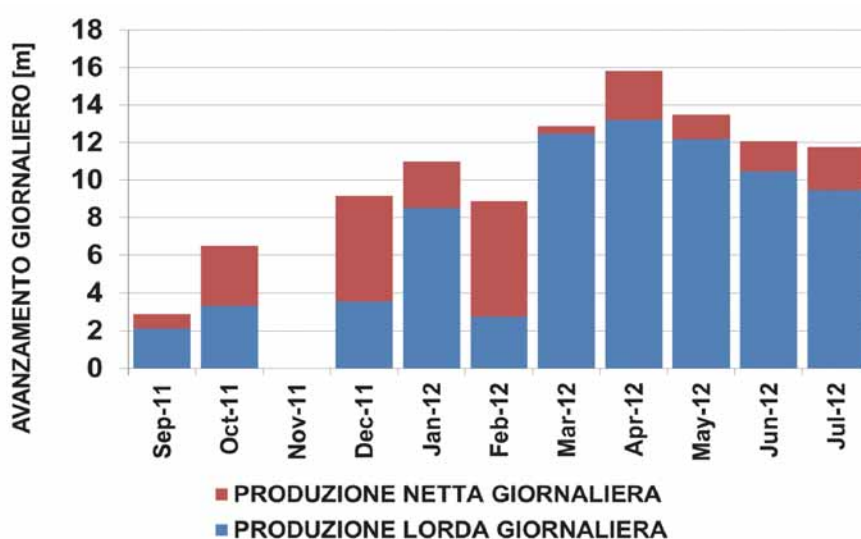


Fig. 6 - Produzione giornaliera (al mese).

termini di continuità delle attività produttive. In questa ultima fase si è avanzato con la TBM in 134 giorni su 149 (pari al 90%), con soli 15 giorni di fermo corrispondenti sostanzialmente alle ispezioni di routine in camera di scavo per la verifica e sostituzione degli utensili; ne è derivata una produzione media netta di 13.2 m/giorno (11.9 m/giorno, se valutata sull'intero periodo). Complessivamente, escludendo i due principali lunghi fermi (guasto al main drive ed infortunio) non direttamente correlabili ad una normale gestione di uno scavo meccanizzato, "Martina" ha mantenuto le aspettative con una produzione giornaliera media di 11 m/giorno. Anche considerando i due lunghi fermi, che hanno fortemente penalizzato le performance della TBM (con 114 giorni di fermo su 331, pari ad oltre il 30%), si hanno produzioni medie giornaliere di poco più di 7 m/giorno, comunque decisamente superiori ad un sistema di scavo con metodologia tradizionale, anche considerando i tempi di allestimento del Cantiere e di assemblaggio della TBM. Il dettaglio della produzione mensile, riportato in **figura 6**, evidenzia un costante incremento delle performance della macchina, con il periodo finale, da marzo a giugno 2012, dove si sono mantenute produzioni mensili nette di 13-14 m/giorno (con record nei mesi di marzo ed aprile, che hanno visto produzioni mensili di 400 m di galleria).

L'aspetto più significativo, relativamente ai dati di produzione, riguarda le velocità di avanzamento nelle singole formazioni geologiche attraversate lungo il tracciato della galleria. Se si osservano le produzioni medie giornaliere nette (ovvero depurate dai fermi non direttamente correlabili agli

avanzamenti) riportate in **Tabella 1**, si rivela come le velocità di avanzamento della TBM non siano fortemente condizionate dalle caratteristiche degli ammassi attraversati, come invece avviene negli scavi in tradizionale, dove la necessità di porre in opera importanti interventi di consolidamento in presenza di terreni scadenti ne penalizza significativamente le velocità di scavo. Si può osservare come le migliori performance si siano avute nei materiali flyschiodi, con 12.9 m/giorno nelle SCB, 12.3 m/giorno nel MOV e addirittura 14.7 m/giorno nelle BAP (che oltre a presentare un ammasso un poco meno resistente dello SCB, è anche stato attraversato in un periodo di generali migliori performance della TBM). Ma anche nelle APA, che, affrontate con sistemi di scavo in tradizionale, avrebbero richiesto la messa in opera di interventi di consolidamento sistematici decisamente penalizzanti per le velocità di avanzamento, la TBM ha mantenuto produzioni elevate, specie nel secondo settore, in presenza delle maggiori coperture, dove si sono registrate velocità di avanzamento medie di 9.7 m/giorno, con una riduzione quindi di un solo 30% rispetto agli ammassi di migliori caratteristiche geomeccaniche. Il rallentamento rilevato nelle APA, nel settore ad alte coperture, è principalmente da ricondurre alla necessità, anche a causa della presenza di edifici in superficie, di mantenere elevate pressioni in camera di scavo, superiori a 3 bar.

Infine, dall'esame del ciclo produttivo emergono le seguenti considerazioni: i "tempi di spinta" evidenziano una graduale diminuzione al proseguire dell'avanzamento, passando da tempi di spinta medi di

circa 2 h (per concio di 2.0 m) a valori di poco superiori a 1 h, testimoniando la messa a punto dei parametri di avanzamento, specie quelli relativi al condizionamento del cake in camera di scavo. Un incremento dei tempi di spinta si è avuto solo nel settore interessato dalle APA ad alte coperture, a comportamento spingente, a prevalente composizione argillosa, alternati a porzioni litoidi di notevole competenza, caratterizzate da elevata resistenza all'avanzamento (rocce basiche intrusive correlate alle formazioni ofiolitiche). In questo settore si sono registrati tempi di spinta pari a 1.3 h, con punti fino a 2 h. Anche i tempi relativi al "montaggio dell'anello" si sono ridotti dalle 2 h per anello iniziali, fino a circa 1 ora, in funzione di una ottimizzazione del ciclo produttivo e della perizia delle squadre di lavoro; tali valori, pari a circa 1 ora, si sono mantenuti anche nel settore finale delle APA. Escludendo i fermi eccezionali di lunga durata, precedentemente descritti, nell'ambito delle normali attività di avanzamento, si sono verificati fermi per ispezioni in camera di scavo finalizzati alla verifica e sostituzione degli utensili (di durata generalmente 48 h, max. 72 h) ed i fermi per il prolungamento delle linee di rifornimento (acqua, aria, miscela bicomponente, linee elettriche) e del nastro per lo smarino (di durata da 4 a 12 ore). Si sono condotti 8 fermi principali, mediamente ogni 300 m circa, in condizioni "normobariche", come più in dettaglio descritto in seguito; si segnala un lungo tratto, di circa 600 m, senza ispezioni in camera nella tratta terminale delle APA, tra le Progr. Km. 2+850 e 3+445 circa, volendo evitare soste nel settore con presenza di edifici in superficie.

Tab. 1 – Produzioni medie vs Litologie attraversate.

Litologia	Lunghezza tratta (m)	Numero totale giorni	Numero giorni con produzione	Produzione media giornaliera lorda (m)	Produzione media giornaliera netta (m)
APA (1° settore)	372	134	55	2,78	6,76
APA (2° settore)	600	71	62	8,45	9,68
SCB	748	81	58	9,23	12,90
BAP	310	27	21	11,48	14,76
MOV	160	13	13	12,31	12,31

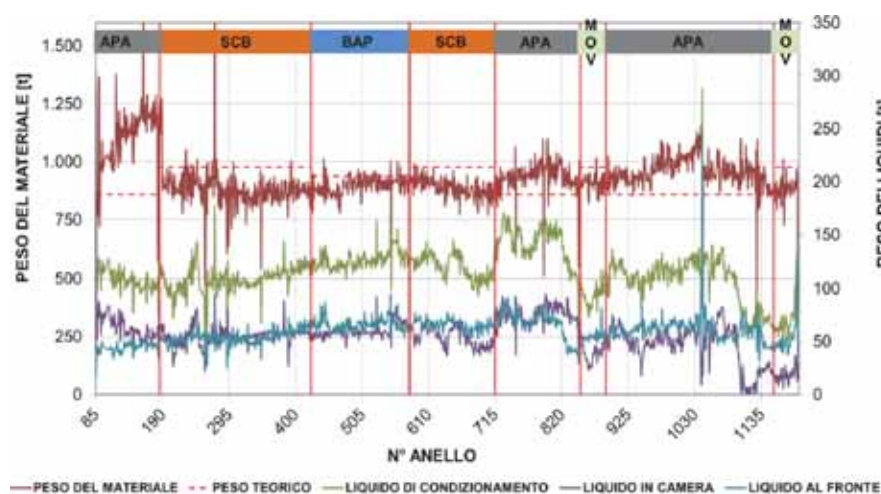


Fig. 7 - Peso del materiale estratto.

4. Parametri di avanzamento della TBM-EPB

All'interno di ogni TBM è presente un computer dove vengono archiviati sia i dati provenienti dal funzionamento delle varie componenti meccaniche, idrauliche ed elettriche di cui è costituita la macchina (pressione e temperatura dell'olio dei principali circuiti, dati sui motori elettrici ecc.), sia i dati riguardanti settaggi operativi della TBM (pressione in camera di scavo, quantità di acqua e schiume per il condizionamento del materiale, quantità di ammasso estratto ecc.). Tale struttura di archiviazione dati, denominata PLC (programmable logic controller) ha consentito di acquisire, in tempo reale, informazioni riguardo a più di 900 parametri di funzionamento di "Martina", permettendo un sistematico controllo in corso d'opera del funzionamento della macchina, nonché la possibilità di operare calibrazioni al fine di ottenere la migliore performance in avanzamento. Nel seguito si commentano i valori registrati per i principali parametri operativi, confrontandoli con le previsioni che erano state effettuate in sede progettuale.

4.1. Peso del materiale estratto

Il controllo del peso del materiale estratto, effettuato attraverso sistematiche pesate di bilance collocate in due punti del nastro di smarino, è particolarmente importante al fine di individuare l'eventuale verificarsi di sovrascavi (quali rilasci o distacchi di roccia

al contorno del profilo di scavo) e operare prontamente l'intasamento della cavità nella successiva fase di iniezione a tergo del rivestimento in conci prefabbricati. Per la corretta valutazione del peso del materiale estratto occorre dedurre, dai valori misurati sul nastro, i quantitativi di liquidi impiegati per il condizionamento del materiale, nel caso in esame fino ad un massimo di circa 1000 KN immessi in camera di scavo, più circa 500 KN direttamente sul fronte di scavo. Ne sono derivati, come riportato in **Figura 7**, valori del peso del materiale estratto, per ogni singola spinta di lunghezza pari a 2.0 m (~383 m³), pari a circa

8500 KN per le APA (ad eccezione di una breve tratta interessata da un grosso corpo ofiolitico dove si sono raggiunti valori pari a 9500 KN) e circa 8000 KN per le formazioni flyschoidi: SCB, BAP e MOV. Mentre per la formazione delle APA si sono quindi riscontrati pesi specifici pari a 22 KN/m³, in linea con le previsioni progettuali, per le altre formazioni si sono riscontrati pesi specifici pari a 20-21 KN/m³, più bassi rispetto alle attese di progetto di 24-25 KN/m³. La differenza è probabilmente da correlare ad un effetto scala che vede sugli importanti volumi di ammasso al fronte una maggiore eterogeneità litologica nonché la presenza di fratture, talora beanti anche di notevole ampiezza, non rappresentate nel campione litoide sottoposto a prove di laboratorio. Non si sono osservati durante gli avanzamenti significativi estrascavi.

4.2. Velocità di avanzamento e spinte

La velocità di avanzamento ha raggiunto i valori massimi nel tratto centrale della galleria, interessata da SCB e BAP, con valori costantemente nel range 25-30 mm/min, mentre è risultata più irregolare nel settore delle APA, specie nel tratto interessato dalla presenza dei corpi ofiolitici, dove si sono verificati repentini abbassamenti della velocità fino a 15 mm/min a causa della durezza dei corpi basaltici. Più in generale si può osservare che, al di là delle caratteristiche

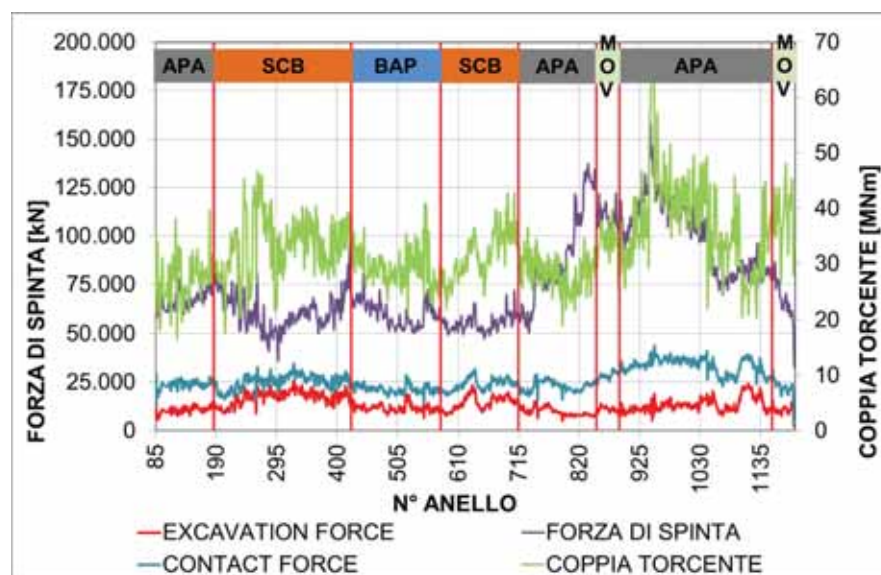


Fig. 8 - Forze di spinta.

geomeccaniche degli ammassi attraversati, i valori di velocità sono risultati spesso condizionati dallo stato di usura degli utensili e da fenomeni di clogging all'interno della camera di scavo; si sono sistematicamente osservate più elevate velocità a seguito delle soste di manutenzione della testa fresante. Il dimensionamento della forza di spinta era stato esaminato con molta attenzione in fase progettuale, per la paura che il comportamento spingente delle APA ad alte coperture potesse bloccare l'avanzamento della TBM; era stata in particolare valutata la pressione da impiegare in camera di scavo al fine di mantenere il terreno in condizioni elastiche ed evitare, il più possibile, il detensionamento dell'ammasso, nello spirito dell'Approccio ADECO-RS di pre-confinamento del nucleo-fronte (Lunardi, 2000). E si erano inoltre valutate le probabili pressioni al contorno dello scudo in funzione del restringimento del cavo e dei possibili extrascavi; le analisi avevano portato a stimare un valore di spinta totale, considerando opportuni coefficienti di sicurezza nell'ambito di un'analisi di rischio, pari a 270 MN, spinta esercitata dai 57 martinetti presenti sulla TBM. Si era inoltre valutata con Herrenknecht AG la possibilità di aumentare la pressione operativa dei martinetti da 350 bar a 500 bar, ottenendo la possibilità di operare una forza di spunto, per eventuale sbloccaggio della TBM, pari a 390 MN (Gatti, 2011). Durante l'avanzamento della TBM, come riportato in **figura 8**, per buona parte del tracciato si sono impiegate spinte al di sotto dei 100 MN; nelle tratte interessate dalle APA all'imbocco sud, dallo SCB e dalle BAP, i valori di spinta totale si sono mantenuti in un range di 60-80 MN, ottimale nei confronti delle potenzialità della TBM. A partire dall'anello 800, con l'ingresso nel settore ad alte coperture delle APA, il valore della forza di spinta ha cominciato a salire raggiungendo valori di picco pari a 160-170 MN (circa il 60% della forza nominale della TBM) e mantenendo valori mediamente nel range 120-130 MN. Fortunatamente non si sono quindi raggiunte le condizioni di spinta severe, temute in fase di progetto, ma la tratta in questione ha evidenziato chiaramente l'atteso comportamento spingente, come desumibile anche dall'insieme dei parametri di comportamento della TBM descritti al capitolo 4.6. I valori di spinta impiegati in fase di costruzione fanno intendere che, grazie anche al confinamento

del fronte esercitato in camera di scavo, si è molto contenuto il decadimento dei parametri di resistenza e di deformabilità della APA, come pure vi è da ritenere che, alla scala della galleria, il sistema di scavo meccanizzato sia stato in grado di operare sull'ammasso un disturbo decisamente inferiore a quello che ha contraddistinto il prelievo dei campioni e le relative prove di laboratorio, sulle quali è stata operata la caratterizzazione geotecnica degli ammassi. Al momento, a seguito di prime back-analyses che dovranno essere approfondite anche impiegando i dati raccolti durante lo scavo della seconda canna, si ritiene che i parametri geotecnici più rappresentativi per le APA siano prossimi al limite superiore del range stimato in progetto, con decadimento che non ha raggiunto i valori residui (Gatti, 2011).

Anche i valori della coppia torcente si sono mantenuti al di sotto del limite di dimensionamento della TBM pari a 100 MNm. Nel primo settore di galleria, interessato dalle APA all'imbocco, e dalle formazioni di SCB e BAP, si sono registrati valori compresi tra 25 e 40 MNm; un incremento si è verificato, come per la forza di spinta, nel settore delle APA a più elevate coperture, tra gli anelli 900 e 1000, dove si è raggiunto un valore massimo di 65 MNm. Si segnala che incrementi localizzati della coppia torcente si sono verificati in presenza di fenomeni di clogging in camera di scavo. Un parametro particolarmente utile a valutare quanto speso dalla TBM per lo scavo della roccia, in termini di energia impressa dagli utensili di scavo, è la "excavation force". La forza di scavo può essere valutata a partire dalla "contact force", pari al valore della forza esercitata dai 15 martinetti collocati a contrasto della testa fresante, sottraendo la quota parte di pressione in camera di scavo agente sulla piastra di collegamento tra il cutter head ed i martinetti; la "excavation force" ha assunto valori compresi mediamente tra 10 e 22 MN, con valori massimi nelle tratte più litoidi, quale il settore in SCB ed il corpo ofiolitico principale. Come per la coppia torcente, anche la forza di scavo ha mostrato alcuni innalzamenti anomali in presenza di fenomeni di clogging all'interno della camera di scavo, che di fatto, "appesantendo" la testa di scavo, riducono la fluidità dell'avanzamento; è un parametro da tenere sotto controllo per verificare un buon rendimento della TBM.

4.3. Parametri di condizionamento

Il condizionamento rappresenta un elemento fondamentale per un corretto funzionamento della TBM del tipo EPB; da lui dipende il corretto mantenimento della pressione in camera di scavo, il controllo delle forze agenti nella testa fresante (forza di scavo e coppia torcente) e dell'usura degli utensili di scavo, nonché la consistenza del materiale estratto e la sua gestione nello smaltimento. Nel primo periodo di scavo si è molto lavorato nel trovare un corretto bilanciamento tra le quantità di acqua, polimeri e tensioattivi, al fine di ottenere da un lato un buon funzionamento della TBM, evitando fenomeni di clogging in presenza di materiali argillosi, e dall'altra un materiale estratto non troppo liquido, così da poterlo più facilmente smaltire. La configurazione finale ha previsto l'inserimento di 6 linee aggiuntive di immissione di liquidi in camera di scavo, in corrispondenza del main drive, dalle quali si è immessa principalmente acqua deputata a rendere il materiale in camera maggiormente fluido ed omogeneo, specie in corrispondenza dell'ingresso della coclea, evitando fenomeni di clogging. Una seconda quantità di liquidi, con presenza di tensioattivi, è stata immessa direttamente sul fronte di scavo, allo scopo di lubrificare il materiale al fronte. Complessivamente si sono impiegati liquidi per il condizionamento in quantità pari a 1100-1500 KN, di cui 500-800 KN per il condizionamento del fronte impiegando quantità di tensioattivi nel range 1200-1900 lt per spinta, in percentuali quindi variabili da un 3.0% ad un 2.2%. I valori più elevati di condizionamento si sono raggiunti nei settori interessati dai materiali di natura argillosa appartenenti alle APA. Per le schiume si sono adottati valori di FER (Foam expansion ratio) nel range 6-8, ridotti a 5-6 nel settore delle APA, e valori di FIR (Foam injection ratio) mediamente pari a 80-120%, con valore massimo del 160% nelle APA.

4.4. Pressioni in camera di scavo e sullo scudo

La definizione del valore di pressione da mantenere in camera di scavo è senza dubbio l'aspetto progettuale più rilevante nell'ambito di uno scavo meccanizzato con EPB-TBM. Governare il comportamento deformativo del nucleo-fronte, in termini di estrusione e pre-convergenza, significa governare il com-

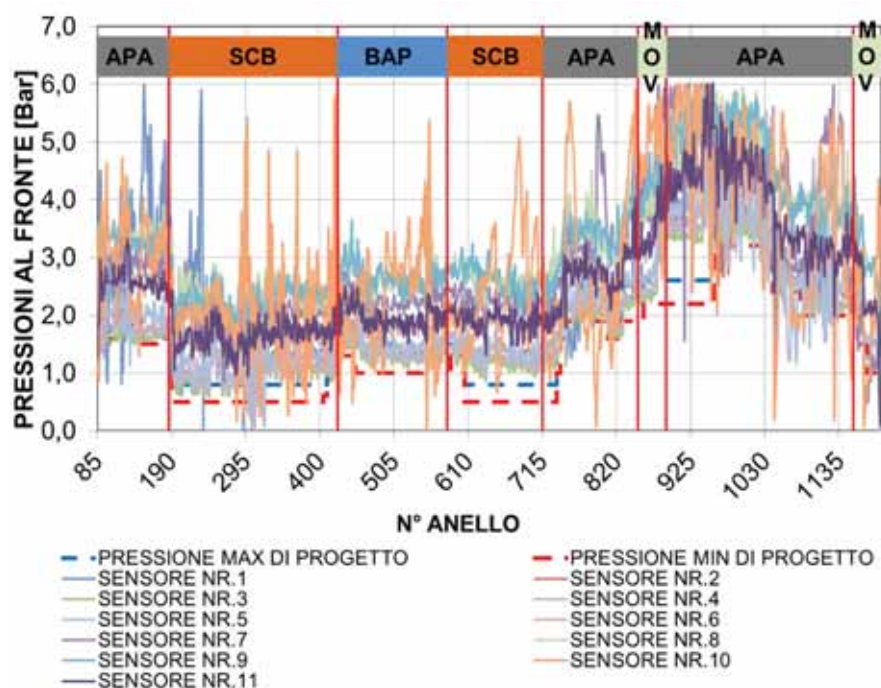


Fig. 9 - Pressioni in camera di scavo.

portamento deformativo della cavità e le pressioni ad esse associate (Lunardi, 2008); specie in ammassi, quali le APA, dove le caratteristiche di resistenza sono fortemente dipendenti dalle deformazioni in gioco, essendo la legge costitutiva del materiale non lineare, con comportamento di tipo "strain softening". I valori di pressioni al fronte, data l'impossibilità di controbilanciare la pressione gostatica, in considerazione delle elevate coperture, pari a 100-120 m, sono stati quindi scelti con l'obiettivo di mantenere al fronte deformazioni assai contenute, possibilmente in campo elastico. Analisi numeriche, supportate da prove di estrusione in cella triassiale, avevano evidenziato la necessità di impiegare per le APA pressioni superiori a 3.0-3.5 bar (Gatti, 2011). In **Figura 9** si riporta l'andamento delle pressioni in camera di scavo lungo la galleria, come rilevate dai sensori posti a differenti quote sul bulkhead; sono riportati anche i valori nominali e le soglie minime individuate in progetto. I valori rilevati in calotta galleria sono risultati i seguenti: nel primo tratto di APA, con coperture fino a 25 m circa, pressioni pari a 1.5-1.9 bar; nel tratto delle SCB pressioni pari a 0.6-1.0 bar, non tanto quale confinamento del fronte ma con l'obiettivo di mantenere piena la camera di scavo nel-

la gestione del rischio gas; nelle BAP valori nel range 0.9-1.6 bar, mentre nelle APA con coperture fino a 100-120 m, valori pari a 3.3-3.6 bar. Nel tratto terminale della galleria si sono progressivamente ridotte le pressioni fino a valori di 1.0-1.5 bar. L'impiego di elevate pressioni nel tratto caratterizzato da ammassi spingenti ha consentito di limitare il detensionamento dell'ammasso e contenere

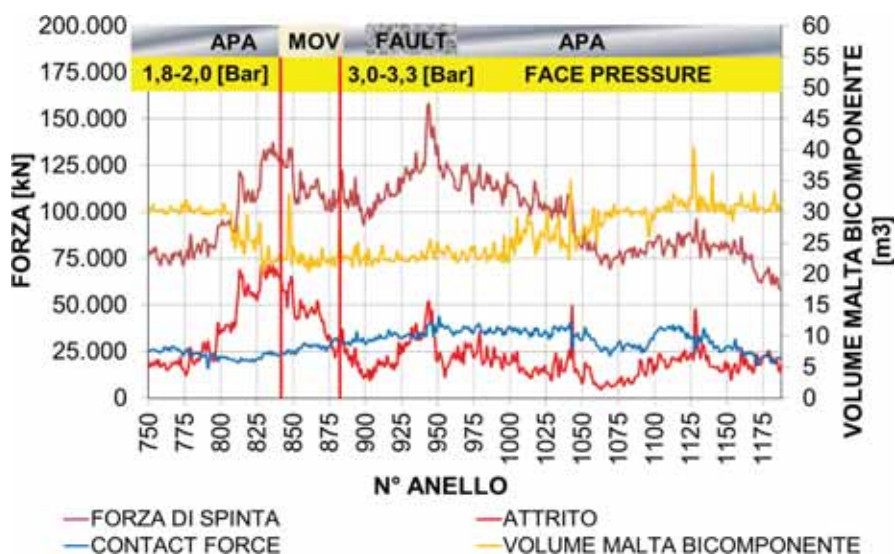


Fig. 10 - APA ad alte coperture - Parametri principali.

le pressioni agenti sullo scudo; l'impiego, in un primo tratto, di pressioni inferiori, pari a 1.9-2.2 bar, ha subito innescato un evidente fenomeno di squeezing, con necessità di più elevate forze di spinta, come descritto al capitolo 4.6.

4.5. Riempimento a tergo dei conci

In coda allo scudo viene eseguito il riempimento del gap anulare tra profilo di scavo ed estradosso del rivestimento in conci, mediante iniezione di miscele bi-componenti con acceleranti di presa, finalizzato ad impedire eventuali convergenze del cavo e conseguenti volumi persi. Il volume massimo iniettabile a seguito di ogni spinta di 2.0 m, è pari, in assenza di extrascavi, a 29.6 m³, quale differenza tra il diametro di scavo, pari a 15.62 m ed il diametro di estradosso dell'anello di rivestimento, pari a 15.00 m. Essendo prevista una conicità dello scudo, pari a 7.25 cm sul raggio, qualora si verifichi una convergenza del profilo di scavo verso la coda dello scudo, il volume disponibile per il riempimento si riduce a 22.5 m³. Durante lo scavo si sono osservati valori di iniezione prossimi al volume massimo per quasi l'intero tracciato della galleria, ad eccezione del tratto interessato dalle APA ad alte coperture, dove si è osservata una riduzione dei valori di riempimento fino ai volumi minimi di 22-23 m³ nel tratto tra gli anelli 800 e 1000 circa, a testimoniare il comportamento spingente del materiale e

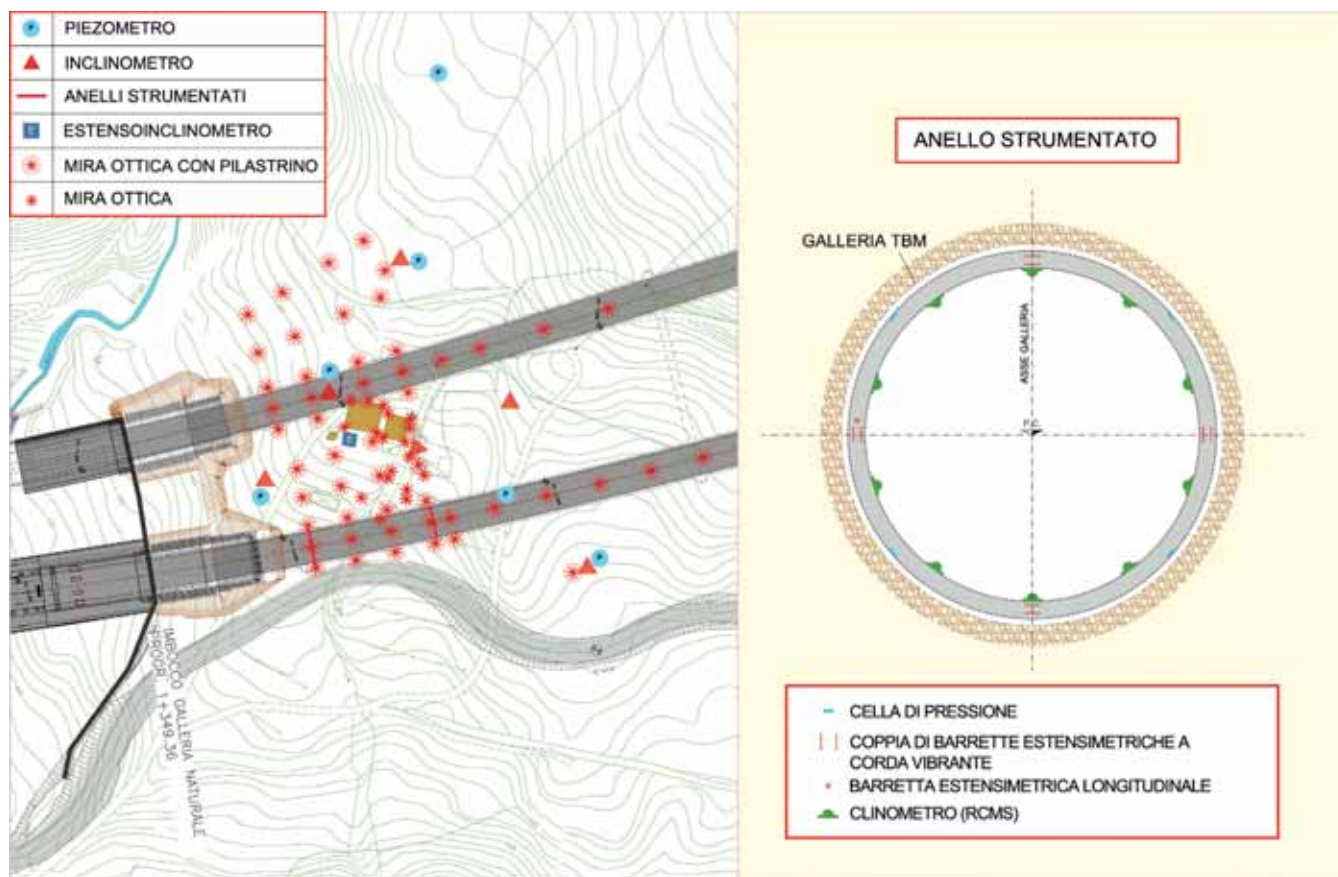


Fig. 11 - Sistema di monitoraggio.

la chiusura del profilo di scavo al contorno dello scudo. Quali valori delle pressioni di iniezione si sono generalmente impiegate pressioni di 0.5-1.0 bar superiori ai valori di pressioni in camera di scavo, al fine di evitare il rifluimento di miscela verso il fronte.

4.6. Considerazioni sulla tratta nelle APA ad alte coperture

L'esame congiunto dei dati raccolti durante l'avanzamento ha consentito di valutare il comportamento della TBM e calibrare i parametri operativi. Il tratto di galleria più significativo è senza dubbio il settore ad alte coperture delle APA, compreso tra gli anelli 800 e 1000 circa, dove fin dalle fasi progettuali era stata rivolta la maggiore attenzione. In **figura 10** si riporta un grafico dove si è combinato l'andamento di alcuni parametri principali, già discussi in precedenza, al fine di evidenziarne la mutua interazione e l'importanza di correlarli per una corretta interpretazione delle modalità di

avanzamento. Si può osservare come, a partire dall'anello 810, in presenza di pressioni al fronte pari a circa 1.8-2.0 bar, si sia rilevato un graduale aumento della spinta della TBM, pur in presenza di una forza di scavo sostanzialmente invariata; ne è risultata pertanto un incremento della componente di spinta associata all'attrito terreno-scudo (fino a 80 MN), testimoniata anche dall'incremento delle pressioni nei sensori ubicati sullo scudo, dove si è rapidamente raggiunto il fondo scala di 6 bar, e della riduzione dei volumi di riempimento a tergo dei conchi, da 24-26 m³ (in presenza di convergenze radiali di 4-5 cm) fino ai valori minimi di 22-23 m³ (con terreno al contatto dello scudo). L'insieme di questi dati ha confermato il comportamento spingente dell'ammasso; si è quindi subito proceduto ad un incremento delle pressioni al fronte, su valori in calotta superiori a 3.0-3.3 bar, nel tentativo di contenere il fenomeno. Se tale incremento non ha impedito all'ammasso di convergere sullo scudo (i volumi di riempimento si so-

no infatti mantenuti sui valori minimi) si è comunque assistito ad una riduzione delle pressioni sullo scudo, con la componente di spinta ad esse associata che è diminuita fino a 20-30 MN, per poi risalire nel punto più critico, in corrispondenza della faglia attraversata nell'intorno dell'anello 940, senza però raggiungere i valori precedentemente riscontrati in presenza di pressioni al fronte minori. Tali evidenze confermano, anche nell'ambito dello scavo meccanizzato, l'importanza del confinamento del fronte nel controllo della stabilità e dell'evoluzione tenso-deformativa della cavità.

5. Ingressi in camera di scavo

Un tema molto importante da valutare in corso d'opera riguarda le modalità con cui vengono eseguiti gli ingressi in camera di scavo, finalizzati ad ispezionare le parti meccaniche della testa fresante, in particolare gli utensili di scavo ed operare la loro sostituzione

in funzione del livello di usura riscontrato. L'ingresso in condizioni "iperbariche", ovvero con mantenimento di prestabilite pressioni in camera di scavo grazie ad aria in pressione (previa impermeabilizzazione delle pareti di scavo con bentonite) appare molto delicato, imponendo specifiche procedure al fine di ridurre il rischio per le maestranze. Essendo gli ammassi attraversati dalla galleria principalmente di natura litoide, si è, di volta in volta, valutata la possibilità di operare in condizioni "normobariche", ovvero a pressione ambientale, mettendo in campo una specifica procedura di verifica e controllo. Una prima fase di verifica ha riguardato l'esame del materiale estratto sul nastro di smarino e l'analisi di alcuni parametri operativi della TBM, quali la forza di spinta ed il momento torcente, la velocità di avanzamento, le pressioni al fronte nonché il peso del materiale estratto ed i volumi di riempimento iniettati. In questa fase si riscontra se il materiale estratto è in linea con le condizioni geologiche riportate sul profilo geologico di previsione, e se i parametri operativi risultano entro i range di progetto: in particolare se i valori di spinta escludano condizioni locali particolarmente spingenti e se il peso del materiale estratto, combinato con i volumi della miscela di riempimento a tergo dei conci, escluda la presenza di estrascavi, condizione associabile ad un ammasso più fratturato, poco incline al mantenimento del profilo di scavo. Una seconda fase di verifica riguarda l'analisi dell'andamento della pressione in camera di scavo una volta effettuato il fermo della TBM: occorre verificare che i valori di pressione risultino sostanzialmente stabili o caratterizzati da un lieve e graduale calo, comunque con valori superiori ai minimi di progetto. Un anomalo innalzamento potrebbe suggerire la presenza di un ammasso spingente o, più in generale, di un apporto in camera di scavo di materiale a causa di rilasci e quindi di condizioni instabili del fronte; viceversa, un calo troppo repentino delle pressioni potrebbe suggerire perdite del cake al fronte, in presenza di ammassi molto fratturati o di cavità. Una volta riscontrata l'assenza di anomalie, si procede con un primo ingresso in camera di scavo da parte di un tecnico qualificato, con la funzione di riscontrare in modo diretto le condizioni geomeccaniche del fronte, attraverso le aperture presenti nella testa fresante. Qualora quest'ultimo non ravvisi condizioni litologiche e geomeccaniche sfavo-

revoli, quali la presenza di fasce di ammasso fortemente alterate o fratturate, la presenza di significative venute d'acqua e, nel contempo, il sistema di monitoraggio del gas evidenzia concentrazioni al di sotto delle soglie di sicurezza, si potrà procedere con la posa in opera dei presidi di sicurezza (quali protezioni e chiusure per le parti aperte in calotta) e l'ingresso in camera delle maestranze. Al fine di verificare la stabilità globale del fronte si procede inoltre, durante l'intero periodo di fermo della TBM, a monitorare la forza della testa di scavo, così da riscontrare se si verificano un aumento delle spinte a seguito del possibile decadimento dei parametri di resistenza e deformabilità del nucleo-fronte. Durante lo scavo della prima canna, gli ingressi in camera di scavo sono avvenuti tutti in condizioni normobariche.

6. Sistema di monitoraggio

In fase di progetto, si è messo a punto uno specifico piano di monitoraggio in grado di seguire l'avanzamento della TBM in termini di evoluzione del quadro deformativo, in galleria e nei versanti in cui si inserisce l'opera in costruzione; una sintesi del sistema di monitoraggio è riportata in **Figura 11**. In galleria si è prevista la posa in opera di anelli strumentati, mediante barrette estensimetriche, finalizzati a rilevare il tasso di lavoro dei rivestimenti in opera; si è inoltre prevista l'installazione

di stazioni di misura degli spostamenti del cavo, così da valutare eventuali convergenze del rivestimento. Entrambe le strumentazioni non hanno evidenziato in corso d'opera situazioni di criticità, con convergenze del tutto trascurabili, come è tipico di sistemi di rivestimento circolari chiusi. In alcuni settori di galleria si è invece assistito a spostamenti del cavo di ordine centimetrico, probabilmente associati a spinte dell'ammasso non simmetricamente distribuite sui rivestimenti. Per valutare l'impatto della costruzione delle gallerie sul territorio, si è inoltre previsto di installare una rete di capisaldi topografici a piano campagna, specie in corrispondenza di manufatti o edifici preesistenti, e di porre in opera strumentazione in profondità, costituita da inclinometri e piezometri. L'esame dei dati di monitoraggio raccolti in corso d'opera ha evidenziato risentimenti a piano campagna in corrispondenza delle zone di imbocco, in presenza di ridotte coperture, e nel settore delle APA ad alta copertura, dove si sono principalmente riscontrate le chiusure del profilo di scavo in avanzamento. In questo settore, il confinamento del fronte di scavo è risultato molto importante nel contenere l'evoluzione dei fenomeni deformativi, considerata anche la presenza di edifici in superficie, localizzati in una porzione di versante interessata da depositi franosi. La vulnerabilità di quest'area, già compromessa da passati

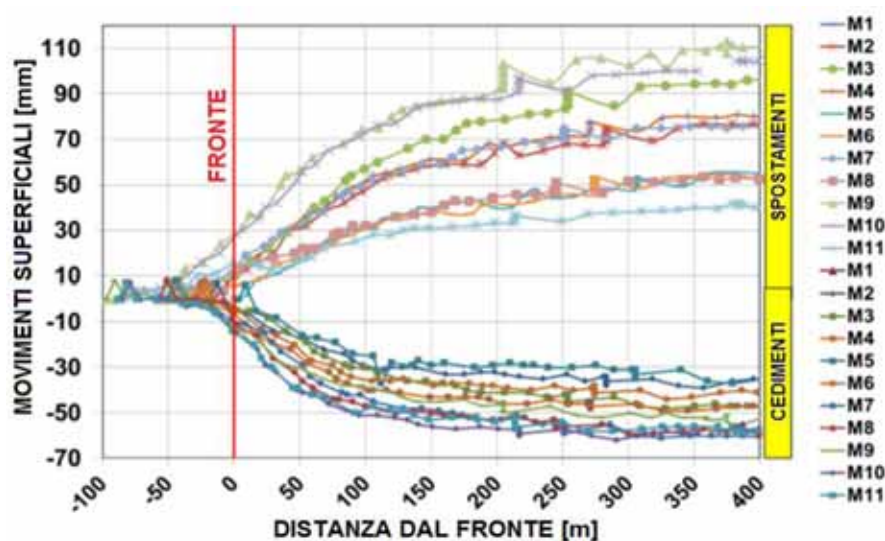


Fig. 12 - Punti topografici.

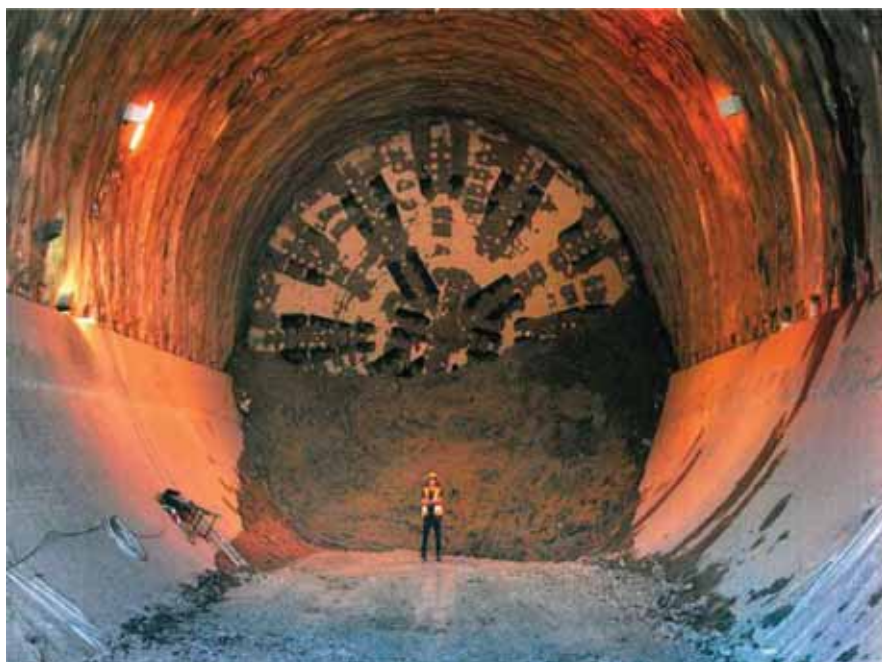


Fig. 13 – Galleria Sparvo – Foratura.

movimenti di versante, ha fatto sì che la risposta deformativa del piano campagna fosse significativa, nonostante le elevate coperture presenti e l'impiego dello scavo meccanizzato, che determina volumi persi decisamente inferiori rispetto al sistema di scavo in tradizionale. In **Figura 12** si riporta l'andamento degli spostamenti di alcuni punti topografici significativi: si osservano cedimenti pari a 40-70 mm, in presenza di spostamenti, pari a 50-110 mm. Il disturbo a piano campagna si è attivato con fronte di scavo a 50-70 m dal punto topografico di misura, mentre si è osservata una tendenza all'asintoticità degli spostamenti, allorché il fronte di scavo ha superato di 150-200 m il punto di misura (ovvero dopo circa 1 mese dal passaggio della TBM).

7. Conclusioni

L'articolo presenta le prime evidenze raccolte durante lo scavo della prima canna della galleria Sparvo, eseguita mediante TBM del tipo EPB del diametro record di 15.62 m e completata nel luglio 2012. Dopo un primo periodo di messa a pun-

to delle modalità operative, si è raggiunta una industrializzazione del processo costruttivo che ha raggiunto, nel periodo di marzo-luglio 2012, una produzione media di 13.2 m/giorno (con record di 22 m/g), superiore alle aspettative. Un aspetto rilevante è che i valori di produzione non sono stati significativamente condizionati dalle litologie attraversate, osservando una riduzione del solo 30% nella formazione più impegnativa della APA, dove operando con il sistema di scavo meccanizzato si sarebbero dovuti impiegare estesi interventi di consolidamento: in questo settore si sono osservate produzioni medie pari a circa 8.0 m/giorno (9,70 m/giorno nel tratto APA ad alta copertura). I parametri di pressione al fronte sono risultati in linea con le previsioni progettuali, necessitando in particolare di elevate pressioni di 3.0-3.5 bar in corrispondenza dell'attraversamento delle APA ad alte coperture; in questo settore si è verificato l'atteso comportamento spingente dell'ammasso, senza però che la spinta necessaria all'avanzamento della TBM (valore massimo pari a 160-170 MN) superasse, grazie anche al confinamento operato al fronte, il limite di dimensionamento della macchina. In questo settore

si è comunque osservato un significativo restringimento del profilo di scavo, che è spesso venuto a contatto con l'estradosso dello scudo, riducendo i volumi di miscela di riempimento a valori minimi di 22-23 m². Particolarmente importante è stata la messa a punto dei parametri di condizionamento del materiale, al fine di evitare fenomeni di clogging in camera di scavo con effetti negativi sul rendimento della TBM e sul consumo degli utensili; sono state in particolare aggiunte 6 linee di immissioni di fluidi al centro del main drive. Il monitoraggio geotecnico ha consentito in corso d'opera di valutare l'interazione tra gli scavi e le preesistenze in superficie, in particolare rilevando la necessità di operare con le massime pressioni al fronte di progetto nel settore delle APA ad alte coperture in corrispondenza, in superficie, della frana di Sparvo. Il monitoraggio sulle concentrazioni del gas disciolto nel materiale scavato (che hanno raggiunto valori fino allo 0.15-0,20%, mediamente pari a 0.03-0.05%), in abbinamento alle procedure discusse in Lunardi (2012), ha permesso di gestire questo delicato aspetto della costruzione.

8. Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare i loro colleghi G. Lodigiani, per la collaborazione nella predisposizione dei documenti progettuali, e I. La Rosa per l'assistenza tecnica in cantiere durante l'avanzamento della TBM. Desiderano inoltre ringraziare l'Impresa TOTO Costruzioni per la proficua collaborazione durante la realizzazione dell'opera.

Bibliografia

- GATTI M., LUNARDI P., CASSANI G., 2011 – The largest TBM-EPB machine in the world, designed to the Appennines. The experience of the Sparvo Tunnel. 1st Int. SEE Con. «Using underground space», Dubrovnik.
- LUNARDI P., 2008 – Design and Construction of Tunnels – Analysis of Controlled Deformation in Rock and Soils (ADECO-RS). Berlin, Springer.
- LUNARDI G., SELLERI A., 2012 – Design of «Martina», the World's Largest EBM TBM. Geological and geotechnical issues. Swiss Tunnel Congress Colloquium, Luzern.

summary of:

Evidences collected during the excavation of the first tube of the “Sparvo” tunnel by using “Martina”, the world’s largest EPB-TBM

P. LUNARDI
G. CASSANI
M. GATTI
Rocksoil SpA

The paper presents the first evidences collected during the excavation of the first tube of the “Sparvo” tunnel, bored by means of an EPB-TBM having the record diameter of 15.62 m and completed in July 2012. Particular attention is paid to the most critical point, from both a geotechnical viewpoint and due to the presence of gas deposits, consisting of the APA formation. The main operative parameters are commented and confronted with those that had been projected during the design stage. Rocksoil was involved in the final and detailed design of the tunnel and in technical assistance during TBM excavation. Analyses of the geological conditions of the tunnel were carried out during work progress, through constant control of the material being extracted and transported on the conveyor belt; through periodic inspections of the excavation chamber during stops for verification of the excavation cutters’ wear and necessary substitution; and through the use of the “BEAM system”, which proved to be an excellent instrument for inspection during work progress and to detect in advance the contact position of the main formations encountered by the TBM. In general, the geological data collected during the excavation corresponded well to that which had been projected during the design stage; just in the final sector, in correspondence to SCB-APA tectonic contact, a slight northward translation of all stratigraphic and tectonic limits

was observed (about 30-40 m). About production, after a first period of tuning of the operative modality, the construction process was industrialized up to an average production of 13.2 m per day (with a record of 22 m/d) in the period of March-July 2012, above expectations. An important aspect is that production values were not significantly conditioned by the lithologies bored, with only a reduction of 30% in the most difficult formation of APA, where a conventional tunnelling process would have required extensive ground improvement (9.7 m per day in APA with respect to 12.9 m per day in SCB, 12.3 m per day in MOV and 14.7 per day in BAP). The pressure parameters at the face were in line with design projections, needing high pressure levels of 3.0-3.5 bars when boring through the heavily covered APA; in this sector the expected squeezing behaviour of the mass took place (the ground converges upon the shield and the back-filling volumes remained constantly at minimum levels, equal to 22-23 m³ respect the maximum value 29.5 m³), although the necessary thrust for the progress of the TBM (maximum value equal to 160 MN) did not go over the dimensioning limit of the machine (270 MN up to a spike force of 390 MN), also thanks to the confinement operated at the face. This evidence confirms - also in the field of mechanized excavation - the importance of face confinement in keeping the stability

and the deformation control of the cavity. The tuning of the conditioning parameters (FIR equal to 80-120%, FER 6-8 and foam percentage in the range 2.2-3.0%) of the material was of particular importance, as it avoided the clogging of the excavation chamber and consequent negative effects on the TBM’s performance and the tool’s wear; in particular, 6 liquid input lines were added to the centre of the main drive. Geotechnical monitoring during the work made it possible to evaluate the interaction between the excavation and the existing buildings on the surface. In APA formation, despite the high level of coverage present and the use of mechanized excavation, a significant deformation response at the ground level took place, in an area which had already been compromised by past movements of the slope: settlements equal to 40-70 mm and movements of 50-110 mm; the ground level started to be disturbed when the excavation face was 50-70 m from the topographic measure point, while a tendency towards asymptoticity was observed once the excavation face went 150-200 m beyond each measure point (around 1 month after the TBM had passed). Monitoring of the gas concentrations in the excavated material (which reached values up to 0.15-0.20%, on average equal to 0.03%-0.05%), by means of specific procedures, made it possible to manage this delicate aspect of construction.