

Galleria Sparvo: Il dimensionamento geotecnico della TBM-EPB per lo scavo della galleria

Pietro LUNARDI
Martino GATTI
Giovanna CASSANI
Rocksoil S.p.A.

Nel presente articolo si descrivono le valutazioni geologico-geotecniche effettuate per la scelta della tipologia di TBM da adottare per lo scavo della "Galleria Sparvo", galleria dall'eccezionale diametro di scavo di 15.62 m facente parte dell'Autostrada A1, Milano-Napoli, nel tratto tra La Quercia e Barberino di Mugello. Si individuano le caratteristiche tecniche ed i parametri operativi per i quali la macchina è stata dimensionata, con particolare riferimento al contesto geotecnico più critico rappresentato dalla Formazione delle Argille a Palombini.

1. Introduzione

Nell'ambito del potenziamento delle infrastrutture italiane, l'adeguamento del tratto tra Sasso Marconi e Barberino di Mugello dell'Autostrada A1, Milano-Napoli, appare particolarmente significativo per la presenza di un elevato numero di opere in sotterraneo, tra le quali la "Galleria Sparvo", la cui realizzazione, in considerazione della sua lunghezza, del diametro di scavo e del contesto geologico attraversato, risulta critica per l'apertura all'esercizio della tratta autostradale tra La Quercia e Barberino di Mugello. Il tracciato in sotterraneo, di lunghezza pari a 2600 m circa a doppia canna, si inserisce infatti in un versante interessato dalla presenza di numerose frane quiescenti e locali fenomeni attivi - talora di notevole estensione ed importanza quale la "Frana di Sparvo" - ed attraversa formazioni geologiche principalmente appartenenti ai "complessi di base liguridi", quali le Arenarie dello Scabiazza e le Argille a Palombini. Le difficili condizioni geomeccaniche, in particolare per la tratta interessata dalle Argille a Palombini e dai depositi di ver-

sante, e le conseguenti incertezze legate al mantenimento di importanti velocità di avanzamento dello scavo, hanno spinto l'Impresa Costruttrice, in accordo con la Committenza, a valutare l'ipotesi dello scavo meccanizzato. Si è optato per uno scavo con TBM del tipo EPB-S. Tale scelta, sebbene comporti un allungamento dei tempi necessari per avviare la realizzazione della galleria naturale (in termini di progettazione, costruzione, trasporto ed allestimento della macchina), ha il vantaggio di permettere successivamente il raggiungimento di produzioni/giorno, in fase di scavo, assai più elevate con un bilancio complessivo, in termini di analisi di rischio, più favorevole rispetto al metodo di scavo in tradizionale. Rispetto ai 6-8 mesi necessari per allestire l'imbocco per avviare gli scavi con metodo tradizionale, l'adozione di una TBM di grande diametro necessita di almeno 14-16 mesi per la costruzione ed il montaggio della macchina presso l'imbocco della galleria; consente però in fase di scavo di mantenere produzioni medie nel range 10-12 m/gg rispetto allo scavo in tradizionale, dove le produzioni variano da 1.0-1.2 m/gg in

ammassi scadenti fino a 3-4 m/gg in contesti lapidei. L'impiego di una TBM scudata a fronte chiuso presenta poi il vantaggio di ridurre fortemente i rischi per l'incolumità delle maestranze che, in questa configurazione, operano sempre in un contesto protetto, e di minimizzare i rischi di fenomeni di instabilità del fronte e del cavo. Vi è comunque da evidenziare che l'aspetto più delicato nella scelta del sistema di scavo ha riguardato l'esame dell'evoluzione del quadro tenso-deformativo nell'ammasso durante lo scavo nella formazione delle Argille a Palombini, costituita da ammassi con scadenti parametri di resistenza e di deformabilità, specie alle coperture di 100-120 m presenti nella parte centrale del tracciato, dove assai probabili sono fenomeni di "squeezing" che possono causare seri problemi all'avanzamento della macchina. E' stato quindi necessario operare accurate valutazioni allo scopo di definire le caratteristiche tecniche ed i parametri operativi per i quali dimensionare la macchina (geometrie, spinta massima, pressione al fronte...); le analisi sono state condotte con ipotesi conservative e tali da dimensionare la TBM per fare fronte a condizioni di lavoro alquanto severe, anche se - in considerazione di aspetti non preventivabili e schematizzabili nelle analisi numeriche, quali tensioni residue nell'ammasso a seguito di stress tettonici, forti anisotropie locali, il notevole diametro di scavo in materiali soggetti a squeezing - il funzionamento della TBM è da inquadrarsi in una analisi di rischio, non potendo azzerare il rischio che

si verifichi in corso d'opera il superamento delle pressioni previste con conseguente blocco della TBM.

Da ultimo, un aspetto non trascurabile per la sicurezza delle operazioni di scavo, è la gestione dell'interferenza con depositi di gas in sotterraneo, la cui presenza è riconosciuta negli ammassi attraversati, specie ai contatti tra formazioni.

2. Dati di progetto

Ad inquadramento del progetto, si evidenzia che la Galleria Sparvo presenta un tracciato di lunghezza approssimativamente pari a 2600 m, con pendenza longitudinale sempre inferiore allo 0.4% e raggi di curvatura planimetrica tra 3100 e 6000 m. È costituita da due canne con distanza tra gli assi compresa tra un minimo di 30 m ed un massimo di circa 80 m. Il diametro interno è pari a 13.60 m; ciascuna carreggiata è costituita da 2 corsie di 3.75 m e da una corsia di emergenza di larghezza pari a 3.75 m, con banchina di 0.25 m in destra e 0.70 m in sinistra (figura 1) – Le due canne sono connesse mediante by-pass pedonali ogni 300 m e by-pass carrabili ogni 900 m. I dispositivi di sicurezza sono completati da nicchie S.O.S. disposte ogni 150 m sul lato destro della carreggiata.

Quale rivestimento definitivo si sono adottati anelli in conci prefabbricati, in numero di 9+1, di peso max. 165 KN, lunghezza di 2.0 m e spessore 0.70 m, armati in barre

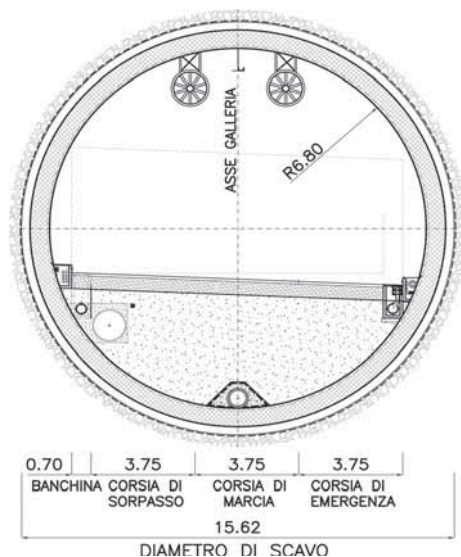


Fig. 1 – Galleria Sparvo – Sezione trasversale.

Tab. 1 – Dati di progetto.

Committente	Autostrade per l'Italia
Appaltatore	TOTO Costruzioni Generali
Costruttore TBM	Herrenknecht AG
Progettazione Esecutiva	Rocksoil
Direzione Lavori	Spea Ingegneria Europea
Assistenza tecnica	Rocksoil

metalliche; i conci sono attrezzati con guarnizioni in EPDM lungo l'intero sviluppo e da elementi di tenuta in hydrofiller. Il collegamento dei conci è realizzato mediante connessioni poste sia lungo i lati radiali (bulloni) e longitudinali (spinotti) dei conci; per garantire l'allineamento dei conci si prevede l'impiego di barre guida. All'estradosso del rivestimento è previsto un riempimento mediante malta bi-componente, a presa rapida, fino a raggiungere il diametro di scavo pari a 15.62 m, per un'area di scavo complessiva di 190 m. approx. In tabella 1 si riportano i soggetti coinvolti nella realizzazione dell'opera.

3. Contesto geologico-geomeccanico

3.1. Condizioni geologiche lungo il tracciato

A partire dall'imbocco sud, lato Firenze, la galleria naturale attraversa dapprima un versante poco acclive, caratterizzato da depositi di natura argilloso-limosa, 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 Palombi-

ni". 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 "Ofioliti" con vario grado di fratturazione, 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 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. Dal punto di vista idrogeologico gli ammassi lapidei presenti nell'area sono caratterizzati da permeabilità secondaria, dovuta a fessurazione, mentre i depositi recenti e le coltri di frana presentano una permeabilità primaria connessa alla porosità, anche se con permeabilità basse. Le rocce appartenenti alle formazioni dei flysch arenacei (SCA, MOV) hanno permeabilità nel range 10^{-6} e 10^{-8} m/s; solo in corrispondenza di fasce tettonizzate la permeabilità raggiunge valori superiori e si possono rilevare circolazioni idriche sotterranee (i sondaggi hanno rilevato, in queste zone, venute idriche fino a 200 lt/min). I terreni a prevalente componente argillosa (APA, BAP) hanno invece permeabilità bassissima, con circolazione idrica scarsa. 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.

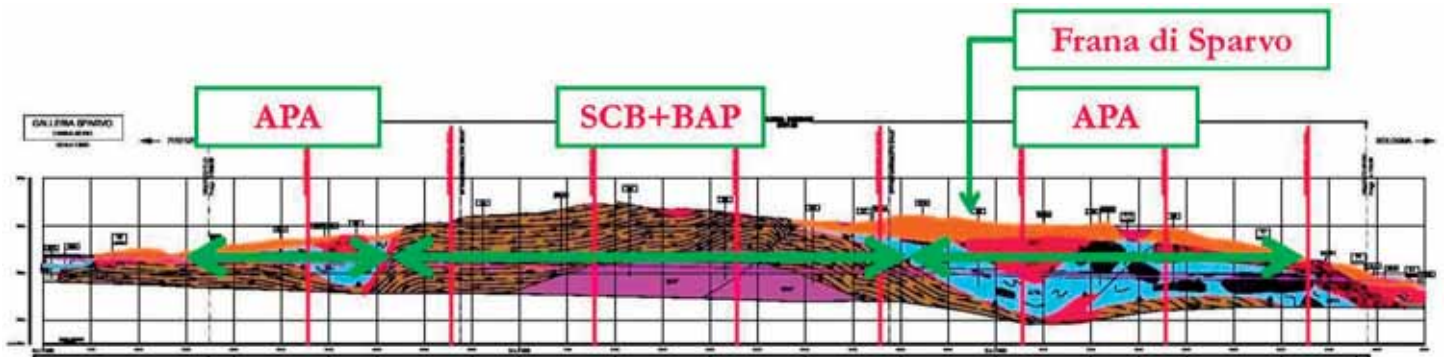


Fig. 2 – Profilo geologico longitudinale.

3.2. Caratteristiche geotecniche

I principali litotipi attraversati sono rappresentati dalle SCA (35% della lunghezza della galleria) e dalle APA (45%), che hanno costituito i due principali contesti di studio per la definizione delle modalità di scavo. L'insieme delle prove in situ e di laboratorio condotte ha permesso di definire, per ciascun litotipo, i parametri geotecnici, di resistenza e di deformabilità, riportati in Tab. 2.

In particolare, per le APA, che rappresentano senza dubbio il contesto geotecnico più delicato, si sono prese in esame anche le esperienze raccolte in contesti simili, quali le Formazioni delle "Argille Scagliose" e del "Complesso Caotico" presenti lungo il tracciato della Linea ad Alta Capacità Bologna-Firenze [1] ed in altre gallerie del tratto autostradale Bologna-Firenze [2]. Per gli ammassi appartenenti alle APA sono da attendersi parametri geotecnici variabili con la profondità e con i livelli deformativi raggiunti in fase di scavo, manifestando una legge costitutiva marcatamente non lineare, di tipo elasto-plastica con comportamento di "strain-softening". Le equazioni (1), (2)

e (3) riportano i valori dei parametri di resistenza, angolo di attrito ϕ e coesione c , e di deformabilità, E , in funzione della profondità (picco e residuo):

$$\phi_{picco} = 15 + 0.07 z [^\circ] \quad \phi_{res} = 10 + 0.05 z [^\circ] \quad (1)$$

$$c_{picco} = 5 + 1.95 z [kPa] \quad c_{res} = 1.5 z [kPa] \quad (2)$$

$$E_{picco} = 13 + 6 z [MPa] \quad E_{res} = 4 z [MPa] \quad (3)$$

Nei dimensionamenti si è inoltre presa in esame la possibilità che localmente sussistano fasce di ammasso con parametri geotecnici più scadenti, cautelativamente del 20% (APA-2). Il decadimento dei parametri di resistenza verso i valori residui avviene, una volta raggiunta la condizione di rottura secondo il criterio di Mohr-Coulomb, in funzione della deformazione plastica nel range 0.1-0.6%; questo fatto implica la necessità di operare adeguati confinamenti dell'ammasso in fase di scavo, allo scopo di evitare il prodursi di deformazioni tali da attivare le importanti pressioni correlate alle condizioni di resistenza residue.

Da ultimo si evidenziano le principali proprietà indice delle APA; le analisi granulometriche hanno evidenziato la presenza di limi ed argille al 40% e 29% rispettivamente (L+A=69%), con percentuali di ghiaie al 12% e sabbie al 19%. Il valore del Limite Liquido (LL) risulta assai disperso nel range 25-65%, mentre i valori del Limite Plastico (LP) sono contenuti nel range 15-25%, con indice plastico IP tra il 10 e 40%; il materiale si inquadra come una "argilla inorganica a media-alta plasticità". L'indice di consistenza, IC, risulta ampiamente superiore a 1, così da potere definire l'ammasso quale "argilla consistente". Dal punto di vista mineralogico si osserva la presenza all'80% di minerali argillosi, con il 20-35% di smectite. Infine il contenuto d'acqua è pari al 10% circa, così da ritenere l'ammasso "non saturo", anche se in alcuni campioni si sono rilevati contenuti d'acqua superiori prossimi alla saturazione.

metriche hanno evidenziato la presenza di limi ed argille al 40% e 29% rispettivamente (L+A=69%), con percentuali di ghiaie al 12% e sabbie al 19%. Il valore del Limite Liquido (LL) risulta assai disperso nel range 25-65%, mentre i valori del Limite Plastico (LP) sono contenuti nel range 15-25%, con indice plastico IP tra il 10 e 40%; il materiale si inquadra come una "argilla inorganica a media-alta plasticità". L'indice di consistenza, IC, risulta ampiamente superiore a 1, così da potere definire l'ammasso quale "argilla consistente". Dal punto di vista mineralogico si osserva la presenza all'80% di minerali argillosi, con il 20-35% di smectite. Infine il contenuto d'acqua è pari al 10% circa, così da ritenere l'ammasso "non saturo", anche se in alcuni campioni si sono rilevati contenuti d'acqua superiori prossimi alla saturazione.

4. Le problematiche progettuali

La progettazione delle modalità di scavo della galleria è stata condotta quindi considerando da un lato le problematiche connesse al difficile contesto geotecnico

Tab. 2 – Parametri geotecnici di resistenza e deformabilità

FORMAZIONE	Copertura [m]	GSI	γ [kN/m ³]	k ₀ [-]	ϕ_p [°]	ϕ_r [°]	c_p [kPa]	c_r [kPa]	E_p [MPa]	E_r [MPa]	ν [-]
Depositi	20	-	21	0.53	28	-	20	-	60	-	0.35
MOV	110	30	25	0.59	24	20	150	120	800	640	0.25
BAP	100-130	60	25	0.61	23	18	200	160	4000	3200	0.25
SCB	60-120	40	25	0.50	30	24	250	200	2000	1600	0.25
APA	25	-	22	0.70	16	11	53	37	163	100	0.35
APA-2	25	-	22	0.70	13	10	42	29	130	80	0.35
APA	60-115	-	22	0.70	23	14	230	170	703	460	0.35
APA-2	60-115	-	22	0.70	18	11	180	140	563	368	0.35

dall'altro la necessità di garantire idonee velocità di avanzamento per contenere i tempi di costruzione dell'opera. Circa il contesto geotecnico, un primo aspetto delicato è rappresentato dall'alternanza lungo il tracciato di formazioni francamente lapidee, quali le arenarie dello SCA e del MOV, con depositi di versante ed ammassi argillosi alquanto scadenti, situazione che impone metodologie di scavo "flessibili" sia in termine di abbattimento del fronte sia circa gli interventi di consolidamento e di rivestimento da porre in opera al fronte ed al contorno del cavo. Un secondo aspetto critico è il forte decadimento dei parametri di resistenza delle APA, descritto al capitolo 3.2, in funzione dei livelli deformativi nell'ammasso a seguito dello scavo (legge costitutiva con ramo "strain-softening"), condizione che impone di operare minimizzando il disturbo durante l'avanzamento mediante l'adozione di interventi di pre-confinamento del nucleo in avanzamento; la mancanza di tali azioni comporta una progressiva chiusura del cavo con fenomeni di "squeezing". Un terzo aspetto è correlato alla presenza di depositi di frane quiescenti, e localmente attive, presso gli imbocchi con basse coperture, ed in corrispondenza dell'abitato di Sparvo; anche questa condizione impone modalità di scavo alquanto conservative. Infine molto critica è la presenza di depositi di gas all'interno degli ammassi attraversati, soprattutto ai contatti tra le diverse formazioni; questa evidenza, riscontrata in letteratura e durante l'esecuzione dei sondaggi, impone di operare mediante una struttura di Cantiere, quali attrezzature e procedure operative, volta ad evitare condizioni di innesco della miscela gassosa a tutela della sicurezza dei lavoratori.

Una prima fase di progettazione ha preso in esame sia il metodo di scavo convenzionale, sviluppato secondo l'Approccio ADECO.RS [3], sia lo scavo meccanizzato, individuando per entrambe le metodologie di scavo la fattibilità tecnica con i relativi vantaggi/svantaggi. La scelta finale di impiegare lo scavo meccanizzato, mediante TBM del tipo EPB, è stata condotta congiuntamente al Committente ed all'Impresa Costruttrice, tenendo anche conto di strategie di investimento legate a futuri reimpieghi della macchina, e nella convinzione, come detto in premessa, che tale metodo-

logia, nell'ambito di un'analisi di rischio, fornisca maggiori garanzie circa il rispetto dei tempi di costruzione dell'opera. Anche la progettazione della TBM ha comportato un'importante fase di approfondimento, condotta dalla HERRENKNECHT AG, legata al carattere del tutto eccezionale del diametro di scavo; a fronte delle usuali geometrie di scavo, con diametri pari a 6-7 m per gallerie metropolitane e pari a 10-12 m max. per gallerie ferroviarie ed autostradali, la galleria Sparvo, con un diametro di 15.62 m, risulta la più grande TBM-EPBs mai costruita. Andavano quindi verificati i dimensionamenti delle parti meccaniche, specialmente della testa fresante dello scudo, e soprattutto andavano definiti la spinta e la coppia fresante della TBM in funzione della pressione da mantenere in camera di scavo e delle pressioni esercitate dall'ammasso al contorno dello scudo; il tutto nel tentativo di impedire il blocco della TBM in fase di avanzamento. Di questi aspetti si parlerà in dettaglio nel prossimo capitolo. Anche la gestione della sicurezza in presenza di gas ha comportato, nell'ambito del progetto della TBM, l'introduzione di speciali attrezzature e schemi di lavoro descritti.

5. Il dimensionamento geotecnico della TBM-EPB

La definizione delle forze di interazione tra ammasso e TBM durante l'avanzamento con sistema meccanizzato non può prescindere, così come per lo scavo in tradizionale, dall'analisi della risposta deformativa dell'ammasso a seguito dello scavo, in termini sia di estrusione del nucleo-fronte e di "preconvergenza" presso il fronte, sia di convergenza della cavità, secondo quanto ben individuato dall'Approccio ADECO.RS [4]. È infatti importante capire come esista una stretta connessione tra l'estrusione del nucleo-fronte ed i fenomeni di preconvergenza e convergenza del cavo, e come il controllo dell'estrusione, attraverso adeguate azioni di pre-confinamento del fronte di scavo, consenta un conseguente controllo dei fenomeni di convergenza e delle pressioni ad essi associate al contorno del cavo [4]. Con riferimento alla Fig. 3, una volta nota la pressione geostatica σ_0 agente esternamente la TBM al fron-

te, appare fondamentale definire correttamente la pressione di confinamento σ_3 da operare in camera di scavo, perché da essa dipendono le deformazioni presso il fronte, le quali condizionano l'evoluzione del comportamento tensio-deformativo del cavo. Questo soprattutto in terreni quali le APA, dove le caratteristiche di resistenza sono fortemente dipendenti dalle deformazioni raggiunte, così che il livello di detensionamento del fronte condiziona sostanzialmente la dimensione della fascia di ammasso plasticizzato al contorno del profilo di scavo e l'entità dei carichi agenti sullo scudo e sui rivestimenti definitivi. Tali aspetti verranno trattati in dettaglio nei capitoli seguenti.

5.1. Il comportamento del nucleo-fronte e la pressione in camera di scavo

La definizione della pressione σ_3 da mantenere in camera di scavo è stata effettuata con l'obiettivo di mantenere l'ammasso al fronte pressoché in campo elastico, con deformazioni quindi contenute. In considerazione degli elevati valori di ricoprimento, fino a 100-120 m, è infatti impossibile operare un contro-bilanciamento delle pressioni geostatiche agenti ($\sigma_v = 20-25 \text{ bar} = 2.0-2.5 \text{ MPa}$, $\sigma_h = 14-18 \text{ bar} = 1.4-1.8 \text{ MPa}$, assumendo $K_0 = \sigma_h / \sigma_v = 0.7$), come usualmente effettuato per scavi meccanizzati in ambito urbano, in presenza di modesti ricoprimenti, dove ci si pone l'obiettivo di azzerare i volumi persi ed i conseguenti cedimenti a piano campagna. In questo caso occorre minimizzare il prodursi di plasticizzazioni nel nucleo-fronte, allo scopo di limitare il detensionamento dell'ammasso.

Per la definizione della pressione σ_3 secondo il suddetto criterio, sono stati partico-

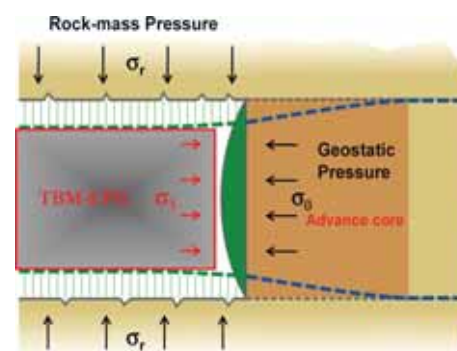


Fig. 3 - Analisi della risposta deformativa.

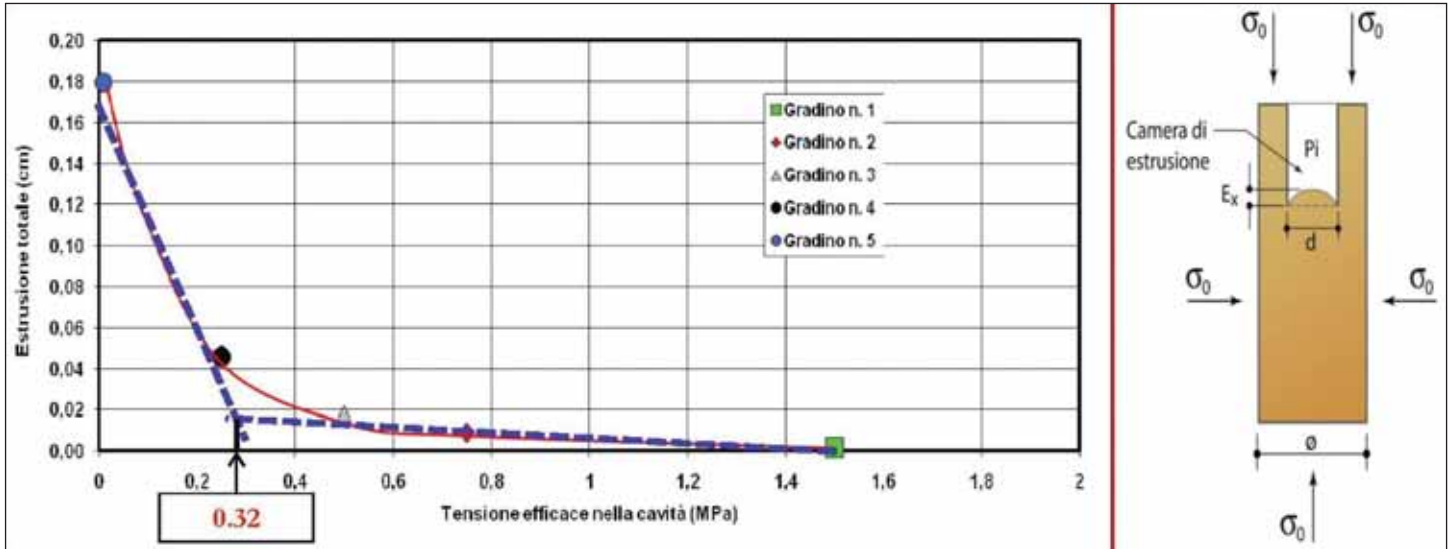


Fig. 4 – Prove di estrusione, Curve Estrusione-Pressione di confinamento del fronte.

larmente utili gli esiti di alcune “prove di estrusione” in cella triassiale, in grado di simulare lo scavo di avanzamento in galleria in scala ridotta, ricostruendo l’evoluzione tenso-deformativa nel nucleo di terreno al fronte quando la pressione di confinamento σ_3 decresce fino ad annullarsi. Con riferimento alla Fig. 4, un campione di terreno di diametro \varnothing viene posto all’interno di una cella triassiale e viene ricreata la tensione geostatica σ_0 presente nell’ammasso. Viene poi determinata la pressione $P_i = \sigma_3$ di un fluido all’interno di un volume cilindrico eseguito nel campione, denominato “camera di estrusione”; la camera è coassiale al campione e simula, a piccola scala, la zona del fronte della galleria.

Mantenendo costante la pressione esterna al campione e riducendo gradualmente la pressione P_i del fluido interna alla camera di estrusione si ottiene una simulazione realistica dell’estrusione al fronte ϵ_x in funzione della pressione di confinamento P_i . In Fig. 4 si riporta un esempio di curva “estrusione-pressione di confinamento”; queste curve permettono di definire la pressione di confinamento al limite del campo elastico (tratto lineare della curva) ed essere impiegate direttamente per valutare, in fase progettuale, la pressione che deve essere garantita al fronte per controllare i fenomeni deformativi [4]. Nel caso in esame, i tests condotti hanno evidenziato valori di pressioni di confinamento nel range 2.5-4.0 bar (0.25-0.40 MPa), in funzione dello stato tensionale iniziale simulato e delle

caratteristiche geotecniche dei campioni di APA impiegati. Valori di pressioni di confinamento analoghe sono state determinate mediante modelli numerici assialsimmetrici. Le valutazioni numeriche condotte per la formazione delle SCA hanno evidenziato come non siano necessarie, ai fini del controllo del comportamento del fronte, specifiche pressioni di contenimento in camera di scavo.

5.2. Le forze d’attrito agenti sullo scudo

La definizione delle forze agenti al contorno dello scudo è stata condotta attraverso

l’analisi della relazione tra pressione e convergenza del cavo, secondo il metodo “convergenza-confinamento”; anche in questo caso non è pensabile operare con riferimento ai carichi geostatici, che raggiungono alle massime coperture valori prossimi a 3 MPa. Si è dovuto necessariamente considerare le inevitabili convergenze del cavo nel gap previsto tra diametro di scavo ed estradosso scudo. Attraverso analisi numeriche 2D, in grado di tenere conto di coefficienti a riposo nel range 0.6-0.8 e, nel caso specifico delle APA, della legge di strain-softening descritta al capitolo 3, sono state ricavate le curve caratteristiche pressione-convergenza, così

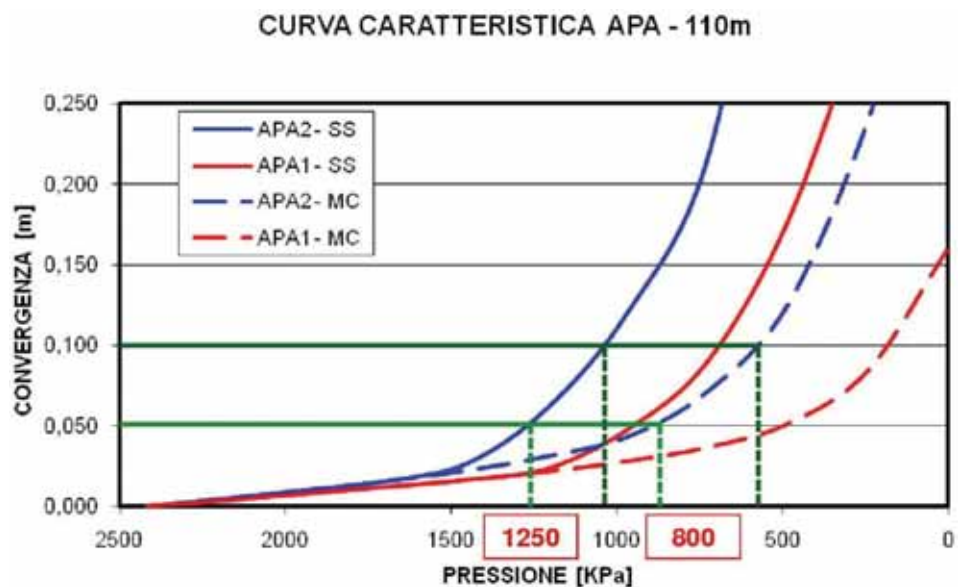


Fig. 5 – APA (H=110m) – Curve convergenza-confinamento.

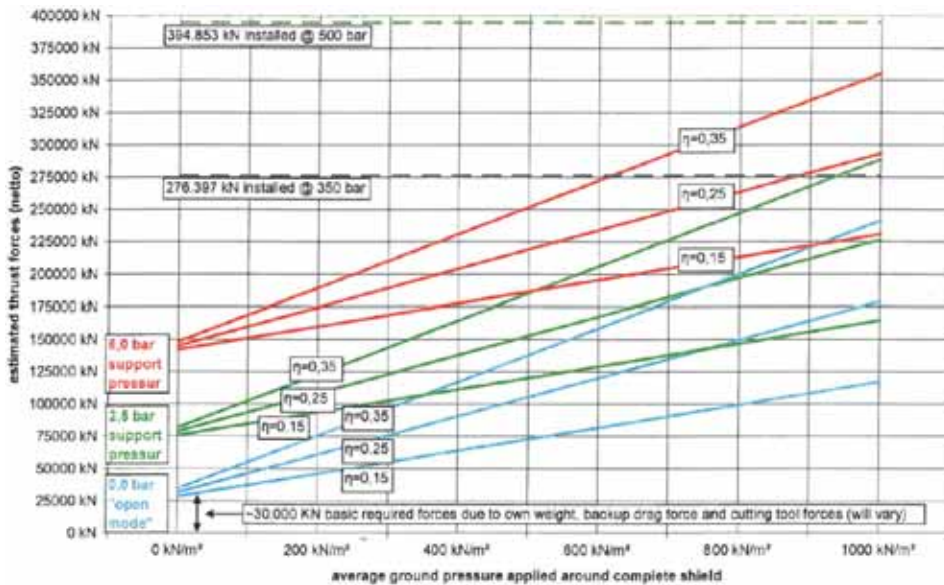


Fig. 6 - Analisi parametrica della spinta della TBM (Herrenknecht AG).

da potere calcolare le pressioni agenti in corrispondenza di chiusure del cavo pari a 5 cm, normalmente gestibili dalle geometrie di scavo della TBM, o di 10 cm nel caso di estrascavi operabili in ammassi spingenti. Con riferimento alla Fig. 5 si possono, ad esempio, esaminare le curve costruite per le APA in presenza di coperture pari a 110, impiegando parametri di resistenza e di deformabilità derivati dalle (1), (2) e (3), curve in rosso, o considerando un decadimento del 20% degli stessi, curve in blu (APA-2). In presenza di 5 cm di convergenza si hanno pressioni massime pari a 1250 kPa per le APA-2 e 900 kPa per le APA, tali pressioni scendono a 1000 kPa circa e 650 kPa circa per convergenze di 10 cm.

Sempre in Fig. 5 si riportano le curve pressione-convergenza nell'ipotesi di impiegare per le APA e APA-2 una legge costitutiva elasto-plastica secondo Mohr-Coulomb, ovvero senza inserire il rame di strain-softening. Si osservi l'importante riduzione, a parità di convergenza 5-10 cm, delle pressioni conseguenti, a testimonianza di come sia fondamentale mantenere in fase di avanzamento livelli deformativi bassi e tali da evitare il detensionamento del materiale. Al riguardo diviene prioritaria l'azione di confinamento del nucleo operata dalla pressione in camera di scavo. I valori di pressione determinati per le APA a basse coperture, 25 m, sono pari a 550 kPa, sostanzialmente coincidenti con i carichi geostatici, a conferma della

formazione di un solido di carico che si propaga fino alla superficie (azione gravitativa). Infine, i valori di pressioni determinati per le SCA sono nell'ordine dei 160-200 kPa per convergenze di 5 cm e pressoché nulle per convergenze di 10 cm.

5.3. Spinta richiesta per il dimensionamento dei martinetti

La forza correlata al valore di pressione media da mantenere al fronte di scavo e la forza per vincere l'attrito scudo-ammasso, in funzione delle pressioni agenti al contorno della TBM, sono senza dubbio le principali componenti per la definizione della spinta della TBM. Ad essa sono poi da aggiungere una serie di altre componenti, legate al peso proprio della macchina e del back-up, alle forze necessarie per la frantumazione dell'ammasso al fronte attraverso i cutters ed al contorno della testa fresante, l'attrito del sistema di spazzole in coda allo scudo. Con riferimento a quanto anche indicato in [5], il dimensionamento della spinta complessiva (T) deriva dalla somma delle singole resistenze, prevedendo un fattore di sicurezza (γ_f). Si ha:

$$T = \gamma_f \cdot \Sigma W \text{ (KN)}$$

$$\Sigma W = W_{sk} + W_{supp} + W_{exc} + W_{sh} \text{ (KN)}$$

essendo

$$W_{sk} = \mu [2\pi \cdot R \cdot L \cdot (\sigma_m) + F_w] \text{ (KN)}$$

la forza dovuta all'attrito, avendo indicato

con $R=7.8\text{m}$ ed $L=12.5\text{m}$ circa rispettivamente il raggio e la lunghezza dello scudo, con σ_m la pressione dell'ammasso all'estradosso dello scudo, determinata come discusso al capitolo 4.2, F_w il peso della TBM (30000 KN) e del back-up e con μ il coefficiente di attrito, per il quale, in funzione delle litologie, si assume il valore nel range 0.25-0.35. L'impiego di speciali lubrificanti in bentonite, iniettati dallo scudo, possono condurre ad assumere un valore del coefficiente μ pari a 0.15,

$$W_{supp} = A_{exc} \cdot P_f \text{ (KN)}$$

la forza dovuta alla pressione da applicare in camera di scavo presso il fronte, con A_{exc} l'area di scavo e P_f la pressione di confinamento σ_3 determinata al capitolo 4.1,

$$W_{exc} = N_{cutter} \cdot P_{cutter}$$

la forza necessaria allo scavo con N_{cutter} il numero dei cutter previsti nella cutter head, pari a 100, e P_{cutter} la forza sviluppata da ciascun cutter, posta ad esperienza pari a 200 KN/cutter, ed infine

$$W_{sh} = 2\pi \cdot R \cdot (p_{sh} + p_b)$$

la forza d'attrito presente in coda allo scudo in corrispondenza delle spazzole di tenuta del grouting, p_b , e la forza di pretaglio al contorno della testa frsante, p_{sh} , posti pari a 10 KN/m sulla base di valori di esperienza. Le valutazioni condotte hanno portato a redigere, con HERRENKNECTH AG, il grafico di Fig. 6 dove viene individuato il valore della forza di spinta in funzione del contesto geotecnico attraversato e della scelta del coefficiente di attrito adottato. Si può osservare un valore di spinta minima, pari a circa 30000 KN, correlata al peso proprio della TBM e del back-up ed alla forza dei cutters; in questo caso, tipico di un contesto lapideo non spingente, si considerano nulle sia le pressioni al contorno dello scudo sia la pressione in camera di scavo. La presenza di pressione in camera di scavo, pari a 2.5 bar (0.25 MPa) o 6 bar (0.60 MPa) - in quest'ultimo caso volendo tenere conto anche di possibili pressioni idrostatiche in aggiunta a quanto definito al capitolo 4.1 - porta la spinta necessaria a 75000 KN o 150000 circa; sono poi derivabili i valori di spinta in funzione della pressione agente



Foto 1 – La TBM-EPB “Martina” e gli apprestamenti dell’imbocco lato Firenze.

al contorno dello scudo: considerando una pressione massima di 1000 KN/m^2 , ovvero 1000 kPa , si ottengono valori della spinta variabili fino a circa 360000 KN in considerazione del valore di coefficiente di attrito adottato. Il dimensionamento del sistema di spinta è stato effettuato impiegando 57 martinetti, che in condizioni di normale esercizio operano con pressioni di 350 bar esprimendo una forza complessiva di spinta pari a 276000 KN circa, mentre nei contesti più spingenti operano con sovrappressioni fino a 500 bar, raggiungendo una spinta complessiva di circa 400000 KN .

5.4. I dettagli costruttivi

In sede di progettazione di dettaglio della TBM si sono evidenziati alcuni aspetti costruttivi particolarmente utili nella gestione dell’interazione TBM-ammasso; in primis, considerata l’evoluzione della convergenza del cavo in funzione della distanza dal fronte, si è ritenuto opportuno prevedere una forma troncoconica dello scudo riducendo il diametro nella parte terminale. Nel dettaglio lo scudo è composto da tre parti: il settore di testa ha un diametro di 15550 mm, il settore centrale 15510 mm ed il settore di coda 15470, prevedendo quindi una riduzione di 20 mm sul raggio rispetto al tronco precedente e 40 mm complessivi tra

testa e coda dello scudo. E’ poi previsto un ulteriore salto tra testa scudo e cutter head di 32.5 mm, portando quindi a 72.5 mm sul raggio il gap tra profilo di scavo ed estradosso scudo. Inoltre, come descritto al capitolo 4.2., la presenza di un cutter estraibile nel cutteredge permette un sovrascavo di ulteriori 50 mm sul raggio, permettendo quindi di gestire meglio l’avanzamento della TBM in condizioni di ammasso spingente. Al

riguardo si è previsto di attrezzare lo scudo con celle di pressione, così da monitorare in corso d’opera il valore delle pressioni che l’ammasso trasferisce alla TBM. Da ultimo si sono previsti, sempre nello scudo, specifici iniettori di lubrificanti per ridurre le condizioni di attrito sullo scudo e ridurre la forza di spinta in caso di imprevisti superamenti delle pressioni determinate in fase di dimensionamento.



Foto 2 – La TBM-EPB “Martina” durante la fase di montaggio.

6. Conclusioni

Nel presente articolo si sono descritte le analisi condotte per il dimensionamento geotecnico della TBM-EPB che verrà impiegata per lo scavo della Galleria Sparvo, opera facente parte dei lavori di ammodernamento dell'Autostrada A1 Milano-Napoli, nel tratto tra La Quercia (Bologna) e Barberino di Mugello (Firenze). La TBM, dall'eccezionale diametro di 15.62 m, deve scavare 2600 m attraverso svariati contesti geologici, da ammassi lapidei di natura arenacea, quale la Formazione delle Arenarie dello Scabiazza, ad ammassi argillosi di scadenti caratteristiche geotecniche, quale la formazione delle Argille a Palombini. Specie queste ultime impongono di operare lo scavo minimizzando la risposta deformativa dell'ammasso durante l'avanzamento, sia in termini di estrusione e pre-convergenza al fronte sia in termini di convergenza del cavo, così da evitare il decadimento dei parametri di resistenza, guidati da una legge costitutiva strain-softening in funzione delle deformazioni plastiche, e ridurre le spinte agenti al contorno della TBM. Si è quindi dimensionata la pressione di confinamento in camera di scavo (nel range 2.5-4.0 bar) allo scopo di mantenere l'ammasso in campo elastico, attraverso anche l'esame dei risultati di prove di estrusione in cella

triassiale. Si è poi esaminata l'evoluzione dello stato tenso-deformativo al contorno dello scudo al fine di definire le pressioni su di esso agenti, variabili in funzione delle coperture e degli ammassi attraversati nel range 250-1000 kPa. La valutazione della pressione da mantenere al fronte e delle conseguenti pressioni al contorno, tenuto conto di coefficienti di attrito nel range 0.25-0.35, ha permesso quindi di calcolare la spinta esercitata dai martinetti per garantire l'avanzamento della TBM. Sono state individuate due soglie di lavoro: la prima permette di esercitare 275000 KN di spinta attraverso 57 martinetti che lavorano a 350 bar ciascuno; la seconda permette, in condizioni di ammasso spingente, di raggiungere 400000 KN circa portando la pressione di lavoro dei martinetti a 500 bar, nella logica di un'analisi di rischio. Dettagli costruttivi sono stati sviluppati al fine di evitare il blocco della TBM, quali la presenza di un gap tra testa scavo e coda scudo pari a 72.5 mm sul raggio (tronco conicità dello scudo) e la possibilità di un estrascavo di ulteriori 50 mm sul raggio per gestire più significative chiusure del cavo. Lo scudo è stato inoltre attrezzato con iniettori di lubrificanti, così da ridurre l'attrito tra TBM ed ammasso ($\mu=0.15$). Da ultimo si sono descritti gli speciali accorgimenti

per la gestione della sicurezza in galleria in presenza di gas.

La costruzione della TBM si è conclusa nel dicembre 2010 (Fig. 1) e ad oggi è stata traspostata presso il sito dell'imbocco lato Firenze dove è in fase di montaggio (Fig. 2) ed inizierà lo scavo della galleria dal prossimo agosto, affrontando una sfida avvincente che ci auguriamo possa superare con successo.

7. Bibliografia

- [1] LUNARDI P. (2007), CASSANI G., BINDI R., "From the ADECO-RS approach to the tunnelling industrialization", *International Symposium on "Tunnelling for urban development"*, Pattaya City, Thailand
- [2] LUNARDI P. (2008), CASSANI G., GATTI M., "Design aspects of the new Apennines crossing on the A1 Milan-Naples motorway: the Base Tunnel", *Proceeding of the AFTES Congrès International Monaco "Le souterrain: espace d'avenir"*, Monaco, France
- [3] LUNARDI P. (2000), "Design & Constructing tunnels – ADECO-RS approach", *Tunnels and Tunnelling International*, special supplement
- [4] LUNARDI P. (2008), "Design and Construction of Tunnels – Analysis of Controlled Deformation in Rock and Soils (ADECO-RS)", *Springer*, Berlin
- [5] MAIDL B. (1996), HERRENKNECHT M., ANHEUSER L., "Mechanised Shield Tunneling", *Ernst&Sohn*, Berlin

Summary of:

The geotechnical design of the TBM-EPB for the excavation of the "Sparvo Tunnel"

P. LUNARDI
M. GATTI
G. CASSANI
Rocksoil S.p.A.

This paper describes the geological and geotechnical assessments performed to define the TBM to employ for the excavation of the "Sparvo Tunnel", which has an exceptional outer diameter of 15.62 m.; the tun-

nel lies on the A1 Milan-Naples motorway in the section between La Quercia (Bologna) and Barberino di Mugello (Florence). The technical characteristics and operating parameters are identified on which the design of the machine were based, with particular attention paid to the most critical geotechnical context consisting of the "Argille a Palombini" formation. This possesses

poor strength and deformation parameters and, with overburdens of 100-120 m., "squeezing" phenomena are highly probable, which could cause serious problems to the advance of the machine. It was therefore necessary to perform keen assessments in order to determine the characteristics of the machine (geometry, maximum thrust, pressure at the face, etc.).