

Bologna, 17, 18 19 ottobre 2013

L'industrializzazione del processo costruttivo della Galleria Naturale Solbiate Olona, mediante l'applicazione della tecnologia "jet-grouting"

P. Lunardi⁽¹⁾, G. Cassani⁽²⁾, M. Gatti⁽²⁾, N. Meistro⁽³⁾⁽¹⁾ Studio di progettazione Lunardi, P.za San Marco, 1 – 20121 Milan, Italy⁽²⁾ Rocksoil S.p.A - P.za San Marco, 1 – 20121 Milan, Italy - www.rocksoil.com⁽³⁾ Pedelombarda S.c.p.a – Via Garibaldi, 62/A – 22078 Turate, Italy

ABSTRACT: Nell'ambito dei lavori di realizzazione del Nuovo Collegamento Autostradale Dalmine-Como-Varese, noto come "Autostrada Pedemontana Lombarda", la galleria naturale Solbiate Olona rappresenta un'opera molto significativa, che ha consentito di risolvere l'interferenza tra il tracciato autostradale ed una parte dell'abitato di Solbiate, prospiciente la valle dell'Olona. La galleria, dopo un lungo tratto di artificiale realizzato a cielo aperto, attraversa in naturale terreni ghiaioso-sabbiosi, sottopassando, in presenza di ricoprimenti di una decina di metri, diversi edifici residenziali e preesistenze. La memoria illustra le modalità d'avanzamento adottate, messe a punto conformemente ai principi dell'Approccio ADECO-RS, le quali hanno consentito una completa industrializzazione del processo costruttivo. È esaminata in dettaglio la tecnologia della "jet-grouting" dei terreni, che molta importanza ha avuto sia nella realizzazione della galleria, con trattamenti sub-orizzontali, sia nell'esecuzione dell'imbocco lato valle dell'Olona, dove si è prevista una paratia di contenimento del versante con trattamenti colonnari sub-verticali. Quest'ultima soluzione, che permette d'imboccare una galleria con una copertura dell'ordine di 2 m, è risultata particolarmente vantaggiosa rispetto ad un imbocco tradizionale, impiegante pali di grande diametro, sia in termini temporali, sia in termini di logistica di Cantiere.

1 Introduzione

Il "Nuovo Collegamento Autostradale Dalmine-Como-Varese" rappresenta, con i suoi 87 km di autostrada e quasi 70 km di nuova viabilità, un importante sistema territoriale di mobilità, che sarà in grado di muovere 350 mila veicoli al giorno, attraverso un territorio di 94 comuni interessato da quasi 4 milioni di abitanti. Il primo passo di questa importante rete di trasporto lombarda è rappresentato dalla "Tratta A", i cui lavori, iniziati nel febbraio 2010, sono ormai in fase di completamento; la realizzazione della tratta è stata appaltata al Contraente Generale "Pedelombarda" S.c.p.A, costituita da Impregilo S.p.A, Astaldi S.p.A., Impresa Pizzarotti & C. S.p.A ed A.C.I. S.c.p.A.. Questa prima tratta, di lunghezza 14.5 km, interessa le provincie di Varese e Como e costituisce il collegamento tra le esistenti Autostrade A8 "Milano-Varese" e A9 "Milano-Chiasso", mediante le interconnessioni poste in località Cassano Magnago e Lomazzo (Figura 1). Ulteriori svincoli intermedi sono previsti in località Solbiate Olona, Mozzate e Cislago. La tratta A si inserisce in un territorio a tratti urbanizzati, con presenza quindi di importanti vincoli al contorno, quali costruzioni, infrastrutture esistenti, stradali e ferroviarie, corsi d'acqua e discariche. Nel settore tra l'interconnessione di Cassano Magnago e la Valle dell'Olona, il tracciato vede un alternarsi di tratte in trincea e gallerie artificiali, con lo scopo di limitare quanto più possibile l'impatto sul territorio attraversato. Dopo avere sottopassato la SP 20 e la SP 2 mediante gallerie artificiali scatolari, il tracciato, in avvicinamento alla Valle dell'Olona, interferisce con parte dell'abitato di Solbiate, che viene sottoattraversato in galleria naturale (Figura 2); si è previsto un primo tratto di approfondimento della livelletta stradale in galleria artificiale, realizzato a cielo aperto, seguito da un tratto in sotterraneo, scavato a foro cieco con metodologia "convenzionale". Lo sbocco della galleria avviene sul versante prospiciente la sponda destra del Fiume Olona; al termina di un breve tratto in artificiale si imposta la spalla del Viadotto Olona che attraversa il fiume e consente la prosecuzione dell'opera in località Gorla Maggiore, ancora una volta in galleria artificiale così da limitare l'impatto ambientale e preservare alcune viabilità locali esistenti, tra cui la SP19.

La progettazione della galleria naturale "Solbiate Olona", affidata alla Rocksoil S.p.A., ed in particolare la scelta delle metodologie esecutive, è stata condotta con l'obiettivo da un lato di garantire idonee condizioni di sicurezza, in galleria e per le preesistenze con essa interferenti, e dall'altra di raggiungere un elevato livello di industrializzazione del processo costruttivo, in grado di consentire il rispetto dei tempi e dei costi preventivati. Tali scelte progettuali vengono presentate in dettaglio nel seguito, congiuntamente alle evidenze raccolte durante lo svolgimento dei lavori.



Figura 1. Localizzazione dell'opera



Figura 2. Inquadramento territoriale

2 Breve inquadramento dell'opera

La Galleria Solbiate Olona è costituita da due canne, una in direzione Est verso Lomazzo, l'altra in direzione Ovest verso Cassano Magnago, con distanza tra gli assi, nel tratto in naturale, mediamente di 35 m e lunghezze rispettivamente pari a 1175 m e 1178 m, di cui 464 m e 457 m circa in naturale. La piattaforma stradale è riferibile alla categoria A "Autostrade in ambito urbano", secondo le disposizioni del D.M. 05.11.2001, con tre corsie per ogni direzione, di cui due di marcia, di larghezza pari a 3.75 m ed una di emergenza, di larghezza pari a 3.00 m con banchina di 0.70 m in sinistra. Al fine di garantire le visibilità in curva previste in Normativa per la velocità di progetto, nel range 80-140 km/h, in presenza di un raggio di curvatura planimetrica di 1350 m e pendenza trasversali fino al 5.8%, la carreggiata est presenta, lungo l'intero suo sviluppo, un allargamento di 0.50 m in destra, mentre la carreggiata ovest un allargamento in sinistra pari a 2.60 m. Ne derivano sezioni trasversali particolarmente importanti, con area di scavo di 190 m² per la canna Est e di 230 m² per la canna Ovest (Figura 3). Le due canne sono connesse nel tratto a foro cieco mediante un by-pass carrabile ed un by-pass pedonale, ai quali si aggiungono, nel tratto di galleria artificiale lato Cassano Magnago, un ulteriore by-pass pedonale, una coppia di piazzole di sosta ed un'uscita di sicurezza con corpi scala, così da rispettare le prescrizioni in materia di sicurezza, che prevedono collegamenti pedonali ogni 300 m, carrabili ogni 900 m e piazzole per la sosta di emergenza ogni 600 m.

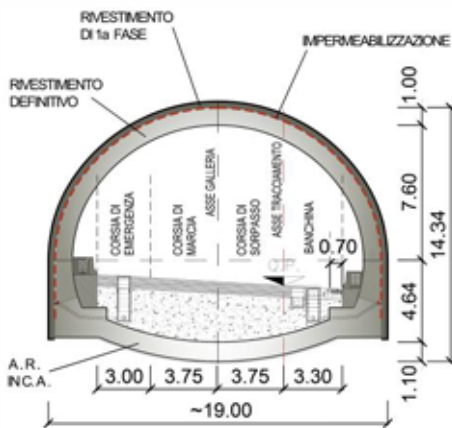


Figura 3. Carr. ovest - Sezione trasversale



Figura 4. Planimetria con le interferenze di superficie

La galleria è caratterizzata da ricoprimenti in calotta molto modesti, mediamente compresi tra 10 e 13 m, inferiori ai diametri di scavo pari a circa 17 m per la canna est e 19 m per per la canna ovest (rapporti H/D nel range 0.5-0.7); tale situazione è ulteriormente complicata dalla presenza, a piano campagna, di edifici che interessano per un ampio tratto l'impronta della galleria, come mostrato in Figura 4. Si tratta prevalentemente di edifici residenziali a 2-3 piani, costruiti negli anni 60-70, con struttura mista in muratura portante e solai in latero-cemento, più alcune strutture industriali monopiano; talora è previsto un piano cantinato fino a profondità di 2-3 m da piano campagna. Durante la fase di progettazione sono state predisposte schede di rilievo con le principali caratteristiche degli edifici interessati (geometrie, quota piano fondazioni, tipologia strutturale ...), mentre, prima dell'inizio dei lavori, sono stati redatti specifici "testimoniali di stato", per accertare in contraddittorio lo stato di conservazione dei manufatti e l'eventuale presenza pregressa di stati fessurativi. La presenza di edifici, abitati durante la realizzazione dei lavori, ha determinato la necessità di minimizzare i volumi persi in fase di scavo, così da operare un controllo dei cedimenti a piano campagna e dei relativi risentimenti sulle preesistenze. E' stato inoltre predisposto un sistema di monitoraggio, in modo da rilevare in corso d'opera i valori di cedimento, in funzione dei quali affinare le modalità di avanzamento stesse, secondo specifiche "Linee Guida" già predisposte in fase progettuale nello spirito dell'approccio osservazionale ADECO-RS (Lunardi, 2008).

3 Quadro geologico-idrogeologico e geotecnico

L'opera si inserisce in un contesto geologico costituito superficialmente dai sedimenti glaciali pleistocenici degli anfiteatri del Verbano e del Lario, e dai corrispettivi sedimenti fluvioglaciali. I sedimenti di natura fluviale, ad eccezione di quelli recenti che occupano gli attuali letti dei corsi d'acqua, sono limitati ai conglomerati chiamati generalmente "Ceppo", depositatisi nel lungo periodo interglaciale compreso tra il Pliocene superiore ed il Pleistocene medio. Secondo il principio delle Alloformazioni, lungo il tracciato della galleria è stato individuato l'Allogruppo di Besnate, appartenente al Bacino del Verbano, costituito da depositi glaciali e fluvioglaciali composti da ghiaie e sabbie stratificate e gradate; in Figura 5 si riporta il profilo geologico-geomeccanico della galleria. Nell'area interessata dalla galleria, specie lungo la Valle dell'Olona, sono stati inoltre rilevati affioramenti di "Ceppo dell'Olona", costituito da conglomerati a supporto clastico con cementazione molto variabile, da buona a scarsa, fino ad assente; diversi passaggi sono risultati riconoscibili anche sui fronti di scavo della galleria, sotto forma di sporadiche intercalazioni (Figura 6). Dal punto di vista geomorfologico l'area in esame risulta sostanzialmente pianeggiante; l'unico elemento di rilievo è il fiume Olona, che ha scavato un piccolo canyon poco inciso con la relativa piana alluvionale a quote inferiori (circa 30m) rispetto al livello principale della pianura, con scarpate fluviali mediamente acclivi. Lungo il tracciato della galleria non sono state rilevate forme di dissesto significative; le le uniche aree potenzialmente soggette ad instabilità sono le scarpate fluviali del Fiume Olona, spesso soggette a distacchi degli strati più superficiali ad opera degli agenti atmosferici. La galleria non presenta criticità di natura idrogeologica, non interferendo con la falda, la cui soggiacenza media, in questo settore del tracciato, è superiore a 35 m, raccordandosi con l'alveo del fiume Olona.

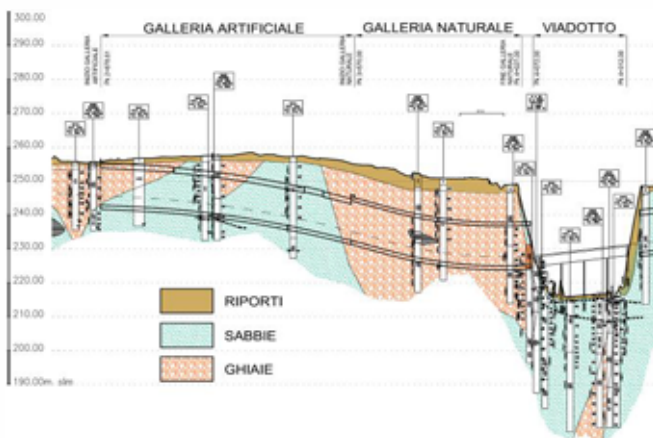


Figura 5. Profilo geologico-geotecnico (coperture da 2 a 13 m, diam. 19 m)

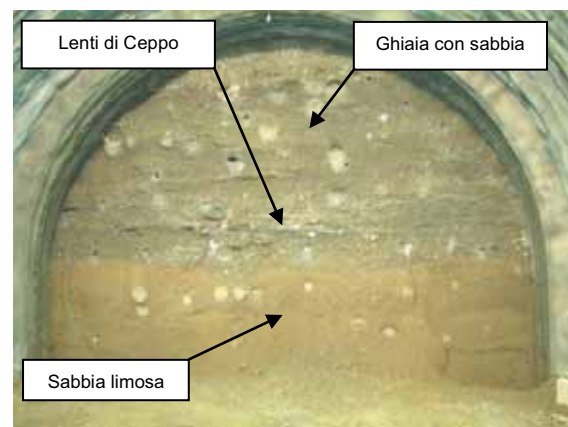


Figura 6. Terreni al fronte di scavo

La ricostruzione stratigrafica è stata condotta mediante 5 verticali geognostiche, mentre la caratterizzazione geotecnica ha previsto l'esecuzione di prove in situ ed in laboratorio, le quali hanno

permesso di classificare i terreni interessati dalla galleria quali appartenenti all'unità delle "Ghiaie prevalenti", mentre solo in fasce più contenute sono presenti le unità delle "Sabbie" e dei "Limi" prevalenti. In tabella 1 si riportano i parametri di resistenza e deformabilità, in funzione della profondità, impiegati nelle analisi numeriche.

Tabella 1. Parametri geotecnici caratteristici impiegati in progetto

Stratigrafia	d [m]	γ [kN/m ³]	c' [kPa]	ϕ' [kPa]	E [MPa]	k [m/s]
Riporto	3	18.0-19.0	0	28-30	10-20	-
Ghiaia con sabbia	3-15	19.5-20.5	0-5	32-36	20-50	10^{-4} - 10^{-5}
Ghiaia con sabbia	> 15	19.5-20.5	0-5	34-38	50-100	10^{-4} - 10^{-5}
Limo con ghiaia	lenti	18.5-19.5	10-15	25-28	10-20	10^{-6} - 10^{-7}

Infine, relativamente alle condizioni di sismicità dell'area, si evidenzia che questa si trova in zona 4 secondo l'OPCM 2003; le accelerazioni orizzontali a_g su suolo di categoria A, valutate secondo le NTC2008, risultano pari a 0.054g per lo Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV) e 0.031g per lo Stato Limite di Danno (SLD), considerando una vita nominale V_N pari a 100 anni con classe d'uso IV (coefficiente $c_u = 2.0$, periodo di riferimento $V_R = 200$ anni). Per le opere provvisorie di imbocco, considerando V_N pari a 10 anni ($V_R = 35$ anni), si hanno a_g pari a 0.035g per SLV e 0.016g per SLD.

4 La tecnologia del "jet-grouting"

Al fine di operare il controllo della risposta deformativa dell'ammasso, a seguito dello scavo, secondo quanto previsto dall'Approccio ADECO-RS (Lunardi 2008), si rendeva necessario adottare interventi preventivi di consolidamento dei terreni granulari, incoerenti, attraversati dalla galleria, migliorandone le caratteristiche di resistenza, così da farli contribuire attivamente al raggiungimento di condizioni di stabilità del fronte e del cavo. Le caratteristiche granulometriche e di permeabilità dei materiali da trattare hanno spinto ad individuare nel "jet-grouting" la tecnologia più idonea ad ottenere significativi volumi trattati mediante lavorazioni dalle tempistiche contenute, se confrontate con altri sistemi di iniezione e consolidamento. La tecnica del "jet-grouting" consiste infatti nell'iniezione di miscele fluide ad altissima velocità attraverso uno o più ugelli posti all'estremità di un'asta cava; i getti fluidi determinano un'azione meccanica di disaggregazione e permeazione del terreno, ottenendo la cementazione dello stesso all'intorno del punto di iniezione. Ne derivano trattamenti colonnari, il cui diametro dipende dai procedimenti operativi di esecuzione del "jet-grouting" e dai parametri impiegati (Lunardi et al. 1986; Croce, Gaio et al. 1994). Qualora si impieghi un'unica miscela, costituita da acqua e cemento (procedimento "monofluido"), si ottengono, nei materiali granulari in esame, trattamenti colonnari di diametro 600-1000 mm; diametri più elevati, fino a 1500-1800 mm, si ottengono abbinando alla miscela cementizia anche l'iniezione di aria compressa (procedimento "bifluido"). In considerazione delle potenziali applicazioni, in galleria e dal piano campagna, si sono investigate entrambe le procedure operative mediante specifici campi prova, allo scopo di valutare puntualmente l'idoneità della tecnologia e mettere a punto i parametri operativi ottimali, anche alla luce dell'evoluzione che la tecnologia ha recentemente avuto in termini di attrezzature ed in particolare di potenzialità delle pompe di iniezione, in grado di gestire più elevate sezioni di iniezione a pressioni importanti (400-420 bar).



Figura 7. Campo prova jet "bifluido" (1500 mm)

I campi prova sono stati eseguiti durante gli scavi a cielo aperto per la realizzazione dell'imbocco lato Cassano Magnago, ed hanno previsto l'esecuzione di diversi trattamenti colonnari con differenti parametri operativi; si è poi provveduto, per i primi 5-6 m da p.c., al controllo visivo delle colonne (Figura 7), nonché si è verificata la continuità del trattamento in profondità mediante carotaggi. Infine sono stati effettuati prelievi di campioni di terreno trattato da sottoporre a prove di compressione monoassiale, per definirne le caratteristiche di resistenza. Gli esiti dei campi prova condotti sono risultati molto soddisfacenti, sia in termini di diametri resi (le prove condotte con il procedimento bifluido hanno ottenuto diametri resi nel range 1450-1700 mm), sia considerando la continuità del trattamento in profondità, dove si è registrato un recupero delle carote con RQD > 70-80%; le prove di compressione hanno fornito un valore medio di resistenza a compressione pari a 8.7 MPa, superiore al valore di 5 MPa prescritto in progetto. In Tabella 2 si riportano i parametri operativi individuati, impiegati durante i lavori; per la miscela di iniezione si è adottato un rapporto A/C pari a 1.0. Per il jet "bifluido" si è impiegata una pressione dell'aria iniettata di 8 bar con portata 8 m³/min.

Tabella 2. Parametri operativi impiegati per il "jet-grouting"

Procedimento	D [mm]	Pr [bar]	Ugelli [N, Dmm]	V _{estrazione} [sec/4cm]	V _{estrazione} [cm/min]	V _{rot} [g/min]	Portata [lt/min]
Monofluido	600	360-400	3 da 2.6	3-4	60-80	15	216
Bifluido	1500	400-420	2 da 4.0	7.5-8	30-32	9.38	342



Figura 8. Trattamenti jet "monofluido" (600 mm)

Durante l'esecuzione dei trattamenti si sono registrati consumi di cemento in ragione di 210-230 kg/ml per i trattamenti colonnari diametro 600 mm, e 800-850 kg/ml per i trattamenti diametro 1500 mm. Particolarmente significativo è anche il controllo del bilancio energetico in funzione dei parametri operativi, secondo quanto illustrato da Tornaghi (1993): per i trattamenti diametro 600 mm si sono previste energie specifiche di 11-14 MJ/ml di perforazione, mentre per i trattamenti 1500 mm energie specifiche di 42-46 MJ/ml. In Figura 8 si documenta la buona riuscita dei trattamenti sub-orizzontali eseguiti al fronte ed al contorno del profilo di scavo. Tutti i trattamenti in jet-grouting sono stati eseguiti dalla Società SGF – INC S.p.A..

5 La realizzazione della galleria naturale

Scelta la modalità di consolidamento più adeguata per i terreni da scavare, si sono individuate le geometrie di intervento, le ulteriori azioni di stabilizzazione del cavo da adottare e la successione delle fasi esecutive necessarie a contenere il disturbo nell'ammasso operato dall'apertura dello scavo. Riguardo alle geometrie dei trattamenti, considerate le modeste caratteristiche geotecniche dei materiali attraversati, si sono previste azioni di pre-contenimento sia del contorno del cavo, sia del nucleo-fronte. Gli interventi di consolidamento al contorno del profilo di scavo, eseguiti in avanzamento, determinano la formazione di un "effetto arco" artificiale a monte del fronte di scavo, con funzione strutturale e protettiva. La deviazione delle tensioni prodotta dalla presenza, oltre il fronte, di un guscio di terreno consolidato mediante trattamenti colonnari compenetrati, consente infatti di alleggerire e proteggere il nucleo-fronte e di evitare, o almeno limitare, il detensionamento dell'ammasso a seguito dello scavo. Gli interventi di consolidamento al fronte da un lato garantiscono la necessaria azione di stabilizzazione del nucleo, ad evitare rilasci di terreno, dall'altra minimizzano i fenomeni deformativi di estrusione ed il conseguente allentamento del terreno del nucleo. Grazie alle due azioni operate, l'avanzamento avviene in un materiale praticamente già stabilizzato e, dal punto di

vista statico, si traduce in una sensibile riduzione delle azioni che sollecitano i rivestimenti, di prima fase e definitivi, e quindi del comportamento deformativo del cavo in termini di cedimenti e convergenze. E' quindi possibile operare lo scavo a "piena sezione", anche in presenza di geometrie di 230 m², favorendo la rapida stabilizzazione del cavo mediante il getto dell'arco rovescio.

Per un primo tratto a partire dall'imbocco lato Cassano Magnago, la disponibilità di aree ha consentito di operare da piano campagna, realizzando trattamenti colonnari di diametro 1500 mm, a formare una fascia di terreno consolidato al contorno del cavo pari a 4 m in calotta e 3.5 m sui piedritti, come indicato in Figura 10 (sezione tipo C1c). La geometria dei trattamenti è stata studiata per ottenere una maglia quadrata, a fondo foro, 1.10 m×1.30 m, così da garantire la compenetrazione dei trattamenti; sono state realizzate perforazioni di lunghezza pari a 19-20 m, con un tratto a vuoto, non iniettato, di 8 m circa. Il fronte di scavo è stato trattato realizzando tamponi consolidati dello spessore di 4 m ogni 15 m, così da compartimentare lo scavo della galleria. L'esecuzione anticipata dei trattamenti, realizzati pressochè in contemporanea con i pali della paratia di imbocco, ha consentito di velocizzare le fasi di avanzamento dovendo operare, dall'interno della galleria, unicamente le fasi di scavo e rivestimento; si sono previsti rivestimenti di prima fase costituiti da centine 2IPN180/200 (canna est/ovest) disposte a passo 1.0 m ed inglobate in uno strato di spritz-beton fibrorinforzato dello spessore di 30 cm, più 5 cm di regolarizzazione. La distanza di getto dell'arco rovescio è stata posta a circa 40-50 m dal fronte.

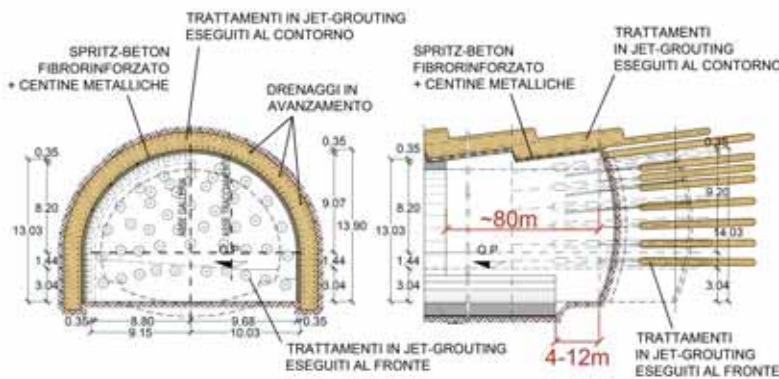


Figura 9. Sezione tipo C1a

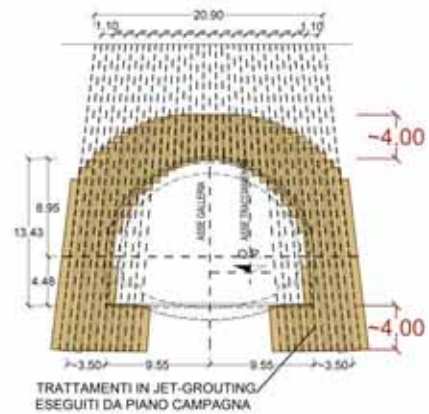


Figura 10. Sezione tipo C1c

Per la restante parte della galleria, i trattamenti sono stati eseguiti in avanzamento, con geometria sub-orizzontale tronco-conica e diametri nominali di 600 mm. Le geometrie degli interventi, ed in particolare la lunghezza delle perforazioni, sono state studiate in funzione della presenza o meno di preesistenze in superficie. Nel tratto interessato dagli edifici in superficie si è prevista una doppia coronella di trattamenti al contorno del cavo, così da disporre di una fascia consolidata di maggiore spessore (pari a 1.10-1.30 m) e, soprattutto, di avere la garanzia di continuità del trattamento anche in presenza di locali difetti del trattamento. In questo caso (sezione tipo C1a, Figura 9) si sono adottate lunghezze di trattamento pari a 18 m, con campi di avanzamento pari a 8 m; la ripetitività dell'intervento determina al contorno una doppia sovrapposizione con un ulteriore margine di 2 m. I trattamenti sono stati disposti ad interasse di 0.50 m, con 69 colonne in canna est e 75 colonne in canna ovest. Il consolidamento del nucleo-fronte ha previsto l'esecuzione di 30 colonne in canna est e 41 in canna ovest, di lunghezza pari a 18 m e sovrapposizione di 10 m (4 m di perforazione a vuoto).



Figura 11. Controlli in galleria (trattamenti in jet-grouting, L=18 m spessore 150 cm)

Quale rivestimento di prima fase si è previsto l'impiego di centine 2IPN180/200 (canna est/ovest) disposte a passo 1.0 m, inglobate in uno strato di spritz-beton fibrorinforzato di spessore pari a 30 cm, più 5 cm di regolarizzazione. Al fine di minimizzare il comportamento deformativo del prerinvestimento si è operato il getto dell'arco rovescio ad una distanza molto prossima al fronte di scavo, variabile tra 4 m e 12 m (inizio e fine scavo del campo di avanzamento). La distanza massima dal fronte di getto della calotta è pari a 80 m, avendo come regola di rivestire la canna più avanzata prima del sopraggiungere del fronte di scavo della seconda canna; questo ha determinato distanze di getto pari a circa 50 m. Un aspetto delicato della sezione tipo C1a è l'importante lunghezza dei consolidamenti, pari a 18 m, che rappresenta, oggigiorno, un limite superiore della procedura "monofluido" standard in galleria; allo scopo di verificarne l'affidabilità sono stati condotti controlli in corso d'opera, effettuando carotaggi radiali a fine trattamento, che hanno mostrato spessori di terreno trattato pari a 140-150 cm, come mostrato in Figura 11, con resistenze a compressione monoassiale nel range 7.2-8.4 MPa. In assenza di edifici in superficie, si sono adottate lunghezze di consolidamento al contorno pari a 14 m, con campi di avanzamento da 9.0 m, e sovrapposizione di 5.0 m (perforazione a vuoto pari a 1.5 m); anche in questo caso si è adottato un interasse di 0.5 m, con 69 colonne in canna est e 75 colonne in canna ovest. Il consolidamento del nucleo-fronte ha previsto l'esecuzione di 30 colonne in canna est e 41 colonne in canna ovest, di lunghezza pari a 16 m, sovrapposizione di 7 m e tratto a vuoto di 5 m (sezione tipo C1b). Si sono adottati rivestimenti di prima fase analoghi a quelli della sezione tipo C1a, con distanza di getto dell'arco rovescio dal fronte pari a 15-20 m. Nello schema planimetrico riportato in Figura 4 si indicano le tratte di applicazione delle sezioni tipo impiegate: C1a, C1b e C1c. Tutti i rivestimenti definitivi, arco rovescio e calotta, sono in calcestruzzo armato, classe C25/30 (XC2)



Figura 12. Fasi esecutive

Dal punto di vista del Cantiere, gestito in diretta da "Pedelombarda S.c.p.A.", il ciclo di lavoro è stato organizzato su tre fasi principali: 1) l'esecuzione dei trattamenti, al fronte ed al contorno, 2) lo scavo di avanzamento, condotto per singoli sfondi di 1.0 m, seguiti dalla posa del rivestimento di prima fase e 3) il getto dell'arco rovescio, come mostrato in Figura 12. Le altre lavorazioni, quali la posa del sistema di impermeabilizzazione, la posa dell'armatura in calotta ed il getto del rivestimento definitivo, vengono eseguite in ombra al percorso critico, condizionando unicamente l'avanzamento della canna adiacente che, dato il ridotto setto tra le due canne, deve affiancarsi ad una galleria già rivestita.

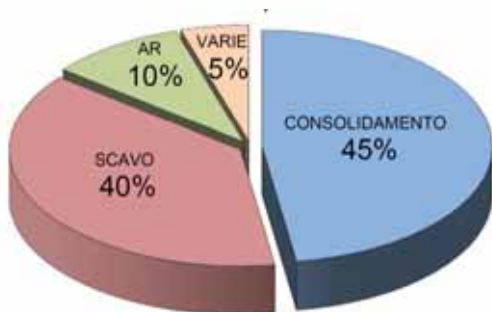


Figura 13. Ciclo di lavoro (sezione tipo C1b)

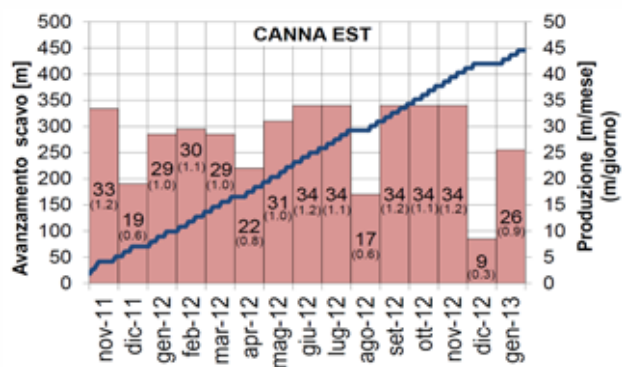


Figura 14. Produzioni Canna est (m/mese-giorno)

La durata media di un ciclo di lavoro è risultata di circa 7-8 giorni, ripartita, per la sezione tipo C1b, come indicato in Figura 13: il 45% del tempo viene dedicato all'esecuzione dei trattamenti, il 40% alla fase di scavo e posa del rivestimento di prima fase, il 10% per la realizzazione dell'arco rovescio; una

minima percentuale per attività collaterali. Analoga ripartizione vale per la sezione C1a. Gli scavi, iniziati nell'ottobre 2011 dall'imbocco lato Cassano Magnago (Figura 15), sono proceduti senza interruzione con estrema regolarità, addivenendo ad una vera e propria industrializzazione del processo costruttivo, come si può notare dal grafico di Figura 14, che riporta, a titolo di esempio, le produzioni della canna est in m/mese e m/giorno. Si osservano produzioni mensili molto regolari, pari a 30-34 m/mese, se si escludono i mesi di agosto e dicembre interessati dalle sospensioni per ferie estive e festività natalizie, ovvero produzioni medie giornaliere di 1.00-1.20 m/giorno. L'andamento dell'avanzamento (linea in blu) è praticamente lineare e, in prima battuta, assimilabile ad una retta, a testimonianza di come un'attenta pianificazione progettuale permetta di industrializzare gli scavi e quindi di ottimizzare i tempi e i costi di costruzione. La foratura della canna est è avvenuta a febbraio 2013, il completamento anche della canna ovest nell'aprile 2013.



Figura 15. Fasi di partenza degli avanzamenti (imbocco lato Cassano Magnago)

6 La soluzione in jet-grouting per l'imbocco sulla Valle dell'Olon

L'imbocco prospiciente la Valle del fiume Olona presenta un contesto particolarmente delicato, avendo una morfologia piuttosto acclive pur in presenza di terreni granulari di modeste caratteristiche di resistenza; le pendenze presenti sono da associarsi a locali livelli conglomeratici ("ceppo") e principalmente ad una coesione apparente dei terreni, con il risultato che periodicamente, ad opera degli agenti atmosferici, si verificano distacchi di porzioni di pendio non trattenute dalla vegetazione. Inoltre, subito a tergo del versante, sono presenti alcuni edifici residenziali con relative pertinenze, in affaccio sulla valle. In sede di Progetto Esecutivo, come per l'imbocco lato Cassano Magnago, al fine di predisporre le geometrie di scavo della galleria naturale, si era prevista l'adozione di una paratia di pali di grosso diametro, contrastata, in fase di ribasso, mediante tiranti a trefoli. Nella fase di allestimento del Cantiere, sono però emerse notevoli difficoltà logistiche legate alla movimentazione delle attrezzature di realizzazione dei pali, in ragione delle pendenze del versante; le fasi previste per la realizzazione dell'imbocco, dovendo prevedere diversi step di ribasso degli scavi alternati alla realizzazione dei livelli di contrasto mediante tiranti, rendeva inoltre la realizzazione dell'opera molto onerosa in termini temporali.

Si è quindi valutata l'ipotesi di impiegare, quale opere di contenimento degli scavi, una cuffia realizzata mediante trattamenti colonnari in jet-grouting compenetrati, spesso impiegata, a partire dall'inizio degli anni '80, per la realizzazione di opere di contenimento in terreni difficili (Lunardi 2008); molte applicazioni sono state condotte nell'ambito dei lavori di realizzazione delle tratte Roma-Napoli e Bologna-Firenze della Linea ferroviaria ad Alta Capacità. Tali cuffie in jet-grouting permettono di creare una struttura di pre-contenimento del terreno a monte del futuro scavo, preservando gli equilibri naturali preesistenti grazie alla formazione, anche in questo caso, di un effetto arco in grado di minimizzare gli spostamenti nel versante. In presenza di paratie di imbocco in jet-grouting è inoltre possibile procedere all'attacco degli scavi in naturale in presenza di ricoprimenti minimi, pari a 1-3 m, così da ridurre l'altezza della paratia e gli interventi di pre-sbancamento da operare sul versante.

In Figura 16 si sono riportate le geometrie dell'intervento. Data la presenza di due canne si è prevista la realizzazione di una cuffia a due archi con la presenza di un contrafforte centrale, sempre realizzato con trattamenti colonnari in jet-grouting. Le altezze di scavo variano, lungo il perimetro delle cuffie, da pochi metri in corrispondenza delle ali laterali fino ad un massimo di 16 m in asse canna ovest. La

paratia è realizzata, in corrispondenza delle altezze maggiori, mediante 3 trattamenti colonnari in jet-grouting "bifluido", di diametro nominale 1500 mm, disposti con inclinazione 5°, 7° e 15° (quest'ultima per il paramento lato scavo), così da realizzare un setto che, in virtù della forma (planimetricamente curva ed inclinata lungo l'altezza), meglio contrasti le spinte del terreno a tergo. I trattamenti sono disposti in sommità ad interasse trasversale di 0.50 m e longitudinale di 1.0 m, la fila intermedia sfalsata e con un primo tratto di perforazione a vuoto. Per altezze di scavo inferiori ai 10-11 m si sono previste solo due colonne, inclinate 7.5° e 15°. Le lunghezze dei trattamenti variano quindi da 5-8 m fino a 23 m, con lunghezze di infissione variabili tra 4 e 7 m; le colonne esterne sono armate con tubi in acciaio, di diametro 88.9 spessore 10 mm, posizionati all'interno dei trattamenti, date le lunghezze, a seguito di riperforazione. Al fine di garantire la monoliticità dell'intervento i trattamenti colonnari sono "incappucciati" in sommità mediante una trave di testa in calcestruzzo armato, con anche funzione di irrigidimento lungo l'asse della paratia. In corrispondenza dei settori con le massime altezze si sono inoltre, precauzionalmente, posti in opera una decina di tiranti passivi, disposti ad interasse di 4 m; localmente sono stati posti in opera barbacani per dissipare eventuali pressioni idrostatiche a seguito di eventi meteorici intensi. La predisposizione dell'imbocco è avvenuta in 2-3 fasi di ribasso con posa in opera, a seguito di ciascuna fase, di uno strato di protezione mediante spritz-beton armato con rete elettrosaldata.

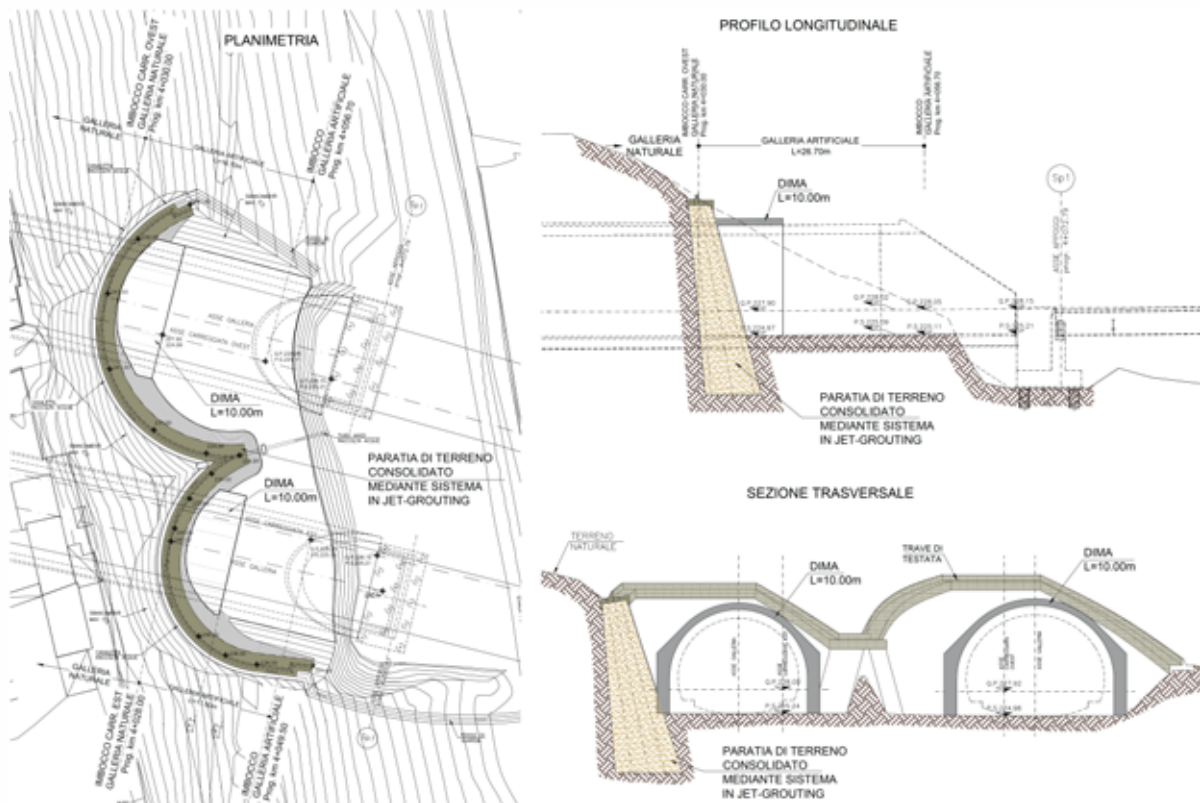


Figura 16. Il progetto dell'imbocco

La progettazione dell'imbocco e la verifica degli interventi previsti è stata condotta mediante analisi bidimensionali agli elementi finiti, così da valutare in dettaglio non solo la statica dell'opera di sostegno ma anche la variazione del quadro tenso-deformativo nel versante a seguito della realizzazione dell'opera, con specifica attenzione agli spostamenti planimetrici ed ai cedimenti in corrispondenza degli edifici a tergo dell'imbocco. L'analisi è stata condotta per fasi: dopo la ricostruzione dello stato geostatico e la simulazione dei carichi trasmessi dalle fondazioni dei fabbricati, si è simulata l'esecuzione della paratia e le successive fasi di ribasso; le analisi sono state condotte, secondo le NTC2008, per le combinazioni A1+M1 e A2+M2. Gli spostamenti orizzontali determinati dalle analisi sono risultati inferiori al cm (Figura 17a), come poi riscontrato dal monitoraggio topografico in testa paratia; gli spostamenti al di sotto dei piani fondazione pari a qualche mm. Le verifiche statiche della paratia sono state condotte valutando che il rapporto tra τ mobilitata e τ limite, derivata dal criterio di rottura del materiale jet-grouting, fosse sempre minore dell'unità (si sono ottenuti rapporti nel range 0.23-0.59, Figura 17b); sono state inoltre verificate le tensioni di trazione, in parte assorbite dai tubi metallici, ed i valori di compressione massima (pari a 0.81 MPa rispetto al valore di progetto di 5

MPa). Sono state infine condotte alcune analisi tridimensionali preliminari, al fine di valutare l'effetto della curvatura sul contenimento delle spinte agenti sull'opera di sostegno.

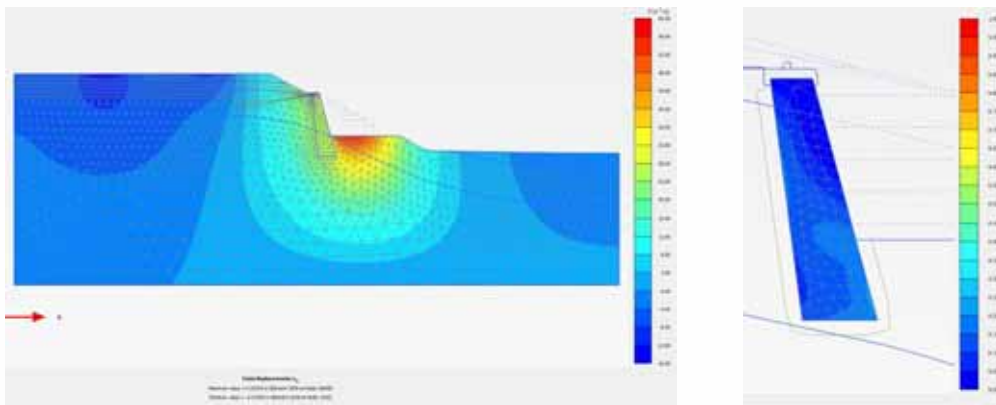


Figura 17. Valutazioni numeriche: (a) spostamenti orizzontali (A1+M1) e (b) $t_{rel} = t_{mob}/t_{lim}$

Le fasi esecutive per la predisposizione dell'imbocco prevedono tre fasi principali: 1) la realizzazione della paratia mediante trattamenti in jet-grouting, 2) la realizzazione degli scavi di ribasso con contestuale esecuzione dei trattamenti sub-orizzontali necessari per l'attacco degli scavi a foro cieco, 3) la realizzazione della dima di contrasto; le fasi principali sono illustrate in Figura 18 e 19.



Figura 18. Le fasi esecutive: preparazione dei piani di lavoro ed esecuzione dei trattamenti



Figura 19. Le fasi esecutive: scavi di ribasso, esecuzione dei trattamenti al fronte e getto della dima

Le lavorazioni sono iniziate nel luglio 2012, con la predisposizione dei piani di lavoro per l'esecuzione dei trattamenti; grazie al minore ingombro della macchina impiegata rispetto alle attrezzature per l'esecuzione di pali di grande diametro, le piste eseguite per consentire l'accesso alle aree di lavoro sono risultato poco invasive, in alcuni tratti riportando materiale stabilizzato onde evitare di intagliare il versante già particolarmente acclive e con edifici in sommità. I trattamenti in canna est sono stati eseguiti a partire dalla metà di agosto in meno di 3 mesi, comprensivi della realizzazione della trave di testata; successivamente si è provveduto agli scavi di ribasso che, in assenza di interventi di tirantatura, sono stati eseguiti in poche settimane, comprensivi anche dei consolidamenti in

avanzamento per l'attacco degli scavi a foro cieco. Rispetto ad una soluzione tradizionale, prevedente una paratia di pali di grosso diametro, si è ottenuto quindi un risparmio temporale di alcuni mesi, oltre a maggiori garanzie riguardo alle condizioni di stabilità del versante durante le lavorazioni condotte.



Figura 20. L'imbocco predisposto per lo scavo (canna est)

7 Le evidenze del sistema di monitoraggio

Il controllo della risposta deformativa allo scavo, sia in galleria sia in superficie, è stata condotta mediante un piano di monitoraggio che ha previsto principalmente la messa in opera sistematica di stazioni di misura della convergenza del cavo, mediante mire ottiche posizionate sul rivestimento di prima fase (1/campo di avanzamento), nonché l'installazione di una rete di livellazione topografica a piano campagna, specie in corrispondenza degli edifici e dei manufatti. Si sono inoltre previste misure del comportamento estrusivo del fronte durante i fermi prolungati dell'avanzamento (per festività e ferie) mediante mire ottiche e stazioni principali di misura dello stato tensionale dei rivestimenti definitivi, da mantenere anche durante una prima parte dell'esercizio.

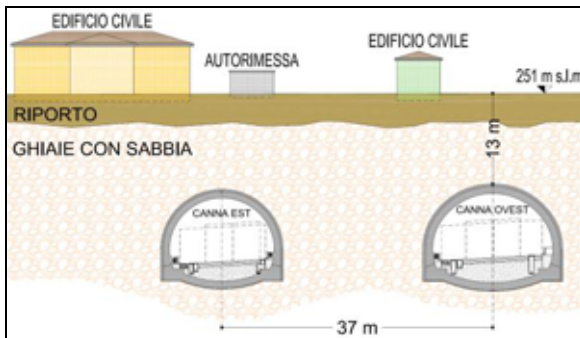


Figura 21. Sezione trasversale Via Opificio Valle

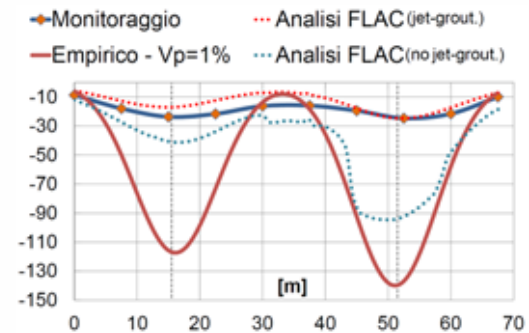


Figura 22. Cedimenti piano campagna (mm)

Premesso che si sta operando su una sezione di scavo di 230 m^2 e 19 m di diametro, i dati raccolti hanno confermato il comportamento deformativo previsto dalle analisi numeriche condotte in fase di progetto. Il nucleo-fronte, a seguito dell'esecuzione dei trattamenti, ha mostrato un comportamento "stabile", con deformazioni trascurabili; durante i fermi prolungati dell'avanzamento le misure di spostamento del fronte hanno indicato estrusioni inferiori al cm, a testimoniare una risposta deformativa in campo elastico. Anche le misure di spostamento del cavo hanno fornito valori di convergenza molto contenuti, nel range 3-8 mm, inferiori ai valori di soglia definiti nel range 25-50 mm (solo in 3 stazioni su 86 si sono registrate convergenze superiori a 10 mm, con valore massimo pari a 21 mm). Il monitoraggio più significativo ha riguardato la misura dei cedimenti a piano campagna, dati i possibili risvolti sulle preesistenze. I capisaldi topografici, sia sul piano campagna sia sugli edifici, hanno indicato cedimenti nel range 15-25 mm, secondo le previsioni di progetto, non superando mai le soglie di attenzione e di allarme fissate rispettivamente a 35mm e a 50 mm. I cedimenti misurati hanno mostrato come gli interventi di consolidamento previsti e la successione delle fasi esecutive, in particolare l'esecuzione dell'arco rovescio al fronte, abbiano consentito il mantenimento di "volumi

persi" molto contenuti. A titolo di esempio si riporta in Figura 22 il bacino di subsidenza riscontrato a piano campagna in corrispondenza della sezione trasversale di Via Opificio Valle riportata in Figura 21 (indicata "sezione A-A" nello schema planimetrico di Figura 4). I cedimenti, misurati su un allineamento trasversale all'asse delle gallerie, sono risultati compresi nel range 2-24 mm, con andamento gaussiano (linea continua blu, valori massimi pari a 23/24 mm in asse canna est/ovest); il "valore perso" sotteso alla curva dei cedimenti monitorati è risultato pari allo 0.3% del volume scavato, molto inferiore a quanto generalmente riportato in letteratura per scavi condotti in tradizionale, per i quali si prevedono indicativamente "volumi persi" nel range 1.0-2.0%. Sempre in Figura 22, a confronto, si è riportato il bacino di subsidenza valutato con le usuali formulazioni empiriche (Peck, 1969, O'Really e New, 1982) assumendo un valore del "volume perso" pari all'1%, nonché le valutazioni numeriche mediante analisi alle differenze finite, con codice di calcolo FLAC, in assenza di interventi e con i trattamenti in jet-grouting di progetto. Si noti come quest'ultima simulazione fitti molto bene i dati di monitoraggio, a testimonianza di come le modalità di avanzamento adottate siano riuscite nell'intento di mantenere un disturbo nell'ammasso molto ridotto, in linea con soluzioni di scavo con sistema meccanizzato.

8 Conclusioni

Le esperienze raccolte durante la realizzazione della Galleria Naturale Solbiate Olona, opera facente parte dell' "Autostrada Pedemontana Lombarda", tratta A, hanno mostrato come la tecnologia della "jet-grouting" rappresenti un efficiente sistema di trattamento di terreni granulari sopra falda, quali ghiaie e sabbie ben gradate; l'applicazione della tecnologia consente infatti di creare strutture di precontenimento nei terreni preventivamente alle fasi di scavo, preservando gli equilibri naturali grazie alla formazione di "effetti arco" in grado di minimizzare gli spostamenti nei materiali. Questo sia nel caso di scavi a foro cieco, per l'esecuzione di gallerie naturali, sia nel caso di scavi a cielo aperto, per la realizzazione di opere di imbocco. Nel caso in esame, l'impiego della tecnologia in sotterraneo, ha consentito di avanzare a piena sezione con diametri di scavo fino a 19 m ($A_{\text{scavo}} = 230 \text{ m}^2$) in presenza di ricoprimenti di 10-13 m ed edifici in superficie, rimasti abitati durante i lavori; sono stati rilevati cedimenti massimi nel range di 15-25 mm, corrispondenti a un "volume perso" pari allo 0.3%, in linea con soluzioni di scavo di tipo meccanizzato. Le metodologie di avanzamento, predisposte secondo l'Approccio ADECO-RS, hanno inoltre consentito una piena industrializzazione del processo costruttivo, con produzioni assai regolari, pari a 30-34 m/mese (ovvero 1.0-1.2 m/giorno). La tecnologia del "jet-grouting" è stata con successo adottata anche per la realizzazione dell'imbocco della galleria inserito nel delicato versante della Valle dell'Olona; l'esecuzione di un guscio di contenimento mediante trattamenti colonnari in jet-grouting ha consentito di risolvere le problematiche logistiche connesse all'impiego di attrezzature per pali, minimizzando nel contempo gli impatti deformativi sul versante; la soluzione ha inoltre consentito, a parità di costi, una significativa ottimizzazione dei tempi di realizzazione dell'opera, evitando la dispendiosa alternanza tra fasi di scavo e di posa in opera dei tiranti di contrasto.

9 Ringraziamenti

Gli Autori desiderano ringraziare il collega L. Bellardo per l'assistenza tecnica operata in corso d'opera e per l'attento esame dei dati di monitoraggio. Desiderano inoltre ringraziare il Cantiere "Tratta A" di Pedelombarda S.c.p.a, per la proficua collaborazione durante la realizzazione dell'opera.

10 Bibliografia

- Croce, P., Gajo A., Mongioli, L., Zaninetti, A. (1994), "Una verifica sperimentale degli effetti della jettizzazione". R.I.G., 2/94
- Lunardi, P., Mongioli, E., Tornaghi, R., (1986) "Il preconsolidamento mediante jet-grouting nella realizzazione di opere in sotterraneo", Congresso Internazionale su "Grandi Opere Sotterranee", Firenze 8-11 giugno 1986
- Lunardi, P., (2008), "Design and Construction of Tunnels – Analysis of Controlled Deformation in Rock and Soils (ADECO-RS)". Berlin, Springer.
- O'Really, M.P., New, B.M. (1982), "Settlement above tunnels in the United Kingdom – their magnitude and prediction", Proceedings of Tunneling Symposium 1982
- Peck, R.B. (1969), "Deep excavations and tunneling in soft ground", Proceedings of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City
- Tornaghi, R. (1993) "Controlli e bilanci analitici dei trattamenti colonnari mediante jet-grouting". R.I.G., 3/93