

Aspetti progettuali nella realizzazione del nuovo valico appenninico

LA GALLERIA DI BASE SULLA VARIANTE DI VALICO DELL'AUTOSTRADA A1 MILANO-NAPOLI

Pietro Lunardi
Giovanna Cassani*
Martino Gatti**

La galleria di Base del nuovo valico appenninico, di lunghezza pari a circa 8.500 m, attraversa ammassi appartenenti alle formazioni delle arenarie del Monte Cervarola e del Monte Modino e alla formazione delle Argille Scagliose, in presenza di coperture fino a 450 m.

Nel presente articolo, si descrivono le valutazioni effettuate in sede di progettazione costruttiva - impiegando l'approccio A.DE.CO-RS - per la messa a punto delle sezioni tipo. Si illustra inoltre la metodologia di avanzamento impiegata, che prevede l'applicazione di specifiche Linee Guida per la taratura degli interventi da porre in opera, in funzione delle evidenze del sistema di monitoraggio appositamente predisposto.

Da ultimo, verrà condotto un primo riesame delle evidenze raccolte in fase di costruzione, con particolare attenzione alle due tratte di galleria prossime agli imbocchi, l'una in ammassi arenacei di natura lapidea, l'altra in terreni argillosi, di scadenti caratteristiche geotecniche, interessati da superfici di scorrimento profonde interferenti con gli scavi.

Nell'ambito del potenziamento delle infrastrutture autostradali in Italia, 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 di Base che rappresenta il Valico Appenninico. L'intervento di adeguamento, interessante complessivamente un tratto di lunghezza pari a circa 60 km, prevede un primo tratto di autostrada, fino in località La Quercia, dove l'ampliamento avviene in sede all'autostrada esistente con realizzazione di due carreggiate a tre corsie di marcia più corsia di emergenza. Segue un secondo tratto, de-



Figura 1 - L'innesto a crociera per il by-pass Poggiolino

nominato Variante di Valico, di lunghezza pari a circa 32 km tra le località La Quercia e Aglio, dove viene realizzato un nuovo tratto autostradale fuori sede costituito da due carreggiate ciascuna composta da due corsie di marcia più la corsia di emergenza; in questa tratta entrambe le sedi autostradali, quella esistente e la nuova in costruzione, verranno mantenute in esercizio; infine si ha un terzo tratto - tra le località Aglio e Barberino di Mugello - dove si è previsto di impiegare le due carreggiate dell'autostrada esistente per la direzione Nord, verso Bologna, e di costruire una variante planimetrica costituita da tre corsie di marcia più corsia di emergenza (in galleria tre corsie senza emergenza) per la direzione Sud, verso Firenze.

La galleria di Base, passante per il Valico del Citerna a quota 726 m s.l.m., si inserisce nel tratto di Variante di Valico tra le p.k. 1+400 e 10+100, presenta uno sviluppo di circa 8.500 m, con pendenze longitudinali sempre inferiori allo 0,4% e raggi di curvatura planimetrici compresi tra 3.100 m e 6.000 m. E' costituita da due canne, poste a interasse variabile da un minimo di 30 m a un massimo di 80 m cir-



ca, ognuna con diametro interno pari a 13,8 m (circa 160 m di scavo), essendo la carreggiata composta da due corsie di marcia di 3,75 m, 1 corsia di emergenza di 3,50 m più franchi laterali di 0,25 m in destra e 0,70 m in sinistra; sono poi previsti due marciapiedi di larghezza pari a 0,80 m (Figura 2). Le due canne sono messe in comunicazione tramite by-pass, di tipo pedonale ogni 300 m di galleria e di tipo carrabile ogni 900 m. A completamento dei presidi di sicurezza è prevista la realizzazione di piazzole di sosta, di lunghezza pari a 80 m e larghezza 3,0 m, e nicchie SOS poste a interasse di 150 m sul lato destro della carreggiata.

Alla p.k. 5+985 (canna Sud) è prevista la realizzazione di una galleria di accesso intermedia, galleria di discenderia, al fine di velocizzare lo scavo della galleria in fase costruttiva e con funzione di accesso di sicurezza e di ventilazione in fase di esercizio. Dal punto di vista geologico la galleria attraversa principalmente ammassi appartenenti alle formazioni delle arenarie del Monte Cervarola e del Monte Modino e delle Argille Scagliose, con coperture variabili da alcuni metri, in corrispondenza degli imbocchi, fino a ricoprimenti massimi di 450 m (250 m in corrispondenza della formazione delle argille scagliose). La ricostruzione lito-stratigrafica è stata messa a punto sulle base delle indagini condotte in situ e in particolare dalle evidenze geologico-geomeccaniche raccolte durante la realizzazione di cunicoli esplorativi, che sono stati eseguiti per buona parte del tracciato della galleria in anticipo rispetto alla redazione del Progetto Esecutivo di realizzazione dell'opera, secondo la logica del foro pilota (Lunardi, 1996).

La realizzazione dell'opera è stata appaltata nell'ambito dei Lotti 9, 10 e 11 della Variante di Valico, sulla base della documentazione di progetto esecutivo, la quale ha costituito elemento di riferimento per la formulazione delle offerte di gara. Il Consorzio di Imprese Risalto (Rizani-Salini-Todini), aggiudicatario dell'appalto, e in particolare l'Impresa Todini Costruzioni SpA - che sta seguendo nel dettaglio le fasi di costruzione - hanno richiesto a MaireEngineering, in collaborazione con Rocksoil, un approfondimento circa le modalità costruttive previste in progetto alla luce dell'esperienza raccolta in contesti geomeccanici similari - in primis le gallerie ferroviarie della Linea ad Alta Capacità Bologna-Firenze (Lunardi, Bindi, Cassani, 2006-2007) - e soprattutto tenendo in conto gli aspetti connessi all'organizzazione e alla logistica propria del cantiere.

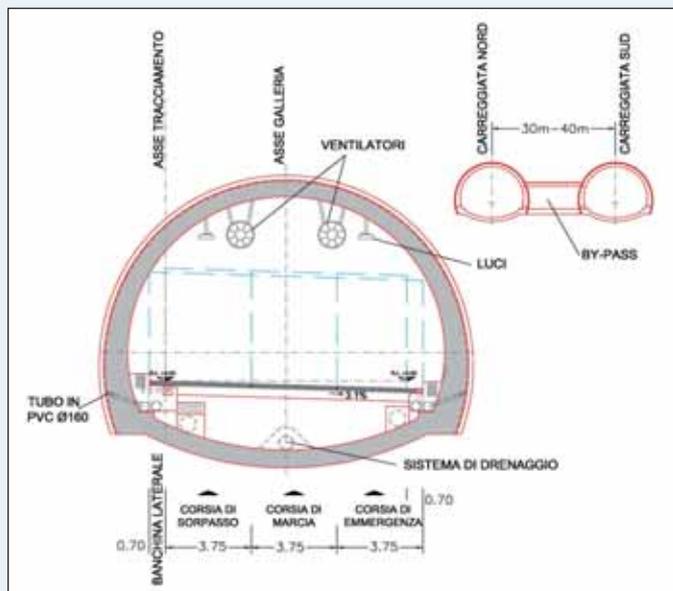


Figura 2 - La sezione trasversale

Si è quindi sviluppata una proposta di variante circa le modalità di scavo della galleria, ottimizzando le sezioni tipo di avanzamento e introducendo in progetto una flessibilità sull'intensità degli interventi da gestire in corso d'opera in funzione dei dati raccolti dal sistema di monitoraggio, nello spirito dell'approccio A.DE.CO-RS (Lunardi, 2000, 2008). Accanto al momento della progettazione, l'approccio prevede infatti anche il momento della costruzione, dove si opera il controllo e l'interpretazione dei fenomeni deformativi necessari alla messa a punto degli interventi di progetto.

La variante tecnico-economica è stata inquadrata nell'ambito dell'art. 11 del Decreto Ministeriale 145 del 2000, il quale prevede la possibilità dell'Appaltatore di proporre soluzioni tecniche migliorative al progetto esecutivo appaltato, purché in riduzione del preventivo di spesa. Non essendo state eseguite indagini geognostiche integrative, la soluzione progettuale di variante è stata messa a punto sulla base del quadro geologico-geomeccanico già individuato in sede di appalto che ha costituito, con riferimento alla gestione del rischio di Impresa in termini di tempi e costi, l'elemento base di riferimento.

Nel presente articolo si presentano le fasi che hanno guidato la messa a punto delle modalità di scavo secondo l'approccio A.DE.CO-RS, e si effettua, con ormai tre quarti di gallerie scavate (Figura 12), un primo riesame delle evidenze raccolte in fase di costruzione.

Il quadro geologico-geomeccanico

La prima fase del momento della progettazione, detta fase conoscitiva, è finalizzata all'analisi degli equilibri naturali preesistenti allo scavo della galleria, ovvero alla ricostruzione del quadro geologico-geomeccanico degli ammassi interessati dalle opere in costruzione. Essa è stata messa a punto sulla base di alcuni sondaggi eseguiti lungo il tracciato della galleria, delle prove in situ in essi condotti, sui rilievi geostrukturali effettuati in corrispondenza di affioramenti rocciosi in superficie e, soprattutto, in considerazione dei dati raccolti durante la realizzazione di cunicoli esplorativi, eseguiti fino al 1999 proprio con lo scopo di definire in modo continuo il profilo geologico, geomeccanico e idrogeologico di previsione. Nel seguito se ne riporta una breve sintesi.

L'indagine attraverso i cunicoli esplorativi

L'impiego di cunicoli esplorativi è una metodologia di indagine molto importante nell'ottica del contenimento dei rischi connessi alla realizzazione di un'opera come quella in esame, che si caratterizza per una notevole lunghezza e per la presenza di coperture rilevanti che di fatto impediscono la esecuzione di indagini dalla superficie.

E' infatti possibile in questo modo raccogliere informazioni di carattere puntuale attraverso il rilievo sistematico di dettaglio delle pareti di scavo, stimare la distribuzione dei valori di resistenza dell'ammasso lungo il tracciato ed eseguire prove in situ e prelevare campioni per prove di laboratorio; infine consente di delineare, osservando il comportamento deformativi del cunicolo, il tipo di comportamento che l'ammasso roccioso manifesterà durante l'allargamento a piena sezione. I cunicoli esplorativi sono stati eseguiti a partire dall'imbocco di Badia (lato Bologna) per circa 4.000 m e dall'imbocco Poggolino (lato Firenze) per circa 950 m; essi non interessano la parte centrale della galleria, poiché la loro esecuzione fu sospesa per problematiche connesse all'intercettazione in avanzamento di gas. Quale metodologia esecutiva fu previsto l'impiego di TBM da roccia, di diametro 3,4-4,0 m a doppio scudo, a eccezione di brevi tratte in corrispondenza dei depositi superficiali agli imbocchi, dove lo scavo fu condotto con metodologia tradizionale mediante l'impiego di centine metalliche inglobate in spritz-beton, e prevedendo localmente tubi metallici in calotta (Figura 3).



Figura 3 - Il cunicolo pilota dall'imbocco lato Bologna

Durante l'esecuzione dei cunicoli si è provveduto a raccogliere in dettaglio, attraverso schede, le caratteristiche litologiche e di fratturazione degli ammassi, con indicazione delle strutture presenti, primarie e secondarie, del grado di fratturazione e di alterazione, nonché delle venute d'acqua e dell'intercettamento di sacche di gas. In modo pun-

tuale sono state inoltre rilevate le instabilità del profilo di scavo, per distacco di cunei, per crollo di materiale incoerente, per deformazioni rilevanti, valutandone i volumi in gioco (un esempio di scheda di rilievo è riportata in Figura 4). Sono stati anche censiti gli interventi messi in opera per la stabilizzazione dello scavo, in termini di intensità dell'intervento di bullonatura, dei quantitativi di rete elettrosaldata e di spritz-beton, dei liner plates posti in opera in corrispondenza delle tratte con comportamento spingente, in particolare nella formazione delle argille scagliose. Infine, di particolare interesse per la valutazione indiretta delle caratteristiche dell'ammasso, sono anche i parametri di funzionamento delle TBM, quale velocità di avanzamento della fresa, spinta della testa, potenza assorbita, informazioni volte alla definizione dell'energia specifica di scavo (Lunardi, 1996).

Gli elementi di geologia

Il tracciato della galleria si sviluppa nel contesto geologico ascrivibile alla catena orogenetica dell'Appennino Settentrionale con riferimento a due domini principali: il Dominio Toscano, al quale appartiene la formazione del Macigno del Mugello (che a sua volta comprende una successione di formazioni, tra le quali le arenarie del Monte Cervarola e di Monte Modino) e il Dominio Ligure esterno, al quale appartiene la formazione delle argille scagliose.

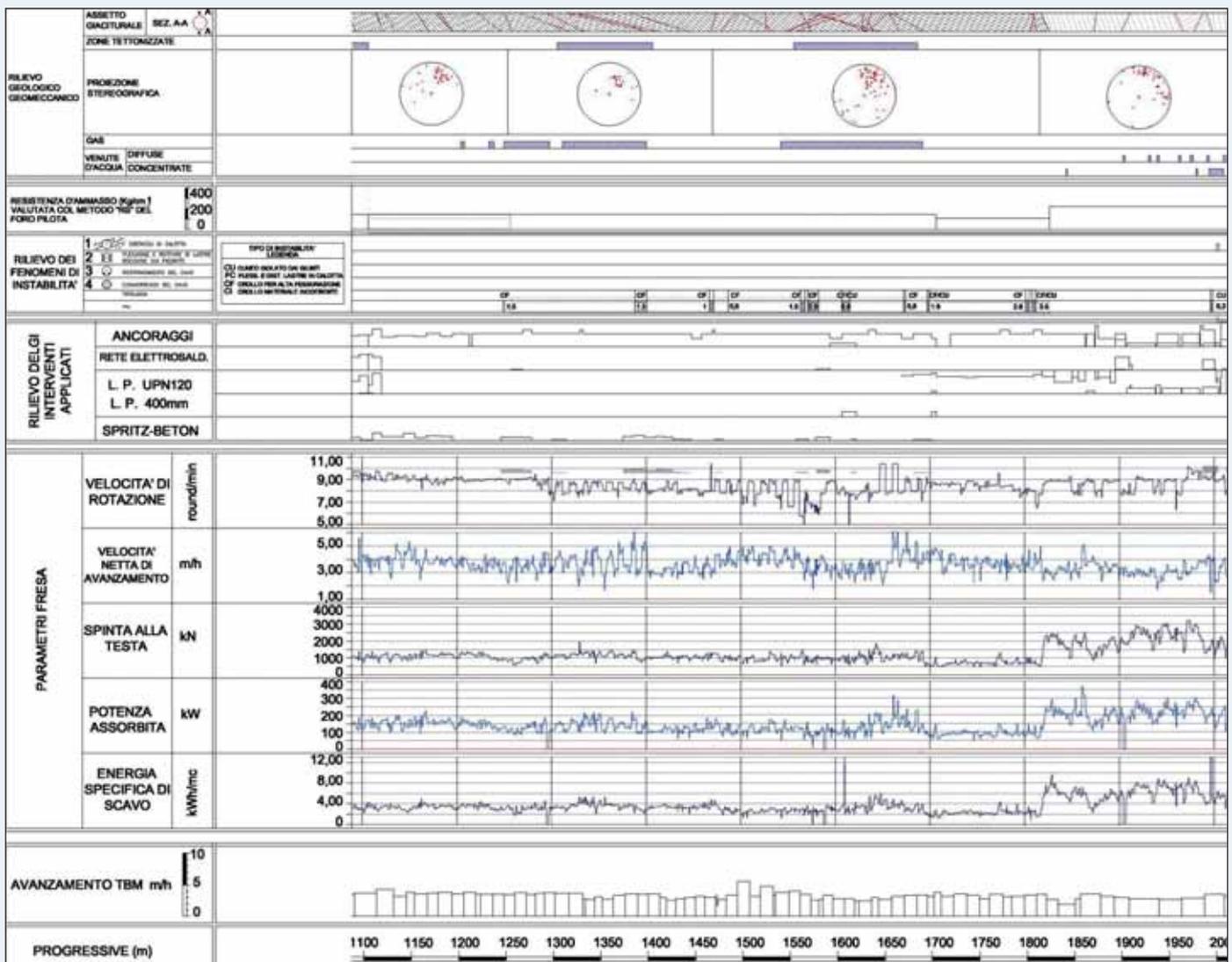


Figura 4 - Un esempio di scheda di rilievo del cunicolo pilota



Le arenarie del Monte Cervarola sono costituite da arenarie quarzoso-feldspatiche, organizzate in cicli sedimentari che comprendono sequenze di strati da decimetrici a metrici alternati a livelli siltitici e pelitici di spessore da centimetrico a decimetrico. Le arenarie di Monte Modino, di genesi torbiditica, sono costituite da strati spessi di arenarie da grossolane a medie, interposti a strati decimetrici di arenarie fini e a siltiti marnose, raggruppati in banchi di spessore metrico, che costituiscono la principale caratteristica dell'unità; talora, sono presenti marne o argilliti.

Infine, le argille Scagliose sono costituite da argilliti a struttura scagliosa con intercalati strati marnosi e calcarei, generalmente sottili (spessore decimetrico). All'interno dell'unità sono frequenti corpi litoidei discontinui, costituiti da calcari selciferi, da calcari grigi (palombini) e subordinatamente da pietre verdi ofiolitiche. Nelle porzioni più superficiali, molto alterate per effetto dell'azione degli agenti atmosferici e delle acque di falda, talora all'alterazione si sovrappone il rimaneggiamento dei movimenti gravitativi in atto o quiescenti.

Lungo il profilo della galleria, partendo dall'imbocco Nord, lato Bologna, gli scavi attraversano ammassi appartenenti alla formazione delle arenarie del Monte Cervarola, per un tratto di circa 1.100 m, seguiti da 650 m di litotipi delle argille scagliose, ancora seguite dalle arenarie del Cervarola per una lunga tratta fino alla p.k. 8+800 dove si ha una inclusione di argille scagliose impostata tra due lineamenti tettonici (Figura 5); a seguire, verso l'imbocco Sud, lato Firenze, gli scavi interessano la formazione delle arenarie di Monte Modino e ancora le argille scagliose per la tratta di imbocco, dove l'ammasso presenta scadenti caratteristiche geomeccaniche data la presenza di movimenti gravitativi profondi.

Gli aspetti idrogeologici

La realizzazione dei cunicoli esplorativi ha consentito anche una ricostruzione delle problematiche di carattere idrogeologico; principalmente si è constatata l'interferenza tra gli scavi e alcune sorgenti esistenti correlate a bacini di raccolta acque, quali principalmente i Rii Molino, Farabugino, Vaccareccia e Gambellato. I cunicoli hanno infatti funzionato da elementi drenanti; anche la galleria, se pur in parte impermeabilizzata, è da intendersi drenante, allo scopo di evitare l'insorgere di pressioni idrostatiche a tergo del cavo non supportabili dagli usuali rivestimenti in calcestruzzo.

L'inquadramento geomeccanico

La definizione delle caratteristiche di resistenza e deformabilità degli ammassi da scavare, assai importante per la previsione del comportamento tenso-deformativo della cavità a seguito dello scavo, è stata anch'essa condotta alla luce delle caratteristiche geomeccaniche della roccia (RQD, σ_c , spaziatura e orientazione delle discontinuità, ecc.)

raccolte nei cunicoli, definendo, per ciascuna tratta rappresentativa, l'indice RMR (Bieniaswki, 1989) e il valore di GSI (Hoek et al., 2002); in funzione del livello di ricoprimento, ovvero dello stato tensionale in situ, si sono quindi valutati i parametri di resistenza secondo il criterio di rottura di Mohr-Coulomb.

In Figura 6 si riporta l'andamento del valore di GSI in funzione della copertura e delle litologie; per le tratte in arenaria si hanno valori compresi tra 40 e 70, mentre per le argilliti si hanno valori più ridotti, nel range 30-40.

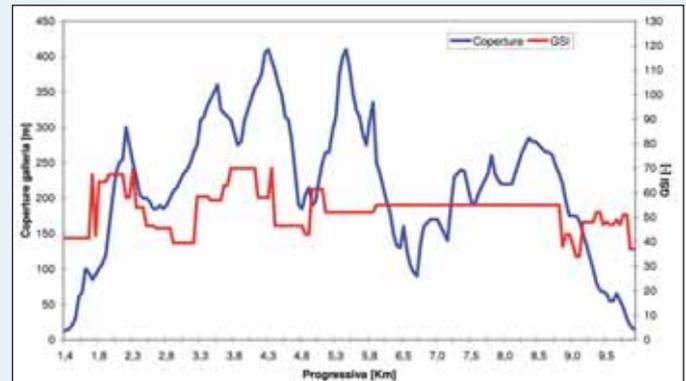


Figura 6 - Momento della progettazione: i valori di GSI di previsione

Il quadro geomeccanico e la parametrizzazione assunta nelle analisi di progetto sono indicati in sintesi nelle Tabelle 1 e 2. In Tabella 1 sono indicati in dettaglio, per ciascuna formazione geologica, i valori di RMR-

GEOLOGIA	GEOMECCANICA			COPERTURE		CRITERIO ROTTURA HOEK-BROWN				
	RMR	GSI	GSI _r	T _r	H (MIN-MAX)	σ_{ci}	m _i	m	s	σ_{cm}
				kN/m ²	m	MPa	-	-	-	MPa
ARENARIE M.CERVAROLA	20-30	40 (35-45)	35	26	50-300	30	10	1,173	0,0013	4,19
	30-40	50 (45-55)	40	26	50-300	30	10	1,677	0,0039	5,23
	40-55	60 (55-65)	46	26	150-450	30	10	2,397	0,0117	6,55
	55-70	70 (65-75)	50	26	150-450	30	10	3,425	0,0357	8,43
ARGILLE SCAGLIOSE		30	30	25	170-250	8	5	0,41	0,0004	0,615
		35	35	25	170-250	8	5	0,491	0,0007	0,703
		40	35	25	170-250	8	5	0,587	0,0013	0,796
		45	35	25	170-250	8	5	0,7	0,0022	0,898
ARENARIE M.MODINO	30-35	35	35	27	50-200	35	10	0,981	0,0007	4,35
	35-40	40	35	27	50-200	35	10	1,173	0,0013	4,889
	40-45	45	38	27	50-200	35	10	1,403	0,0022	5,467

Tabella 1 - I parametri geomeccanici secondo il criterio di rottura di Hoek-Brown (fase conoscitiva)

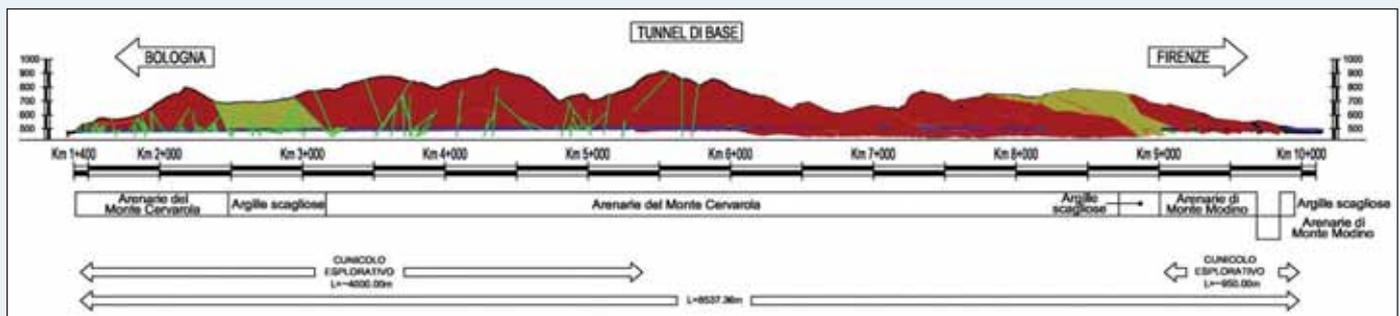


Figura 5 - Il profilo geologico-geomeccanico della galleria di Base

GEOLOGIA	PARAMETRI DEFORMAZIONE			CRITERIO ROTTURA MOHR-COULOMB			
	E picco	E residuo	ν	ϕ picco	ϕ residuo	c' picco	c' residuo
	MPa	MPa	-	°	°	kPa	kPa
ARENARIE M.CERVAROLA	3080	2300	0,25	34-47	32-45	270-750	240-700
	5400	3080	0,25	37-50	34-47	350-935	270-750
	9700	4790	0,25	36-45	35-49	810-1430	20-850
	13000-17000	5400	0,25	39-47	37-50	1120-1780	350-935
ARGILLE SCAGLIOSE	900	900	0,35	18-20	18-20	200-250	200-250
	1200	1200	0,35	19-22	19-22	220-280	220-280
	1600	1200	0,35	20-23	22	250-310	250
	2100	1200	0,35	21-24	22	250-350	250
ARENARIE M.MODINO	2500	2500	0,3	36-47	36-47	260-600	260-600
	3300	2500	0,3	38-48	36-47	300-660	260-600
	4400	2500	0,3	39-50	36-47	350-730	260-600

Tabella 2 - I parametri geotecnici secondo il criterio di rottura di Mohr-Coulomb (fase conoscitiva)

GSI con i parametri del criterio di rottura di Hoek-Brown a essi correlati; in Tabella 2 si riportano il range dei parametri di resistenza secondo il criterio di Mohr-Coulomb e le caratteristiche di deformabilità degli ammassi.

Le problematiche progettuali e le modalità costruttive

Lo studio progettuale si è basato sulla necessità di individuare modalità di avanzamento che garantissero da un lato le necessarie condizioni di stabilità del fronte e del cavo, nel breve e lungo termine, e dall'altra consentissero una industrializzazione del processo costruttivo attraverso l'adozione di un sistema di scavo "flessibile", in grado di fare fronte alle diverse condizioni geologiche-geomeccaniche incontrate e alla risposta deformativa rilevata, semplicemente variando l'intensità di alcuni interventi di base.

L'obiettivo era di semplificare la gestione del cantiere in termini di approvvigionamenti, attrezzature e programmazione dei lavori, a tutto vantaggio dei tempi di costruzione e quindi dei costi.

Per la definizione dell'intensità dei sistemi di stabilizzazione da porre in opera si è proceduto dapprima - secondo l'approccio A.DE.CO-RS - alla valutazione del comportamento deformativo della galleria (estrusione, pre-convergenza, convergenza) in assenza di interventi, così da poter determinare la categoria di comportamento del nucleo-fronte: categoria A "a fronte stabile", categoria B "a fronte stabile a breve termine", categoria C "a fronte instabile" e suddividere la galleria in tratte a comportamento tenso-deformativo omogeneo (fase di diagnosi). La rigidità del nucleo di terreno a monte del fronte di scavo condiziona infatti un modo decisivo la risposta deformativa del sistema galleria, determinandone le condizioni di stabilità. Le previsioni sono state condotte impiegando il Metodo delle Linee Caratteristiche (Amberg e Lombardi, 1974), prendendo in esame in particolare la linea caratteristica del fronte, la quale tiene conto dell'effetto tridimensionale delle tensioni nel nucleo-fronte.

Si è osservato quanto segue:

- per ammassi appartenenti alle formazioni delle arenarie del Monte Cervarola e del Monte Modino, nei contesti geomeccanici più ricorrenti con GSI nel range 50-60, si sono riscontrate convergenze radiali al fronte da pochi millimetri fino a 2-4 cm, queste ultime per coperture superiori a 300 m. A seguito dell'apertura del fronte, l'ammasso rimane in campo elastico o si hanno plasticizzazioni assai contenute, con estensione della fascia plastica fino a un raggio di scavo.

Ne deriva un comportamento del nucleo-fronte di tipo "stabile" (categoria A) o "stabile a breve termine" (categoria B). Solo per zone caratterizzate da ammassi alquanto fratturati (GSI < 40), in presenza di coperture superiori a 250-300 m, si sono individuati fenomeni deformativi più accentuati con convergenze radiali decimetriche e fascia plastica al fronte superiore a 2,5-3,0 raggi di scavo;

- per ammassi appartenenti alla formazione delle argille scagliose, presenti lungo il tracciato con coperture variabili tra 170 m e 250 m, si sono riscontrate convergenze radiali al fronte nel range 5-14 cm, associati a fasce plastiche pari a 1,5-3,5 raggi di scavo, per valori di GSI nel range 40-45 e convergenze radiali al fronte non accettabili (superiori a 50 cm) con fasce plastiche molto estese per valori di GSI nel range 30-35. Ne deriva un comportamento del nucleo-fronte prevalente di tipo "instabile" (categoria C), con comportamento "stabile a breve termine" (categoria B) per valori di GSI nel range 35-40 in presenza di coperture inferiori a 200 m.

Le Figure 7 e 8 rappresentano le deformazioni specifiche al fronte (ovvero i valori di convergenza al fronte rapportati al raggio di scavo) in funzione delle coperture e del valore di GSI. Per le arenarie del Monte Cervarola si osservano deformazioni molto contenute, inferiori allo 0,2-0,4%, con andamento pressoché lineare in funzione della copertura, per valori di GSI superiori a 55-60. Per valori di GSI nel range 40-50 si osservano deformazioni contenute e comportamento lineare con la copertura fino a valori di 150-200 m; poi si osserva un andamento non lineare con deformazioni, alle massime coperture, nel range 0,8-1,2% per valori di GSI pari a 50 e 1,4-2,0% per GSI pari a 40. Deformazioni decisamente superiori, nel range 0,8-2,2%, si hanno invece per le argille scagliose, per le quali la curva di deformazione risulta spiccatamente non lineare per coperture superiori a 200 m. Le deformazioni specifiche massime, pari a 3,6%, si raggiungono per valori di GSI pari a 30 e coperture di 250 m.

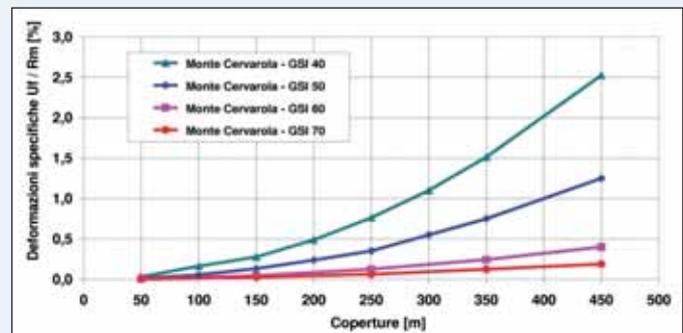


Figura 7 - Le deformazioni specifiche nella formazione di arenarie del Monte Cervarola (fase di diagnosi)

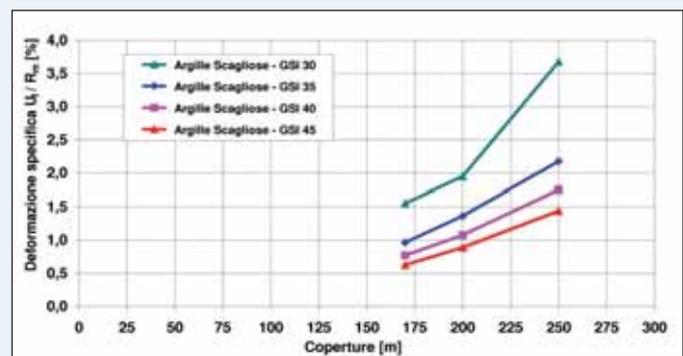


Figura 8 - Le deformazioni specifiche nella formazione di argille scagliose (fase di diagnosi)



Alla luce della previsione del comportamento deformativo del fronte di scavo, sono stati definiti, per ciascun contesto geomeccanico e in funzione dei valori di copertura presenti lungo il tracciato della galleria, gli interventi costituenti le sezioni tipo di avanzamento (fase di terapia).

Si sono operate innanzitutto alcune scelte di base: la prima è stata l'adozione dello scavo a piena sezione anche per i contesti più difficili, così da consentire un'immediata stabilizzazione dell'intero nucleo al fronte e operare in un'unica soluzione il confinamento del cavo mediante la posa del rivestimento di prima fase e il getto dell'arco rovescio.

Per il pre-confinamento del nucleo, così come per gli interventi di protezione e consolidamento al contorno del cavo, si è adottato l'impiego di elementi strutturali in vetroresina (vtr), di lunghezza pari a 24 m, modulando la lunghezza del campo di scavo e l'intensità degli interventi in funzione dell'estensione e dell'entità delle deformazioni oltre il fronte.

Per il confinamento del cavo si è privilegiata la posa in opera di centine metalliche e spritz-beton, limitando l'impiego di bulloni tipo Superswellex solo in ammassi arenacei di buone caratteristiche geomeccaniche. Infine un dato progettuale importante è stata la regolazione delle distanze di getto dal fronte di arco rovescio e calotta, in funzione dei valori di convergenza registrati.

Il controllo di eventuali venute d'acqua è stato affidato, in corso d'opera, all'impiego di drenaggi microfessurati posti in opera sub-orizzontalmente prima degli dell'esecuzione degli interventi di consolidamento; per il lungo termine, la galleria è stata rivestita con geotessuto e telo in PVC in calotta, attrezzati con canalette di raccolta d'acqua al piede.

In dettaglio, con riferimento a quanto discusso in fase di diagnosi, laddove si è individuato comportamento del nucleo-fronte stabile, o stabile a breve termine con deformazioni specifiche contenute (< 0,4-0,6%) si è previsto unicamente il confinamento delle pareti di scavo mediante il rivestimento di prima fase (costituito da spritz-beton inglobante centine metalliche e/o bulloni): sezioni di avanzamento tipo A e B0.

Per valori di deformazione specifica superiori allo 0,6-0,8% si è previsto anche un intervento di pre-confinamento del nucleo mediante elementi strutturali in vetroresina (sezione tipo B2, B2V e B0V, queste ultime con tubi metallici in calotta quale intervento di pre-sostegno per zone di roccia molto fratturate o per il sostegno locale di inclusi calcareo-marnosi all'interno delle argilliti). Infine, per deformazioni specifiche superiori all'1,0-1,5%, con comportamento del nucleo-fronte di tipo instabile, all'azione di pre-confinamento del fronte si è associata anche la messa in opera del preconsolidamento al contorno del profilo di scavo, sempre mediante elementi strutturali in vetroresina, iniettati a pressione o cementati con miscele espansive (sezioni tipo C2 e C6).

In particolare, l'impiego delle miscele espansive consente, grazie allo stato di coazione indotto dall'espansione della miscela nel foro, di mantenere indisturbate le condizioni tenso-deformative dell'ammasso al contorno del profilo di scavo, limitando la decompressione dei materiali e il decadimento delle caratteristiche geomeccaniche.

ARENARIE MONTE CERVAROLA		COPERTURE							
		<50	50-100	100-150	150-200	200-250	250-300	300-350	350-450
GSI	<45	A	A	A	B0	B0	B0V	B0V	B0V
	45 + 55	A	A	A	B0	B0	B0V	B0V	B0V
	55 + 65	A	A	A	A	A	B0	B0	B0V
	>65	A	A	A	A	A	A	A	A

Tabella 3 - I criteri di applicazione delle sezioni tipo della formazione di arenarie del Monte Cervarola (fase di terapia)

ARGILLE SCAGLIOSE		COPERTURE		
		<170	170-200	200-250
GSI	<30	C2	C2	C2
	30 + 35	C2	C2	C2
	35 + 40	C6	C6	C6
	>40	B2 B2V	B2 B2V	C6

Tabella 4 - I criteri di applicazione delle sezioni tipo della formazione di argille scagliose (fase di terapia)

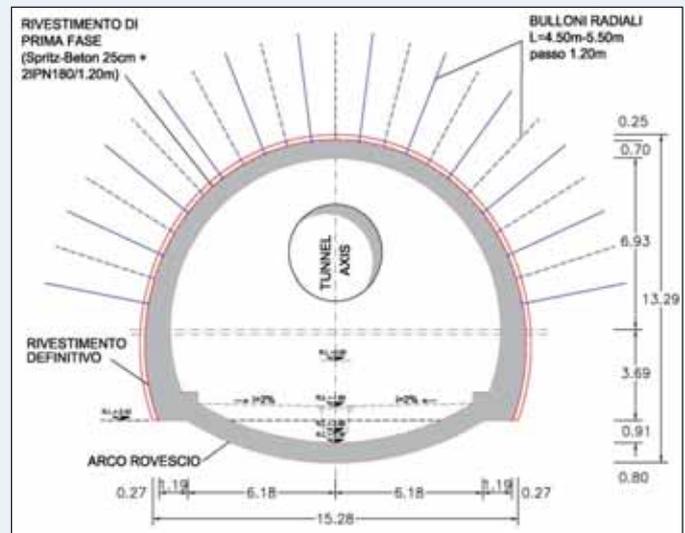
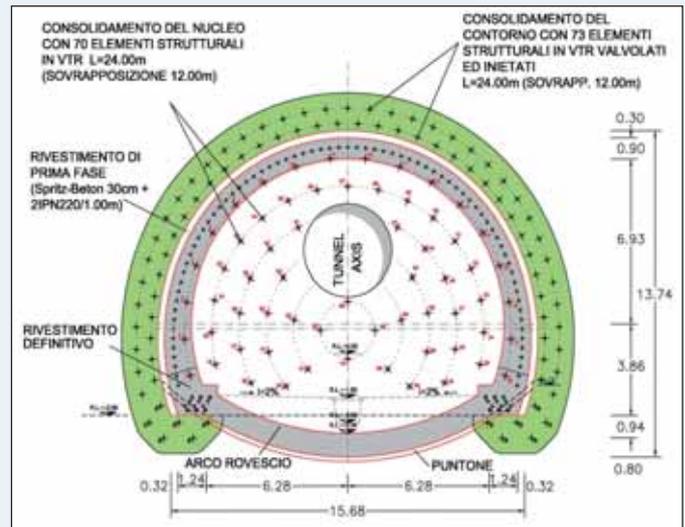


Figure 9 e 10 - La sezione tipo C2 (9) e la sezione tipo B0 (10) (fase di terapia)

Nella Tabelle 3 e 4 si riportano i criteri di applicazione delle sezioni tipo in funzione del contesto geomeccanico e delle coperture (ovvero dello stato tensionale geostatico) presenti lungo il tracciato. A titolo di esempio si riportano, nelle Figure 9 e 10, le sezioni tipo B0 e C2, ritenute le più rappresentative delle due principali formazioni geologiche attraversate; il numero degli interventi sono da intendersi nominali, ovvero medi nel campo di variabilità di cui si parlerà al capitolo successivo. L'applicazione delle sezioni tipo lungo il tracciato è stata individuata nel profilo geomeccanico di previsione.

Le Linee Guida per l'avanzamento e il sistema di monitoraggio

Al fine di verificare in corso d'opera l'idoneità delle sezioni tipo previste e calibrare in modo più puntuale gli interventi in funzione della variabilità del contesto geomeccanico si è predisposto un sistema di monitoraggio e un documento di procedure (denominato Linee Guida).

Il sistema di monitoraggio è volto a raccogliere informazioni sistematiche circa le condizioni geostrukturali del fronte e la risposta deformativa del sistema galleria durante gli scavi. Per il primo viene prevista la redazione di una scheda di rilievo del fronte di scavo con indicazione delle caratteristiche litologiche, geostrukturali e geomeccaniche, corredata di schema pittorico e foto; attraverso i dati raccolti è possibile controllare il valore di RMR-GSI di previsione ed esaminare la stabilità locale del fronte alla luce del sistema di discontinuità presenti; i rilievi del fronte vengono eseguiti ogni 10-20 m di galleria. Circa il controllo della risposta deformativa, è prevista la posa in opera di stazioni di misura degli spostamenti assoluti dei rivestimenti di prima fase (convergenze, cedimenti, eventuali traslazioni trasversali) mediante rilievi topografici con frequenza commisurata al tipo di ammasso (una stazione per ogni campo di avanzamento, 8-12 m, per comportamento del fronte tipo C, 1 stazione ogni 25-50 m per comportamento tipo B e A rispettivamente). In ammassi argillitici, laddove è previsto l'impiego di una azione di pre-confinamento del fronte, si è previsto in progetto anche il controllo delle deformazioni al fronte (estrusione) mediante estensimetro incrementale, di lunghezza di 36 m: questo ultimo appare uno strumento fondamentale per le tratte di galleria dove non è presente il cunicolo esplorativo. La frequenza di lettura è giornaliera per gradienti di deformazione superiori a 1 mm/gg, settimanale in presenza di fenomeni in fase di stabilizzazione. Stazioni speciali, volte al controllo delle deformazioni e della fascia plastica al contorno del cavo (estensimetri multibase) e dello stato tensionale dei rivestimenti, di prima fase e definitivi, (barrette estensimetriche posizionate sulle centine o all'interno dei getti di rivestimento), sono infine state previste in corrispondenza di tratte particolarmente significative (Figura 11). Noto il quadro geomeccanico e deformativo, è possibile effettuare un confronto con le previsioni progettuali per la tratta a comportamento tenso-deformativo omogeneo e decidere di:

- confermare la sezione tipo prevista secondo l'intensità degli interventi e la successione delle fasi esecutive previste in progetto;
- confermare la sezione tipo prevista e variare l'intensità degli interventi o la successione delle fasi esecutive, così da adeguarle alle condizioni geomeccaniche puntuali riscontrate in corso d'opera (variabilità trasversale, di interventi, fissata la sezione tipo);
- individuare una diversa sezione tipo, tra quelle già previste in progetto, qualora le condizioni riscontrate, litologiche e geomeccaniche,

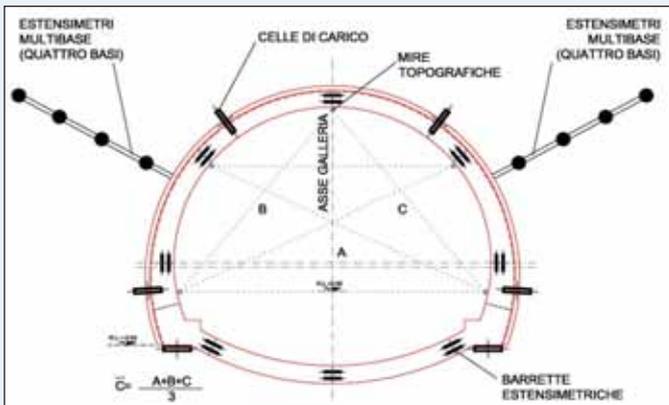


Figura 11 - La stazione speciale di monitoraggio

si presentino difforni da quelle ipotizzate per la sezione tipo in corso di applicazione (variabilità longitudinale, circa l'applicazione di sezioni tipo previste nella tratta a comportamento omogeneo);

- evidenziare la necessità di progettare una nuova sezione tipo, con caratteristiche tecniche differenti nel caso in cui si riscontrino condizioni litologiche e geomeccaniche del tutto inattese e non prevedibili.

La realizzazione dei cunicoli esplorativi, quale indagine geognostica preventiva lungo il tracciato, consente di fatto di limitare la gestione delle variabilità ai punti a), b) e, in casi isolati, c), riconducendo il caso c) non tanto a condizioni litologiche differenti, quanto a un eventuale comportamento allo scavo alla scala della galleria decisamente differente da quanto rilevato con riferimento alle geometrie del cunicolo.

Sezioni tipo	Geologia	Estrusione (cm)	Convergenza (cm)
A	Arenarie	Trascurabile	2-3
B0	monte Cervarola/	Trascurabile	3-5
BOV	Modino	< 3	5-10
B2		< 6	8-12
B2V	Argille	< 5	6-10
C2	scagliose	< 10	10-14
C6		< 8	8-12

Tabella 5 - Le sezioni tipo: la risposta deformativa attesa

Relativamente al punto b), le grandezze che possono essere regolate in corso d'opera sono principalmente: numero degli elementi strutturali in vetroresina al fronte e lunghezza di sovrapposizione (ovvero lunghezza del campo di avanzamento), lunghezza e maglia dei bulloni, lunghezza dello sfondo di scavo e passo della centina metallica, eventuale posa di centina metallica anche in arco rovescio, distanza di getto dal fronte dei rivestimenti definitivi, arco rovescio e calotta.

I criteri di applicazione delle variabilità sono contenuti nel progetto, nel documento Linee Guida. Gli elementi di giudizio sono, come detto, il contesto geomeccanico e la risposta deformativa, la quale tiene conto anche della copertura. Analisi numeriche condotte sia con riferimento al Metodo delle Linee Caratteristiche sia a modelli di calcolo più raffinati eseguiti impiegando il codice di calcolo alle differenze finite Flac hanno permesso di valutare, per ciascuna sezione tipo il range

Sezione tipo	Interventi	Variabilità		
		Minimo	Nominale	Massimo
B0	Passo centina	1,40 m	1,20 m	1,00 m
	Lungh. Bulloni	4,50 m	5,00 m	5,50 m
	Maglia bulloni (*)	2x1,40 - N	2x1,20	2x1,00
	Distanza AR-fronte (°)	Non vincolata	< 5,00 Ø	< 4,00 Ø
	Distanza calotta-fronte	Non vincolata	< 9,00 Ø	< 6,00 Ø

Tabella 6 - La variabilità della sezione tipo B0

(*) Assenza di bulloni per valori di GSI > 50

(°) Distanze getto rivestimenti, con Ø = diametro di scavo galleria

Sezione tipo	Interventi	Variabilità		
		Minimo	Nominale	Massimo
C2	Passo centina	1,20 m	1,00 m	0,80 m
	N° VTR fronte	50	70	90
	Sovrapposizione VTR fronte	10,00 m	12,00 m	14,00 m
	Lungh. campo di scavo	14,00 m	12,00 m	10,00 m
	Distanza AR-fronte (°)	< 2,00 Ø	< 1,50 Ø	< 0,50 Ø
	Distanza calotta-fronte	< 3,00 Ø	< 5,00 Ø	< 7,00 Ø

Tabella 7 - La variabilità della sezione tipo C2

(°) Distanze getto rivestimenti, con Ø = diametro di scavo galleria

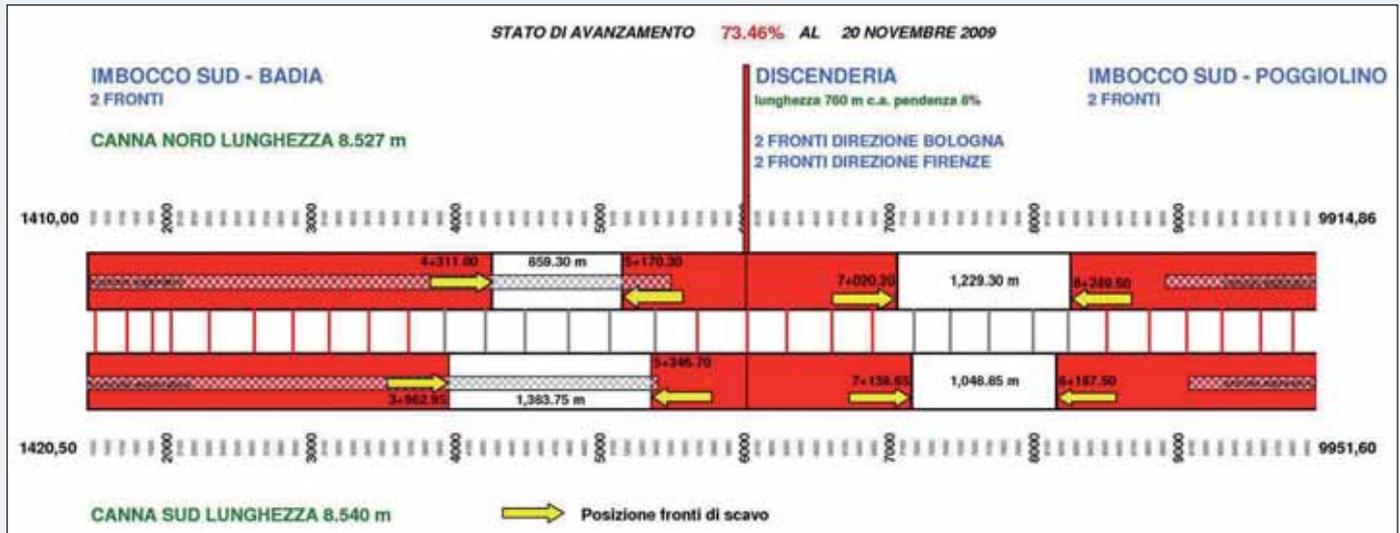


Figura 12 - La situazione degli avanzamenti al Novembre 2009 (Fonte: Todini SpA)

deformativo di comportamento: convergenze diametrali ed estrusioni attese. In Tabella 5 si riportano i valori determinati.

Qualora si registrino valori deformativi centrati nel range previsto si adotteranno gli interventi nominali delle sezioni tipo previste; diversamente si potrà ridurre l'intensità degli interventi in presenza di convergenze ed estrusioni verso il limite inferiore del range previsto o aumentare l'intensità in presenza di valori verso il limite superiore (variabilità trasversale). Qualora l'incremento degli interventi non sia sufficiente a mantenere la risposta deformativa nel range di previsione si renderà necessario cambiare la sezione tipo prevista (variabilità longitudinale). Il documento Linee Guida chiarisce inoltre, al di là del valore di GSI, le condizioni geomeccaniche e strutturali per l'applicabilità di alcune tipologie di intervento: ad esempio la chiodatura al contorno, con chiodi tipo Superswellex, va applicata solo qualora si osservi la presenza di banchi arenacei di potenza pluridecimetrica, in assenza di giunti a persistenza rilevante con geometria a franappoggio, in presenza di giunti serrati-poco aperti privi di riempimento argilloso, e ovviamente qualora non si rilevino elementi di disturbo tettonico (pieghe, faglie). Nelle Tabelle 6 e 7 si riportano le principali variabilità, a titolo di esempio, per le sezioni B0 e C2.

Le Linee Guida appaiono quindi come un libretto di istruzioni, volto a garantire la necessaria flessibilità progettuale in corso d'opera, con l'obiettivo di calibrare gli interventi alle situazioni locali nel rispetto delle condizioni di sicurezza. Appaiono inoltre come uno strumento assai

importante per il controllo dei tempi e dei costi di costruzione dell'opera, evitando sprechi e distribuendo le risorse in modo attento. In accoppiamento all'esecuzione dei cunicoli esplorativi, riteniamo possano costituire un valido strumento per la gestione dei rischi connessi alla realizzazione di un'opera importante come quella in esame.

La fase costruttiva

Ottenuta l'approvazione del progetto di variante, l'Impresa ha organizzato la realizzazione della galleria su tre aree principali: il Cantiere in località Badia, con due fronti di avanzamento da Nord, lato Bologna, il Cantiere di Roncobilaccio, finalizzato alla gestione dei quattro fronti intermedi scavati a partire dalla discenderia, e il Cantiere di Poggiolino, con due fronti da Sud, lato Firenze. In Figura 12 si riporta la situazione degli avanzamenti alla fine di Novembre 2009; il totale dello scavo, considerati gli otto fronti di avanzamento, è circa pari al 75% della galleria.

Le attività di costruzione sono iniziate dall'imbocco Nord, lato Bologna, dove gli scavi sono avvenuti per attacco diretto del versante roccioso attraversando ammassi appartenenti alla formazione delle arenarie del Monte Cervarola. L'andamento degli scavi ha sostanzialmente confermato le previsioni progettuali impiegando prevalentemente la sezione tipo B0 e, solo per zone localizzate, la sezione tipo A (Figura 13).

Con riferimento alla sezione tipo B0, l'analisi costante delle schede di rilievo, accompagnate dai valori di convergenza rilevati, hanno per-



Figura 13 - La sezione tipo B0 (formazione di arenarie del Monte Cervarola) presso l'imbocco lato Bologna

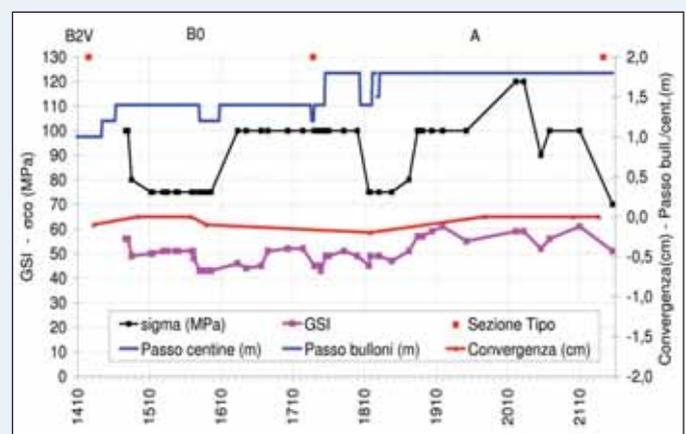


Figura 14 - I rilievi in corso d'opera dalla p.k. 1+410 alla p.k. 2+160, presso l'imbocco lato Bologna (momento della costruzione)

messo di adeguare l'entità dell'azione di confinamento del cavo variando la lunghezza dello sfondo e di conseguenza il passo delle centine metalliche. Rispetto al valore medio di progetto, pari a 1,20 m, si è proceduto per ampie tratte con valori del passo centine di 1,40 m, fino anche ad alcuni brevi tratti dove il passo è stato portato a 1,60 m, stante caratteristiche geomeccaniche superiori al campo di applicazione della sezione stessa. Per valori di GSI superiori a 55, e in presenza di condizioni geostrukturali favorevoli, si è passati alla sezione tipo A. In Figura 14 si riporta una sintesi dei principali dati osservati in canna Sud tra la progressiva di imbocco, 1+410, e la p.k. 2+160.

Si osservi come il valore di GSI si sia mantenuto nel range 40-60, con valori decisamente superiori a 50-55 nel tratto tra p.k. 1+830 e p.k. 2+160 dove si è applicata la sezione tipo A. Analogamente la misura del valore di resistenza monoassiale della roccia, σ_{co} , misurata spedtivamente al fronte mediante martello di Schimdt, è sempre risultata superiore a 75 MPa, con valori anche fino a 100-120 MPa. Da ultimo si osservano valori di convergenza trascurabili, sempre inferiori al



Figura 16 - La posa della centina metallica nella sezione tipo C2



Figura 15 - La sezione tipo C2 (formazione di argille scagliose), presso l'imbocco lato Firenze

centimetro, a testimonianza di un comportamento dell'ammasso in campo elastico, con deformazioni immediate e millimetriche. La velocità di avanzamento si è mantenuta in questo tratto pressoché costante, con produzioni compresi tra 2,5 m/gg e 4,2 m/gg (valore medio pari a 2,8 m/gg). Si osserva peraltro che la gestione contemporanea di due fronti di avanzamento, canna Nord e canna Sud, consente anche una più funzionale gestione e ottimizzazione delle risorse, quali mano d'opera e attrezzature.

Nel primo tratto di galleria prossimo all'imbocco lato Firenze (zona Poggolino), la situazione geologico-geomeccanica è risultata invece fin da subito peggiore di quanto individuato a livello progettuale, per la complessità geomorfologia dell'area; in particolare la risposta deformativa a seguito dello scavo è risultata di entità alquanto superiore alle attese, specie in corrispondenza del piano campagna, dove la rete di capisaldi topografici e l'installazione di alcuni inclinometri hanno consentito di individuare una superficie di scivolamento profonda, interessante anche il fronte di scavo, la quale ha agito negativamente nei confronti della galleria (Figura 15).

Dopo un primo rilascio, si è quindi progressivamente irrobustita la sezione di scavo prevista, tipo C2, aumentando il numero di consolidamenti previsti e soprattutto prevedendo anche per gli elementi strutturali al fronte di scavo l'esecuzione di iniezioni di miscela cementizie finalizzate al miglioramento delle caratteristiche di resistenza della fascia di ammasso interessato dalle superfici di scivolamento; al riguardo attrezzando gli elementi in vtr mediante due valvole a metro si sono



Figura 17 - Lo scavo e il getto dell'arco rovescio nella sezione tipo C2

registrati assorbimenti medi di 50-60 l/vlv (con valori massimi anche di 120 l/vlv), con pressioni di iniezione di 8-14 bar. In concomitanza all'incremento dell'azione di pre-confinamento del fronte, si è anche aumentata l'azione di confinamento del cavo, riducendo il passo delle centine a 0,80 m e avvicinando l'esecuzione dell'arco rovescio presso il fronte; queste correzioni di progetto hanno comportato l'introduzione di una nuova sezione tipo, denominata C2Vp (caso d) delle Linee Guida). Alcune delle principali fasi costruttive sono illustrate nelle Figure dalla 15 alla 18: il consolidamento del fronte mediante elementi strutturali in vtr (Figura 15), lo scavo a piena sezione, la posa delle centine metalliche (Figura 16), lo scavo e getto dell'arco rovescio (Figura 17) e del rivestimento di calotta (Figure 18A e 18B). Il controllo attento della strumentazione di monitoraggio ha consentito di guidare l'avanzamento e soprattutto di calibrare la lunghezza del campo di avanzamento, interrompendo gli scavi in presenza di incrementi dei valori di convergenze diametrali di 6-8 cm.

Il grafico di Figura 19 mostra l'andamento del fronte di scavo, il conseguente getto dell'arco rovescio e i valori di convergenza rilevati dalle stazioni predisposte.

Si osservano valori di convergenze diametrali, di valore massimo pari a 15-16 cm, via via crescenti con l'avanzamento che si avvicinava alla posizione della superficie di scivolamento. In questo caso, l'adeguamento della sezione tipo a seguito delle osservazioni



Figure 18A e 18B - Il getto del rivestimento definitivo (A) e le distanze di getto (B)

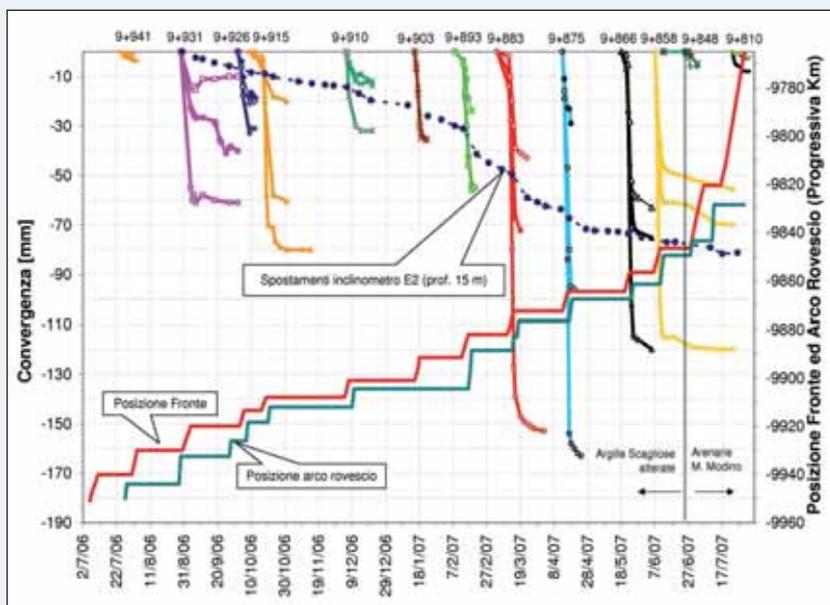


Figure 19 - I rilievi di convergenza dalla p.k. 9+950 alla p.k. 9+765, presso l'imbocco lato Firenze (momento della costruzione)

sul campo ha consentito, pur con una riduzione delle produzioni attese, di non interrompere l'avanzamento, il quale è proseguito, una volta superata la tratta interessata dai fenomeni gravitativi di versante, secondo le previsioni di progetto.

Con uno sguardo più generale sull'andamento dei lavori, in Figura 20 si riporta l'andamento delle caratteristiche geomeccaniche, in termini di valore di GSI, rilevate durante gli avanzamenti lungo il tracciato della galleria.

Si osserva un generale buon accordo con le previsioni progettuali per quanto riguarda la formazione delle arenarie del Cervarola e di Monte Modino; per quanto riguarda invece la formazione delle Argille Scagliose, previste lato Bologna tra le p.k. 2+400 e 3+200 circa, si sono rilevati in corso d'opera valori di GSI più elevati, nel range 40-50, e una risposta deformativa più contenuta rispetto alle previsioni di progetto, con convergenze diametrali raramente superiori ai 5-6 cm; in questi casi, pur prevedendo un'azione di confinamento del cavo di adeguata rigidità (rivestimenti di prima fase propri della sezione tipo B2), il comportamento del fronte, nel breve termine, è risultato stabile, in presenza di deformazioni trascurabili, così da non richiedere l'adozione di interventi di pre-confinamento del nucleo. Passaggi delicati sono risultati i contatti tra le due principali formazioni attraversate; in Figura 21 si riportano, ad esempio, i principali parametri rilevati in fase di scavo per il contatto in canna Sud tra le p.k. 8+875 e 8+764: l'applicazione della sezione tipo C2 è stata regolata circa il numero dei consolidamenti al fronte di scavo al fine di mantenere il valore di convergenza diametrale sotto i 10 cm, aumentando gli elementi strutturali in vetroresina al fronte da 60 a 80-90 in presenza di convergenze superiori a 15 cm.

Raggiunto lo scavo in arenaria si è proceduto unicamente mediante azioni di contenimento del cavo, dapprima con centine metalliche 2IPN220 a passo 1,20 e poi, raggiunti valori di GSI superiori a 60, mediante chiodature radiali. Infine, nelle Figure 22 e 23 si riporta l'andamento delle produzioni per i due principali can-

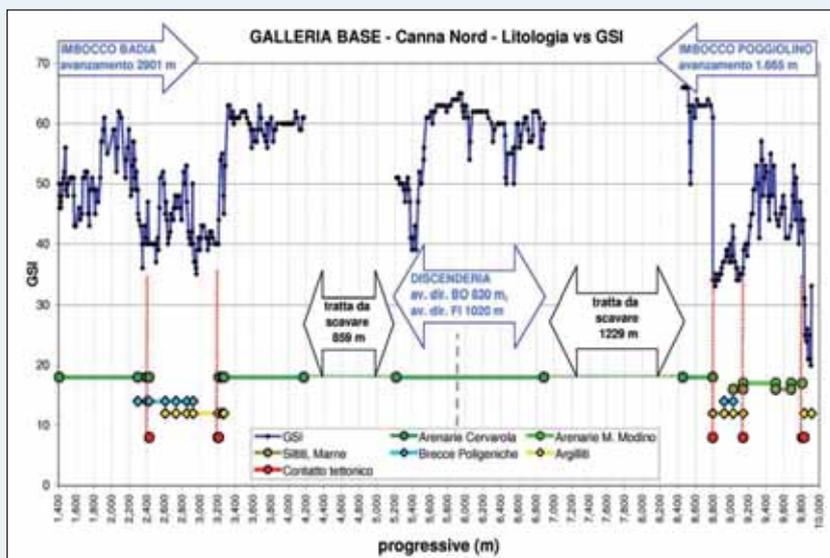


Figure 20 - I valori di GSI rilevati in corso d'opera

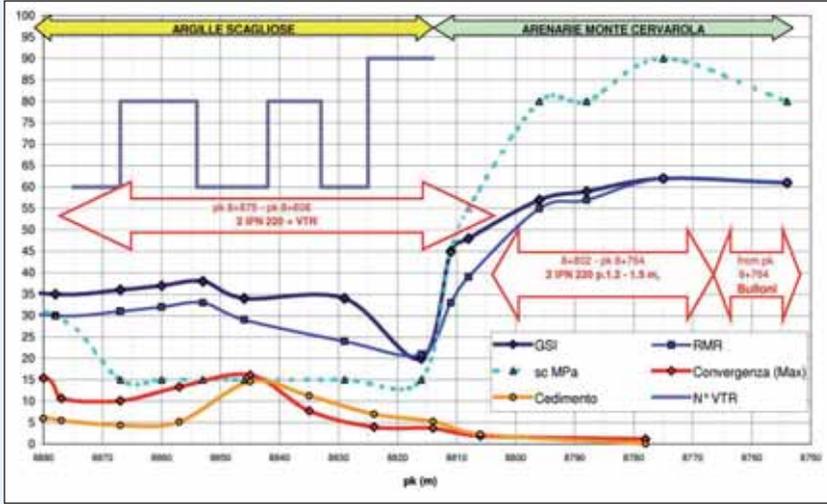


Figura 21 - Un attraversamento della zona di contatto formazionale (rilievi dalla p.k. 8+875 alla p.k. 8+764 imbocco Firenze)

tieri: quello lato Badia, il quale ha mantenuto produzioni medie di 60-70 m/mese (con punte di 100-110 m/mese), e quello lato Poggiolino, dove si sono osservate produzioni più ridotte in corrispondenza dell'imbocco e di alcune zone di passaggio tra formazioni, come quella precedentemente descritta (produzioni di 25-30 m/mese).

Conclusioni

Per la realizzazione della galleria di Base, opera in costruzione facente parte dei lavori di ammodernamento della nuova Autostrada Milano-Napoli nel tratto da Sasso Marconi e Barberino di Mugello, si è provveduto alla messa a punto del progetto costruttivo secondo il Metodo A.DE.CO-RS, individuando le modalità di avanzamento più idonee a garantire il controllo della risposta deformativa allo scavo e a guidare l'avanzamento verso condizioni di stabilità. L'esame del comportamento atteso è stato messo a punto sulla base dei dati geologico-geomeccanici raccolti durante l'esecuzione di cunicoli esplorativi eseguiti in anticipo ri-



Figura 24

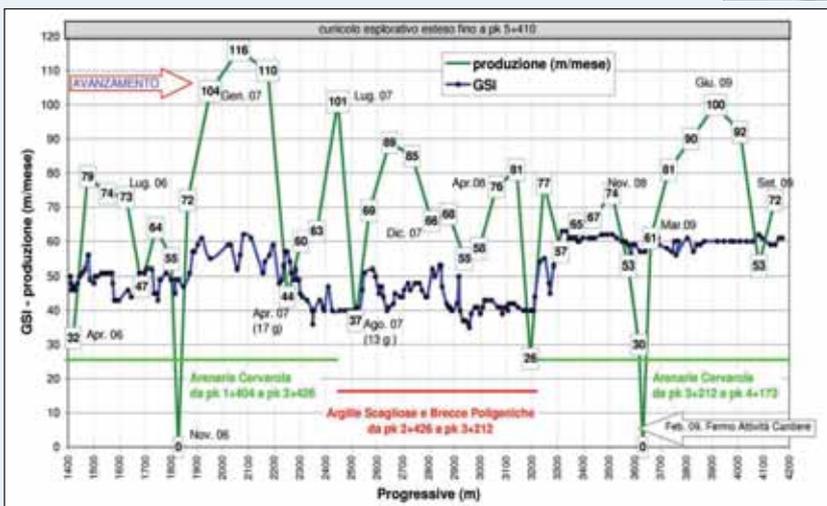


Figura 22 - Le produzioni del cantiere Badia presso l'imbocco lato Bologna

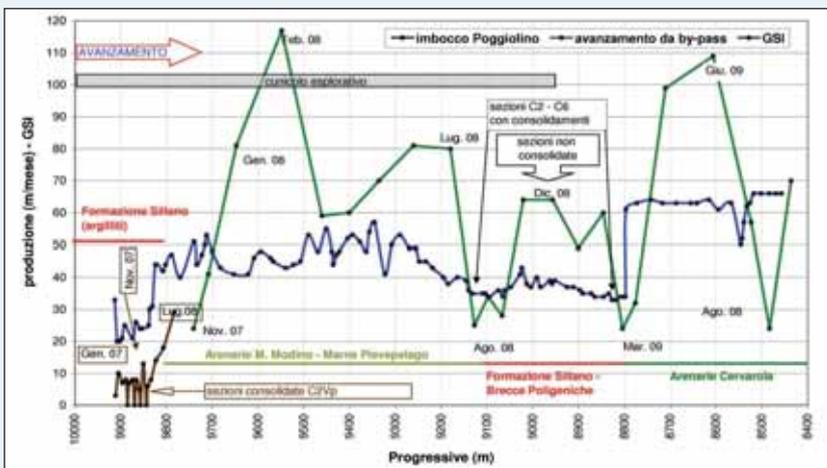


Figura 23 - Le produzioni del cantiere Poggiolino presso l'imbocco lato Firenze

spetto agli scavi di allargo, secondo la logica del foro pilota. E' questa una metodologia di indagine geognostica assai preziosa, in quanto raccogliendo informazioni in continuo lungo il tracciato della futura galleria consente una notevole riduzione delle incertezze geologiche, consentendo una più accurata previsione dei tempi e dei costi di previsione.

Le modalità di avanzamento hanno tenuto conto delle necessità logistiche e di organizzazione del Cantiere favorendo da un lato una industrializzazione del processo di scavo, mediante l'impiego di alcune tecnologie di base quali lo scavo a piena sezione, l'adozione di elementi in vetroresina per l'azione di pre-confinamento del fronte, ecc. e dall'altra la necessaria flessibilità per calibrare in corso d'opera gli interventi alle reali e puntuali condizioni rilevate. Allo scopo il progetto ha predisposto uno specifico documento - le Linee Guida - che, in funzione dei dati raccolti dal sistema di monitoraggio eseguito in corso d'opera (rilievi geomeccanici dei fronti di scavo, stazioni di misura della convergenza e delle estrusioni al fronte, ecc.), fornisce i criteri per l'applicazione delle sezioni tipo e per la taratura degli interventi previsti, in termini di numero e sovrapposizione dei consolidamenti, passo centina, distanze di getto dei rivestimenti definitivi. Un'attenta assistenza tecnica in corso d'opera ha permesso la corretta interpretazione dei dati di monitoraggio raccolti, così da verificare le modalità di avanzamento adottate e definire eventuali variazioni.



Figura 25

Questa modalità costruttiva, che vede una forte sinergia tra il momento della progettazione e il momento della costruzione, determina un'ottimizzazione delle risorse, consentendo una gestione più accurata dei tempi e dei costi di costruzione. ■

* *Dottore Ingegnere Direttore Tecnico di Rocksoil SpA*
 ** *Dottore Ingegnere Responsabile di Progetto di Rocksoil SpA*

Ringraziamenti

Gli Autori desiderano ringraziare la Todini Costruzioni SpA, Impresa affidataria dei lavori nella persona del Geom. Felice Rossi, per la proficua collaborazione durante la realizzazione dell'opera. Un ringraziamento particolare ai colleghi Dott. Geol. Alvisse Amadi, Antonio Vitiello e Giovanni Landra per la preziosa assistenza tecnica prestata al Cantiere in fase costruttiva.

Dati tecnici

Committente: Autostrade per l'Italia SpA
Progettazione esecutiva: Spea Ingegneria Europea SpA
Contractor: Risalto - Todini Costruzioni SpA
Progettazione costruttiva: MaireEngineering con Rocksoil SpA
Direzione dei Lavori: Spea Ingegneria Europea SpA
Assistenza tecnica di cantiere: Rocksoil SpA

BIBLIOGRAFIA

- [1]. P. Lunardi - "Lo scavo delle gallerie mediante cunicolo pilota", Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria strutturale, Primo Ciclo di Conferenze di meccanica e ingegneria delle rocce, Torino 1986.
- [2]. P. Lunardi, R. Bindi, G. Cassani - "Prime evidenze e risultati dell'impiego dell'approccio A.DE.CO-RS per la realizzazione di 73 km di gallerie di linea", "Strade & Autostrade" n° 55.
- [3]. P. Lunardi, R. Bindi, G. Cassani - "From the A.DE.CO-RS approach to the tunnelling industrialisation", Proceedings of the International Congress "Tunnelling for urban development", Pattaya City (Thailand), 2007.
- [4]. P. Lunardi - "Design and construction tunnel - A.DE.CO-RS approach", Tunnels & Tunnelling International Special Supplement, 2000.
- [5]. P. Lunardi - "Design and Construction of Tunnels - Analysis of Controlled Deformation in Rock and Soil (A.DE.CO-RS)", Springer, 2008.
- [6]. Z.T. Bieniawski - "Engineering rock mass classifications", New York, Wiley, 1989.
- [7]. E. Hoek, C.T. Carranza-Torres, B. Corkum - "Hoek-Brown failure criterion", 2002 Edition, Proceedings North American Rock Mechanics Society meeting in Toronto in July 2002, Toronto (Canada), 2002.
- [8]. W.A. Amberg, G. Lombardi - "Une Méthode de Calcul Elasto-Plastique de l'Etat de Tension et de Déformation autour d'une Cavité Souterraine", Proceedings of the Third Congress of the International Society for Rock Mechanics, Vol. 2, Part B, National Academy of Sciences, Washington DC (USA), 1974.
- [9]. P. Lunardi, G. Cassani, M. Gatti - "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, 2008.