

Sulla galleria Raticosa, tra la pk 40+240 e la pk 40+410,  
sulla linea Alta Velocità Bologna-Firenze  
all'interno di un versante potenzialmente instabile

## PROGETTAZIONE E COSTRUZIONE DI GALLERIE IN AREE POTENZIALMENTE INSTABILI

Gallerie & Tunneling

Pietro Lunardi\*  
Giovanna Cassani\*\*  
Martino Gatti\*\*\*  
Alvise Amadi\*\*\*\*

Come noto, la linea ferroviaria Alta Velocità Bologna-Firenze, caratterizzata da più di 100 km di gallerie (tra galleria di linea, gallerie di interconnessione, finestre di accesso e cunicoli di servizio) realizzate per lo più all'interno di terreni eterogenei spesso molto scadenti, rappresenta una delle opere in sotterraneo più importanti di sempre.

Uno dei tratti più complessi dell'intera tratta è risultato essere costituito dai primi 170 m ca. della galleria Raticosa, dall'imbocco Sud, che sono stati realizzati all'interno di un versante potenzialmente instabile (Figura 2).

Vista la delicatezza del contesto geologico e geomorfologico, la progettazione e la costruzione delle opere ha necessitato l'utilizzo degli approcci progettuali (approccio ADECO-RS) e delle tecnologie più all'avanguardia ad oggi disponibili.



Figura 1 - L'imbocco Sud della galleria Raticosa con la linea Ferroviaria in esercizio (Foto del Dicembre 2010)

### La fase conoscitiva

#### Lo studio geologico e geomorfologico del versante

In relazione alla notevole complessità e particolarità del contesto geologico-stratigrafico, geomorfologico e idrogeologico presenti, lo studio del versante ha richiesto l'esecuzione di un significativo numero di indagini geognostiche, eseguite nel corso di successive campagne di approfondimento (Figura 3 e Tabella 1).

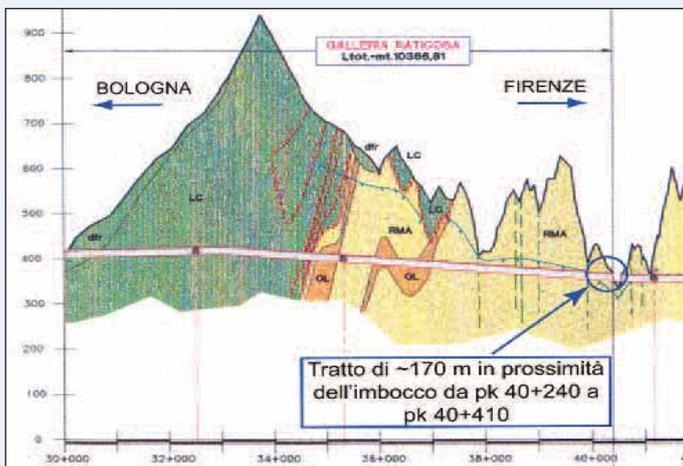


Figura 2 - Il profilo geologico longitudinale in asse al tracciato della galleria Raticosa

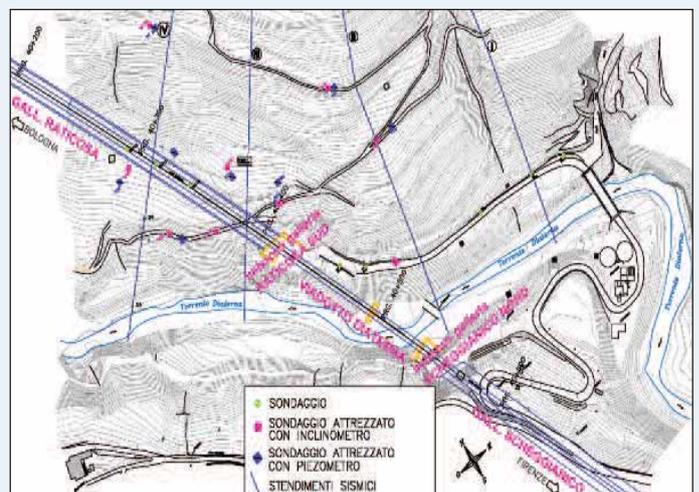


Figura 3 - Le campagne geognostiche di progressivo approfondimento



	1995-99	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Piezometri				2		2	5
Inclinometri				5		2	3
Sismica a rifrazione		x		x			
Sondaggi a carotaggio continuo	3 (imb scheggiano)	7	12				14
Prove in sito e laboratorio		x					x
Stop geostrutturali e rilievi geologici e geomorfologici	x		x				x

Tabella 1 - Sondaggi carotaggio continuo: 36; inclinometri: 10; piezometri: 7

## La caratterizzazione geotecnica mediante analisi a ritroso

Per approfondire lo stato degli equilibri naturali, il versante si è caratterizzato, dal punto di vista geotecnico, mediante uno studio di back-analysis, utilizzando i numerosi dati di monitoraggio inclinometrici e piezometrici disponibili. In particolare, è stata effettuata una modellazione numerica alle differenze finite (Figure 5A, 5B e 5C) nella quale sono stati implementati gli innalzamenti di falda misurati (massimo in-

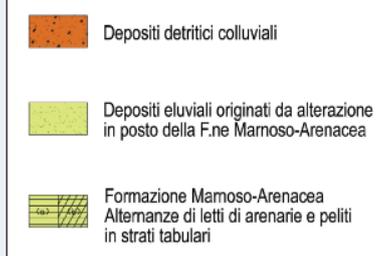
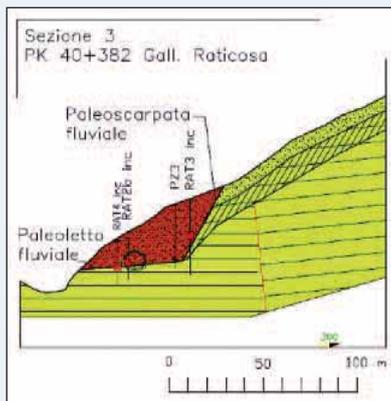


Figura 4 - La sezione geologica trasversale al tracciato della galleria Raticosa nel tratto in esame

L'interpretazione geologica e geomorfologica è stata condotta in collaborazione con i massimi esperti del settore (Università di Bologna). Il piede del versante in corrispondenza delle opere di imbocco Sud della galleria Raticosa è risultato essere costituito da un riempimento detritico colluviale del vecchio letto del torrente Diaterna, che nel Quaternario si trovava a una quota superiore a quella attuale. Tale riempimento detritico cuneiforme, dello spessore massimo di 30-40 m e delimitato da un paleoletto e da una paleoscarpa fluviale, poggia su un substrato roccioso costituito dalla Formazione Mamoso-Arenacea (Figura 4).

La ricostruzione geologica

ha evidenziato come la galleria Raticosa attraversasse il corpo detritico per i primi 170 m circa a partire dall'imbocco Sud. In particolare, vi erano delle zone di tale tratto dove la sagoma della galleria risultava essere completamente immersa nel corpo detritico, senza alcun immersionamento della stessa nel substrato roccioso.

## Lo studio idrogeologico e monitoraggio propedeutico alla costruzione dell'opera

Prima della realizzazione delle opere, il piede del versante risultava essere particolarmente sensibile agli innalzamenti di falda al di sopra del contatto tra il detrito e il substrato roccioso sottostante.

Nei periodi di intense precipitazioni, infatti, veniva a crearsi una falda sospesa all'interno del corpo detritico, alimentata dall'infiltrazione diretta e dagli afflussi sotterranei provenienti da monte all'interno della fascia molto fratturata del substrato roccioso (Figura 7A). In concomitanza dell'innalzamento della falda misurata dai piezometri, gli inclinometri indicavano velocità di spostamento al contatto detrito-roccia fino a 3 mm/gg, che decrescevano rapidamente all'abbassarsi della falda fino a divenire pressoché nulli nei periodi secchi (Figura 7B).

Tali tassi di spostamento non erano compatibili con la costruzione dell'opera né tantomeno con il suo mantenimento in esercizio.

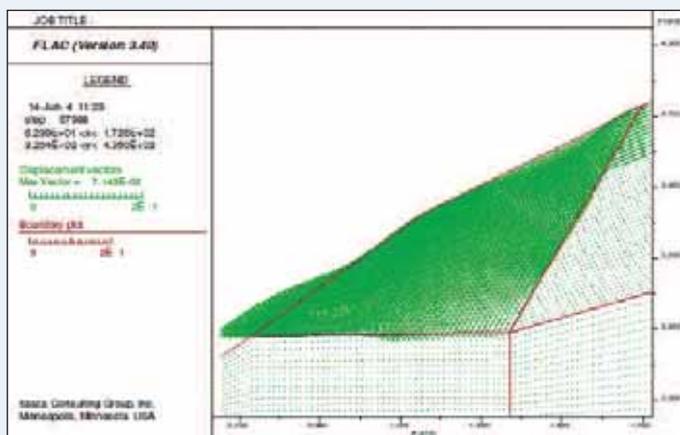
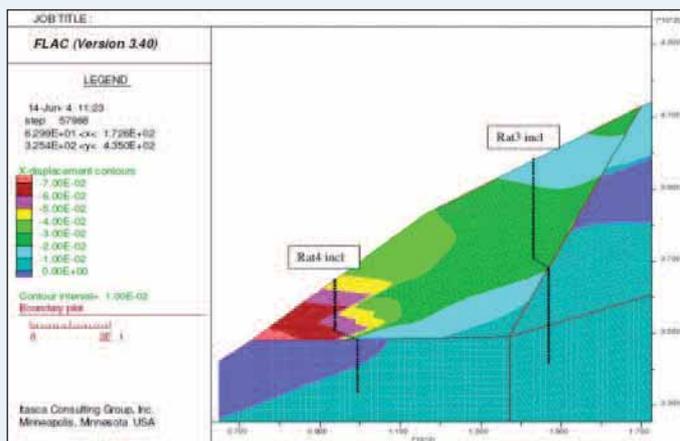
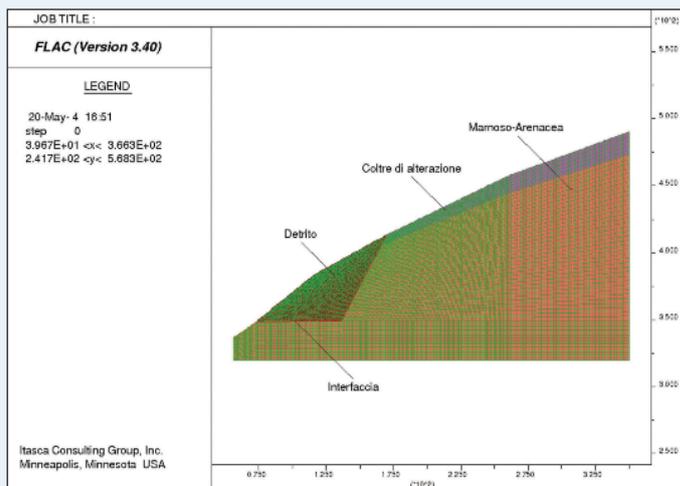


Figure 5A, 5B e 5C - La caratterizzazione geotecnica del versante tramite analisi a ritroso alle differenze finite: 5A: mesh di calcolo; 5B: isolinee di spostamento orizzontale; 5C: vettori di spostamento

nalzamento di falda sul versante nella primavera 2004) e si sono variati per tentativi i parametri geotecnici fino a determinare la combinazione che permetteva di riprodurre analiticamente gli spostamenti profondi misurati dagli inclinometri in corrispondenza del contatto tra il corpo detritico e il substrato roccioso sottostante. I parametri geotecnici così determinati sono risultati i seguenti: detrito:  $c = 30$  kPa,  $\Phi = 34^\circ$ ; interfaccia di contatto detrito-roccia:  $c = 0$  kPa,  $\Phi = 24^\circ$ . Come evidenza la Figura 6, la notevole precisione nella riproduzione da calcolo degli spostamenti misurati confermava la bontà della parametrizzazione eseguita nonché l'adeguatezza del modello geologico ricostruito. In particolare, l'analisi confermava che gli spostamenti misurati erano riproducibili dal calcolo solo ipotizzando l'esistenza di un'interfaccia liscia di contatto, tra il corpo detritico e il substrato roccioso sottostante, che rappresentava l'elemento critico del modello.

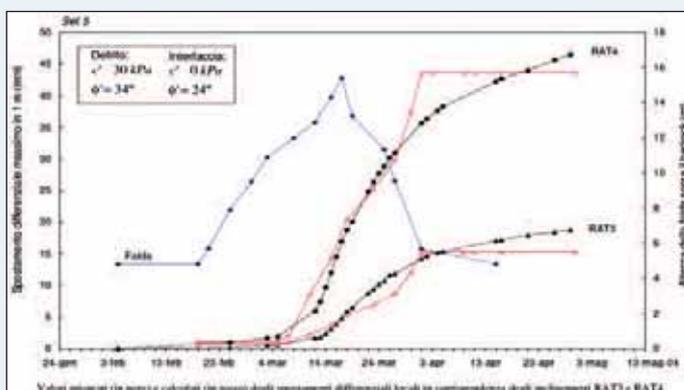


Figura 6 - La caratterizzazione geotecnica del versante tramite analisi a ritroso alle differenze finite: i risultati

	E (MPa)	$\nu$	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	c' (kPa)	$\phi'$ (°)
Detrito e coltre	30	0,03	21	30	34
Interfaccia detrito-roccia	Kn = Ks = 2 MPa/m		\	0	24
Substrato roccioso	4.000	0,03	24	250	28

Tabella 2

### Le verifiche di stabilità

Una volta individuati i parametri geotecnici sono state eseguite opportune verifiche di stabilità del versante, in funzione della variazione dell'altezza della falda sopra il bedrock.

I fattori di sicurezza determinati mediante verifiche all'equilibrio limite sono stati i seguenti:

- durante i massimi innalzamenti di falda (15 m sopra il bedrock nel Marzo del 2004): FS = 1,15;
- in condizioni di falda bassa (in prossimità del bedrock): FS = 1,3.

I risultati confermano che il versante non era interessato da un corpo di frana vero e proprio, bensì da un riempimento detritico che, nel corso della sua storia geologica, non aveva mai evidenziato un'attivazione parossistica, pur avendo accumulato, con l'innalzamento di falda, notevoli spostamenti lungo la superficie di contatto con il bedrock, come testimoniato dalla morfologia particolarmente "bombata" riscontrata al piede.

Pur non trattandosi di un movimento franoso, la presenza di un'interfaccia liscia delimitante il contatto tra detrito e roccia rendeva comunque il versante particolarmente "sensibile" agli innalzamenti di falda, come dimostravano le risultanze delle analisi numeriche effet-

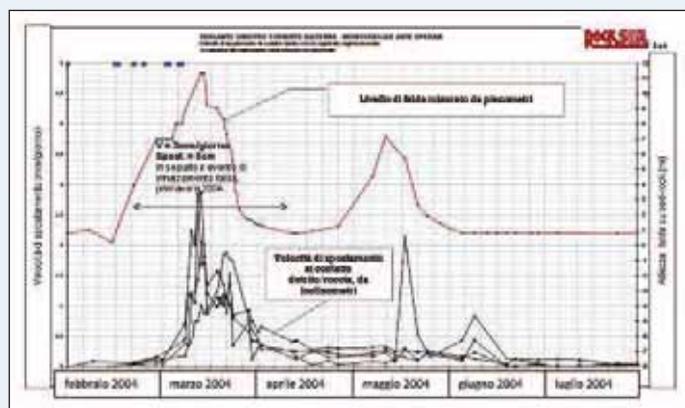
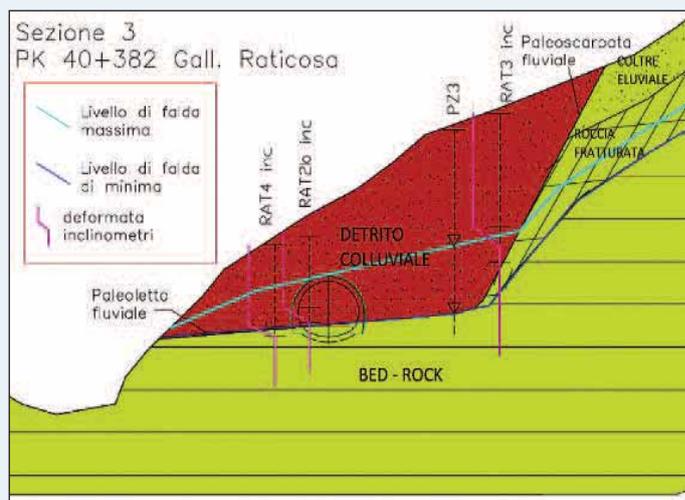


Figure 7A e 7B - Il monitoraggio ante operam: spostamenti profondi, al contatto detrito roccia, da inclinometri, in seguito all'innalzamento del livello di falda misurato da piezometri

tuate che evidenziavano una correlazione marcatamente non lineare tra innalzamenti di falda e di spostamenti al contatto detrito-roccia (Figura 9).

### La fase di diagnosi

Le problematiche che si dovevano affrontare e superare per la realizzazione delle opere ferroviarie previste nella zona in oggetto erano in sintesi le seguenti:

- esistenza, in corrispondenza del tracciato della galleria, di un versante costituito da un riempimento detritico colluviale, di scadenti caratteristiche geotecniche, poggiante su un substrato roccioso;
- spostamenti profondi del versante al contatto detrito-roccia quando, nei periodi di intense precipitazioni, si verifica l'innalzamento della falda;
- profondità di tali spostamenti sufficiente da poter coinvolgere la sagoma della futura galleria, che, in alcuni tratti dei primi 170 m a partire dall'imbocco lato Firenze, sarebbe stata completamente immersa nel corpo detritico e tale quindi da poter essere coinvolta dai movimenti di versante;
- prevedibile avanzamento degli scavi della galleria in categoria C (fonte instabile).

La particolare suscettibilità allo spostamento del versante, non essendo compatibile con la costruzione delle opere ferroviarie previste, né tantomeno con il loro mantenimento in esercizio, rendeva necessario lo studio e la realizzazione di interventi propedeutici di stabilizzazione del versante.



	N° raggiera	Interasse raggiera (m)	N° dreni per raggiera (min-max)	N° dreni per by-pass	Lunghezza singoli dreni (m)	Lunghezza tot. dreni (metri)	Manutenibilità in esercizio	Caratteristiche dreni
					min-max			
By-pass 1	6	5	4 ÷ 12	62	10 ÷ 35	1760	SI	perforazioni $\geq 110$ mm; tubo di drenaggio finestrato in PVC rigido est. $\geq 89$ mm sp. 4.6mm (caratteristiche conformi alla DIN 1187)
By-pass 2	7	5	5 ÷ 12	61	20 ÷ 35	1755	SI	
By-pass 3	9	5	6 ÷ 12	82	15 ÷ 35	2105	SI	
	<b>TOTALI</b>	<b>22</b>		<b>205</b>		<b>5620</b>	<b>SI</b>	

Tabella 3

stati eseguiti ulteriori drenaggi a valle della futura galleria Raticosa (Figura 8B). Complessivamente, l'intero intervento di drenaggio profondo ammonta a circa 300 dreni per un totale di circa 9.000 ml.

I dreni realizzati a partire dai cunicoli di by-pass (circa 200 dreni per circa 6.000 ml) costituiscono dei veri e propri schermi drenanti disposti ortogonalmente alla direzione di flusso della falda e svolgono, pertanto, una funzione fondamentale nella regimazione idraulica profonda del versante (Figure 10A, 10B e 10C).

Vista la loro importanza, il numero e le geometrie di tali dreni si sono derivati da un dimensionamento eseguito mediante un'analisi di flusso agli elementi finiti condotta allo stato stazionario, mediante sezioni di calcolo parallele all'asse dei cunicoli. La falda è stata imposta come linea a carico idraulico costante, riproducendo il massimo innalzamento piezometrico misurato dai piezometri nella primavera 2004 (15 m al di sopra del bedrock). I dreni, essendo intersecati dalle sezioni di calcolo, sono stati rappresentati come dei punti in corrispondenza dei quali la pressione dei pori era imposta pari a 0; in tal modo, agendo all'interno di ogni dreno la pressione atmosferica, l'acqua circostante può drenare. La permeabilità assunta è stata pari a  $K = 10^{-5}$  m/s, come dalle risultanze delle prove di permeabilità eseguite in sito. I risultati delle analisi di flusso evidenziarono che i dreni dimensionati, per numero e geometrie, sarebbero stati in grado di regimare il livello di falda in prossimità del bedrock, con un valore di portata complessiva emunta pari mediamente a  $Q = 160$  l/min.

### La soluzione progettuale per lo scavo della galleria Raticosa da pk. 40+240 a pk. 40+410

La soluzione progettuale individuata per la realizzazione della galleria Raticosa, nel tratto compreso da pk. 40+240 a pk. 40+410, doveva garantire il raggiungimento dei seguenti obiettivi:

- ridurre al minimo il disturbo indotto dallo scavo sull'ammasso, considerando le delicate condizioni geomorfologiche al contorno e la presenza di materiali scadenti (avanzamento previsto in categoria di comportamento "C"), attraverso l'esecuzione di un adeguato intervento di consolidamento;
- garantire la durabilità dell'opera, prevedendone la fondazione sul substrato roccioso laddove il contatto detrito-roccia si presentava al di sotto dell'arco rovescio.

La soluzione prescelta al termine dello studio di terapia condotto secondo l'approccio ADECO-RS prevedeva di conseguire gli obiettivi mediante:

- lo scavo di un cunicolo esplorativo;
- il successivo scavo di allargo della galleria a piena sezione;
- la fondazione dell'opera sul substrato roccioso mediante pozzi strutturali o approfondimento dell'arco rovescio nonché il dimensionamento di carpenterie e armature maggiorati.

### Il cunicolo esplorativo

Lo scavo del cunicolo esplorativo ( $A = 25$  m<sup>2</sup> circa;  $\varnothing = 5,5$  m circa), propedeutico alla realizzazione della galleria era finalizzato a:

- determinare l'esatta posizione del contatto detrito-roccia (Figure 11A e 11B).
- consolidare il materiale al contorno della sagoma della galleria e in corrispondenza del contatto detrito-roccia tramite iniezioni attraverso tubi valvolati.

Quando il contatto detrito-roccia si trovava al di sotto del piano di scavo del cunicolo sono stati eseguiti sondaggi a partire dallo stesso per determinare l'esatta posizione del contatto.

L'intervento di consolidamento radiale eseguito dal cunicolo mediante iniezioni selettive a bassa pressione è stato tarato sulla base delle caratteristiche del detrito (permeabilità  $k = 10^{-5}$  m/s, porosità efficace  $n = 10-15\%$ ), studiando una maglia di elementi strutturali valvolati (2 vlv/m) con passo trasversale pari a 2 m e passo longitudinale pari a 1 m disposti a quinconce, per ottenere:

- una fascia consolidata al contorno  $H = 5$  m;
  - una fascia consolidata a cavallo del contatto detrito/roccia  $H = 5-8$  m.
- I parametri di iniezione adottati in corso d'opera sono stati i seguenti:

Volume della miscela per passata (adottate in media due passate)	80÷120 l/vlv
Portata	< 30 l/min.
Press. iniezione	< 15 bar
Press. rifiuto (press. residua)	5÷10 bar circa

Tabella 4

### Lo scavo della galleria

Una volta consolidato il terreno al contorno della sagoma della galleria, lo scavo di allargo della stessa sarebbe potuto avvenire a piena sezione (area di scavo = 170 m<sup>2</sup>), utilizzando un priverestimento costituito da centine HEB 240, passo  $p = 1$  m e 30 cm di spritz-beton fibrorinforzato.

Un'adeguata fondazione della struttura nel substrato roccioso, laddove il contatto detrito-roccia si trovava al di sotto del piano di scavo, è stata ottenuta prevedendo un approfondimento dell'arco rovescio (sezione tipo C2p/T), nel caso di parziale immersione, o la realizzazione di veri e propri pozzi strutturali (sezione tipo C2p/P), nel caso di galleria non immersa. In particolare, sono stati realizzati quattro pozzi strutturali di diametro pari a 6 m, lunghezza  $L = 10$  m (due pozzi) e  $L = 6$  m (due pozzi) e interasse pari a 12 m (Figure 12A e 12B).

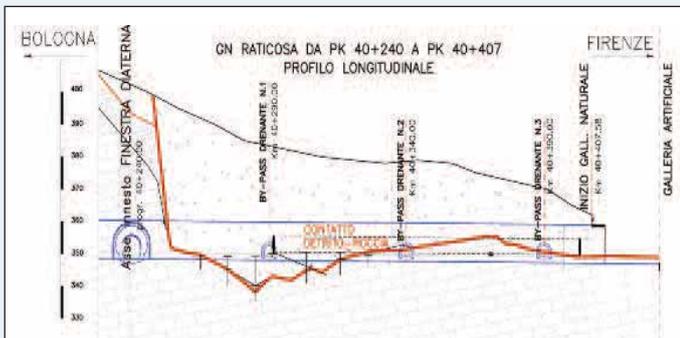
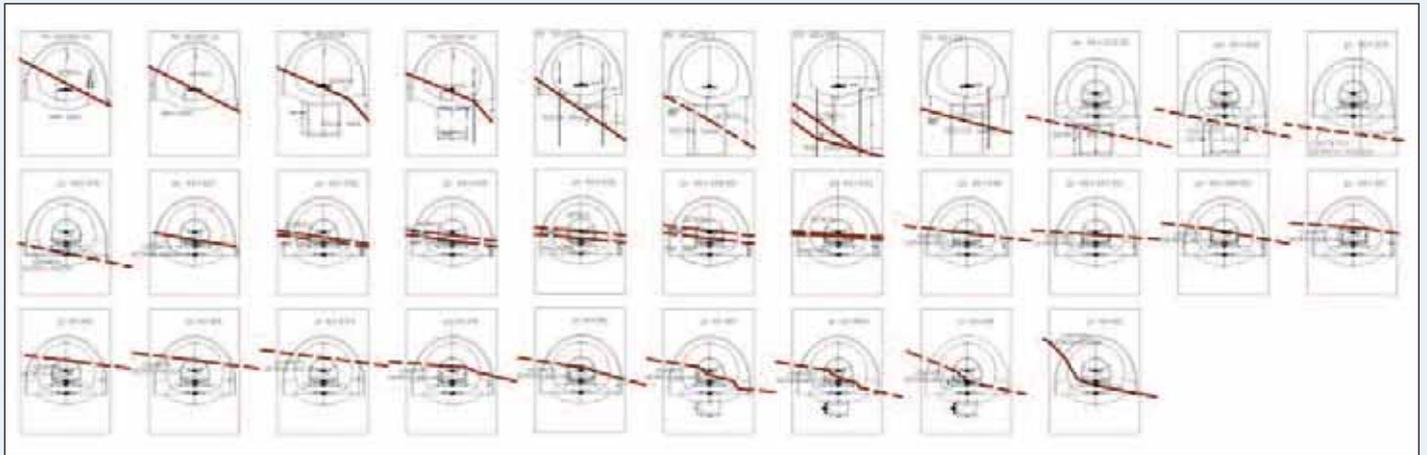


Figure 11A e 11B - Le risultanze della ricostruzione di dettaglio del contatto detrito-roccia da cunicolo esplorativo

Le carpenterie dei rivestimenti definitivi è stata alquanto potenziata per opporsi ai potenziali movimenti di versante, con spessori di calcestruzzo armato pari a 1,25 m in chiave calotta, 2,55 m sui piedritti e 2 m in chiave arco rovescio (Figure 13A e 13B).

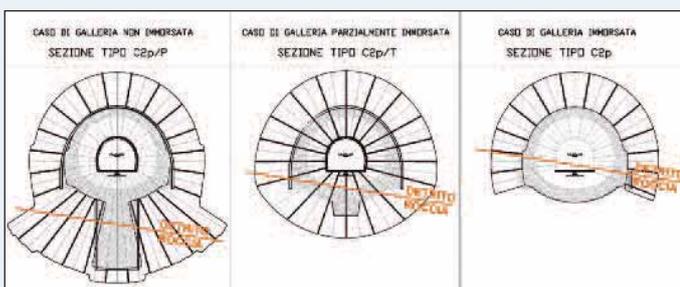
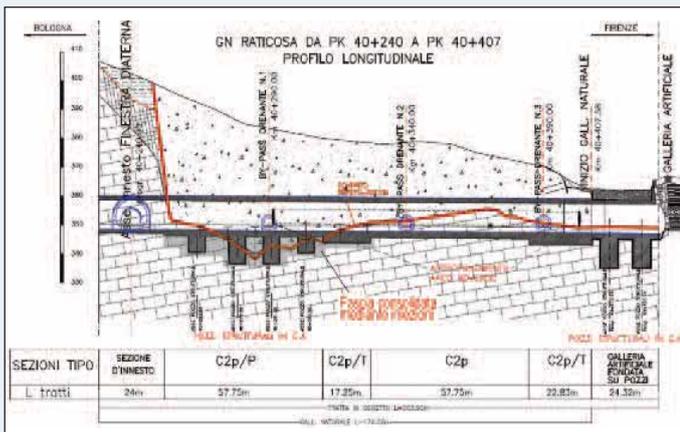
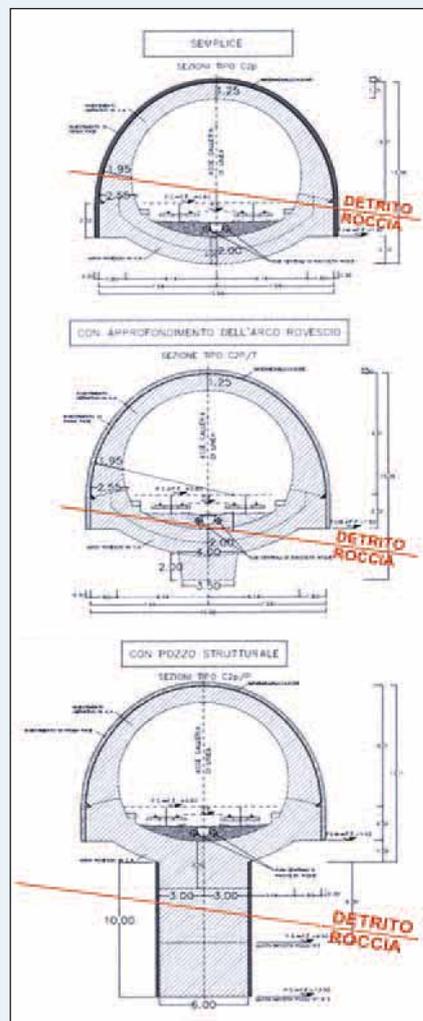


Figure 12A e 12B - Le sezioni tipo

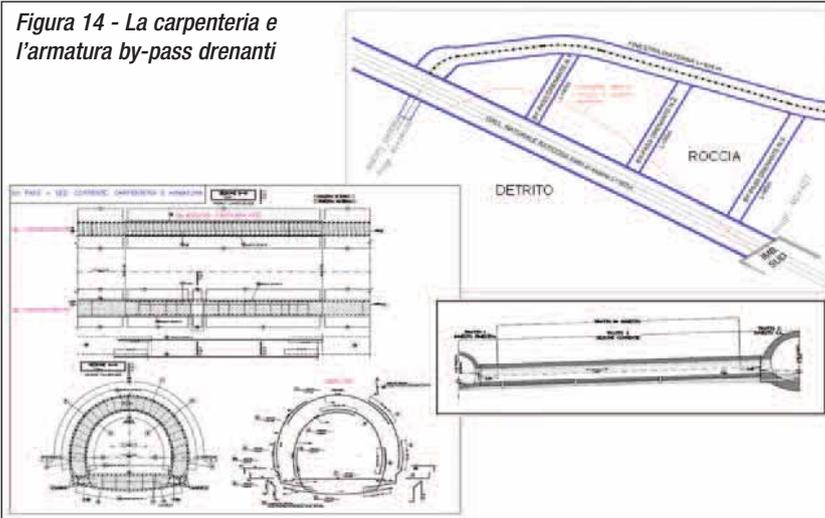


CARATTERISTICHE CARPENTERIE		Approfondimento arco rovescio (sez tipo C2p/T) tratto L= 40.08m
SEZIONE C2p; tratti L= 57.75m		H= 2.00m; L= 4.00m
Area di scavo: 170m <sup>2</sup>		armatura: F26/20
Riv. 1 <sup>a</sup> fase:		
Centine HEB 240 p=1m		
30cm spritz-beton armato		
Riv. Definitivo:		
Spessore calotta	sp = 1.25m	Pozzi strutturali (C2p/P) tratto L=57.75m
Spessore piedritti	sp = 2.55m	N°POZZI = 4
Spessore arco rovescio	sp = 2.00m	Altezza H=10m (2 pozzi)
Armatura: corrente F26/20 rip. F26/30		H=6m (2 pozzi)
(collegamento longitudinale fra conchi contigui)		Diametro = 6m
		Interasse = 12m
		Armatura: corrente F26/15 rip F26/30

Figure 13A e 13B - Carpenterie dei rivestimenti maggiorati della Sez. C2p

Anche le armature sono state fortemente potenziate, prevedendo un opportuno collegamento longitudinale tra conchi di getto contigui, al fine di irrigidire ulteriormente la struttura per renderla in grado di assorbire possibili spinte di versante dissimmetriche. Poiché i cunicoli di by-pass tra finestra Diaterna (immersata in roccia) e galleria di linea (nel detrito) avrebbero di fatto agito anche da collegamento strutturale, i rivestimenti definitivi (spessore calcestruzzo = 0,80 m in chiave calotta e 0,90 m in chiave arco rovescio) e le armature degli stessi sono state anche in questo caso fortemente incrementate (Figura 14).

Figura 14 - La carpenteria e l'armatura by-pass drenanti



Il dimensionamento della galleria e delle sue strutture è stato eseguito mediante modellazioni alle differenze finite, considerando le condizioni al contorno e ipotizzando, a favore di sicurezza, scenari di innalzamento di falda anche a fronte dell'intervento drenante, per tener conto della possibilità di un temporaneo malfunzionamento

dell'intervento stesso. In fase di terapia, si è quindi progettato un opportuno sistema di monitoraggio che permettesse anche nella successiva fase di esercizio di rilevare eventuali perdite di efficienza del sistema drenante e di predisporre adeguati interventi di manutenzione.

Va infatti sottolineato come, al di là delle risultanze dei dimensionamenti, eseguiti anche per condizioni di falda alta, la piena efficienza del sistema drenante rimaneva una condizione necessaria per salvaguardare la durabilità dell'opera in esercizio.

## La fase operativa

### Le fasi esecutive della realizzazione della galleria

Le fasi esecutive della realizzazione della galleria prevedevano (sezione tipo C2p/P):

- ◆ lo scavo del cunicolo esplorativo (Figure 15A e 15B);
- ◆ il consolidamento della futura sagoma della galleria mediante iniezioni valvolate lanciate radialmente dal paramento e dal piano di scavo del cunicolo esplorativo (Figure 16A e 16B);
- ◆ lo scavo di allargo a piena sezione della galleria di linea e posa del privervestimento (Figure 17A e 17B a pagina successiva);

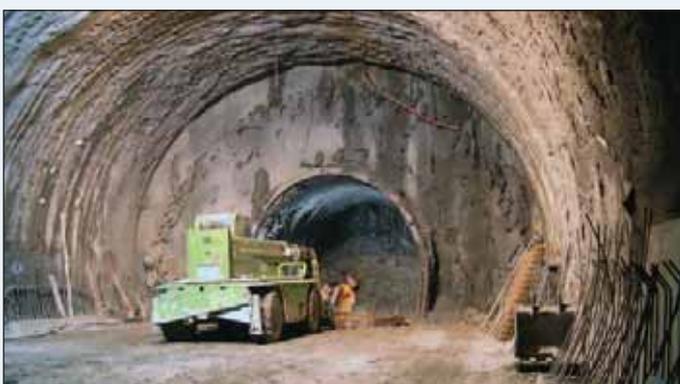
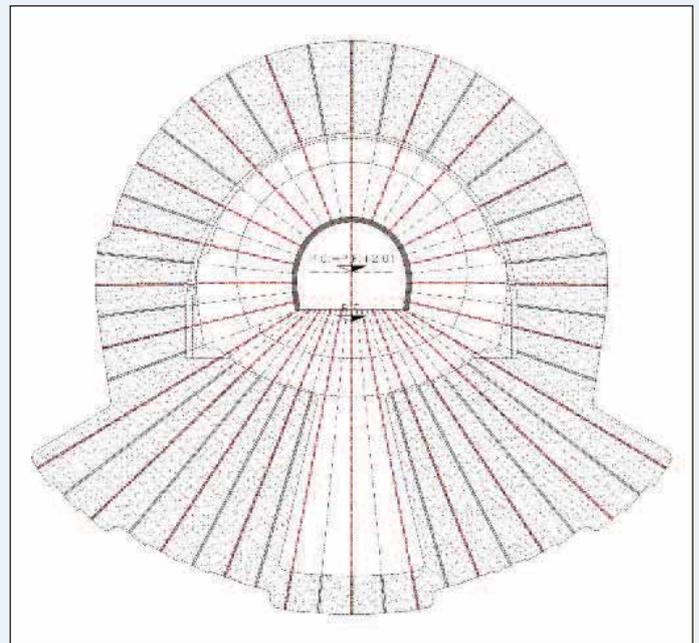
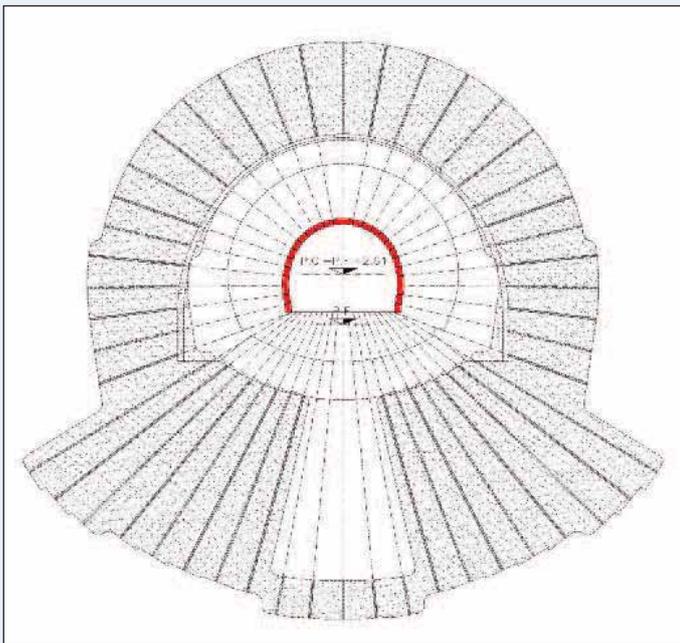


Figure 15A e 15B - Le fasi esecutive sez. C2p/P: l'inizio dello scavo del cunicolo esplorativo



Figure 16A e 16B - Le fasi esecutive sez. C2p/P: consolidamento radiale da cunicolo esplorativo

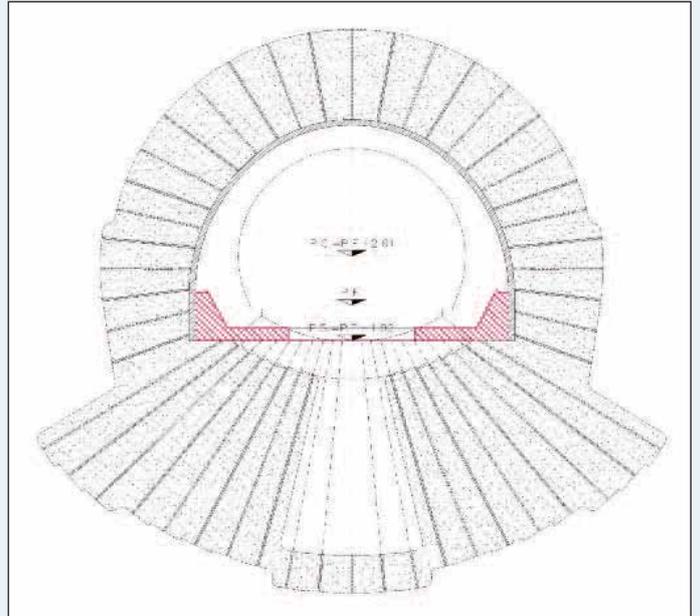
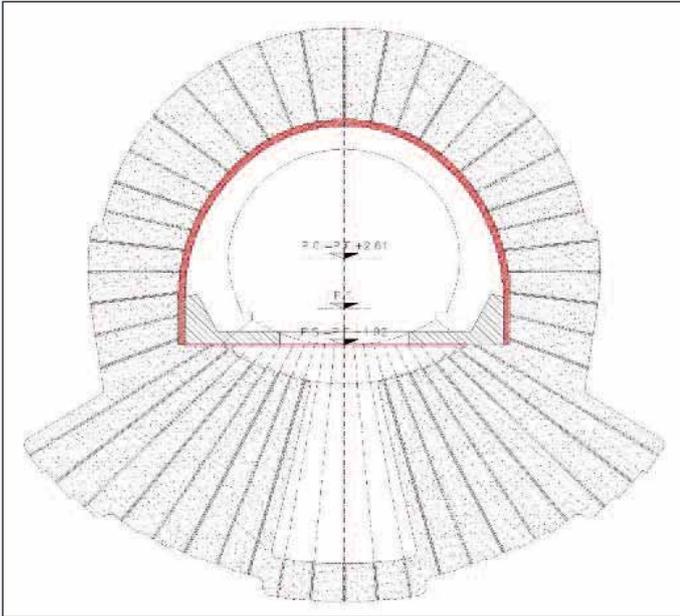


Figure 17A e 17B - Le fasi esecutive sez. C2p/P: scavo di allargo della galleria



Figure 18A e 18B - Le fasi esecutive sez. C2p/P: getto soletta di contrasto

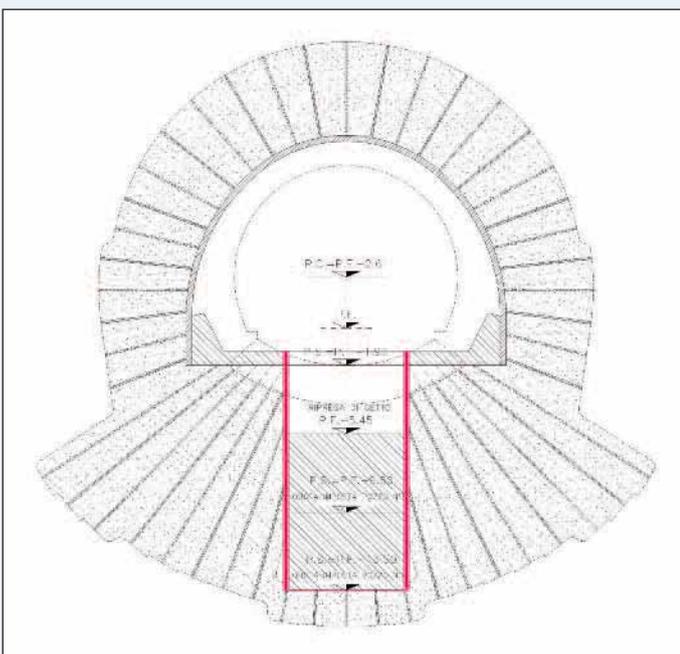


Figure 19A e 19B - Le fasi esecutive sez. C2p/P: lo scavo del pozzo strutturale

- ◆ il getto della soletta di contrasto provvisoria propedeutica alla realizzazione dei pozzi strutturali (Figure 18A e 18B);
- ◆ lo scavo e il getto in calcestruzzo armato del pozzo strutturale di fondazione (Figure 19A e 19B);



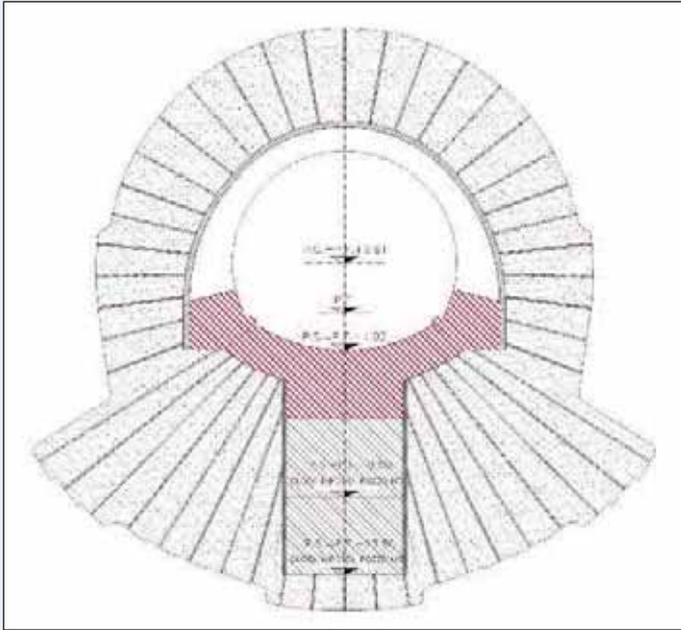


Figure 20A, 20B e 20C - Fasi esecutive sez.C2p/P: posa dell'armatura e getto dell'arco rovescio e murette a completamento del pozzo

- il getto di murette e arco rovescio in calcestruzzo armato a ridosso del fronte (Figure 20A, 20B e 20C); nei tratti dove il contatto detrito roccia interessava la sagoma della galleria ma a una quota inferiore alle murette, tale da non garantire un adeguato immersionamento in roccia, in luogo dei pozzi strutturali, sono stati realizzati degli approfondimenti della carpenteria dell'arco rovescio (sezione tipo C2T);

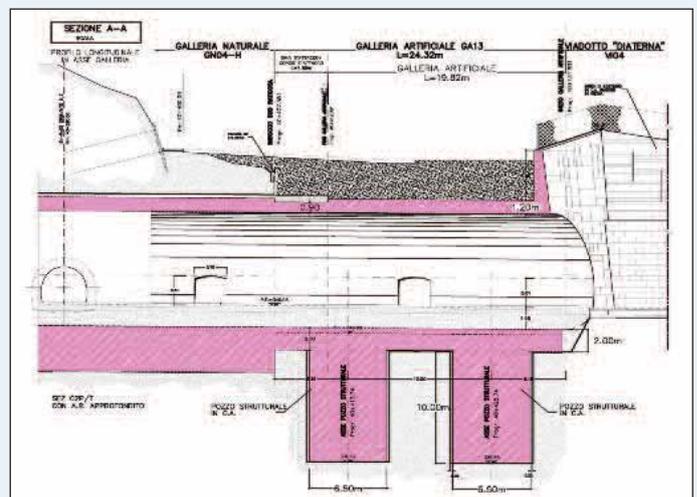
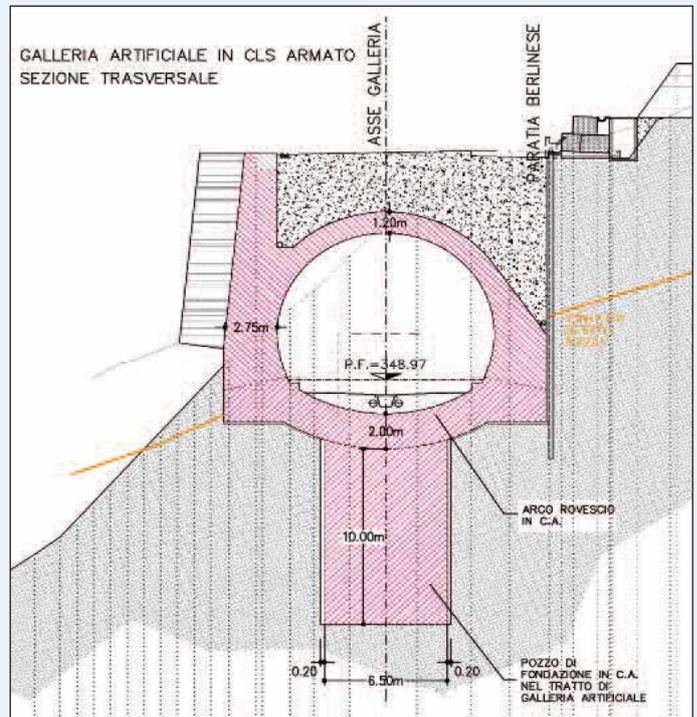
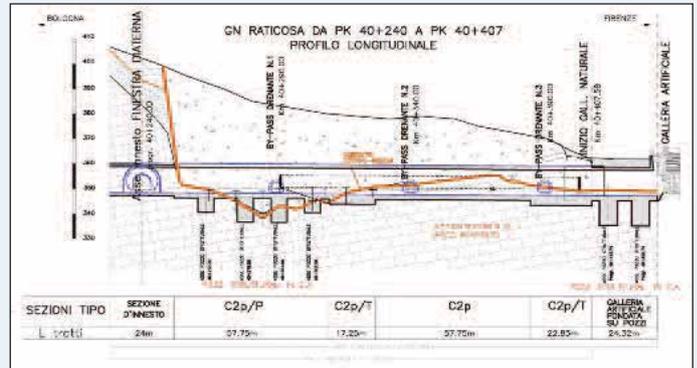


Figure 21A, 21B e 21C - L'imbocco Sud della galleria artificiale Raticosa



- ◆ il getto, previa messa in opera dell'impermeabilizzazione dotata di pannelli drenanti continui, del rivestimento definitivo di calotta in calcestruzzo armato con carpenterie maggiorate, a una distanza dal fronte compresa entro tre diametri circa.

- ◆ otto pozzi strutturali in calcestruzzo armato a interasse pari a 9 m, di cui 6 di diametro 7 m e H = 22,5 m, e 2 di diametro 5 m e H = 15-18 m.
- ◆ un muro in calcestruzzo armato fondato su tali pozzi, a protezione del sottostante Viadotto Diaterna.

## I tempi di realizzazione

Nella Tabella 5 sono riassunte le tempistiche delle singole lavorazioni relative alle tre sezioni tipo utilizzate per la realizzazione dei primi 170 m della galleria Raticosa da imbocco Sud (C2p, C2p/P, C2p/T). La

## La fase di verifica e messa a punto in corso d'opera

A fronte della delicatezza del contesto geologico-geomorfologico presente e dell'importanza dell'opera è stato realizzato come previsto dal progetto un importante piano di monitoraggio sia per la fase costrut-

Sezione tipo	Tempi delle fasi esecutive per la realizzazione di un campo di 12 m (giorni)								Prod. media per sezione (m/giorno)	Produzione media tratto in esame (m/giorno)	Produzione media (considerando sovrapposiz. lavorazioni) (m/giorno)
	Scavo cunicolo (compreso suo cons.)	Cons. radiale	Scavo di allargò	Scavo pozzo	Armatura e getto pozzo	Scavo approfond. a.r. armatura e getto	Scavo arco rovescio armatura e getto	Tempo medio totale per un campo di 12 m			
C2P	5	10	5-7	-	-	-	5	26	0,5	0,4	0,5
C2P/T (con arco rovescio approfondito)	6	25	5-7	-	-	9	46	0,3			
C2P/P (con pozzi strutturali)	6	35	7	5 (6 m) 7 (10 m)	3 (6 m) 7 (10 m)	-	9	68	0,2		

Tabella 5 - I tempi medi di realizzazione

produzione media sull'intera tratta si è aggirata intorno ai 0,5 m/giorno. Considerando la complessità del contesto affrontato e la notevole entità degli interventi previsti, tale produzione può ritenersi più che soddisfacente.

## La galleria artificiale e opere esterne

Anche la galleria artificiale è stata realizzata prevedendo interventi molto importanti. In particolare, visto il delicato contesto presente al contorno, tale opera presenta carpenterie e armature potenziate ed è stata fondata all'interno del substrato roccioso mediante due pozzi strutturali di diametro pari a 6 m, lunghezza L = 10 m e interasse pari a 12 m (Figure 21A, 21B e 21C).

Inoltre, nella zona prossima all'imbocco, si sono previste importanti opere strutturali di stabilizzazione al piede del versante costituite da (Figure 22A, 22B e 22C):

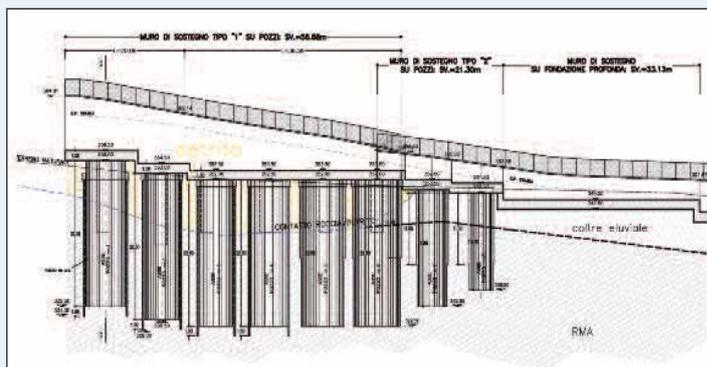


Figure 22A, 22B e 22C - I pozzi strutturali al piede del versante

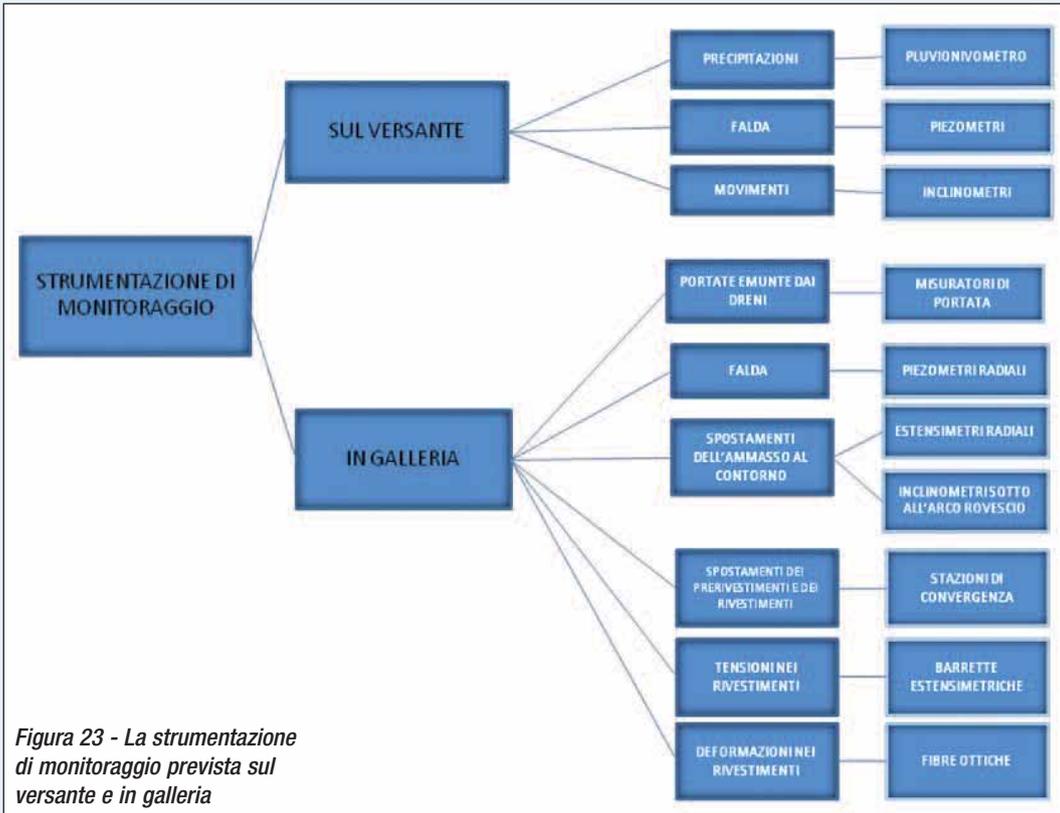


Figura 23 - La strumentazione di monitoraggio prevista sul versante e in galleria

tiva sia per la fase di esercizio. In particolare, in fase costruttiva il monitoraggio doveva consentire una costante verifica dell'efficacia delle soluzioni progettuali progressivamente messe in opera per la stabilizzazione del versante e la realizzazione della galleria, in fase di esercizio, lo stesso doveva permettere invece la verifica del costante mantenimento delle condizioni di stabilità del versante e di durabilità dell'opera. La strumentazione utilizzata è stata molto articolata ed è stata posizionata sia sul versante che in galleria (Figura 23). La finalità dei controlli era infatti quella di eseguire un monitoraggio "incrociato" tra versante e galleria, valutando le correlazioni tra evento meteorico di precipitazione, portate affluenti nei drenaggi profondi, livello di falda, risposta defor-

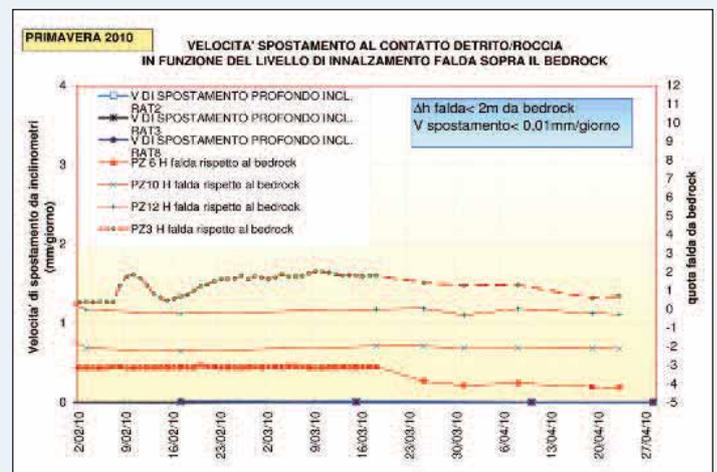
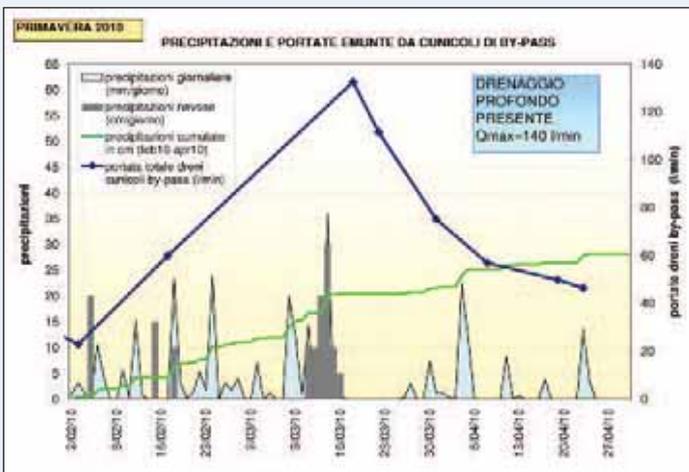
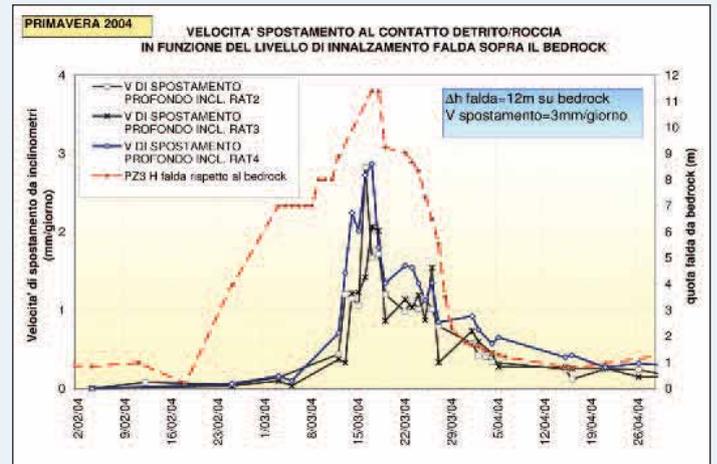
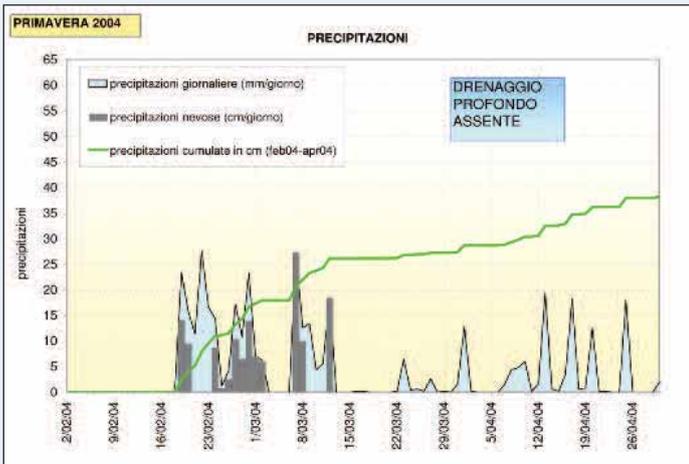


Figure 24A, 24B, 24C e 24D - Durante il monitoraggio in corso d'opera, il confronto tra la primavera 2004 e la primavera 2010, rispettivamente prima dopo la messa in opera degli interventi progettati



mativa del versante e stato tenso-deformativo dei rivestimenti della galleria, per verificare il costante mantenimento delle condizioni di stabilità, secondo il seguente flusso modalità.

In concomitanza di precipitazioni significative sul versante, registrate da un pluviometro:

- ◆ mediante misuratori di portata, si verifica che in galleria si registri un effettivo aumento delle portate emunte dai dreni;
- ◆ mediante piezometri, si verifica contestualmente che sul versante il livello di falda si mantenga in prossimità del contatto detrito-roccia;
- ◆ mediante inclinometri, si verifica che sul versante permangano condizione di stabilità degli spostamenti;
- ◆ mediante estensimetri radiali e inclinometri posti sotto l'arco rovescio, si verifica l'assenza di spostamenti dell'ammasso al contorno; mediante misure topografiche di convergenza si verifica l'assenza di spostamenti della struttura; mediante barrette estensimetriche e fibre ottiche si verifica l'assenza di anomali incrementi tensionali nei rivestimenti definitivi.

Tale tipologia di controllo, applicata durante la fase costruttiva dell'opera, ha confermato l'efficacia degli interventi progettati. Lo si evince chiaramente dall'analisi dei grafici riportati in Figure 24A, 24B, 24C e 24D che mettono a confronto i risultati del monitoraggio anteoperam (primavera 2004) con quelli del monitoraggio post costruzione (primavera 2010).

Infatti, nella primavera 2004, quando non erano ancora stati realizzati gli interventi di drenaggio profondo sul versante, in concomitanza di precipitazioni intense si era registrato un rilevante innalzamento del livello di falda al di sopra del bedrock e conseguentemente un incremento significativo dei tassi di spostamento profondo del versante. Nella primavera 2010, a galleria terminata e in presenza della massima efficienza dei drenaggi profondi, a seguito di precipitazioni di intensità paragonabile a quella del 2004, si è registrato un notevole incremento delle portate complessive emunte dai dreni in galleria ( $Q_{max} = 140 \text{ l/min.}$ ) e contestualmente il livello di falda sul versante si è mantenuto in prossimità del bedrock. Non si sono registrati spostamenti profondi di rilievo. Conseguentemente, grazie all'efficacia degli interventi realizzati, l'opera è stata soggetta a stati tensionali ridotti, ampiamente compatibili con le previsioni di progetto e non ha subito alcun spostamento significativo (Figure 25A e 25B).

La raccolta dei dati di monitoraggio durante la fase di esercizio è stata centralizzata al fine di acquisire le letture in automatico e garantire un controllo continuativo del versante e delle opere. In funzione dei parametri da monitorare sono state definite delle soglie di riferimento e le azioni da mettere in opera al superamento delle stesse. In particolare tali azioni saranno volte sostanzialmente alla manutenzione dei dreni (spurgo e/o riperforazione) ai primi segnali di innalzamento di falda e di conseguenti movimenti di versante, a seguito del ridursi nel tempo dell'efficienza/efficacia del sistema drenante.

## Conclusioni

La realizzazione dei primi 170 m circa a partire dall'imbocco Sud della Galleria Raticosa, facente parte della linea ferroviaria A.V. Bologna-Firenze, ha costituito senza dubbio uno dei passaggi più complessi dell'intera opera. A fronte della delicatezza del contesto geologico e geomorfologico presente, la cui stabilità era condizionata dalle escursioni piezometriche (precipitazioni meteoriche), la progettazione e la costruzione delle opere hanno necessitato l'utilizzo degli approcci progettuali (ADECO-RS) e delle tecnologie costruttive più all'avanguardia ad oggi disponibili per realizzare speciali interventi propedeutici di stabilizzazione mediante iniezioni cementizie e drenaggi profondi, la cui esecuzione ha richiesto anche lo scavo di una serie di gallerie accessorie.

Il monitoraggio in fase costruttiva ha confermato l'efficacia degli interventi progettati e realizzati e, a circa quattro anni dal completamento delle opere e con la linea ferroviaria ormai in esercizio (Figura 1), il versante mostra tassi deformativi trascurabili. Allo stesso modo, le strutture della galleria manifestano stati tensionali pienamente compatibili con le previsioni progettuali.

Come previsto dal progetto, è stato messo in opera un articolato piano di monitoraggio che durerà per tutta la fase di esercizio della galleria e che permetterà di verificare il costante mantenimento delle condizioni di stabilità del versante e di affidabilità dell'opera ferroviaria. ■

- \* *Professore Ingegnere*
- \*\* *Dottore Ingegnere Direttore Tecnico di Rocksoil SpA*
- \*\*\* *Dottore Ingegnere Responsabile di Progetto di Rocksoil SpA*
- \*\*\*\* *Dottore Geologo Responsabile di Commessa di Rocksoil SpA*

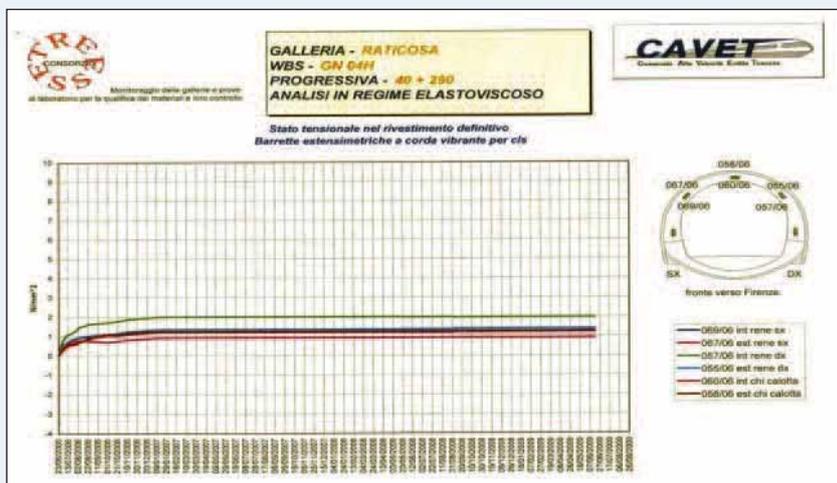
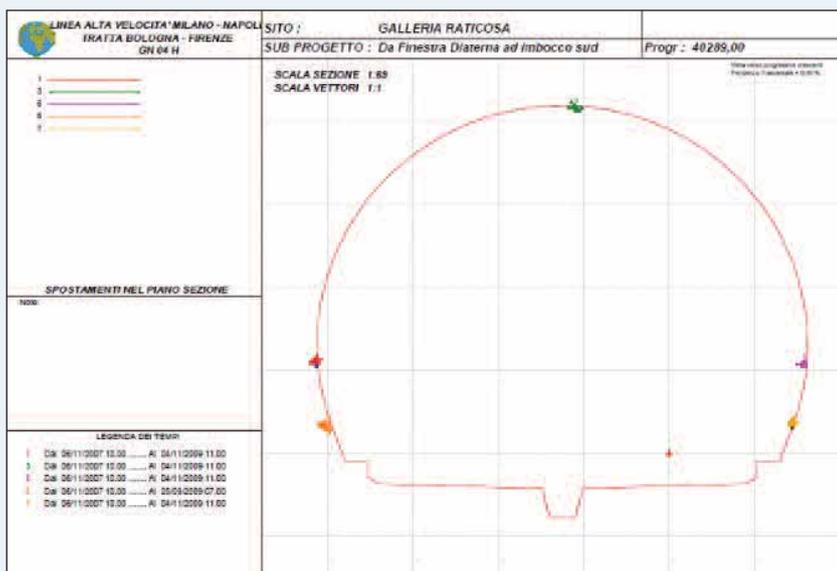


Figure 25A e 25B - Il monitoraggio topografico del rivestimento definitivo