



Il 21 Ottobre 2005 è una data importante per il tunnelling italiano: si è festeggiata la fine dei lavori di scavo del tratto appenninico tra Bologna e Firenze della nuova linea ferroviaria AV/AC Milano-Roma-Napoli

PRIME EVIDENZE E RISULTATI DELL'IMPIEGO DELL'APPROCCIO ADECO-RS PER LA REALIZZAZIONE DI OLTRE 73 KM DI GALLERIE DI LINEA

Pietro Lunardi*
Renzo Bindi**
Giovanna Cassani***

Oggi, dopo nemmeno sei anni dall'inizio dei primi scavi delle gallerie di linea, il tracciato da Bologna a Firenze - per oltre 73 km in tunnel a doppio binario da 140 m² di sezione trasversale - è tutto percorribile e possono iniziare le operazioni di finitura delle pareti delle gallerie per poi passare alla posa dei binari.

Si è trattato di un'esperienza pilota per tutto il settore delle grandi infrastrutture e non solo perché - per la prima volta nel nostro Paese - i lavori sono stati affidati a un unico General Contractor ma anche per le difficoltà tecniche che si sono dovute superare. Il panorama geologico-geotecnico si presentava e si è dimostrato tra i più difficili e complessi al mondo.

Si doveva attraversare un'ampia e disomogenea varietà di terreni, talvolta interessati da manifestazioni idriche e presenza di gas, sotto coperture da nulle a elevate. A fronte di questa eterogeneità di materiali e di situazioni, si è adottato un nuovo approccio progettuale e costruttivo basato sull'Analisi delle Deformazioni Controllate nelle Rocce e nei Suoli (ADECO-RS).

Utilizzando tale approccio, che si basa sulla netta distinzione tra momento della progettazione e momento della costruzione delle gallerie, si sono stimati - in via preventiva e in maniera ritenuta sufficientemente attendibile - costi e tempi di realizzazione dell'opera: ciò ha permesso di appaltare i lavori, per la prima volta nella storia delle opere in sotterraneo di queste dimensioni - almeno per l'Italia -, sulla base di un contratto forfetario "chiavi in mano".

Altre caratteristiche rilevanti dell'ADECO-RS: la centralità attribuita alla risposta deformativa dell'ammasso all'azione dello scavo e l'avanzamento a piena sezione, impiegato anche nelle situazioni più difficili, previo l'utilizzo del nucleo di terreno al fronte di scavo (opportuna-mente protetto o rinforzato) quale elemento strutturale capace di garantire la formazione dell'"effetto arco" vicino alle pareti dello scavo e quindi la stabilità a breve e a lungo termine della galleria.

A conclusione di ogni esperienza pilota, piccola o grande che sia, è do-



L'abbattimento dell'ultimo diaframma nella galleria Vaglia

veroso esaminare a consuntivo i risultati conseguiti, per valutare l'efficacia e la reale portata delle innovazioni introdotte.

La tratta tra Bologna e Firenze della nuova linea ferroviaria ad Alta Velocità/Capacità Milano-Roma-Napoli, per lunghezza del tracciato scavato in sotterraneo, eterogeneità dei terreni attraversati ed estrema difficoltà delle situazioni tenso-deformative che si sono dovute superare, ha costituito certamente un severo test dell'effettiva capacità del nuovo approccio progettuale e costruttivo a soddisfare le attese. In questo articolo si illustreranno le evidenze emerse.

L'inquadramento generale dell'opera

La nuova linea ferroviaria tra Bologna e Firenze fa parte della direttrice italiana Milano-Roma-Napoli del Treno ad Alta Velocità/Capacità e si inserisce, nell'ambito della rete europea, quale tratto terminale in direzione Sud (Figura 1). La lunghezza complessiva del tracciato è di oltre 78,5 km di cui 70,6 (il 90 % circa della lunghezza totale) in galleria naturale a doppio binario.

Il progetto comprendeva la costruzione di:

- ◆ Nove gallerie di linea di circa 140 m² di sezione e lunghezza variabile da 528 m a 16.775 m;
- ◆ Quattordici finestre di accesso per complessivi 9.255 m;
- ◆ Una galleria di servizio per complessivi 10.647 m;



Galleria Sadurano: il fronte durante l'avanzamento sotto "protesi" (terreno: siltiti marnose e conglomerati; copertura nulla)



Galleria Firenzuola: il nucleo-fronte consolidato mediante micro-jet-grouting armato con elementi strutturali di vetroresina (terreno: sabbie argillose con intercalazioni ghiaiose; copertura di 50 m)



Figura 1 - L'ubicazione dell'opera

- ◆ Due gallerie di interconnessione + by-pass per complessivi 2.160 m.

Come già accennato, la progettazione esecutiva e costruttiva di tutte queste opere è avvenuta sulla base dell'approccio ADECO-RS che, com'è noto, prevede che il progetto e la costruzione si sviluppino in due momenti assolutamente distinti, dal punto di vista cronologico, attraverso:

- ◆ una fase conoscitiva, una fase di diagnosi e una fase

di terapia, al momento della progettazione;

- ◆ una fase operativa e una fase di verifica in corso d'opera, al momento della costruzione.

La progettazione dell'opera

L'inquadramento geologico-geotecnico (fase conoscitiva)

Essendo ben nota la notevole complessità dei terreni in gioco, che furono già affrontati tra eccezionali difficoltà per realizzare la linea ferroviaria "Direttissima" attualmente in esercizio, inaugurata nel 1934, per le campagne geognostiche da espletare ai fini della progettazione esecutiva, fu investita una somma pari a circa 84 milioni di Euro, il 2% dell'importo globale dell'opera.

Ciò ha permesso di ottenere una caratterizzazione geologico-geomeccanica dei terreni che sarebbero stati interessati dallo scavo delle gallerie assai dettagliata e, soprattutto, realistica.

Come mostra la Figura 2, si tratta soprattutto di formazioni flyshioidi,

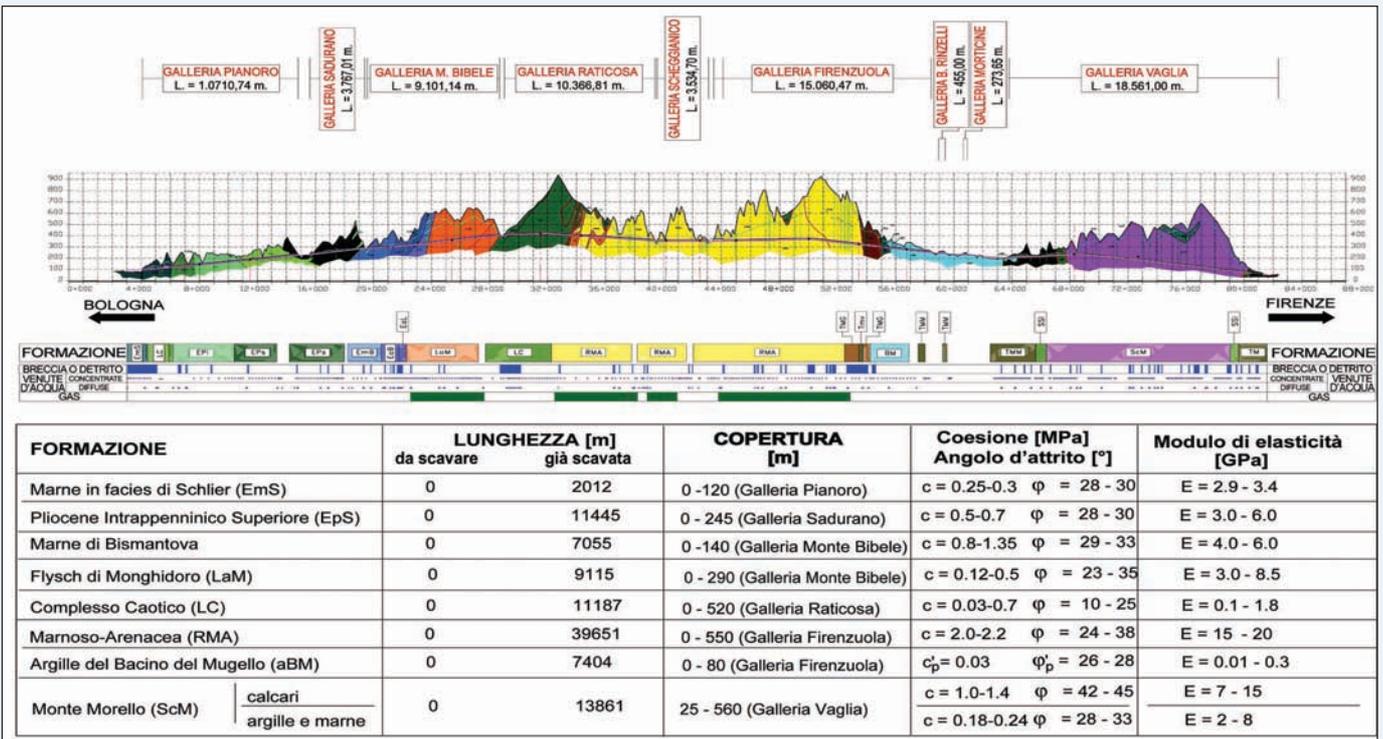


Figura 2 - La variabilità dei parametri di resistenza e deformabilità delle formazioni principali



argille, argilliti e terreni sciolti, talvolta sede di importanti orizzonti acquiferi che hanno interessato più del 70 % del tracciato sotterraneo, con coperture variabili tra 0 e 600 m. Alcune formazioni hanno presentato anche il problema della presenza di gas, sempre insidioso e delicato da affrontare. Sulla base delle conoscenze acquisite, in fase conoscitiva il tracciato è stato suddiviso in tratte aventi caratteristiche geologico-geomeccaniche simili, cui si sono attribuiti i parametri di resistenza e deformabilità da assumere nelle successive analisi di diagnosi e terapia.

La previsione del comportamento tenso-deformativo dell'ammasso allo scavo (fase di diagnosi)

In fase di diagnosi era apparso subito evidente che le gallerie da realizzare, sia per le diverse caratteristiche geotecniche dei terreni attraversati sia per la variabilità delle coperture, si sarebbero trovate in condizioni tenso-deformative estremamente differenti.

Sulla base delle conoscenze geologiche, geotecniche, geomeccaniche e idrogeologiche raccolte e dei risultati dei calcoli di stabilità eseguiti con metodi analitici e/o numerici, il tracciato sotterraneo fu quindi suddiviso in tratte a comportamento tenso-deformativo omogeneo, in funzione della prevista stabilità del nucleo-fronte in assenza di interventi di stabilizzazione:

- ◆ nucleo-fronte stabile (categoria di comportamento A; fenomeni deformativi in campo elastico, manifestazioni di instabilità prevalenti: distacchi gravitativi sul fronte e al contorno del cavo);
- ◆ nucleo-fronte stabile a breve termine (categoria di comportamento B; fenomeni deformativi in campo elastoplastico; manifestazioni di instabilità prevalenti: splaccaggi al fronte e al contorno del cavo);
- ◆ nucleo-fronte instabile (categoria di comportamento C; fenomeni deformativi in campo di rottura; manifestazioni di instabilità conseguenti: crollo del fronte e collasso della cavità).

Da questa analisi è risultato che il 17% del tracciato si sarebbe sviluppato entro ammassi che, all'atto dello scavo, avrebbero manifestato un comportamento di categoria A, il 57% sarebbe stato prevedibilmente interessato da fenomeni deformativi in campo elastoplastico riconducibili alla categoria di comportamento B, infine circa il 26% sarebbe stato caratterizzato, in assenza di appropriati interventi, da gravi fenomeni di instabilità del nucleo-fronte tipici della categoria di comportamento C.

La definizione dei sistemi di scavo e degli interventi di stabilizzazione (fase di terapia)

Dopo aver formulato previsioni attendibili riguardo al comportamento tenso-deformativo dell'ammasso in seguito allo scavo, si sono individuate, per ogni tratta di galleria a comportamento tenso-deformativo omogeneo, le azioni (di precontenimento e/o di semplice contenimento) necessarie per garantire, in ciascuna situazione ipotizzata, la formazione di un effetto arco il più possibile prossimo al profilo dello scavo.

Conseguentemente, si sono progettati le metodologie di avanzamento (sistema di abbattimento, profondità degli sfondi) e gli interventi più idonei per produrre tali azioni e garantire, di conseguenza, la stabilità e la sicurezza degli scavi a breve e a lungo termine.

Poiché la variabilità dei terreni, più o meno marcata in tutte le gallerie, consigliava di adottare tecnologie di scavo totalmente meccanizzato, ad eccezione della galleria di servizio della galleria Vaglia, i principi informativi sui quali si è basata la progettazione delle sezioni tipo per le gallerie di linea sono stati i seguenti:

- ◆ Avanzamento sempre a piena sezione, soprattutto in condizioni tenso-deformative difficili: grazie ai vantaggi statici che gli sono propri e alla meccanizzazione spinta che è possibile realizzare nei grandi spazi di lavoro disponibili, l'impiego dello scavo a piena sezione previo consolidamento del nucleo-fronte, quando necessario, permette infatti di avanzare in condizioni di sicurezza conseguendo produzioni ottime, e soprattutto regolari, anche nelle situazioni più complesse;
- ◆ Contenimento ove necessario dell'alterazione e della decompressione del terreno, causate dallo scavo, mediante l'applicazione immediata di efficaci interventi di precontenimento e/o contenimento del cavo (jet-grouting sub-orizzontale, elementi strutturali di vetroresina nel nucleo e/o in avanzamento al contorno del cavo, eventualmente valvolati per l'esecuzione di iniezioni cementizie in pressione, spritz-beton, ecc.) dimensionati per essere in grado, a seconda dei casi, di incassare una significativa quota parte delle deformazioni senza collassare, oppure anticipare ed annullare l'insorgere di qualsiasi movimento nel terreno;
- ◆ Realizzazione di un rivestimento definitivo di calcestruzzo, eventualmente armato, completo di arco rovescio gettato, laddove si riconosceva la necessità di bloccare tempestivamente i fenomeni deformativi, a ridosso del fronte per campioni di lunghezza ridotta.

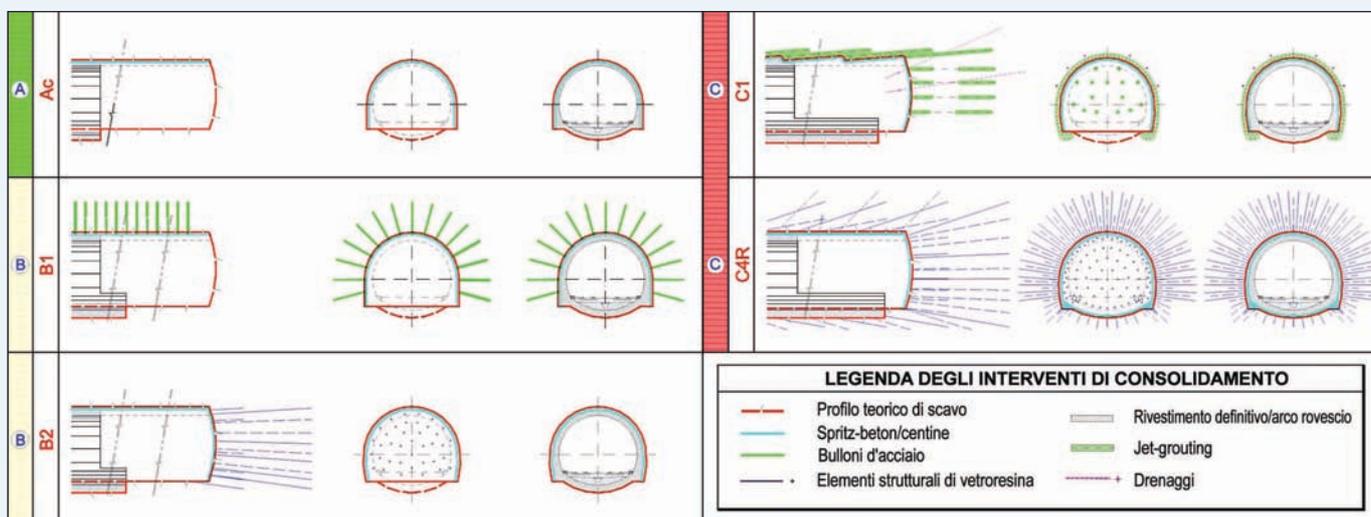


Figura 3 - Le sezioni tipo principali



Si sono quindi individuate le sezioni tipo longitudinali e trasversali più adeguate per affrontare le diverse condizioni di ammasso, definendo con chiarezza, per ciascuna, le condizioni geologiche-geomeccaniche e tenso-deformative (estrusioni e convergenze) entro le quali avrebbe dovuto essere applicata, nonché la posizione rispetto al fronte di scavo, l'intensità, le fasi e le cadenze di messa in opera dei differenti interventi previsti (preconsolidamento, priverestimento, arco rovescio, ecc.), ipotizzando, con riferimento a precedenti esperienze oramai sufficientemente numerose, un ciclo temporale di esecuzione assai attendibile, onde prevedere con sufficiente precisione le possibili produzioni giornaliere.

La Figura 3 mostra le principali sezioni tipo adottate (in totale sono state quattordici), raggruppate in funzione delle categorie di comportamento A, B e C.

Per ogni sezione tipo si sono progettate le variabilità da applicare in concomitanza di situazioni statisticamente probabili, la cui ubicazione lungo il tracciato, però, non era prevedibile sulla base dei dati disponibili (Figura 4).

L'individuazione preventiva, per ciascuna sezione tipo, delle variabilità ammesse in funzione del reale comportamento manifestato dall'ammasso allo scavo, sempre e comunque entro i campi di deformazione previsti, è un'operazione fondamentale prevista dall'approccio ADECORS, che consente di conseguire un elevato livello di definizione del progetto e, contemporaneamente, la flessibilità necessaria per poter adottare vantaggiosamente, in fase di costruzione, senza svilirne i principi fondamentali, un Sistema di Assicurazione Qualità conforme alle Norme ISO 9002 [3]. In tal modo, infatti, si evita che, ad ogni variazione delle condizioni incontrate tale da implicare cambiamenti anche minori al progetto, insorgano delle Non Conformità (cioè diversità tra il costruito e il progettato) che obblighino a una parziale riprogettazione.

Ciascuna sezione tipo è stata verificata in funzione dei carichi mobilitati dallo scavo individuati in fase di diagnosi, sia per quanto concerne le diverse fasi costruttive, sia per la fase finale di esercizio, mediante una serie di calcoli su modelli agli elementi finiti tridimensionali e piani in campo elastoplastico.

Si sono formulate, infine, precise indicazioni per l'attuazione di un programma di monitoraggio adeguato, che in funzione delle differenti caratteristiche dei terreni attraversati, fosse in grado, da un lato, di garantire la sicurezza degli scavi, dall'altro lato, di controllare l'adeguatezza del progetto e la sua ottimizzazione in rapporto alle condizioni realmente incontrate.

La progettazione esecutiva ha riguardato, ovviamente, anche le indispensabili opere accessorie, quali imbocchi, cameroni, gallerie di accesso e di servizio, che però trascureremo nel seguito per non complicare inutilmente la trattazione.

La costruzione delle gallerie

Le caratteristiche dell'appalto

Le opere dell'intera tratta ferroviaria tra Bologna e Firenze sono state appaltate con un contratto rigorosamente forfetario (importo 4,209 miliardi di Euro) da Fiat SpA, in qualità di General Contractor che, sulla base del progetto esecutivo redatto come diano illustrato e di un'analisi delle aree di rischio esistenti in termini di tempi e di costi di costruzione [1], ha accettato di farsi carico di qualsiasi imprevisto, compreso quello geologico, delegando al Consorzio CAVET tutte le attività (espropri, progettazione, costruzione, collaudo, ecc.).

La fase operativa

Subito dopo l'aggiudicazione dell'appalto, contemporaneamente ai primi lavori di scavo (aree e viabilità di cantiere, piazzali di imbocco, finestre, ecc. - Luglio 1996) ha avuto inizio la progettazione costruttiva delle opere.

A fronte degli ulteriori elementi conoscitivi a disposizione e dei riscontri diretti sul campo, la validità del progetto esecutivo è risultata sostanzialmente confermata e in sede di progettazione costruttiva sono stati operati solo affinamenti minori:

- ◆ per affrontare specificatamente situazioni particolarmente delicate dal punto di vista tenso-deformativo si è introdotto, nell'ambito delle variabilità delle sezioni tipo B2, e C4, l'impiego di un puntone di

ROCK SOUL S.p.A.		SEZIONE LONGITUDINALE		SEZIONE TRASVERSALE IN FASE D'AVANZAMENTO			SEZIONE TRASVERSALE A GALLERIA RIVESTITA		
B									
GEOLOGIA	GEOMECCANICA	COPERTURA [m]		SEZIONE TIPO PROGETTATA			RISPOSTA DEFORMATIVA PREVISTA	VARIABILITA'	
	Fascia intrinseca	Da	A	INTERVENTI				INTERVENTI	
				Tipo	1° fase	Definitivi		1° fase	Definitivi
Complessi argillo-sabbiosi in facies massiva o non ben stratificata da poco a moderatamente cementata. Bassa permeabilità a scala d'ammasso.	$\varphi = 14^\circ + 32^\circ$ $c = 0,25 + 0,5 \text{ Mpa}$ $E = 0,5 + 3,0 \text{ Gpa}$	50	100	B2	45 elementi strutturali di vetroresina nel nucleo-fronte. Sovrapposizione > 5 m. Centine reticolari d'acciaio ogni 1,2 m. Spritz-beton 30 cm.	Rivestimento definitivo di calcestruzzo 90 cm arco rovescio 100 cm	< 10 cm 5 + 18 cm	35 + 55 elementi strutturali di vetroresina nel nucleo-fronte. Sovrapposizione 5 + 7 m. Centine reticolari d'acciaio ogni 1 + 1,4 m. Spritz-beton 20 + 30 cm.	Rivestimento definitivo di calcestruzzo 90 cm arco rovescio 100 cm

Figura 4 - Esempio delle variabilità progettate in funzione del reale comportamento dell'ammasso allo scavo

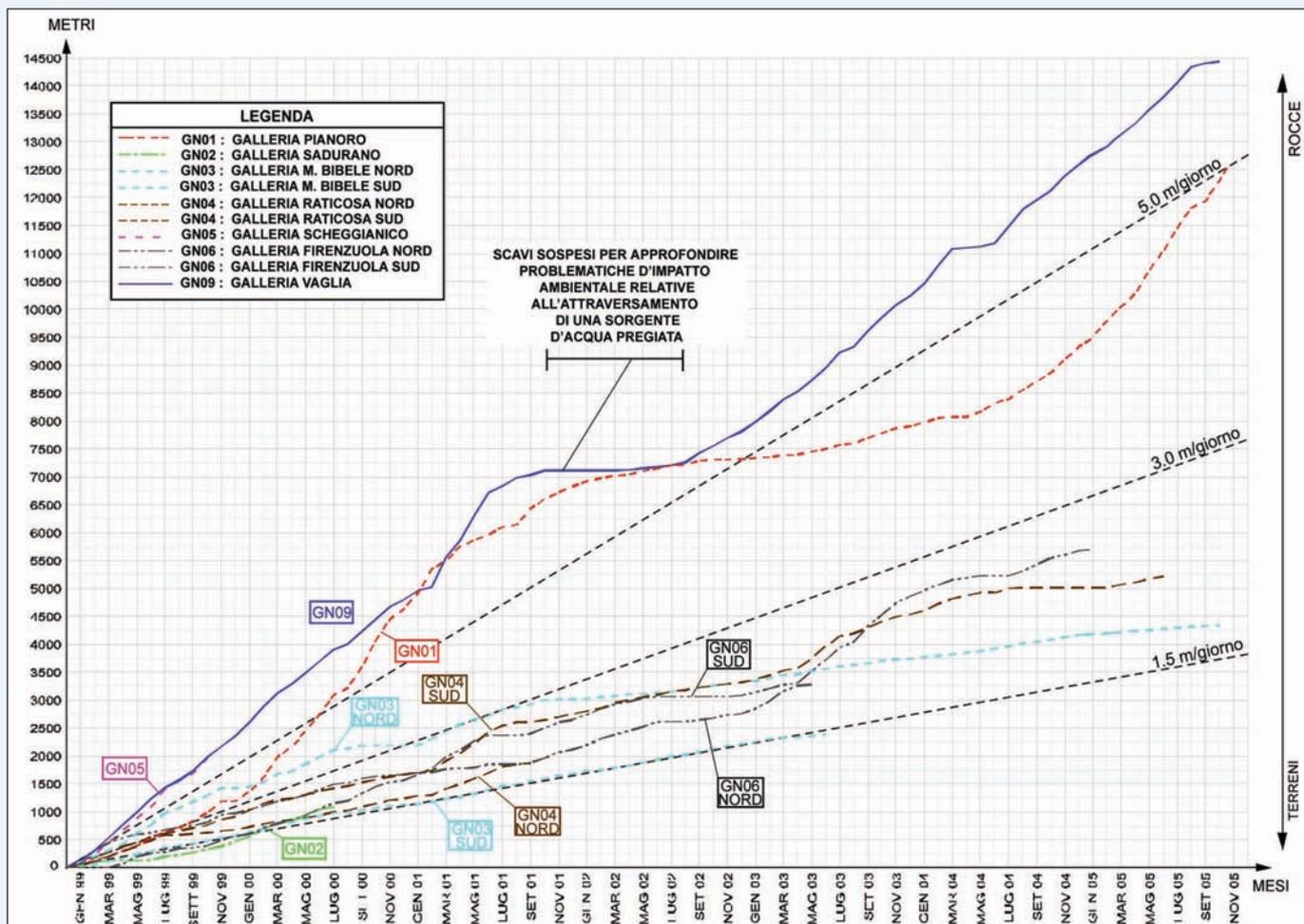


Figura 5 - Le produzioni ottenute nelle diverse condizioni tenso-deformative incontrate

acciaio in arco rovescio per ottenere un'efficace azione di contenimento dei fenomeni deformativi in tempi sensibilmente più brevi. La sezione tipo B2, così modificata, si è dimostrata assai versatile e adeguata anche per molte situazioni di nucleo-fronte instabile, permettendo di limitare l'utilizzazione delle più pesanti sezioni tipo C alle situazioni tenso-deformative più estreme;

- ◆ l'efficacia del consolidamento del nucleo-fronte mediante elementi strutturali di vetroresina è stata incrementata notevolmente introducendo, per la cementazione delle chiodature, l'impiego di miscele cementizie espansive;
- ◆ conseguentemente alla positiva esperienza maturata durante la costruzione di alcune gallerie della tratta Roma-Napoli della stessa linea ferroviaria [4], si è progettata la sezione tipo B2pr per lo scavo in naturale delle gallerie Sadurano, Borgo Rinzelli e Morticine, originariamente previsto in galleria artificiale;
- ◆ si è infine deciso di sostituire le sezioni B3 e C3, che prevedevano l'impiego del pretaglio meccanico, con la sezione C2 (consolidamento del nucleo-fronte e del suo contorno con elementi strutturali di vetroresina) più adatta ai terreni da affrontare.

Alla fine, la progettazione costruttiva ha portato a definire le seguenti percentuali di applicazione delle sezioni tipo: sezioni tipo A: 20,5%; sezioni tipo B: 57,5%; sezioni tipo C: 22,1%.

Sono stati realizzati, e per la quasi totalità rivestiti, circa 73 km di gallerie di linea, il 100% del totale. La produzione media mensile è stata dell'ordine di 1.000 m di galleria finita con una punta massima di 2.000 m raggiunta nel Mar-

zo 2001, lavorando su trenta fronti contemporaneamente. La Figura 5 riporta i grafici di produzione relativi alle gallerie realizzate, dai quali si evince che non solo sono state elevate in rapporto ai terreni attraversati, ma soprattutto molto regolari, segno dell'eccellente allineamento del progetto costruttivo con l'effettiva realtà riscontrata.

Anche per la galleria Raticosa, scavata in condizioni tenso-deformative assai difficili entro il Complesso Caotico costituito dalle assai temute argille scagliose, le produzioni non sono mai state mediamente inferiori a 1,5 m/giorno.

La Tabella 1 mette a confronto gli avanzamenti giornalieri stimati in sede di progettazione esecutiva per alcune sezioni tipo e i valori effettivamente realizzati.

A sua volta la Tabella 2 mette a confronto le differenze di distribuzione delle diverse sezioni tipo tra il progetto esecutivo e l'"as built".

Sezioni tipo	Avanzamenti previsti (m/giorno di galleria finita)	Avanzamenti realizzati (m/giorno di galleria finita)
A	5,40	5 - 6
B0	4,30	5 - 5,5
B2	2,25	2,10 - 2,2
C1	1,40	1,40
C2	1,25	0,85
C4V	1,25	1,63

Tabella 1



TRENO ALTA VELOCITA'/CAPACITA' -Linea Milano-Roma-Napoli - DISTRIBUZIONE DELLE SEZIONI TIPO																												
GALLERIA	PROGETTO ESECUTIVO														"AS BUILT" (al 21 Ottobre 2009)													
	Lunghezza [m]	DISTRIBUZIONE SEZIONI TIPO [m]													Lunghezza [m]	Lunghezza galleria scavata		DISTRIBUZIONE SEZIONI TIPO [m]										
		A	B0	BOV	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4	C4V	C5		[%]	[m]	A	B0	BOV	B2	B2pr	B2V	C1	C2	C4	C4V	C5
Pianoro	10293,4		951,8			3888,4	3036		82,0	948,8	1083	310		15,5	10710	100	10710			8167,0	682,5		63,0	3,5			1794,3	
Sadurno	3778,0	64,0	2580,8			875,0			68,0	190,3					3787,0	100	3787,0	2213,0	1408,0	55	53			8				
Monte Bibele	9118,5	978,2	1084,6		4529,1	1212,2			76,0	1112,8			115,6		9101,0	100	9101,0	2935,5	2015,7	3965,8		97,9	41	45				
Raticosa	10381,0		3043,0		972,2	758,4			40,0	786,7				315,67	10367,0	100	10367,0	3680,0	786,0	857		25	85		1468	673,4	2792,6	
Scheggiano	3530,6		2099,9		1404,7								35,0		3535,0	100	3535,0	3517,0	18,0									
Pianzuola	14311,5		3528,7		5950,4	716	412,2		227,5	911,9	2226,8	738,1			15211,0	100	15211,0	6633,1	3556,3	3081,8		263,5	577,1	8		125,83	43,46	
B. Rinzelli	455,0								160		295				455,0	100	455,0			303,5				225,1				
Moricone	273,7								80	193,7					565,5	100	565,5			537,0				38,5				
Vaglia	16757,0	2017,2	3104,3	1129,75	5629,0			1151,15	692	708,5				2325,15	16757,0	100	16757,0	5287,60	9299,50	96,60	1547,0		206,70	128,25	101,4			
LUNGHEZZA TOTALE [m]	68896,6	11721,0	7731,5	1129,8	18485,2	7447,9	3448,2	1151,2	1405,4	4488,6	3604,8	5629,8	2325,2	331,2	70542,3	100,0	70542,4	24466,2	25250,5	98,6	10219,1	893,5	746,1	834,8	417,0	1468,0	2593,5	2836,1
DISTRIBUZIONE SEZIONI TIPO [%]		A	B0	BOV	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4	C4V	C5				A	B0	BOV	B2	B2pr	B2V	C1	C2	C4	C4V	C5
		17,0	11,2	1,6	26,8	10,8	5,0	1,7	2,0	6,5	5,2	8,2	3,4	0,5				34,7	35,7	0,1	14,5	1,3	1,1	1,2	0,6	2,1	3,7	4,0

Tabella 2

Anche se si tiene conto dell'irrigidimento apportato alla sezione tipo B2, che ne ha permesso l'impiego in molte situazioni tipiche della categoria di comportamento C, si è comunque registrata una significativa riduzione di applicazione delle sezioni tipo più costose a favore di quelle più economiche. Questo risultato è in gran parte dovuto all'eccezionale efficacia dimostrata dagli interventi di precontenimento del cavo anche in condizioni di elevata copertura. E' stata questa la prima volta che essi si sono applicati con coperture superiori ai 500 m.

L'avanzamento previo irrigidimento del nucleo-fronte, da taluni ritenuto controproducente sotto le coperture più elevate, se correttamente operato, assicurando la continuità dell'azione da monte a valle del fronte di scavo con l'impiego del puntone di acciaio in arco rovescio, si è dimostrato invece assai efficace anche in tali situazioni, richiedendo di adottare le sezioni tipo più pesanti solo nelle condizioni più estreme.

Un'altra ragione che ha portato a un maggior utilizzo della sezione tipo A è che essa differisce dalle sezioni tipo B0 solo per alcuni aspetti minori, quali: lo spessore del rivestimento definitivo o la posizione di getto dell'arco rovescio più o meno distante dal fronte di scavo. Di conseguenza, la sezione tipo A si è adottata al posto delle sezioni tipo B0 o BOV ogni volta che le condizioni del terreno lo permettevano senza rischi (per esempio su importanti tratti della galleria Vaglia, dove la presenza della contigua galleria di servizio, già costruita, rendeva la situazione assai chiara).

Di conseguenza, le differenze rilevate tra il progetto esecutivo e quanto si è effettivamente costruito non hanno comportato clamorosi scostamenti né di costo globale dell'opera, che è risultato di poco inferiore (~ -5%) rispetto a quello previsto dal progetto esecutivo, né di tempi costruttivi. Mentre della riduzione del costo beneficerà il costruttore, che vedrà premiato il maggior rischio corso accettando di firmare un contratto rigorosamente forfetario, del rispetto dei tempi beneficeranno il Committente e i cittadini, che potranno disporre della nuova infrastruttura senza intollerabili ritardi.

La fase di verifica

Il monitoraggio in corso d'opera

La particolarità e l'importanza del progetto hanno imposto un accurato programma di monitoraggio sia in corso d'opera sia in fase di esercizio. In corso d'opera si sono monitorati:

- ◆ i fronti di scavo delle gallerie, attraverso sistematici rilievi geomeccanici degli ammassi presenti al fronte di scavo. I rilievi, condotti secondo gli standard dell'ISRM, sono utili per avere un primo riferimento sulle caratteristiche dell'ammasso da confrontare con quelle previste in sede di progetto;

- ◆ il comportamento deformativo del nucleo-fronte, attraverso misure di estrusione del nucleo-fronte stesso sia superficiali sia profonde, eseguite in funzione delle diverse categorie di comportamento. L'esecuzione sistematica di questo tipo di misure in condizioni tenso-deformative difficili è cruciale: infatti, tenere sotto controllo la sola convergenza, che è l'ultimo stadio del processo deformativo, in tali condizioni non evita le situazioni di collasso. L'estrusione, al contrario, essendo il primo stadio del processo deformativo, se tenuta opportunamente sotto controllo, dà il tempo necessario per intervenire efficacemente;
- ◆ il comportamento deformativo del cavo, attraverso misure sistematiche di convergenza;
- ◆ il comportamento tensionale dell'insieme ammasso-rivestimento, attraverso celle di pressione da collocare al contatto terreno-rivestimento e all'interno del rivestimento stesso, sia quello di prima fase sia quello definitivo.

In corso d'opera i risultati del monitoraggio hanno guidato progettista e Direzione Lavori sull'opportunità di proseguire con la sezione prevista o eventualmente modificarla, secondo i criteri preindicati nel progetto, adottando le variabilità già previste nello stesso. E' ovvio che, per far fronte a situazioni particolari non individuate in sede di indagine e di conseguenza non previste in fase di progettazione - comunque possibili - si può sempre progettare una nuova sezione tipo. Questa impostazione ha consentito di gestire con soddisfazione l'aleatorietà connessa alle opere in sotterraneo pur con un contratto come quello tra Cavet e TAV rigorosamente forfetario.



Galleria Vaglia: vista del fronte nella Formazione di Monte Morello (alternanze di calcari, marne e arenarie calcaree), copertura di 500 m



La maggior parte degli strumenti già utilizzati in corso d'opera, opportunamente collegati a sistemi di acquisizione automatica, continueranno ad essere impiegati nel monitoraggio in fase di esercizio. Ad ogni istante della vita dell'opera il sistema di acquisizione automatica potrà essere interrogato per raccogliere i dati di interesse e verificare il comportamento reale della stessa, confrontandolo con quello previsto in sede di progetto.

Conclusioni

Le nuove tecniche di precontenimento del cavo quali il jet-grouting in orizzontale, il pretaglio meccanico a piena sezione, il consolidamento del nucleo di avanzamento mediante tubi o elementi strutturali di vetroresina hanno certamente prodotto, nel campo del tunnelling, un salto tecnologico simile a quello che si verificò agli inizi del 1900 con l'introduzione delle tecniche di contenimento del cavo, quali lo spritz-beton, le centine e gli ancoraggi di acciaio, consentendo di affrontare con successo situazioni di scavo prima proibitive. Tuttavia, come già nel secolo scorso per cogliere appieno le potenzialità delle nuove tecnologie i Progettisti e i Costruttori dovettero sforzarsi per abbandonare le teorie e le pratiche tradizionali a favore di altre più efficienti e adeguate, di nuovo oggi è necessario che essi compiano sino in fondo lo stesso sforzo. L'esperienza maturata con la realizzazione - avvenuta nel sostanziale rispetto dei tempi e dei costi preventivati - di un'opera eccezionale per vastità, eterogeneità e difficoltà di situazioni affrontate qual è l'attraversamento appenninico della nuova linea ferroviaria ad Alta Velocità/Capacità tra Bologna e Firenze, dimostra che un impiego più consapevole e corretto delle nuove tecnologie può effettivamente aprire nuove eccezionali prospettive per il tunnelling, rendendone finalmente possibile l'industrializzazione, con la conseguente certezza dei tempi e dei costi di realizzazione che sino a ie-

ri è mancata. A patto che esse siano operate in maniera integrata, nel quadro di approcci progettuali e costruttivi come l'ADECO-RS, coerenti con i principi che le generarono. ■

* *Professore e Ingegnere*

** *Ingegnere*

*** *Ingegnere*

Ringraziamenti

Gli Autori ringraziano l'Ing. Silvano Morelli (Consorzio Cavet), l'Ing. Claudio De Giudici (Rocksoil SpA) e il Dott. Geol. Alvise Amadi (Rocksoil SpA) che hanno fornito i dati indispensabili alla redazione di questa memoria.

BIBLIOGRAFIA

- [1]. P. Lunardi, A. Focaracci - Analisi di rischio nella progettazione di una galleria, *Strade & Autostrade* n° 50/2005.
- [2]. P. Lunardi - The ADECO-RS approach in the design and construction of the underground works of Rome to Naples High Speed Railway Line: a comparison between final design specifications, construction design and "as built", *AITES-ITA World Tunnel Congress su "Progress in tunnelling after 2000"*, Milano, 10-13 Giugno 2001, Vol. 3, 329-340.
- [3]. Quality assurance in the design and construction of underground works. *Atti del Convegno internazionale su "Underground Construction in Modern Infrastructure"*, Stoccolma, 7-9 Giugno 1998.
- [4]. P. Lunardi, A. Focaracci, D. Ricci, A. Valente - Una soluzione innovativa per la realizzazione di gallerie naturali senza copertura, *Quarry and Construction*, Maggio 1997.
- [5]. P. Lunardi, R. Bindi, A. Focaracci - Technical and financial planning of underground works: the ADECO-RS method, *VI Forum Europeo di Ingegneria Economica*, Università Bocconi, Milano, 13-14 Maggio 1993.