

ATTENDIBILITÀ DELLA PROGETTAZIONE
 RISULTATO DELL'APPLICAZIONE DELL'APPROCCIO ADECO-RS PER IL
 PROGETTO E LA COSTRUZIONE DELLE OPERE IN SOTTERRANEO DELLA LINEA
 FERROVIARIA AD ALTA VELOCITÀ ROMA-NAPOLI: CONFRONTO TRA I
 PROGETTI ESECUTIVO, COSTRUTTIVO ED "AS BUILT"

Prof. Ing. Pietro Lunardi, Studio di progettazione Lunardi, Milano

SOMMARIO: 22 gallerie, per complessivi 21,8 Km di tracciato, della nuova linea ferroviaria ad alta velocità Roma-Napoli sono state progettate e costruite sulla base dell'approccio ADECO-RS, che distinguendo nettamente il momento della costruzione da quello della progettazione, consente di pianificare le opere in sotterraneo in termini di costi e tempi esecutivi. Nella memoria, dopo aver illustrato i criteri progettuali seguiti, si commentano, a consuntivo, i risultati ottenuti in termini di tempi e di costi, che sono stati in linea con le previsioni.

1 INQUADRAMENTO GENERALE DELL'OPERA

La nuova linea ferroviaria Roma-Napoli fa parte della direttrice italiana Milano-Napoli del Treno ad Alta Velocità e si inserisce, nell'ambito della rete europea, quale tratto terminale in direzione Sud.

La linea è divisa in lotti di pari valore economico, la cui costruzione è stata affidata alle cinque "Conferitarie" che compongono il consorzio IRICAV UNO (General Contractor della tratta): Pegaso, Icla, Italstrade, Vianini e Condotte.

La lunghezza complessiva della tratta, attualmente in via di ultimazione, è di 204 km di cui 28,3 km (pari al 13% circa della lunghezza totale) realizzata con gallerie a foro cieco.

Nel prosieguo della trattazione si illustreranno le problematiche progettuali e costruttive relative alle opere in sotterraneo di progettazione Rocksoil che hanno riguardato il 77% delle tratte in galleria naturale per complessivi 21,8 km suddivisi in 22 tunnel.

Nelle figure 1?4 sono assemblati i profili geologici longitudinali delle 22 gallerie: la galleria "Colli Albani" (lotto Pegaso, 6361 m) è la galleria più lunga dell'intera linea, mentre la galleria "Collatina" (lotto Italstrade, 53 m) risulta la più corta.

Il tracciato in sotterraneo si sviluppa entro terreni riconducibili, a grandi linee, a due genesi distinte:

?? terreni piroclastici e colate laviche, generati dagli eventi eruttivi dei complessi vulcanici, laziale, della valle del Sacco e campano;

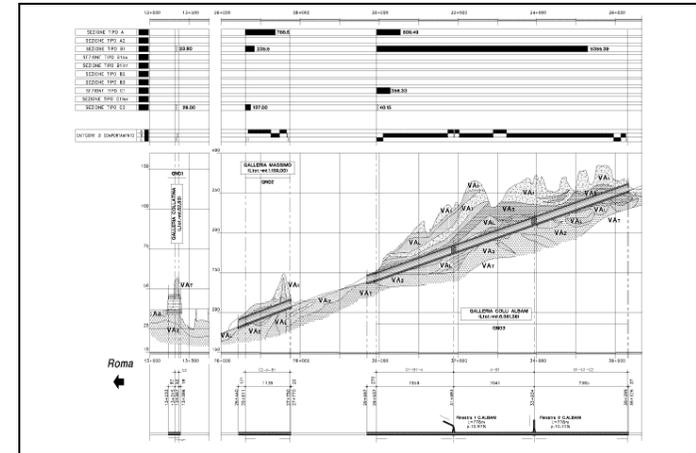


Figura 1. Profili longitudinali delle gallerie: Collatina, Massimo, Colli Albani.

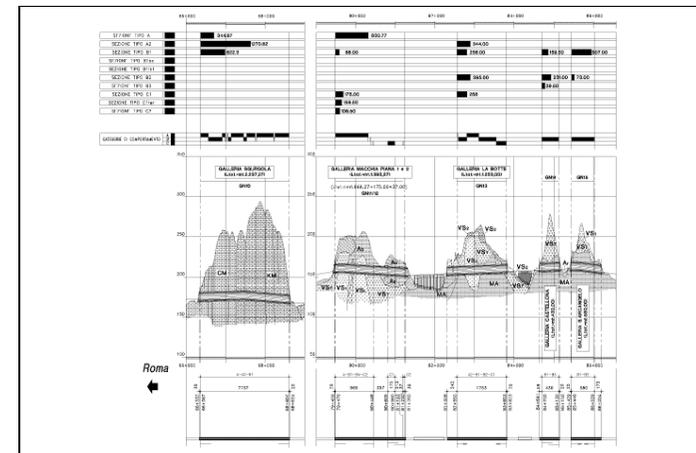


Figura 2. Profili longitudinali delle gallerie: Sgurcola, Macchia Piana 1 e 2, La Botte, Castellana, S. Arcangelo.

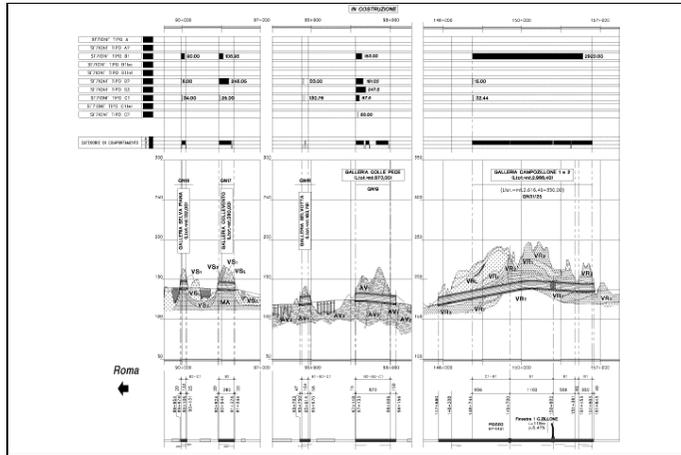


Figura 3. Profili longitudinali delle gallerie: Selva Piana, Collevento, Selvotta, Colle Pece, Campo Zillone 1 e 2.

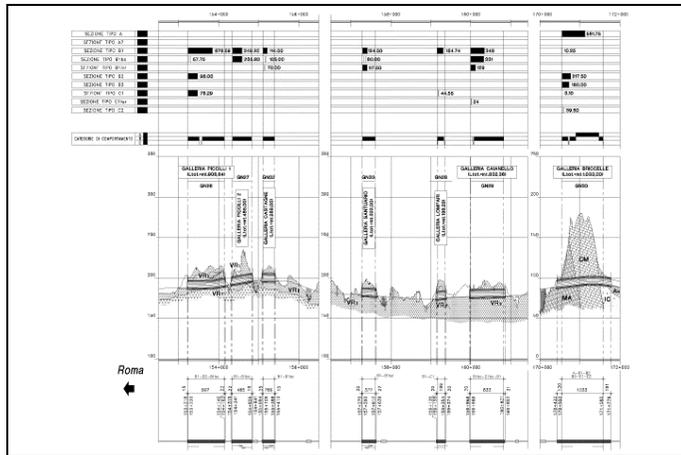


Figura 4. Profili longitudinali delle gallerie: Picilli 1 e 2, Castagne, Santuario, Lompari, Caianello, Briccelle.

?? rocce sedimentarie, di tipo flyschoid e carbonatiche (argilliti-marmose e calcari), appartenenti al sistema appenninico.

Le coperture, assai variabili, non superano mai i 110 m, mentre in corrispondenza degli imbocchi sono spesso estremamente ridotte.

La progettazione esecutiva e costruttiva delle gallerie è avvenuta sulla base del metodo dell'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli (ADECO-RS), valido in qualsiasi tipo di terreni e di situazioni tenso-deformative [Lunardi 2000 e 2001].

Esso prevede che il progetto e la costruzione di un'opera in sotterraneo si sviluppino attraverso le seguenti fasi:

?? 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.

2 INQUADRAMENTO GEOLOGICO-GEOTECNICO (FASE CONOSCITIVA)

Come sopra accennato, una parte importante delle gallerie si sviluppa in terreni di origine vulcanica. L'attività degli apparati vulcanici interessati, iniziata nel Pliocene, si è sviluppata prevalentemente nel Pleistocene, dall'alto Lazio fino alla regione vesuviana, estinguendosi all'incirca 100.000 anni fa. L'evoluzione vulcanologica dei centri eruttivi si è svolta attraverso tre differenti fasi, che si sono succedute quasi nello stesso ordine in tutti i centri stessi: fase di strato-vulcano, fase dei grandi espandimenti ignimbritici, fase della costruzione di cono di cenere e lava.

Lungo la linea sono riconoscibili due importanti centri eruttivi localizzati l'uno (Colli Albani) nella zona laziale e l'altro (Roccamonfina) nella zona campana in corrispondenza della parte terminale del tracciato. Un apparato vulcanico minore si trova anche nei pressi del Fiume Sacco (Valle del Sacco). Interposti ai due "domini" vulcanici maggiori, in corrispondenza della parte centrale del tracciato, spesso interdigitandosi con i prodotti vulcanici dell'apparato della Valle del Sacco, affiorano i terreni sedimentari della dorsale appenninica, di età cretacea e miocenica, in facies carbonatica, flyschoid e argillo-marmosa.

Dal punto di vista idrogeologico, il tracciato si mantiene sempre al di sopra della falda regionale, per cui le gallerie non sono generalmente soggette a importanti battenti idrici; fanno eccezione alcune situazioni locali quali, ad esempio, quelle delle gallerie "La Botte", lotto Italstrade, e "Castellona", lotto Vianini, dove il complesso marnoso-arenaceo fa da letto impermeabile alle soprastanti piroclastiti, favorendo il formarsi di falde sospese peraltro a modesto battente, o quella che si presenta all'imbocco nord della galleria "Colli Albani", dove viene intersecata la falda di approvvigionamento di una fontana in località Vetrice.

Dal punto di vista geotecnico, dai complessi evidenziati si distinguono i litotipi sotto riportati, che sono stati parametrizzati con le variabilità di caratteristiche geotecniche riportate nella tabella in tabella I.

3 PREVISIONI DI COMPORTAMENTO TENSO-DEFORMATIVO (FASE DI DIAGNOSI)

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

Il tracciato in sotterraneo è stato quindi suddiviso, sulla base delle conoscenze geologiche, geotecniche, geomeccaniche e idrogeologiche raccolte e dei risultati dei calcoli di stabilità

	COMPLESSI VULCANICI (Vulcaniti dei Colli Albani, Vulcaniti della Valle del Sacco, Vulcaniti di Rocca Monfina)			COMPLESSO CARBONATICO (Calcari dei Monti Lepini)	COMPLESSO DEL FLYSCH (Argille Varicolori, Complesso Mamoso-Arenaceo)	
	Piroclastiti	Tufi	Lave	Calcari stratificati	Argille scagliose	Marne argillose con livelli arenacei
γ [t/m ³]	1,4 ÷ 1,6	1,6 ÷ 2	2,6 ÷ 2,7	2,5 ÷ 2,7	2,0 ÷ 2,1	2,2 ÷ 2,4
C [Mpa]	0 ÷ 0,1	0,1 ÷ 0,5	0,5 ÷ 5	0,5 ÷ 1	0,01 ÷ 0,05	0,2 ÷ 0,4
α [°]	25 ÷ 35	20 ÷ 25	30 ÷ 35	35 ÷ 40	18 ÷ 23	28 ÷ 33
γ_{sd} [Mpa]	1 ÷ 5	/	/	1 ÷ 4	/	/
E [Mpa]	50 ÷ 100	300 ÷ 600	2.000 ÷ 5.000	10.000 ÷ 12.000	50 ÷ 100	200 ÷ 400
μ	0,35	0,3	0,25	0,25 ÷ 0,3	0,35	0,3

Tabella I. Sintesi delle caratteristiche dei terreni.

eseguiti con metodi analitici e/o numerici, in tratte a comportamento tenso-deformativo omogeneo, in funzione delle condizioni di stabilità previste in corrispondenza del fronte di scavo in assenza di interventi di stabilizzazione:

- fronte stabile (categoria di comportamento A);
- fronte stabile a breve termine (categoria di comportamento B);
- fronte instabile (categoria di comportamento C).

In particolare, nella categoria A si sono inquadrate tutte quelle tratte in galleria in cui il calcolo faceva prevedere che:

- ?? lo stato di coazione del terreno al fronte e al contorno del cavo non avrebbe superato le caratteristiche naturali di resistenza del mezzo;
- ?? l'"effetto arco" si sarebbe formato vicino al profilo di scavo;
- ?? i fenomeni deformativi si sarebbero evoluti in campo elastico, con effetto immediato e ordine millimetrico;
- ?? di conseguenza, il fronte di scavo si sarebbe mantenuto globalmente stabile.

È il caso delle tratte in lava, tufo litoide e calcare poco fratturato, materiali che generalmente presentano buone caratteristiche di resistenza in rapporto alle tensioni mobilitate dallo scavo sotto le coperture di progetto.

Nella categoria B, invece, si sono inquadrate tutte quelle tratte in galleria dove il calcolo faceva prevedere che:

- ?? lo stato di coazione del terreno al fronte e al contorno del cavo durante l'avanzamento avrebbe superato le caratteristiche naturali di resistenza, in campo elastico, del mezzo;
- ?? l'"effetto arco" non si sarebbe formato vicino al profilo di scavo, bensì ad una distanza pari alla potenza della fascia di plasticizzazione del terreno al contorno del cavo;
- ?? i fenomeni deformativi si sarebbero evoluti in campo elastoplastico, con effetto differito e ordine centimetrico;
- ?? di conseguenza, il fronte di scavo, alle normali cadenze di avanzamento, sarebbe risultato stabile a breve termine, facendo registrare contenuti movimenti di estrusione del nucleo,

tali comunque da non condizionare la stabilità a breve termine della galleria, essendo il terreno ancora in grado di mobilitare una sufficiente resistenza residua.

È il caso delle tratte in scavo entro i complessi flyschoidi (Argille Varicolori o Mamoso-Arenaceo) o nelle piroclastiti stratificate, fintantoché le coperture sono tali da rendere possibile la formazione per via naturale dell'effetto arco.

Nella categoria C, infine, si sono inquadrate tutte quelle tratte in galleria dove il calcolo faceva prevedere che:

- ?? lo stato di coazione del terreno avrebbe superato sensibilmente la capacità di resistenza del materiale anche nella zona del fronte di scavo;
- ?? l'"effetto arco" non si sarebbe formato, per via naturale, né al fronte né al contorno del cavo, non possedendo il terreno una sufficiente resistenza residua;
- ?? i fenomeni deformativi si sarebbero evoluti in campo di rottura, con effetto differito e ordine decimetrico dando luogo a gravi manifestazioni d'instabilità, quali il crollo del fronte e il collasso della cavità.
- ?? di conseguenza, il fronte di scavo, in assenza di adeguati interventi di precontenimento, sarebbe risultato assolutamente instabile.

È il caso che si è presentato più frequentemente in corrispondenza degli imbocchi ed in generale nelle tratte con ridotta copertura, oltre che in alcune tratte in corrispondenza dei termini argillosi a struttura scagliosa appartenenti al flysch delle Argille Varicolori con caratteristiche geotecniche prossime ai limiti inferiori dei range individuati (valori residui). L'effetto arco non ha in questo caso alcuna possibilità di formarsi se non per via artificiale.

4 METODOLOGIA COSTRUTTIVA (FASE DI TERAPIA)

Dopo aver formulato previsioni attendibili riguardo al comportamento tenso-deformativo dell'ammasso in seguito allo scavo, si sono scelti, per ogni tratta di galleria a comportamento tenso-deformativo omogeneo, gli interventi di stabilizzazione più idonei a controllare, contenere o addirittura anticipare ed annullare le deformazioni.

I principi informativi sui quali si è basata la progettazione delle sezioni tipo sono stati essenzialmente i seguenti:

1. avanzamento sempre a piena sezione, soprattutto in condizioni tenso-deformative difficili;
2. contenimento dell'alterazione e della decompressione del terreno al contorno dello 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 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 crollare, ovvero anticipare ed annullare l'insorgere di qualsiasi movimento nel terreno;
3. realizzazione di un rivestimento definitivo di calcestruzzo, eventualmente armato, completo di arco rovescio gettato, quando necessario per bloccare i fenomeni deformativi, a ridosso del fronte per campioni di lunghezza ridotta.

In definitiva, si sono progettate le seguenti sezioni tipo (fig. 5):

- ?? **per le tratte di galleria inquadrate nella categoria di comportamento A (fronte stabile)**, si è progettata la sezione tipo A, composta da un semplice rivestimento di 1^a fase di calcestruzzo proiettato armato con cinte semplici d'acciaio + un rivestimento definitivo di calcestruzzo di 60 cm di spessore, chiuso da un arco rovescio anch'esso di 60 cm;

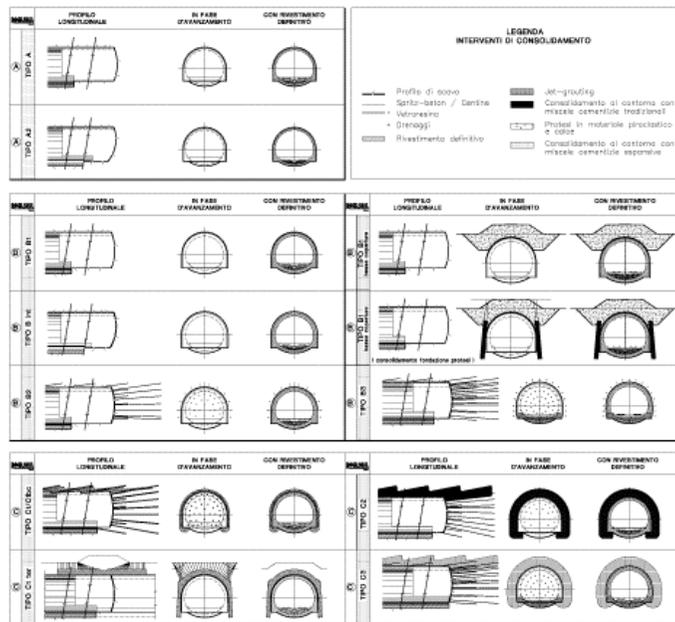


Figura 5. Sezioni tipo.

?? per le tratte di galleria inquadrata nella categoria di comportamento B (*fronte stabile a breve termine*), si sono progettate tre sezioni tipo principali:

- la sezione tipo B1, costituita da un rivestimento di 1^a fase di calcestruzzo proiettato armato con centine doppie d'acciaio + un rivestimento definitivo di calcestruzzo di 80 cm di spessore, chiuso da un arco rovescio di 90 cm di spessore gettato entro 3 \varnothing dal fronte;
- la sezione tipo B2, che prevede il consolidamento del nucleo d'avanzamento, da realizzare mediante elementi strutturali in vetroresina + un rivestimento di 1^a fase di calcestruzzo proiettato armato con centine doppie d'acciaio + un rivestimento definitivo di calcestruzzo di 90 cm di spessore, chiuso da un arco rovescio di 100 cm gettato entro 1,5 \varnothing dal fronte;
- la sezione tipo B3, che prevede una geometria di scavo a piedritto curvo per contrastare più efficacemente le spinte orizzontali, il consolidamento del nucleo d'avanzamento (più intenso che nella B2, con una maggiore incidenza ed una maggiore lunghezza di sovrapposizione), da realizzare sempre mediante elementi

strutturali in vetroresina, + un rivestimento di 1^a fase di calcestruzzo proiettato armato con centine doppie d'acciaio + un rivestimento definitivo di calcestruzzo di 90 cm di spessore, chiuso da un arco rovescio di 100 cm gettato in unica soluzione con murette e solettone di regolamento per campioni di 4 \div 6 m a ridosso del fronte;

?? per le tratte di galleria inquadrata nella categoria di comportamento C (*fronte instabile*), si sono progettate due sezioni tipo principali:

- la sezione tipo C1, costituita da un preconsolidamento del terreno al contorno del futuro cavo eseguito con la tecnica jet grouting sub-orizzontale + microcolonne di terreno consolidato ottenute con la stessa tecnologia nel nucleo d'avanzamento e armate con elementi strutturali in vetroresina (lunghezza 15,5 m, sovrapposizione 3 m) + un rivestimento di 1^a fase di calcestruzzo proiettato armato con centine doppie d'acciaio + un rivestimento definitivo di calcestruzzo di spessore variabile in calotta da 40 a 130 cm, chiuso da un arco rovescio di 100 cm gettato per campioni di lunghezza 6 \div 12,5 m entro 1+1,5 \varnothing dal fronte;
- la sezione tipo C2, costituita da un preconsolidamento del terreno al contorno del futuro cavo ottenuto mediante iniezioni ad alta pressione operate in avanzamento attraverso tubi di vetroresina valvolati + consolidamento del nucleo con elementi strutturali in vetroresina cementati (lunghezza 15 m, sovrapposizione 5 m) + un rivestimento di 1^a fase di calcestruzzo proiettato armato con centine doppie d'acciaio + un rivestimento definitivo di calcestruzzo di 90 cm di spessore, chiuso da un arco rovescio di 100 cm gettato per campioni di lunghezza 6 \div 12,5 m entro 1+1,5 \varnothing dal fronte.

In definitiva, in sede di progettazione esecutiva si è prevista l'esecuzione delle sezioni tipo su descritte secondo le seguenti percentuali di applicazione rispetto alla lunghezza complessiva del tracciato in galleria:

- ?? sezioni tipo A: 28,9 %;
- ?? sezioni tipo B: 60 %;
- ?? sezioni tipo C: 11,1 %.

Oltre alle gallerie di linea, la progettazione esecutiva ha riguardato anche alcune indispensabili opere accessorie. Tra queste, vale la pena rammentare:

- ?? tre finestre carrabili d'accesso, che sono state previste per accelerare, operando contemporaneamente su più fronti, i lavori d'avanzamento delle gallerie più lunghe: due finestre d'accesso alla galleria "Colli Albani" (oltre 6 Km di lunghezza), una terza finestra d'accesso alla galleria "Campo Zillone" (circa 3 Km di lunghezza);
- ?? le opere d'imbocco, che, in funzione della morfologia e della natura dei terreni in gioco, sono state progettate utilizzando le tecnologie più appropriate (gusci di terreno consolidato con il sistema jet-grouting, paratie tipo "berlinese", ecc.).

4.1 Calcoli statici

Il comportamento statico e deformativo delle gallerie, sia per quanto concerne le diverse fasi costruttive, sia per la fase finale di esercizio, è stato analizzato e verificato mediante una serie di calcoli su modelli agli elementi finiti tridimensionali e piani in campo elastoplastico.

I modelli sono stati messi a punto in modo da simulare nel modo il più possibile realistico il comportamento del sistema terreno-galleria nelle diverse fasi esecutive, con particolare riguardo all'effetto dei trattamenti di precontenimento del cavo e consolidamento del nucleo d'avanzamento progettati, ai valori delle deformazioni che ci si sarebbero dovute aspettare in fase di scavo, alle sollecitazioni nelle strutture di rivestimento di 1^a fase e definitive. Le

elaborazioni sono state condotte mediante elaboratore, utilizzando il codice di calcolo ADINA ver. 6.0.

5 CARATTERISTICHE DELL'APPALTO

Sulla base del progetto esecutivo così redatto, tutte le gallerie, al pari delle altre opere in superficie previste per realizzare l'intera linea, sono state appaltate con un contratto a *forfait* (importo 2.844.644.600 euro, di cui 324.231.600 per le sole gallerie) nel quale il General Contractor IRICAV UNO ha accettato di farsi carico di qualsiasi imprevisto, compreso quello geologico.

6 FASE OPERATIVA

Subito dopo l'aggiudicazione dell'appalto, contemporaneamente ai lavori di scavo (maggio 1995, galleria *Colli Albani*) 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 stata sostanzialmente confermata in fase operativa e in sede di progettazione costruttiva sono stati operati solo affinamenti minori:

?? per affrontare specificatamente le argille scagliose caratteristiche della galleria Colle Pece è stata introdotta la sezione tipo C3, che si differenzia dalla C2 soprattutto per l'utilizzazione di miscele cementizie espansive per la cementazione degli elementi strutturali di vetroresina;

?? per superare alcune tratte con particolari progettualità, di cui sarà riferito in seguito, si sono progettate le sezioni tipo "B1_{bc}" per basse coperture e "C1_{ter}";

?? per ottimizzare le lavorazioni in alcune particolari circostanze, si sono messe a punto le sezioni tipo A2 e "B1_{intermedia}", molto simili a quelle sopra descritte A1 e B1;

?? per ogni sezione tipo si sono previste le variabilità ammesse (es.: intensità dei consolidamenti) in funzione dei fenomeni tenso-deformativi misurati in corso d'opera in raffronto a quelli previsti dal calcolo. Questo ai fini dell'applicazione delle norme di assicurazione qualità.

In definitiva, la progettazione costruttiva ha portato alla definizione delle seguenti percentuali di applicazione delle sezioni tipo:

?? sezione tipo A: 22,5 %;

?? sezioni tipo B: 69,4 %;

?? sezioni tipo C: 8,2 %.

A fine dicembre 1999, dopo 1.100 giorni lavorativi (1.700 consecutivi) risultavano completati, e per la quasi totalità rivestiti, circa 21,6 km di galleria, pari al 99 % delle tratte in sotterraneo.

La produzione media era stata pari a circa 20 m/giorno, senza contare gli scavi eseguiti per l'apertura di finestre, pozzi ed altre opere accessorie.

In fig. 6 sono riportati i grafici di produzione relativi alle gallerie Colli Albani e Sgurgola, dai quali si evince che le produzioni non solo sono state elevate (circa 100 m/mese per fronte), ma soprattutto molto regolari, segno dell'eccellente allineamento del progetto costruttivo con l'effettiva realtà riscontrata.

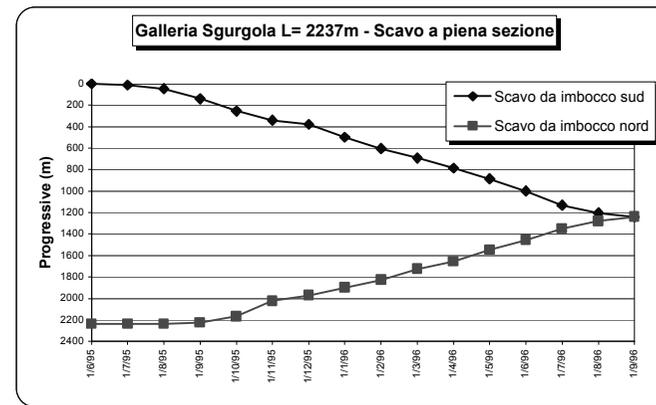
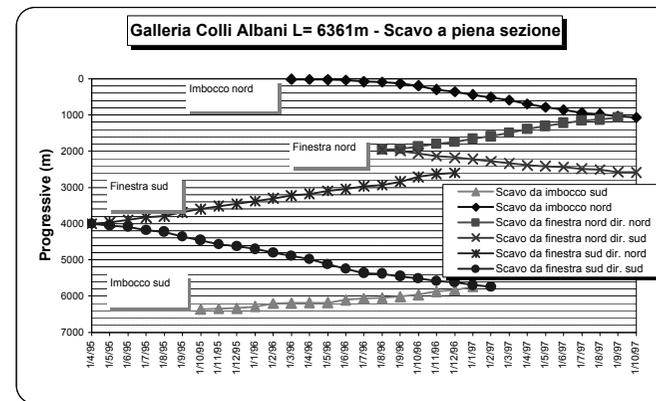


Figura 6. La marcata linearità dei grafici di produzione testimonia l'elevato grado d'industrializzazione raggiunto.

Tutte le opere civili in galleria sono state completate nel giugno 2001. La tabella II permette di confrontare agevolmente le differenze di distribuzione delle sezioni tipo tra i progetti esecutivo, costruttivo ed "as built". Tali differenze non hanno comportato significativi scostamenti di costo globale dell'opera, dato che la maggiore percentuale di applicazione

ALTA VELOCITA' Linea Milano-Napoli Tratta Roma-Napoli QUADRO DI CONFRONTO DISTRIBUZIONE SEZIONI TIPO																										
WBS	DENOMINAZIONE	LUNGI PALLONE	PROGETTO ESECUTIVO								PROGETTO COSTRUTTIVO								Tratta esecutiva	ESEGUITO a Marzo 2001						
			SEZIONI TIPO (lunghezza in mt)								SEZIONI TIPO (lunghezza in mt)									SEZIONI TIPO (lunghezza in mt)						
			A	B1	B1 bc	B2	B3	C1	C2	AA2	B1	B1 bc	B2	B3	C1	C2	AA2	B1	B1 bc	B2	B3	C1	C2	C2C3		
GNP1	COLATINA	25								55	53	24					25	100,0	53					29		
GNP2	MARSANO	1145	1192							47	1139	254	395				120	100,0	1139	795	316			137		
GNP3	COLLI ALBANI	6397	1492	3115						1780	6361	541	5425				355	46	100,0	6361	610	6305			356	
GNP4	SIURGOLA	2240	980	1690						2237	1697	250					12	100,0	2237	1610	622					
GNP5	MACCHIAPIANA 1	1120	920	200						990	924	43					72	100,0	990	831	66					
GNP6	MACCHIAPIANA 2	540	540							212							191	21	100,0	212						
GNP7	LA BOTTE	1130	687							119	1203	320	348	242	263		100,0	1203	344	236	369			238		
GNP8	CASTELLON	420	258	221						230	420	178	222	79			100,0	420	180	180						
GNP9	SARSANGIULO	590								118	496	58	590				100,0	590	507	200						
GNP10	SELVAPIANA	170	119	41						132	49	49	34	34			100,0	132	36	8	8			34		
GNP11	COLLEVERDE	365								365	365	365	365	365			100,0	365	365	365						
GNP12	SESCUOTA	113								113							100,0	113	113	113						
GNP13	COLLE PESE	873								611	133	87	873	253	389	145	42	40	100,0	838	153	163	254	62	200	
GNP14	CAMPO ZILIONE 1	303								1740							2617	1060	301	291						
GNP15	CAMPO ZILIONE 2	360								360							334	334	16							
GNP16	PICCOLLI	845	127	591						127	907	553	58	256			100,0	907	677	58	98				74	
GNP17	PICCOLLI 2	270								24	496	266	210				100,0	496	250	236						
GNP18	VOMPANI	230								47	179	155					44	100,0	155	135						
GNP19	CAMANELLO	210								21	21						832	474	333	24						
GNP20	BRICCELLE	1093	241	659						1033	351	15	218	180	4	45	100,0	1033	692	10	218	180	4	39		
GNP21	CASCIONE	400								399	199	150					100,0	399	196	150						
GNP22	SANLUIGIO	4								392	242	86					100,0	392	242	86						
LUNGHEZZE TOTALI (m)			21306	8130	8472					31112	6592	149	21817	2997	11213	791	2229	406	1499	302	1198	0	0	0	0	
% APPLICAZIONE SEZ. TIPO			A	B1	B1 bc	B2	B3	C1	C2	AA2	B1	B1 bc	B2	B3	C1	C2	AA2	B1	B1 bc	B2	B3	C1	C2	C2C3		
			38,9	28,6	6,9	17,4	3,6	9,2	1,9	22,1	15,4	3,5	12,4	1,9	6,5	1,2	21,8	17,3	3,7	6,8	2,2	3,4	3,5			
TOTALE TRATTA DI SCARICO (%/m)																							0,6	0		

Tabella II. Percentuali di applicazione delle sezioni tipo: confronto tra i progetti esecutivo, costruttivo ed "as built".

delle sezioni tipo B è ben compensata dalla diminuzione di sezioni tipo A e, soprattutto, tipo C (di gran lunga le più costose).

7 FASE DI VERIFICA

7.1 Monitoraggio in corso d'opera

La rispondenza alle ipotesi progettuali è stata verificata attraverso il rilievo geostrutturale dei fronti di scavo ed il controllo del comportamento tenso-deformativo del fronte e del cavo, riscontrati in corso d'opera in rapporto alle lavorazioni condotte conformemente alle fasi e alle cadenze prestabilite dal progetto.

A tale scopo è stato studiato un completo sistema di monitoraggio, comprendente:

1. rilievi geologico - strutturali del fronte di scavo;
2. misure di convergenza;
3. misure di estrusione del fronte;
4. misure estensimetriche dall'alto;
5. livellazioni superficiali (in corrispondenza delle tratte a bassa copertura);
6. misure inclinometriche (in corrispondenza degli imbocchi);
7. prove di laboratorio su campioni prelevati al fronte.

7.2 Monitoraggio definitivo

Lungo le gallerie di linea sono state ubicate 22 stazioni di monitoraggio definitivo dell'opera, completamente automatizzate per la registrazione digitale dei dati.

Questo allo scopo di:

1. verificare le ipotesi di progetto;
2. tenere sotto controllo il comportamento dell'opera nel tempo;

3. fornire informazioni utili per le attività di manutenzione.

In particolare, nell'ambito del progetto di monitoraggio sono in corso di esecuzione:

1. misure di convergenza, per determinare le deformazioni del cavo in senso radiale;
2. misure estensimetriche, per valutare l'evoluzione delle deformazioni entro l'ammasso roccioso;
3. misure di pressione totale dell'ammasso sul rivestimento;
4. misure di pressione interstiziale entro l'ammasso;
5. misure di sollecitazione negli elementi strutturali;
6. misure di temperatura nel calcestruzzo del rivestimento definitivo;
7. misura delle vibrazioni indotte nella struttura dal passaggio dei treni.

8 CONCLUSIONI

Nella realizzazione di opere in sotterraneo, la difficoltà di prevedere in maniera attendibile le caratteristiche geologiche e geomeccaniche dei terreni ad attraversare e la mancanza di strumenti e tecniche di attacco validi per affrontare ogni tipo di terreno ha da sempre rappresentato un vero e proprio punto di debolezza ai fini di una pianificazione delle opere stesse, sia in termini di tempi sia in termini di costo.

Per le gallerie della linea A.V. Roma-Napoli, a consuntivo si può affermare che le previsioni progettuali conseguenti all'applicazione dell'approccio ADECO-RS, nonostante la difficoltà geologica dei siti attraversati, sono risultate molto vicine alla realtà.

L'elevata produzione media raggiunta, tenuto conto dei terreni in gioco e di alcune situazioni obiettivamente difficili che si sono dovute superare, è indice, da un lato della buona qualità del progetto e, dall'altro lato, dell'alta industrializzazione delle operazioni di scavo raggiunta dai cantieri.

I lavori per le opere civili dovrebbero concludersi, come previsto, entro i primi mesi del 2001. Anche per quanto riguarda i costi di costruzione, questi si scostano di pochi punti percentuali dai valori di previsione e non si sono mai verificati contenziosi seri tra Imprese e Committenza.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI:

- Lunardi P., Bindi R., Focaracci A., 1993. Technical and financial planning of underground works: the ADECO-RS method, VI Forum Europeo di Ingegneria Economica - Università Bocconi - Milano, 13-14 Maggio 1993
- Lunardi P., 1994-1996. Progetto e costruzione di gallerie secondo l'approccio basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli, (Italiano e Francese), Quarry and Construction, Marzo 1994, Marzo 1995, Aprile 1996
- Lunardi P., 1997-1999. Conception et execution des tunnels d'après l'analyse des déformations contrôlées dans les roches et dans les sols, Revue Française de Géotechnique, n. 80, 84, 86
- Lunardi P., 2000. Design & constructing tunnels - ADECO-RS approach, T&T International special supplement, Maggio 2000
- Lunardi P., 2000. Progetto e costruzione di gallerie - Approccio ADECO-RS, Supplemento a Quarry and Construction, Maggio 2001

Lavoro:	TRENO ALTA VELOCITA' Linea Milano - Napoli Tratta Roma - Napoli Gallerie naturali
Concedente:	FERROVIE DELLO STATO S.p.A.
Concessionaria:	T.A.V. S.p.A.
Alta sorveglianza:	ITALFERR-SIS.T.A.V. S.p.A.
General Contractor:	IRICAV UNO S.p.A.
Progettista:	ROCKSOIL S.p.A. (Prof. Ing. Pietro Lunardi)