

Aspetti progettuali ed esecutivi della realizzazione della galleria Avise

Il primo tronco funzionale del Raccordo Autostradale Aosta-Monte Bianco, entrato in esercizio da circa un anno e mezzo, si snoda da Sarre (AO) a Morgex attraverso una serie di sette lunghe gallerie a doppio fornice, brevi viadotti e rilevati, per uno sviluppo globale di circa 20 km di cui 16,5 in sotterraneo, con una pendenza longitudinale massima di circa il 3,2 %.

La soluzione progettuale adottata, con più dell'80% del tracciato nascosto dentro le montagne, testimonia l'impegno per il rispetto e la salvaguardia dell'ambiente che hanno costituito, sin dall'inizio, la prima preoccupazione dei progettisti e che hanno caratterizzato, nel suo sviluppo, tutto il progetto. Tale soluzione consentirà, tra l'altro, di ridurre i problemi di manutenzione particolarmente gravosi nella regione durante i periodi invernali, a causa delle rigide temperature e delle abbondanti precipitazioni nevose.

La galleria Avise, oggetto del presente

articolo, è una delle sette gallerie che compongono il primo tronco. I suoi due fornicati contigui, ciascuno di circa 100 m² di sezione trasversale, si sviluppano in sponda sinistra del fiume Dora Baltea per una lunghezza di oltre 3.000 m, dei quali circa 310 m in terreno sciolto (230 m in corrispondenza dell'imbocco lato M. Bianco e 80 m in corrispondenza dell'opposto imbocco lato Aosta) e i rimanenti 2.700 m circa in materiale lapideo sotto coperture comprese tra 180 e 350 m.

La morfologia particolarmente inaccessibile della copertura non ha consentito, prima di iniziare i lavori di scavo, l'esecuzione delle indagini geognostiche indispensabili per caratterizzare l'ammasso roccioso alla profondità della galleria, imponendo il ricorso a un cunicolo esplorativo (foro pilota) da realizzarsi in entrambe le canne mediante fresa ad attacco integrale di 4,50 m di diametro.

Il progetto, una volta superate le tratte

d'imbocco in detrito, prevedeva quindi di articolare i lavori di scavo della galleria in due fasi, la prima delle quali costituita dall'esecuzione dei fori pilota in asse alle due canne, la seconda costituita dall'allargamento con fresa alesatrice di 11,40 m di diametro.

Nel corso delle lavorazioni si è dovuto tra l'altro superare un rilevante accidente tettonico (faglia del Vertosan) durante l'avanzamento del foro pilota nella canna di monte (canna sx), evento che ha determinato il completo arresto del fronte della stessa canna per oltre un anno e la revisione del progetto per quanto riguarda le tecniche d'avanzamento da impiegare per il suo completamento.

Nel presente articolo, dopo un breve inquadramento geostrutturale e idrogeologico dell'ammasso roccioso interessato dal tracciato della galleria, si illustreranno le problematiche progettuali ed esecutive che si sono dovute affrontare e risolvere per la realizzazione della galleria.

Fig. 1 - Profilo geologico della galleria Avise.

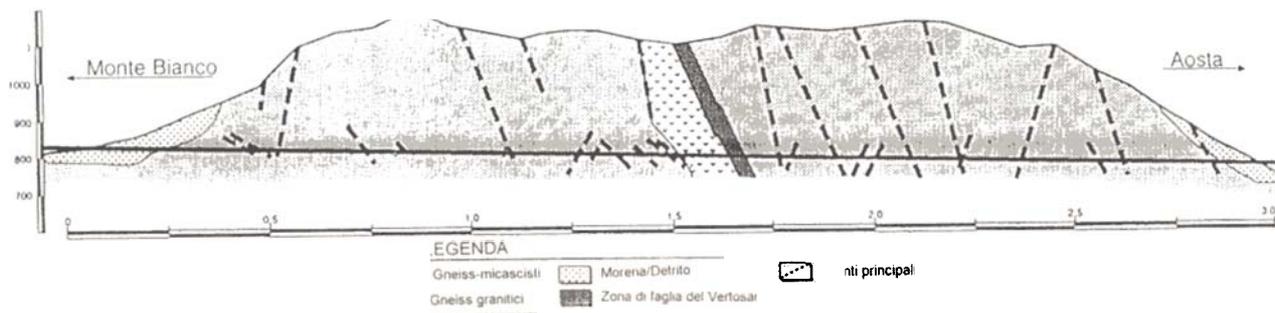




Foto 1 - Foro pilota.

1. CARATTERISTICHE GEOSTRUTTURALI DELL'AMMASSO ROCCIOSO

1.1 Inquadramento geologico, geostrutturale e idrologico

La galleria Avise (vedi profilo geologico in Fig. 1) attraversa un rilievo montuoso, la cui vetta principale è costituita dal M. Auletta, appartenente alla zona del S. Bernardo. Le formazioni rocciose, di origine metamorfica, sono formate prevalentemente da gneiss e micascisti, a luoghi cloritici, con intercalazioni di calcescisti e filladi.

La foliazione è spesso caratterizzata da deformazioni in grande e piccola scala, ondulazioni e pieghettature, che testimoniano le intense sollecitazioni subite dalla massa rocciosa. Quest'ultima è attraversata anche da numerose fratture e faglie, spesso mascherate dalla copertura, che si concentrano e intersecano creando una morfologia a gradoni.

A entrambi gli imbocchi, la galleria attraversa estese e potenti falde di detrito originate sia dagli effetti della disgregazione e del disfacimento, sia dall'azione delle forze gravitative: in generale, gli accumuli si compongono di un insieme di clasti eterometrici, prevalentemente

grossolani, a conformazione lastroide e con scarsa componente fine.

L'idrografia superficiale è rappresentata da incisioni talora profonde, come il T. Vertosan, disposte perpendicolarmente alla pendice montuosa ed entro vie preferenziali d'erosione, quali superfici più fortemente tettonizzate: il regime idrico di questi tributari della Dora è discontinuo e legato al clima invernale dell'arco alpino.

2 Indagini di superficie (fase conoscitiva)

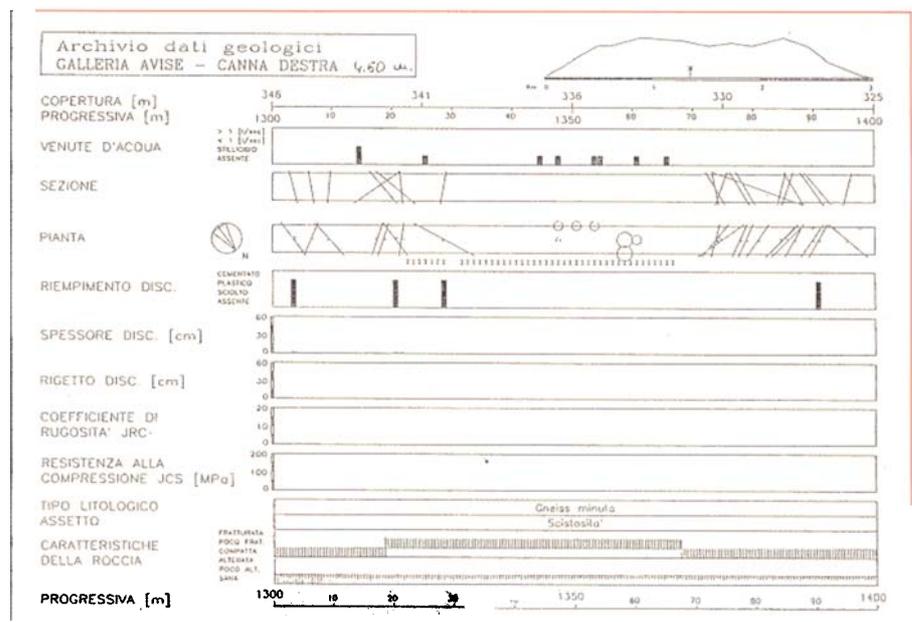
Le indagini di superficie, consistenti in un rilevamento geologico-geostrutturale di dettaglio integrato da un'apposita campagna geognostica, non consentivano, da sole, di caratterizzare con suffi-

ciente precisione l'ammasso roccioso a quota galleria, qualche centinaio di metri di profondità dal piano campagna, specialmente per quanto riguardava l'ubicazione delle discontinuità tettoniche. Ciò soprattutto in relazione all'andamento geomorfologico della superficie topografica (difficoltà d'accesso ai siti soprastanti la galleria, presenza di coperture detritiche che impediscono l'esame diretto delle formazioni rocciose in affioramento, ecc.).

Le generiche conoscenze acquisite dalla campagna geognostica di superficie orientavano comunque a considerare le caratteristiche dell'ammasso roccioso, escluse le tratte agli imbocchi e le zone di faglia, sufficientemente buone, in relazione agli stati tensionali esistenti, da far prevedere un comportamento tenso-deformativo allo scavo in campo elastico, a fronte stabile (comportamento confermato successivamente durante la realizzazione dei fori pilota e degli scavi di allargo dei medesimi).

La presenza di discontinuità tettoniche importanti, per i motivi già esposti, era stata però individuata solo con larga approssimazione. In particolare, in corrispondenza della tratta ricadente nella zona di faglia del Vertosan (circa 50 metri di lunghezza) non era stata prevista la presenza di discontinuità importanti, né tantomeno l'esistenza di una fascia d'ammasso cataclasato, come riscontrato durante lo scavo del foro pilota.

Fig. 2 - Esempio di scheda di dati geologici rilevati dal foro pilota.



1.3 Foro pilota (fase conoscitiva)

Preso atto dell'insufficienza delle indicazioni fornite dalla campagna di superficie, veniva decisa l'esecuzione del foro pilota, che avrebbe permesso di conseguire molteplici vantaggi, a seguito delle seguenti peculiarità:

- possibilità di rilevamento geologico sistematico e continuo dall'interno del cunicolo, lungo tutto il tracciato, con eliminazione di ogni imprevisto geologico, geomeccanico e idrogeologico;
- attraversamento in prima fase di zone caratterizzate da disturbi tettonici e geostrutturali con uno scavo di piccola sezione, con minori problemi di stabilità e sicurezza;
- programmazione delle successive fasi di allargo sulla base di un sicuro inquadramento geognostico di dettaglio, con possibilità di eseguire opere di preconsolidamento su roccia indisturbata;
- drenaggio delle acque sotterranee, con abbattimento delle pressioni idrostatiche.

I lavori per l'esecuzione del foro pilota iniziarono sulla canna sinistra, a partire dall'imbocco lato Aosta, nell'aprile 1990. Durante l'avanzamento, dove appariva indispensabile in relazione al comportamento mostrato dall'ammasso roccioso allo scavo, veniva eseguito un consolidamento radiale al contorno del cunicolo mediante bulloni di vetroresina \varnothing 22 mm lunghi 1,5 m. Nelle zone di faglia o più intensamente fratturate, specie se con acqua in pressione, il cunicolo veniva blindato sistematicamente mediante centine metalliche "linerplate" ad assetto verticale tipo CBK. In questo modo l'avanzamento del foro pilota proseguì con regolarità e con produzioni medie giornaliere dell'ordine di 21 m, con punte di 60, fino alla progressiva 1.290 m. Qui, il giorno 20 settembre 1990, si verificava l'accidente tettonico legato alla presenza della faglia del Vertosan di cui si è già accennato e che sarà trattato ampiamente più avanti nell'articolo.

In attesa di superare detto accidente con la canna sinistra, il foro pilota veniva realizzato, previa esecuzione di preconsolidamenti lanciati dal cunicolo di monte, con le stesse modalità, tra i mesi di novembre 1990 e maggio 1991, su quella destra, senza incontrare particolari difficoltà.

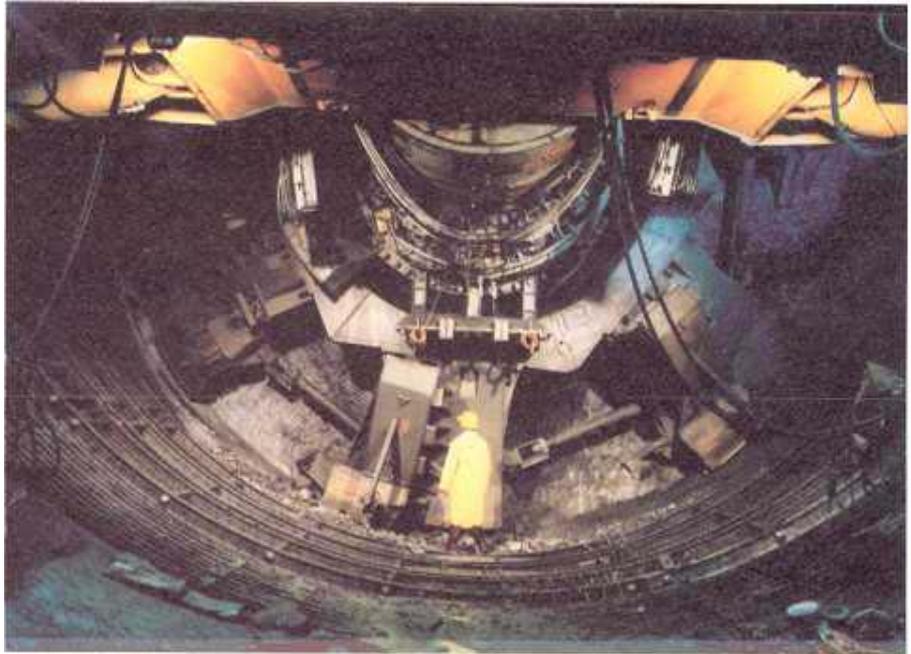


Foto 2 - Fresa alesatrice durante i lavori d'avanzamento.

3.1 Indicazioni fornite dai cunicoli pilota

Il rilievo di dettaglio, effettuato in tempi diversi dall'interno di entrambi i cunicoli pilota (sx e dx) permise di individuare i principali caratteri geostrutturali e idrogeologici dell'ammasso roccioso attraversato (Foto 1), confermando sostanzialmente le indicazioni già fornite dai precedenti rilievi di superficie circa le caratteristiche geolitologiche (unica litofacies costituita da gneiss minuti e micascisti, interessata dalla costante presenza di piani di scistosità normalmente a giacitura subverticale) e di qualità dell'ammasso [in prevalenza compatto o poco fratturato (indice di fratturazione = $0,25 \div 0,35$ fratt/m) con elevata resistenza di matrice ($\sigma_r = 80$ MPa), che solo in tratte di ridotta estensione presentava un grado di fratturazione più accentuato, passante localmente, in particolari zone di faglia, a facies cataclasata e/o milonitizzata].

Circa le caratteristiche geostrutturali a livello puntuale (Fig. 2), si poté riscontrare la presenza di singole strutture principali (faglie) di notevoli dimensioni, spesso con riempimento di materiale plastico e/o sciolto e quasi sempre associate a venute d'acqua di entità generalmente superiore rispetto alle manifestazioni acquifere diffuse lungo l'intera galleria (stillicidi).

In ogni caso, l'assetto idrogeologico dell'ammasso attraversato dalla galleria Avise risultava influenzato dagli apporti idrici di superficie legati a fenomeni stagionali (disgelo, abbondanti precipitazioni, ecc.) che potevano comportare variazioni anche significative delle portate delle emergenze presenti in galleria.

Il comportamento tenso-deformativo mostrato dall'ammasso roccioso durante l'avanzamento del foro pilota era decisamente in campo elastico per la quasi totalità della galleria, con fenomeni d'instabilità che, per quanto presenti, si manifestavano sotto forma di rilasci gravitativi immediati al passaggio del fronte; le tipologie di tali franamenti risultavano in massima parte riconducibili a distacchi di cunei rocciosi (per lo più di modesta entità) isolati dall'intersezione delle discontinuità (Foto 2), oppure consistevano nel crollo di materiale roccioso fratturato e/o disgregato, in corrispondenza di fasce d'ammasso tettonizzate.

Facevano eccezione, oltre naturalmente alle tratte d'imbocco in materiale detritico, la tratta di galleria ricadente nella zona di faglia del Vertosan e alcune tratte di minor estensione, in corrispondenza di altre discontinuità importanti, dove la presenza di fasce milonitiche associate ad abbondanti venute d'acqua determinavano un comportamento tenso-deformativo dell'ammasso di tipo plastico o in campo di rottura.

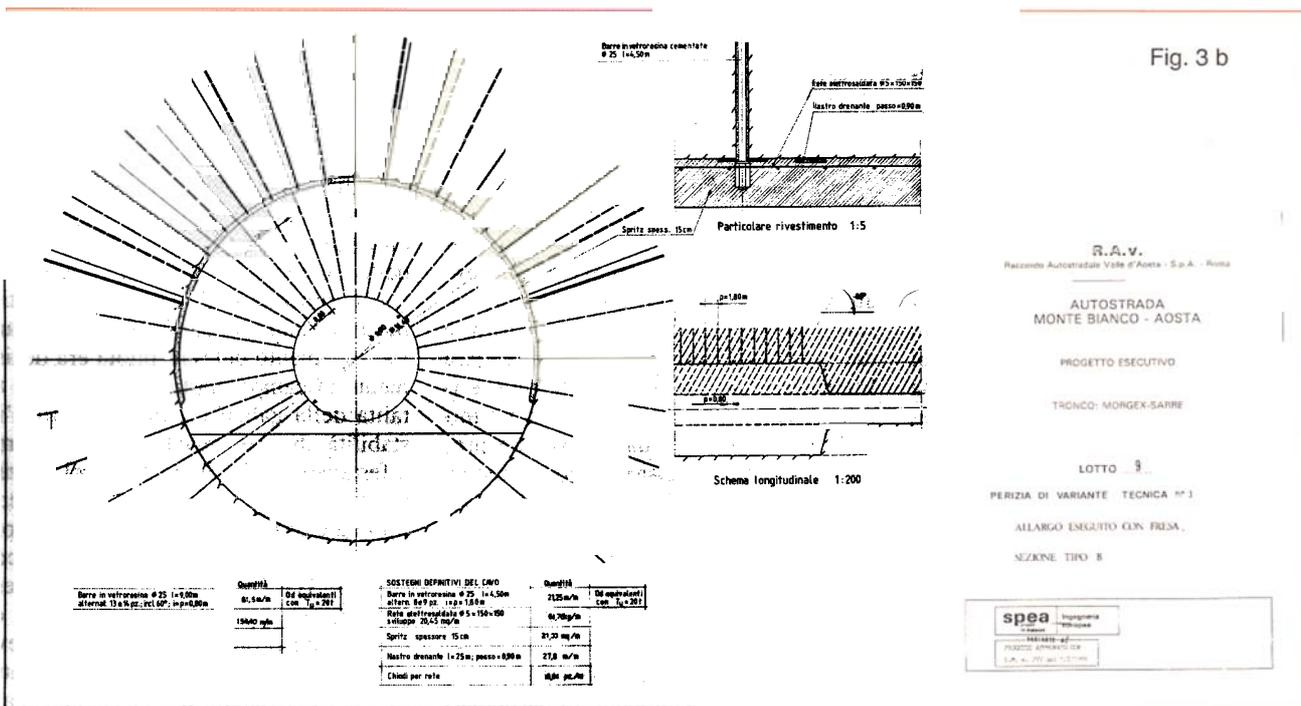
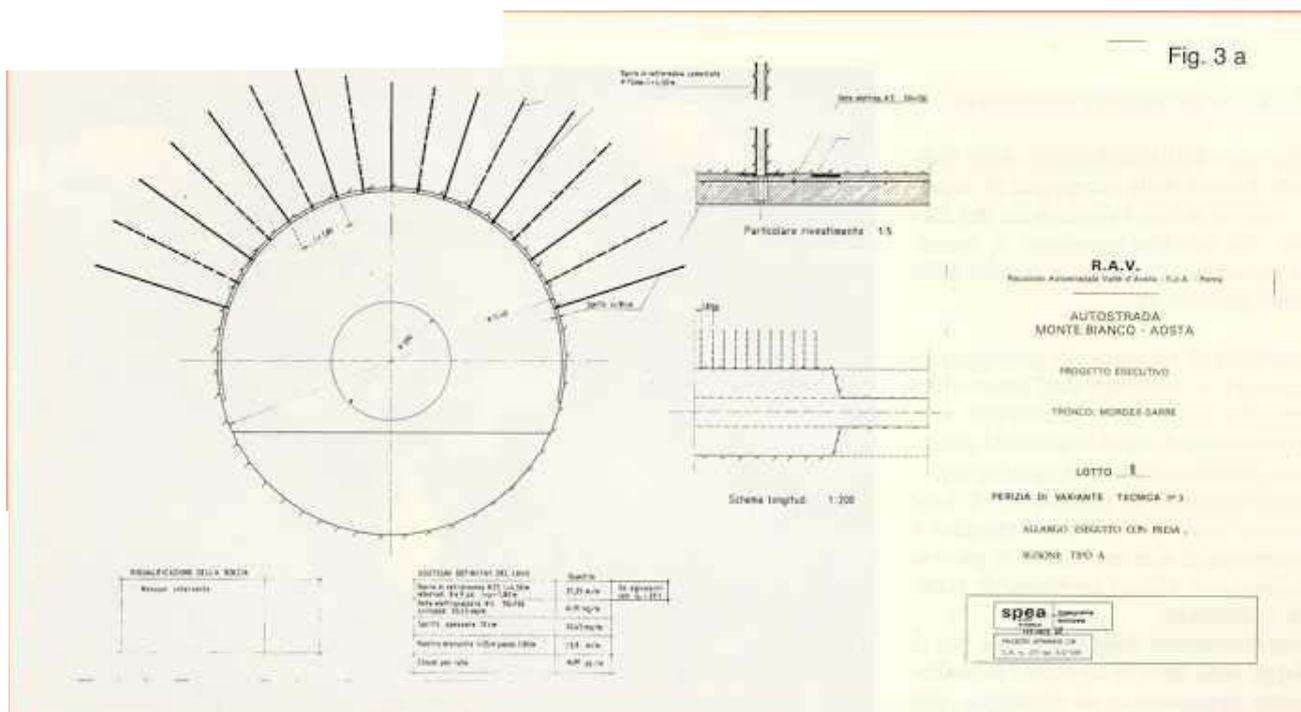


Fig. 3 a, b, c - Sezioni tipo per la galleria Avise.

2. ASPETTI PROGETTUALI

Come già illustrato, la galleria Avise attraversa i seguenti materiali:

- nella zona d'imbocco lato M. Bianco, circa 230 m di terreno prevalentemente detritico;
- nella tratta intermedia, circa 2.760 m di formazione rocciosa metamorfica (Gran

San Bernardo);

- nella zona d'imbocco lato Aosta, circa 80 m di materiale in parte detritico e in parte morenico.

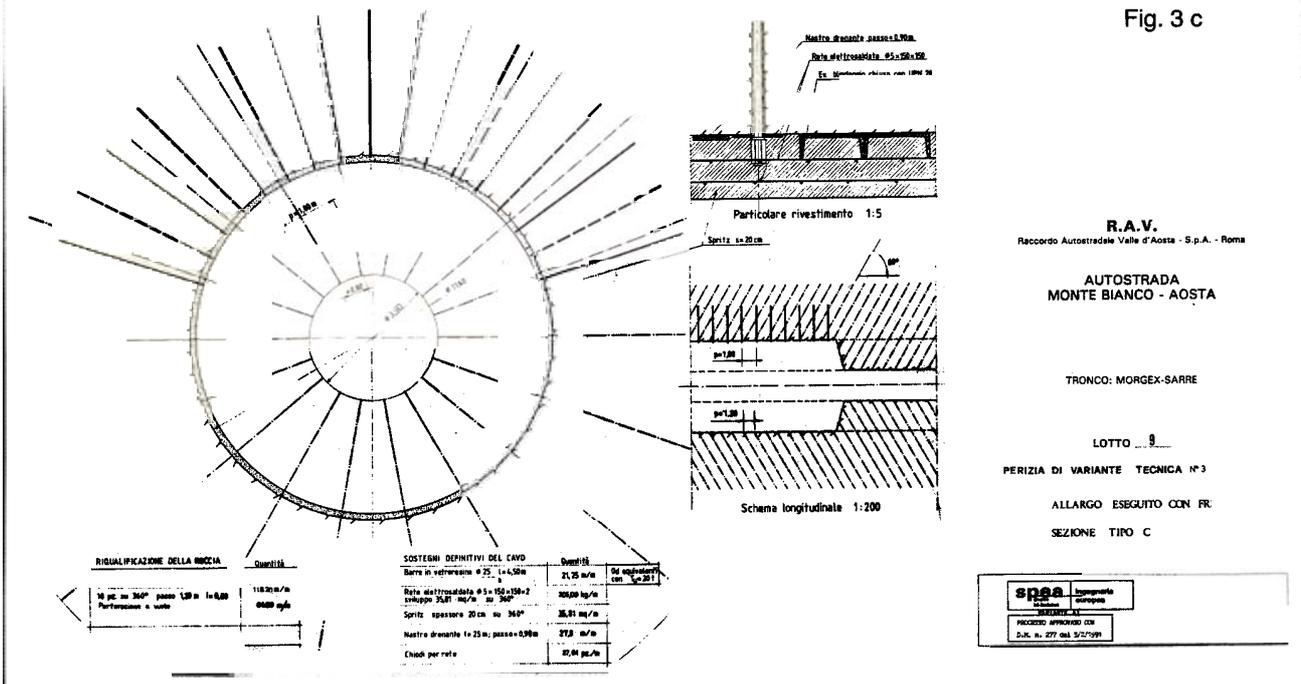
Lo spessore medio della copertura è di circa 40 m nelle zone detritiche degli imbocchi e da 180 a 330 m nella tratta intermedia in roccia.

Di conseguenza, nelle tratte corrispon-

denti alle zone d'imbocco sussistevano i classici problemi di realizzazione di cavità sotterranee in terreni sciolti (instabilità del fronte e delle pareti di scavo, minimizzazione dei cedimenti in corrispondenza di eventuali vincoli superficiali quali edifici o vie di traffico, esecuzione degli scavi in più fasi, ecc.).

Nelle tratte in roccia, date le condizioni geomeccaniche generalmente favore-

Fig. 3 c



voli, i problemi erano soprattutto quelli relativi all'ottimizzazione del progetto sia per quanto riguarda le opere di stabilizzazione sia per quanto riguarda le modalità esecutive e quindi l'ottimizzazione e la pianificazione dei tempi e dei costi.

La metodologia progettuale, in "fase di diagnosi", si è basata sulla suddivisione degli scavi in tratte a comportamento tenso-deformativo omogeneo (in assenza di opere di stabilizzazione) sulla base di tre categorie di comportamento:

- **Categoria A:** comportamento allo scavo a fronte stabile, con fenomeni deformativi in campo elastico. Durante l'avanzamento, in assenza di opere di stabilizzazione, si possono avere solo locali distacchi di blocchi rocciosi isolati dall'intreccio delle discontinuità. Avvalendosi delle osservazioni fatte attraverso il foro pilota, si ritenne di poter inquadrare in questa categoria gran parte della lunghezza di galleria in roccia.

- **Categoria B:** comportamento allo scavo a fronte stabile a breve termine, con fenomeni deformativi in campo elastoplastico. Durante l'avanzamento, in assenza di opere di stabilizzazione, il fronte tende a estrudere verso l'interno della galleria, anche se non in maniera evidente, e si possono verificare instabilità locali dello stesso. Di conseguenza i fenomeni

deformativi sono diffusi al contorno del cavo e di entità non trascurabile. Avvalendosi delle osservazioni fatte attraverso il foro pilota, si ritenne di poter inquadrare in questa categoria di comportamento alcune brevi tratte di galleria in roccia alterata o tettonizzata.

- **Categoria C:** comportamento allo scavo a fronte instabile, con fenomeni deformativi in campo di rottura. Durante l'avanzamento, in assenza di opere di stabilizzazione, si verifica l'immediata instabilità del fronte e, di conseguenza, del cavo. Avvalendosi anche delle osservazioni fatte attraverso il foro pilota, si ritenne di dover inquadrare in questa categoria le tratte d'imbocco e quella attraverso la faglia del Vertosan.

A fronte di tale suddivisione si progettarono (fase di terapia) sezioni tipo A, B e C a intensità di interventi di stabilizzazione crescente, con tempistiche esecutive che comportavano la messa in opera degli interventi stessi a distanza rispettivamente decrescente dal fronte di scavo fino ad arrivare a quelli lanciati in avanzamento rispetto al fronte stesso.

In particolare, per le tratte di galleria scavate con fresa alesatrice (la maggior parte della galleria), date le ridotte dimensioni del diametro di scavo in rapporto al diametro utile interno, fu scelto

di adottare un unico schema esecutivo per la bullonatura della calotta (bulloni di vetroresina $\varnothing 25$ mm di 4,5 m di lunghezza disposti a passo di 1,80 x 1,80 m), dimensionato sulle caratteristiche dell'ammasso roccioso relative alla categoria di comportamento "A". Per le tratte di categoria "B" e "C", peraltro di ridotta estensione, fu previsto di eseguire, prima di iniziare la fase di allargo, un preconsolidamento dell'ammasso roccioso con interventi (barre o tubi di vetroresina) lanciati dal cunicolo pilota con intensità tale da adeguare le caratteristiche dell'ammasso roccioso a quelle della categoria di comportamento "A".

In definitiva, si sono generalmente adottate le seguenti sezioni tipo (Fig. 3):

- **Sezione tipo A**

- bulloni di vetroresina $T_u=20$ t, $L=4,5$ m disposti in calotta con passo 1,8 x 1,8 m per uno sviluppo angolare di 130° ;
- rivestimento in calotta di *spritz-beton* $s = 10$ cm armato con rete elettrosaldata 15 x 15, $\varnothing 5$ mm.

- **Sezione tipo B**

- preconsolidamento dell'ammasso roccioso al contorno e sul fronte del futuro allargo con bulloni di vetroresina $T_u=15$ t, $L=9$ m messi in opera dal cunicolo pilota e disposti in calotta e sul

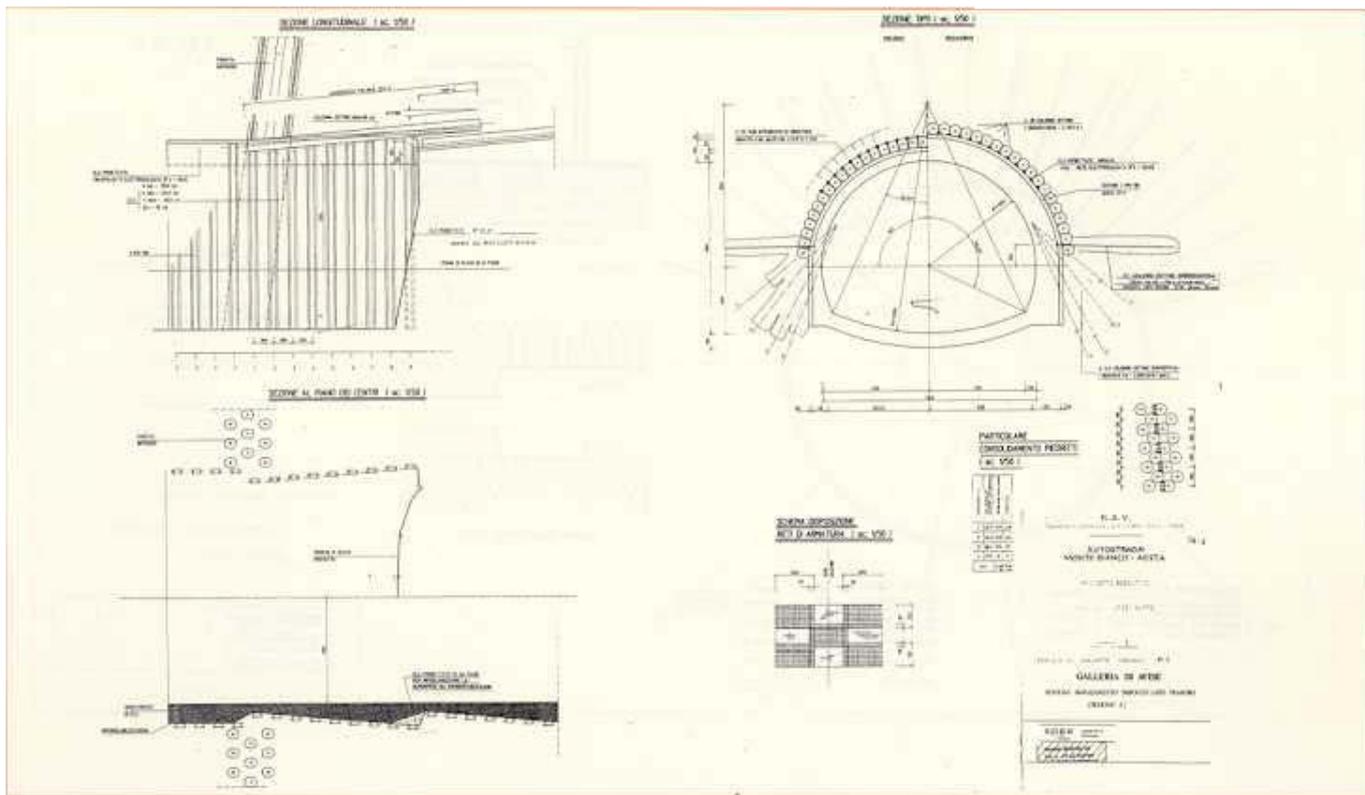


Fig. 4 - Schema d'avanzamento a mezza sezione mediante jet-grouting in orizzontale

le reni con passo $0,8 \times 0,8$ m, per uno sviluppo angolare di 250° , in perforazioni inclinate rispetto alla direzione radiale di 30° nel senso dell'avanzamento della fase di allargo;

- bulloni di vetroresina $Tu=20$ t, $L=4,5$ m

disposti in calotta con passo $1,8 \times 1,8$ m per uno sviluppo angolare di 130° ;

- rivestimento in calotta di spritz-beton $s = 15$ cm armato con rete elettrosaldata 15×15 , $\phi 5$ mm.

fettivamente raggiunto con il preconsolidamento dell'ammasso roccioso;

- rivestimento di *spritz-beton* $s = 20$ cm armato con doppia rete elettrosaldata 15×15 , $\phi 5$ mm, esteso a tutto il profilo circolare.



Foto 3 - Posa di bulloni in corrispondenza di una discontinuità.

• Sezione tipo C

- preconsolidamento dell'ammasso roccioso al contorno e sul fronte del futuro allargo mediante esecuzione di iniezioni cementizie da tubi di vetroresina valvolati $\phi 48/28$ mm, $L=12$ m messi in opera dal cunicolo pilota e disposti sull'intero sviluppo angolare di 360° con passo $0,8 \times 1,2$ m in perforazioni inclinate rispetto alla direzione radiale di 30° nel senso dell'avanzamento della fase di allargo;
- bulloni di vetroresina $Tu=20$ t, $L=4,5$ m disposti in calotta con passo $1,8 \times 1,8$ m per uno sviluppo angolare di 130° ;
- eventuale blindaggio locale completo delle pareti di scavo mediante centine a profilo circolare, in funzione del grado di stabilità ef-

Per lo scavo delle tratte d'imbocco in terreno sciolto fu previsto di avanzare a sezione parzializzata (calotta, ribasso, arco rovescio), previo consolidamento in avanzamento del perimetro dello scavo mediante *jet-grouting* in orizzontale o mediante infilaggi, a seconda delle dimensioni dei blocchi di detrito presenti.

Per la realizzazione degli scavi d'imbocco, su pendii particolarmente acclivi e potenzialmente instabili se modificati morfologicamente, il concetto progettuale fu il medesimo seguito per quelli in sottterraneo: garantire la conservazione degli equilibri naturali originari realizzando le opere di stabilizzazione ancor prima di iniziare gli scavi. A questo scopo si è fatto ricorso alla tecnologia del *jet-grouting* in verticale in accoppiamento a quella del *jet-grouting* in orizzontale, con cui è possibile limitare l'altezza degli sbancamenti e realizzare pareti subverticali d'imbocco affidabili nei riguardi della sicurezza dei lavori e della stabilità del versante, nonché ottenere un

significativo contenimento dell'impatto ambientale anche durante le fasi transitorie delle lavorazioni.

3. ASPETTI ESECUTIVI

3.1 Tratte d'imbocco in galleria naturale

All'imbocco lato M. Bianco, dove il detrito si presentava piuttosto omogeneo, il consolidamento in avanzamento è stato realizzato secondo il sistema del *jet-grouting* in orizzontale a mezza sezione. La lunghezza del trattamento è stata di 12 m in modo da permettere scavi di avanzamento per tratte di 9 m (Fig. 4). Dove si incontravano grossi trovanti il trattamento veniva integrato con infilaggi metallici con funzione di "cucitura" del trovante.

All'imbocco lato Aosta, invece, dove prevalevano blocchi grossi anche diversi metri cubi, con riempimento eterogeneo e vacuolare, che avrebbero potuto interrompere la continuità del *jet-grouting*, è stato operato un preconsolidamento costituito da infilaggi con tubi metallici valvolati opportunamente iniettati.

In entrambi i casi si è realizzato un rivestimento di prima fase costituito da 2 centine NP 180 accoppiate al metro lineare, rete elettrosaldata 15 x 15 cm ϕ 6 mm e un manto di 20 cm di *spritz-beton*. Il rivestimento finale è consistito in un anello di calcestruzzo non armato di 60 ÷ 120 cm di spessore.

Le lavorazioni di preconsolidamento sono state realizzate con 2-3 turni giornalieri per ogni attrezzatura.

L'abbattimento del fronte è stato effettuato mediante martelloni tipo Montabert BRH 1100 (peso operativo 1.700 Kg) montati su escavatori. Il lavoro di scavo della calotta e la messa in opera del rivestimento di prima fase per un tratto di 9 m ha richiesto mediamente 7-9 turni di 6 persone ognuno (3 turni ogni 24 ore); ovviamente l'avanzamento in una canna avveniva contemporaneamente al preconsolidamento in quella adiacente.

3.2 Scavo di allargo della canna destra

Come abbiamo già accennato, il progetto inizialmente prevedeva l'esecuzione di un foro pilota mediante TBM di 4,5 m di diametro al centro delle canne destra e sinistra. Il foro pilota sarebbe in

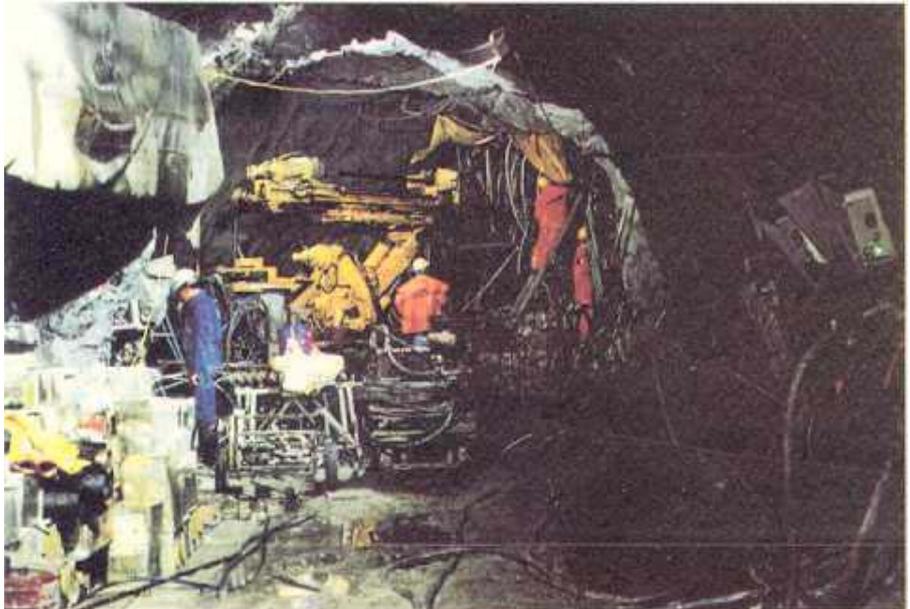


Foto 4 - Camera di lavoro a prog. 1302 del foro pilota sinistro per l'esecuzione degli interventi di preconsolidamento di 2ª fase.

seguito stato allargato utilizzando una fresa alesatrice di 11,4 m di diametro.

Questa innovativa e avanzata tecnologia esecutiva è stata preferita ad altre più tradizionali per i molteplici vantaggi che avrebbe permesso di conseguire:

- riduzione dei tempi di esecuzione della galleria, in ragione della maggior continuità dei lavori di scavo e delle elevate produzioni della macchina alesatrice che, una volta messa a regime in relazione alle caratteristiche della roccia, può rag-

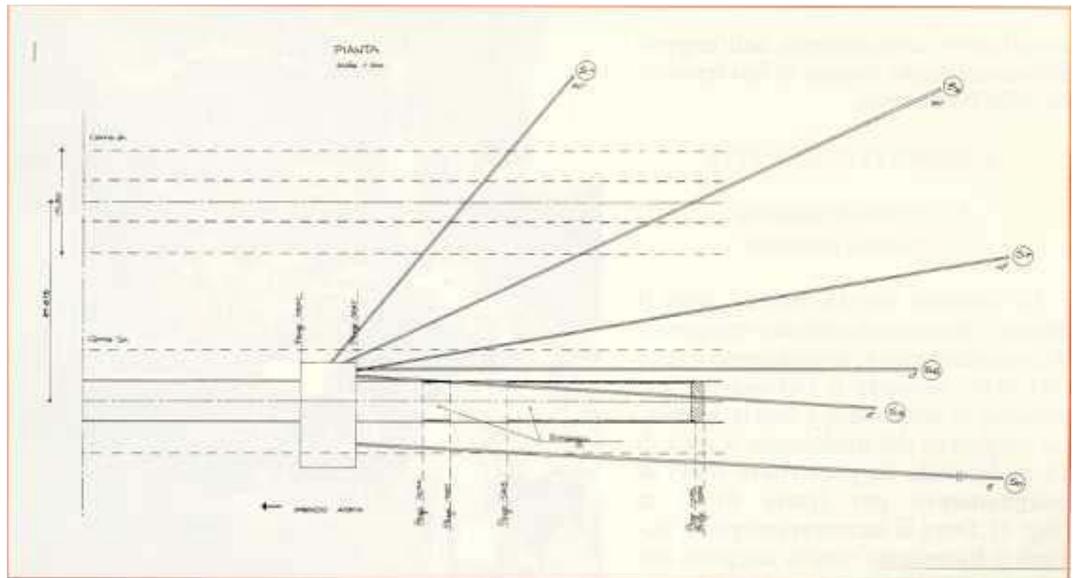
giungere un avanzamento medio giornaliero di 25 m;

- minor disturbo della roccia, con conseguenti riflessi positivi per la stabilità delle opere. Infatti, essendo il lavoro di scavo meccanico continuo ed esente da vibrazioni impulsive, viene preservata la totale capacità portante della roccia, che si mantiene di conseguenza in migliori condizioni di stabilità;
- minori alterazioni al regime delle falde acquifere esistenti e minor disturbo dell'ambiente circostante.

Foto 5 - Messa a giorno della testa della fresa a prog. 9 m della camera di lavoro. Si osserva la testa completamente inglobata nel materiale milonitico precedentemente consolidato dalle iniezioni.



Fig. 5 - Schema esecutivo dei sondaggi geognostici.



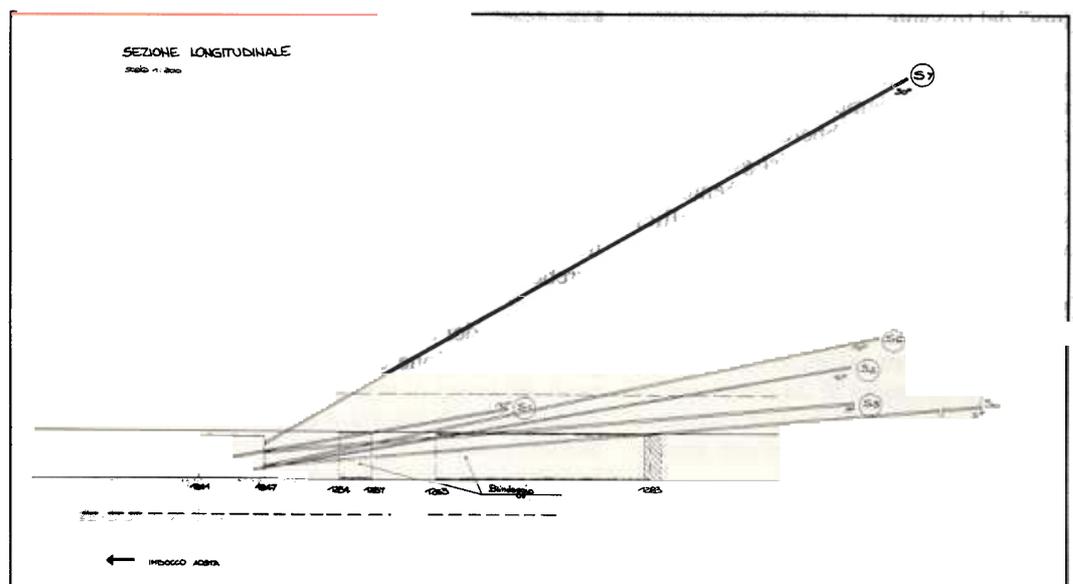
Tali prerogative favoriscono la continuità di esecuzione dei lavori, che diversamente potrebbero essere soggetti a interruzioni.

A causa dei problemi associati con l'attraversamento della faglia del Vertosan, dei quali riferiremo nel prossimo paragrafo, le tecnologie d'avanzamento utilizzate effettivamente sono state diverse nelle due canne, con l'impiego della fresa alesatrice solo per lo scavo di quella destra.

Questo ha avuto inizio nel mese di ottobre 1991 ed è terminato senza particolari problemi il 12 settembre 1993 (Foto 2). La fresa alesatrice utilizzata è stata una Wirth TBS di 11,40 m di diametro, circa 100 m di lunghezza e 1.200 t di peso totale. La macchina, provvista di 10 motori elettrici da 250 kW ciascuno e capace di sviluppare una spinta di avanzamento di 1.500 t, era equipaggiata con attrezzature per il bullonaggio della roccia a tergo della testa fresante, di piattaforme mobili e di un braccio robotizzato per la posa dello *spritz-beton* e della bullonatura (Foto 3).

3.3 Scavo della canna sinistra

Come più volte accennato nel corso dell'articolo, lo scavo della canna sinistra della galleria Avise è stato più problematico rispetto a quello della canna destra. I problemi sono stati in gran parte legati al superamento dell'incidente tettonico della faglia del Vertosan.



3.3.1 Descrizione dell'incidente tettonico della faglia del Vertosan

Lo scavo del cunicolo pilota sinistro, intrapreso dall'imbocco lato Aosta a partire dall'aprile 1990, aveva raggiunto a metà luglio dello stesso anno la progressiva 1.260 m senza particolari difficoltà operative (velocità media 30 ÷ 40 m/giorno).

A partire dalla prog. 1.260 m e fino alla prog. 1.290 m, l'avanzamento veniva ostacolato dalla presenza di una zona d'ammasso intensamente fratturata, con venute d'acqua di circa 20 l/s. In tali sfavorevoli condizioni, a prog. 1.290 m, a causa del franamento di porzioni di roccia dal fronte e sul contorno del mantello

protettivo della macchina, si determinava il grippaggio della testa.

L'inconveniente provocava il temporaneo arresto dell'avanzamento, a cui si provvedeva, come di consueto in situazioni analoghe, con l'immediata messa in atto dei seguenti interventi:

- rafforzamento delle strutture di confinamento nel tratto scavato;
- manutenzione e rimessaggio della macchina;
- esecuzione di alcuni fori di sondaggio per la valutazione dell'estensione della zona fratturata;
- esecuzione di iniezioni di consolidamento, ricompressione e intasamento del materiale presente davanti alla te-

sta fresante e sul contorno del tratto già scavato.

Alla ripresa dell'avanzamento, il 20 settembre 1990, effettuato con un unico sfondo di 1,5 m, si verificava lo svuotamento di una sacca d'acqua ubicata nella zona di faglia sopra la quota dello scavo, con conseguente improvviso quanto violento ingresso a tergo della testa fresante di un'ingente quantità di fango e detriti che travolgeva, con esito mortale, due degli otto minatori presenti in quel momento.

Immediatamente a seguito dell'evento e nei giorni successivi persisteva una notevole portata d'acqua pulita che, per la sua velocità, sembrava provenire da un'altezza considerevole. Tale ipotesi trovava peraltro conferma nel violento spostamento d'aria verificatosi negli istanti immediatamente precedenti il franamento, cosa che faceva pensare a una massa d'acqua ubicata a notevole altezza che improvvisamente, rompendo un diaframma impermeabile di ridotto spessore, si era scaricata nella sottostante galleria, trascinando con sé i detriti dello stesso diaframma.

La dinamica dell'evento, gli accertamenti successivi e le risultanze geognostiche eseguite in seguito misero in luce l'anomalia del fenomeno rispetto alle condizioni geosturali e geomeccaniche dell'ammasso ipotizzate in sede di previsione e puntualmente riscontrate durante lo scavo sino a quel momento, concordando nel far ritenere del tutto fortuito e imprevedibile a priori il verificarsi di un tale evento franoso.

3.3.2 Indagini geognostiche per la caratterizzazione della zona di faglia

A seguito dell'accidente e del conseguente arresto della fresa nel cunicolo sinistro a prog. 1.290 m, veniva attuata una campagna geognostica per definire l'estensione della zona di faglia e le caratteristiche dell'ammasso roccioso oltre il fronte d'arresto della macchina.

A questo scopo, dopo aver smontato gli elementi di coda della fresa, fu realizzata, previo allargamento della sezione del cunicolo, una camera di lavoro, opportunamente ubicata a prog. 1.250 m nella zona d'ammasso integro precedente alla zona di faglia, dalla quale furono lanciati 7 sondaggi sub-orizzontali di 70 m di lunghezza e 3 fori di drenaggio per il con-

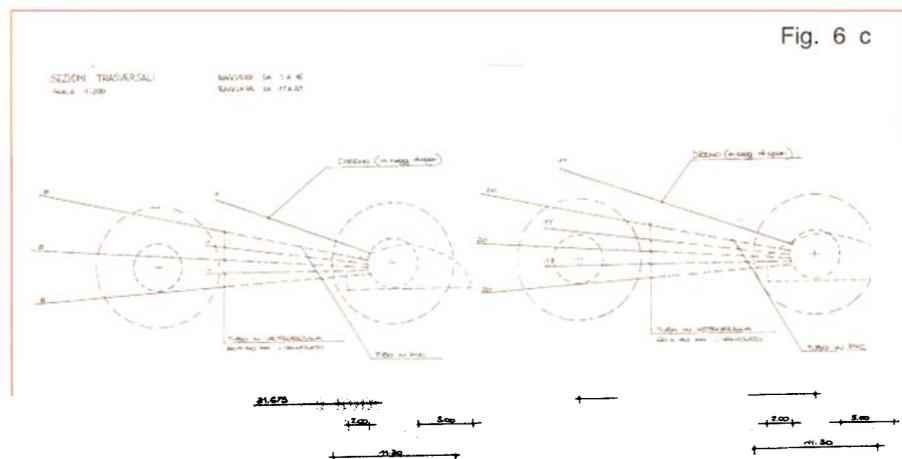
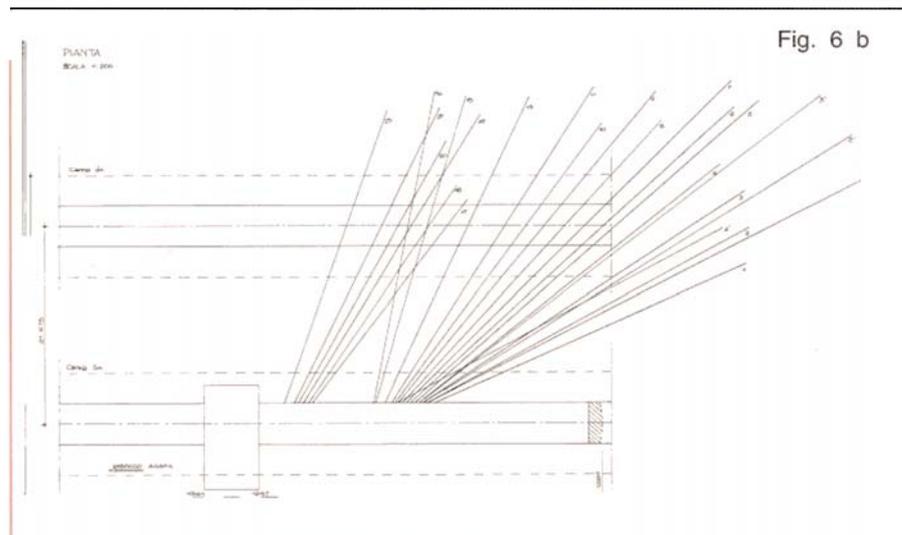
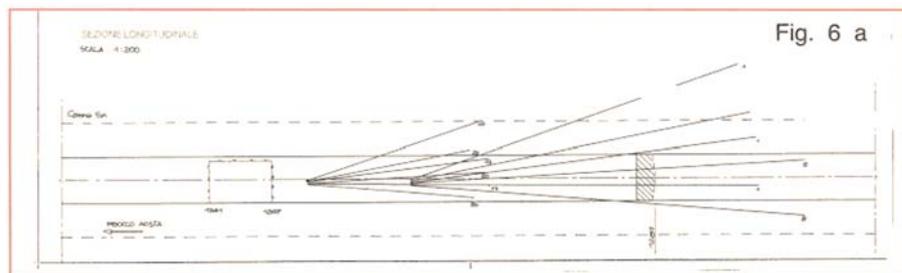


Fig. 6 a, b, c- Schema dei trattamenti di preconsolidamento di 1^a fase.

trollo delle venute d'acqua esistenti e la captazione di ulteriori sacche di raccolta idrica eventualmente presenti nell'ammasso circostante (Fig. 5). Le acque raccolte dopo l'esecuzione dei drenaggi mantennero una portata di 20 l/s, pari a quella osservata precedentemente al verificarsi dell'accidente tettonico.

Le risultanze fornite dai sondaggi evidenziavano sostanzialmente la presenza

di una zona di faglia preannunciata, da prog. 1.260 m a prog. 1.280 m, da un evidente peggioramento dell'integrità della roccia, che diveniva assai fratturata e degradata e, in corrispondenza della superficie di scorrimento della faglia a prog. 1.280 m, formata da vero e proprio materiale di frizione (cataclaste). Oltre prog. 1280 m si evidenziava la presenza di una fascia intensamente tettonizzata,

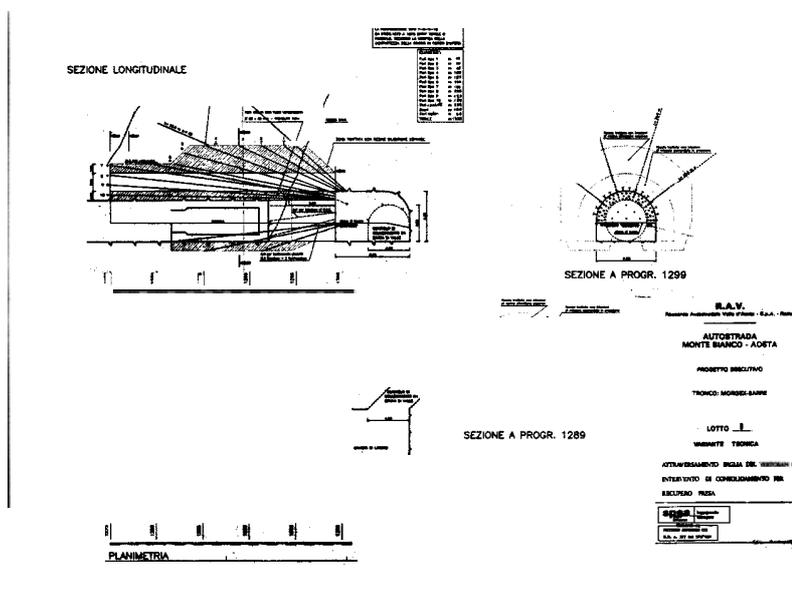


Fig. 7 - Schema dei trattamenti di preconsolidamento di 2ª fase (per il recupero dello scudo dal foro pilota sinistro).

potente 10 ÷ 15 m, caratterizzata da materiale di riempimento milonitico alternato a blocchi lapidei, macrovuoti e cavità, oltre la quale si osservava la presenza di roccia integra, a indicare il superamento della zona di faglia.

3.3.3 Interventi di preconsolidamento dell'ammasso roccioso

3.3.3.1 Criteri generali di progettazione e messa a punto in fase esecutiva

Sulla base delle risultanze fornite dalla campagna geognostica, si mise a punto una serie di interventi di preconsolidamento dell'ammasso roccioso per l'attraversamento della zona di faglia con entrambe le canne della galleria.

Detti interventi, articolati in relazione alle problematiche esecutive secondo 4 fasi successive (vedi paragrafo 3.3.3.2), perseguivano come obiettivo comune la formazione di un arco di scarico al contorno del futuro cavo, atto a garantirne la stabilità nelle successive fasi di scavo (cunicolo o allargo) e di messa in opera degli interventi di stabilizzazione. Tale benefico effetto venne raggiunto previa esecuzione, in anticipo sugli scavi, di iniezioni controllate di idonee miscele chimiche e/o cementizie (effettuate rispettivamente in avanzamento da fondo foro e/o da tubi valvolati), secondo op-

portune disposizioni geometriche (suborizzontali rispetto alla direzione di avanzamento della galleria o radiali rispetto all'asse del cunicolo pilota centrale, a seconda dei casi).

All'attuale stato dell'arte, tale metodologia risulta essere la più efficace per il trattamento di ammassi eterogenei e di caratteristiche geomeccaniche assai scadenti quale quello in esame, caratterizzato, come già esposto, da materiale lapideo grossolano frammisto a materiali sciolti pseudocoesivi, in presenza di macrovuoti e/o cavità e di abbondanti venute d'acqua.

Il problema di dilavamento delle miscele cementizie d'iniezione da parte dell'acqua e della dispersione delle medesime attraverso vuoti e/o fratture viene infatti risolto mediante utilizzo di resine silicatiche espansive che, opportunamente preiniettate in fase di perforazione, consentono, ove necessario, di realizzare il tamponamento delle miscele cementizie, che vengono iniettate in fasi successive a pressioni via via crescenti.

Si raggiunge così il duplice scopo di impermeabilizzare e intasare i vuoti e le cavità (grazie alle caratteristiche di rigonfiamento delle particolari miscele chimiche utilizzate) e di incrementare la coesione e la resistenza meccanica del materiale trattato (grazie alla capacità di penetrazione delle miscele cementizie di tipo stabilizzato sotto elevati valori di

pressione e in condizioni di adeguato preconfinamento).

L'iniezione controllata delle miscele cementizie venne quindi effettuata da idonei tubi valvolati (n. 1 valvola/ml) di tipo misto vetroresina/acciaio (rispettivamente per la porzione all'interno della sezione di scavo finale e per quella all'esterno della stessa). Tale scelta era motivata dall'esigenza di consentire una più agevole demolizione e rimozione delle porzioni di tubo in fase di scavo, garantendo nel contempo, grazie all'elevata resistenza al taglio della vetroresina (resina poliestere-termoindurente rinforzata con fibre di vetro in percentuale non inferiore al 50% in peso), una resistenza allo scoppio e una capacità di armatura del terreno sostanzialmente equivalenti a quelle dei tubi in acciaio.

I limiti di pressione raggiungibili in fase di iniezione con attrezzature convenzionali (fino a 100 bar) sono condizionati dalla tenuta e dalla resistenza allo scoppio dei tubi e dei dispositivi di iniezione (valvole, otturatori, circuiti idraulici) e risultano in genere sufficienti a garantire l'iniettabilità di materiali chiusi e addensati a prevalente frazione fine, quali i riempimenti milonitici presenti nelle discontinuità tettoniche principali.

Particolare importanza riveste infine la scelta delle miscele di iniezione e dei parametri esecutivi.

Per quanto riguarda le miscele chimiche, si scelse l'impiego di una resina bicomponente in stato fluido a base di silicato sodico, caratterizzata da un fattore di schiumatura (rapporto tra volume finale dopo l'iniezione e volume iniziale dei singoli componenti) superiore a 25 (nel caso di espansione libera) e da un'elevata velocità di reazione (≈ 120 s). Nei riguardi della compatibilità con l'ambiente, tale miscela era particolarmente indicata in quanto priva di idrocarburi fluoroclorinati, oltre che essere garantita non inquinante in presenza di falda (requisito assai importante nel caso in esame).

Per le iniezioni di ricomprensione e consolidamento, si scelse una miscela cementizia confezionata con cemento a finezza $\approx 5.000 \text{ cm}^2/\text{g}$ Blaine (tipo R425), con rapporto di base acqua/cemento $A/C = 0.7$ in peso, stabilizzata mediante additivo colloidale (bentonite) in percentuale pari al 5-6% rispetto al peso del cemento. Alcuni di questi parametri (e in particolare il rapporto A/C e la percentuale di additivo colloidale) vennero poi sensi-

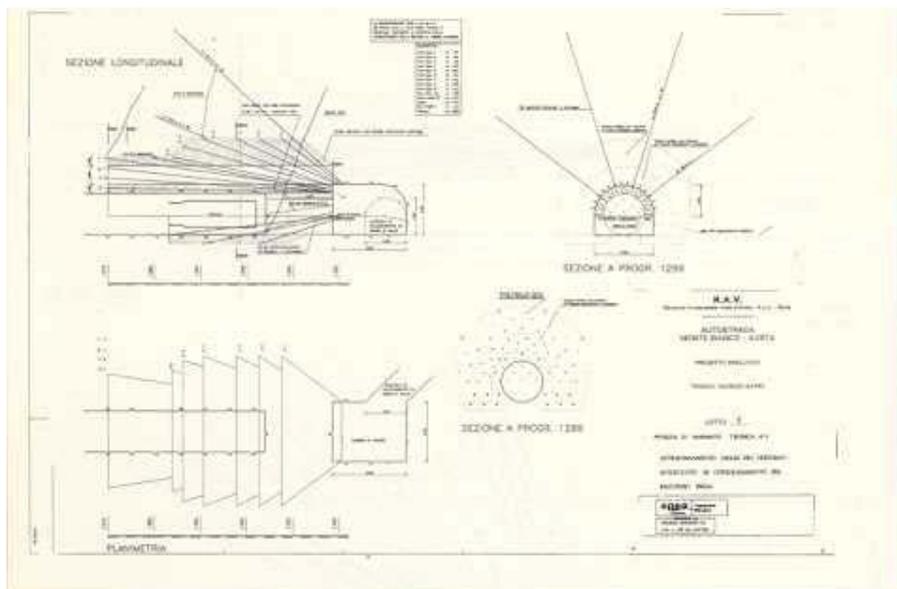


Fig. 7 - Schema dei trattamenti di preconsolidamento di 2ª fase (per il recupero dello scudo dal foro pilota sinistro).

potente 10 ÷ 15 m, caratterizzata da materiale di riempimento milonitico alternato a blocchi lapidei, macrovuoti e cavità, oltre la quale si osservava la presenza di roccia integra, a indicare il superamento della zona di faglia.

Interventi di preconsolidamento dell'ammasso roccioso

3.3.3.1 Criteri generali di progettazione e messa a punto in fase esecutiva

Sulla base delle risultanze fornite dalla campagna geognostica, si mise a punto una serie di interventi di preconsolidamento dell'ammasso roccioso per l'attraversamento della zona di faglia con entrambe le canne della galleria.

Detti interventi, articolati in relazione alle problematiche esecutive secondo 4 fasi successive (vedi paragrafo 3.3.3.2), perseguivano come obiettivo comune la formazione di un arco di scarico al contorno del futuro cavo, atto a garantirne la stabilità nelle successive fasi di scavo (cunicolo o allargo) e di messa in opera degli interventi di stabilizzazione. Tale benefico effetto venne raggiunto previa esecuzione, in anticipo sugli scavi, di iniezioni controllate di idonee miscele chimiche e/o cementizie (effettuate rispettivamente in avanzamento da fondo foro e/o da tubi valvolati), secondo op-

portune disposizioni geometriche (suborizzontali rispetto alla direzione di avanzamento della galleria o radiali rispetto all'asse del cunicolo pilota centrale, a seconda dei casi).

All'attuale stato dell'arte, tale metodologia risulta essere la più efficace per il trattamento di ammassi eterogenei e di caratteristiche geomeccaniche assai scadenti quale quello in esame, caratterizzato, come già esposto, da materiale lapideo grossolano frammisto a materiali sciolti pseudocoesivi, in presenza di macrovuoti e/o cavità e di abbondanti venute d'acqua.

Il problema di dilavamento delle miscele cementizie d'iniezione da parte dell'acqua e della dispersione delle medesime attraverso vuoti e/o fratture viene infatti risolto mediante utilizzo di resine silicatiche espansive che, opportunamente preiniettate in fase di perforazione, consentono, ove necessario, di realizzare il tamponamento delle miscele cementizie, che vengono iniettate in fasi successive a pressioni via via crescenti.

Si raggiunge così il duplice scopo di impermeabilizzare e intasare i vuoti e le cavità (grazie alle caratteristiche di rigonfiamento delle particolari miscele chimiche utilizzate) e di incrementare la coesione e la resistenza meccanica del materiale trattato (grazie alla capacità di penetrazione delle miscele cementizie di tipo stabilizzato sotto elevati valori di

pressione e in condizioni di adeguato preconfinamento).

L'iniezione controllata delle miscele cementizie venne quindi effettuata da idonei tubi valvolati (n. 1 valvola/ml) di tipo misto vetroresina/acciaio (rispettivamente per la porzione all'interno della sezione di scavo finale e per quella all'esterno della stessa). Tale scelta era motivata dall'esigenza di consentire una più agevole demolizione e rimozione delle porzioni di tubo in fase di scavo, garantendo nel contempo, grazie all'elevata resistenza al taglio della vetroresina (resina poliestere-termoindurente rinforzata con fibre di vetro in percentuale non inferiore al 50% in peso), una resistenza allo scoppio e una capacità di armatura del terreno sostanzialmente equivalenti a quelle dei tubi in acciaio.

I limiti di pressione raggiungibili in fase di iniezione con attrezzature convenzionali (fino a 100 bar) sono condizionati dalla tenuta e dalla resistenza allo scoppio dei tubi e dei dispositivi di iniezione (valvole, otturatori, circuiti idraulici) e risultano in genere sufficienti a garantire l'iniettabilità di materiali chiusi e addensati a prevalente frazione fine, quali i riempimenti milonitici presenti nelle discontinuità tettoniche principali.

Particolare importanza riveste infine la scelta delle miscele di iniezione e dei parametri esecutivi.

Per quanto riguarda le miscele chimiche, si scelse l'impiego di una resina bicomponente in stato fluido a base di silicato sodico, caratterizzata da un fattore di schiumatura (rapporto tra volume finale dopo l'iniezione e volume iniziale dei singoli componenti) superiore a 25 (nel caso di espansione libera) e da un'elevata velocità di reazione (≈ 120 s). Nei riguardi della compatibilità con l'ambiente, tale miscela era particolarmente indicata in quanto priva di idrocarburi fluoroclorinati, oltre che essere garantita non inquinante in presenza di falda (requisito assai importante nel caso in esame).

Per le iniezioni di ricompressione e consolidamento, si scelse una miscela cementizia confezionata con cemento a finezza ≈ 5.000 cm²/g Blaine (tipo R425), con rapporto di base acqua/cemento A/C = 0.7 in peso, stabilizzata mediante additivo colloide (bentonite) in percentuale pari al 5-6% rispetto al peso del cemento. Alcuni di questi parametri (e in particolare il rapporto A/C e la percentuale di additivo colloide) vennero poi sensi-

bilmente modificati in corso d'opera, in relazione a particolari esigenze esecutive (compatibilità con le caratteristiche delle attrezzature e dei circuiti di alimentazione e di pompaggio impiegati).

Il valore della portata di iniezione, eseguita mediante doppio otturatore interno al tubo valvolato, fu definito sulla base delle risultanze fornite da alcune iniezioni di prova, effettuate per la messa a punto del sistema.

In particolare, fu prevista l'iniezione a portata costante di un volume massimo di miscela di 300 l/valvola commisurato sia al valore di porosità media della fascia d'ammasso da consolidare (ipotizzato inizialmente pari a $n = 0.30$) sia alla densità media delle iniezioni (una ogni $2 \div 3 \text{ m}^2$).

Fa es utive

Dopo aver constatato l'impossibilità di riprendere l'avanzamento del foro pilota sinistro dalla prog. 1.290 m con la stessa fresa, vennero realizzati consolidamenti proiettati verso la canna di valle in modo da consentire l'avanzamento in sicurezza della fresa (TBM $\varnothing 4,50 \text{ m}$) che nel frattempo aveva iniziato lo scavo del foro pilota destro. Questo ha consentito, a scavo ultimato, la realizzazione, oltre la zona di faglia, di un *by-pass* di collegamento tra i due cunicoli, rendendo in tal modo possibile l'esecuzione di trattamenti più intensi ed efficaci (in quanto lanciati più a ridosso della zona da trattare) e quindi di recuperare lo scudo e proseguire lo scavo della canna di monte.

In accordo a tali ipotesi programmatiche, gli interventi di preconsolidamento per l'attraversamento della zona di faglia vennero articolati in successione secondo le seguenti fasi esecutive:

1. trattamenti di preconsolidamento per l'attraversamento della zona di faglia tra le progr. 1.260 \div 1.300 m con fresa TBM $\varnothing = 4.50 \text{ m}$ in canna di valle (canna dx). Tali interventi sono consistiti nell'esecuzione di iniezioni di tipo misto lanciate a inclinazione sub-orizzontale del cunicolo di monte verso quello di valle (vedi Fig. 6);
2. interventi per il recupero dello scudo rimasto bloccato a progr. = 1.290 m nel cunicolo sinistro (di monte). Dopo lo scavo del cunicolo destro e la realizzazione di un *by-pass* obliquo di collegamento con l'adiacente cunicolo di monte a progr. 1.300 m, furono effettuati inter-

venti di preconsolidamento dell'ammasso roccioso al contorno del foro pilota consistenti in iniezioni di tipo misto, lanciate a inclinazione sub-orizzontale da un'apposita camera di lavoro antistante la progressiva di arresto della fresa ricavata a progr. 1.300 m, in corrispondenza all'intersezione con il *by-pass*. Dopo aver verificato l'esito favorevole degli interventi, fu realizzato, mediante impiego combinato di mezzi di abbattimento meccanici e chimici (martello demolitore - dirompenti chimici), lo scavo del setto di roccia ($L = 10 \text{ m}$) tra camera di lavoro e scudo della fresa e quest'ultimo venne estratto dal cunicolo (vedi Fig. 7 e Foto 4 e 5).

3. trattamenti di preconsolidamento dell'ammasso roccioso al contorno della sezione di scavo finale della canna di valle (canna dx) mediante iniezioni radiali lanciate dal foro pilota (vedi Fig. 8).

Tali interventi sono stati effettuati precedentemente all'esecuzione dello scavo di allargo con fresa alesatrice;

4. interventi di preconsolidamento dell'ammasso roccioso al contorno della sezione di scavo finale della canna di monte (canna sx) mediante iniezioni radiali lanciate dal foro pilota.

Tutti gli interventi, definiti e dimensionati sulla base dei criteri progettuali illustrati al precedente cap. 3.3.3.1, sono stati effettuati precedentemente allo scavo di allargo, e hanno dato esito positivo in tutte le quattro fasi di intervento appena descritte, confermando la validità proget-

tuale delle metodologie adottate.

Visto il ritardo accumulato nell'avanzamento della canna sinistra (che si trovava con il solo cunicolo pilota scavato fino a prog. 1.290 m) e tenuto conto dell'impossibilità di utilizzare la fresa alesatrice su tutta la galleria, in quanto il foro pilota era stato realizzato solo fino a prog. 1.290 m, si decise di abbandonare questa soluzione e passare (limitatamente alla canna in questione) allo scavo in tradizionale con abbattimento mediante esplosivo.

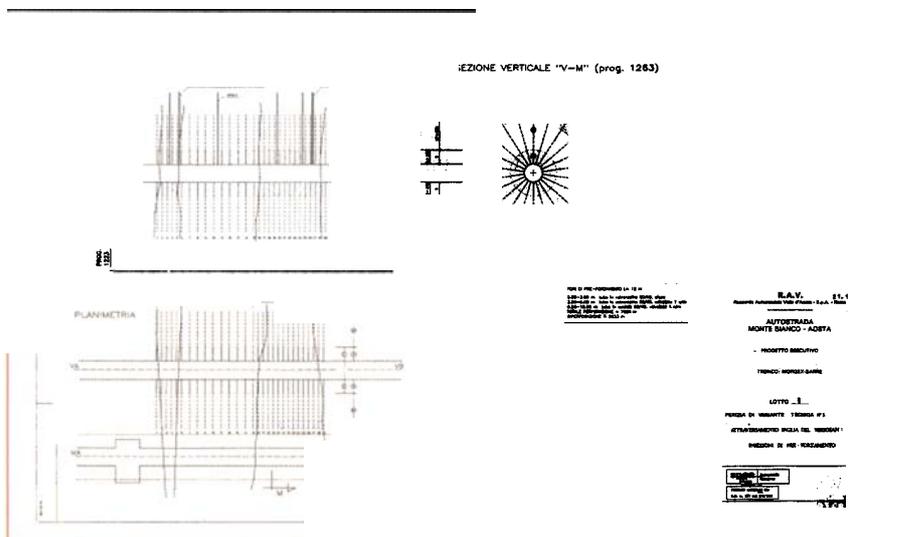
3.3.3.3 Sistema di drenaggio per la regimazione idraulica della galleria in fase di esercizio

Onde garantire in fase di esercizio la regimazione controllata del comportamento idraulico della galleria nella tratta ricadente nella zona di faglia principale (tra le progressive 1.260 \div 1.280 m del cunicolo destro) si sono realizzati, a seguito del completamento degli interventi di preconsolidamento, drenaggi sub-orizzontali aventi lunghezza 25 \div 40 m previa installazione, in perforazioni $\varnothing \geq 101 \text{ mm}$, di tubi in PVC microfessurati opportunamente protetti con calza in geotessile.

Si è inoltre predisposto un sistema di rilevamento periodico dei parametri idraulici in gioco (portate idriche e battenti idraulici sulla galleria).

Le acque globalmente emunte dall'insieme dei dreni sono raccolte in un tubo collettore attrezzato con un apposito

Fig. 8 - Schema dei trattamenti di preconsolidamento di 3ª fase.



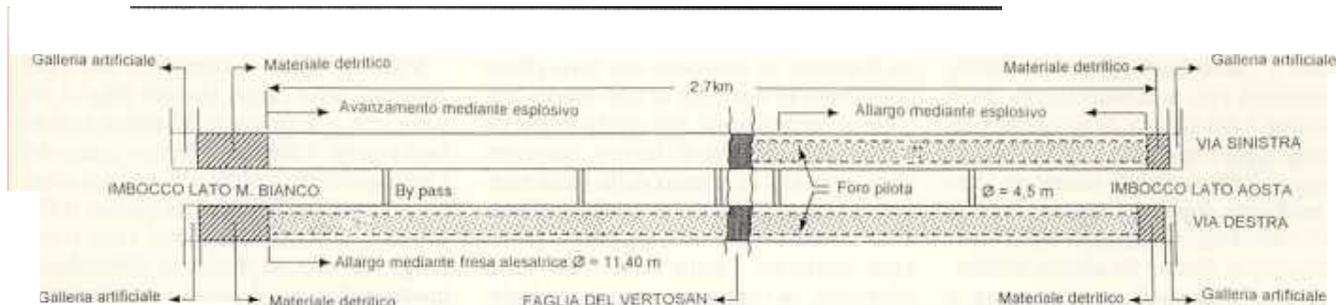


Fig. 9 - Schema planimetrico delle metodologie d'avanzamento adottate per la galleria Avise.

strumento misuratore di portata, posto a monte della confluenza con il tubo di smaltimento principale, che corre in senso longitudinale inferiormente alla quota di chiave dell'arco rovescio.

3.4 Monitoraggio vibrometrico in canna destra

Dato il ridotto interesse esistente tra i due forni della galleria Avise (solo 22 m), si è dovuta attentamente valutare la possibilità che le vibrazioni indotte dall'impiego di esplosivo per l'avanzamento della canna sinistra potessero causare problemi non trascurabili alla canna destra già scavata con fresa alesatrice. Di conseguenza, a partire dal mese di luglio 1992, fu affidato alla Geoconsult l'incarico di monitorare in continuo gli effetti indotti sulla canna destra dallo scavo, eseguito in tradizionale, della galleria gemella.

In particolare, il comportamento tenso-deformativo del prerivestimento di *spritz-beton* e quello del rivestimento di calcestruzzo della via destra della galleria sono stati controllati in funzione della velocità massima delle particelle indotta dal brillamento delle volate, in modo da prevenire l'insorgere di eventuali fenomeni fessurativi.

Le sollecitazioni nei rivestimenti, infatti, sono correlate, tramite l'impedenza caratteristica dell'ammasso roccioso, alla velocità delle particelle al passaggio del transiente. Questa, a sua volta, è un parametro delle onde misurabili in situ con apposita strumentazione e correlabile, con le dovute approssimazioni, alla quantità di esplosivo e alla distanza fra punto di sparo e punto di misura.

Le misure vibrometriche di controllo sono state eseguite con uno strumento tipo Sismoter DV 8004 triassiale, che veniva ubicato di volta in volta in canna

destra in corrispondenza della progressiva dove avveniva il brillamento della volata nella canna adiacente.

Successivamente a questo strumento è stato affiancato un Sismoter C3. I sensori sono stati resi solidali alla roccia o al rivestimento tramite staffe metalliche cementate.

Il Sismoter DV 8004 fornisce un grafico continuo delle tre componenti della velocità di vibrazione indotta nella roccia, unitamente ai valori massimi di ciascuna componente.

Facendo riferimento a questa grandezza (e in particolare alla componente totale ottenuta come modulo del vettore risultante delle tre componenti della velocità di vibrazione) si ottiene la risultante:

$$R_a = \sqrt{V^2 + T^2 + L^2} \quad (1)$$

Poiché i valori massimi delle tre componenti V (verticale), T (trasversale) e L (longitudinale) non si verificano mai contemporaneamente nello stesso istante, il valore di R_a (risultante asincrona) non è reale ed è sempre maggiore di quello della risultante sincrona R_s (risultante calcolata in ogni istante come somma delle tre componenti V , T , e L).

Sulla base della bibliografia e dall'esperienza si può assumere che il valore massimo della componente sincrona sia pari a:

$$R_s = 0,85 R_a$$

Il vibrometro tipo Sismoter C3 permette di acquisire in continuo tutti gli eventi che inducono vibrazioni nel terreno, registrando i valori massimi delle tre componenti della velocità di vibrazione in uno stesso istante. Di conseguenza, la componente totale ottenuta con la formula (1) coincide, in tal caso, con la componente sincrona reale.

Da considerazioni teoriche sulla propagazione delle onde in un mezzo elastico, è possibile correlare in ogni punto le sollecitazioni indotte con la velocità delle particelle, attraverso le formule:

$$\begin{aligned} \sigma &= \delta C_1 V_1 && \text{(MPa)} \\ \tau &= \delta C_2 V_2 && \text{(MPa)} \end{aligned}$$

- δ = densità del mezzo
- C_1 = velocità di propagazione delle onde P di compressione
- C_2 = velocità di propagazione delle onde S di taglio
- V_1 = velocità di vibrazione delle particelle nella direzione di propagazione dell'onda
- V_2 = velocità di vibrazione delle particelle in direzione ortogonale alla propagazione dell'onda

con:

$$C_1 = \frac{E}{\delta} \sqrt{\frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-\nu)}}$$

$$C_2 = \frac{E}{\delta} \sqrt{\frac{1}{2(1+\nu)}}$$

Con le suddette relazioni, e con le approssimazioni dovute all'incertezza dei dati utilizzati, è possibile valutare i valori delle sollecitazioni indotte.

Per esempio, assumendo a favore della sicurezza:

$$\begin{aligned} \delta &= 2.400 \text{ t/m}^3 \\ C_1 &= 3.500 \text{ m/s} \quad (\text{per un cls } R_{bk} \text{ 300}) \\ C_2 &= C_1 \sqrt{3} = 2.020 \text{ m/s} \end{aligned}$$

e utilizzando i valori di velocità di vibrazione longitudinale (V_1) e verticale (V_2) registrati (rispettivamente pari a

40 mm/s e 20 mm/s), si è ottenuto:

$$\sigma = 2400 \times 3500 \times 0,04 = 0,34 \text{ MPa} \approx 3,4 \text{ kg/cm}^2$$

$$\tau = 2400 \times 2020 \times 0,02 = 0,097 \text{ MPa} \approx 0,97 \text{ kg/cm}^2$$

Questo valore della sollecitazione dinamica di trazione, dovuto alla riflessione delle onde P su una superficie di discontinuità, pur non essendo elevato, va considerato, anche se con effetto transitorio, nello stato di sollecitazione complessivo agente sul rivestimento di calcestruzzo.

Alla luce di quanto sopra, si è potuto scegliere lo schema di volata e la serie completa dei ritardi di detonazione, senza trascurare, comunque, di eseguire un'ispezione continua del rivestimento di calcestruzzo della canna destra onde essere in grado di individuare tempestivamente l'insorgenza di eventuali fessurazioni nello stesso.

Per garantirsi dal rischio di distacco di placche di *spritz-beton*, si può sempre far riferimento ad una velocità di vibrazione della roccia che non induca in essa fessurazioni più o meno estese, che, vista la vicinanza tra le due canne, potrebbero interessare il contatto tra roccia e pre-rivestimento della canna destra contigua, perturbando la stabilità di quest'ultimo.

La bibliografia riporta i valori massimi di velocità di vibrazione da non superare per non provocare fessurazioni nella roccia.

Nel caso della galleria Avise si sono considerati accettabili valori compresi tra i 50 e i 100 mm/s, che si possono considerare di assoluta sicurezza, dato che secondo la bibliografia quelli per i quali si riscontrano le prime micro-fessure nella roccia si attestano sui 200-250 mm/s.

4. CONCLUSIONI

Il progetto per la realizzazione della galleria Avise prevedeva inizialmente l'esecuzione di un foro pilota mediante TBM di 4,5 m di diametro al centro delle canne destra e sinistra. Il foro pilota sarebbe stato in seguito allargato utilizzando una fresa alesatrice di 11,4 m di diametro.

A causa dei problemi associati con l'attraversamento della faglia del Vertosan, le tecnologie di scavo utilizza-

te in realtà sono state diverse nelle due canne, essendosi potuto mantenere l'impiego della fresa alesatrice solo per lo scavo di allargò di quella destra.

La canna sinistra, invece, è stata realizzata tramite avanzamento tradizionale con esplosivo per la metà lato M. Bianco e tramite avanzamento previo foro pilota e successivo allargò con esplosivo per l'altra metà della stessa (Fig. 9).

A consuntivo, l'analisi dei risultati ottenuti con i due tipi di avanzamento in condizioni d'ammasso similari permette di trarre alcune interessanti conclusioni.

La produzione ottenuta durante l'avanzamento a partire dal lato M. Bianco verso la faglia di Vertosan nell'allargamento della canna destra mediante fresa alesatrice è stata mediamente di 7,38 m/giorno (compresi i tempi d'interruzione per problemi operativi quali l'accumulo di polveri nel foro pilota, ecc.), mentre quella ottenuta nello scavo della canna sinistra in tradizionale sull'intera sezione è stata mediamente di 5,4 m/giorno.

Analogamente, il confronto tra le produzioni corrispondenti all'allargamento del foro pilota ottenute rispettivamente con la fresa alesatrice (canna destra) e con l'esplosivo (canna sinistra), questa volta riferite alla tratta di galleria tra la faglia del Vertosan e il portale lato Aosta, dà valori medi di 13,2 m/giorno (con 25,5 m/giorno di picco) per il primo contro i 7,7 m/giorno del secondo applicato su un solo fronte. Applicando l'allargò con esplosivo su due fronti (uno da Aosta verso la faglia del Vertosan, l'altro viceversa) la produzione conseguita è stata la stessa, 13,2 m/giorno, di quella conseguita con la fresa alesatrice. Appare importante osservare che l'avanzamento con esplosivo è sempre avvenuto secondo le tecniche di sparo controllato per minimizzare il danneggiamento della roccia al contorno dello scavo.

Questi dati, se si confrontano con le caratteristiche di qualità dell'ammasso roccioso attraversato, dimostrano che l'avanzamento di tipo tradizionale si adatta meglio quando queste sono significativamente variabili, d'altra parte l'avanzamento con fresa alesatrice può fornire produzioni anche assai più elevate dove l'ammasso roccioso è di buona qualità, ma esse sono suscettibili di ridursi percentualmente in maniera assai più marcata che con lo scavo tradizionale al diminuire di questa.

La fresa alesatrice si è dimostrata molto superiore allo scavo tradizionale nei riguardi della preservazione della qualità della roccia al contorno dello scavo. Per contro per il suo impiego necessita della presenza di un cunicolo pilota dalle pareti ben stabili cui ancorarsi saldamente, altrimenti i *gripper*, anziché fornire l'appoggio necessario per spingere la testa in avanti, spingono il terreno all'interno del foro pilota.

In conclusione, le esperienze tratte dalla realizzazione della galleria Avise dimostrano che in ammassi rocciosi sani o poco fratturati sollecitati, in seguito all'avanzamento, in campo elastico o quasi, lo scavo mediante fresa alesatrice è più efficiente di quello con esplosivo. L'esistenza di zone di faglia importanti, come quella del Vertosan, anche se predette dal foro pilota, può però causare ritardi del 25% ÷ 50% (su circa 3 chilometri di galleria), per cui la scelta della tecnologia d'allargò è opportuno che venga effettuata dopo l'esecuzione del foro pilota.

PIETRO LUNARDI

(Procuratore Tecnico Rocksoil)

VINCENZO POZZI

(Direttore Tecnico RAV, Fintecna-Gruppo IRI)

BIBLIOGRAFIA

- ROCKSOIL S.p.a., *Il Raccordo Autostradale Valle d'Aosta: aspetti progettuali riguardanti le opere sotterranee*, Quarry and Construction, febbraio 1991.
- A. DA VIÀ et al., *Autostrada Traforo del Monte Bianco-Aosta: Tronco Morgex-Sarre*, Quarry and Construction, febbraio 1991.
- A. DA VIÀ et al., *Avise tunnel revisited*, Atti del Congresso Internazionale su "Tunnelling and Ground Conditions", Cairo 3-7 aprile 1994.
- V. POZZI, *Galleria Avise: interventi di preconsolidamento della zona di faglia del Vertosan*, Quarry and Construction, aprile 1994.