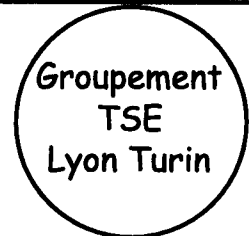




Questo progetto è cofinanziato dall'Unione europea (TEN-T)

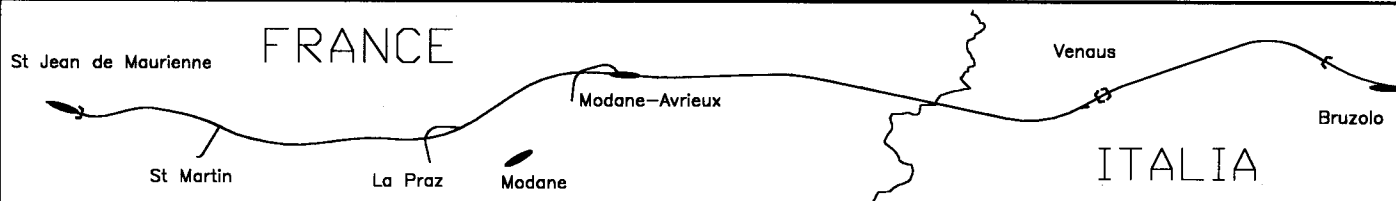


Ce projet est cofinancé par l'Union européenne (RTE-T)



**NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO TRANSALPINO TORINO - LIONE**  
**NOUVELLE LIAISON FERROVIAIRE TRANSALPINE LYON - TURIN**  
**TRATTA CONFINE DI STATO ITALIA/FRANCIA - BRUZOLO**

**INFRASTRUTTURE FERROVIARIE STRATEGICHE**  
**DEFINITE DALLA LEGGE OBIETTIVO N°443/2001**



**PROGETTO PRELIMINARE**

**TUNNEL DI BASE ZONA IMBOCCO LATO ITALIA E TUNNEL DI BUSSOLENO**  
**RELAZIONE TECNICA**

Scala

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato
0	EMISSIONE	GATTI	28/10/2002	MAGNORFI	29/10/2002	OGNIBENE	31/10/2002	
A	EMISSIONE PER PP	GATTI	29/01/2003	MAGNORFI	31/01/2003	OGNIBENE	05/02/2003	

Rif.Doc.	P	P	2	0	8	5	T	S	E	3	R	E	G	X	:	:	G	:	:	:	3	1	1	6	A
	fase	n° S.C.	emettente			tipo doc.	codice geografico			oggetto			n° doc.			indice									

## INDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE.....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA DI LAVORO .....</b>	<b>6</b>
2.1	Fase A – Acquisizione dati .....	7
2.1.1	Fase A1 – Esame della documentazione pregressa .....	7
2.1.2	Fase A2 – Acquisizione dei dati funzionali e trasportistici .....	7
2.2	FASE B – PROGETTAZIONE PRELIMINARE .....	8
2.2.1	Fase B1 – Fase conoscitiva .....	8
2.2.2	Fase B2 – Fase di diagnosi .....	9
2.2.3	Fase B3 – Fase di terapia.....	12
<b>3</b>	<b>DESCRIZIONE DELLE OPERE IN SOTTERRANEO .....</b>	<b>13</b>
3.1	Gallerie di linea .....	13
3.1.1	Sezione con avanzamento in tradizionale.....	13
3.1.2	Sezione con avanzamento meccanizzato.....	14
3.2	Cameroni di scambio imbocchi val Cenischia .....	14
3.3	By-pass di collegamento.....	16
3.3.1	Tipo R0 .....	16
3.3.2	Tipo R1 .....	16
3.3.3	Tipo R2 .....	17
3.4	Siti di intervento e di ventilazione .....	17
3.4.1	Sito di intervento di Venaus .....	17
3.4.2	Sito di ventilazione di Foresto.....	19
3.5	Locali tecnici .....	20
3.5.1	Locali tecnici in sotterraneo .....	20
3.5.2	Locali tecnici all’aperto.....	21
3.6	Discenderie.....	22
3.6.1	Pozzo di ventilazione di Val Clarea .....	22
3.6.2	Finestra di Foresto.....	22
3.7	Opere di imbocco.....	23
3.7.1	Imbocco Est Tunnel di Base.....	23
3.7.2	Imbocco Ovest Tunnel di Bussoleno.....	24
3.7.3	Imbocco Est Tunnel di Bussoleno.....	25
3.7.4	Imbocchi discenderie.....	25

<b>4</b>	<b>SINTESI DEL QUADRO GEOLOGICO-GEOMECCANICO (FASE CONOSCITIVA)...</b>	<b>27</b>
<b>5</b>	<b>METODOLOGIE DI SCAVO - ANALISI DEL COMPORTAMENTO DEFORMATIVO ALLO SCAVO (FASE DI DIAGNOSI) .....</b>	<b>30</b>
<b>6</b>	<b>DEFINIZIONE DELLE SEZIONI DI AVANZAMENTO (FASE DI TERAPIA).....</b>	<b>32</b>
6.1	Gallerie di linea - Avanzamento in tradizionale.....	32
6.2	Galleria di linea - Avanzamento con fresa .....	36
6.2.1	Avanzamento con TBM-EPB – Tunnel Bussoleno, imbocco Bruzolo .....	37
6.2.2	Avanzamento con TBM aperta – Tunnel di Base, massiccio d’Ambin.....	38
6.3	Profili geogici-tecnici .....	40
6.4	Opere accessorie.....	41
6.5	Valutazioni statiche di massima.....	42
6.6	Case-hystories di scavo.....	42
<b>7</b>	<b>CONSIDERAZIONE SULL’INTERASSE DELLE GALLERIE DI LINEA.....</b>	<b>44</b>
<b>8</b>	<b>PROGRAMMA DI MONITORAGGIO.....</b>	<b>47</b>
<b>9</b>	<b>FASAGGI – ANALISI DELLE OPERE CIVILI.....</b>	<b>49</b>
<b>10</b>	<b>CONCLUSIONI.....</b>	<b>51</b>
<b>11</b>	<b>BIBLIOGRAFA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO.....</b>	<b>52</b>
<b>12</b>	<b>APPENDICE 1 – APPROCCIO PROGETTUALE SECONDO IL METODO ADECO-RS58</b>	
<b>13</b>	<b>ALLEGATI.....</b>	<b>59</b>

## 1 INTRODUZIONE

Nella presente nota si descrivono le problematiche progettuali e gli aspetti tecnici relativi al progetto preliminare del tunnel di Base (tratta italiana), del tunnel di Bussoleno e delle opere ad essi accessorie, riportando la descrizione dei requisiti funzionali, degli interventi previsti e delle modalità di realizzazione.

In particolare, oltre alle gallerie di linea, si sono esaminate le seguenti opere:

- Tratte con cameroni a doppio binario, in corrispondenza degli imbocchi in Val Cenischia;
- By-pass di collegamento tra le gallerie di linea;
- Sito di intervento, in corrispondenza dell'intersezione tra la galleria di Venaus ed il pozzo della Val Clarea nel tunnel di Base;
- Sito di ventilazione in corrispondenza della finestra di Foresto nel tunnel di Bussoleno;
- I locali tecnici in sotterraneo, previsti per la gestione degli impianti di ventilazione e di sicurezza e per l'organizzazione della sicurezza in esercizio;
- Le discenderie, quali il pozzo di ventilazione della Val Clarea per il tunnel di Base (tratta italiana) e la finestra di Foresto nel tunnel di Bussoleno;
- Le opere di imbocco, in particolare modo delle gallerie di linea.

Tali opere fanno parte del "Nuovo Collegamento Ferroviario Torino – Lione", tratta internazionale.

Si riporta dapprima una breve descrizione della metodologia di lavoro impiegata, evidenziando i temi approfonditi in fase di acquisizione dati e la successione delle fasi progettuali percorse.

Dopo una descrizione funzionale delle opere, si è quindi proceduto alla definizione di un sintetico quadro geologico geomeccanico (fase conoscitiva), per un approfondimento del quale si rimanda alle specifiche relazioni geologiche e geomeccaniche, all'individuazione del comportamento dell'ammasso allo scavo (fase di diagnosi) ed alla scelta delle modalità di avanzamento da applicare (fase di terapia), sia in tradizionale che mediante scavo meccanizzato.

In merito alla scelta delle modalità realizzative delle gallerie, oltre alle considerazioni tecniche esposte nel seguito, un ruolo fondamentale hanno avuto le analisi condotte sui “tempi e costi” di esecuzione dell’opera, discusse e descritte in un apposito elaborato; tali studi hanno permesso di definire la soluzione ottimale riguardo al numero dei fronti di scavo ed alle risorse da prevedere.

La soluzione finale di riferimento prevede, per il tunnel di Bussoleno e per la tratta italiana del tunnel di Base:

- Avanzamenti in tradizionale, dall’imbocco est del tunnel di base, per 1400 m circa, nella tratta di galleria interessata da ammassi appartenenti alla zona Piemontese, quali micascisti, gneiss di Charbonnel e carnirole, con probabile presenza di acqua; in tale contesto geomeccanico, la scelta di adottare avanzamenti con modalità in tradizionale è sembrata più conservativa e sicura, in quanto il comportamento allo scavo di questi ammassi pone seri problemi all’adozione di macchine di scavo, dovendosi sostenere il fronte di scavo, gestire possibili elevate convergenze e pressioni idrostatiche al contorno del cavo. L’adozione dello scavo in tradizionale permette inoltre di meglio gestire la realizzazione dei cameroni previsti all’imbocco della galleria. A seguire, nell’ambito della zona Brianzonese e nel gruppo della Clarea, gli avanzamenti vengono condotti impiegando una TBM aperta con gripper.
- Avanzamenti in tradizionale dall’imbocco ovest del tunnel di Bussoleno, così da realizzare la tratta in cameroni e superare il tratto di galleria interessata dalle rocce verdi, per quali è previsto un comportamento molto spingente.
- Avanzamenti con TBM del tipo EPB, a bilanciamento del fronte mediante pressioni di terra, per l’imbocco est del tunnel di Bussoleno; in particolare si dovrà prevedere avanzamenti a fronte chiuso, “close mode”, per la tratta iniziale dall’imbocco caratterizzata dal conoide e da ammassi alquanto fratturati.
- Infine si procederà allo scavo della finestra di Foresto, la cui esecuzione è principalmente da ricondursi a necessità di tipo impiantistico (sito di ventilazione), che consentirà comunque di operare avanzamenti in tradizionale lungo le gallerie di linea, in direzione dell’imbocco ovest del tunnel di Bussoleno, ottimizzando i tempi complessivi di realizzazione dell’opera.

Per lo studio delle problematiche relative ai cantieri, individuazione delle aree, organizzazione dei campi base e dei campi industriali, nonché per lo studio delle problematiche legate alla gestione ed alla valorizzazione dello smarino, si rimanda ad apposite relazioni tecniche.

L'ultima parte della relazione è dedicata alla descrizione dei "fasaggi" e degli "scenari di sicurezza" previsti per il raggiungimento della configurazione finale, prevedente due gallerie affiancate, una per ciascuna direzione di marcia.

## 2 METODOLOGIA DI LAVORO

Si richiama brevemente la metodologia di lavoro che è stata seguita per l'analisi delle problematiche tecniche connesse alla realizzazione delle opere civili del tunnel di Base e di Bussoleno.

La prima fase di lavoro ha previsto un'attività di "acquisizione dati" (Fase A), relativa sia agli studi pregressi condotti sul collegamento ferroviario a partire dal 1990, in termini di geologia, geomeccanica e modalità di scavo (Fase A1), sia per quanto attiene all'acquisizione dei dati funzionali e trasportistici elaborati nell'ambito dei Lotti 1, 2 e 3 (progettazione dei tracciati e delle esigenze di esercizio).

La seconda fase di lavoro, relativa alla attività di progettazione preliminare (Fase B), si è articolata nei momenti principali di:

- Fase B1 Definizione del quadro geologico e geomeccanico di progetto ed individuazione di eventuali indagini geognostiche integrative da condurre in fase di progettazione definitiva ed esecutiva (fase conoscitiva)
- Fase B2 Analisi delle problematiche progettuali e definizione del comportamento degli ammassi allo scavo, in funzione del quadro geologico-geomeccanico e delle geometrie di avanzamento (fase di diagnosi)
- Fase B3 Scelta delle tipologie di avanzamento e degli interventi previsti, alla luce delle modalità di scavo (tradizionale o meccanizzato) ed individuazione di un sistema di monitoraggio che ne consenta la verifica in corso d'opera (fase di terapia)

Nel seguito si descrivono più in dettaglio le fasi di lavoro sopra delineate.

## **2.1 Fase A – Acquisizione dati**

### **2.1.1 Fase A1 – Esame della documentazione pregressa**

In questa fase si è proceduto all'esame della documentazione tecnica prodotta nell'ambito del GEIE Alpetunnel, con riferimento all'elenco elaborati reso disponibile in fase di gara e approfondendo i seguenti temi:

- Tema 1 – Indagini geologiche, con esame della documentazione relativa ai sondaggi, alle indagini sismiche, agli studi strutturali, alla cartografia topografica e geologica; particolarmente utile sarà l'esame delle esperienze condotte nell'ambito dei lavori in sotterraneo dell'impianto idroelettrico di Pont Ventoux;
- Tema 2 – Gallerie geognostiche: studi specifici sulla galleria di Venaus;
- Tema 6 – Studi generali. Si è ritenuto particolarmente importante l'esame dettagliato del rapporto finale della missione "Bonnard&Gardel", relativa alla caratterizzazione geologico-geomeccanica e alle modalità di scavo e avanzamento, nonché gli studi sulla metodologia e logistica dello scavo condotti applicando l'analisi DAT.

Per una descrizione dettagliata delle analisi condotte e per i riferimenti bibliografici dei documenti esaminati ed impiegati quali allegati al presente progetto preliminare si rimanda alla "Relazione geologica generale", documento APS 2085 TSE3 REXX::GO::311, ed alla "Relazione geomeccanica", documento APS 2085 TSE3 REXX::G::3112.

### **2.1.2 Fase A2 – Acquisizione dei dati funzionali e trasportistici**

Al fine di procedere alla redazione della progettazione preliminare delle opere civili, è stato necessario acquisire le prime conclusioni degli studi condotti nell'ambito dei Lotti 1 e 2 relativamente agli scenari funzionali e di sicurezza, nonché reperire i dati trasportistici dei tunnel sia in merito ai tracciati che alle sagome interne. In particolare sono stati raccolti i seguenti elementi:



- Individuazione degli scenari funzionali della tratta da approfondire nella progettazione preliminare, con definizione dei criteri per la sicurezza;
- tracciati plano-altimetrico del tunnel di Base, del tunnel di Bussoleno e delle opere accessorie, quali finestre, stazioni sotterranee e loro innesti con la galleria di linea;
- sezioni trasversali delle gallerie, con definizione delle carpenterie interne considerate le sagome limiti e i dispositivi di sicurezza;
- definizione dei volumi tecnici e per la gestione della sicurezza: nicchie, cameroni, bypass, stazioni per impianti tecnici di ventilazione o elettrici.

Una descrizione dettagliata degli aspetti impiantistici e di sicurezza è contenuta nei relativi documenti specialistici.

## **2.2 FASE B – PROGETTAZIONE PRELIMINARE**

### **2.2.1 Fase B1 – Fase conoscitiva**

Nell'ambito della fase conoscitiva, si è preceduto ad una prima analisi dei dati geologico-tecnici ed alla definizione del quadro geologico-geomeccanico, indispensabile per compiere l'analisi degli equilibri naturali preesistenti nell'ammasso allo scavo della galleria e potere svolgere correttamente la successiva fase di diagnosi.

Sono stati esaminati i dati derivanti dalle campagne geognostiche ad oggi condotte, riassumibili in:

- Indagini condotte in superficie, quali rilievi geologici di superficie, rilievi geostrutturali, esami geomorfologici, definizione dei bacini idrogeologici;
- Indagini profonde, quali sondaggi, indagini sismiche, strumentazione piezometrica e di monitoraggio dei movimenti nell'ammasso;
- Gallerie geognostiche, relativamente ai dati ad oggi disponibili (alcune finestre sono di prossimo scavo);
- Prove in situ e di laboratorio, realizzate in foro e su campioni prelevati a differenti profondità da piano campagna.

al fine di comprendere e definire i seguenti aspetti:

- Litologia degli ammassi rocciosi, e loro successione lungo il tracciato delle gallerie;
- Morfologia dell'area interessata dai lavori, con particolare riferimento alle zone d'imbocco delle gallerie;
- Tettonica ed assetto geostrutturale, con individuazione dei principali sistemi di discontinuità (stato, giacitura, grado di fatturazione) e dei lineamenti tettonici;
- Quadro idrogeologico generale di riferimento (*uno studio specifico è stato affidato da LTF esternamente al presente incarico*);
- Caratteristiche geomeccaniche, con definizione, per ciascun litotipo, dei parametri di resistenza e di deformabilità e dello stato tensionale in situ, in funzione delle coperture e del grado di separazione strutturale;
- Leggi costitutive dei materiali a loro comportamento durante lo scavo: fenomeni di rigonfiamento, squeezing, fluage, rilasci tensionali;
- Caratteristiche di abrasività e di fresabilità (per la valutazione delle caratteristiche dello scavo meccanizzato).

A completamento di questa fase di studio si è proceduto alla redazione di un "Profilo geologico-geomeccanico" di massima, con indicazione delle indagini eseguite, e possibilmente da eseguire, e della caratterizzazione geomeccanica dei materiali secondo la classificazione tecnica di Bieniaswki e di Barton.

### 2.2.2 Fase B2 – Fase di diagnosi

In questa fase sono state esaminate le principali problematiche progettuali per ciascuna opera, individuando la soluzione tecnica più appropriata in termini di raggiungimento di adeguati fattori di sicurezza e di ottimizzazione dei tempi e costi.

La progettazione delle modalità di avanzamento in sotterraneo in tradizionale è stata principalmente condotta secondo l'approccio del "Metodo per l'Analisi delle Deformazioni Controllate nelle Rocce e nei Suoli - ADECO-RS" (per un approfondimento sulle caratteristiche del metodo e per i riferimenti bibliografici si rimanda all'appendice 1).

Sulla base dei dati raccolti in fase di studio geologico e caratterizzazione del mezzo (Fase B1), vengono condotte le previsioni di comportamento tenso-deformativo in assenza di interventi; si tratta di un momento fondamentale nella progettazione delle gallerie: solo riuscendo ad analizzare in che modo ed in che punto si sviluppano i fenomeni deformativi è possibile scegliere, nelle successive fasi della progettazione, gli interventi più adatti al loro controllo.

La valutazione di come evolve lo stato tensionale a seguito dell'apertura di una galleria è possibile solo attraverso l'attenta analisi dei fenomeni deformativi in quanto essi ci possono dare indicazioni sul comportamento della cavità nei riguardi della stabilità a breve e a lungo termine.

In particolare, l'elemento centrale per l'analisi dell'evoluzione dei fenomeni deformativi al contorno del cavo, attraverso la quale è possibile valutare la stabilità della galleria, è il comportamento del fronte di scavo. Tale comportamento è condizionato da:

- le caratteristiche di resistenza e deformabilità dell'ammasso connesse con le varie strutture geologiche che interessano le gallerie;
- il comportamento del materiale nel breve e lungo termine: rigonfiamento, squeezing, fluage e rilasci tensionali;
- i carichi litostatici corrispondenti alle coperture in gioco;
- la forma e le dimensioni della sezione di scavo;
- lo schema di avanzamento e la tipologia dello scavo (tradizionale o meccanizzato).

Il comportamento del fronte di scavo, al quale è legato quello della cavità, può essere sostanzialmente di tre tipi: “stabile”, “stabile a breve termine” e “instabile”, come di seguito brevemente illustrato.

#### Gallerie a fronte stabile (CASO A)

Se il fronte di scavo è stabile, ciò significa che lo stato tensionale al contorno della cavità in prossimità del fronte si mantiene in campo prevalentemente elastico e i fenomeni deformativi osservabili sono di piccola entità e tendono ad esaurirsi rapidamente.

In questo caso anche il comportamento del cavo sarà stabile (rimanendo prevalentemente in campo elastico) e quindi non si rendono necessari interventi preventivi di consolidamento; il

rivestimento definitivo costituirà allora il margine di sicurezza per la stabilità a lungo termine.

#### Gallerie a fronte stabile a breve termine (CASO B)

Questa condizione si verifica quando lo stato tensionale indotto dall'apertura della cavità supera le caratteristiche di resistenza meccanica del materiale al fronte, che in tal modo non può più avere un comportamento di tipo elastico, ed assume un comportamento di tipo elasto-plastico.

I fenomeni deformativi connessi con tale redistribuzione delle tensioni sono più accentuati che nel caso precedente e producono nell'ammasso roccioso al fronte una decompressione che porta ad una riduzione della resistenza interna dovuta alla formazione di microfratture talora preesistenti e all'aumento della distanza dei legami intermolecolari. Questa decompressione può essere opportunamente controllata e regimata con adeguati interventi di preconsolidamento al fronte e/o di consolidamento al contorno del cavo. In tal caso verrà fornito l'opportuno contenimento all'ammasso che potrà così essere condotto verso la stabilità, ed il rivestimento definitivo costituirà il margine di sicurezza a lungo termine. In caso contrario lo stato tenso-deformativo potrà evolvere verso situazioni d'instabilità del cavo.

#### Gallerie a fronte instabile (CASO C)

L'instabilità progressiva del fronte di scavo è attribuibile ad una accentuazione dei fenomeni deformativi nel campo plastico, che risultano immediati e più rilevanti manifestandosi prima ancora che avvenga lo scavo, oltre il fronte stesso. Di conseguenza tali deformazioni producono una decompressione più spinta nell'ammasso roccioso al fronte e portano ad un decadimento rapido e progressivo delle caratteristiche meccaniche d'ammasso.

Questo tipo di decompressione più accentuata deve essere contenuta prima dell'arrivo del fronte di scavo e richiede pertanto interventi di preconsolidamento sistematici in avanzamento che consentiranno di creare artificialmente quell'effetto arco capace di far evolvere la situazione verso configurazioni di equilibrio stabile.

Per la previsione del comportamento deformativo sono stati impiegati metodi analitici di tipo semplificato; in particolare il metodo che consente di avere in "forma chiusa" una descrizione

del comportamento deformativo al fronte è la teoria delle “Linee caratteristiche”, che si ritiene particolarmente indicata al caso in esame caratterizzato da elevate coperture che determinano condizioni tensionali in situ molto vicine alle ipotesi di base del metodo.

L’applicazione del metodo ha permesso di suddividere il tracciato delle gallerie in tratte a “comportamento deformativo omogeneo”, individuando per ciascuna tratta i particolari dell’evoluzione deformativa e l’entità dei carichi mobilitati dallo scavo.

L’analisi del comportamento deformativo dell’ammasso allo scavo ha inoltre permesso di individuare tratte di galleria dove si è ritenuto vantaggioso, in termini di tempi e costi, prevedere l’impiego di scavo meccanizzato, evidenziando le caratteristiche della TBM da impiegare e quindi la sua tipologia: a fronte aperto/chiuso, con scudo/aperta, con posa dei conci prefabbricati a ridosso del fronte / con getto in opera lungo il back-up.

### **2.2.3 Fase B3 – Fase di terapia**

In questa fase sono stati definiti nell’ambito dei lavori in sotterraneo, le sezioni tipo di avanzamento, individuando gli interventi di contenimento e/o precontenimento necessari per controllare i fenomeni deformativi previsti nella attività precedente ed in considerazione delle modalità di esecuzione degli scavi: tradizionale o meccanizzato.

In particolare, per ogni sezione tipo verranno individuati i campi di variabilità dei livelli deformativi (convergenza ed estrusione), gli eventuali interventi da porre in opera in avanzamento sul fronte, gli interventi di contenimento della cavità, e le fasi esecutive relative ad ogni lavorazione.

In merito alle modalità di scavo, si è analizzata la metodologia tradizionale, prevedente l’impiego di esplosivo e/o di mezzo meccanico puntuale (martellone, escavatore, fresa puntuale), e quella meccanizzata con impiego di idonee TBM, del tipo aperto o EPB.

Quale sintesi delle valutazioni condotte si è prodotto un “Profilo geologico-tecnico” con indicazione degli interventi previsti ed un elaborato grafico riportante le sezioni di avanzamento previste, con indicazione degli interventi.

### 3 DESCRIZIONE DELLE OPERE IN SOTTERRANEO

#### 3.1 Gallerie di linea

La linea ferroviaria è costituita da due gallerie, monobinario, disposte ad un interasse variabile tra 30 m e 50 m.

La sezione libera interna risulta di circa 44 m<sup>2</sup>, e sarà realizzata, a seconda del contesto geomeccanico, mediante scavo in tradizionale, con esplosivo o demolitore meccanico, o impiegando una TBM, a fronte aperto o chiuso. La sezione di scavo, ad esclusione dei fuori scavo, risulta pari a 72 m<sup>2</sup> nell'ipotesi di scavo meccanizzato e variabile tra 76 m<sup>2</sup> e 86 m<sup>2</sup>, in funzione del contesto geomeccanico ovvero dello spessore dei rivestimenti di prima fase e definitivi, nell'ipotesi di scavo in tradizionale.

Per una descrizione dettagliata degli aspetti funzionali ed impiantistici della sezione corrente di galleria di linea si rimanda alle apposite relazioni tecniche. In particolare, nel documento APS 2085 TSE3 NT GAB GC 3306 si definisce la sezione trasversale della galleria ferroviaria, indicando nel dettaglio la sezione libera (43.6 m<sup>2</sup>), le caratteristiche del gabarit ferroviario e di circolazione delle persone, i sottoservizi previsti in corrispondenza dei marciapiedi e sotto la sede ferroviaria, quali condotti di smaltimento delle acque bianche e nere, tubi per gli impianti e per i cavi di fibre ottiche, alta/bassa tensione.

Sono riportate inoltre le tolleranze per l'esecuzione dei rivestimenti in considerazione dei gabarit definiti e tenendo conto di esperienze esecutive di gallerie similari (Tunnel della Manica).

##### 3.1.1 Sezione con avanzamento in tradizionale

Lo scavo verrà condotto mediante esplosivo o demolitore meccanico in funzione delle caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso; solo in ammassi di caratteristiche geomeccaniche scadenti, si procederà alla realizzazione di consolidamenti in avanzamento, mediante elementi strutturali in vetroresina iniettati o sistema di jettiniezione. Effettuato lo scavo e lo smarino, si procederà alla posa in opera dei rivestimenti di prima fase, mediante spritz-beton, bulloni e/o centine metalliche ed al controllo geometrico del profilo di scavo, al

fine di assicurare il gabarit previsto. A distanza dal fronte di scavo, funzione del comportamento deformativo del cavo, si procederà al getto dei rivestimenti definitivi di arco rovescio, al fine di contrastare adeguatamente il piede del rivestimento di prima fase, e, previa posa dell'impermeabilizzazione, al getto dei rivestimenti definitivi di calotta. Al piede dello strato di impermeabilizzazione, si disporrà una canaletta microfessurata di raccolta acqua, con scarico nel condotto di smaltimento generale, posto sopra l'arco rovescio, indicativamente ogni 50 m. I rivestimenti definitivi saranno armati o in calcestruzzo semplice in funzione delle caratteristiche dell'ammasso, come specificato al capitolo 6, al quale si rimanda per gli aspetti costruttivi di dettaglio.

### **3.1.2 Sezione con avanzamento meccanizzato**

E' previsto l'impiego di due tipologie di scavo meccanizzato, il primo, a partire dall'imbocco est del tunnel di Bussoleno, con macchina a fronte chiuso del tipo EPB e posa di conci prefabbricati, il secondo, nel tunnel di Base in ammassi appartenenti all'Ambin, con macchina aperta a grippers e getto in opera dei rivestimenti definitivi, lontano dal fronte di scavo. La distanza dal fronte di getto sarà definita in funzione del comportamento deformativi del cavo. Tali aspetti saranno approfonditi al capitolo 6.

### **3.2 Cameroni di scambio imbocchi val Cenischia**

In corrispondenza degli imbocchi in Val Cenischia è prevista la realizzazione di cameroni a doppio binario, di raccordo alla zona di scambio prevista nel tratto di linea a cielo aperto.

L'elaborato grafico presentato in progetto, documento APS 2085 TSE3 PLGB::G::3123, è basato sull'ipotesi di esercizio con treni AF 750 m.

Sono risultati necessari, in considerazione dell'andamento planimetrico dei binari, due cameroni, il primo di larghezza pari a 12.0 m, nell'ipotesi di interasse binari di 4.60 m, il secondo di larghezza pari a 14.5 m, nell'ipotesi di interasse binari di 7.30 m.

In merito alle tratte di applicazione, sempre nell'ipotesi di AF di 750 m, in corrispondenza dell'imbocco ovest del tunnel di Bussoleno, si hanno, per il binario dispari, 33.0 m di camerone con binari ad interasse 7.30 m seguito da 61.0 m di camerone con binari ad

interasse di 4.60 m. Per il binario pari, si hanno 33.0 m di camerone con binari ad interasse di 7.30 m, seguito da 50.0 m di camerone ad interasse binari di 4.60 m.

All'imbocco est del tunnel di Base, si ha un primo tratto, di lunghezza pari a 55 m, realizzato in scatolare per entrambi i binari, con un setto centrale in c.a. per dividere il binario pari da quello dispari, seguito per il binario dispari da 72.0 m di camerone, con interasse binari di 4.60 m. Per il binario pari si ha invece un unico camerone, con interasse binari di 4.6 m, per una lunghezza di 23.0 m.

Il tracciato ferroviario è stato comunque progettato prevedendo, in corrispondenza del tratto in Val Cenischia, tra il tunnel di Base ed il tunnel di Bussoleno, un tratto in rettilineo di 1500 m, atto ad ospitare una zona scambio anche in nell'ipotesi di esercizio ferroviario con treni AF da 1500 m. In questo caso, a livello preliminare si evidenzia la necessità di tratte prevedenti camerone di lunghezza maggiore, ed in particolare di un camerone in corrispondenza dell'imbocco est del tunnel di Base con interasse binari pari a 9.75 m, in aggiunta alle già previste geometrie con interasse binari di 4.60 m e 7.30 m, con diametro di circa 17.0 m.

In merito alle tratte di applicazione, nell'ipotesi di AF di 1500 m, in corrispondenza dell'imbocco ovest del tunnel di Bussoleno, si hanno, per il binario dispari, 33.0 m di camerone con binari ad interasse 7.30 m seguito da 73.0 m di camerone con binari ad interasse di 4.60 m. Per il binario pari, si hanno 122 m di camerone con binari ad interasse di 7.30 m, seguito da 624 m di camerone ad interasse binari di 4.60 m.

All'imbocco est del tunnel di Base, si ha un primo tratto, di lunghezza pari a 55 m, realizzato in scatolare per entrambi i binari, con un setto centrale in c.a. per dividere il binario pari da quello dispari, seguito per il binario dispari da un primo camerone con interasse binari di 9.75 m per un tratto di 99.0 m e da un secondo camerone, con interasse binari di 4.60 m, per un tratto di 617 m. Per il binario pari si ha invece un unico camerone, con interasse binari di 4.6 m, per una lunghezza di 51.0 m.

All'imbocco est del tunnel di Bussoleno non sono previste tratte in camerone in sotterraneo. Per le modalità di scavo dei camerone si rimanda al capitolo 6, dedicato alle tecniche costruttive.



### **3.3 By-pass di collegamento**

Lungo la linea, con riferimento alla configurazione finale a doppio binario, sono previsti by-pass di collegamento fra le due canne al fine di consentire una adeguata gestione della sicurezza in caso di incendio o del verificarsi di condizioni di pericolo in uno dei due tunnel; in questo caso l'altra canna viene ad assumere la funzione di via di fuga.

A seconda della presenza o meno di locali tecnici in sotterraneo, in corrispondenza dei by-pass, si hanno tre tipologie, descritte nel seguito. La lunghezza dei by-pass è variabile in funzione dell'interasse tra le due canne, che lungo il tracciato è compreso tra 30 m e 50 m (quest'ultimo interasse è previsto in particolare in corrispondenza dei siti di intervento e di ventilazione).

#### **3.3.1 Tipo R0**

E' il by-pass standard, che ha funzione unicamente di collegamento tra le due canne; esso è previsto, lungo la linea, ad interasse di 400 m, salvo in corrispondenza dei by-pass tipo R1 ed R2.

La sezione trasversale ha una sagoma interna utile di 2.40 m di larghezza e 2.20 m di altezza; si è prevista una carpenteria interna circolare di raggio 1.75 m, come riportato nell'elaborato grafico allegato.

#### **3.3.2 Tipo R1**

Questo by-pass è previsto lungo linea ogni 1600 m, in corrispondenza delle sottostazioni elettriche, aventi dimensioni di 4 m per 12 m, e della nicchia di segnalamento e comunicazione, rispettivamente occupanti una area di 4 e 10 m<sup>2</sup>. Tali volumi tecnici sono disposti trasversalmente al by-pass, in posizione centrale.

La sezione trasversale prevede una sagoma interna utile di 4.0 m di larghezza e 4.0 m di altezza, con raggio interno di 2.40 m (diametro in corrispondenza del piano dei centri pari a 4.80 m).

### 3.3.3 Tipo R2

Questo by-pass è previsto ogni 6400 m lungo la linea, anch'esso in corrispondenza di sottostazioni elettriche e di locali tecnici per le apparecchiature di segnalamento e comunicazione. Tali locali sono disposti trasversalmente al by-pass in posizione centrale, con profondità pari a 12.0 m e 7.0 m rispettivamente. La sagoma interna è sempre pari a 4.0 m per 4.0 m, con raggio di 2.40 m.

In corrispondenza delle gallerie di linea, sul paramento opposto al by-pass, è inoltre presente una nicchia per l'ubicazione di un trasformatore elettrico, avente dimensioni planimetriche di 7.0 m per 4.50 m; la sezione trasversale ha una sagoma interna netta di 2.50 m di larghezza e 4.50 m di altezza, con raggio interno di calotta di 2.80 m.

### 3.4 Siti di intervento e di ventilazione

In corrispondenza di finestre o discenderie di accesso intermedie sono previsti siti di interventi e di ventilazione in sotterraneo, allo scopo di consentire da un lato lo stazionamento di convogli ferroviari incendiati ed il tempestivo intervento dei VVFF, così da spegnere l'incendio e trarre in salvo gli utenti coinvolti, e dell'altro di ubicare gli allarghi in calotta galleria per la distribuzione dell'aria.

Nel seguito si descriveranno il sito di intervento di Venaus ed il sito di ventilazione di Foresto, rappresentati in dettaglio negli elaborati facenti parte del presente progetto.

#### 3.4.1 Sito di intervento di Venaus

Per la tratta italiana del tunnel di Base, il sito di intervento è ubicato al Km. 10 dall'imbocco, in corrispondenza dell'intersezione tra la galleria geognostica di Venaus, che viene impiegata quale galleria di sicurezza per l'intervento dei VVFF, ed il pozzo di ventilazione della Val Clarea (Progr. assoluta, con riferimento all'imbocco francese 44+833).

La galleria di Venaus è ubicata planimetricamente in posizione centrale rispetto ai due tunnel di linea, disposti in questa tratta ad interasse di 50 m, alla stessa quota altimetrica. La galleria della Val Clarea ha invece, in corrispondenza dell'intersezione con la linea, posizione

planimetrica ortogonale alle gallerie di linea, ed è altimetricamente ubicata sopra le gallerie di linea, a 15 m dal piano del ferro; è ad esse collegata mediante due pozzi verticali.

Il sito di intervento ha lunghezza di 750 m, 375 m per ciascun lato del punto di intersezione con la Val Clarea, con sezione allargata di raggio interno pari a 4.75 m e due banchine laterali di 1.50 m e 3.0 m rispettivamente, quest'ultima sul lato interno affiancato alla galleria di Venaus. Essa permetterà di accogliere i vigili del fuoco per l'intervento di spegnimento dell'incendio e di messa in salvo degli utenti.

Il collegamento con la galleria di Venaus avviene mediante tre by-pass, ubicati rispettivamente al centro della zona di intervento ed alle sue estremità, aventi sagoma interna netta di 2.40 m di larghezza e 3.0 m di altezza.

Il tratto centrale del sito di intervento, per una lunghezza di 40 m, consente la distribuzione a cascata dall'alto dell'aria di ventilazione proveniente dal pozzo della Val Clarea. Questo ultimo ha sezione idraulica di 42 m<sup>2</sup>, mentre il condotto di ventilazione in calotta della zona di distribuzione dell'aria ha sezione di 21 m<sup>2</sup>, con un innalzamento, rispetto alla sezione della zona di intervento, di circa 2.80 m.

Infine, trasversalmente alla galleria di Venaus sono disposte aree di manovra/inversione veicoli, aventi dimensioni planimetriche di 8.0 m per 15.0 m. Per i locali tecnici si rimanda al capitolo 3.5.

Dal punto di vista costruttivo, le fasi previste per la realizzazione del sito sono le seguenti:

1. Scavo della galleria geognostica di Venaus.
2. Esecuzione degli innesti tra la galleria geognostica di Venaus e le gallerie del sito di intervento.
3. Scavo in tradizionale delle gallerie del sito di intervento.
4. Scavo in tradizionale della rampa di collegamento al pozzo di ventilazione della Val Clarea; tale rampa, di pendenza media pari al 10%, ha lunghezza pari a 160 m e parte dalla galleria di intervento, binario pari, ad una distanza di 150 m dall'asse del sito di intervento.
5. Scavo in tradizionale del pozzo di ventilazione della Val Clarea; tale pozzo viene scavato, come detto, a partire dalla galleria del sito di intervento e lo smarino viene allontanato verso l'imbocco di Venaus attraverso la galleria geognostica.
6. Passaggio a vuoto, nel sito di intervento, delle TBM di scavo della linea.

### 3.4.2 Sito di ventilazione di Foresto

Per il tunnel di Bussoleno non è previsto un sito di intervento in sotterraneo. In corrispondenza della finestra di Foresto Ovest, alla progr. assoluta 61+971, si è predisposto un sito di ventilazione. L'innesto della finestra con le gallerie di linea permetterà inoltre di intraprendere lo scavo lungo la linea in direzione imbocco ovest, con modalità in tradizionale. L'intersezione con le gallerie di linea avviene planimetricamente in direzione ortogonale; altimetricamente, il piano di scavo della finestra è superiore alla quota delle gallerie di linea, con distanza rispetto al piano ferro di 15 m. La finestra ha raggio interno di 4.75 m e dimensioni trasversali di circa 9.5 m di base e 9.75 di altezza. Internamente una soletta appesa alla volta separa la parte superiore, di sezione pari a 27 m<sup>2</sup>, dedicata alla ventilazione da quella inferiore, di altezza netta di 4.0 m, per consentire l'accesso degli addetti alla manutenzione delle opere.

Nel punto di intersezione con le gallerie di linea, in asse alle due gallerie (interasse binario pari-binario dispari pari a 50 m), dalla finestra si stacca una galleria di discenderia che, con pendenza di circa il 10% e lunghezza di 160 m, raggiunge la quota delle gallerie di linea, ad un interasse di 25 m da esse. In questo punto un tratto di galleria ortogonale alla discenderia ed alle gallerie di linea, permette di collegare queste ultime alla finestra e consentirne lo scavo, impiegando la finestra stessa quale acceso ai fronti di avanzamento. Per la rampa di discesa e per il tratto di innesto si è prevista una sagoma di scavo pari alla galleria di linea, con raggio di scavo pari a 4.95 m (raggio interno 4.20 m).

La ventilazione viene realizzata mediante due tratte di galleria allargate in calotta, di lunghezza ciascuna pari a 40 m; tale galleria allargata ha dimensioni di scavo di circa 11.0 m di base e 12.50 m di altezza, ed ospita al suo interno, oltre alla galleria di linea, un condotto in calotta di 13.50 m<sup>2</sup>.

Per il binario pari, tale tratta allargata parte a 20 m dal punto di intersezione con la finestra, al fine di evitare che l'allargato sia realizzato al di sotto del piano di scavo della finestra a ridurre ulteriormente il setto di ammasso tra piano di scavo e calotta. Il collegamento alla zona di distribuzione dell'aria avviene mediante un cunicolo, di lunghezza pari a circa 55 m e sezione interna utile di 27 m<sup>2</sup> (raggio di scavo in calotta di circa 3.65 m). Per il binari dispari, la zona di distribuzione, sempre di lunghezza pari a 40 m, è prevista in asse alla finestra (quest'ultima

termina infatti a metà tra le due gallerie di linea, e non sovrappassa quindi la galleria di binario dispari che si trova sul lato opposto dell'imbocco della finestra) ed è ad essa collegata mediante un cunicolo di area interna pari a 27 m<sup>2</sup>.

In merito alle fasi esecutive, si ritiene che terminato lo scavo della finestra si proceda senza soluzione di continuità allo scavo della rampa di collegamento alle gallerie di linea, allo scavo delle gallerie allargate di distribuzione dell'aria ed ai cunicoli di collegamento, prima dell'arrivo della TBM-EPB, la quale si arresterà proprio in corrispondenza delle gallerie allargate.

Per la descrizione dei locali tecnici, si rimanda al capitolo 3.5.

### **3.5 Locali tecnici**

#### **3.5.1 Locali tecnici in sotterraneo**

Sia in corrispondenza del sito di intervento di Venaus che del sito di ventilazione di Foresto, è prevista la realizzazione dei seguenti locali tecnici realizzati in sotterraneo per l'ubicazione degli impianti di ventilazione ed elettrico, nonché per gli impianti di sicurezza.

Precisamente si ha:

- Per la ventilazione: locale tecnico avente dimensioni di 15 m per 10 m, altezza 6.0 m; locali per la ventilazione della galleria, di dimensioni di 25 m per 20 m, altezza 6.0 m; locali tecnici per la ventilazione del sito di intervento, avente dimensioni di 25 m per 10 m, altezza 6.0 m; posto elettrico, 17 m per 4.0 m, altezza 5.0 m.
- Per l'impianto elettrico: posto elettrico discenderie, avente dimensioni di 12 m per 8.0 m, altezza di 6.0 m.
- Per la sicurezza: serbatoio antincendio, di dimensioni di 24 m per 9.0 m, altezza 5.0 m; locale pompe, 26 m per 9.0 m, altezza 5.0 m; posto pompe elettriche, 10 m per 6 m, altezza 5.0 m.

In entrambi i siti si dovranno inoltre prevedere spazi pari a 40 m<sup>2</sup> per il segnalamento e 10 m<sup>2</sup> per la trasmissione. Infine, in corrispondenza del sito di Foresto, è previsto di ricavare un volume in sotterraneo di 8000 m<sup>3</sup> per la cisterna antincendio.

E' stata inoltre studiata la sagoma di scavo di un camerone da realizzarsi per il montaggio in sotterraneo della TBM aperta prevista, nel tunnel di Base, per lo scavo degli ammassi appartenenti al massiccio dell'Ambin, dopo avere eseguito in tradizionale i primi 1440 m di galleria. Si è ipotizzata una sagoma libera intera di 13.0 m di base per 12.0 m di altezza, al fine di alloggiare il telaio metallico a carroponete necessario per l'assemblaggio della macchina.

In merito alla disposizione planimetrica, riportata negli elaborati APS 2085 TSE3 PLGA::G::3128 e 3129, si evidenzia che, per il sito di Venaus, i locali sono stati ubicati principalmente in corrispondenza del tratto di innesto per lo scavo delle gallerie di linea a partire dalla galleria geognostica di Venaus e della discenderia per lo scavo del pozzo della Val Clarea; in questo modo si ritiene che i locali tecnici risultino meglio accessibili senza interferire significativamente con le gallerie di esercizio ferroviario. Analogamente, nel sito di Foresto, essi sono stati ubicati ai piedi della discenderia costruttiva per lo scavo delle gallerie di linea. In sede di progettazione definitiva, allorché si definiranno meglio i volumi delle intersezioni/innesti costruttivi, si valuterà l'opportunità di allocare alcuni dei volumi tecnici previsti in questi spazi costruttivi.

### 3.5.2 Locali tecnici all'aperto

In corrispondenza dell'imbocco della finestra di Foresto e del pozzo della val Clarea, sono disposti locali tecnici principalmente legati all'impianto di ventilazione. In particolare si prevede una centrale di ventilazione di dimensione planimetrica pari a 60 m per 60 m, di altezza pari a 10 m; per una porzione di 30 m per 10 m si ha il camino di ventilazione, di altezza pari a 20 m. Le centrali sono collegate alle gallerie in sotterraneo mediante condotti di ventilazione.

In corrispondenza dell'imbocco della finestra di Foresto è inoltre ubicata un'area a destinazione eliporto, di pianta quadrata di lato 28 m.

In prossimità di entrambi gli imbocchi sarà inoltre prevista una strada di collegamento fra le finestre, le centrali di ventilazione e a viabilità locale ed uno spazio adibito a parcheggio.

Per l'inserimento ambientale di queste opere e la loro sistemazione finale si rimanda all'elaborato APS 2085 TSE3 REXX::N::3170.

### 3.6 *Discenderie*

#### 3.6.1 Pozzo di ventilazione di Val Clarea

La discenderia della val Clarea ha principalmente la funzione di galleria di ventilazione; si innesta in corrispondenza del sito di intervento di Venaus, al Km. 10 dall'imbocco est del tunnel di Base.

La discenderia imbocca a quota 1112 m s.l.m. a sud della località di Pietra Porcheria, sul lato destro (occidentale) della Val Clarea e si sviluppa con una pendenza del 8.5% per una lunghezza di circa 5600 m. Il tratto in corrispondenza dell'innesto con le gallerie di linea è a pendenza nulla; la discenderia arriva superiormente le gallerie di linea, con distanza fra il piano di scavo ed il piano ferro pari a 15.0 m.

La sezione interna è pari a 42 m<sup>2</sup>, con raggio interno in calotta pari a 3.95 m.

Lo scavo verrà condotto in contropendenza a partire dall'innesto con le gallerie di linea, impiegando la galleria di Venaus per gestire l'allontanamento dello smarino e l'alimentazione del fronte di scavo.

#### 3.6.2 Finestra di Foresto

La finestra di Foresto è ubicata in zona baricentrica rispetto al tunnel di Bussoleno, con funzione principalmente di servizio: galleria di ventilazione e galleria di accesso alla linea.

La sua direzione risulta sostanzialmente perpendicolare rispetto al tracciato del tunnel e la lunghezza risulta di circa 1900 m. Le coperture crescono gradualmente dall'imbocco fino alla Progr. 800 m, poi restano stabili intorno ai 350 m per il resto del tracciato.

La pendenza è a partire dall'imbocco pari al 3.09%, a salire verso le gallerie di linea; nell'ultimo tratto precedente alla zona di innesto, il tracciato è a pendenza nulla. Il piano di scavo della finestra è posto superiormente alle gallerie di linea, con distanza dal piano ferro pari a 15.0 m.

La sezione interna della finestra ha raggio in calotta di 4.73 m, con diametro al piano dei centri di 9.46 m. Una soletta in c.a. appesa separa il condotto di ventilazione, posto nella metà superiore della finestra e di sezione idraulica pari a 27.0 m<sup>2</sup>, dal piano di accesso, per il quale è prevista una altezza utile di 4.0 m.

### 3.7 Opere di imbocco

Nel seguito si riporta, per ciascun imbocco, una descrizione della tipologia di interventi impiegata per l'attacco delle gallerie, riportando anche una soluzione tecnica per la sistemazione nel lungo termine.

Le indicazioni riportate nel seguito e negli elaborati grafici sono da intendersi di massima; una progettazione di dettaglio dovrà essere condotta sulla base di rilievi cartografici più accurati, a maggiore scala, e, per gli attacchi diretti, sulla base di rilievi geomeccanici di parete, tali da individuare con maggiore puntualità la disposizione delle discontinuità principali e le loro caratteristiche strutturali.

Per quanto concerne le problematiche di inserimento ambientale si rimanda ad un apposito elaborato, documento APS 2085 TSE3 REXX::N::3170.

#### 3.7.1 Imbocco Est Tunnel di Base

L'imbocco est del tunnel di Base si caratterizza morfologicamente dalla presenza del rilevato costituito dal materiale di smarino derivante dallo scavo delle gallerie idrauliche dell'impianto di Pont Ventoux. In considerazione della natura geotecnica del materiale, del grado di addensamento, nonché delle geometrie di attacco degli scavi (l'imbocco avviene con la sagoma del camerone), si è ritenuto non consigliabile procedere all'esecuzione degli scavi all'interno del rilevato.

Si invece optato per asportare il materiale recentemente accumulato, fino ad incontrare il substrato roccioso, originariamente presente e caratterizzante il versante dove avviene l'attacco delle gallerie di linea. Allo scopo di limitare l'entità degli sbancamenti, si è prevista la realizzazione di una paratia berlinese multitirantata, disposta sui due lati della trincea di accesso all'imbocco. Gli scavi posti superiormente alla paratia sono stati impostati con pendenze di 1 su 1, e berme intermedie a modulare e limitare i versanti di sbancamento. Una volta incontrata la roccia, l'imbocco viene realizzato mediante un attacco diretto in roccia, predisponendo interventi di chiodatura delle pareti di scavo e di confinamento del fronte di attacco con strati di spritz-beton fibrorinforzato e rete elettrosaldata; gli sbancamenti in roccia saranno condotti con pendenze di 5 (verticale) su 2 (orizzontale).



Per la sistemazione definitiva, si prevede la realizzazione di una galleria artificiale scatolare, con setto intermedio in c.a., a separare il binario pari da quello dispari, parzialmente ritombata, a ripristinare una morfologia del versante il più possibile nella configurazione antecedente alle lavorazioni.

### 3.7.2 Imbocco Ovest Tunnel di Bussoleno

L'imbocco ovest del tunnel di Bussoleno è caratterizzato da un versante roccioso molto acclive, costituito principalmente da calcescisti; modesti accumuli di versante e di detrito potrebbero interessare parzialmente la base del versante.

Per la realizzazione delle gallerie si è previsto un attacco diretto delle pareti di roccia, provvedendo ad una riprofilatura con pendenze di 5 (verticale) su 2 (orizzontale) e localmente di 5 su 1. Le pareti di scavo vengono protette mediante chiodature metalliche e reti paramassi e funi, tipiche di interventi di stabilizzazione e presidio di versanti in roccia. Le pareti di imbocco saranno inoltre confinate mediante strati di spritz-beton fibrorinforzato e armato con rete elettrosaldata. Le porzioni di detrito, eventualmente interferenti con le sagome di imbocco, saranno asportate con pendenze di 1 su 1 o contenute da locali interventi di sostegno.

Prima di procedere all'esecuzione del campo di attacco di procederà alla realizzazione di una dima in c.a., allo scopo di proteggere dal possibile rotolamento di sassi le maestranze impegnate nel lavoro e contestualmente incrementare il fattore di stabilità del versante di attacco delle gallerie. In funzione di più accurati rilievi geomeccanici di parete e della restituzione di una cartografia a maggiore scala, sarà possibile, nelle successive fasi di progettazione, procedere alla definizione più puntuale degli interventi di chiodatura e di profilatura delle pareti, che acquistano notevole importanza sull'efficacia dell'intervento.

Nel lungo termine si prevede la realizzazione di gallerie artificiali, parzialmente ritombate; al proposito si segnala che le differenti progressive di inizio artificiale, tra binario pari a dispari, determinano l'opportunità di adottare per il binario dispari una galleria artificiale finestrata per la tratta non in adiacenza alla galleria artificiale binario pari.

### 3.7.3 Imbocco Est Tunnel di Bussoleno

L'imbocco est del tunnel di Bussoleno è caratterizzato da una morfologia dolce del versante, geologicamente rappresentato da un conoide di fondo valle, costituito da terreni sciolti granulometricamente molto eterogenei.

Al fine di contenere le opere di sbancamento e contenere le pareti di scavo, altrimenti instabili, si è prevista la realizzazione di una paratia di contenimento degli scavi, che permettesse inoltre di rendere l'intervento il meno invasivo possibile nei riguardi dell'inserimento ambientale. Date le caratteristiche geotecniche e di permeabilità dei terreni interessati, si è ritenuto idoneo prevedere una paratia mediante sistema jet-grouting, costituita da tre file di trattamenti armati con tubi in acciaio e, in corrispondenza dei futuri fronti di scavo, in vetroresina. La paratia assume funzionamento statico a guscio, in particolare in corrispondenza del fronte di attacco, dove ha conformazione geometrica a doppio arco, uno per ciascuna canna. In posizione centrale è prevista la realizzazione di un setto di terreno consolidato, sempre mediante sistema jet-grouting, con funzione di contrafforte nei confronti degli archi di imbocco. Tale soluzione è stata più volte sperimentata in terreni simili e con medesime geometrie.

Il tratto di paratia è di circa 75 m, con altezza media di scavo pari a 12.5 m ed infissione di 4.0 m. Una volta effettuato l'imbocco delle gallerie, la sistemazione definitiva dell'imbocco prevede la realizzazione di gallerie artificiali, per una lunghezza di circa 75 m, completamente ritombate a verde e di un completamento a becco di flauto di lunghezza pari a circa 20 m.

Oltre le gallerie artificiali la linea ferroviaria continua in trincea con sbancamenti di pendenza 1 su 1 con berme intermedie e protezioni in esercizio mediante geogriglie.

Per consentire la partenza delle TBM-EPB, si prevede di realizzare un tratto di gallerie in sotterraneo, di attacco, di lunghezza di circa 20 m, con modalità di scavo in tradizionale, sempre impiegando la tecnologia del jet-grouting per realizzare gli quali interventi di stabilizzazione del fronte di scavo e del contorno del cavo.

### 3.7.4 Imbocchi discenderie

Non si dispone al momento di una cartografia adeguata al progetto degli imbocchi delle discenderie. Al momento, a seguito di alcuni sopralluoghi condotti nelle aree di imbocco, si è individuata la fattibilità esecutiva e la predisposizione delle aree di cantiere.

L'imbocco della discenderia di Foresto, ubicato ad Ovest dell'abitato di Foresto, incontra una prima fascia di depositi superficiali, per uno spessore di circa 70 m. L'imbocco del pozzo della Val Clarea è ubicato a quota 1112 m s.l.m. a sud della località di Pietra Porcheria, sul lato occidentale della Val Clarea. Come per la discenderia di Foresto, anche la galleria di Val Clarea attraversa all'imbocco depositi superficiali per uno spessore decametrico, seguiti da ammassi appartenenti al massiccio di Ambin.

Per la realizzazione dell'imbocco di Foresto si prevedono opere di sbancamento e la realizzazione di una paratia, berlinese tirantata o in jet-grouting, di contenimento degli scavi. Per l'imbocco della Val Clarea, l'asportazione del materiale sciolto, disposto a ridosso del versante, potrà consentire di attaccare direttamente in roccia con stabilizzazione delle superfici di sbancamento e di riprofilatura con chiodature metalliche, reti elettrosaldate ed in funi e localmente strati di spritz-beton fibrorinforzati o armati con rete elettrosaldata.

#### 4 SINTESI DEL QUADRO GEOLOGICO-GEOMECCANICO (FASE CONOSCITIVA)

Nel seguito si riporta un inquadramento di massima delle caratteristiche geologico-geomeccaniche degli ammassi attraversati dalla linea ferroviaria; per una descrizione dettagliata delle analisi condotte e per i riferimenti bibliografici dei documenti esaminati e di quelli allegati al presente progetto preliminare, si rimanda alla “Relazione geologica generale”, documento APS 2085 TSE3 REXX::GO::311, ed alla “Relazione geomeccanica”, documento APS 2085 TSE3 REXX::G::3112.

Nelle suddette relazioni si riporta inoltre un quadro completo degli aspetti geologici-geomeccanici, idrogeologici e morfologici, nonché una suddivisione del tracciato dei tunnel in tratte litologicamente omogenee.

I tracciati della tratta italiana del Tunnel di Base e del Tunnel di Bussoleno si impostano nelle unità di pertinenza piemontese e penninica coinvolte nelle deformazioni alpine; viene attraversata sia la copertura sedimentaria che il sottostante basamento cristallino.

La parte più orientale del tunnel di Base interessa il massiccio dell’Ambin, costituito da un basamento polimetamorfico (Gruppo Ambin) e dalla copertura sedimentaria soggetta a metamorfismo alpino (Gruppo della Val Clarea). Si tratta di micascisti estremamente competenti e massivi, della serie di Clarea, e dai micascisti e gneiss minuti leucocratici intercalati a micascisti conglomeratici-arenacei della serie di Ambin. Nella parte terminale del tunnel, verso l’imbocco in Val Cenischia, gli ammassi appartengono dapprima alla copertura sedimentaria del massiccio d’Ambin, quali gneiss, micascisti, calcescisti, quarziti, marmi dolomitici e carnioli, e dai terreni appartenenti alla zona Piemontese, costituiti da calcescisti filladici e gneiss di Charbonnel.

Il tunnel di Bussoleno attraversa invece interamente le unità della zona piemontese. A partire dall’imbocco ovest, il tracciato attraversa i calcescisti e gli gneiss di Charbonnel, la serie delle rocce verdi, costituiti da prasiniti e serpentiniti. Seguono ammassi appartenenti alla copertura sedimentaria del massiccio della Dora Maira, costituiti da marmi, marmi, dolomitici e calcescisti arenacei ed il basamento cristallino della Dora Maira, costituito da gneiss e micascisti, più volte alternate lungo il tracciato. Infine, in corrispondenza dell’imbocco lato

Bruzolo, vengono attraversati depositi di conoide, costituiti da blocchi da decimetrici a metrici in matrice sabbio-limoso con ghiaie.

Dal punto di vista strutturale si evidenzia la presenza di fronti di accavallamento di età alpina, quali il contatto tra la zona piemontese e quella brianzonese, interessante il tunnel di Base, la fascia di contatto in corrispondenza delle rocce verdi e la faglia di Falcimagna interessanti il tunnel di Bussoleno. Si segnalano inoltre lineamenti distensivi sub-verticali post-alpini, rappresentati da faglie normali lungo il tracciato, come indicato nei profili geologici-geomeccanici, in particolare la faglia di Venaus, localizzata intorno alla Progr. 53.4 del tunnel di Base (progressiva riferita al profilo redatto da Alpetunnel, 2000) e le fasce di taglio presso Mompantero.

Morfologicamente la forma dei versanti indica origini prevalentemente glaciali, con depositi superficiali distribuiti prevalentemente nel settore di fondovalle; i tunnel in studio interessano tali depositi limitatamente alle zone di imbocco, come esaminato nella relazione geologica generale.

In merito alla idrogeologia, in generale la permeabilità delle rocce attraversate risulta debole, restano comunque probabili venute d'acqua importanti localizzate in fasce maggiormente fratturate e legate alla presenza di accidenti geologici. Considerate le elevate coperture vengono inoltre previste alte pressioni idrostatiche; nella relazione geologica generale si riporta una previsione di massima sulle venute d'acqua e sulle pressioni idrostatiche attese lungo il tracciato dei tunnel. Uno studio di dettaglio è inoltre oggetto di un incarico apposito da parte di LTF.

In considerazione della classificazione RMR'89 di Bieniawski il tracciato italiano del tunnel di Base appartiene prevalentemente alle classi II e III, ed alle classi III e IV in corrispondenza dell'ultimo chilometro, allorché localmente, data la presenza di fasce molto fratturate e di carniolate, presenta caratteristiche ascrivibili alla classe V.

Il tracciato del tunnel di Bussoleno risulta prevalentemente in classe III, con classi inferiori localizzate nella fascia delle rocce verdi, nei contatti tra il basamento della Dora Maira e la sua copertura sedimentaria, in presenza di rocce fortemente fratturate (roche broyéés). Analisi sul comportamento allo scavo, secondo l'approccio Adeco-RS saranno condotte nel prossimo capitolo.

Problematiche geomeccaniche particolari sono correlate all'anisotropia dell'ammasso metamorfico e scistoso, alle decompressioni violente legati allo scavo in ammassi con elevate

coperture, e problemi correlati alle caratteristiche litologiche e composizionali dell'ammasso, quali fenomeni di gonflement, squeezing, fluage. Tali aspetti sono stati puntualmente discussi nella relazione geomeccanica.

Relativamente alle caratteristiche di sismicità dell'area in cui si inseriscono le opere oggetto della presente relazione tecnica, si segnala che i comuni coinvolti non risultano classificati come sismici nelle liste riportate nella normativa, anche se in base al D.M. 04.02.1982, pubblicato sulla G.U. n 64 del 06.03.1982, tutti i comuni del Piemonte sono classificati come "sismici di seconda categoria". In fase di dimensionamento e verifica statica delle opere si deve quindi operare con riferimento ai coefficienti sismici di seconda categoria.

## 5 METODOLOGIE DI SCAVO - ANALISI DEL COMPORTAMENTO DEFORMATIVO ALLO SCAVO (FASE DI DIAGNOSI)

In questa fase in funzione delle coperture previste per ciascun litotipo, ed impiegando i parametri geomeccanici definiti nelle relazione geomeccanica, si sono valutate le risposte deformative allo scavo mediante l'impiego del Metodo delle Linee caratteristiche.

In particolare si è calcolata la linea caratteristica in corrispondenza del fronte di scavo così da determinare, secondo la classificazione Adeco-RS, il comportamento del fronte e la relativa categoria di appartenenza: A "fronte stabile", B "fronte stabile a breve termine", C "fronte instabile" (si veda anche per l'illustrazione del metodo l'Appendice 1).

Quali parametri geomeccanici, in questa fase di verifica preliminare, si sono cautelativamente adottati i minimi del range previsto nell'ambito della caratterizzazione geomeccanica condotta e si è ipotizzato un decadimento dei parametri di picco, a seguito del detensionamento arrecato dalle operazioni di scavo, pari al 60% (tale assunzione risulta molto cautelativa, considerati i metodi di scavo proposti, volti al contenimento pressoché immediato delle pareti di scavo, e dovrà essere approfondito nei successivi stadi di progettazione mediante più accurate analisi bidimensionali).

Per le rocce fratturate (roches broyées, LT2), considerata la caratterizzazione geomeccanica già scadente, si è operato con riferimento ai parametri medi del range individuato. Infine, per il litotipo LT1, terreni di copertura, date le basse coperture presenti la linea caratteristica non appare particolarmente significativa; il comportamento del fronte, di tipo "instabile", è desumibile da analisi di stabilità del nucleo.

Le Linee Caratteristiche condotte sono riportate in allegato; nella tabella seguente si riportano, per l'analisi del fronte, il valore di pre-convergenza (convergenza al fronte), l'entità dell'anello plastico al contorno del cavo (quale rapporto tra il raggio plastico ed il raggio teorico di scavo  $R_p/R_o$ ) e la conseguente categoria di comportamento individuata. Tra parentesi è indicata la categoria superiore per situazioni di frontiera fra due categorie di comportamento (in questi casi, modeste variazioni della parametrizzazione possono variare la categoria di comportamento). Tali dati sono valutati per i campi di copertura presenti lungo il tracciato.

Litotipo	Copertura	Convergenza fronte $U_f$	$R_p/R_0$	Categoria
LT 1 terreni di copertura	10-40 m			C
LT 2 rocce fratturate	400 1000	25 cm Chiusura del cavo	3.8 Elevato	C C
LT 6.1 Calcescisti	100 300 600 1000	Trascurabile < 1 cm 2.5 cm 7.5 cm	Assente 1.3 1.8 2.5	A A (B) B B (C)
LT 6.2 Calcescisti fratturati	100 300 600	Trascurabile 4 cm 25 cm	Assente 2.1 3.5	A A - B C
LT 7.2 micascisti-gneiss	400 800 1600	< 1 cm 2.0 cm 2.1 cm	1.2 1.6 1.3	A (B) A - B A - B
LT 7.3 Gneiss aplitici	900 (*) 900	2 cm 6 cm	1.2 1.4	A B
LT 8.2 marmi dol.-aren.	400 600 1000	trascurabile < 1 cm 2.7 cm	Assente 1.3 1.6	A A (B) B
LT 9.1	400	0.8 cm	1.1	A
LT 10 pietre verdi	600	15 cm	3.0	C (B)

(\*) parametri medi del range previsto

Per i contesti geomeccanici più delicati e/o in presenza di alte coperture, dove si sono riscontrati valori deformativi alquanto elevati (LT6.2 e LT10 per coperture di 600 m e LT2) si è verificata la possibilità di effettuare il contenimento del fronte e del profilo di scavo in avanzamento, ipotizzando di evitare il decadimento dei parametri verso valori plastici residui. Sono state calcolate nuove Linee caratteristiche del fronte considerando valori plastici residui pari al 90% di quelli elastici di picco, evidenziando stati deformativi più contenuti.

Nel capitolo successivo (fase di terapia) si individuerà una sezione tipo in grado di operare, mediante interventi di pre-consolidamento realizzati in avanzamento, tale azione di “contenimento” del disturbo arrecato all’ammasso in fase di scavo.



## 6 DEFINIZIONE DELLE SEZIONI DI AVANZAMENTO (FASE DI TERAPIA)

### 6.1 Gallerie di linea - Avanzamento in tradizionale

In merito alle modalità di avanzamento si è prevista l'adozione dello scavo a piena sezione, per sfondi di lunghezza funzione delle caratteristiche geomeccaniche degli ammassi attraversati e del loro comportamento allo scavo; tale metodologia di scavo, ampiamente impiegata anche in contesti geomeccanici difficili, ci appare la più adeguata al controllo delle deformazioni al contorno del cavo (e conseguentemente dei livelli di plasticizzazione), consentendo un rapido contenimento del cavo a seguito dello scavo, mediante il getto dell'arco rovescio, a ridosso del fronte, quale incremento della capacità portante dei rivestimenti di prima fase. Il rivestimento definitivo di calotta sarà gettato ad una distanza funzione dello stato deformativo del prerivestimento e della relativa pressione esercitata dall'ammasso circostante.

Il rivestimento di prima fase è costituito da uno strato di spritz-beton e bulloni metallici (ad ancoraggio puntuale o continuo) o in alternativa centine metalliche in funzione del grado di separazione strutturale e dei carichi preventivabili sui rivestimenti. Tali interventi rappresentano azioni di "contenimento" del cavo; puntualmente in presenza di ammassi molto fratturati, ma non spingenti, potranno essere impiegati tubi metallici in corrispondenza della calotta.

Quali azioni di "pre-consolidamento" in avanzamento si è previsto l'impiego di elementi strutturali in vetroresina in ammassi alquanto fratturati ed alterati, disposti sia in corrispondenza del fronte di scavo (in questo caso semplicemente cementati) sia al contorno del cavo (iniettai a pressione mediante valvole), con schema a quinconce tale da determinare la formazione di un "arco consolidato". Questo assolve alla funzione di "scaricare" il nucleo di scavo riducendo, in combinazione con il trattamento del fronte, i fenomeni estrusivi del nucleo, i valori di pre-convergenza al fronte e conseguentemente controllando lo stato di plasticizzazione dell'ammasso e le pressioni sul cavo. Tale intervento permette quindi di evitare il decadimento dei parametri geomeccanici dell'ammasso verso condizioni residue. Si è invece adottato il sistema di jettiniezione per i depositi alluvionali previsti in corrispondenza degli imbocchi. La permeabilità e le caratteristiche fisiche di questi ultimi

bene si adattano infatti alla realizzazione di volumi di terreno cementati allo scopo di realizzare un “arco portante” al contorno del cavo quale “pre-contenimento” del nucleo e di fornire al fronte elementi di stabilità ad impedire fenomeni di rilascio. La coronella compenetrata al contorno del cavo permette inoltre di evitare rifluimenti di materiale dalla calotta associabili alla percolazione di acqua.

Si ritiene di adottare chiodature del fronte mediante bulloni metallici in acciaio dolce FeB32k, con piastre larghe di ripartizione, per controllare i fenomeni di splaccaggio legati alle decompressioni violente. Dovranno inoltre essere previsti drenaggi in avanzamento nelle tratte ove è presente il rischio di forti venute d’acqua, come riportato nell’elaborato grafico “Sezione di drenaggio”; apposite sezioni con drenaggi radiali potranno essere predisposte in corrispondenza di serbatoi di accumulo in roccia.

Infine potranno essere impiegati rivestimenti di prima fase in grado di assorbire deformazioni radiali in ammassi rigonfianti.

In ogni caso si ritiene opportuna la realizzazione di sondaggi in avanzamento nelle tratte ritenute particolarmente delicate consentirà di calibrare gli interventi previsti.

I rivestimenti sono previsti in calcestruzzo non armato, ad eccezione di zone caratterizzate da rocce alquanto fratturate, faglie, spinte elevate o nelle tratte a bassa copertura, per le quali si è prevista armatura sia in calotta che in arco rovescio.

A tergo dei rivestimenti definitivi di calotta e piedritto si porrà in opera l’impermeabilizzazione, costituita da uno strato di geotessuto e da una guaina in pvc. Al piede dell’impermeabilizzazione, su ciascun piedritto, si disporrà una canaletta microfessurata per il drenaggio e lo smaltimento delle acque presenti nell’ammasso; indicativamente ogni 50 m tale canaletta sarà collegata al condotto di smaltimento posto sopra l’arco rovescio. Tale intervento permetterà anche di abbattere le pressioni idrostatiche a tergo dei rivestimenti, in presenza di elevati battenti d’acqua.

Sezioni di scavo prevedenti interventi di consolidamento impermeabilizzanti, eseguiti in avanzamento, saranno invece da prevedere nelle tratte di galleria interessate da possibili acquiferi, al fine di evitare interferenze con pozzi e/o usi delle acque sotterranee.

Le sezioni tipo di avanzamento, riportate sull’elaborato grafico allegato prevedono in sintesi i seguenti interventi, intesi quali quantità medie (tra parentesi si sono indicati i campi di

variabilità dei principali interventi, da calibrare in funzione del comportamento deformativo riscontrato allo scavo mediante un opportuno sistema di monitoraggio):

- Sezione tipo A      scavo per sfondi di 3.0-4.0 m  
5-6 bulloni/2.0 m (1.5-2.5 m) in acciaio ad ancoraggio puntuale,  
L=4.5-6.0 m  
Spritz-beton al contorno, sp. 0.10 m (0.05-0.15 m) fibrorinforzato o  
con rete  
Arco rovescio in cls., sp. 0.50 m  
Impermeabilizzazione costituita da geotessuto e strato in PVC  
Rivestimento di calotta in cls., sp. 0.50 m
  
- Sezione tipo B0      scavo per sfondi di 2.0-3.0 m  
10-11 bulloni/1.50 m (1.20-1.80 m) in acciaio ad ancoraggio continuo  
o in alternativa tipo Swellex, L=6.00 m  
Spritz-beton al contorno, sp. 0.15 m (0.10-0.20 m) fibrorinforzato o  
con rete  
Arco rovescio in cls., sp. 0.60 m  
Impermeabilizzazione costituita da geotessuto e strato in PVC  
Rivestimento di calotta in cls., sp. 0.60 m
  
- Sezione tipo B1      scavo per sfondi di 1.50-2.0 m (campo di avanzamento 10.0 m se si  
predispongono i tubi metallici, in caso di elevato grado di separazione  
strutturale)  
29 tubi metallici Ø88.9/10 mm, L=13.0 m sovr. 3.0 m (eventuali)  
Spritz-beton al contorno, sp. 0.20 m (0.15-0.25 m) fibrorinforzato o  
con rete  
Centine metalliche HEA180/1.20 m (1.0-1.5 m)  
Arco rovescio in cls., sp. 0.60 m  
Impermeabilizzazione costituita da geotessuto e strato in PVC  
Rivestimento di calotta in cls., sp. 0.60 m

- Sezione tipo B2 scavo per sfondi di 1.2 m, campo di avanzamento 10.0 m  
28 elementi VTR al fronte, L=18.0 m sovr. 8.0 m  
Spritz-beton al contorno, sp. 0.25 m (0.20-0.30 m) fibrorinforzato o con rete  
Centine metalliche HEB160/1.20 (1.0-1.5 m)  
Spritz-beton al fronte, sp. 0.10 m/10 m fibrorinforzato  
Arco rovescio in c.a., sp. 0.70 m (gettato entro 2.0-3.0Ø dal fronte)  
Impermeabilizzazione costituita da geotessuto e strato in PVC  
Rivestimento di calotta in cls., sp. 0.60 m (gettato in funzione del comportamento deformativo)
- Sezione tipo C1 scavo per sfondi di 1.0 m, campo di avanzamento 10.0 m  
54 trattamenti jet-grouting al contorno, L=14.0 m sovr. 4.0 m  
9 trattamenti jet-grouting al fronte, L=14.0 m (a vuoto 4.0 m)  
6+6 trattamenti jet-grouting al piede centina, L=var.  
Spritz-beton al contorno, sp. 0.20 m (0.25 m) fibrorinforzato o con rete, al fronte 0.10 m/10 m fibrorinforzato  
Centine metalliche HEB160/1.00 (0.80-1.20 m) m anche in arco rovescio (eventuale)  
Spritz-beton al fronte, sp. 0.10 m/10 m fibrorinforzato  
Arco rovescio in c.a., sp. 0.80 m (gettato entro 1Ø dal fronte)  
Impermeabilizzazione costituita da geotessuto e strato in PVC  
Rivestimento di calotta in cls., sp. 0.80 m (0.40-1.20 m, gettato entro 3Ø dal fronte)
- Sezione tipo C2 scavo per sfondi di 1.0 m, campo di avanzamento 10.0 m  
43 elementi VTR al contorno, L=18.0 m sovr. 8.0 m  
29 elementi VTR al fronte, L=18.0 m sovr. 8.0 m  
5+5 tubi/elementi VTR al piede centina, L=18.0 m sovr. 8.0 m  
Spritz-beton al contorno, sp. 0.25 m fibrorinforzato o con rete  
Centine metalliche HEB180/1.00 m  
Spritz-beton al fronte, sp. 0.10 m/10 m fibrorinforzato

Arco rovescio in c.a., sp. 0.80 m (gettato entro 1.5-2.0Ø dal fronte)

Impermeabilizzazione costituita da geotessuto e strato in PVC

Rivestimento di calotta in cls., sp. 0.70 m (gettato in funzione del comportamento deformativo)

Nel Profilo geologico-tecnico si sono indicate per ciascuna tratta di galleria, come meglio descritto al paragrafo 6.3., le percentuali di applicazione. Nella tabella seguente si riporta una correlazione tra ammassi attraversati e le sezioni tipo, quale indicazione di massima per l'applicazione delle stesse:

Litologia	Sezione di avanzamento (*)
LT 1	C1
LT 2	C2
LT 6.1	A - B0 - B1
LT 6.2	A - B0 - B1 - B2
LT 7.1-7.2-7.3	A - B0 - B1 - B2
LT 8.2	A - B0 - B1
LT 9.1	A - B0 - B1
LT 10	B2 - C2

(\*) in funzione delle coperture come indicato in fase di diagnosi

Infine si riportano, per ciascuna sezione tipo, la risposta deformativa attesa, in termini di estrusione del fronte e di convergenza del cavo a seguito dell'adozione degli interventi previsti in progetto, e una prima indicazione di massima sui tempi di avanzamento in base ad esperienze analoghe.

SEZIONE DI AVANZAMENTO	RISPOSTA DEFORMATIVA		TEMPI D'AVANZAMENTO
	Estrusione	Convergenze	
A	Assente	Trascurabile	5.0-6.0 m/g
B0	Assente	< 1 cm	4.0-5.0 m/g
B1	Trascurabile	< 4 cm	2.5-3.0 m/g
B2	< 5 cm	< 8 cm	1.4-2.0 m/g
C1	Trascurabile	< 5 cm	1.0-1.2 m/g
C2	< 10 cm	< 10 cm	1.2-1.4 m/g

I tempi di avanzamento riportati sono indicativi: per una valutazione di dettaglio si rimanda d una apposita relazione tecnica

## 6.2 Galleria di linea - Avanzamento con fresa

Gli avanzamenti con fresa sono previsti a partire dall'imbocco est del tunnel di Bussoleno, mediante una macchina a fronte chiuso mixshield, del tipo EPB a bilanciamento del fronte con pressione di terra, e dall'imbocco est del tunnel di Base, dopo 1400 m circa a partire dall'imbocco, allorché gli avanzamenti interessano le formazioni appartenenti alla serie della Val Clarea ed al massiccio d'Ambin. In questo secondo caso la macchina prevista è una TBM aperta con grippers.

Entrambe le macchine dovranno essere attrezzate per eseguire sondaggi in avanzamento, al fine di effettuare una puntuale previsione delle caratteristiche degli ammassi attraversati e delle condizioni idrogeologiche. L'attrezzatura di perforazione sarà impiegata anche per eseguire interventi di consolidamento in avanzamento.

Nel seguito si descrivono, per i due casi, le modalità di avanzamento. Un approfondimento tecnico sulle caratteristiche delle macchine di scavo è anche riportato nel documento relativo ai tempi ed ai costi di esecuzione delle opere.

### **6.2.1 Avanzamento con TBM-EPB – Tunnel Bussoleno, imbocco Bruzolo**

Per definire le caratteristiche della macchina da adottare dall'imbocco est del tunnel di Bussoleno si è dovuto tenere conto delle diverse condizioni geologiche e geomeccaniche attraversate.

Dapprima, in prossimità dell'imbocco, si è evidenziata la presenza di terreni costituiti prevalentemente da materiali sciolti di conoide, quali sabbie-limose e ghiaia con trovanti e blocchi, per diverse centinaia di metri, seguite da un tratto di galleria caratterizzata da rocce molto fratturate. In tale contesto è apparso necessario prevedere l'impiego di una macchina a fronte chiuso. Tale modalità di funzionamento permette infatti da un lato di garantire la stabilità del fronte e del profilo di scavo, dall'altro di procedere in condizioni di idrostatismo, con controllo delle subsidenze superficiali ed evitando pericolosi fenomeni di sifonamento.

Successivamente si prevede di condurre gli scavi in ammassi di buona consistenza, quali i marmi, marmi dolomitici e calcescisti arenacei della copertura sedimentaria del basamento cristallino della Dora Maira, ed il basamento stesso, costituito da gneiss e micascisti. In tali contesti le caratteristiche geomeccaniche consentono di avanzare a fronte aperto, a tutto vantaggio delle produzioni e dei costi di realizzazione dell'opera.

L'adozione di una macchina del tipo "mixshield", in grado di operare sia a fronte chiuso, con funzionamento del tipo EPB, a bilanciamento di terra, sia a fronte aperto è apparsa la più flessibile e vantaggiosa, tenendo anche conto della relativa facilità con la quale è possibile passare da un funzionamento all'altro, per far fronte a situazioni anomale o impreviste.

La macchina, monoscudata, sarà pertanto attrezzata con una testa fresante da roccia (per tipologia e numero dei cutters) ed in grado di operare con camera di scavo in pressione grazie al condizionamento del materiale di smarino ed alla regolazione della quantità dello stesso estratta attraverso la coclea.

A tergo dello scudo si prevede la posa del rivestimento definitivo, in conci prefabbricati di spessore pari a 0.45 m, e l'iniezione a tergo dell'anello di miscela cementizia di intasamento, per uno spessore medio di 0.15 m. Tale iniezione sarà effettuata direttamente dalla coda dello scudo, al fine di ridurre gli assestamenti dell'anello ed il "volume perso" in fase di scavo. L'avanzamento della macchina avviene attraverso la spinta di martinetti, a contrasto sull'ultimo anello in conci posato.

La tenuta idraulica del rivestimento sarà garantita da una guaina in gomma, del tipo EPDM, disposta lungo il perimetro dei conci prefabbricati e tenuta in posizione da un sistema di connettori disposti longitudinalmente e trasversalmente l'anello. Al fine di abbattere le pressioni idrostatiche in presenza di elevati battenti si è prevista la posa di canalette di drenaggio controllato, collegate al sistema di smaltimento dell'acqua lungo la linea.

Infine saranno realizzate le opere ubicate sotto il piano del ferro, quali condotti e pozzetti, mediante getti in opera o elementi prefabbricati posati durante l'avanzamento della macchina.

### **6.2.2 Avanzamento con TBM aperta – Tunnel di Base, massiccio d'Ambin**

L'impiego dello scavo meccanizzato per l'attraversamento degli ammassi appartenenti al massiccio di Ambin ed alla serie della Val Clarea, quali micascisti e gneiss di buone caratteristiche geomeccaniche, è apparso molto vantaggioso in termini di tempi e costi, se paragonato allo scavo con modalità tradizionali, ma pone alcuni problemi di ordine tecnico legati alle alte coperture presenti, ai conseguenti rilasci tensionali connessi all'apertura del fronte (decompressioni violente e colpi di montagna), ed alle pressioni che possono manifestarsi al contorno del cavo in passaggi caratterizzati da rocce fratturate e da faglie, pressioni in grado di intrappolare la macchina impedendone l'avanzamento.

Inoltre in tali contesti (elevate coperture, comportamento prevalentemente elastico del fronte e del cavo, ma caratterizzato da elevate pressioni di confinamento) la posa in opera di un rivestimento in conci a ridosso del fronte di scavo appare alquanto delicata, dovendo talora l'anello in conci supportare carichi distribuiti molto elevati.

Al fine di risolvere tali problematiche, si è ritenuto ottimale l'adozione di una macchina aperta, con avanzamento mediante grippers, in grado di gestire i livelli deformativi, prevalentemente elastici, dell'ammasso, consentire la dissipazione delle pressioni attive a seguito dello scavo e di operare, in caso di necessità, adeguati confinamenti delle pareti di scavo, mediante la posa in opera di strati di spritz-beton, fibrorinforzato o armato con rete elettrosaldata, centine metalliche. In tratte di caratteristiche geomeccaniche scadenti, si potrà inoltre prevedere la posa in opera di interventi di preconsolidamento in avanzamento mediante elementi strutturali in vetroresina.

Gli interventi da prevedere in funzione delle caratteristiche dei materiali, e dei relativi livelli deformativi, così come effettuato per gli scavi in tradizionale, sono riportati nel seguito:

- Sezione tipo TA 5-6 bulloni/2.0 m (1.5-2.5 m) in acciaio ad ancoraggio puntuale, L=4.5-6.0 m (nel caso si potranno prevedere bullonature solo locali)  
Spritz-beton al contorno, sp.0.05-0.10 m fibrorinforzato o con rete
- Sezione tipo TB0 10-11 bulloni/1.50 m (1.20-1.80 m) in acciaio ad ancoraggio continuo o in alternativa tipo Swellex, L=6.00 m  
Spritz-beton al contorno, sp. 0.15-0.20 m fibrorinforzato o con rete
- Sezione tipo TB1 Spritz-beton al contorno, sp. 0.20 m (0.15-0.25 m) fibrorinforzato o con rete  
Eventuali, 10-11 bulloni/1.50 m (1.20-1.80 m) in acciaio ad ancoraggio continuo o in alternativa tipo Swellex, L=6.00 m  
Centine metalliche HEA180/1.20 m (1.0-1.5 m)
- Sezione tipo TB2 26 elementi VTR al fronte, L=18.0 m sovr. 8.0 m  
Spritz-beton al contorno, sp. 0.25 m (0.20-0.30 m) fibrorinforzato o con rete



Centine metalliche HEB160/1.20 (1.0-1.5 m)

- Sezione tipo TC2 54 elementi VTR al contorno, L=18.0 m sovr. 8.0 m  
26 elementi VTR al fronte, L=18.0 m sovr. 8.0 m  
Spritz-beton al contorno, sp. 0.25 m fibrorinforzato o con rete  
Centine metalliche HEB180/1.00 m

Tali interventi saranno posti in opera a ridosso del fronte di scavo, mediante apposite attrezzature predisposte a valle della testa della macchina, e lungo le attrezzature di back-up della macchina.

Quale rivestimento per il lungo termine, si è previsto il getto in opera di spessore pari a 0.50, effettuato a distanza dal fronte in funzione del livello deformativi del cavo e delle logistiche di cantiere, in generale entro 100-200 m dal fronte di scavo, previa posa dell'impermeabilizzazione, costituita da uno strato di geotessuto e da una guaina in pvc. In alternativa si potranno impiegare anelli in conci prefabbricati, montati lontano dal fronte di scavo.

A tergo del getto in opera, ed in modo sistematico nel caso di impiego di elementi prefabbricati, potranno essere effettuate iniezioni di contatto allo scopo di meglio impermeabilizzare il tunnel. Al fine di abbattere le pressioni idrostatiche in presenza di elevati battenti si è prevista la posa di canalette di drenaggio controllato, collegate al sistema di smaltimento dell'acqua lungo la linea.

### **6.3 Profili geologici-tecnici**

Gli elaborati APS 2085 TSE3COGB::G::3117 e 3116 "Tunnel di Bussoleno e Tunnel da Base Zona imbocco lato Italia - Profilo geologico-tecnico" costituiscono una sintesi delle analisi e delle scelte progettuali condotte, suddividendo il tracciato in tratte omogenee.

Al di sotto del profilo geologico dei due tunnel, secondo la restituzione grafica già adottata dallo Studio Bonnard&Gardel (2000) e prima ancora dal DST di Torino (1998) si riporta, per ciascuna tratta omogenea, dapprima le finche che sintetizzano le informazioni raccolte durante la "fase conoscitiva", ovvero per l'inquadramento geologico, l'Unità litostrutturale, la litologia e le percentuali dei litotipi, le tratte tettonizzate ed un giudizio circa l'affidabilità

della ricostruzione geologica effettuata, sulla base delle indagini geognostiche condotte in corrispondenza di ciascuna tratta omogenea.

Quindi si riportano le informazioni di natura geomeccanica, quali i range delle caratteristiche fisiche degli ammassi, i parametri di resistenza e di deformabilità. In merito alle classificazioni geomeccaniche tecniche, si riportano il valore dell'RMR secondo la classificazione di Bieniawski (1989) ed il parametro Q di Barton.

Nel gruppo di finche seguente si riportano gli esiti della “fase di diagnosi”, indicando il comportamento del fronte e del cavo allo scavo, la natura dei fenomeni deformativi e conseguentemente la categoria di comportamento del fronte, A, B o C, secondo l'approccio Adeco-RS. Per ciascuna tratta di galleria, si individuano le percentuali di previsione delle categorie di comportamento, in funzione dei litotipi e delle coperture caratterizzanti la tratta.

Si riporta quindi il gruppo di finche indicanti le scelte condotte in termini di interventi e modalità di scavo (“fase di terapia”), raggruppando gli interventi di preconsolidamento/precontenimento (chiodi ed elementi strutturali in vetroresina, al fronte ed al contorno, trattamenti colonnari jet-grouting, drenaggi in avanzamento) e quelli di semplice contenimento (spritz-beton fibrorinforzato, bulloni metallici, centine e rivestimenti definitivi).

A conclusione si indicano, per ciascuna tratta di galleria, le percentuali di applicazione delle sezioni tipo di avanzamento, precedentemente discusse ai paragrafi 6.1 e 6.2, sia essi con modalità di scavo in tradizionale o meccanizzato.

Tali percentuali di sezioni tipo sono state assunte quale base per le valutazioni in merito ai tempi ed ai costi di realizzazione dell'opera.

#### **6.4 Opere accessorie**

Lo scavo delle opere accessorie, quali by-pass di collegamento fra le gallerie, siti di intervento e di ventilazione, camerone, locali tecnici in sotterraneo, nonché le discenderie – di Foresto e della Val Clarea – saranno scavate in tradizionale, a piena sezione, con modalità analoghe a quelle precedentemente descritte per le gallerie di linea, in funzione del contesto geomeccanico, del comportamento deformativo previsto per il fronte e del contesto idrogeologico. Le geometrie di scavo e le carpenterie previste, per i rivestimenti di prima fase e definitivi, sono riportate negli elaborati grafici facenti parte del Progetto Preliminare.

Solo per il camerone con interasse binari di 9.75 m (qualora fosse previsto l'esercizio ferroviario mediante AF da 1500 m) e per la caverna per il montaggio della TBM in sotterraneo, dati il diametro di scavo superiore a 18-19 m, si potrà prevedere, se in presenza di ammassi fratturati, la "parzializzazione" del fronte di avanzamento, anticipando lo scavo di gallerie di piedritto e procedendo al getto dei piedritti prima di effettuare lo scavo in calotta, il getto della calotta stessa ed il ribasso in arco rovescio. Interventi di consolidamento al contorno del cavo potranno essere realizzati in avanzamento o radiali a seguito dello scavo dei piedritti.

### **6.5 Valutazioni statiche di massima**

Le modalità di avanzamento proposte e l'intensità degli interventi, in termini di numero e maglia delle bullonature, numero dei trattamenti, spessore dei rivestimenti di prima fase e definitivi, sono stati definiti in considerazione di analisi statiche preliminari, condotte con riferimento al metodo delle Linee caratteristiche, e tenendo conto delle evidenze allo scavo di avanzamenti effettuati in contesti geomeccanici simili in corso d'opera o riportate in letteratura, come descritto nel paragrafo successivo. Sono inoltre state prese in esame i risultati di analisi statiche e valutazioni geomeccaniche condotte in studi pregressi, in particolare quelli condotti da Bonnard&Gardel nell'ambito dei progetti Alpetunnel. (2000).

### **6.6 Case-hystories di scavo**

L'approccio Adeco-RS è stato nell'ultimo decennio applicato alla progettazione di numerose opere in sotterraneo, in particolare nell'ambito di contesti geomeccanici difficili, quali quelli caratterizzati da materiali spingenti e condizionati da proprietà reologiche che ne determinano nel tempo il decadimento dei parametri di resistenza e di deformabilità.

Una numerosa casistica è stata raccolta nella realizzazione delle tratte ad Alta Velocità Bologna-Firenze e Roma-Napoli, seppur in contesti appenninici non completamente associabili agli ammassi attraversati dalle gallerie LTF, e nella galleria di Tarteguille dell'AV Marsiglia-Valencia.

Ammassi più simili sono stati affrontati, sempre nei riguardi della metodologia di scavo in tradizionale, nello scavo delle gallerie dell'autostrada Raccordo Autostradale Valle d'Aosta,

in particolare nelle gallerie Morgex, Prè St. Didier e Dolonne, con tratte interessate da scisti, scisti filladici e carboniosi, calcescisti e gneiss.

Sono inoltre state prese in considerazione, per la definizione delle scelte progettuali, le modalità di scavo attuate nel Traforo Autostradale del Frejus e del Gran Sasso, negli scavi parziali condotti per il ripristino del Traforo del Monte Bianco e la ricca esperienza raccolta durante lo scavo delle gallerie idrauliche di Pont Ventoux.

Relativamente allo scavo meccanizzato, soluzioni con macchine TBM aperte con “gripper” sono state adottate per il Lotchberg Tunnel e per una tratta del Tunnel ferroviario di Base del S. Gottardo. Macchine del tipo Mixshield o EPB sono largamente impiegate per lo scavo di gallerie in terreni incoerenti, in particolare in ambito urbano dove appare importante il contenimento dei cedimenti superficiali e dei possibili aggotamenti in fase di scavo.

## 7 CONSIDERAZIONE SULL'INTERASSE DELLE GALLERIE DI LINEA

Quale interasse tra le gallerie di linea si è adottato 30 m, come già suggerito e verificato nell'ambito degli studi condotti da Alpetunnel; in corrispondenza del sito di intervento di Venaus, lungo la tratta con la galleria geognostica di Venaus posizionata fra le due gallerie di linea ed in prossimità del sito di ventilazione di Foresto l'interasse fra le due gallerie di linea è stato incrementato a 50 m. Riduzioni dell'interasse si verificano invece in corrispondenza degli imbocchi, al fine di raccordarsi alle opere esterne, in particolare in prossimità degli imbocchi in Val Cenischia dove la linea ferroviaria procede in viadotto.

Al fine di verificare la stabilità dei setti di ammasso tra le gallerie, sono state condotte verifiche preliminari di massima impiegando la teoria dell'Area Indice.

Tale teoria consente di valutare l'influenza esercitata vicendevolmente da cavità adiacenti e lo stato tensionale indotto dalle stesse nell'ammasso roccioso circostante, adottando un approccio di tipo analitico che, pur introducendo ipotesi semplificative, consente di tenere conto di tutti i principali fattori che governano il comportamento di un ammasso roccioso allo scavo. Il metodo presuppone il comportamento di tipo elasto-plastico del materiale circostante i cavi, nella fascia decompressa a ridosso delle cavità denominata "anello plastico", ed un comportamento di tipo elastico della fascia rocciosa a tergo dell'anello plastico, che sopporta le sovratensioni indotte dall'apertura del cavo.

Nel campo elasto-plastico, lo stato tensionale circostante la cavità è stato formulato teoricamente da Fenner-Kastner. La presenza di una pressione di contenimento esercitata sul contorno del cavo da eventuali opere di stabilizzazione, quali la struttura di priverimento e o di rivestimento definitivo della cavità stessa, modifica tale stato tensionale, "contenendo" in senso radiale la roccia di parete ed aumentandone le caratteristiche di resistenza conformemente alla curva intrinseca.

Essa determina quindi l'arresto della propagazione del fenomeno di decompressione, limitando lo spessore della massa allentata.

Considerando il caso di due gallerie parallele adiacenti, nel setto di separazione tra le due gallerie si ammette che lo stato tensionale derivi dalla combinazione dei due regimi elementari di tensione competenti a ciascuna cavità.

In particolare, la fascia plasticizzata al contorno della prima cavità risentirà delle sovratensioni causate dalla seconda cavità e viceversa. Nelle fasce plastiche circostanti i cavi, l'effetto di tale reciproca influenza si traduce, in assenza di rivestimento, in un incremento dei fenomeni deformativi al contorno e, in definitiva, in un aumento dell'estensione delle zone a comportamento plastico.

Contemporaneamente, nel setto tra le due gallerie, l'estensione delle zone plasticizzate induce una riduzione della fascia a comportamento elastico, cui consegue una maggiore concentrazione delle tensioni.

La situazione limite si verifica quando, a seguito di una eccessiva riduzione dell'interasse delle due gallerie, il setto di separazione è sollecitato al limite della resistenza disponibile.

In tale circostanza il setto di separazione offre un contributo di resistenza trascurabile, e si manifesta una deviazione del flusso degli sforzi indotti all'esterno del complesso individuato dall'insieme delle due cavità, dando luogo ad una fascia a comportamento plastico unica per le due gallerie, le quali si comportano in definitiva come una singola cavità di dimensioni superiori alle due gallerie.

Il metodo dell'Area Indice consente di verificare, alla luce delle considerazioni sopra esposte, nota la curva intrinseca del materiale costituente l'ammasso roccioso, la stabilità del setto di separazione di due gallerie adiacenti, confrontando lo stato tensionale presente nel setto di separazione con la resistenza mobilitabile dal materiale costituente il setto stesso.

L'algoritmo di calcolo approntato consente in particolare di:

- considerare cavità anche di diametro diverso;
- considerare comportamenti dell'ammasso roccioso di tipo elasto-plastico fragile;
- valutare l'effetto di eventuali opere di stabilizzazione dei cavi.

Nel progetto in esame, si sono considerate alcune situazioni ritenute rappresentative lungo il tracciato; precisamente:

1. Tunnel di Base, massiccio d'Ambin, coperture pari a 1600 m, galleria di linea (diametro di scavo 5.0 m) affiancata alla galleria geognostica di Venaus (diametro di scavo 3.0 m), interasse pari a 25 m;

2. Tunnel di Base, zona Brianzonese, coperture pari a 900 m, galleria di linea (diametro di scavo 5.0 m) affiancata alla galleria geognostica di Venaus (diametro di scavo 3.0 m), interasse pari a 25 m;
3. Tunnel di Base, zona Piemontese, coperture pari a 300 m, galleria di linea (diametro di scavo 5.0 m) affiancata alla galleria geognostica di Venaus (diametro di scavo 3.0 m), interasse pari a 25 m;
4. Tunnel di Base, zona di imbocco con cameroni a doppio binario (diametri di scavo 8.5 m e 7.0 m), coperture pari a 100 m, interasse pari a 25 m;
5. Tunnel di Bussoleno, Copertura del Dora Maira, copertura pari a 800 m, gallerie di linea affiancate (diametro di scavo 5.0 m), interasse pari a 30 m.

Le valutazioni sono state condotte impiegando parametri geomeccanici ritenuti mediamente rappresentativi delle litologie e dei gruppi geomeccanici attraversati; valutazioni più puntuali dovranno essere condotte nelle successive fasi di progettazione.

In relazione alla pressione di contenimento interna alla cavità, offerta dai rivestimenti di prima fase e definitivi, si sono considerate due condizioni, coerentemente con il procedere delle fasi esecutive:

- Condizione di esercizio, in cui in entrambe le canne si è effettuato il getto dei rivestimenti definitivi (condizione di lungo termine);
- Condizione transitoria, in cui una canna ha il rivestimento di prima fase e l'altra è in fase di scavo, quindi senza alcun contenimento radiale interno (condizione di breve termine); tale situazione è sicuramente molto onerosa, considerando

Le pressioni di contenimento interne, per i rivestimenti definitivi e di prima fase, sono state valutate impiegando le formule, in campo elastico, per tubi di grosso spessore, assumendo tensioni ammissibili nei materiali contenute.

I coefficienti di sicurezza ottenuti nei casi esaminati sono, come riportato in allegato, sempre maggiori di 1.0 per le verifiche in transitorio e 1.3 per il lungo termine.

## 8 PROGRAMMA DI MONITORAGGIO

Durante la realizzazione delle opere in sotterraneo si dovrà porre in opera un adeguato programma di monitoraggio, volto a verificare ed ottimizzare le scelte progettuali effettuate, in termini di intensità degli interventi di consolidamento e confinamento previsti e di successione delle fasi esecutive, in particolare: cadenze di scavo e distanze di getto dal fronte dei rivestimenti definitivi in funzione dei livelli deformativi del fronte e del cavo. Questi adeguamenti progettuali fanno parte dell'approccio progettuale Adeco-RS e più in generale del "metodo osservazionale".

Alcune stazioni di monitoraggio andranno previste in situazioni specifiche locali per il monitoraggio in esercizio dei manufatti realizzati, così da verificarne la funzionalità nel lungo termine.

In linea generale, quali indicazioni di massima, per le gallerie in oggetto si prevede la predisposizione di:

- Rilievi del fronte di scavo, per la restituzione delle caratteristiche geologiche-geostrutturali dell'ammasso al fronte di scavo; andranno previsti rilievi di tipo speditivo-pittorico ogni 20-30 m, con rilievi più dettagliati, di tipo analitico, ogni 150-200 o in corrispondenza di passaggi particolarmente significativi.
- Stazioni di misura delle convergenze a cinque chiodi, per il rilevamento tridimensionale degli spostamenti del profilo di scavo, disposte ad un interasse di 50-100 m in funzione del contesto geomeccanico; nelle tratte caratterizzate da ammassi alquanto scadenti, dove si prevede la esecuzione di consolidamenti in avanzamento, andranno ubicate ogni campo di avanzamento, al fine di calibrare l'intensità dei trattamenti.
- Stazioni di misura dell'estrusione al fronte mediante estrusometro, solo in ammassi spingenti con significative deformazioni estrusometriche al fronte; tale misura viene condotta mediante la posa di una colonna estensimetrica, del tipo "sliding deformer", per una lunghezza in avanzamento di 30-40 m.
- Stazioni di misura dei cedimenti superficiali, mediante rete topografica di superficie, per la zona dell'imbocco Bruzolo, a basse coperture.



- Stazioni di misura dello stato tensionale nei rivestimenti mediante celle di carico al di sotto del piede della centina e/o barrette estensimetriche da posizionarsi sull'anima del profilato centinato.
- Stazioni di misura dello stato tensionale nei rivestimenti definitivi mediante prove di martinetto piatto o mediante barrette estensimetriche annegate nei getti.
- Stazioni di misura delle deformazioni e del livello di plasticizzazione al contorno del cavo, mediante estensimetri multibase, ubicati in corrispondenza della calotta e delle reni.
- Stazioni di misura delle pressioni neutre al contorno del cavo, mediante posa di piezometri radiali con celle piezometriche; al fine di stimare le portate d'acqua in galleria si prevede infine l'impiego di misuratori di portata.

Le stazioni di misura saranno organizzate in:

- "Stazioni sistematiche", frequenti lungo il tracciato della galleria, per raccogliere i dati di più immediata interpretazione e gestione, quali rilievi del fronte di scavo, stazioni di convergenza e stazioni estrusometriche al fronte;
- "Stazioni speciali", dove si raccolgono informazioni di maggiore dettaglio ed approfondimento; oltre alla strumentazione già tipica delle stazioni sistematiche, andranno previste celle di carico e barrette estensimetriche per la definizione dello stato tensionale dei rivestimenti, estensimetri multibase per la misura delle deformazioni nell'ammasso e piezometri per la valutazione delle pressioni idrostatiche. Tali stazioni saranno ubicate, in particolare, in situazioni geomeccaniche e strutturali delicate e potranno essere remotizzate per la lettura nel lungo termine.

## 9 FASAGGI – ANALISI DELLE OPERE CIVILI

Per il raggiungimento della configurazione finale dell'opera, a due canne, si sono studiati – secondo un percorso multicriteria – diversi scenari di fasaggio, focalizzando in particolare l'attenzione agli scenari denominati 5, 5', 7 e 10. Per una descrizione dettagliata degli stessi, dal punto di vista funzionale e trasportistico, si rimanda al documento APS 2085 TSE3 REXX::3352.

A ciascuno dei suddetti scenari si associano quattro concetti di sicurezza, ovvero:

- Concetto A: galleria monotubo senza disposizioni particolari
- Concetto B: galleria monotubo con galleria di transito
- Concetto C: galleria monotubo con galleria di sicurezza
- Concetto D: galleria monotubo con secondo tubo non attrezzato

Gli scenari più significativi sono apparsi, a conclusioni degli studi, il 5, 5' e 7.

Per gli scenari 5 e 5' si prevede di realizzare a doppia canna, già in prima fase, il tunnel di Bussoleno ed un primo tratto del tunnel di Base, prossimo all'imbocco italiano; a questi scenari si applicherebbero i concetti di sicurezza A o C.

Lo scenario 7 prevede invece sia per il tunnel di Bussoleno che per la tratta in territorio italiano del tunnel di Base gallerie a singola canna; a questo scenario si applicherebbe il concetto di sicurezza C.

Infine, un'ultima ipotesi è rappresentata dallo scenario 5'', che risulta dalla sovrapposizione dello scenario 5 per il tunnel di Base e dello scenario 7 per il tunnel di Bussoleno.

Negli scenari per i quali non è prevista da subito la realizzazione delle due canne ferroviarie, si ritiene di procedere dapprima con la realizzazione della canna binario dispari, disposto più a monte, sia per il tunnel di Bussoleno che del Tunnel di Base, come riportato negli elaborati grafici APS 2085 TSE3 PLGA::G::3185 e 3186.

Al fine di consentire in un successivo momento il completamento delle opere finali senza interrompere l'esercizio ferroviario, si ritiene inoltre necessario procedere da subito alla realizzazione dei by-pass di collegamento, lasciando ad un secondo momento unicamente lo scavo degli ultimi metri di raccordo con la nuova canna in costruzione. Le tratte di by-pass già

scavate potranno essere in parte impiegate per l'alloggiamento di impianti per l'esercizio della linea e protetti nella parte terminale da un muro di chiusura che sarà rimosso solamente al completamento dei lavori.

Analogamente, sia per il sito di intervento di Venaus che per quello di ventilazione di Foresto, risulta necessario procedere alla realizzazione di tutti i volumi tecnici e delle gallerie necessarie alla gestione della sicurezza e della ventilazione, lasciando da eseguire unicamente gli "allacciamenti" alla nuova canna in scavo. Anche in questo caso i volumi in esercizio saranno separati da muri di contenimento e protezione dai futuri volumi in scavo, demoliti solo in fase di completamento delle opere.

Rimarranno da scavare unicamente la nuova galleria e, per il sito di Venuas, la sezione allargata per la zona di intervento e di ventilazione, e per il sito di Foresto, la tratta in allargo per la diffusione dell'aria fresca.

## 10 CONCLUSIONI

Nella presente relazione tecnica sono state descritte le principali opere in sotterraneo per il tratto italiano del tunnel di Base e per il tunnel di Bussoleno, opere facenti parte del nuovo collegamento ferroviario Lione-Torino.

Dopo avere descritto il metodo di lavoro impiegato per la progettazione preliminare, si sono descritti gli aspetti funzionali e geometrici delle opere progettate e si sono individuati, in funzione delle caratteristiche geologiche-geomeccaniche (fase conoscitiva) e del comportamento allo scavo del fronte (fasi di diagnosi) le modalità di avanzamento (fase di terapia), sia in tradizionale che con scavo meccanizzato.

Si sono infine riportate alcune considerazioni in merito all'interasse fra le due gallerie di linea ed al programma di monitoraggio da predisporre per il controllo tenso-deformativo dei manufatti realizzati nel breve e lungo termine.

Le analisi numeriche condotte - linee caratteristiche e verifiche di stabilità del setto fra le due canne - sono da intendersi quali valutazioni di massima, che dovranno essere approfondite in sede di progettazione definitiva ed esecutiva, mediante modelli di calcolo ad elementi finiti, in grado di meglio rappresentare l'evoluzione tensionale al contorno del cavo, a seguito dello scavo. La campagna geognostica integrativa permetterà inoltre di meglio caratterizzare gli ammassi, in termini di parametri di resistenza e di deformabilità, come indicato nella relazione geologica generale.

Si riportano infine alcune valutazioni in merito alle fasi di costruzione dell'opera in funzione dei fasaggi di esercizio studiati (progetto fasato).

## 11 BIBLIOGRAFIA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

- Bonnard & Gardel Ingénieurs-conseils SA - Alpetunnel GEIE; Lug.1999 Mission d'assistance géotechnique, Mission M 2.2 Qualification des risques de décompressions violentes, Essais en laboratoire de compression monoaxiale avec enregistrement acoustique. Lausanne.
- Bonnard & Gardel Ingénieurs-conseils SA - Alpetunnel GEIE– Set. 1999 - Mission d'assistance géotechnique, Mission M 1 Caractérisation géotechnique du tracé, Note sur les possibilités de caractériser de manière statistique le comportement mécanique des roches dures. Lausanne.
- Bonnard & Gardel Ingénieurs-conseils SA – Alpetunnel GEIE - Gen. 2000 - Mission d'assistance géotechnique, Mission M 0.1 Avis général sur le projet et sur les données disponibles, Tunnel Maurienne – Ambin et tunnel de Bussoleno, Note 1 : reconnaissances et études réalisées.
- Bonnard & Gardel Ingénieurs-conseils SA – Alpetunnel GEIE - Gen. 2000 - Mission d'assistance géotechnique, Mission M 0.1 Avis général sur le projet et sur les données disponibles, Tunnel Maurienne – Ambin et tunnel de Bussoleno, Note 2 : analyse globale du contexte géotechnique. Lausanne.
- Bonnard & Gardel Ingénieurs-conseils SA – Alpetunnel GEIE - Gen. 2000 Mission d'assistance géotechnique, Mission M 0.1 Avis général sur le projet et sur les données disponibles, Tunnel Maurienne – Ambin et tunnel de Bussoleno, Note 3 : répertoire des points sensibles pour le projet.
- Bonnard & Gardel Ingénieurs-conseils SA – Alpetunnel GEIE - Gen. 2000 - Mission d'assistance géotechnique, Mission M 0.1 Avis général sur le projet et sur les données disponibles, Tunnel Maurienne – Ambin et tunnel de Bussoleno, Note 4 : Analyse de l'étude de risques de mars 1998
- Bonnard & Gardel Ingénieurs-conseils SA - Alpetunnel GEIE - Feb. 2000 Missione di assistenza geotecnica, Missione M 0.1 Parere generale sul progetto e sui dati disponibili, Tunnel Maurienne – Ambin e tunnel di Bussoleno, Nota 5 : sintesi della missione e parere sulle indagini.

- Bonnard & Gardel Ingénieurs-conseils SA - Alpetunnel GEIE – Feb. 2000 - Mission M2 Problèmes géotechniques particuliers; Tunnel Maurienne – Ambin et tunnel de Bussoleno Mission M 2.1 : anisotropie mécanique du massif.
- Bonnard & Gardel Ingénieurs-conseils SA – Alpetunnel GEIE - Feb. 2000 - Mission d’assistance géotechnique, Mission M 2 Problèmes géotechnique particuliers, Tunnel Maurienne – Ambin et tunnel de Bussoleno, Mission M 2.2 : Décompressions violentes.
- Bonnard & Gardel Ingénieurs-conseils SA – Alpetunnel GEIE - Feb. 2000 - Mission d’assistance géotechnique, Mission M 2 Problèmes géotechniques particuliers, Tunnel Maurienne – Ambin et tunnel de Bussoleno, Mission M 2.3 : Hydrogéologie.
- GEIE Bonnard & Gardel Ingénieurs-conseils SA – Alpetunnel GEIE - Feb. 2000 - Mission d’assistance géotechnique, Mission M 2 Problèmes géotechnique particuliers, Tunnel Maurienne – Ambin et tunnel de Bussoleno, Mission M 2.4 : Gonflement.
- Bonnard & Gardel Ingénieurs-conseils SA – Alpetunnel GEIE - Mag. 2000 - Mission d’assistance géotechnique, Mission M 2 Problèmes géotechnique particuliers, Tunnel Maurienne – Ambin et tunnel de Bussoleno, Mission M 2.5 : Fortes convergences – Squeezing.
- Bonnard & Gardel Ingénieurs-conseils SA - Alpetunnel GEIE - Mag. 2000 - Mission d’assistance géotechnique, Mission M 2 Problèmes géotechnique particuliers, Tunnel Maurienne – Ambin et tunnel de Bussoleno, Mission M 2.6 : Fluage.
- Bonnard & Gardel Ingénieurs-conseils SA - Alpetunnel GEIE – Mag. 2000 - Mission M1 Caractérisation géotechnique du tracé; Tunnel de base Maurienne – Ambin Mission M 1.1 à M 1.5 (Cahier n°1 – Rapport) .
- EEG-SIMECSOL, SEA Consulting, Silène, Baptendier – LTF Lyon Turin Ferroviarie Dic. 2002 – Etudes hydrogéologiques 2002-2004 – Rapport d’étape Parte italiana.
- Bonnard & Gardel Ingénieurs-conseils SA – Alpetunnel GEIE - Apr. 2001 - Mission d’assistance géotechnique, Caractérisation géotechnique du tracé, Tunnel de Bussoleno Variante Nord, Mission M 1.6.
- ISMES – Alpetunnel GEIE – Gen. 2000 – Collegamento ferroviario transalpino Torino-Lione. Misure di radioattività su campioni di rocce provenienti da sondaggi.
- ISMES – Alpetunnel GEIE – Gen. 2000 – Collegamento ferroviario transalpino Torino-Lione. Ricerca bibliografica sulla radioattività naturale in Val Susa.

- LTF Lyon Turin Ferroviarie - 2002 - Campagna geognostica 2002-2003, Relazione tecnico-illustrativa .
- LTF Lyon Turin Ferroviarie – Giugno 2002 – Monitoraggio delle risorse idriche ricadenti nelle aree interessate dal progetto del nuovo collegamento Torino Lione – Campagna di misure di controllo 2002-2004.
- Jean-Christophe Maréchal (LGIH) – Lug. 1998 - Observation des massifs cristallins alpins au travers des ouvrages souterrains, 1. Caractérisation de la conductivité hydraulique à l'échelle du massif . Liege.
- G. Menard (CNRS), D. Fabre (LIRIGM) – Alpetunnel GEIE – Giu. 2000 - SEZIONE INTERNAZIONALE Sintesi geologica per settori. Nuova linea ferroviaria transalpina Torino-Lione.
- Risorse Idriche S.p.a. – Alpetunnel GEIE – Gen.1996 – Progetto del tunnel di base e collegamento con la rete esistente nel tratto in territorio italiano. Studio idrogeologico. Relazione di sintesi.
- SEA Consulting, S.G.I. - LTF Lyon Turin Ferroviarie - Luglio 2002 - Galleria geognostica di Venaus, Relazione geologica idrogeologica e geomeccanica.
- SEA Consulting – Alpetunnel GEIE – Luglio 1999 – Studio “Tunnel di base Maurienne –Ambin e Tunnel di Bussoleno”. Studio sulla tettonica Recente finalizzata alla definizione dello stress in sito. Tav. 1 Schema tettonico e dati relativi all’ analisi strutturale sulla tettonica fragile.
- Università Ca’ Foscari di Venezia, Dipartimento di Scienze Ambientali. – 2000 – Assistance Technique Hydrogeologie – Géochimie isotopique des circulations souterraines profondes (tunnels de base et de Bussoleno de la future liaison ferroviaire Lyon – Torino).
- Università degli studi di Torino, Dipartimento di Scienze della Terra (DST) – Alpetunnel GEIE – Set. 1998 – Relazione geologica relativa all’area Bussoleno Nord. Tav. 2 Carta geologica in scala 1:10.000, Tav. 2b Variante Nord, Profilo geologico in corrispondenza dell’ipotesi di tracciato, Torino.
- Università degli studi di Torino Dipartimento di Scienze della Terra (DST) – Alpetunnel GEIE – Set. 1998 – Relazione geologica relativa all’area Val Cenischia – Val Clarea. Tav. 1 Carta geologica in scala 1:10.000, Tav. 1a Variante Nord, Profilo

geologico in corrispondenza dell'ipotesi di tracciato, Tav 1b Variante Sud, Profilo geologico in corrispondenza dell'ipotesi di tracciato. Torino.

- Università degli studi di Torino, Dipartimento di Scienze della Terra (DST) – Alpetunnel GEIE – Dic. 1999 – Studio preliminare di alcuni campioni di ortoderivati provenienti dalla Val di Susa, mediante il metodo delle tracce di fissione su apatite. Torino.
- Università degli studi di Torino Dipartimento di Scienze della Terra (DST) – Alpetunnel GEIE – Aprile 1999 – Studio fotogeologico. Rapporto Finale. Tav. 1 Foglio Bardonecchia scala 1:50.000, Tav. 2 Foglio Susa scala 1:50.000, Tav 3 Fogli Susa, Bardonecchia, Cesana Torinese e Pinerolo scala 1:100.000.
- Università degli studi di Torino Dipartimento di Scienze della Terra (DST), SEA – Alpetunnel GEIE - Giugno 1999 – Idrogeologia rapporto finale (Tunnel di Base e Tunnel di Bussoleno). Tav. 1 Carta delle unità idrogeologiche del basamento prequaternario e delle unità quaternarie di copertura, Tav. 2 Profili idrogeologici in corrispondenza delle ipotesi di tracciato – scala 1:25.000, Tav 3 Profili idrogeologici e modello idrogeologico del settore vallivo compreso tra la media e bassa Val Cenischia e la Val Clarea. Torino.
- Università degli studi di Torino, Dipartimento di Scienze della Terra (DST) – Alpetunnel GEIE – Set. 1998 – Relazione geologica relativa all'area Bussoleno Nord. Allegati: Tav. 2 Carta geologica in scala 1:10.000, Tav. 2b Variante Nord, Profilo geologico in corrispondenza dell'ipotesi di tracciato, Torino.
- Università degli studi di Torino Dipartimento di Scienze della Terra (DST) – Alpetunnel GEIE – Set. 1998 – Relazione geologica relativa all'area Val Cenischia – Val Clarea. Allegati: Tav. 1 Carta geologica in scala 1:10.000, Tav. 1a Variante Nord, Profilo geologico in corrispondenza dell'ipotesi di tracciato, Tav 1b Variante Sud, Profilo geologico in corrispondenza dell'ipotesi di tracciato. Torino.
- Università degli studi di Torino Dipartimento di Scienze della Terra (DST), SEA – Alpetunnel GEIE - Novembre 1999 – Tavola 4, Stratigrafia dei sondaggi S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9, S10, S11, S12, S17, S23, S24, S25, S26, S27, S28, S29, S30 scala 1:100 .
- LTF Lyon Turin Ferroviarie - 2002 - Campagna geognostica 2002-2003, Relazione tecnico-illustrativa.



- SEA Consulting – Alpetunnel GEIE – Luglio 1999 – Studio “Tunnel di base Maurienne –Ambin e Tunnel di Bussoleno”. Studio sulla tettonica Recente finalizzata alla definizione dello stress in sito. Allegati: Tav. 1 Schema tettonico e dati relativi all’analisi strutturale sulla tettonica fragile.
- Università degli studi di Torino, Dipartimento di Scienze della Terra (DST) – Alpetunnel GEIE – Dic. 1999 – Studio preliminare di alcuni campioni di ortoderivati provenienti dalla Val di Susa, mediante il metodo delle tracce di fissione su apatite. Torino.
- Università degli studi di Torino Dipartimento di Scienze della Terra (DST) – Alpetunnel GEIE – Aprile 1999 – Studio fotogeologico. Rapporto Finale. Allegati: Tav. 1 Foglio Bardonecchia scala 1:50.000, Tav. 2 Foglio Susa scala 1:50.000, Tav 3 Fogli Susa, Bardonecchia, Cesana Torinese e Pinerolo scala 1:100.000.
- EEG-SIMECSOL, SEA Consulting, Silène, Baptendier – LTF Lyon Turin Ferroviarie Dic. 2002 – Etudes hydrogéologiques 2002-2004 – Rapport d’étape Parte italiana. Allegati: Tav. 1 Schéma hydrogéologique entre St.Jean de Maurienne et Bruzolo 1:50.000, Tav. 2 Coupe hydrogéologique entre St.Jean de Maurienne et Bruzolo 1:50.000, Tav 3 Carte dei syntese du SIG.
- Università degli studi di Torino Dipartimento di Scienze della Terra (DST), SEA – Alpetunnel GEIE - Giugno 1999 – Idrogeologia rapporto finale (Tunnel di Base e Tunnel di Bussoleno). Allegati: Tav. 1 Carta delle unità idrogeologiche del basamento prequaternario e delle unità quaternarie di copertura, Tav. 2 Profili idrogeologici in corrispondenza delle ipotesi di tracciato – scala 1:25.000, Tav 3 Profili idrogeologici e modello idrogeologico del settore vallivo compreso tra la media e bassa Val Cenischia e la Val Clarea. Torino
- Risorse Idriche S.p.a. – Alpetunnel GEIE – Gen.1996 – Progetto del tunnel di base e collegamento con la rete esistente nel tratto in territorio italiano. Studio idrogeologico. Relazione di sintesi.
- LTF Lyon Turin Ferroviarie – Giugno 2002 – Monitoraggio delle risorse idriche ricadenti nelle aree interessate dal progetto del nuovo collegamento Torino Lione – Campagna di misure di controllo 2002-2004.
- ISMES – Alpetunnel GEIE – Gen. 2000 – Collegamento ferroviario transalpino Torino-Lione. Ricerca bibliografica sulla radioattività naturale in Val Susa.

- ISMES – Alpetunnel GEIE – Gen. 2000 – Collegamento ferroviario transalpino Torino-Lione. Misure di radioattività su campioni di rocce provenienti da sondaggi.
- Università Ca' Foscari di Venezia, Dipartimento di Scienze Ambientali. – 2000 – Assistance Technique Hydrogeologie – Géochimie isotopique des circulations souterraines profondes (tunnels de base et de Bussoleno de la future liaison ferroviaire Lyon – Torino).
- Bonnard & Gardel Ingénieurs-conseils SA – Alpetunnel GEIE - Gen. 2000 - Mission M3 – Conception des ouvrages principaux. Tunnel di Base Maurienne –Ambin : hypotesis generales.
- Bonnard & Gardel Ingénieurs-conseils SA – Alpetunnel GEIE - Gen. 2000 - Mission M3 – M3.1-M3.5 Chaier n 1, Chaier n 2 e n 3.
- Bonnard & Gardel Ingénieurs-conseils SA – Alpetunnel GEIE - Gen. 2000 - Mission M3 – Conception des ouvrages principaux. Tunnel di Bussoleno: chaier n 1 e 2.

APS2085TSE3REGX::G::  
:3116 A

NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO TRANSALPINO TORINO - LIONE  
TRATTA CONFINE DI STATO ITALIA/FRANCIA - BRUZOLO  
PROGETTO PRELIMINARE

Groupement  
TSE  
Lyon Turin

31/01/03

## 12 APPENDICE 1 – APPROCCIO PROGETTUALE SECONDO IL METODO ADECO-RS

APS2085TSE3REGX::G::  
:3116 A

NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO TRANSALPINO TORINO - LIONE  
TRATTA CONFINE DI STATO ITALIA/FRANCIA - BRUZOLO  
PROGETTO PRELIMINARE

Groupement  
TSE  
Lyon Turin

31/01/03

### 13 ALLEGATI

1. Linee Caratteristiche
2. Analisi mediante il programma Area indice