

SIG – Società Italiana Gallerie

Convegno “Le grandi infrastrutture ferroviarie alpine in costruzione: le scelte progettuali e costruttive per la realizzazione di tunnel lunghi e profondi”

Samoter 2017 - Verona (VR) 23 – 24 febbraio 2017

**TUNNEL DI BASE DEL BRENNERO LATO ITALIA – LOTTO MULES 2-3
LE SCELTE DI PROGETTO DEI RIVESTIMENTI DEFINITIVI**

**BRENNER BASIS TUNNEL ITALIAN SIDE – LOT MULES 2-3
FINAL LININGS’ DESIGN CHOICES**

Matteo Moja – Pro Iter S.r.l. – Progettista settore Opere in Sotterraneo, Tunnels’ Engineer
Enrico Maria Pizzarotti – Pro Iter S.r.l. – Direttore Tecnico, Technical Director

Sommario

I rivestimenti definitivi del sistema ferroviario del Tunnel di Base del Brennero sono stati progettati per garantire all’infrastruttura una vita utile di 200 anni. Tale obiettivo è stato perseguito mediante l’adozione di particolari accorgimenti progettuali, come l’aumento dei coefficienti di sicurezza sui materiali, la limitazione delle pressioni idrauliche, l’adozione di spessori di calcolo inferiori a quelli nominali, l’applicazione di combinazioni di carico eccezionali, ecc. Per garantire la durabilità dell’opera, particolare attenzione è stata dedicata anche al sistema di impermeabilizzazione e drenaggio delle gallerie, sia nelle tratte scavate con metodi tradizionali che in quelle meccanizzate. In quest’ultime, nelle zone critiche dal punto di vista geomeccanico, in presenza di materiali rigonfianti e in corrispondenza degli innesti con i Cunicoli Trasversali, è inoltre prevista la realizzazione di un rivestimento interno gettato in opera, rispettivamente con o senza arco rovescio.

Abstract

The final linings of the railway system of the Brenner Base Tunnel have been designed to guarantee a service life of 200 years. This goal has been pursued through the adoption of special design features, such as increasing the safety coefficients on the materials, the limitation of hydraulic pressures, the adoption of design thicknesses less than nominal, considering exceptional load combinations, etc. To ensure the durability, special attention was also devoted to the system of waterproofing and drainage in the tunnels excavated with traditional and mechanized methods. In the mechanized sections, where critical geomechanical conditions are expected, in the presence of swelling phenomena and in correspondence with bypass, an internal concrete lining, respectively with or without invert is also provided.

1 Introduzione

La Galleria di Base del Brennero (BBT) (Figura 1) è costituita da due canne principali, che da sole raggiungeranno ciascuna una lunghezza di 55 km (64 km se si considera anche la circonvallazione di Innsbruck) che corrono parallelamente alla distanza di 70 m l'una dall'altra. Ogni 300 m circa le due canne principali sono collegate mediante by-pass che assumono funzioni di alloggiamento impiantistico e di percorsi di sicurezza e sono parti integranti del sistema di raccolta delle acque drenate dalle gallerie. È presente inoltre un cunicolo, avente una funzione esplorativa in fase di scavo e di servizio e drenaggio in fase definitiva, che corre in mezzzeria alle due canne a una quota inferiore di circa 12 m. Completano il sistema 3 Fermate di Emergenza, di cui una lato Italia e 3 finestre di accesso laterale, tra cui quella di Mules lato Italia.

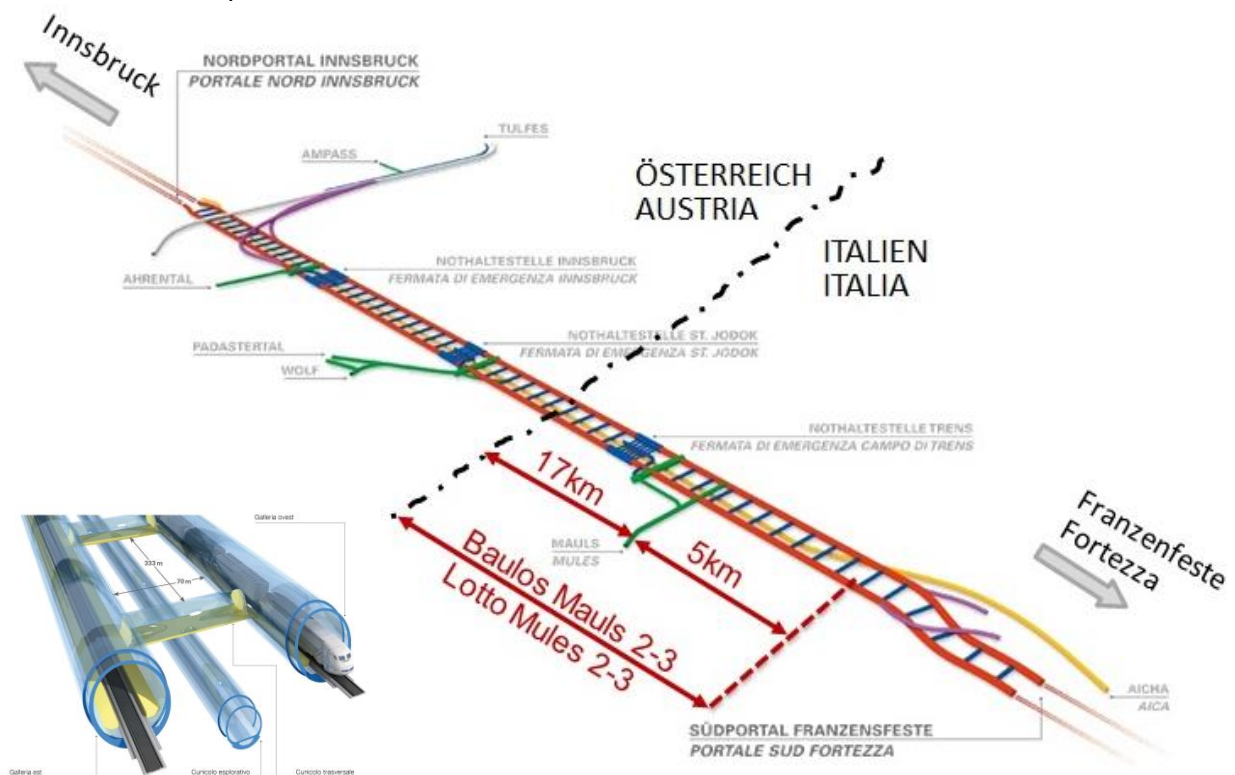


Figura 1 – Planimetria schematica della Galleria di Base del Brennero

Il Raggruppamento Temporaneo di Imprese RTI 4P, composto dalla Pro Iter S.r.l. (mandataria) e da Pöyry Schweiz SA, Pini Swiss Engineers SA e Pasquali-Rausa Engineering S.r.l. (mandanti), si è occupato della Progettazione Esecutiva del Lotto Mules 2-3 che riguarda gran parte delle opere previste sul territorio italiano, in particolare tutte quelle che ricadono nella tratta tra il Confine di Stato al Sotto-attraversamento dell'Isarco.

Il lotto prevede sia il dimensionamento dei rivestimenti definitivi delle tratte già scavate (Finestra di Mules, Caverne e prima tratta di Gallerie e Cunicolo Esplorativo in tradizionale verso nord) sia il dimensionamento delle sezioni di scavo delle Gallerie di Linea, del Cunicolo Esplorativo verso nord, dei Cameroni di montaggio delle TBM, della Fermata di Emergenza, ecc., per un totale di oltre 22 km di sistema. Le performance di progetto del sistema del sono state definite da un corpo di linee guida redatte in ambiente transnazionale, preliminarmente alla fase di progettazione esecutiva, conosciuto come Progettazione di Sistema (PdS). La PdS prevede, come premessa fondante, un obiettivo di vita utile dell'opera di 200 anni. Per ottemperare alle prescrizioni della PdS è stato necessario adottare una serie

di accorgimenti progettuali, in parte definiti dalla PdS stessa e in parte integrati attraverso un continuo e costruttivo confronto con il Responsabile Tecnico di BBT SE.

2 Inquadramento geologico

La Galleria di Base del Brennero attraversa, in territorio italiano, gran parte delle unità tettoniche che caratterizzano il sistema alpino (Figura 2), passando da rocce molto competenti come i graniti di Bressanone presenti nella tratta più a sud, a quelle meno competenti che caratterizzano il lineamento Periadriatico e la Falda del Vizze.

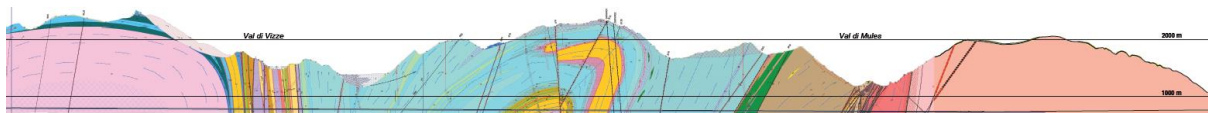


Figura 2 – Profilo geologico lato Italia

Da sud verso nord, molto sinteticamente, si incontra il granito di Bressanone, le tonaliti, le filladi e le rocce di faglia della Val di Mules, i paragneiss e i micascisti del basamento cristallino austroalpino, quindi calcestisti calcarei e non, marmi e scisti della Falda del Vizze, i metasedimenti mesozoici (marmi, quarziti, anidriti e gesso, scisti e micascisti, filladi) del triassico alla base della falda del Vizze fino al nucleo di gneiss granitico centrale del Tux.

Le coperture raggiungono i 1700 m e lungo il tracciato sono presenti numerose zone di disturbo tettonico e altre in cui sono previste copiose venute d'acqua, alcune delle quali connesse a sistemi idrogeologici termali di pregio, per le quali sono state dettate particolari prescrizioni in termini di salvaguardia.

3 Sezioni tipo

Come detto, il sistema ferroviario è costituito da due gallerie monodirezionali a singolo binario caratterizzate da un'aria di scavo variabile da 65 m² a 90 m² (Figura 3) in funzione della classe geomeccanica dell'ammasso attraversato e delle relative modalità di scavo. Solo nella tratta più a sud, verso Fortezza, dove sono previsti due binari per senso di marcia, e nella Fermata di Emergenza a nord di Mules, la sezione di scavo aumenta fino ad un massimo di 123 m². Per affrontare le diverse configurazioni geometriche e la variabilità geomeccanica riscontrabile lungo il tracciato, ma anche per ottimizzare il cronoprogramma, in accordo con BBT SE sono state previste tratte scavate con metodi tradizionali e altre con metodi meccanizzati.

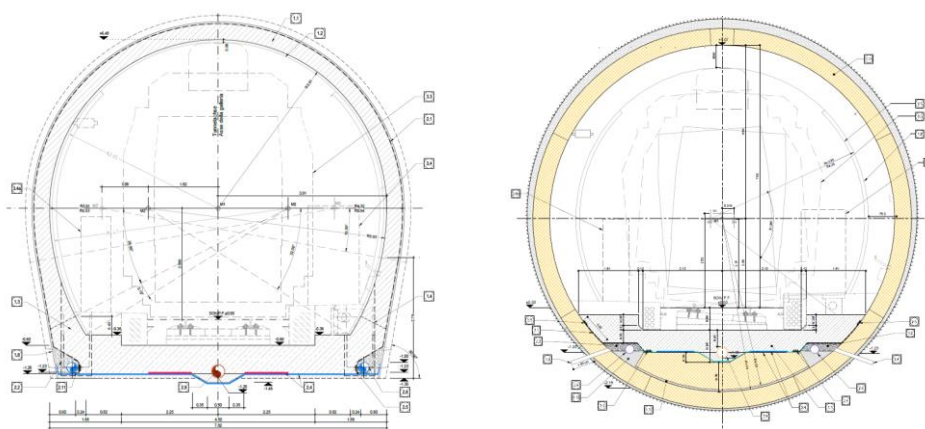


Figura 3 – Galleria a singolo binario – Sezioni tipo esemplificative per scavo in tradizionale e scavo meccanizzato (con rivestimento unico in conci prefabbricati)

In particolare, lo scavo in tradizionale è previsto per affrontare le Gallerie a doppio binario, la Fermata di Emergenza con annessa Galleria di Accesso e tutti i Cunicoli Trasversali, nonché le Gallerie di Linea a singolo binario e il Cunicolo Esplorativo tra la Finestra di Mules e i Cameroni di Montaggio delle TBM verso nord. Lo scavo delle Gallerie di Linea e del Cunicolo a nord della Fermata di Emergenza fino al Confine di Stato e delle Gallerie di Linea a singolo binario a sud della Finestra di Mules, viceversa, è previsto mediante metodi meccanizzati.

La sicurezza statica delle gallerie scavate in tradizionale è garantita, a lungo termine, dall'esecuzione di un rivestimento interno gettato in opera, armato o non, a cui è affidata la totalità dei carichi, trascurando cautelativamente il contributo del rivestimento di prima fase, come da esplicita prescrizione della PdS. Anche nelle tratte scavate con TBM, nell'attraversamento di tratte critiche dal punto di vista geomeccanico, in presenza di materiali rigonfianti o di configurazioni geometriche complesse, come gli innesti con i Cunicoli Trasversali, la sicurezza statica in esercizio è affidata a un rivestimento gettato in opera, con o senza arco rovescio (Figura 4), mentre per le restanti parti si è previsto un unico rivestimento in anelli di conci prefabbricati (Figura 3).

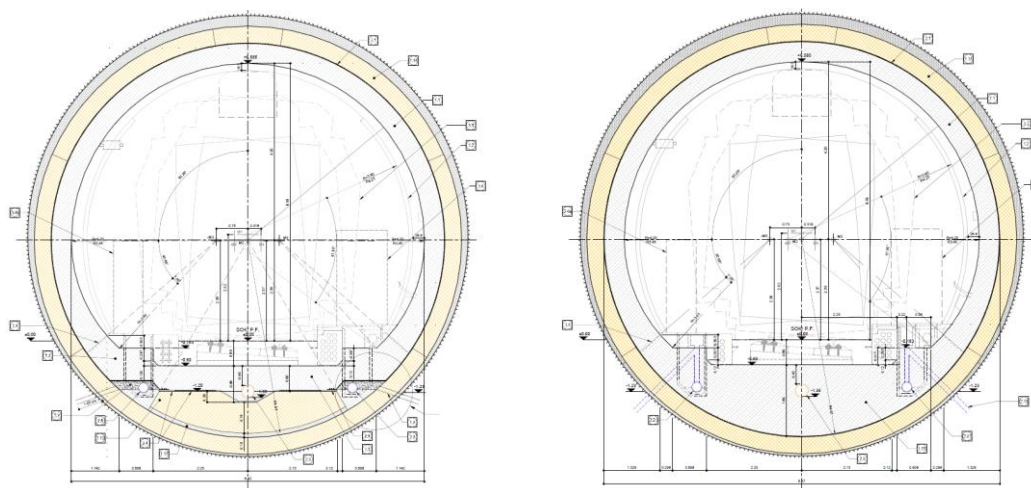


Figura 4 – Scavo meccanizzato con doppio rivestimento (con platea o con arco rovescio)

4 Input della Progettazione di Sistema e dimensionamento strutturale

4.1 Prescrizioni geometriche

Il dimensionamento di tutte le strutture è stato condotto considerando gli spessori di progetto derivanti dall'applicazione delle tolleranze di costruzione sugli spessori nominali, previste dalla PdS. Quest'ultima individua tre tipologie di tolleranze (Tabella 1):

- di tracciamento (T_t);
- sui rivestimenti di prima fase (T_1), siano essi realizzati con betoncino proiettato o con conci prefabbricati;
- sul cassero del rivestimento definitivo (T_c).

L'entità di tali valori, variabile in funzione delle sezioni tipo, ha comportato una riduzione degli spessori di calcolo, rispetto a quelli nominali, variabile tra i 5 e i 7 cm. Per le sezioni scavate in tradizionale, per esempio, si è assunta una tolleranza sul betoncino proiettato di ± 2.5 cm e sul posizionamento del cassero di ± 3.5 cm, con una conseguente riduzione complessiva dello spessore nominale decisamente significativa, pari a 6 cm.

			T _t [cm]	T ₁ [cm]	T _c [cm]
Scavo in tradizionale	Galleria principale	Orizzontale	±5	±2.5	±3.5
		Verticale	±2	±2.5	±3.5
	Galleria principale a due binari	Orizzontale	±8	±2.5	±3.5
		Verticale	±2	±2.5	±3.5
	Cunicolo esplorativo	Orizzontale	±35	±2.0	±3.0
		Verticale	±10	±2.0	±3.0
	Cunicoli trasversali	Orizzontale	±4	±2.0	±3.0
		Verticale	±2	±2.0	±3.0

			T _t [cm]	T ₁ [cm]	T _c [cm]
Scavo con TBM	Galleria principale TBM scudata	Orizzontale	±9	±3.5	±3.5
		Verticale	+5 / -13	±3.5	±3.5
	Galleria principale TBM aperta	Orizzontale	±9	±2.5	±3.5
		Verticale	+5 / -13	±2.5	±3.5
	Cunicolo esplorativo	Orizzontale	±35	±3.0	±3.0
		Verticale	±10	±3.0	±3.0

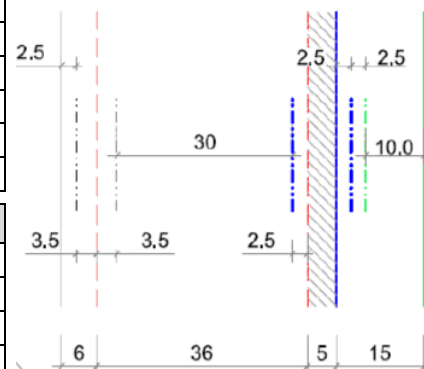


Tabella 1 – Tolleranze di costruzione e rappresentazione grafica per le GL in tradizionale

Un ulteriore vincolo imposto dalla Progettazione di Sistema ha riguardato gli spessori minimi strutturali, pari a 30 cm per le sezioni non armate e 35 cm per quelle armate.

4.2 Carichi di riferimento

I rivestimenti definitivi sono stati dimensionati nei confronti di: I) carichi d'ammasso, comprensivi di quelli derivanti da fenomeni di swelling e squeezing; II) pesi propri; III) appendimento della linea di contatto; IV) carichi idraulici (Paragrafo 6); V) variazioni di temperatura; VI) carichi dovuti a fenomeni di viscosità e ritiro del calcestruzzo; VII) delle pressioni/depressioni aereodinamiche indotte dal passaggio dei convogli.

Per la definizione dei carichi d'ammasso sui rivestimenti definitivi sono state considerate due configurazioni (Figura 5):

1. Carichi concentrati dovuti al rilascio di blocchi rocciosi in materiali competenti con presenza di discontinuità persistenti;
2. Carichi distribuiti, in ammassi con comportamento spingente, rigonfiante e/o dipendente dal tempo.

L'entità dei carichi concentrati è stata valutata di volta in volta considerando la giacitura e le caratteristiche geomeccaniche delle discontinuità caratterizzanti ciascuna tratta in oggetto.

L'entità dei carichi distribuiti è stata invece valutata mediante analisi di discretizzazione del continuo FDM in grado di modellare tutte le fasi di realizzazione delle varie parti d'opera fino all'installazione del rivestimento definitivo. I suddetti modelli hanno consentito anche la taratura e il dimensionamento di tutti i provvedimenti costruttivi di prima fase finalizzati al confinamento delle cavità durante le fasi di scavo.

Oltre al carico principale d'ammasso, particolare attenzione è stata dedicata alla valutazione dei carichi che inducono potenziali stati di trazione nei rivestimenti, al fine della verifica della possibilità di applicare sezioni non armate. In particolare, su tutti i rivestimenti è stato applicato un delta termico variabile in funzione della distanza dagli imbocchi come rappresentato in Tabella 2.

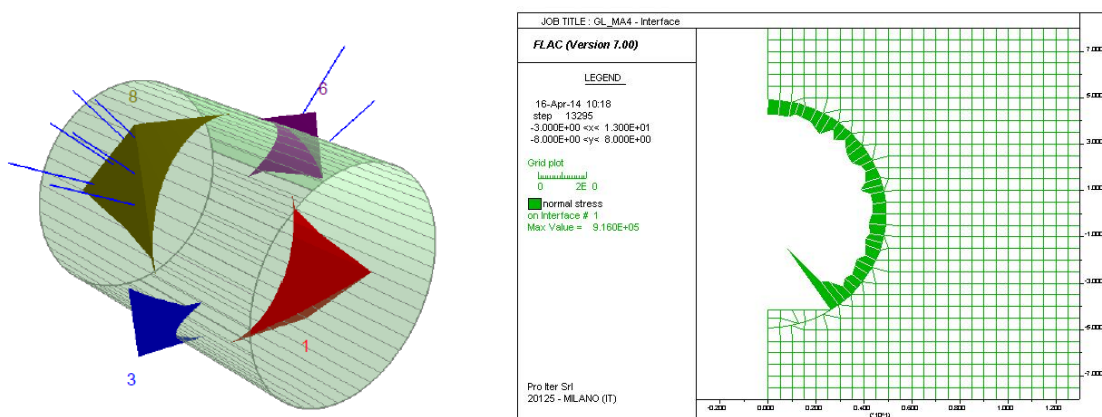


Figura 5 – Esempio di definizione del carico concentrato e del carico d’ammasso

Abstand Portal / Distanza dall’imbocco [km]	< 3,0		3,0 - 10,0		>10,0	
Temperaturgradient / gradiente della temperatura ΔT [°C]	5		2		2	
ΔT_{eff} [°C]	Winter / inverno	Sommer / estate	Winter / inverno	Sommer / estate	Winter / inverno	Sommer / estate
	-16	16	-10	10	-6	6

Tabella 2 – Variazione di temperatura in funzione della distanza dagli imbocchi

Per quanto riguarda il ritiro del calcestruzzo gettato in opera (C30/37) si è assunta una deformazione media a tempo infinito pari al 50% del valore prescritto dalla normativa (0.27‰), applicata in modo differenziato in funzione delle fasi di getto, prescrivendo, d’altra parte, l’adozione di un mix-design, da validare con test di laboratorio, con impiego di un super-fluidificante, di inerti non calcarei e di un additivo espansivo.

Lo studio dei processi di carico e scarico tensionale indotti dal passaggio dei treni fornito nella PdS, ha evidenziato che si possono generare in galleria azioni aerodinamiche fino a valori massimi pari a +11 kN/m² in pressione e a -9 kN/m² in aspirazione. Poiché si tratta di azioni da considerare come eccezionali, le azioni aerodinamiche sono state considerate solo nelle verifiche delle relative combinazioni di carico agli SLU.

Infine, in accordo con le prescrizioni del DM 28/10/2005 “Sicurezza gallerie ferroviarie”, la stabilità di tutte le opere è stata verificata anche in caso d’incendio, in considerazione della curva temperatura-tempo RWS definita dalla UNI 11076 (Figura 7). Per tutte le parti d’opera è stato garantito un Livello di Prestazione minimo, in accordo alle NTC 2008, pari al livello III (mantenimento dei requisiti di resistenza al fuoco delle strutture per un periodo congruo con la gestione dell’emergenza, pari a 120’) mentre per alcune parti d’opera deputate alla gestione dell’emergenza (Fermata di Emergenza, accessi ai Cunicoli Trasversali, soletta del canale di aspirazione fumi nella Fermata di Emergenza e subito a valle della stessa) si è optato per incrementare il Livello di Prestazione al Livello IV (requisiti di resistenza al fuoco delle strutture per garantire, dopo la fine dell’incendio, un limitato danneggiamento delle strutture stesse). Tale incremento di sicurezza è stato ottenuto prescrivendo l’additivazione dei rivestimenti definitivi con fibre in polipropilene e la protezione dell’estradosso del canale di aspirazione fumi mediante materiale isolante.

4.3 Combinazioni di carico

Le azioni sinteticamente descritte al paragrafo precedente sono state considerate in combinazione tra loro definendo la matrice riportata nella Figura 6.

Lastfall / Caso di carico	ständig / permanenti							vorübergehend / variabili			außergewöhnlich / eccezionali				
	Eigengewicht	Oberleitung	Sohlbeton	Wasserdruck	Gebirgslast ohne Auftrieb	Kriechen und Schwinden	Quell-druck	Temperatur (Sommer)	Temperatur (Winter)	Verkehrslast (Zugfahrt)	Erdbeben	Anprall	Brand	Druck infolge Zugfahrt	Sog infolge Zugfahrt
Einwirkungskombination / Combinazioni	Peso proprio	Catenaria	Carichi permanenti sull'arco rovescio	Carico idraulico	Carichi della roccia in condizioni assolute	Ritiro e rilassamento	Swelling-Squeezing	Temperatura (Estate)	Temperatura (Inverno)	Carico ferroviario	Sisma	Impatto	Fuoco	Carico aerodinamico (pressione)	Carico aerodinamico (aspirazione)
	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	Q1	Q1	Q2	E1	A2	A3	A1	A1
druckentlastet / sistema drenato	1.35							1.50							
	1.00							1.00							
	1.35					1.00			1.50						
	1.00					1.00			1.00						
	1.35	1.35	1.00					1.50							
	1.00	1.00	1.00					1.00							
	1.35	1.35	1.00			1.00			1.50						
	1.00	1.00	1.00			1.00			1.00						
	1.35	1.35	1.00	1.35	1.35			1.50							
	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00			1.00							
	1.35	1.35	1.00	1.35	1.35	1.00			1.50						
	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00			1.00						
	1.35	1.35	1.00	1.35	1.35		1.35	1.50							
	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00	1.00							
	1.35	1.35	1.00	1.35	1.35	1.00	1.35		1.50						
	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00							
	1.35	1.35	1.00					1.35	1.50						
	1.00	1.00	1.00					1.00	1.00						
	1.35	1.35	1.00							1.50					
	1.00	1.00	1.00							1.00					
	1.35	1.35	1.00			1.00	1.35		1.50						
	1.00	1.00	1.00			1.00	1.00		1.00						
	1.35	1.35	1.00					0.60	0.60					1.00	
	1.00	1.00	1.00												1.00
	1.35	1.35	1.00	1.00	1.00			0.60	0.60		1.00				
	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00					1.00				
	1.35	1.35	1.00	1.00	1.00		1.00	0.60	0.60						
	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00				1.00				
	1.35	1.35	1.00	1.00	1.00			0.60	0.60			1.00			
	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00							1.00			
	1.35	1.35	1.00	1.00	1.00								1.00		
	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00			0.60						1.00	
	1.35	1.35	1.00	1.00	1.00										1.00
	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00										1.00

Figura 6 – Combinazioni di carico

4.4 Resistenze di progetto (Fattori di sicurezza sui materiali)

A valle della definizione delle sollecitazioni nei rivestimenti, il dimensionamento e le verifiche delle sezioni, armate e non, sono state svolte in accordo alle prescrizioni contenute nelle NTC 2008, sia agli Stati Limite Ultimi che agli Stati Limite di Esercizio. Tuttavia, i coefficienti parziali di sicurezza per le resistenze in fase definitiva sono stati aumentati rispetto a quelli di Normativa per garantire la vita utile dell'opera di 200 anni. In particolare, per il calcestruzzo si è assunto un coefficiente parziale di sicurezza sulla resistenza pari a $\gamma_c = 1.60$ e per l'acciaio pari a $\gamma_s = 1.20$, contro rispettivamente a 1.50 e 1.15 definiti dalla Normativa.

Per le verifiche nella situazione di dimensionamento eccezionale i fattori parziali di sicurezza sono stati assunti pari a $\gamma_c = 1.20$ e $\gamma_s = 1.00$.

5 Verifiche in caso di incendio

Come precedentemente accennato, la sicurezza di tutte le strutture definitive è stata garantita anche nei confronti di un possibile incendio, assumendo la curva di esposizione temperatura-tempo RWS, definita dalla UNI 11076. La verifica al fuoco dell'opera si è basata sull'applicazione di normative e raccomandazioni costruttive cogenti ma anche sull'implementazione di modelli specifici utili a caratterizzare il comportamento strutturale rispetto all'evento incendio in un'infrastruttura complessa quale la Galleria di Base del Brennero. In estrema sintesi, la verifica di resistenza al fuoco dei rivestimenti definitivi è stata condotta in accordo agli Eurocodici con il metodo di calcolo semplificato, disaccoppiando il problema termico da quello meccanico. Il primo step è consistito nel definire le mappe di temperatura degli elementi strutturali coinvolti dall'incendio risolvendo analiticamente l'equazione della trasmissione del calore di Fourier. Nota la distribuzione delle temperature all'interno della sezione si è quindi stimato il decadimento puntuale delle proprietà meccaniche degli elementi strutturali e si è proceduto al dimensionamento strutturale delle sezioni pressoinflesse così penalizzate.

Il modello di trasmissione del calore in regime non stazionario all'interno del rivestimento della galleria è stato risolto applicando una condizione al contorno di temperatura variabile

nel tempo secondo la curva RWS (Figura 7). Si precisa che tale curva si è dimostrata più gravosa rispetto alla curva EUREKA definita dalle Specifiche Tecniche di Interoperabilità concernenti la sicurezza delle gallerie ferroviarie nel sistema ferroviario transeuropeo ad alta velocità.

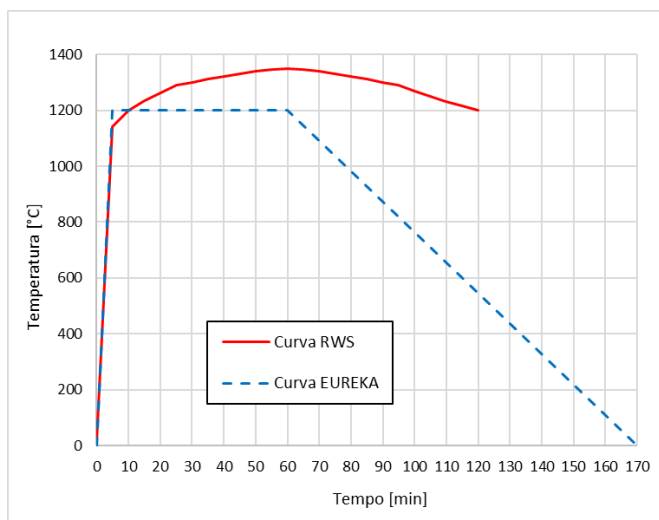


Figura 7 – Curve Temperatura-Tempo di riferimento

Note le mappe di temperatura nella sezione in diversi istanti temporali, confermate anche dal confronto con i risultati di analisi numeriche più complesse, appositamente commissionate da BBT, che considerano il calcestruzzo come un mezzo poroso multifase [2], il decadimento puntuale delle proprietà meccaniche è stato valutato applicando sia il metodo dell'isoterma dei 500° sia il metodo a zone, entrambi proposti negli Eurocodici.

I due metodi hanno fornito risultati paragonabili in termini di sezione danneggiata nel caso di lato esposto al fuoco soggetto a uno stato di sforzo di compressione. Viceversa, in caso di lato esposto al fuoco soggetto ad uno stato di sforzo di trazione, solo il metodo a zone, considerando i coefficienti per la riduzione della resistenza a trazione $k_{ct}(\theta)$ del calcestruzzo, ha permesso una definizione rappresentativa dello spessore danneggiato.

Alla luce di queste analisi, lo spessore di sezione che è stato trascurato nelle verifiche delle sezioni non armate in condizioni d'incendio è stato assunto pari a 5 cm e 7 cm rispettivamente in zona compressa ed in zona tesa.

Per le verifiche delle sezioni armate, in analogia a quelle non armate, sono stati distinti due casi:

- lato esposto al fuoco soggetto ad uno stato tensionale di compressione;
- lato esposto al fuoco soggetto ad uno stato tensionale di trazione.

Nel primo caso, la riduzione di resistenza del calcestruzzo in zona compressa è stata simulata riducendo la sezione di calcolo di 5 cm, in analogia a quanto previsto nelle sezioni non armate. Nel secondo caso, non considerando la resistenza a trazione del calcestruzzo in zona tesa nelle verifiche strutturali, le verifiche sono state effettuate considerando l'intero spessore della sezione e, in funzione della temperatura raggiunta nelle barre e del relativo coefficienti per la riduzione della resistenza a trazione $k_s(\theta)=0.8$, riducendo del 20% la resistenza caratteristica dell'armatura in zona tesa.

6 Sistema di impermeabilizzazione e drenaggio

Un'altra peculiarità del progetto è rappresentata dal sistema di impermeabilizzazione e drenaggio delle gallerie. In particolare, il drenaggio delle acque a tergo dei rivestimenti definitivi, che consente la captazione e l'allontanamento delle stesse, convoglia le portate drenate in alcuni Cunicoli Trasversali (Figura 8) da cui vengono scaricate nel Cunicolo Esplorativo sottostante, attraverso il quale vengono trasferite fino all'imbocco di Aica.

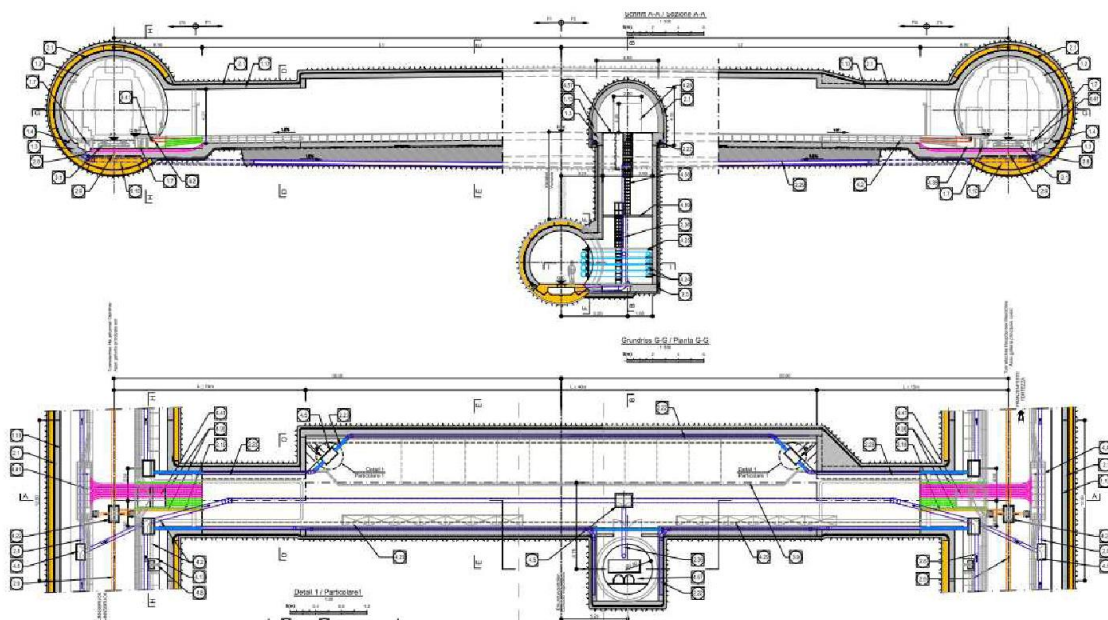
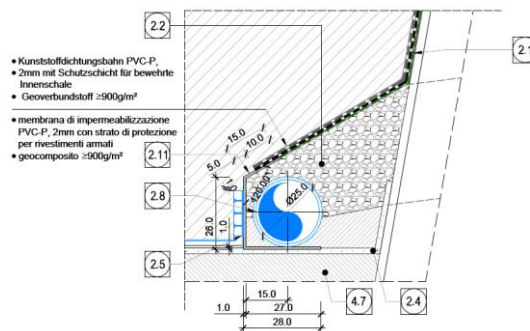
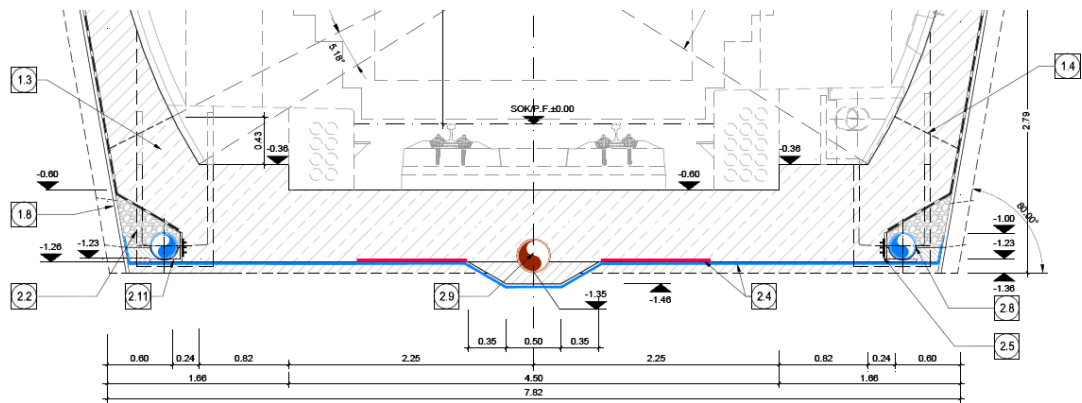
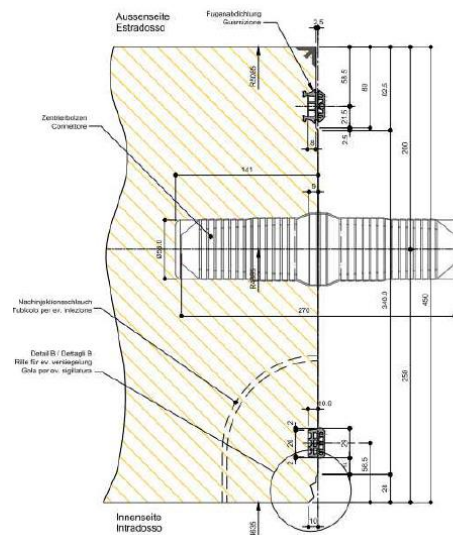


Figura 8 – Cunicoli Trasversali tipo 2 con scarico delle acque nel Cunicolo Esplorativo

Nelle sezioni scavate in tradizionale, il sistema di impermeabilizzazione in calotta è costituito da un telo in PVC accoppiato a un geotessuto. Nelle sezioni armate è inoltre prevista l'applicazione di uno strato di protezione, mentre nelle tratte con le maggiori venute d'acqua è prevista l'applicazione di un geocomposito drenante integrativo, posto a contatto con il rivestimento di prima fase, per garantire una maggiore capacità di captazione delle acque e escludere l'insorgere di pressioni idrauliche. In platea/arco rovescio non è prevista una impermeabilizzazione completa ma solo la posa di strisce di membrana bugnata drenante, sia parallelamente all'asse della galleria che trasversalmente (Figura 9), al fine di convogliare le acque nei tubi di captazione posti a tergo delle murette (Figura 10). Si noti che questi sono posti alla base delle murette stesse alla quota minima possibile e sono contornati da materiale drenante per favorire l'azione di riduzione delle pressioni idrauliche. L'inserimento di water-stop in corrispondenza delle riprese di getto completa il sistema di impermeabilizzazione.



Nelle tratte delle Gallerie di Linea scavate con TBM, dove non è prevista la realizzazione di un rivestimento definitivo interno, è stata progettata una tripla protezione idraulica mediante due guarnizioni elastomeriche (posizionate una in intradosso e una in estradosso, rispettivamente incollata e ancorata) e l'eventuale successiva sigillatura dei giunti mediante iniezioni di resine eseguite attraverso canalicoli predisposti nei conci, in caso di defaillance delle guarnizioni.



Nelle tratte con rivestimento interno gettato in opera, invece, sono previsti conci con una semplice guarnizione ancorata in estradosso e il sistema di impermeabilizzazione del rivestimento interno ricalca la soluzione adottata per gli scavi in tradizionale con un telo in PVC, geotessuto, eventuale geocomposito e strato di protezione per i rivestimenti armati. Per garantire la dissipazione delle pressioni idrostatiche a tergo dei conci è inoltre prevista l'esecuzione di fori nei conci in corrispondenza del pacchetto drenante posto a tergo delle murette del rivestimento interno.

Tutto il sistema di drenaggio descritto presuppone il corretto funzionamento dei tubi di raccolta microfessurati posti a tergo delle murette. È stata pertanto dedicata particolare attenzione nella progettazione dei pozzetti che ne garantiscono l'ispezionabilità e la manutenzione. Quest'ultimi, disposti a interasse di 111 m e sagomanti diversamente in funzione delle diverse sezioni tipo, presentano dimensioni interne (60 x 120 cm) in grado di garantire l'accessibilità anche dei pozzetti più profondi, che raggiungono altezze di circa 180 cm.

7 Soluzioni progettuali adottate nei Cameroni TBM

Il progetto prevede 4 Cameroni di Montaggio delle TBM, due a sud e due a nord della Finestra di Mules, per il lancio delle rispettive TBM verso Fortezza e verso il Confine di Stato. Le sezioni di scavo sono dell'ordine dei 380 m³ e in fase definitiva è prevista la realizzazione di un rivestimento interno, con le geometrie tipiche di una galleria artificiale, che consente di garantire la continuità dell'intradosso con le sezioni correnti delle gallerie di linea. La sicurezza della sezione è stata garantita mediante il riempimento del vuoto tra la sezione di scavo del camerone e la galleria artificiale. D'accordo con BBT, si è optato per limitare il riempimento a una quota compatibile con l'esecuzione di lavorazioni di manutenzione, senza prevedere l'intasamento completo della porzione più alta del camerone, garantendo però l'accessibilità a tale area per l'ispezione dei rivestimenti di prima fase. L'accesso è stato garantito mediante una rampa realizzata nel camerone logistico trasversale al Camerone di Montaggio della TBM (Figura 12) per i Cameroni sud, e mediante dei 'camini' (Figura 13) per i Cameroni nord.

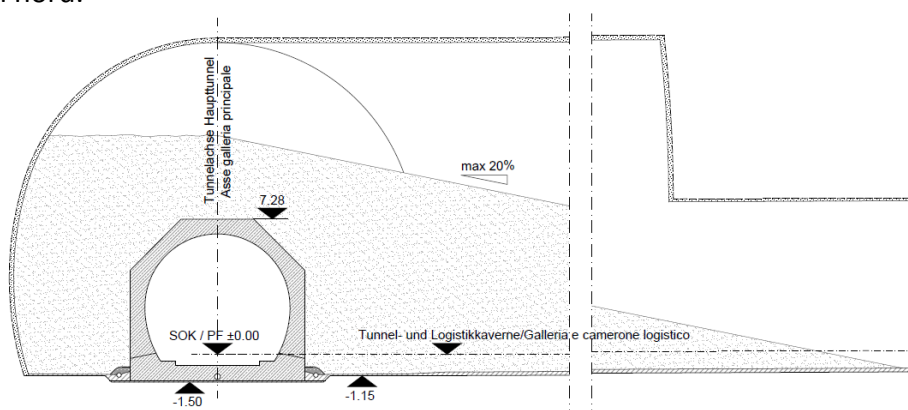


Figura 12 – Camerone di Montaggio TBM sud – Accessibilità in calotta mediante rampa dal Camerone Logistico di Mules



[1] M.Moja, E.M.Pizzarotti, 2016. *Tunnel di Base del Brennero: Protezione al fuoco dei rivestimenti*. Italian concrete days – Giornata Aicap e Congresso CTE, 27-28 ottobre 2016 (Roma)

[2] F.Pesavento, B.A.Schrefler, 2014. *Valutazione dell’impatto da incendio nel Brenner Basis Tunnel*. CISM-Lab s.r.l., International Centre for Mechanical Sciences (Studio commissionato da BBT)