

# IL RIFACIMENTO DELLA GALLERIA FERROVIARIA DRAGONATO A BELLINZONA

LA RICOSTRUZIONE DI UNA GALLERIA URBANA CORTA MA CON NUMEROSE INSIDIE

## IL PROGETTO

Nel traffico merci europeo sempre più merce viene trasportata per mezzo di semirimorchi con altezza agli angoli di 4 m. Sulle tratte di accesso alle gallerie di base del San Gottardo e del Ceneri è stato necessario aumentare le dimensioni dei profili di una ventina di gallerie, con lo scopo appunto di accrescere il profilo di spazio libero per il transito dei convogli nell'ambito del Programma "Corridoio 4 m" sulla tratta ferroviaria svizzera da Basilea a Chiasso.

Il progetto ha riguardato il rifacimento della galleria ferroviaria Dragonato a doppio binario, ovvero la sostituzione del manufatto esistente in muratura, con una nuova galleria artificiale in calcestruzzo armato di maggiori dimensioni. L'opera si situa nel

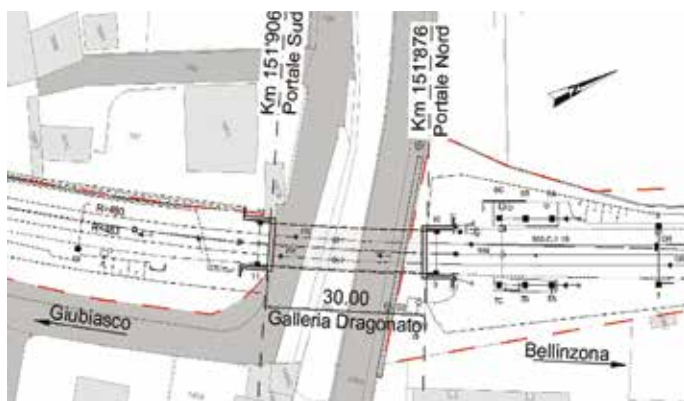
contesto urbano del comune di Bellinzona lungo la linea del San Gottardo per una lunghezza di 30 m.

Nonostante il suo sviluppo limitato le difficoltà progettuali non sono state affatto proporzionali. Infatti la galleria esistente, costituita da muratura di pietra squadrata e realizzata alla fine dell'Ottocento sulla conoide dell'omonimo torrente, è scavalcata da due strade comunali e da un torrente, con la presenza di palazzine residenziali nelle adiacenze.

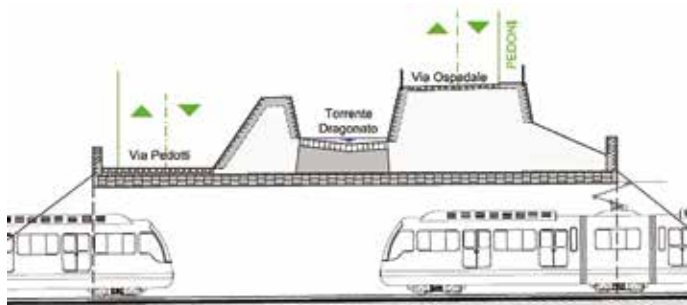
La presenza di questi condizionamenti, oltre che la cautela nell'operare a contatto con una galleria in muratura e l'impossibilità di dotare la nuova galleria di una platea, hanno influenzato la fasistica e le modalità esecutive. La soluzione adottata, tenuto conto anche delle evidenti limitazioni imposte agli sbarramenti



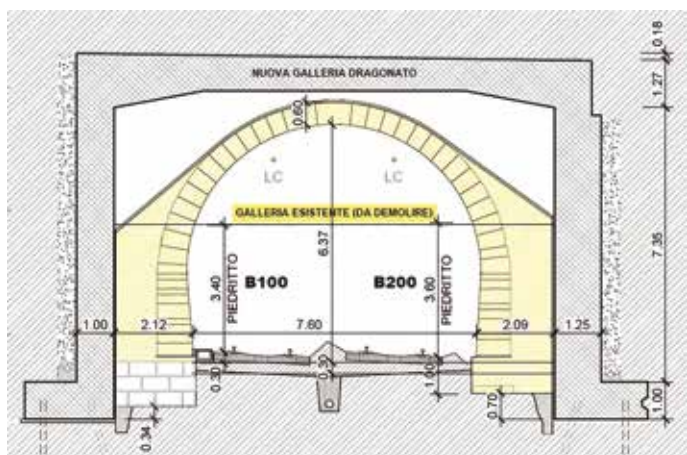
1. L'inquadramento topografico



2. Un estratto della planimetria catastale



3. La sezione longitudinale esistente



4. La sezione tipo

della linea ferroviaria, è stata quella di costruire la nuova galleria in calcestruzzo esternamente a quella esistente, con un'esecuzione in due fasi lungo l'asse della galleria, così da permettere lo spostamento alternato dell'alveo del torrente Dragonato e di Via Ospedale, collegamento principale al Nosocomio di Bellinzona, che doveva ininterrottamente mantenere la transitabilità. Una volta completata la nuova galleria si è provveduto alla demolizione della galleria in muratura con un'interruzione totale della linea di sole 33 ore.

## LE FASI ESECUTIVE

Come detto i differenti condizionamenti hanno reso indispensabile operare in più fasi distinte, per una durata complessiva dei lavori di tre anni. Si è pertanto proceduto temporalmente come indicato qui di seguito.

### I lavori preliminari (Giugno-Settembre 2016)

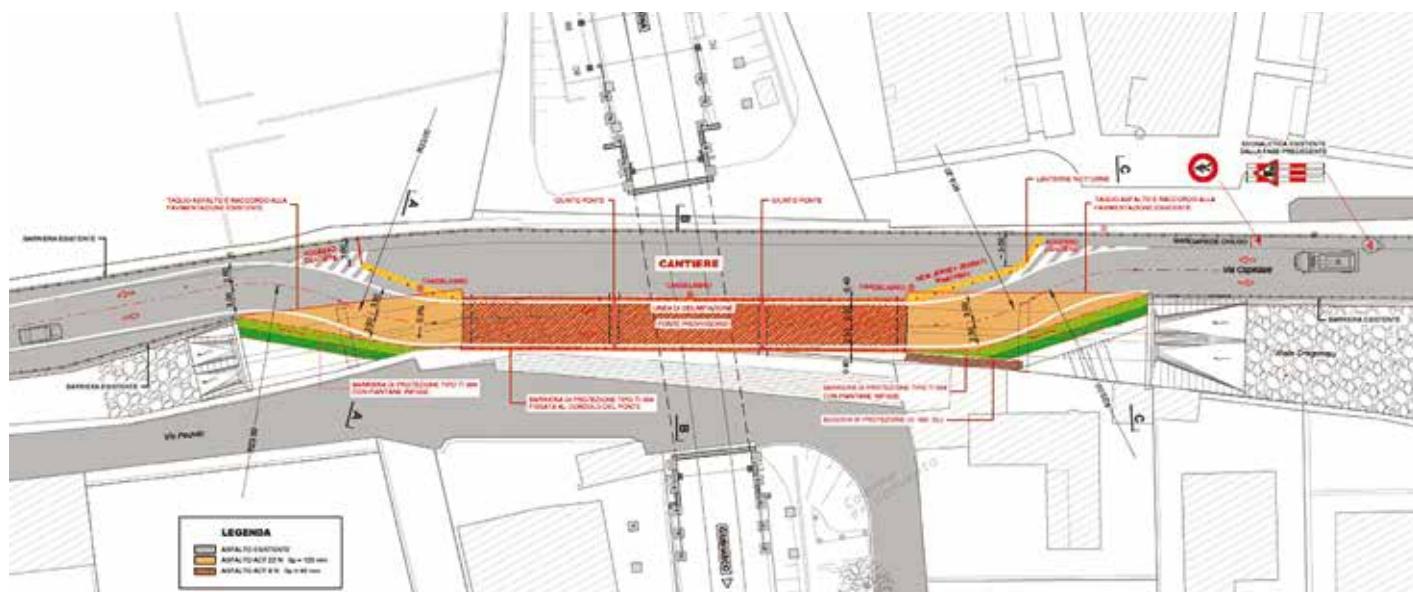
Sfruttando gli sbarramenti di un solo binario sono stati eseguiti quegli interventi interferenti con l'esercizio ferroviario, quali il consolidamento provvisorio della muratura mediante iniezioni dall'interno della galleria, i micropali e le fondazioni dei pali LC provvisori e le palizzate e i pianali di protezione della linea agli imbocchi.

### La fase 0 (Ottobre-Dicembre 2016)

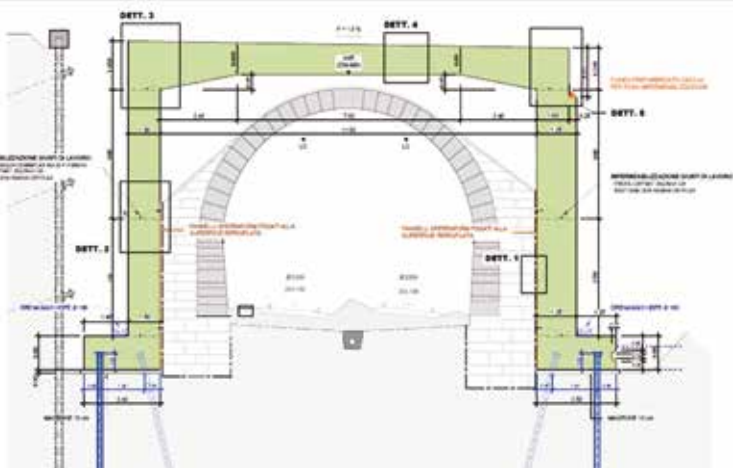
L'attività principale ha riguardato l'intubamento del torrente Dragonato all'interno del suo alveo per consentire la demolizione della sponda destra, mediante condotte in lamiera ondulata e la costruzione del ponte provvisorio soprastante, in struttura mista acciaio-clc, per la deviazione provvisoria di Via Ospedale e dei vari sottoservizi.

### La fase 1 (Gennaio-Dicembre 2017)

Dapprima si è provveduto con la demolizione di Via Ospedale e lo scavo a partire da 5 m sopra la calotta, confinato ai lati da berlinesi tirantate e sul fronte da interventi di sostegno adeguati alle condizioni locali (micropali con puntoni, parete chiodata, travi metalliche, ecc.). Le operazioni di scavo sono avvenute con cautela mediante utilizzo di differenti mezzi, a seconda della profondità di scavo e dello spazio a disposizione, e con medesimi ribassi su entrambi i lati per limitare carichi asimmetrici sulla galleria esistente. Una volta liberata la galleria è stata eseguita la riprofilatura verticale dei rinfianchi mediante tagli con filo diamantato per far posto ai piedritti della nuova galleria. Sono stati poi eseguiti i micropali di fondazione e gettato il manufatto per metà della galleria artificiale.



5. La deviazione di Via Ospedale sul torrente intubato



6. La nuova galleria esterna all'esistente



8. La panoramica degli scavi in fase 2



7. La predisposizione della centina per il getto della soletta della nuova galleria

Il getto delle elevazioni è stato eseguito contemporaneamente per garantire una spinta uniforme e simmetrica sulla galleria esistente in quanto i casseri erano costituiti da pannelli applicati ai piedritti della galleria esistente, non potendo ricavare più spazio col taglio dei rinfianchi, pena l'indebolimento della struttura. Per il sostegno della cassetta del solettone, non potendo appoggiarsi sulla galleria esistente, sono state utilizzate centine sospese che poggiavano sui piedritti tramite profili metallici tubolari precedentemente annegati in getto.

È stata infine ricostruita la sponda destra del torrente e Via Ospedale, predisponendo al di sotto una tubazione per la deviazione provvisoria del torrente necessaria per liberare la zona per i lavori della fase successiva.



9A e 9B. La demolizione della galleria esistente

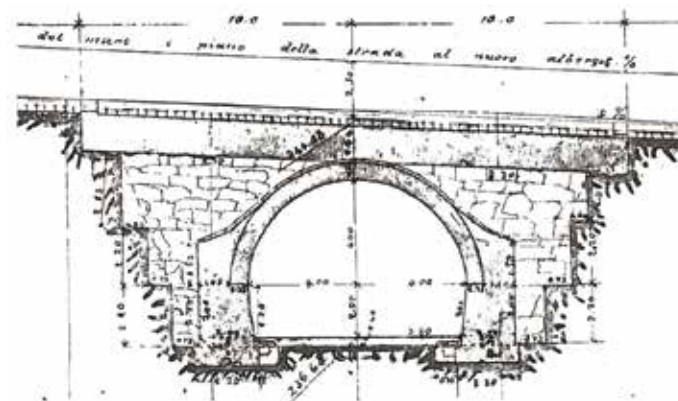
Analogamente alla fase 1 sono stati ripetuti gli interventi per realizzare la seconda tappa della nuova galleria, rigidamente connessa alla prima mediante ripresa delle armature longitudinali avvistabili. Al di sopra è stato ricostruito l'alveo con blocchi e ripristinata Via Pedotti e relative infrastrutture.

### La fase 3 (23-24 Marzo 2019)

Sfruttando lo sbarramento totale della linea ferroviaria in 33 ore consecutive è stata smontata la linea di contatto, rimossi i binari, demoliti dall'interno e smantellati oltre 1.000 m<sup>3</sup> di muratura della vecchia galleria senza procurare danni a quella adiacente nuova, ricostruita la sottostruttura ferroviaria, posata la nuova linea di contatto, i nuovi binari e il canale cavi.

## LA STATICA DELLA GALLERIA ESISTENTE

La galleria è strutturalmente identificabile come un'arcata - insieme di piedritti e arco - in muratura di pietra, di luce pari a 8 m, che doveva necessariamente essere mantenuta in esercizio durante i lavori. La distribuzione dei carichi permanenti stabilizzanti e agenti da un secolo su di essa è stata pertanto alterata durante gli scavi, oltre a nuove sollecitazioni indotte dai sovraccarichi generati dai mezzi di scavo.



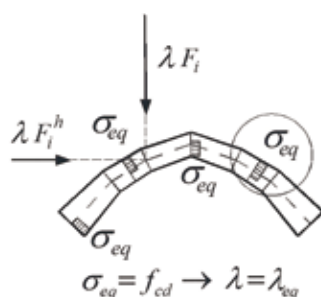
10. Un disegno storico della sezione della galleria esistente

Per analizzarne il comportamento statico si è scelto di approntare una procedura innovativa basata sul calcolo a rottura. Infatti, grazie alla recente definizione di due teoremi da parte del Prof. Giuseppe Stagnitto, lo Studio Anastasi & Partners ha implementato un programma di calcolo che rende possibile applicare alle strutture voltate in muratura l'analisi limite nelle condizioni più generali.

Servendosi del primo teorema (Teorema della minima compressione equilibrata), è stato possibile semplificare la ricerca della soluzione (moltiplicatore di collasso  $\lambda$ ) secondo l'approccio statico. Per ciascuna condizione di carico, rappresentata dai diversi livelli di terreno durante le fasi di scavo, è stata determinata, all'interno del fascio di soluzioni equilibrate e rispettose della resistenza, quella cui corrisponde la minima tensione di compressione secondo la distribuzione rettangolare.

Sfruttando il secondo teorema - Teorema delle Rotazioni Plastiche Consecutive - si è agevolato il procedimento cinematico di controllo del risultato.

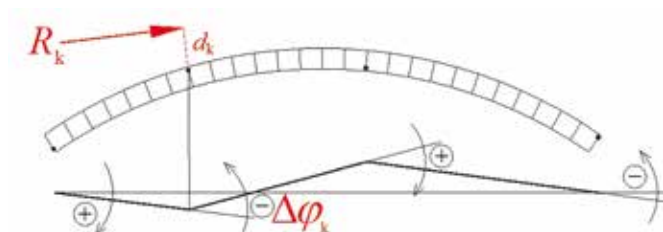
Poiché, per definizione, i tronchi tra le diverse cerniere sono da considerarsi infinitamente rigidi, il lavoro virtuale delle forze agenti sull'arco si può esprimere semplicemente come il prodotto dei momenti per le rotazioni virtuali delle cerniere plastiche oppure, sapendo che la linea delle pressioni fornisce la risultante delle forze che precedono la sezione ove la cerniera  $k$  è



11. Lo schema del metodo statico della minima compressione equilibrata

collocata, è il braccio della risultante  $R_k$  rispetto alla cerniera plastica  $k$

$$L = \sum M_k \cdot \Delta\varphi_k = \sum (R_k \cdot d_k) \cdot \Delta\varphi_k \quad (1)$$



12. L'applicazione del Teorema delle rotazioni plastiche consecutive

Nel caso di resistenza finita della muratura si determina il lavoro interno svolto dalle compressioni nelle cerniere plastiche secondo la seguente relazione:

$$L_{pl} = \frac{1}{2} \cdot \sum a_k^2 \cdot f_{bd} \cdot \Delta\varphi_k \quad (2)$$

Calcolando separatamente il lavoro delle forze esterne dovuto alle azioni permanenti (verticali e orizzontali) e alle azioni variabili si ottiene il moltiplicatore cinematico di collasso dal rapporto:

$$\lambda_Q = \frac{L_{pl} - (L_V + L_H)}{L_Q} \quad (3)$$

La procedura è stata quindi applicata considerando dapprima la situazione esistente con il ricoprimento massimo di terreno prima dell'inizio degli scavi. In questo caso è stata determinata la resistenza minima della muratura necessaria per evitare il collasso ( $f_{bd} = 0,84$  MPa). Si è poi proceduto a verificare che il moltiplicatore di collasso nelle condizioni di carico dettate dai diversi livelli di terreno durante gli scavi risultasse sempre maggiore dell'unità:

- livello 0: situazione esistente con terra a 5 m sopra estradosso  $\rightarrow \lambda = 1,00$ ;
- livello 1: scavo con terra fino a 1,50 m sopra estradosso + sovraccarico su un lato  $\rightarrow \lambda = 1,88$ ;
- livello 2: scavo con terra fino a sommità piedritto + sovraccarico su un lato  $\rightarrow \lambda = 5,37$ ;
- livello 3: scavo completato - arcata soggetta al solo peso proprio  $\rightarrow \lambda = 4,27$ .

Quello che genericamente si è portati a pensare ovvero che una volta eliminate con gli scavi le spinte fornite dal terreno, la galleria si sarebbe potuta trovare in una condizione statica peggiore di quella iniziale, è stata smentita dai risultati ottenuti.

## LE ANALISI GEOTECNICHE

Un'analisi geotecnica affinata si è resa necessaria per il dimensionamento delle fondazioni della nuova galleria in quanto la posizione delle stesse era limitata all'esterno dei piedritti per la presenza della galleria esistente, motivi per il quale si sono adottati micropali.

Tenuto conto delle incertezze sull'effettiva ripartizione del carico tra fondazione diretta e micropali e ammettendo, in considerazione della qualità discreta del terreno di fondazione, che i

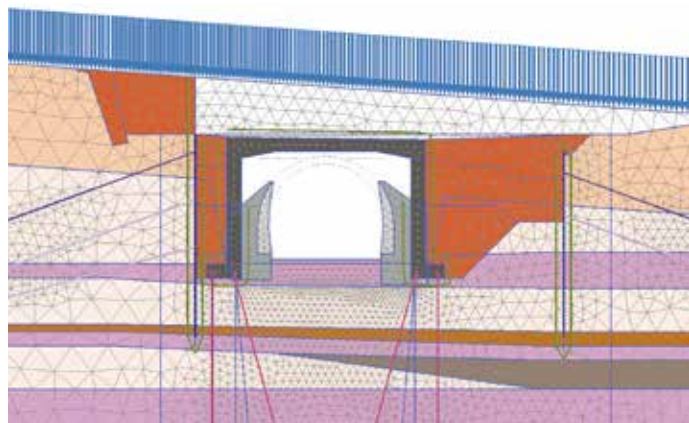
micropali potessero essere utilizzati come riduttori di cedimento, si è deciso di approcciare alle problematiche geotecniche analizzando il progetto nel suo complesso mediante una modellazione numerica che tenesse conto contemporaneamente di tutti i contributi e delle reciproche interazioni con gli elementi strutturali.

Le analisi sono state sviluppate in condizioni di stato piano nelle deformazioni per mezzo del codice di calcolo agli elementi finiti Plaxis 2D, trascurando gli effetti tridimensionali. Per assicurare le dovute cautele nel considerare un modello bidimensionale per una problematica che presenta caratteristiche geometriche tridimensionali e una certa variabilità delle condizioni geotecniche, è stata considerata la stratigrafia del terreno più svantaggiosa e la sezione tracciata trasversalmente a Via Ospedale, la più gravosa in termini di sovraccarico a causa della presenza del rilevato e dei carichi stradali.

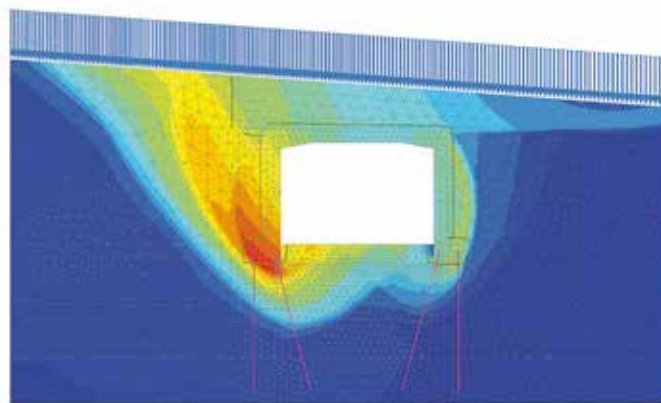
Lo scopo dell'analisi era la valutazione del campo degli spostamenti e degli stati di sollecitazione del terreno, dei micropali di fondazione e delle strutture in calcestruzzo armato durante tutte le fasi costruttive, fino alle condizioni che si verificheranno tra diversi decenni ovvero il rilascio totale dei tiranti e alla perdita di efficacia dei micropali delle berlinesi. Gli effetti dipendenti dal tempo sono stati considerati nel calcolo inserendo fasi di consolidazione laddove è attesa la generazione di sovrappressioni interstiziali e assegnando a ciascuno strato un valore di permeabilità. Il calcolo ha compreso una fase finale con l'analisi della condizione a lungo termine dopo completa consolidazione.

Tutti gli elementi strutturali a contatto col terreno o altre strutture sono dotati di elementi interfaccia su ciascun lato, per poter tener conto dell'interazione; tali elementi sono caratterizzati da valori di rigidità e resistenza determinati in proporzione ai corrispondenti parametri del terreno. I pali di fondazione sono infine modellati attraverso gli elementi "embedded beam row" di Plaxis, i cui parametri sono stati calibrati attraverso un'analisi numerica preliminare.

Complessivamente, considerando le azioni interne ed esterne in condizioni di lungo termine, si può affermare che secondo il modello di calcolo analizzato i carichi verticali sono ripresi per 2/3 dalla fondazione e per 1/3 dai micropali, mentre la spinta orizzontale è ripresa per l'80% dall'azione assiale nel



13. Il modello di calcolo



14. Le condizioni ultime della safety analysis con  $FS = 1,87$

solettone e il restante 20% è ripartito fra la componente orizzontale dell'azione assiale nel micropalo inclinato, la resistenza al taglio sotto la fondazione e la spinta passiva esercitata dal terreno interno alla galleria. In relazione alle importanti cautele introdotte nella resistenza tangenziale dell'interfaccia micropali-terreno e nella resistenza ai carichi orizzontali del sistema micropalo-terreno, limitata in accordo alla teoria di Broms, questa soluzione è stata considerata a favore di sicurezza, nel senso che qualora si fossero manifestate nella realtà condizioni di maggiore resistenza i micropali avrebbero assorbito una quota parte maggiore del carico riducendo il carico sulle altre componenti.

Considerando la distribuzione dei carichi in fondazione risultante dal calcolo la capacità portante della fondazione superficiale risulta verificata secondo stato limite ultimo. Il grado di sicurezza rispetto alla rottura del terreno è stato quantificato tramite una safety analysis, eseguita riducendo i parametri di resistenza del terreno, che ha restituito un fattore di sicurezza pari a 1,87.

Alla luce dei risultati ottenuti, il calcolo numerico eseguito ha confermato la correttezza della soluzione progettuale sia in termini di resistenza strutturale e geotecnica, che in termini di efficienza funzionale.

In fase di esecuzione grazie al monitoraggio degli spostamenti della nuova galleria è stato possibile confrontare i cedimenti attesi in base al calcolo numerico con quelli misurati che sono risultati di circa quattro volte inferiori (1 cm rispetto a 4 cm). Tale risultato indica che nel modello numerico sono stati introdotti parametri eccessivamente cautelativi, in particolare per quanto riguarda la caratterizzazione dell'interfaccia micropalo-terreno.

## IL MONITORAGGIO

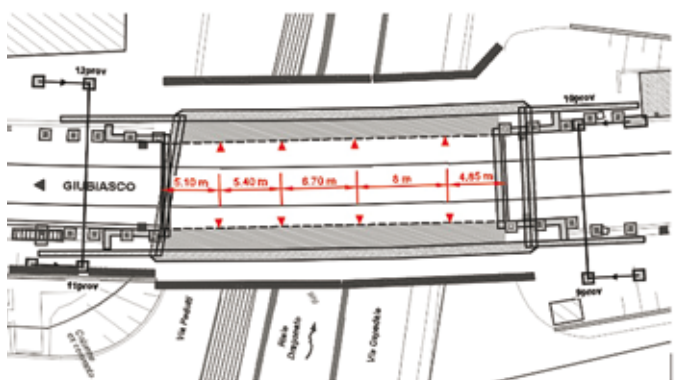
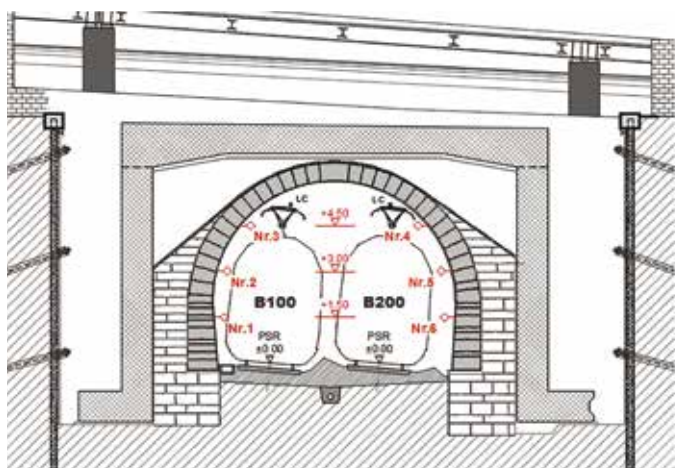
Ai sensi del regolamento FFS I-50009 "Monitoraggio degli impianti di tecnica ferroviaria su cantieri situati in prossimità dei binari" è stato allestito e approntato un concetto di monitoraggio finalizzato a garantire la sicurezza per l'esercizio ferroviario. Il sistema è stato studiato nel dettaglio a partire dall'individuazione degli elementi da controllare, dalla definizione dei valori soglia fino alla stesura del piano d'allarme.

In particolare, si è stabilito di monitorare la galleria esistente con misurazioni automatiche di precisione dello spostamento assoluto con compensazione automatica dell'effetto termico e con autocalibrazione della corretta posizione dei prismi posati

all'intradosso. Al riguardo sono state installate esternamente ai portali due stazioni di misura con teodolite automatico tecnologia laser in grado di "vedere" tutti i punti di misura e compiere le letture in continuo, ogni 30 minuti. Le misurazioni hanno dimostrato che la galleria, una volta completati gli scavi, si è rigonfiata sia in calotta che sui piedritti di 6-7 mm. Durante i lavori, in particolare nel corso del getto dei piedritti della nuova galleria, si è registrata una convergenza di circa 15 mm rispetto alla geometria iniziale.



16A e 16B. Il portale Sud prima e dopo l'intervento



15A e 15B. La posizione dei prismi di monitoraggio della galleria

### L'ARCHEOLOGIA E LA CONSERVAZIONE

Nel corso delle attività di scavo sono emersi ritrovamenti archeologici riguardanti vestigia murarie del vecchio convento degli Agostiniani.

Al riguardo, le attività di cantiere sono state coordinate per consentire allo specialista archeologo di eseguire i rilievi necessari a documentare i rinvenimenti nella loro originalità. Si è affrontato anche il tema della conservazione dell'argine

sinistro del torrente Dragonato in quanto bene culturale tutelato a livello cantonale.

Si sono pertanto condivise con l'Ufficio dei Beni Culturali le modalità di demolizione del tratto interessato dai lavori e i principi da adottare per la successiva ricostruzione con l'impiego dello stesso materiale recuperato.

### CONCLUSIONI

Il progetto di rifacimento della galleria ferroviaria Dragonato ha trattato diversi campi dell'ingegneria a partire dalla geotecnica, per il sostegno degli scavi e lo studio delle fondazioni indirette, all'idraulica per la regimazione delle acque del torrente, alla statica delle murature per le verifiche della galleria esistente e alla statica delle strutture per il dimensionamento del nuovo manufatto.

La professionalità di tutte le figure coinvolte, dal personale FFS sino alle maestranze, ha permesso di raggiungere il risultato prefissato nel rispetto dei termini, dei costi preventivati, della qualità richiesta e senza incidenti e danni. ■

(1) Ingegnere Progettista della Anastasi & Partners SA

(2) Ingegnere Capo Progetto FFS

(3) Ingegnere Capo Progetto Genio Civile FFS

### DATI TECNICI

**Stazione Appaltante:** FFS Infrastruttura  
**Progetto d'appalto ed esecutivo:** Anastasi & Partners SA  
**Collaudo:** Anastasi & Partners SA  
**Direzione dei Lavori:** Anastasi & Partners SA  
**Responsabile della Sicurezza:** FFS Infrastruttura  
**Esecutori dei Lavori:** Consorzio Matteo Muttoni Costruzioni e Reali Costruzioni  
**Importo dei lavori:** 9,8 milioni di CHF  
**Data di consegna:** Giugno 2016  
**Data di ultimazione:** Giugno 2019